

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra fyziky**



**Bakalářská práce**

**Druhotné využití použitých PV panelů**

**Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Vladislav Poulek, CSc.**

**Autor práce: Nikita Sakovtsev**

**© 2023 ČZU v Praze**

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Nikita Sakovtsev

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

**Druhotné využití použitých PV panelů**

Název anglicky

**Secondary utilization of used PV panels**

---

## Cíle práce

Rešerše. Provedení průzkumu stavu techniky v ČR a ve světě.

Zhodnocení průzkumu.

Výběr vhodných metod pro druhotné využití FV panelů

## Metodika

Z dostupné literatury provést rešerši stavu problematiky.

Vlastní závěry ohledně druhotného využití PV panelů.

## Doporučený rozsah práce

30 stran

## Klíčová slova

FV panel, recyklace, uhlíková stopa

---

## Doporučené zdroje informací

LIBRA, M. – POULEK, V. *Solární energie : fotovoltaika – perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*. V Praze: ČZU, 2006. ISBN 80-213-1488-5.

LIBRA, M. – POULEK, V. *Zdroje a využití energie*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2007. ISBN 978-80-213-1647-8.

POULEK, V. – LIBRA, M. – STREBKOV, D S. – CHARČENKO, V V. – ROSSIJSKAJA AKADEMIJA NAUK, – FEDERAL'NYJ NAUČNYJ AGROINŽENERNYJ CENTR VIM, – ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. *Fotoelektričeskoje preobrazovanije solnečnoj energii : teorija i praktika ispol'zovanija solnečnoj energii = Photovoltaic solar energy conversion : the theory and practice of solar energy use*. Moskva: Češskij cel'skoxozjajstvennyj universitet, 2018. ISBN 978-5-00077-735-0.

---

## Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

## Vedoucí práce

doc. Ing. Vladislav Poulek, CSc.

## Garantující pracoviště

Katedra fyziky

---

Elektronicky schváleno dne 11. 1. 2022

**prof. Ing. Martin Libra, CSc.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2022

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 18. 03. 2023

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci „Druhotné využití použitých PV panelů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.03.2023

\_\_\_\_\_  
Nik  
ita Sakovtsev

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval zejména mému vedoucímu této bakalářské práce panu prof. Ing. Vladislavu Poulekovi, CSc. za konzultace v průběhu zpracování. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům při mém bakalářském studiu.

# Druhotné využití použitých PV panelů

## **Abstrakt:**

Hlavním cílem této bakalářské práce je zaměřit se na téma recyklace a sekundárního zpracování fotovoltaických panelů, neboť této problematice není v současném světě věnována dostatečná pozornost. To lze přičíst relativně nízkému množství vyřazených panelů v současné době, ale očekává se, že se situace v budoucnu rychle změní. S pomocí literárního rešerše se úvodní kapitoly zaměří na historii, principy a výrobu samotných solárních článků. Následně budou probrány a popsány současné recyklační projekty.

**Klíčová slova:** FV panel, recyklace, uhlíková stopa

# **Secondary utilization of used PV panels**

## **Abstract:**

The primary objective of this bachelor thesis is to address the topic of recycling and secondary processing of photovoltaic panels, as this issue has not received sufficient attention in the contemporary world. This may be attributed to the relatively low quantity of discarded panels at present, but the situation is expected to change rapidly in the future. Utilizing a literature review, the initial chapters will focus on the history, principles, and production of the solar cells themselves. Subsequently, current recycling projects will be discussed and presented.

**Keywords:** PV panel, recycling, carbon footprint

## Obsah

1.	Úvod .....	1
2.	Cíl a metodika práce .....	2
2.1.	Cíl práce.....	2
2.2.	Metodika práce.....	2
3.	Teoretická východiska .....	3
3.1.	Úvod do problematiky solárních panelů .....	3
3.2.	Princip fungování solárních panelů .....	4
3.3.	Historický vývoj solárních panelů .....	6
3.4.	Stávající využití solárních panelů .....	8
3.5.	Obecný popis životního cyklu solárních panelů .....	10
3.6.	Druhotné využití solárních panelů.....	11
3.7.	Náklady na recyklaci solárních panelů .....	15
3.8.	Environmentální dopad solárních panelů .....	17
4.	Přehled řešené problematiky .....	19
4.1.	Rešerše stavu techniky v ČR .....	19
4.2.	Rešerše stavu techniky ve světě .....	20
4.3.	Přehled projektů na druhotné využití solárních panelů v ČR.....	22
4.4.	Přehled projektů na druhotné využití solárních panelů ve světě .....	24
5.	Vlastní zpracování .....	25
5.1.	Zhodnocení současného stavu problematiky v ČR .....	25
5.2.	Zhodnocení současného stavu problematiky ve světě.....	26
6.	Závěr .....	28
6.1.	Shrnutí výsledků práce.....	28
6.2.	Doporučení pro další výzkum .....	28
7.	Seznam použitých zdrojů .....	30





## 1. Úvod

V posledních letech se solární panely stávají stále populárnějšími díky své schopnosti vyrábět čistou a obnovitelnou energii. V důsledku toho rychle roste počet instalovaných fotovoltaických (FV) systémů. Jak však tyto systémy stárnou, nakonec dosáhnou konce své životnosti a stanou se nefunkčními. Likvidace těchto panelů jako odpadu by měla negativní důsledky pro životní prostředí, včetně uvolňování toxických látek do životního prostředí. Proto roste potřeba prozkoumat možnosti druhotného využití použitých fotovoltaických panelů.

Kapitola 2 této práce popisuje cíl práce a metodiku práce, včetně způsobu získávání informací a postupu zpracování informací. Kapitola 3 obsahuje teoretické základy solárních panelů, včetně principů jejich fungování, historického vývoje, současného využití, životního cyklu, druhotného využití, nákladů na recyklaci a vlivu na životní prostředí. Kapitola 4 obsahuje přehled řešené problematiky, včetně přehledu stavu techniky v ČR a přehledu stavu techniky ve světě, a dále přehled projektů opětovného využití solárních panelů v ČR a ve světě. V kapitole 5 jsou uvedeny výsledky vlastního zpracování, včetně zhodnocení současného stavu techniky v ČR a ve světě. Konečně kapitola 6 uzavírá práci shrnutím výsledků práce a doporučeními pro další výzkum.

Je důležité zabývat se problematikou druhotného využití použitých fotovoltaických panelů, protože nabízí způsob, jak snížit množství odpadu a dopad na životní prostředí. Nalezení způsobů opětovného využití těchto panelů může navíc přinést ekonomické výhody a také příležitosti pro inovace a kreativitu. Očekávaným výsledkem této práce je přehled současného stavu v České republice a ve světě, pokud jde o druhotné využití použitých fotovoltaických panelů, a také doporučení pro další výzkum v této oblasti.

## 2. Cíl a metodika práce

### 2.1. Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je provést komplexní výzkum současného stavu v České republice a ve světě v oblasti druhotného využití použitých fotovoltaických (FV) panelů. Cílem výzkumu je prozkoumat současný stav v oblasti opětovného využití fotovoltaických panelů, včetně aktuálních trendů, metod a osvědčených postupů. Práce rovněž zhodnotí ekonomické, environmentální a sociální dopady opětovného využití fotovoltaických panelů se zaměřením na identifikaci příležitostí pro inovace a udržitelný rozvoj v této oblasti.

### 2.2. Metodika práce

K dosažení tohoto cíle bude použita metodika získávání a zpracování informací. Výzkum bude zahrnovat kvalitativní i kvantitativní metody. Kvalitativní metoda bude využita k získání informací o stavu v České republice a ve světě prostřednictvím rešerše literatury a analýzy relevantních zpráv, článků a dalších publikací. Kvantitativní metoda bude použita ke shromáždění a analýze údajů týkajících se opětovného použití fotovoltaických panelů, včetně informací o technických, ekonomických a environmentálních aspektech opětovného použití fotovoltaických panelů. Získané informace budou zpracovány a analyzovány pomocí různých statistických a analytických metod, včetně obsahové analýzy, popisné statistiky a srovnávací analýzy.

Celkově tato práce poskytne komplexní zhodnocení současného stavu v oblasti druhotného využití použitých fotovoltaických panelů v České republice a ve světě, a to na základě metodiky, která kombinuje kvalitativní a kvantitativní metody. Výsledky výzkumu přispějí k lepšímu pochopení problémů a příležitostí spojených s opětovným využitím fotovoltaických panelů a poskytnou doporučení pro další výzkum v této oblasti.

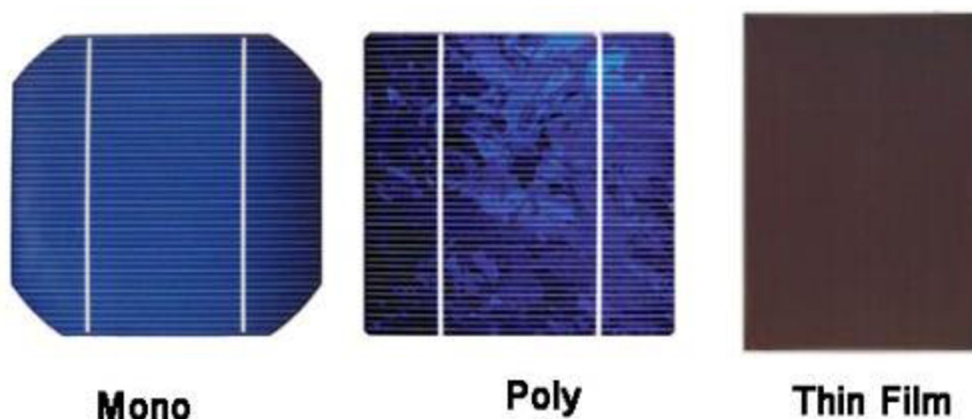
### 3. Teoretická východiska

#### 3.1. Úvod do problematiky solárních panelů

Solární panely, známé také jako fotovoltaické (PV) panely, jsou zařízení, která přeměňují sluneční světlo na elektřinu. V posledních letech si získaly značnou pozornost díky svému potenciálu řešit celosvětovou poptávku po energii a zároveň snižovat emise skleníkových plynů. Vznik solárních panelů lze vysledovat až k objevu fotovoltaického efektu Alexandrem Edmondem Becquerelem v roce 1839 [1]. Vývoj solárních panelů se však urychlil až v polovině 20. století, a to díky pokroku v oblasti polovodičových materiálů a potřebě obnovitelných zdrojů energie.

Křemík je nejčastěji používaným materiálem v solárních panelech, a to především díky jeho hojnému výskytu a příznivým elektronickým vlastnostem [2]. Moderní solární panely se obvykle skládají z řady vzájemně propojených solárních článků, které jsou vyrobeny z vrstev křemíku dopovaných různými příměsemi, aby se vytvořil p-n přechod. Když na solární články dopadá sluneční světlo, dochází k excitaci elektronů, čímž vzniká elektrický proud, který lze využít pro různé aplikace [3].

Existují tři hlavní typy solárních panelů: monokrystalické, polykrystalické a tenkovrstvé. Monokrystalické solární panely jsou vyrobeny z monokrystalického křemíku a nabízejí vysokou účinnost, ale ve srovnání s ostatními typy jsou dražší [4]. Polykrystalické solární panely využívají multikrystalický křemík a jsou cenově dostupnější, ale jejich účinnost je nižší kvůli přítomnosti hranic zrn, které brání pohybu elektronů [5]. Tenkovrstvé solární panely využívají tenké vrstvy různých polovodičových materiálů, jako je amorfni křemík, tellurid kadmia nebo selenid mědi a galia. Tyto panely jsou méně účinné než panely z krystalického křemíku, ale mohou být cenově výhodnější a flexibilnější, takže jsou vhodné pro specifické aplikace [6]. Na obrázku č. 1 jsou zobrazeny typy FV panelů.



Obrázek 1: typy solárních panelů [7]

Celosvětový trh se solární energií v posledních několika desetiletích exponenciálně rostl díky technologickému pokroku, snižování nákladů a podpůrným vládním politikám [8]. Solární

panely se staly nedílnou součástí mixu obnovitelných zdrojů energie a nadále hrají klíčovou roli v globálním přechodu k udržitelné energetické budoucnosti.

Podle slov M. A. Greena, jednoho z předních výzkumníků v oblasti fotovoltaiky, „rychlý růst fotovoltaiky byl poháněn kombinací faktorů, mezi něž patří environmentální imperativ snižování emisí skleníkových plynů, uvědomění si vyčerpatelnosti zdrojů fosilních paliv, touha po energetické nezávislosti a prostá atraktivita bezplatného a hojného slunečního světla jako zdroje energie“ [9]. To podtrhuje význam solárních panelů jako životaschopného a udržitelného řešení pro uspokojení světových energetických potřeb při současném zmírnění dopadů na životní prostředí spojených s konvenčními zdroji energie.

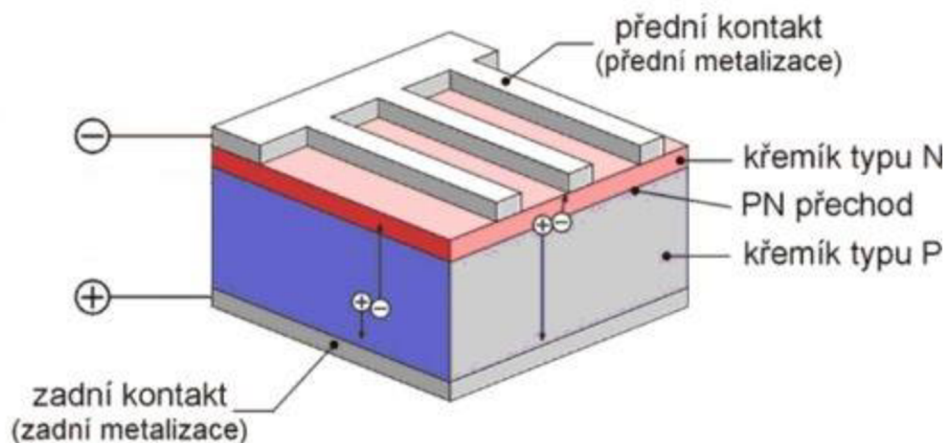
### 3.2. Princip fungování solárních panelů

Principy fungování solárních panelů jsou založeny na fotovoltaickém jevu, který spočívá v přeměně světelné energie na energii elektrickou pomocí polovodičových materiálů. Jak již bylo zmíněno, tento jev poprvé objevil Alexandre Edmond Becquerel v roce 1839. Od té doby se pochopení a použití fotovoltaiky značně rozvinulo, což vedlo k výraznému zlepšení účinnosti a ekonomické efektivnosti solárních panelů [1].

