

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Možnosti recyklace fotovoltaických panelů**

Options of recycling of the photovoltaic panels

**Daniela Ebrlová**

**Plzeň 2016**

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

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Daniela EBRLOVÁ**  
Osobní číslo: **E12B0385P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Technická ekologie**  
Název tématu: **Možnosti recyklace fotovoltaických panelů**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište současný stav a množství instalace FV panelů v ČR a zahraničí.
2. Analyzujte možnosti a způsoby materiálové recyklace FV panelů.
3. Analyzujte zpracovatelský potenciál pro materiálovou recyklaci FV panelů.
4. Navrhněte systém nakládání s FV panely po ukončení jejich životnosti.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Eduard Ščerba, Ph.D.**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

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



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

V Plzni dne 15. října 2015

**Abstrakt**

EBRLOVÁ, D.

*Možnosti recyklace fotovoltaických panelů*

Bakalářská práce.

Plzeň: Fakulta elektrotechnická ZČU v Plzni, 2016

**Klíčová slova:** fotovoltaický panel, fotovoltaický článek, fotovoltaická elektrárna

Tématem bakalářské práce je „*Možnosti recyklace fotovoltaických panelů*“. Práce se zabývá problematikou recyklace fotovoltaických panelů na konci jejich životnosti. V první části nalezneme vývoj panelů v rámci České republiky i v rámci zahraničních států. Dále je probrán princip funkce článků a dělení panelů podle druhu. Součástí práce je také rozbor jednotlivých složek panelu, spolu s možností dalšího zpracování. Důležitou částí je popis dosud známých metod recyklace panelů a rozbor jejich kladů a záporů.

**Abstract**

EBRLOVÁ, D.

Options of recycling of the photovoltaic panels

Bachelor thesis

Plzen Faculty of Electrical Engineering, University of West Bohemia in Pilsen 2016

**Keywords:** photovoltaic panels, photovoltaic cell, photovoltaic power plant

The theme of the thesis is "Options of recycling of the photovoltaic panels." Thesis deals with the recycling of photovoltaic panels at the end of it's life. The first part contains the development of the panels in the Czech Republic and within foreign countries as well. The principle of function of the cells and the way of dividing panels by type is also discussed. The work also includes analysis of the individual components of the panel, along with the possibility of further processing. The important part, is the description of the all known methods for recycling the panels and the analysis of their pros and cons.

**Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma

*Možnosti recyklace fotovoltaických panelů*

vypracovala samostatně pod odborným dohledem vedoucího bakalářské práce za použití pramenů uvedených v příložené bibliografii.

V Plzni, dne 17. 5. 2016

.....

podpis autora

### **Poděkování**

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Mgr. Eduardu Ščerbovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a čas, který mi věnoval. Dále bych chtěla poděkovat svým nejbližším za jejich trpělivost a bezmeznou podporu po celou dobu studia.

**Obsah**

1. Vývoj fotovoltaických panelů .....	11
1.1 Historie FV panelů v zahraničí .....	11
1.2 Historie FV panelů v ČR.....	12
1.3 Současný stav FV panelů v zahraničí.....	13
1.4 Současný stav FV panelů v ČR.....	15
2. Dělení fotovoltaických panelů.....	17
2.1 Principy FV panelů .....	17
2.2 Druhy FV panelů.....	19
3. Materiálová recyklace fotovoltaických panelů.....	21
3.1 Termická metoda .....	21
3.2 Mechanicko – chemická metoda.....	22
3.3 Recyklované složky .....	23
4. Zpracování recyklovaných složek fotovoltaických panelů .....	25
4.1 Recyklace skla.....	25
4.2 Recyklace hliníku a plastových komponent.....	26
4.3 Recyklace křemíku.....	26
5. Recyklace fotovoltaických panelů.....	27
5.1 SWOT analýza .....	27
5.2 Zodpovědnost za recyklaci.....	29



**Seznam použitých zkratek**

ČEZ České Energetické Závody

ČR Česká republika

EU Evropská unie

FV Fotovoltaický

FVE Fotovoltaická elektrárna

JE Jaderná elektrárna

KW Kilo-watt

MW Mega-watt

## Úvod

Pro zpracování bakalářské práce jsem si zvolila téma: Možnosti recyklace fotovoltaických panelů. Důvodem výběru tématu bylo prohloubení znalostí v oblasti této problematiky.