Jádrem solárního panelu jsou solární články, obvykle vyrobené z polovodičových materiálů, jako je křemík. Tyto články obsahují p-n přechod, který vzniká dopováním křemíkových vrstev specifickými nečistotami za účelem vytvoření kladných (p-*typ*) a záporných (n-*typ*) nosičů náboje [3]. P-n přechod je pro fungování solárního článku klíčový, protože usnadňuje oddělení nosičů náboje a vytváří elektrické pole. Toto pole hraje zásadní roli při následné přeměně slunečního světla na využitelnou elektrickou energii.

Když sluneční světlo složené z fotonů dopadá na solární článek, interaguje s polovodičovým materiálem a předává energii elektronům v materiálu. Tento proces, známý jako fotoelektrický jev, vede k excitaci elektronů z valenčního pásu do pásu vodivostního, čímž vznikají páry elektron-díra [10]. Elektrické pole na p-n přechodu pak tyto nosiče náboje odděluje a směřuje záporně nabitě elektrony k vrstvě typu n a kladně nabitě díry k vrstvě typu p [11].

Pohyb nosičů náboje vytváří proud, který lze odebírat a využívat pro různé aplikace. Za tímto účelem jsou na horní a spodní straně solárního článku umístěny kovové kontakty, které zajišťují vodivou cestu pro tok elektronů v obvodu [5]. Sériovým a paralelním zapojením více solárních článků může solární panel generovat vyšší napětí, respektive proudový výkon, a nakonec vyrobit použitelné množství elektrické energie [4]. Obrázek č. 3 ukazuje princip fungování fotovoltaického článku.



Obrázek 2: Princip fotovoltaického článku [7]

Účinnost solárního panelu závisí na několika faktorech, včetně typu použitého polovodičového materiálu, kvality p-n přechodu a schopnosti minimalizovat ztráty energie způsobené odrazem, rekombinací a odporovými ztrátami [2]. Dále je účinnost ovlivněna konstrukcí a architekturou solárního článku, včetně tloušťky a texturování polovodičových vrstev, kvality kovových kontaktů a použití antireflexních povlaků pro zvýšení absorpce světla [12].

Jak uvádí Martin A. Green: „Výzva fotovoltaické technologie spočívá v účinném získávání maximálního možného výkonu z dopadajícího slunečního světla“ [9]. Za tímto účelem vyvinuli výzkumníci a inženýři různé strategie pro zlepšení výkonu solárních panelů, jako je implementace pokročilých materiálů (např. perovskitů), použití solárních článků s více přechody a začlenění solárních koncentrátorů [13; 14].

Kromě toho mohou výkon solárních panelů významně ovlivnit faktory, jako je teplota, intenzita záření a spektrální složení slunečního světla [15]. V důsledku toho se výzkum zaměřuje také na pochopení a zmírnění vlivu těchto faktorů, například prostřednictvím vývoje chladicích systémů, sledovacích mechanismů a technik spektrálního řízení [16; 17].

Celkově jsou principy fungování solárních panelů založeny na fotovoltaickém efektu a vlastnostech polovodičových materiálů. Přeměna slunečního světla na elektřinu závisí na generaci a separaci nosičů náboje v solárním článku, což nakonec vede k toku proudu, který lze využít pro praktické využití. S pokračujícím výzkumem a vývojem v oblasti fotovoltaiky lze očekávat další pokrok v účinnosti a hospodárnosti solárních panelů, což posílí úlohu solární energie v globálním přechodu k udržitelné budoucnosti.

V posledních letech se úsilí zaměřuje na zvýšení spolehlivosti a životnosti solárních panelů a na optimalizaci integrace solární energie do energetických sítí a systémů skladování energie [18]. Tyto pokroky mají zásadní význam pro řešení intermitence solární energie a zajištění efektivní integrace fotovoltaických systémů do širší energetické infrastruktury.

Jedním z nejslibnějších vývojových trendů v oblasti fotovoltaiky je nástup tandemových solárních článků, které kombinují dva nebo více různých materiálů pro zachycení širšího rozsahu slunečního spektra a dosažení vyšší celkové účinnosti konverze [19]. Tato technologie má potenciál způsobit revoluci v solárním průmyslu tím, že nabízí výrazné zlepšení výkonu oproti běžným solárním článkům s jedním spojením.

Výzkumníci navíc zkoumají alternativní materiály a výrobní postupy pro solární články s cílem snížit dopad na životní prostředí a náklady spojené s jejich výrobou. Nové materiály, jako je organická fotovoltaika a solární články citlivé na barvivo, nabízejí možnost výroby lehkých, flexibilních a levných solárních panelů, což by mohlo být zvláště výhodné pro aplikace, jako je fotovoltaika integrovaná do budov a výroba energie z přenosných zařízení [20; 21].

Lze shrnout, že principy fungování solárních panelů jsou založeny na fotovoltaickém efektu a využití polovodičových materiálů. Přeměny slunečního záření na využitelnou elektrickou energii se dosahuje prostřednictvím generace a separace nosičů náboje v solárních člancích, což v konečném důsledku vede k toku proudu, který lze využít pro širokou škálu aplikací. S pokrokem ve výzkumu a vývoji v oblasti fotovoltaiky lze očekávat výrazný pokrok v účinnosti solárních panelů, nákladové efektivitě a ekologické udržitelnosti, což dále upevní roli solární energie v celosvětovém úsilí o čistší a odolnější energetickou budoucnost.

### 3.3. Historický vývoj solárních panelů

Historie solárních panelů sahá až do počátku 19. století, kdy francouzský vědec Alexandre Edmond Becquerel v roce 1839 objevil fotovoltaický efekt [1]. Přestože tento převratný objev položil základ pro vývoj solárních panelů, trvalo více než sto let, než se technologie posunula do fáze, kdy ji bylo možné prakticky využít.

V roce 1883 vyvinul americký vynálezce Charles Fritts první solární článek s použitím selenu pokrytého tenkou vrstvou zlata. Tento první solární článek měl sice nízkou účinnost přeměny kolem 1 %, ale ukázal možnosti výroby elektřiny ze slunečního světla [10]. Během několika následujících desetiletí vědci pokračovali ve zkoumání fotovoltaického efektu a experimentovali s různými materiály a konstrukcemi ve snaze zlepšit výkon solárních článků.

Ve 20. století došlo k významnému pokroku v oblasti fotovoltaiky, který byl podpořen vývojem polovodičových materiálů a rostoucí poptávkou po obnovitelných zdrojích energie. V roce 1954 vyvinuli výzkumníci z Bellových laboratoří Daryl Chapin, Calvin Fuller a Gerald Pearson první křemíkový solární článek, který dosáhl účinnosti 6 % [22]. Tento milník znamenal začátek

moderní éry solární energie, neboť solární články na bázi křemíku budou v budoucnu dominovat v průmyslu solárních panelů.

V 60. a 70. letech 20. století došlo k širokému rozšíření solárních panelů v různých aplikacích, zejména v leteckém a kosmickém průmyslu, kde solární články poskytovaly spolehlivý zdroj energie pro družice a další vesmírné mise [23]. Ropná krize v 70. letech 20. století zdůraznila potřebu alternativních zdrojů energie, což dále podpořilo zájem o výzkum a vývoj solárních panelů. Vlády a soukromé instituce proto začaly investovat velké prostředky do výzkumu solární energie, což vedlo k významnému pokroku v účinnosti a výrobních technikách solárních článků.

V 80. a 90. letech 20. století vedly výzkumné programy a pobídky financované vládou k výraznému zlepšení účinnosti a nákladové efektivity solárních panelů [24]. Založení Národní laboratoře pro obnovitelné zdroje energie (NREL) ve Spojených státech a podobných výzkumných ústavů v jiných zemích sehrálo v tomto období zásadní roli v rozvoji fotovoltaické technologie. Toto výzkumné úsilí vedlo k vývoji nových materiálů pro solární články, jako je arsenid galia a amorfní křemík, a také inovativních výrobních postupů, jako je napařování a sítotisk [25].

Jak uvádí Martin A. Green, přední výzkumný pracovník v oblasti fotovoltaiky, „obor fotovoltaiky se za posledních 30 let dramaticky vyvinul z malé, laboratorní činnosti ve velké průmyslové odvětví“ [9]. Na počátku 21. století došlo k dalšímu růstu trhu se solární energií díky technologickému pokroku, snižování nákladů a podpurným vládním politikám [8]. Solární panely se stále více prosazují v obytných, komerčních i komunálních aplikacích, čímž se solární energie stává důležitou součástí globálního mixu obnovitelných zdrojů energie.

V posledních letech výzkumníci zkoumají alternativní materiály a výrobní techniky pro solární články, což vedlo k vývoji tenkovrstvých, organických a perovskitových solárních panelů [6]. Tyto nové technologie nabízejí potenciál pro další zlepšení účinnosti solárních panelů, nákladové efektivity a ekologické udržitelnosti. Například tenkovrstvé solární panely, které využívají materiály, jako je telurid kadmia (CdTe) a selenid mědi a galia (CIGS), mohou dosáhnout konkurenceschopné účinnosti při použití menšího množství materiálu a umožňují flexibilnější a lehčí konstrukce [26]. Organické fotovoltaické články vyrobené z materiálů na bázi uhlíku nabízejí výhody nízkých výrobních nákladů a mechanické flexibility, což otevírá nové možnosti použití, jako jsou nositelné technologie a fotovoltaika integrovaná do budov [21].

Perovskitové solární články založené na jedinečné třídě materiálů s vynikajícími vlastnostmi pohlcování světla a přenosu náboje přitahují v posledních letech značnou pozornost díky rychlému zvyšování účinnosti a potenciálu pro levnou výrobu [27]. Výzkumníci aktivně pracují na řešení problémů spojených s těmito novými technologiemi, jako je stabilita, trvanlivost a použití materiálů šetrných k životnímu prostředí, aby bylo možné plně využít jejich potenciál na globálním trhu se solární energií. [28]



Vývoj solárních panelů byl rovněž poznamenán vývojem pokročilých systémových komponent a integračních technik, jako jsou sledovače maximálního bodu výkonu, střídače a systémy pro ukládání energie [5]. Tyto pokroky přispěly k celkovému výkonu, spolehlivosti a univerzálnosti solárních systémů, což umožnilo jejich efektivní integraci do různých aplikací a energetických infrastruktur.

Kromě technologického pokroku byl historický vývoj solárních panelů ovlivněn socioekonomickými faktory, jako je informovanost veřejnosti, obavy o životní prostředí a vládní politika [29]. Rostoucí povědomí o naléhavé potřebě řešit změnu klimatu a o vyčerpatelnosti zdrojů fosilních paliv podnítilo zvýšený zájem o technologie obnovitelných zdrojů energie, včetně solárních panelů, a jejich podporu.

Vládní politiky, jako jsou výkupní ceny, daňové pobídky a standardy portfolia obnovitelných zdrojů, sehrály rozhodující roli v růstu trhu se solární energií tím, že snížily finanční překážky pro její zavádění a podpořily konkurenční prostředí pro inovace a investice [30]. Rostoucí cenová dostupnost solárních panelů spolu s rostoucí poptávkou po čisté a udržitelné energii dále urychlily zavádění solárních systémů po celém světě.

Lze shrnout, že historický vývoj solárních panelů odráží neustálou snahu o inovace a pokrok v oblasti fotovoltaiky. Od prvních pokusů se selenovými solárními články až po moderní panely na bázi křemíku a nově vznikající alternativní technologie byl vývoj solárních panelů poznamenán společným úsilím výzkumných pracovníků, inženýrů a tvůrců politik po celém světě. Vzhledem k tomu, že se svět i nadále potýká s problémy spojenými se změnou klimatu a omezenými zdroji fosilních paliv, očekává se, že pokračující pokrok v technologii solárních panelů bude hrát zásadní roli v globálním přechodu k udržitelnější a odolnější energetické budoucnosti. Tato dynamická historie solárních panelů ukazuje potenciál dalšího růstu a inovací v této oblasti, což v konečném důsledku přispěje k čistší a bezpečnější energetice pro budoucí generace.

### 3.4. Stávající využití solárních panelů

Solární panely se stávají stále důležitější součástí globálního energetického mixu, protože svět se snaží přejít na udržitelnější a obnovitelné zdroje energie. Klesající náklady a vyšší účinnost solárních panelů spolu s rostoucím povědomím o environmentálních a ekonomických výhodách obnovitelné energie vedly k rychlému rozšíření využívání solární energie v různých aplikacích po celém světě.

Podle Mezinárodní agentury pro obnovitelné zdroje energie (IRENA) zaznamenala kapacita fotovoltaických elektráren v posledním desetiletí exponenciální růst a na konci roku 2020 dosáhl téměř 714 GW [31]. Tento impozantní růst lze přičíst několika faktorům, včetně technologického pokroku, podpůrných vládních politik a rostoucí konkurenceschopnosti solární energie ve vztahu k tradičním zdrojům energie.

Solární panely se využívají v široké škále aplikací, od malých rezidenčních instalací až po rozsáhlé projekty v oblasti veřejných služeb, stejně jako off-grid a hybridní systémy pro vzdálené a energeticky chudé regiony. Jak uvádí Fatih Birol, výkonný ředitel Mezinárodní energetické agentury (IEA), „solární energie zažívá nový úsvit, díky rychle klesajícím nákladům a rozšiřujícímu se nasazení se stává klíčovým pilířem globální energetické transformace“ [8].

Solární instalace v domácnostech jsou stále populárnější, protože majitelé domů se snaží snížit svou závislost na fosilních palivech a využívají finančních pobídek nabízených vládami a energetickými společnostmi. Solární panely mohou být instalovány na střechách nebo integrovány do konstrukce budovy, například v podobě solárních oken nebo solárních šindelů [5]. Tyto instalace nejenže vyrábějí čistou elektřinu pro potřeby domácností, ale mohou také dodávat přebytečnou energii zpět do sítě, čímž majitelům domů zajišťují dodatečný příjem a přispívají k celkové stabilitě sítě.

Významně se rozšířily také komerční a průmyslové aplikace solárních panelů, protože podniky a instituce si uvědomují ekonomické a environmentální výhody výroby obnovitelné energie na místě. Solární panely lze instalovat na střechy továren, skladů a kancelářských budov nebo je integrovat do přístřešků pro auta, parkovišť a dalších staveb, čímž poskytují spolehlivý a nákladově efektivní zdroj elektřiny [32].

Rozhodující roli v širším zavádění solární energie hrají rozsáhlé solární projekty pro veřejnou potřebu, jako jsou solární farmy a koncentrované solární elektrárny. Tato zařízení vyrábějí obrovské množství elektřiny, kterou lze dodávat do sítě, což pomáhá snižovat závislost na fosilních palivech a zmírňovat emise skleníkových plynů. Vzhledem k tomu, že se solární energie stává cenově stále konkurenceschopnější, očekává se, že se projekty ve veřejném měřítku budou nadále rozšiřovat, přičemž někteří odborníci předpokládají, že by se solární energie mohla do roku 2050 stát největším zdrojem elektřiny na světě [8].

Mimo síťové a hybridní solární systémy jsou zvláště výhodné pro odlehlé a energeticky chudé regiony, kde chybí tradiční síťová infrastruktura nebo je nespolehlivá. Solární panely, často v kombinaci se systémy skladování energie, mohou poskytnout spolehlivý a udržitelný zdroj elektřiny pro venkovské komunity, zdravotní kliniky, školy a další důležitá zařízení, což zlepšuje kvalitu života a podporuje hospodářský rozvoj [33].

Souhrnně lze říci, že současné využití solárních panelů zahrnuje širokou škálu aplikací, od instalací v obytných domech až po projekty ve veřejném měřítku a od městských center až po odlehlé komunity mimo síť. Rychlý nárůst využívání solární energie po celém světě odráží rostoucí uznání ekonomických a environmentálních přínosů využívání čisté, obnovitelné energie. Vzhledem k tomu, že technologie solárních panelů se neustále zdokonaluje a náklady na ně klesají, je solární energie připravena hrát stále významnější roli v celosvětovém přechodu k udržitelnější a odolnější energetické budoucnosti.

### 3.5. Obecný popis životního cyklu solárních panelů

Životní cyklus solárních panelů zahrnuje několik fází, od těžby a výroby surovin až po jejich konečnou likvidaci nebo recyklaci. Analýza životního cyklu solárních panelů je nezbytná pro pochopení jejich dopadu na životní prostředí, požadavků na zdroje a celkové udržitelnosti. Podle přístupu hodnocení životního cyklu (LCA) by hodnocení environmentální výkonnosti výrobku mělo zohledňovat všechny fáze jeho životního cyklu [34]. V této části uvádíme obecný popis životního cyklu solárních panelů, přičemž vycházíme z výzkumu různých autorů.

1. Těžba a výroba surovin: Solární panely se obvykle skládají z několika materiálů, včetně kovů (např. hliníku, křemíku, stříbra a mědi), skla, plastů a různých chemických látek. Těžba a zpracování těchto surovin zahrnuje energeticky náročné procesy, které mohou mít za následek emise skleníkových plynů a další dopady na životní prostředí, jako je znečištění vody a ničení přírodních stanovišť [35]. Některé solární panely obsahují také prvky vzácných zemin a další kritické materiály, jejichž těžba může vyvolávat obavy z nedostatku zdrojů a geopolitického napětí [36].
2. Výroba solárních panelů: Výroba solárních panelů zahrnuje několik kroků, jako je čištění a krystalizace křemíku, výroba solárních článků a montáž solárních modulů. Tyto procesy vyžadují energii, vodu a různé chemikálie, což vede k produkci emisí a odpadů. Technologický pokrok a zdokonalené výrobní postupy však vedly k výraznému snížení spotřeby energie a dopadů výroby solárních panelů na životní prostředí [37].
3. Přeprava a instalace: Solární panely je třeba přepravovat z výrobních závodů na místa jejich instalace, což může zahrnovat dlouhé vzdálenosti a více druhů dopravy, jako je lodní, nákladní a železniční. Přeprava a instalace solárních panelů může přispívat k emisím skleníkových plynů, znečištění ovzduší a dalším dopadům na životní prostředí [38]. Tyto dopady jsou však obecně malé ve srovnání s dopady spojenými s těžbou surovin a výrobou [35].
4. Provoz a údržba: Po instalaci solární panely vyrábějí elektřinu, aniž by produkovaly přímé emise skleníkových plynů nebo znečišťujících látek do ovzduší, což z nich činí ekologicky šetrný zdroj energie během jejich provozní životnosti [39]. Solární panely mají obvykle životnost 25 až 30 let s minimálními požadavky na údržbu, jako je občasné čištění a pravidelná výměna komponent [40]. Energie vyrobená solárními panely po dobu jejich životnosti může kompenzovat dopady na životní prostředí spojené s jejich výrobou, přepravou a instalací, což vede k čistému pozitivnímu vlivu na životní prostředí [41].
5. Řízení po skončení životnosti: Po skončení životnosti je třeba solární panely vyřadit z provozu, což může zahrnovat demontáž, přepravu a likvidaci nebo recyklaci. Likvidace solárních panelů na skládkách může představovat riziko pro životní prostředí kvůli uvolňování toxických materiálů a spotřebě omezeného prostoru skládek [42]. Recyklace je udržitelnější variantou, protože umožňuje obnovu a opětovné použití

cenných materiálů, snižuje produkci odpadu a zmírňuje dopady těžby a výroby surovin na životní prostředí [35]. Procesy recyklace však mohou zahrnovat také spotřebu energie a emise, které je třeba zohlednit v celkovém hodnocení životního cyklu solárních panelů [43].

Závěrem lze říci, že životní cyklus solárních panelů zahrnuje několik fází, z nichž každá má své vlastní dopady na životní prostředí a požadavky na zdroje. Zatímco solární panely během své provozní životnosti vyrábějí čistou, obnovitelnou energii, je důležité zvážit širší dopady na životní prostředí spojené s jejich výrobou, přepravou a nakládáním s nimi po skončení jejich životnosti. Studie hodnocení životního cyklu trvale ukazují, že solární panely mají čistý pozitivní vliv na životní prostředí, přičemž energie, kterou během své životnosti vyrobí, kompenzuje dopady spojené s ostatními fázemi jejich životního cyklu [41; 35].

Očekává se, že neustálé zdokonalování technologie solárních panelů, výrobních procesů a metod recyklace v budoucnu dále zvýší environmentální výkonnost solárních panelů [44]. Například vývoj tenkovrstvých solárních panelů a dalších nových technologií může snížit materiálovou a energetickou náročnost výroby solárních panelů, zatímco pokrok v recyklačních technologiích může zvýšit využití a opětovné použití cenných materiálů z panelů po skončení životnosti [45].

Začlenění solárních panelů do strategií oběhového hospodářství a systémů rozšířené odpovědnosti výrobce (EPR) může navíc pomoci prosazovat udržitelné postupy nakládání s panely po skončení jejich životnosti a motivovat k vývoji ekologicky šetrných konstrukcí solárních panelů [46]. Vlády, zúčastněné strany v průmyslu i spotřebitelé musí hrát roli při zajišťování odpovědné výroby, používání a likvidace solárních panelů, aby se maximalizoval jejich přínos pro životní prostředí a přispělo se k udržitelnější a odolnější energetické budoucnosti.

Souhrnně lze říci, že životní cyklus solárních panelů poskytuje cenné poznatky o jejich environmentální výkonnosti, nárocích na zdroje a celkové udržitelnosti. Zváží-li se dopady spojené s každou fází životního cyklu, mohou výzkumní pracovníci, tvůrci politik a zúčastněné strany v odvětví identifikovat příležitosti ke zlepšení a inovacím, což v konečném důsledku přispěje k vývoji a zavádění udržitelnějších solárních energetických systémů. Vzhledem k tomu, že svět pokračuje v přechodu k nízkouhlíkové energetické budoucnosti, bude pokračující vývoj technologie solárních panelů a zavádění odpovědných postupů řízení životního cyklu zásadní pro zajištění dlouhodobé životaschopnosti a úspěchu solární energie jako klíčové součásti globálního energetického mixu.

### 3.6. Druhotné využití solárních panelů

Sekundární využití solárních panelů znamená opětovné využití solárních panelů, které dosáhly konce své původní provozní životnosti. Vzhledem k tomu, že životnost solárních panelů je obvykle 25 až 30 let, roste potřeba řešit rostoucí objem panelů s ukončenou životností udržitelným a odpovědným způsobem [40]. Sekundární využití nabízí alternativu k likvidaci nebo

recyklaci, prodlužuje životnost solárních panelů a maximalizuje hodnotu materiálů a energie investovaných do jejich výroby.

Jedním z hlavních důvodů, proč uvažovat o druhotném využití, je skutečnost, že výkon solárních panelů má tendenci se v průběhu času postupně snižovat, nikoliv náhle přestat [47]. Přestože jejich účinnost může klesnout pod určitou hranici, například pod 80 % jejich původního jmenovitého výkonu, mnoho panelů může stále vyrábět značné množství elektřiny [48]. Opětovné využití těchto panelů pro méně náročné aplikace může poskytnout nákladově efektivní a ekologické řešení rostoucího problému nakládání s odpadem ze solárních panelů.

Sekundární využití solárních panelů zahrnuje renovaci, opravu nebo opětovné využití použitých solárních panelů za účelem prodloužení jejich funkční životnosti, čímž se snižuje objem odpadu a podporuje se oběhový a udržitelnější přístup k nakládání s odpadem ze solárních panelů. Pro posouzení proveditelnosti a ekonomické životaschopnosti těchto iniciativ je však třeba pečlivě zvážit náklady spojené s druhotným využitím solárních panelů, včetně demontáže, opravy a opětovné montáže panelů, jakož i jejich přepravy na nové místo.

Náklady na demontáž: Proces demontáže použitých solárních panelů zahrnuje pečlivé odstranění panelů z jejich montážních konstrukcí, přičemž je třeba zajistit, aby byly zachovány všechny cenné nebo nebezpečné materiály a aby s nimi bylo náležitě nakládáno. Podle studie Wade a kol. se průměrné náklady na demontáž solárního panelu odhadují na přibližně 64-104 EUR na panel. Tyto náklady se mohou lišit v závislosti na faktorech, jako je velikost a složitost instalace, náklady na pracovní sílu a dostupnost specializovaného vybavení potřebného pro demontáž [49].

Náklady na opravu: Opravy a renovace použitých solárních panelů mohou zahrnovat výměnu poškozených součástí, jako jsou solární články, zapouzdřovací materiály nebo vrstvy zadní strany, a také čištění a opětovné testování panelů, aby byla zajištěna jejich funkčnost a bezpečnost. Náklady na opravu solárních panelů se mohou výrazně lišit v závislosti na rozsahu poškození a konkrétních součástech, které je třeba vyměnit. Ve studii Mendonca (2009) autor odhaduje, že průměrné náklady na opravu solárního panelu se pohybují od 20 do 90 EUR na článek v závislosti na typu a rozsahu potřebných oprav [30]. Na obrázku č. 3 je zobrazena ukázka poškozeného tedlaru.



Obrázek 3: ukázka poškozených panelů [50]

Náklady na dopravu: K celkovým nákladům spojeným s druhotným použitím použitých solárních panelů může přispět i jejich přeprava na nové místo. Náklady na přepravu mohou ovlivnit faktory, jako je vzdálenost mezi místem původní instalace a novým místem, použitý způsob přepravy a logistické problémy spojené s manipulací a přepravou velkých a křehkých solárních panelů. Podle Wade a kol. se průměrné náklady na přepravu použitých solárních panelů pohybují v rozmezí od 12 do 32 EUR za panel v závislosti na konkrétních výše uvedených faktorech. [49]

Náklady na opětovnou montáž: Po přepravě použitých solárních panelů na nové místo je třeba je znovu smontovat a začlenit do nové instalace. Náklady spojené s tímto procesem mohou zahrnovat nákup a instalaci nových montážních konstrukcí, náklady na pracovní sílu při montáži a instalaci panelů a případnou potřebu dodatečného testování a certifikace pro zajištění bezpečnosti a funkčnosti repasovaných panelů. Wade a kol. odhadují, že průměrné náklady na opětovnou montáž použitých solárních panelů se pohybují kolem 130 EUR na panel v závislosti na velikosti a složitosti nové instalace. [49]

Pro posouzení proveditelnosti a ekonomické životaschopnosti těchto iniciativ je však třeba pečlivě zvážit náklady spojené s demontáží, opravou, přepravou a opětovnou montáží použitých solárních panelů. Vyvinutím nákladově efektivních a účinných metod pro druhotné využití

solárních panelů mohou zúčastněné strany v solárním průmyslu přispět k podpoře udržitelnějšího a oběhového přístupu k nakládání s odpadem ze solárních panelů.