Cílem mé práce bylo porovnat klady a zápory dosud známých metod likvidace fotovoltaických panelů, kterými jsou termická a mechanicko-chemická recyklace. Práce je rozdělena do pěti kapitol. První kapitola obsahuje vývoj panelů v České republice a v zahraničních státech. Druhá kapitola popisuje princip funkce a jednotlivé druhy FV panelů. Základem třetí kapitoly je popis dvou metod pro likvidaci panelů, kterými jsou, jak jsem již zmínila, termická a mechanicko-chemická recyklace. Kapitola obsahuje také rozdělení jednotlivých recyklovatelných složek panelu. Na tuto část tematicky navazuje předposlední kapitola, v níž jsou uvedeny možnosti dalšího zpracování jednotlivých složek, které se v panelu objevují. V poslední kapitole je navržena SWOT analýza metod pro recyklaci panelů, popis kladů a záporů jednotlivých metod, ve kterém se objevuje také mé vlastní doporučení pro likvidaci v rámci České republiky. V druhé části kapitoly je zamyšlení nad otázkou „*Kdo bude mít za úkol zajistit recyklaci vyřazených panelů na konci životnosti?*“.

Práce je zaměřena na přiblížení problematiky recyklace fotovoltaických panelů, o které se v současné době hodně hovoří, ale bohužel v současné době není znám účinný způsob, který by byl vhodný pro všechny druhy FV panelů.

## 1. Vývoj fotovoltaických panelů

### 1.1 Historie FV panelů v zahraničí

Již v padesátých letech devatenáctého století byl vyroben první fotovoltaický článek, který měl sloužit pro výrobu elektřiny. K tomuto objevu došlo v roce 1954 v laboratořích, které jsou dnes známé jako Bell Labs.

I když bylo v průběhu let vytvořeno několik druhů FV článků, na prvním místě stále zůstává materiál, který svými vlastnostmi při jejich výrobě dominuje, a to křemík. Při výrobě prvního článku tomu nebylo jinak. Byl také vytvořen z monokrystalického křemíku, avšak jeho účinnost byla pouhých 6%. Nevýhodou nebyla ale pouze velmi nízká účinnost, ale také dosti složité technologické postupy, u kterých byla důležitá například existence vakua.

Bylo tedy zapotřebí zamyslet se nad tím, jak vytvořit FV článek s mnohem lepšími vlastnostmi. Zlom přišel v 70. letech, kdy se začalo intenzivně pracovat na zlepšení účinnosti, která se zvýšila přibližně o 150%, a to z předchozích 6% na účinnost cca patnáctiprocentní. Dalším důležitým krokem bylo prodloužení životnosti určitými technologickými postupy, se kterými ruku v ruce souvisí také pokles cen. Tyto technologické postupy se změnily především ve výrobě, kde již nebylo nutné vakuum, ale pracovalo se za použití normálního tlaku. Další markantní změna nastala se snížením spotřeby surovin a energií.

Nejstarší FV panely, které jsou dosud v provozu, byly instalovány na počátku 80. let. Jednalo se o články z krystalického křemíku, u kterých byla předpokládána životnost minimálně 30 let s tím, že v poslední třetině své životnosti začnou ztrácet i svůj výkon. Výsledky zkoušek těchto instalací jsou ale mnohem lepší, než bylo očekáváno.

Skutečného rozmachu se FV panely dočkaly až po zavedení určitých systémů podpory – dotačních programů. Mezi první země s dotačním programem se řadilo Japonsko a Německo. Podobné dotační programy byly v průběhu let zavedeny i v řadě dalších zemí.

Zdroj: [1]

## 1.2 Historie FV panelů v ČR

I když instalace fotovoltaických panelů ve světě začala již na počátku 80. let minulého století, v České republice začal jejich rozmach téměř o deset let později. První fotovoltaickou elektrárnu, která byla v České republice postavena, uvedla do provozu společnost ČEZ roku 1998. Tato elektrárna, jejíž výkon činil za slunečného počasí až 10kW, byla postavena na vrcholu hory Mravenečník v pohoří Jeseníků. Jelikož bylo toto místo značně odlehlé, nastával problém s údržbou a ostrahou. Tyto okolnosti v roce 2003 zapříčinily přesun elektrárny do areálu JE Dukovany. Zde si ji mohou návštěvníci prohlédnout při exkurzi do Informačního centra.



[Obrázek 1: První FV elektrárna v ČR]

Zdroj: [2]

Nejen ve světě, ale i v České republice došlo k zavedení systému podpory pro výstavbu FV panelů. Největší boom přišel v roce 2008, kdy se stát rozhodl garantovat výkupní cenu elektřiny, která byla v rámci podpory obnovitelných zdrojů mnohem přitažlivější než od jiných dodavatelů.

### 1.3 Současný stav FV panelů v zahraničí

Zatímco v minulých letech patřilo Německo či Španělsko k zemím, které s výstavbou FV panelů neváhají, na konci roku 2015 je s velkým náskokem předčila Francie. I když se tato země držela dlouhou dobu stranou, vše se změnilo poté, co Francouzská energetická skupina Neoen otevřela nedaleko města Bordeaux největší farmu s FV panely v Evropě. Tento megapark, jehož rozloha činí přibližně 2,5 kilometru čtverečních, má kapacitu 300MW a je schopný dodat energii až pro 300 tisíc obyvatel.



[Obrázek 2: Největší FV farma v Evropě]

Zdroj:[4]

Přibližně měsíc poté, co fotovoltaickou farmou překvapila Francie, dokončila své největší FV elektrárny také Austrálie – jsou jimi Nyngan s výkonem 102 MW a Broken Hill, která má výkon přibližně o polovinu nižší. Pro jejich výstavbu bylo použito více než 2 miliony solárních panelů a předpokládá se, že by měli pokrýt spotřebu 50 tisíc domácností. Díky ideálním klimatickým podmínkám, je právě Austrálie kontinent s největším množstvím FV panelů instalovaných na střechách budov. Právě ty ale vytěsnili instalace velkých elektráren, což se má, dle informací, v příštích letech změnit.



[Obrázek 3: Elektrárna Nyngan]

Zdroj: [5]

V červnu roku 2015 byla uvedena do provozu FV elektrárna Solar Star, která se svým výkonem 579MW řadí na první místo největších solárních elektráren světa. Tato elektrárna se nachází v Americkém státě Kalifornie, ve které v současnosti nalezneme hned 3 největší solární elektrárny světa.

NÁZEV	VÝKON	STÁT
Solar Star	579MW	Kalifornie
Topaz Solar Farm	550 MW	Kalifornie
Desert Sunlight Solar Farm	550MW	Kalifornie
Copper Mountain Solar Facility	458MW	Nevada
Longyangxia Dam Solar Park	320MW	Čína
Agua Caliente Solar Project	290 MW	Arizona

[Tabulka 1: Přehled největších elektráren světa]

Zdroj: [3]

Do výstavby FV elektráren se v příštích letech chystá také nejlidnatější město Spojených arabských emirátů, a to Dubaj. Do roku 2030 toto město chystá extrémní nárůst instalací na střeách budov, které by se mělo týkat všech rodinných a bytových domů. Další plán, který město chystá splnit do roku 2030, je rozšíření solárního Dubajského parku, kde by měl proběhnout nárůst výkonu z nyníšších 13 MW na 5000MW.