Navzdory těmto nákladům může sekundární využití solárních panelů stále představovat nákladově efektivní a udržitelnou alternativu k recyklaci nebo likvidaci. Tsanakas et al. ve své studii zjistili, že renovace a opětovné využití solárních panelů s ukončenou životností může snížit celkové náklady na životní cyklus fotovoltaických systémů až o 30 % v závislosti na konkrétních podmínkách a rozsahu požadované renovace. Autoři navíc poznamenávají, že sekundární využití solárních panelů může přispět ke snížení emisí skleníkových plynů spojených s nakládáním s fotovoltaickým odpadem tím, že minimalizuje potřebu výroby nových panelů a energeticky náročných recyklačních procesů. [51]

Mezi příklady sekundárního využití solárních panelů patří např:

1. Off-grid a vzdálené aplikace: Solární panely s ukončenou životností, které stále vyrábějí elektřinu, lze opětovně využít pro off-grid a vzdálené aplikace, jako je elektrifikace venkova, zavlažování, čerpání vody a telekomunikační infrastruktura [4]. Tyto panely mohou poskytnout levný a spolehlivý zdroj energie pro komunity a zařízení, které nemají přístup k rozvodné síti nebo čelí častým výpadkům proudu. Využití použitých panelů v těchto aplikacích navíc může pomoci překlenout energetickou propast v rozvojových zemích a přispět ke zmírnění chudoby a cílům udržitelného rozvoje [52].
2. Zařízení s nízkým příkonem: Použité solární panely lze také využít v zařízeních s nízkým příkonem, jako je venkovní osvětlení, přenosné nabíječky a ohřívače vody na solární pohon. Tyto aplikace mohou těžit ze snížených nákladů na použité panely a zároveň splnit své energetické požadavky [53]. Kromě toho, že je druhotné využití solárních panelů v zařízeních s nízkým výkonem nákladově efektivní, může podpořit úsporu energie, snížit emise skleníkových plynů a přispět k udržitelnější a odolnější energetické infrastruktuře [54].
3. Fotovoltaika integrovaná do budov (BIPV): Dalším možným sekundárním využitím solárních panelů je fotovoltaika integrovaná do budov, kdy jsou panely integrovány do konstrukce budovy, například do stěn, oken nebo fasád. Účinnost použitých panelů může být sice nižší než u nových panelů, ale i tak mohou přispět k celkové výrobě energie a snížit závislost budovy na elektřině dodávané ze sítě [5]. Tento přístup nejen prodlužuje životnost použitých solárních panelů, ale také podporuje zavádění obnovitelných zdrojů energie v městském prostředí a přispívá ke snižování emisí CO<sub>2</sub> souvisejících s energií [55].
4. Vzdělávací a výzkumné účely: Vysloužilé solární panely mohou být také cenným zdrojem pro vzdělávací instituce a výzkumná zařízení, neboť poskytují praktické příležitosti k výuce a slouží jako zkušební zařízení pro nové technologie a techniky v oblasti výroby a řízení solární energie [56]. Tím, že se studenti a výzkumní pracovníci seznámí s reálnými problémy a omezeními spojenými s použitými solárními panely, může sekundární

využití ve vzdělávacích a výzkumných zařízeních podpořit inovace a vývoj udržitelnějších a účinnějších solárních energetických systémů.

Sekundární využití solárních panelů může přispět k oběhovému a udržitelnějšímu přístupu k solární energii tím, že prodlouží životnost těchto cenných zdrojů a sníží dopady na životní prostředí spojené s jejich likvidací nebo recyklací. S druhotným využitím solárních panelů však souvisí několik výzev a úvah, jako je zajištění bezpečnosti a spolehlivosti použitých panelů, vypracování standardizovaných postupů testování a certifikace a zavedení vhodných politik a pobídek na podporu trhu s použitými panely [57].

Řešení těchto problémů vyžaduje spolupráci mezi výzkumnými pracovníky, tvůrci politik a zúčastněnými stranami z odvětví s cílem vypracovat pokyny a osvědčené postupy pro druhotné využití solárních panelů. Například vytvoření transparentního a spolehlivého systému certifikace použitých panelů může pomoci vybudovat důvěru v trh a zároveň zajistit, aby znovu použité panely splňovaly nezbytné bezpečnostní a výkonnostní požadavky [58].

Kromě toho může zavedení politik a pobídek na podporu druhotného využití solárních panelů pomoci vytvořit trh s těmito cennými zdroji, stimulovat inovace a podpořit rozvoj nových obchodních modelů a služeb souvisejících s opětovným použitím a využitím solárních panelů [59]. Taková opatření by mohla zahrnovat daňové úlevy, granty nebo dotace pro podniky a spotřebitele zabývající se druhotným využitím solárních panelů, jakož i zavedení systémů rozšířené odpovědnosti výrobce (EPR), které vyžadují, aby výrobci převzali odpovědnost za nakládání se svými výrobky po skončení jejich životnosti [60].

Pro úspěšné přijetí tohoto přístupu je rovněž nezbytné zvýšit informovanost veřejnosti a propagovat výhody druhotného využití. To může zahrnovat vzdělávací kampaně, demonstrace a pilotní projekty, které ukazují potenciál opětovně použitých solárních panelů a podporují jejich široké využití v různých aplikacích [61].

Závěrem lze říci, že druhotné využití solárních panelů nabízí slibné řešení rostoucího problému nakládání s panely po skončení životnosti, které přináší řadu výhod z hlediska efektivního využívání zdrojů, snižování množství odpadu a výroby energie. Prozkoumáním a propagací potenciálu druhotného využití mohou výzkumní pracovníci, tvůrci politik a zúčastněné strany v odvětví pomoci zajistit dlouhodobou udržitelnost solární energie a podpořit globální přechod k oběhovější a odolnější energetické budoucnosti. Vzhledem k tomu, že poptávka po čisté obnovitelné energii stále roste a objem solárních panelů s ukončenou životností se zvyšuje, bude druhotné využití solárních panelů hrát zásadní roli při podpoře udržitelnějšího a odpovědnějšího přístupu k výrobě solární energie a nakládání s ní.

### 3.7. Náklady na recyklaci solárních panelů

S rostoucím celosvětovým rozšířením fotovoltaických (FV) systémů se stává stále důležitějším problémem správa solárních panelů po skončení jejich životnosti. Recyklace je klíčovou



součástí odpovědného nakládání s odpadem ze solárních panelů, protože umožňuje obnovu cenných materiálů a minimalizuje dopad na životní prostředí spojený s likvidací. Náklady na recyklaci solárních panelů jsou však rozhodujícím faktorem, který ovlivňuje ekonomickou proveditelnost a celkový úspěch recyklačních snah. V této části se budeme zabývat náklady spojenými s recyklací solárních panelů se zaměřením na výzkum a poznatky evropských autorů.

Evropská unie stojí v čele vývoje politiky recyklace solárních panelů, neboť v roce 2012 zavedla směrnici o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (WEEE), která klasifikuje solární panely jako elektronický odpad a vyžaduje, aby členské státy zavedly recyklační programy pro panely s ukončenou životností [62]. Tento regulační rámec vedl ke vzniku specializovaných zařízení na recyklaci solárních panelů po celé Evropě, což poskytuje cenné informace o nákladech spojených s recyklačními procesy.

Náklady na recyklaci solárních panelů ovlivňuje několik faktorů, včetně dopravy, práce, zpracování a likvidace zbytkového odpadního materiálu. Podle studie Miliacca a Rosa se průměrné náklady na recyklaci solárních panelů v Evropě pohybují v rozmezí od 15 do 35 EUR na panel v závislosti na konkrétních použitých recyklačních technologiích a procesech. Studie zdůrazňuje, že doprava a logistika představují významnou část celkových nákladů na recyklaci, a to přibližně 30 % celkových nákladů [63].

Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím náklady na recyklaci je typ zpracovávaného solárního panelu. Panely na bázi krystalického křemíku, které představují většinu celosvětově instalovaných solárních panelů, mají obvykle vyšší náklady na recyklaci ve srovnání s tenkovrstvými panely, a to z důvodu složitějšího a pracnějšího procesu recyklace [64]. Vyšší míra využití materiálu a hodnota krystalických křemíkových panelů však může tyto vyšší náklady částečně kompenzovat [43].

Zásadní roli při určování nákladů na recyklaci solárních panelů hrají také úspory z rozsahu. S rostoucím objemem vyřazených panelů mohou recyklační zařízení dosahovat vyšší efektivity a snižovat celkové náklady na panel [56]. Kromě toho může vývoj pokročilejších a účinnějších recyklačních technologií pomoci snížit náklady spojené s recyklačními procesy. Například studie Mulazzani a dalších naznačuje, že zavedení inovativních recyklačních technologií, jako je například využití vysokoteplotních procesů pro obnovu křemíku, může vést ke snížení nákladů na recyklaci až o 50 % [65].

Finanční životaschopnost recyklace solárních panelů ovlivňuje také tržní hodnota získaných materiálů. Při kolísajících cenách cenných materiálů, jako je hliník, stříbro a křemík, mohou příjmy z prodeje získaných materiálů kompenzovat náklady na recyklaci, čímž se proces stává ekonomicky atraktivnějším [66]. To však také znamená, že náklady na recyklaci solárních panelů podléhají volatilitě trhu, takže je obtížné předvídat dlouhodobou ziskovost.

Pro zajištění ekonomické životaschopnosti recyklace solárních panelů jsou rozhodující pobídky a politická podpora. Systémy rozšířené odpovědnosti výrobce (EPR), jako jsou systémy

zavedené podle směrnice o OEEZ, mohou pomoci internalizovat náklady na recyklaci a podpořit vývoj nákladově efektivních recyklačních procesů a technologií [60]. Kromě toho mohou finanční pobídky, jako jsou dotace nebo granty, pomoci podpořit růst odvětví recyklace solárních panelů a stimulovat inovace recyklačních technologií [57].

Závěrem lze říci, že náklady na recyklaci solárních panelů jsou ovlivněny řadou faktorů, včetně dopravy, práce, zpracování a typu zpracovávaného panelu. Evropský výzkum a zkušenosti se směrnicí o OEEZ poskytly cenné poznatky o nákladech spojených s recyklací solárních panelů. Zatímco současné náklady na recyklaci se pohybují v rozmezí 15 až 35 EUR na panel, potenciál snížení nákladů díky úsporám z rozsahu, technologickému pokroku a tržně řízeným příjmům ze zpětně získaných materiálů může v budoucnu učinit recyklační procesy ekonomicky životaschopnějšími [67].

Politická podpora, jako jsou systémy rozšířené odpovědnosti výrobce a finanční pobídky, hraje zásadní roli při podpoře rozvoje odvětví recyklace solárních panelů a zajištění jeho dlouhodobé udržitelnosti [57; 60]. Podporou podpůrného politického prostředí a investicemi do inovativních recyklačních technologií mohou evropské země přispět k minimalizaci dopadu solárních panelů s ukončenou životností na životní prostředí a přispět k oběhovému a udržitelnějšímu přístupu k nakládání se solární energií.

Vzhledem k tomu, že celosvětový trh se solárními panely nadále roste, bude nakládání s rostoucím objemem vyřazených panelů vyžadovat společné úsilí tvůrců politik, zúčastněných stran v odvětví a výzkumných pracovníků. Na základě zkušeností a poznatků evropských autorů a recyklačních iniciativ mohou země po celém světě vyvinout účinné strategie pro řešení problémů spojených s nakládáním s odpadem ze solárních panelů a zajistit dlouhodobou udržitelnost odvětví solární energie.

### 3.8. Environmentální dopad solárních panelů

Solární panely představují čistý a obnovitelný zdroj energie, který může pomoci snížit emise skleníkových plynů a zmírnit změnu klimatu. Stejně jako každá technologie má však i výroba, používání a likvidace solárních panelů související dopady na životní prostředí, které je třeba zohlednit při hodnocení jejich celkové udržitelnosti. V této části se budeme zabývat různými dopady solárních panelů na životní prostředí, včetně dopadů souvisejících s jejich výrobou, životností a nakládáním s nimi po skončení jejich životnosti.

1. Výroba: Výroba solárních panelů zahrnuje těžbu a zpracování surovin, jako je křemík, hliník a stříbro, což může mít za následek různé dopady na životní prostředí. Například těžba křemenného písku, který je primárním zdrojem křemíku, může vést k degradaci půdy a ztrátě stanovišť [68]. Energeticky náročné procesy potřebné k rafinaci a čištění křemíku, jako je Siemensův proces nebo reaktor s fluidní vrstvou, mohou navíc vytvářet emise skleníkových plynů a přispívat ke změně klimatu [64]. Výroba dalších materiálů, jako je stříbro a hliník, může rovněž vést ke značné spotřebě energie a emisím

- [69]. Pokroky ve výrobních technikách a stále častější využívání recyklovaných materiálů však mohou přispět ke snížení ekologické stopy výroby solárních panelů.
2. Provozní životnost: Během své provozní životnosti solární panely vyrábějí elektřinu, aniž by produkovaly přímé emise, jako je oxid uhličitý nebo jiné látky znečišťující ovzduší. To jim umožňuje nahradit elektřinu vyráběnou z fosilních zdrojů, což má za následek významný přínos pro životní prostředí [70]. Studie Fthenakise et al. zjistila, že solární panely mohou během své životnosti kompenzovat 89-98 % emisí skleníkových plynů spojených s jejich výrobou, v závislosti na konkrétní technologii a lokalitě [35]. Solární panely navíc mohou mít pozitivní dopad na kvalitu místního ovzduší, protože snižují závislost na elektrárnách na fosilní paliva, které vypouštějí znečišťující látky, jako je oxid siřičitý, oxidy dusíku a pevné částice [71].
  3. Nakládání s vyřazeným zařízením: Když solární panely dosáhnou konce své životnosti, obvykle po 25 až 30 letech, musí být zlikvidovány nebo recyklovány, což může mít dopad na životní prostředí [40]. Pokud se se solárními panely po skončení životnosti řádně nenakládá, mohou přispívat k elektronickému odpadu, což vede k potenciální kontaminaci půdy a vody těžkými kovy a dalšími nebezpečnými materiály [67]. Recyklace solárních panelů může pomoci zmírnit tato environmentální rizika tím, že obnoví cenné materiály a sníží potřebu těžby primárních zdrojů [64]. Procesy recyklace však mohou mít také související dopady na životní prostředí, jako je spotřeba energie a emise z dopravy a zpracování [65]. Vývoj účinnějších a k životnímu prostředí šetrnějších recyklačních technologií spolu se zavedením účinných politik nakládání s odpady může pomoci minimalizovat dopady nakládání se solárními panely po skončení jejich životnosti na životní prostředí.