[Obrázek 4: Hotel Vertical Village – Dubaj]

Zdroj:[6]

### 1.4 Současný stav FV panelů v ČR

Také Česká republika se může těšit z množství nových instalací FV panelů na střeších rodinných domů. V druhé polovině minulého roku odstartoval příjem žádostí na podporu malých FV elektráren, v rámci dotačního programu Nová zelená úsporám.

I když Ministerstvo životního prostředí pomáhá díky poskytování dotací k rozšíření počtu malých FV elektráren, přesto v České republice převládají sluneční elektrárny, instalované mimo střešní prostory.

V tabulce č. 2 můžete vidět seznam největších českých FV elektráren:

NÁZEV	VÝKON	MÍSTO
FVE Ralsko Ra1	38,30MW	Ralsko
FVE Vepřek	29,90MW	Nová Ves - Vepřek
FVE Ševětín	29,90MW	Ševětín
FVE Letiště Tuřany	21,20MW	Brno - Tuřany
FVE Mimoň Ra3	17,50MW	Mimoň
FVE Vranovská Ves	16,00MW	Vranovská Ves
FVE Stříbro	13,60MW	Stříbro
FVE ŽV-SUN	13,00MW	Chomutov
FVE Uherský Brod	10,30MW	Uherský Brod
FVE Chrudichromy	10,00MW	Chrudichromy

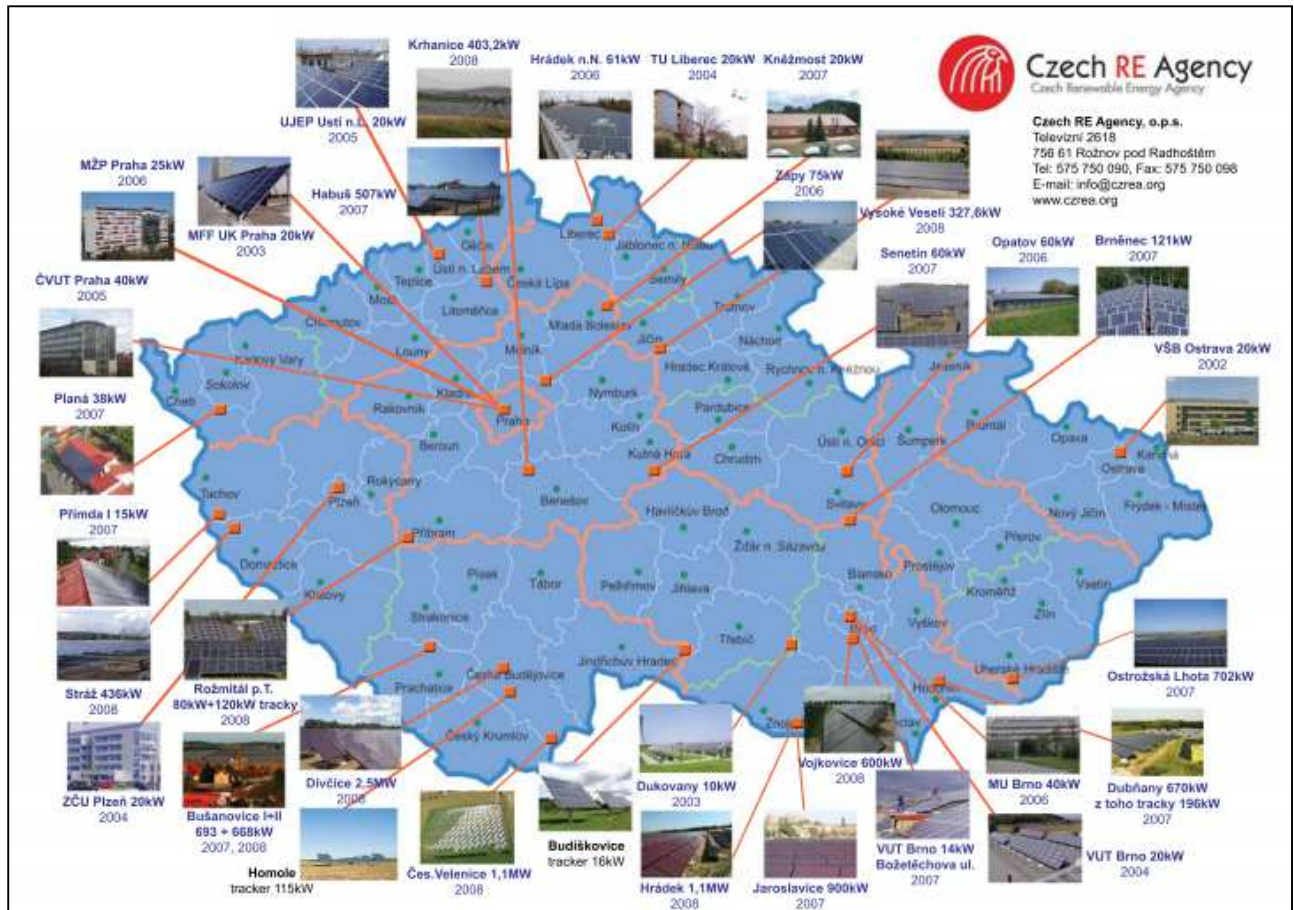
[Tabulka 2: Největší FVE v ČR]