Závěrem lze říci, že ačkoli solární panely přinášejí značné environmentální výhody díky výrobě čisté a obnovitelné energie, jejich výroba, používání a likvidace s sebou nesou také určité dopady na životní prostředí. Zohledněním těchto dopadů v průběhu celého životního cyklu solárních panelů mohou zúčastněné strany vypracovat strategie, které minimalizují ekologickou stopu solární energie a zajistí její dlouhodobou udržitelnost. To může zahrnovat zlepšení výrobních procesů, podporu používání recyklovaných materiálů, investice do výzkumu a vývoje účinnějších a ekologicky šetrnějších recyklačních technologií a zavedení účinných politik nakládání s odpady. Řešením těchto problémů může solární energie i nadále hrát zásadní roli v globálním přechodu k udržitelnější a nízkouhlíkové energetice.

## 4. Přehled řešené problematiky

Tato kapitola poskytuje komplexní přehled o současném stavu v oblasti druhotného využití a recyklace solárních panelů, a to jak v České republice, tak ve světě. Cílem tohoto přehledu je na základě zkoumání stávajícího výzkumu, politik a postupů identifikovat klíčové problémy a výzvy, kterým toto odvětví čelí, jakož i příležitosti ke zlepšení a inovacím. Pochopením současné situace v oblasti opětovného použití a recyklace solárních panelů můžeme lépe posoudit potenciál sekundárního využití solárních panelů, který přispívá k udržitelnějšímu přístupu k nakládání se solární energií.

### 4.1. Rešerše stavu techniky v ČR

V České republice došlo v posledním desetiletí k výraznému nárůstu využívání solární energie, přičemž instalovaný výkon fotovoltaických elektráren (FVE) dosáhl do konce roku 2020 přibližně 2 GW [72]. Tento rychlý rozvoj vyvolal obavy ohledně nakládání s vyřazenými solárními panely a potřebu vypracovat strategie pro jejich opětovné využití a recyklaci. Tento oddíl podává přehled o současném stavu sekundárního využití a recyklace solárních panelů v České republice, včetně příslušného výzkumu, politik, iniciativ a průmyslových postupů.

1. **Politiky a předpisy:** Jako člen Evropské unie podléhá Česká republika směrnici o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (WEEE), která klasifikuje solární panely jako elektronický odpad a vyžaduje zavedení recyklačních programů pro panely s ukončenou životností [62]. Za účelem dosažení souladu s touto směrnicí zavedla Česká republika vnitrostátní předpisy, které nařizují sběr a recyklaci solárních panelů, a zavedla systémy rozšířené odpovědnosti výrobce (EPR) na podporu financování recyklačních činností [73]. Tato opatření pomohla vytvořit právní rámec pro nakládání s odpadem ze solárních panelů a připravila půdu pro rozvoj iniciativ v oblasti recyklace a opětovného použití.
2. **Recyklační infrastruktura:** V České republice se rozvíjí infrastruktura pro recyklaci solárních panelů, v zemi funguje několik specializovaných recyklačních zařízení. Tato zařízení využívají různé recyklační technologie a postupy, včetně mechanické separace a chemického zpracování, k získání cenných materiálů, jako je hliník, stříbro a křemík, z panelů s ukončenou životností. Některá z těchto zařízení také spolupracují s mezinárodními recyklačními sítěmi, jako je PV Cycle, aby zajistila soulad s evropskými normami a osvědčenými postupy [74].
3. **Spolupráce v odvětví a zvyšování povědomí:** Na podporu rozvoje trhu s druhotným využitím a recyklací vytvořily různé průmyslové subjekty v České republice partnerství a sítě pro sdílení znalostí, zdrojů a osvědčených postupů. Česká fotovoltaická průmyslová asociace (CZEPHO) hraje klíčovou roli při podpoře dialogu a spolupráce mezi výrobcí solárních panelů, recyklátory a tvůrci politik [75]. Kromě toho několik vzdělávacích kampaní a akcí, jako je například každoroční konference o solární energii, pomáhá

zvyšovat povědomí o významu recyklace a druhotného využití solárních panelů mezi odborníky v oboru i širokou veřejností.

Celkově lze říci, že Česká republika dosáhla značného pokroku při řešení problémů spojených s vyřazenými solárními panely, a to díky rostoucímu počtu výzkumných prací, podpůrným politikám a rozšiřující se recyklační infrastruktuře. Inovativní projekty a iniciativy navíc ukazují potenciál pro druhotné využití solárních panelů v různých aplikacích. Spolupráce v odvětví a úsilí o zvyšování povědomí dále přispívají k rozvoji udržitelnějšího a oběhového přístupu k nakládání se solární energií.

V odvětví recyklace a opětovného použití solárních panelů v České republice však stále existují příležitosti ke zlepšení a růstu. Vzhledem k tomu, že objem panelů s ukončenou životností stále roste, bude zásadní investovat do výzkumu a vývoje s cílem zdokonalit recyklační technologie, snížit náklady a zvýšit účinnost materiálového využití. Kromě toho může posílení politické podpory a pobídek pro recyklaci a druhotné využití, stejně jako podpora mezinárodní spolupráce a výměny osvědčených postupů, pomoci zajistit dlouhodobou udržitelnost odvětví nakládání s odpadem ze solárních panelů v České republice.

Řešením těchto výzev a navázáním na dosavadní úspěchy může Česká republika sloužit jako vůdčí příklad pro další země, které se snaží vyvinout účinné strategie pro nakládání s vyřazenými solárními panely a podporovat udržitelnější a oběhový průmysl solární energie.

#### **4.2. Rešerše stavu techniky ve světě**

Odvětví solární energie zaznamenalo celosvětově výrazný růst, přičemž instalovaná kapacita fotovoltaických elektráren (FVE) do konce roku 2020 přesáhla 714 GW [31]. Tento rychlý rozvoj zdůrazňuje potřebu zabývat se nakládáním s vyřazenými solárními panely a zkoumat strategie jejich opětovného využití a recyklace. V této části se budeme zabývat současným stavem v oblasti druhotného využití a recyklace solárních panelů ve světě se zaměřením na přístupy a iniciativy přijaté různými zeměmi a regiony.

Evropská unie: EU hraje vedoucí úlohu při vytváření předpisů a politik pro nakládání s odpadem ze solárních panelů. Směrnice o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (WEEE), která klasifikuje solární panely jako elektronický odpad, byla zásadní pro rozvoj recyklační infrastruktury a systémů rozšířené odpovědnosti výrobce (EPR) v členských státech EU [62]. EU navíc financovala několik výzkumných projektů a iniciativ zaměřených na rozvoj technologií recyklace solárních panelů a podporu zásad oběhového hospodářství ve fotovoltaickém průmyslu. Jeden z takových projektů, CIRCUSOL, má za cíl prokázat životaschopnost oběhových obchodních modelů pro fotovoltaický průmysl se zaměřením na design výrobků, recyklační technologie a inovativní služby [76]. Další iniciativa, Evropská rada pro výrobu solárních panelů (ESMC), usiluje o podporu spolupráce mezi zúčastněnými stranami s cílem rozvíjet udržitelné výrobní postupy, včetně nakládání s panely po skončení jejich životnosti [77].

Spojené státy americké: USA mají poměrně roztržštěné regulační prostředí, pokud jde o nakládání s odpadem ze solárních panelů, s různými politikami a pokyny na úrovni jednotlivých států. Například Kalifornie zavedla předpisy vyžadující recyklaci solárních panelů a rozvoj recyklační infrastruktury [78]. Mezitím státy jako Washington a New York rovněž připravují vlastní předpisy pro recyklaci solárních panelů. Pokud jde o výzkum, Národní laboratoř pro obnovitelnou energii (NREL) stojí v čele zkoumání technologií a strategií recyklace solárních panelů s cílem zlepšit využití materiálu a snížit dopady na životní prostředí [79]. Kromě toho organizace jako Solar Energy Industries Association (SEIA) zavedly dobrovolné recyklační programy, například National PV Recycling Program, jehož cílem je usnadnit recyklaci solárních panelů s ukončenou životností a podporovat osvědčené postupy v odvětví [80].

Čína: Čína jako největší světový výrobce a spotřebitel solárních panelů čelí významným výzvám při nakládání s rostoucím objemem vyřazených panelů. V reakci na to čínská vláda vydala pokyny pro recyklaci a likvidaci solárních panelů a ve vybraných provinciích zavedla pilotní recyklační programy [81]. Několik čínských společností, například FH Solar a Yingli Green Energy, rovněž investovalo do vývoje recyklačních zařízení a technologií pro získávání cenných materiálů z použitých panelů [82; 83]. Kromě toho výzkumné instituce, jako je Čínská akademie věd, pracují na inovativních recyklačních procesech, včetně vývoje ekologicky šetrných technik pro získávání cenných materiálů z vysloužilých solárních panelů [84].

Japonsko: Japonsko přijalo proaktivní přístup k nakládání s odpadem ze solárních panelů a zavedlo zákon o recyklaci domácích spotřebičů, který nařizuje sběr a recyklaci solárních panelů s ukončenou životností [61]. Japonská asociace pro fotovoltaickou energii (JPEA) se významně podílí na prosazování spolupráce a standardizace v odvětví a podporuje výzkum a vývoj recyklačních technologií [85]. Japonské společnosti, jako jsou Toshiba a PV Techno Cycle, rovněž vyvinuly úsilí o vývoj vlastních recyklačních technologií a postupů se zaměřením na snížení množství odpadu a maximální využití cenných materiálů z použitých solárních panelů [86].

Indie: Indie s rychle rostoucím trhem se solární energií čelí výzvě, jak naložit s rostoucím objemem vyřazených solárních panelů. Ačkoli v současné době v Indii neexistuje žádný komplexní regulační rámec pro nakládání s odpadem ze solárních panelů, tamní ministerstvo pro novou a obnovitelnou energii (MNRE) navrhlo pokyny pro environmentálně šetrné nakládání s vyřazenými solárními panely, včetně zřízení recyklačních zařízení a podpory druhotného využití [87]. Indické výzkumné instituce, jako je Indický vědecký institut (IISc), se rovněž zabývají výzkumem a vývojem souvisejícím s recyklací a druhotným využitím solárních panelů se zaměřením na nákladově efektivní a udržitelná řešení pro indické podmínky [88].

Závěrem lze říci, že současný stav v oblasti sekundárního využití a recyklace solárních panelů se v různých zemích a regionech značně liší. Zatímco některé regiony, jako například Evropská unie a Japonsko, zavedly robustní regulační rámce a investovaly do výzkumu a infrastruktury, jiné regiony jsou stále v počátečních fázích řešení této problematiky. Vzhledem k tomu, že celosvětový trh se solárními panely nadále roste, bude nezbytné, aby se země vzájemně učily ze

svých zkušeností a spolupracovaly na vývoji účinných strategií pro nakládání s vysloužilými solárními panely a podporovaly udržitelnější a oběhové odvětví solární energie.

Řešení problémů spojených s nakládáním s odpadem ze solárních panelů vyžaduje mnohostranný přístup, včetně vývoje nových recyklačních technologií, podpory aplikací pro druhotné využití a vytvoření podpůrných politických rámců. Podporou mezinárodní spolupráce a výměny znalostí mohou země společně zajistit dlouhodobou udržitelnost odvětví nakládání s odpadem ze solárních panelů a přispět k celosvětovému přechodu na oběhový a ekologicky odpovědnější průmysl solární energie.

### 4.3. Přehled projektů na druhotné využití solárních panelů v ČR

V České republice pracují různé zainteresované strany, včetně vlády, výzkumných institucí a soukromých společností, na vývoji inovativních řešení a projektů zaměřených na sekundární využití solárních panelů. S pokračujícím rozvojem odvětví solární energie roste i poptávka po udržitelném nakládání s vyřazenými solárními panely a jejich opětovném využití. V této části přinášíme podrobný přehled některých významných projektů opětovného využití solárních panelů v České republice a zdůrazňujeme jejich cíle, úspěchy a potenciální dopad na nakládání s fotovoltaickým odpadem v zemi.

**PV Cycle Česká republika:** PV Cycle je evropská nezisková organizace zabývající se nakládáním s vyřazenými fotovoltaickými moduly a jejich recyklací. V České republice PV Cycle spolupracuje s místními společnostmi zabývajícími se nakládáním s odpady, aby vytvořila síť sběrných míst pro použité solární panely. Cílem této iniciativy je usnadnit recyklaci a využití cenných materiálů z panelů s ukončenou životností a zároveň podpořit principy oběhového hospodářství v českém solárním průmyslu. Aby zajistila účinnost svého recyklačního úsilí, provádí PV Cycle pravidelné audity svých recyklačních partnerů a poskytuje jim pokyny o osvědčených postupech pro správné nakládání s použitými solárními panely a jejich přepravu [89].