Zdroj: [7]

Za největší sluneční elektrárnu v České republice je považována FVE Ralsko Ra1, která se nachází v místě bývalého vojenského prostoru. Ten je z hlediska sluneční energie jedním z nejvhodnějších míst pro fotovoltaické elektrárny.

FVE Ralsko Ra1 je složena ze 4 menších zdrojů, které jsou od sebe vzdáleny několik kilometrů – jedná se o Ralsko Jabloneček Ra 1a, Ralsko Jabloneček Ra 1b, Ralsko Jabloneček Ra 1c a Ralsko Ra2 Jih. Spojením těchto čtyř útvarů elektrárna dosahuje výkonu až 38,3MW, čímž si zasloužila nejen prvenství mezi FV elektrárnami v České republice, ale také dosáhla významného uznání ve světě.

V České republice ale najdeme také velké množství menších solárních elektráren, které ale mají pro ČR velký význam. Na obr. č. 5 můžete vidět výběr několika menších elektráren, jejichž výkon se pohybuje v rozmezí od 20kW až do 1MW. V roce 2014 bylo v České republice zaznamenáno přibližně 530 slunečních elektráren, jejichž výkon překročil 1MW.



[Obrázek 5: Mapa FVE, rok 2008]

Zdroj: [8]



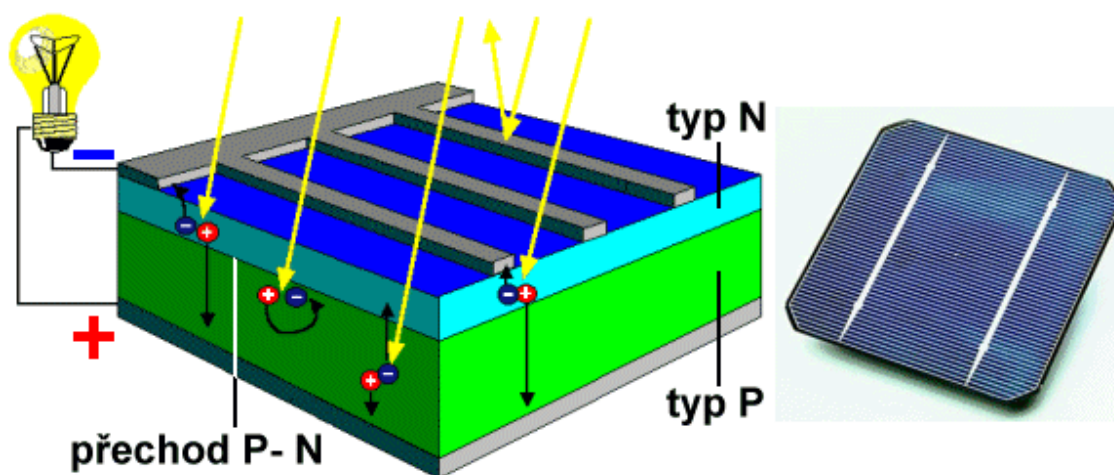
## 2. Dělení fotovoltaických panelů

### 2.1 Principy FV panelů

Fotovoltaický článek můžeme chápat jako diodu, jejíž základní částí je tenká křemíková destička z polovodiče typu P. Na tuto destičku je při výrobě nanášena další vrstva, avšak z polovodiče typu N. Mezi vrstvou z polovodiče typu P a typu N dochází k vytvoření takzvaného P-N přechodu. Při dopadajícím slunečním záření v polovodiči vznikne fotoelektrický jev, což způsobí, že se z krystalové mřížky začnou uvolňovat záporné elektrony. Tím pádem se na P-N přechodu vytvoří elektrické napětí a sluneční energie, která na článek dopadla, se začne měnit na energii elektrickou.