Klusáček a kol. se ve svém článku „From Wasted Land to Megawatts: Jak přeměnit brownfieldy na solární elektrárny“. Autoři tvrdí, že brownfieldy, což jsou opuštěné nebo nedostatečně využívané průmyslové nebo komerční areály, jsou vhodnými lokalitami pro solární elektrárny díky své blízkosti k existující energetické infrastruktuře a dostupnosti velkých ploch nevyužívané půdy. Poskytují ucelený přehled výhod a problémů spojených s využitím brownfieldů pro výrobu solární energie, včetně zvýšení hodnoty nemovitostí, vytváření pracovních míst a přínosů pro životní prostředí. Článek rovněž nabízí případové studie úspěšných projektů solární energie z brownfieldů v Evropě a Severní Americe, které ukazují proveditelnost takových projektů a jejich potenciál přispět k místnímu ekonomickému rozvoji a environmentální udržitelnosti. [90]

**Opětovné využití solárních panelů ve veřejných budovách:** Několik obcí v České republice zavedlo iniciativy na opětovné využití solárních panelů po skončení životnosti ve veřejných budovách, jako jsou školy, komunitní centra a administrativní budovy. Opětovným využitím

použitých panelů tyto projekty nejen přispívají ke snížení množství fotovoltaického odpadu, ale také podporují zavádění řešení čisté energie na místní úrovni, čímž podporují větší informovanost veřejnosti a podporu udržitelných energetických postupů. Kromě toho mohou místní samosprávy začleněním opětovného použití solárních panelů do projektů veřejné infrastruktury ukázat potenciál přístupů oběhového hospodářství v energetice a inspirovat tak další obce k následování.

**Iniciativy v oblasti výzkumu a vývoje:** Kromě výše uvedených projektů se různé výzkumné instituce a univerzity v České republice aktivně zabývají výzkumem nových technologií a metod pro opětovné použití solárních panelů. Cílem těchto výzkumných aktivit je nalézt inovativní využití vysloužilých solárních panelů, jako je integrace použitých panelů do fotovoltaických systémů integrovaných do budov (BIPV) nebo vývoj decentralizovaných řešení pro skladování energie s využitím vysloužilých panelů. Rozšířením znalostí v oblasti opětovného použití solárních panelů mohou tyto výzkumné iniciativy přispět k identifikaci nových příležitostí a trhů pro druhotné využití fotovoltaických modulů v České republice.

**Spolupráce s průmyslem a partnerství veřejného a soukromého sektoru:** Úspěšné realizaci projektů opětovného použití solárních panelů v České republice napomohla silná spolupráce mezi zúčastněnými stranami z veřejného a soukromého sektoru. Soukromé solární společnosti například spolupracovaly s místními samosprávami a výzkumnými institucemi na testování a zavádění inovativních technologií renovace a opětovného využití solárních panelů, čímž zajistily, že jejich řešení jsou přizpůsobena specifickým potřebám a podmínkám českého trhu. Podporou dialogu a spolupráce mezi různými aktéry v odvětví opětovného použití solárních panelů může Česká republika nadále rozvíjet a zdokonalovat svůj přístup k nakládání s fotovoltaickými moduly po skončení životnosti.

Tyto projekty opětovného využití solárních panelů v České republice ilustrují rozmanité možnosti a aplikace druhotného využití vyřazených fotovoltaických modulů. Rozvojem inovativních technologií, podporou spolupráce mezi zúčastněnými stranami a zvyšováním povědomí veřejnosti přispívají tyto iniciativy k rozvoji udržitelnějšího a oběhového přístupu k nakládání s odpadem ze solárních panelů v České republice. Vzhledem k tomu, že objem vyřazených panelů stále roste, bude důležité navázat na tyto úspěchy a dále zkoumat nová řešení a aplikace pro sekundární využití použitých solárních panelů v ČR.

Závěrem lze říci, že různé projekty opětovného použití solárních panelů v České republice dokládají odhodlání země řešit problémy spojené s fotovoltaickými moduly s ukončenou životností a podporovat udržitelnější a cirkulární solární energetiku. Vzhledem k tomu, že globální trh se solárními panely se stále rozšiřuje, mohou zkušenosti a poznatky získané z těchto projektů poskytnout cenné informace dalším zemím, které se snaží vyvinout vlastní strategie nakládání s vyřazenými solárními panely. Sdílením znalostí a zkušeností může Česká republika sehrát důležitou roli při utváření budoucnosti odvětví opětovného použití solárních panelů doma i v zahraničí.



#### 4.4. Přehled projektů na druhotné využití solárních panelů ve světě

S tím, jak se celosvětově rozšiřuje odvětví solární energie, roste význam udržitelného nakládání s vyřazenými solárními panely a jejich opětovného využití. Různé země převzaly iniciativu k vývoji a realizaci inovativních projektů opětovného použití solárních panelů, které řeší problémy spojené s nakládáním s fotovoltaickým odpadem a podporují oběhový přístup k životnímu cyklu solárních panelů. V této části přinášíme podrobný přehled některých významných projektů opětovného použití solárních panelů po celém světě a zdůrazňujeme jejich cíle, úspěchy a potenciální dopad na globální nakládání s fotovoltaickým odpadem.

**PV CYCLE USA:** Po vzoru úspěšného evropského programu PV Cycle je PV CYCLE USA nezisková organizace, která se věnuje podpoře odpovědného nakládání s fotovoltaickými moduly na konci jejich životnosti ve Spojených státech. Organizace spolupracuje s výrobcí solárních panelů, montážními firmami a společnostmi zabývajícími se nakládáním s odpady na vytvoření celostátní sítě sběrných míst a recyklačních zařízení, která zajišťují, že použité solární panely jsou zpracovávány v souladu s osvědčenými postupy a průmyslovými standardy. PV CYCLE USA také poskytuje školení a podporu partnerům v oblasti recyklace, čímž přispívá k rozvoji kvalifikované pracovní síly v oblasti nakládání s odpadními solárními panely [91].

**ReSiELP (Německo):** Projekt ReSiELP (Recyklace křemíku a odpadních materiálů obsahujících křemík pro udržitelný fotovoltaický průmysl) je iniciativa financovaná německým Spolkovým ministerstvem pro vzdělávání a výzkum. Cílem tohoto projektu je vyvinout inovativní postupy recyklace křemíku a odpadních materiálů obsahujících křemík, včetně solárních panelů. Zpětným získáváním cenných materiálů, jako je křemík, stříbro a hliník, a snižováním dopadu fotovoltaického odpadu na životní prostředí přispívá projekt ReSiELP k rozvoji udržitelnějšího a cirkulárního solárního průmyslu v Německu i mimo něj. Projekt také spolupracuje s mezinárodními partnery, sdílí znalosti a odborné poznatky s cílem posunout současný stav v oblasti technologií recyklace fotovoltaických článků [92].

Tyto projekty opětovného použití solárních panelů z celého světa ilustrují rozmanité možnosti a aplikace sekundárního využití vyřazených fotovoltaických modulů. Zdůrazňují význam inovativních technologií, mezisektorové spolupráce a podpůrných politických rámců při prosazování udržitelných postupů nakládání s fotovoltaickým odpadem. Vzhledem k tomu, že celosvětový objem vyřazených solárních panelů stále roste, bude pro země zásadní poučit se z těchto projektů a přijmout cirkulárnější a ekologicky odpovědnější přístup k nakládání s odpadem ze solárních panelů. Díky sdílení znalostí a zkušeností může mezinárodní společenství spolupracovat na vývoji a zavádění účinných řešení problémů, které přináší rostoucí objem vyřazených solárních panelů, a zajistit tak udržitelnou budoucnost odvětví solární energie.

## 5. Vlastní zpracování

### 5.1. Zhodnocení současného stavu problematiky v ČR

Po analýze současného stavu v České republice v oblasti druhotného využití a recyklace solárních panelů můžeme vyvodit několik závěrů a postřehů. Toto hodnocení se zaměřuje na současné postupy, výzvy a potenciální příležitosti ke zlepšení v oblasti nakládání s odpadem ze solárních panelů v zemi.

**Legislativní rámec:** Česká republika přijala směrnici Evropské unie o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (OEEZ), která stanoví právní základ pro nakládání s vyřazenými solárními panely. Stále však existuje prostor pro zlepšení, pokud jde o stanovení konkrétnějších předpisů a pokynů přizpůsobených odvětví nakládání s fotovoltaickým odpadem. Vytvoření komplexního legislativního rámce pro opětovné použití a recyklaci solárních panelů by pomohlo zajistit dodržování osvědčených postupů a podpořilo by větší investice do této oblasti.

**Recyklační infrastruktura:** Zatímco Česká republika dosáhla pokroku v rozvoji recyklační infrastruktury pro elektronický odpad, kapacita pro recyklaci solárních panelů zůstává omezená. Je třeba rozšířit recyklační infrastrukturu, aby bylo možné pojmout rostoucí objem vyřazených solárních panelů, což bude vyžadovat investice do specializovaného vybavení a technologií. To by umožnilo nejen efektivnější recyklační procesy, ale také podpořilo získávání cenných materiálů z použitých solárních panelů, což by snížilo dopad na životní prostředí a podpořilo oběhové hospodářství.

**Informovanost a účast:** Jednou z výzev v České republice je zvyšování povědomí o významu správné likvidace a recyklace solárních panelů s ukončenou životností. Pro úspěch každého programu nakládání s fotovoltaickým odpadem je zásadní podpora účasti zúčastněných stran, včetně výrobců solárních panelů, instalatérů a koncových uživatelů. Iniciativy, jako jsou osvětové kampaně, vzdělávací programy a pobídky pro správnou likvidaci, mohou pomoci podpořit kulturu odpovědnosti a udržitelnosti v solárním průmyslu.

**Výzkum a inovace:** Česká republika má silnou výzkumnou základnu v oblasti obnovitelných zdrojů energie, ale v oblasti opětovného použití a recyklace solárních panelů existuje potenciál pro další rozvoj. Podpora výzkumu a inovací v této oblasti může země rozvíjet své odborné znalosti a schopnosti v oblasti nakládání s fotovoltaickým odpadem a přispět k celosvětové znalostní základně. Mohly by se tak rovněž vytvořit příležitosti pro mezinárodní spolupráci a výměnu znalostí, což by usnadnilo vývoj účinnějších a udržitelnějších řešení pro nakládání s odpadem ze solárních panelů.

**Spolupráce a partnerství:** Pro účinné řešení problémů spojených s nakládáním s odpadem ze solárních panelů je nezbytný přístup založený na spolupráci. To zahrnuje podporu partnerství mezi různými zúčastněnými stranami, včetně vládních agentur, výzkumných institucí, průmyslových subjektů a nevládních organizací. Spoluprací mohou tyto zúčastněné strany sdružovat

zdroje, sdílet odborné znalosti a vytvářet komplexní strategie na podporu odpovědných postupů nakládání s fotovoltaickým odpadem v České republice.

Souhrnně lze říci, že současný stav v České republice v oblasti druhotného využití a recyklace solárních panelů představuje jak výzvy, tak příležitosti. Řešením nedostatků v legislativním rámci, infrastruktuře a informovanosti a podporou výzkumu, inovací a spolupráce se může země dopracovat k udržitelnějšímu a oběhovému přístupu k nakládání s odpadem ze solárních panelů.

## 5.2. Zhodnocení současného stavu problematiky ve světě

Celosvětová situace v oblasti druhotného využití a recyklace solárních panelů se značně liší a různé země přijímají jedinečné přístupy k řešení problémů spojených s nakládáním s fotovoltaickými moduly po skončení jejich životnosti. V tomto hodnocení prozkoumáme současný stav ve světě a identifikujeme trendy, osvědčené postupy a oblasti, které je možné zlepšit.

Rostoucí povědomí a legislativní pokrok: V celosvětovém měřítku se stále více uznává potřeba odpovědného nakládání s vyřazenými solárními panely. Mnoho zemí zavedlo nebo zavádí legislativu, která se zabývá nakládáním s fotovoltaickým odpadem. Evropská unie například zavedla směrnici o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (WEEE), která stanovuje recyklační cíle a podporuje odpovědnost výrobců. V některých zemích však stále chybí konkrétní předpisy pro nakládání s odpadem ze solárních panelů, což poukazuje na potřebu dalšího vývoje legislativy a její harmonizace napříč státy.

Inovativní recyklační technologie: Technologický pokrok v recyklačních procesech hraje významnou roli při řešení problémů spojených s nakládáním s fotovoltaickým odpadem. Výzkumné a vývojové úsilí na celém světě vedlo ke vzniku inovativních recyklačních technik, které umožňují získávat z vyřazených solárních panelů cenné materiály, jako je křemík, stříbro a hliník. Tyto technologie přispívají ke snížení dopadu fotovoltaického odpadu na životní prostředí a podporují oběhové hospodářství.

Vzestup iniciativ pro opětovné použití solárních panelů: Několik zemí zahájilo projekty a iniciativy, které se zaměřují na opětovné využití vyřazených solárních panelů pro různé aplikace, například pro off-grid energetické systémy, fotovoltaiku integrovanou do budov (BIPV) a solární projekty pro veřejné účely. Tyto iniciativy ukazují potenciál druhotného využití solárních panelů, pomáhají minimalizovat odpad a maximalizovat hodnotu fotovoltaických modulů v průběhu jejich životního cyklu.

Mezinárodní spolupráce a výměna znalostí: Celosvětové společenství si stále více uvědomuje význam spolupráce a výměny znalostí při řešení problémů spojených s nakládáním s odpadem ze solárních panelů. Nadnárodní partnerství, jako je Mezinárodní agentura pro obnovitelné zdroje energie (IRENA) a Program fotovoltaických energetických systémů Mezinárodní energetické agentury (IEA-PVPS), usnadňují sdílení osvědčených postupů, zdrojů a odborných

znalostí mezi jednotlivými zeměmi a podporují vývoj účinných a udržitelných řešení pro nakládání s fotovoltaickým odpadem.

Regionální rozdíly a výzvy: Navzdory pokroku, kterého bylo v některých regionech dosaženo, stále existují značné rozdíly v přijímání a zavádění postupů nakládání s fotovoltaickým odpadem na celém světě. Zejména rozvojové země se mohou potýkat s problémy souvisejícími s omezenou recyklační infrastrukturou, nedostatečnými regulačními rámci a nedostatečnou informovaností zúčastněných stran. Řešení těchto rozdílů vyžaduje cílené úsilí o budování kapacit, podporu investic a vytvoření podpůrného politického prostředí v zemích s méně rozvinutými systémy nakládání s fotovoltaickým odpadem.

Závěrem lze říci, že současný stav v oblasti nakládání s odpadem ze solárních panelů ve světě se vyznačuje pokrokem v oblasti legislativy, technologií a iniciativ spolupráce. Mezi jednotlivými zeměmi a regiony však stále existují rozdíly, což naznačuje potřebu pokračovat v úsilí o řešení nedostatků v infrastruktuře, politice a zapojení zúčastněných stran. Učením se z osvědčených postupů a podporou mezinárodní spolupráce může světové společenství usilovat o udržitelnější a oběhový přístup k nakládání s vyřazenými solárními panely.

## 6. Závěr

### 6.1. Shrnutí výsledků práce

Cílem této bakalářské práce bylo prozkoumat současný stav druhotného využití použitých fotovoltaických panelů v České republice a ve světě. Studie poskytuje ucelený přehled teoretických východisek, včetně principů fungování, historického vývoje, současného využití, životního cyklu a vlivu solárních panelů na životní prostředí. Zabývá se také náklady na recyklaci solárních panelů a zdůrazňuje význam zohlednění ekonomických faktorů při rozhodování o nakládání s fotovoltaickým odpadem.

Výzkum provedený v této práci představuje hloubkovou analýzu současného stavu v České republice a také globální pohled na iniciativy týkající se opětovného použití a recyklace solárních panelů. V České republice jsme identifikovali několik výzev, včetně nedostatků v legislativním rámci, omezené recyklační infrastruktury a potřeby větší informovanosti a účasti zúčastněných stran. Zdůraznili jsme také potenciál pro výzkum, inovace a spolupráci, které by mohly vést ke zlepšení postupů nakládání s fotovoltaickým odpadem.

Celosvětově studie ukazuje pokrok v oblastech, jako jsou legislativa, technologie a iniciativy spolupráce. Přetrvávají však regionální rozdíly a výzvy, zejména v rozvojových zemích s omezenými zdroji a infrastrukturou. Je zřejmé, že je třeba pokračovat v úsilí o řešení těchto rozdílů a podporovat oběhový a udržitelnější přístup k nakládání s odpadem ze solárních panelů.

### 6.2. Doporučení pro další výzkum

Na základě zjištění této bakalářské práce lze navrhnout několik doporučení pro další výzkum:

1. Prozkoumat možnosti vývoje účinnějších a nákladově efektivnějších recyklačních technologií, které by mohly přispět ke zlepšení ekonomické životaschopnosti recyklace solárních panelů a podpořit větší zavádění udržitelných postupů nakládání s odpady.
2. Prozkoumat překážky bránící implementaci legislativy v oblasti nakládání s fotovoltaickým odpadem v zemích s omezeným regulačním rámcem a identifikovat strategie k překonání těchto problémů.
3. Prozkoumat úlohu partnerství veřejného a soukromého sektoru při podpoře investic a inovací v oblasti opětovného použití a recyklace solárních panelů, zejména v regionech s omezenými zdroji a infrastrukturou.
4. Provést srovnávací studie účinnosti různých iniciativ v oblasti opětovného použití a recyklace solárních panelů s cílem určit osvědčené postupy, které lze použít v různých kontextech a regionech.
5. Posoudit potenciál pro vypracování mezinárodních norem a pokynů pro nakládání s fotovoltaickým odpadem, které by mohly pomoci harmonizovat postupy v jednotlivých zemích a podpořit větší spolupráci a výměnu znalostí mezi zúčastněnými stranami.

Závěrem lze říci, že tato bakalářská práce poskytuje cenný přehled o současném stavu v oblasti druhotného využití použitých fotovoltaických panelů v České republice i ve světě. Zdůrazňuje význam pokračujícího výzkumu, inovací a spolupráce při řešení problémů spojených s nakládáním s odpadními solárními panely a při prosazování udržitelnějšího a oběhového přístupu k solární energetice.

## 7. Seznam použitých zdrojů

- [1] GOETZBERGER, Adolf a Volker U. HOFFMANN. *Photovoltaic solar energy generation*. 112. Berlin: Springer-Verlag, 2005. ISBN 35-402-3676-7.
- [2] GREEN, Martin A. Silicon photovoltaic modules: a brief history of the first 50 years. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* [online]. 2005, **13**(5), 447-455 [cit. 2023-03-27]. ISSN 1062-7995. Dostupné z: doi:10.1002/pip.612
- [3] *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications*. 2nd ed. Editor A. J. MCEVOY, editor T. MARKVART, editor Luis CASTAÑER MUÑOZ. Waltham: Academic Press, 2012. ISBN 978-0-12-385934-1.
- [4] PARIDA, Bhubaneswari, S. INIYAN a Ranko GOIC. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2011, **15**(3), 1625-1636 [cit. 2023-03-27]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2010.11.032
- [5] KALOGIROU, Soteris A. *Solar energy engineering: processes and systems*. 2nd Edit. Oxford: Academic Press, 2009. ISBN 978-0-12-374501-9.
- [6] GREEN, Martin A., Yoshihiro HISHIKAWA, Ewan D. DUNLOP, Dean H. LEVI, Jochen HOHL-EBINGER a Anita W.Y. HO-BAILLIE. Solar cell efficiency tables (version 52). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* [online]. 2018, **26**(7), 427-436 [cit. 2023-03-27]. ISSN 1062-7995. Dostupné z: doi:10.1002/pip.3040
- [7] *Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny* [online]. In: . Plzeň: Czech Nature Energy, a. s., 2023 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu>
- [8] IEA. Renewable energy market update. In: *iea.org* [online]. Paris: License: CC BY 4.0, 2020 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update>
- [9] GREEN, Martin. *Third generation of photovoltaics : advanced solar energy conversion.: Springer series in photonics*. Vol. 12. Berlin: Springer, 2003. ISBN 3-540-40137-7.
- [10] PERLIN, John a Ken BUTTI. *A Golden Thread : 2500 Years of Solar Architecture and Technology*. Vol. 9(2). New York and London: Van Nostrand Reinhold Company, 1980. ISBN 9780917352089.

- [11] NELSON, Jenny. *The physics of solar cells*. 3rd ed. London: Imperial College Press, 2003. ISBN 1-86094-340-3.
- [12] BHUSHAN, Bharat, Dan LUO, Scott R. SCHRICKER, Wolfgang SIGMUND a Stefan ZAUSCHER, ed. *Handbook of Nanomaterials Properties* [online]. 4th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014 [cit. 2023-03-27]. ISBN 978-3-642-31106-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-31107-9
- [13] DIMROTH, Frank, Matthias GRAVE, Paul BEUTEL et al. Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* [online]. 2014, **22**(3), 277-282 [cit. 2023-03-27]. ISSN 10627995. Dostupné z: doi:10.1002/pip.2475
- [14] YAMAGUCHI, Masafumi, Frank DIMROTH, John F. GEISZ a Nicholas J. EKINS-DAUKES. Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency. *Journal of Applied Physics* [online]. 2021, **129**(24) [cit. 2023-03-27]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/5.0048653
- [15] SKOPLAKI, E. a J.A. PALYVOS. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy* [online]. 2009, **83**(5), 614-624 [cit. 2023-03-27]. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2008.10.008
- [16] HERRANDO, María a Alba RAMOS. Photovoltaic-Thermal (PV-T) Systems for Combined Cooling, Heating and Power in Buildings: A Review. *Energies* [online]. 2022, **15**(9) [cit. 2023-03-27]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15093021
- [17] GUEYMARD, Christian. *SMARTS2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and performance assessment* [online]. Cocoa Florida, 1995 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/fsec-pf-270-95.pdf>. University of Central Florida.
- [18] KAZMERSKI, Lawrence L. Photovoltaics at the Tipping Point: Taking Us From the Evolutionary to the Revolutionary. In: GOSWAMI, D. Yogi a Yuwen ZHAO, ed. *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V)* [online]. Vol. V. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, s. 110-117 [cit. 2023-03-27]. ISBN 978-3-540-75996-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-75997-3\_16
- [19] ALBRECHT, Steve, Michael SALIBA, Juan Pablo CORREA BAENA et al. Monolithic perovskite/silicon-heterojunction tandem solar cells processed at low temperature. *Energy & Environmental Science* [online]. 2016, **9**(1), 81-88 [cit. 2023-03-27]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: doi:10.1039/C5EE02965A



- [20] GRÄTZEL, Michael. Solar Energy Conversion by Dye-Sensitized Photovoltaic Cells. *Inorganic Chemistry* [online]. 2005, **44**(20), 6841-6851 [cit. 2023-03-27]. ISSN 0020-1669. Dostupné z: doi:10.1021/ic0508371
- [21] LI, Gang, Rui ZHU a Yang YANG. Polymer solar cells. *Nature Photonics* [online]. 2012, **6**(3), 153-161 [cit. 2023-03-27]. ISSN 1749-4885. Dostupné z: doi:10.1038/nphoton.2012.11
- [22] CHAPIN, D. M., C. S. FULLER a G. L. PEARSON. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics* [online]. 1954, **25**(5), 676-677 [cit. 2023-03-27]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.1721711
- [23] GLASER, Peter E. Power from the Sun: Its Future. *Science* [online]. 1968, **162**(3856), 857-861 [cit. 2023-03-27]. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.162.3856.857
- [24] YERGIN, Daniel. Ensuring Energy Security. *Foreign Affairs* [online]. 2006, **85**(2) [cit. 2023-03-27]. ISSN 00157120. Dostupné z: doi:10.2307/20031912
- [25] KAZMERSKI, Lawrence L. Photovoltaics: A review of cell and module technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 1997, **1**(1-2), 71-170 [cit. 2023-03-27]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/S1364-0321(97)00002-6
- [26] RAY, Rajeev, Abdus Salam SARKAR a Suman Kalyan PAL. Improving performance and moisture stability of perovskite solar cells through interface engineering with polymer-2D MoS<sub>2</sub> nanohybrid. *Solar Energy* [online]. 2019, **193**, 95-101 [cit. 2023-03-27]. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2019.09.055
- [27] GREEN, Martin A., Anita HO-BAILLIE a Henry J. SNAITH. The emergence of perovskite solar cells. *Nature Photonics* [online]. 2014, **8**(7), 506-514 [cit. 2023-03-27]. ISSN 1749-4885. Dostupné z: doi:10.1038/nphoton.2014.134
- [28] Perovskite Solar Cells. In: *Nrel.gov* [online]. Washington, 2022 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/>
- [29] WÜSTENHAGEN, Rolf, Maarten WOLSINK a Mary Jean BÜRER. Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy* [online]. 2007, **35**(5), 2683-2691 [cit. 2023-03-27]. ISSN 03014215. Dostupné z: doi:10.1016/j.enpol.2006.12.001
- [30] MENDONCA, Miguel. *Powering the Green Economy* [online]. 1st Ed. London: Routledge, 2009 [cit. 2023-03-27]. ISBN 9781136545245. Dostupné z: doi:10.4324/9781136545245

- [31] Renewable Capacity Statistics 2021. In: *Irena.org* [online]. Bonn Germany: IRENA, 2021 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.irena.org/>
- [32] HERNANDEZ, Rebecca R., Madison K. HOFFACKER a Christopher B. FIELD. Land-Use Efficiency of Big Solar. *Environmental Science & Technology* [online]. 2014, **48**(2), 1315-1323 [cit. 2023-03-21]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es4043726
- [33] PINTÉR, Gábor, Nóra BARANYAI, Alec WILIAMS a Henrik ZSIBORÁCS. Study of Photovoltaics and LED Energy Efficiency: Case Study in Hungary. *Energies* [online]. 2018, **11**(4) [cit. 2023-03-27]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en11040790
- [34] *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. ISO 14040:2006. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
- [35] FTHENAKIS, V.M. a H.C. KIM. Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy* [online]. 2011, **85**(8), 1609-1628 [cit. 2023-03-27]. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2009.10.002
- [36] ALONSO, Elisa, Andrew M. SHERMAN, Timothy J. WALLINGTON, Mark P. EVERSON, Frank R. FIELD, Richard ROTH a Randolph E. KIRCHAIN. Evaluating Rare Earth Element Availability: A Case with Revolutionary Demand from Clean Technologies. *Environmental Science & Technology* [online]. 2012, **46**(6), 3406-3414 [cit. 2023-03-27]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es203518d
- [37] JUNGBLUTH, Niels, Roberto DONES a Rolf FRISCHKNECHT. Life Cycle Assessment of Photovoltaics; Update of theecoinvent Database. *MRS Proceedings* [online]. 2007, **1041**, 1041-01-03 [cit. 2023-03-27]. ISSN 0272-9172. Dostupné z: doi:10.1557/PROC-1041-R01-03
- [38] SILVA, Mafalda a Hanne RAADAL. *Life cycle GHG emissions of renewable and non-renewable electricity generation technologies*. Aalborg, 2019. Aalborg University.
- [39] Solar explained. U.S. Energy Information Administration. In: *EIA* [online]. Washington: U.S. Energy Information Administration, 2022 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/>
- [40] JORDAN, D. C. a S. R. KURTZ. Photovoltaic Degradation Rates-an Analytical Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* [online]. 2013, **21**(1), 12-29 [cit. 2023-03-27]. ISSN 10627995. Dostupné z: doi:10.1002/pip.1182
- [41] RAUGEI, Marco, Silvia BARGIGLI a Sergio ULGIATI. Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si. *Energy* [online]. 2007, **32**(8), 1310-1318 [cit. 2023-03-27]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2006.10.003

- [42] FIANDRA, Valeria, Lucio SANNINO, Concetta ANDREOZZI a Giorgio GRADITI. End-of-life of silicon PV panels: A sustainable materials recovery process. *Waste Management* [online]. 2019, **84**, 91-101 [cit. 2023-03-27]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2018.11.035
- [43] LATUNUSSA, Cynthia E.L., Fulvio ARDENTE, Gian Andrea BLENGINI a Lucia MANCINI. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2016, **156**, 101-111 [cit. 2023-03-27]. ISSN 09270248. Dostupné z: doi:10.1016/j.solmat.2016.03.020
- [44] ALSEMA, E. A. *Presented at the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 4-8 September 2006: ENVIRONMENTAL IMPACTS OF PV ELECTRICITY GENERATION - A CRITICAL COMPARISON OF ENERGY SUPPLY OPTIONS* [online]. 2006, **2006** [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Presented-at-the-21st-European-Photovoltaic-Solar-A-Alsema/620d7670b9654c52c1d3bbeb06289e00bfecd2fb>
- [45] FTHENAKIS, Vasilis M. End-of-life management and recycling of PV modules. *Energy Policy* [online]. 2000, **28**(14), 1051-1058 [cit. 2023-03-28]. ISSN 03014215. Dostupné z: doi:10.1016/S0301-4215(00)00091-4
- [46] KISHORE, Jugal a MONIKA. E-Waste management: As a challenge to public health in India. *Indian Journal of Community Medicine* [online]. 2010, **35**(3) [cit. 2023-03-28]. ISSN 0970-0218. Dostupné z: doi:10.4103/0970-0218.69251
- [47] ADENIYI, OD, DA ALI, MA OLUTOYE, MI ADENIYI, OS AZEEZ, AJ OTARU a BO ENIAFE. Modeling and Simulation of Energy Recovery from a Photovoltaic Solar cell. *Nigerian Journal of Technological Research* [online]. 2016, **11**(1), 26-31 [cit. 2023-03-28]. ISSN 0795-5111. Dostupné z: doi:10.4314/njtr.v11i1.4
- [48] What Is End-of-Life Management for Photovoltaics?. In: *Energy.gov* [online]. 2020 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.energy.gov>
- [49] WADE, A., P. SINHA, K. DROZDIK a E. BRUTSCH. Beyond Waste – The Fate of End-of-Life Photovoltaic Panels from Large Scale PV Installations in the EU. The Socio-Economic Benefits of High Value Recycling Compared to Re-Use. *33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition* [online]. Amsterdam, 2017, (511), 1507-1514 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: doi:10.4229/EUPVSEC20172017-5EO.1.1
- [50] *RENOVACE, OPRAVA POŠKOZENÝCH FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ* [online]. In: . Solarmonitoring s.r.o., 2023 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z:

<https://www.solarmon.eu/cz/produkty-a-sluzby/renovace-oprava-poskozenych-panelu/>

- [51] TSANAKAS, John A., Arvid HEIDE, Tadas RADAVIČIUS, Julius DENAFAS, Elisabeth LEMAIRE, Ke WANG, Jef POORTMANS a Eszter VOROSHAZI. Towards a circular supply chain for PV modules: Review of today's challenges in PV recycling, refurbishment and re-certification. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* [online]. 2020, **28**(6), 454-464 [cit. 2023-03-31]. ISSN 1062-7995. Dostupné z: doi:10.1002/pip.3193
- [52] KAMMEN, Daniel M. a Charles KIRUBI. Poverty, Energy, and Resource Use in Developing Countries. *Annals of the New York Academy of Sciences* [online]. 2008, **1136**(1), 348-357 [cit. 2023-03-28]. ISSN 00778923. Dostupné z: doi:10.1196/annals.1425.030
- [53] SICA, Daniela, Ornella MALANDRINO, Stefania SUPINO, Mario TESTA a Maria Claudia LUCCHETTI. Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, **82**, 2934-2945 [cit. 2023-03-28]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.10.039
- [54] BARBOSE, G. *Tracking the Sun II: The Installed Cost of Photovoltaics in the U.S. from 1998-2008*. [online]. 2009 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://escholarship.org/uc/item/15j2t6tj>. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [55] PÉREZ-LOMBARD, Luis, José ORTIZ a Christine POUT. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings* [online]. 2008, **40**(3), 394-398 [cit. 2023-03-28]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.007
- [56] STOLZ, Philippe a Rolf FRISCHKNECHT. *Life Cycle Assessment of Current Photovoltaic Module Recycling* [online]. Uster, 2017 [cit. 2023-03-28]. IEA PVPS Task 12. National Renewable Energy Laboratory.
- [57] WECKEND, Stephanie, Garvin HEATH a Andreas WADE. *End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels* [online]. 1st Ed. Bonn: International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power, 2016 [cit. 2023-03-28]. ISBN 978-92-95111-99-8. Dostupné z: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>
- [58] PANDEY, Siddhi Vinayak, Shriharshini GANAPURAM a Alok Kumar SINGH. A Review on Advancements in Photovoltaic Cells. In: KUMAR, Niraj, Szalay TIBOR, Rahul SINDHWANI, Jaesun LEE a Priyank SRIVASTAVA, ed. *Advances in Interdisciplinary*

- Engineering* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2021, s. 227-236 [cit. 2023-03-28]. Lecture Notes in Mechanical Engineering. ISBN 978-981-15-9955-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-15-9956-9\_23
- [59] NDZIBAH, Emmanuel, Giovanna ANDREA PINILLA-DE LA CRUZ a Ahm SHAMSUZZOHA. End of life analysis of solar photovoltaic panel: roadmap for developing economies. *International Journal of Energy Sector Management* [online]. 2021, **16**(1), 112-128 [cit. 2023-03-28]. ISSN 1750-6220. Dostupné z: doi:10.1108/IJESM-11-2020-0005
- [60] GUPT, Yamini a Samraj SAHAY. Review of extended producer responsibility: A case study approach. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy* [online]. 2015, **33**(7), 595-611 [cit. 2023-03-28]. ISSN 0734-242X. Dostupné z: doi:10.1177/0734242X15592275
- [61] LUNARDI, Marina Monteiro, Juan Pablo ALVAREZ-GAITAN, José I. BILBAO a Richard CORKISH. A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. In: ZAIDI, Beddiaf, ed. *Solar Panels and Photovoltaic Materials* [online]. InTech, 2018 [cit. 2023-03-28]. ISBN 978-1-78923-434-3. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.74390
- [62] *DIRECTIVE 2012/19/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL: of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*. In: . 2012, L 197/38. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:0038:0071:EN:PDF>
- [63] D'ADAMO, Idiano, Michela MILIACCA a Paolo ROSA. Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *International Journal of Photoenergy* [online]. 2017, **2017**, 1-6 [cit. 2023-03-28]. ISSN 1110-662X. Dostupné z: doi:10.1155/2017/4184676
- [64] FTHENAKIS, Vasilis M. Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2004, **8**(4), 303-334 [cit. 2023-03-28]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2003.12.001
- [65] MULAZZANI, Andrea, Panagiotis ELEFTHERIADIS a Sonia LEVA. Recycling c-Si PV Modules: A Review, a Proposed Energy Model and a Manufacturing Comparison. *Energies* [online]. 2022, **15**(22) [cit. 2023-03-28]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15228419
- [66] BUCHERT, M. a D. SCHÜLER. *Critical Metals for Sustainable Technologies and their Recycling Potential* [online]. Freiburg, 2009 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.oeko.de//oekodoc/1070/2009-129-en.pdf>. Studie. Oeko-Institut e.V.

- [67] DENG, Rong, Nathan L. CHANG, Zi OUYANG a Chee Mun CHONG. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, **109**, 532-550 [cit. 2023-03-28]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2019.04.020
- [68] NORGATE, T. a N. HAQUE. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2010, **18**(3), 266-274 [cit. 2023-03-28]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2009.09.020
- [69] RABAIA, Malek Kamal Hussien, Mohammad Ali ABDELKAREEM, Enas Taha SAYED, Khaled ELSAID, Kyu-Jung CHAE, Tabbi WILBERFORCE a A.G. OLABI. Environmental impacts of solar energy systems: A review. *Science of The Total Environment* [online]. 2021, **754** [cit. 2023-03-28]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141989
- [70] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change* [online]. 1st Ed. New York: Cambridge University Press, 2015 [cit. 2023-03-28]. ISBN 9781107058217. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781107415416
- [71] NUGENT, Daniel a Benjamin K. SOVACOOOL. Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey. *Energy Policy* [online]. 2014, **65**, 229-244 [cit. 2023-03-28]. ISSN 03014215. Dostupné z: doi:10.1016/j.enpol.2013.10.048
- [72] Czech Republic 2021. In: *lea.org* [online]. Paris: IEA, 2021 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.iea.org>
- [73] BULKOVÁ, Gabriela, Jan NOHEJL a Jaroslav CHARVÁT. *Plán odpadového hospodářství České republiky pro období 2015–2024 s výhledem do roku 2035* [online]. (1. Aktualizace 2021). Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2021 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/cz/poh\\_cr\\_prislusne\\_dokumenty](https://www.mzp.cz/cz/poh_cr_prislusne_dokumenty)
- [74] About us. In: *Pvcycle.org* [online]. Brussels: PV CYCLE AISBL, 2023 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://pvcycle.org/>
- [75] Kdo jsme. In: *Solarniasociace.cz* [online]. Praha: Solární asociace, 2023 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.solarniasociace.cz/>
- [76] SECOND LIFE PV MODULES. In: *SECOND LIFE PV MODULES* [online]. 2016 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.circusol.eu/>
- [77] About Us. In: *About Us* [online]. BRUSSELS: esmc.solar, 2023 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://esmc.solar/about-us/>

- [78] *Photovoltaic Panels, Energy Storage Batteries, and Electric Vehicle Batteries* [online]. In: . Sacramento: calrecycle.ca.gov, 2023 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://calrecycle.ca.gov/reducewaste/energystorage/>
- [79] DREVES, Harrison. *Long-Lived? Highly Recyclable? Priorities for Solar Panels in a Circular Economy* [online]. In: . Washington: NREL, 2022 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/news/program/2022/long-lived-highly-recyclable-priorities-for-solar-panels-in-a-circular-economy.html>
- [80] *End-of-Life Management for Solar Photovoltaics: Recycling* [online]. In: . Washington: SEIA, 2020 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.seia.org/end-life-management-photovoltaics>
- [81] *China to Crank Up Solar Panel Recycling as Scrappage Set to Mount From 2025* [online]. In: . Shanghai: YICAI, 2022 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.yicaiglobal.com/news/china-shall-promote-pv-modules-recycling-miit-says>
- [82] *Yingli Solar to put 8GW of new capacity into operation during construction of China's first recycling demonstration line* [online]. In: . Hauptsitz Yingli Energy, 2022 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: [https://www.yinglisolar.com/ge/newsInfo\\_1322.html](https://www.yinglisolar.com/ge/newsInfo_1322.html)
- [83] *How the recycled PV modules are made and the detailed production process* [online]. In: . Kunshan: Shanghai FeiHang International Trade Co., Ltd., 2018 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: [https://www.pvrecycle.cn/news/how\\_the\\_recycled\\_pv\\_modules\\_are\\_made\\_and\\_the\\_detailed\\_production\\_process](https://www.pvrecycle.cn/news/how_the_recycled_pv_modules_are_made_and_the_detailed_production_process)
- [84] XU, Xinhai, Dengguo LAI, Wenxuan WANG a Yin WANG. A systematically integrated recycling and upgrading technology for waste crystalline silicon photovoltaic module. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2022, **182** [cit. 2023-03-30]. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2022.106284
- [85] KENNING, Tom. *Japan issues guidelines on 'proper disposal' of used solar modules* [online]. In: . London: PV-Tech, 2017 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.pv-tech.org/japan-issues-guidelines-on-proper-disposal-of-used-solar-modules/>
- [86] TOMIOKA, OSAMU. *Japanese companies work on ways to recycle a mountain of solar panels* [online]. In: . TOKYO: Nikkei Asia, 2016 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://asia.nikkei.com/Business/Biotechnology/Japanese-companies-work-on-ways-to-recycle-a-mountain-of-solar-panels>

- [87] VERMA LAL, Preeti. *MNRE proposes mandatory recycling of solar PV glass* [online]. In: . PV magazine, 2019 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.pv-magazine-india.com/2019/04/05/mnre-proposes-mandatory-recycling-of-solar-pv-glass/>
- [88] WANGCHUK, Rinchen Norbu. *IISc Researchers' Idea Can Turn India's Dumped Solar Panels Into Sustainable Homes* [online]. In: . The Better India, 2022 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.thebetterindia.com/287506/iisc-bengaluru-reuse-upcycle-old-decommissioned-solar-panels-as-building-material/>
- [89] MATAJS, Vladimír. *Jak se recyklují solární panely a kdo to zaplatí?* [online]. In: . Solární Experti s.r.o., 2021 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.solarniexpert.cz/kolik-stoji-recyklace-solarnich-panelu/>
- [90] KLUSÁČEK, Petr, Marek HAVLÍČEK, Petr DVOŘÁK, Josef KUNC, Stanislav MARTINÁT a Petr TONEV. From Wasted Land to Megawatts: How to Convert Brownfields Into Solar Power Plants (the Case of the Czech Republic). *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendeliana Brunensis* [online]. 2014, **62**(3), 517-528 [cit. 2023-03-30]. ISSN 12118516. Dostupné z: [doi:10.11118/actaun201462030517](https://doi.org/10.11118/actaun201462030517)
- [91] *PV CYCLE USA* [online]. In: . Brussels: PV CYCLE USA, 2023 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://pvcycle.org/pv-cycle-usa/>
- [92] *ReSiELP Project Overview* [online]. In: . Grenoble: French Alternative Energies and Atomic Energy Commission, 2017 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.resielp.eu/Pages/ProjectAbout.aspx>