*Připojíme-li k článku pomocí vodičů spotřebič (například miniaturní elektromotorek), začnou se kladné a záporné náboje vyrovnávat a obvodem začne procházet elektrický proud. Je-li třeba větší napětí nebo proud, zapojují se jednotlivé články sériově či paralelně a sestavují se z nich fotovoltaické panely.*

Zdroj: [9]



[Obrázek 6: Fotovoltaický článek]

Zdroj: [9]

### **Výhody sluneční energie pro výrobu elektřiny**

- životnost zařízení
- nízké provozní náklady
- možnost stavět různé solární celky
- žádný negativní vliv na životní prostředí
- žádný negativní vliv na člověka (hluk, škodliviny v ovzduší)

*Fotovoltaický panel je schopen vyrábět elektrickou energii i bez přímého osvětlení na základě difúzního záření, které je v ČR převládající.*

Zdroj:[10]

## 2.2 Druhy FV panelů

Jak již bylo zmíněno, v současné době na trhu převládají panely křemíkové. Dle jeho zpracování lze vyrobit články monokrystalické, polykrystalické či amorfni.

### Monokrystalické články

Jsou tvořeny z jednoho kusu monokrystalu křemíku. Ten je vyroben metodou tažením krystalu za tepla. Z pravidla je jejich barva tmavě modrá až černá. Rohy monokrystalického článku bývají zaoblené a jejich struktura je jednodušší a čistší. Panely tohoto typu se hodí převážně na místech s ideálním sklonem, či v případě takzvaných trackerů, což jsou zařízení, která se otáčejí za sluncem.



[Obrázek 7: FV panel na trackeru]

Zdroj:[11]

Přesto, že panely vykazují nejvyšší účinnost - až 20%, jejich instalace není v současné době tak častá. Důvodem je velice nákladná výroba, se kterou souvisí také vysoká pořizovací cena.

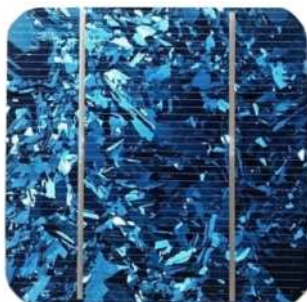


[Obrázek 8: Monokrystalický článek]

Zdroj:[12]

### Polykrystalické články

Tento typ článku je tvořen z křemíku, který se skládá z několika krystalů. Polykrystalické články se od ostatních liší typickým modrým zbarvením, ostrými rohy a znatelnými přechody mezi krystaly. Jelikož je výroba těchto panelů méně nákladná a účinnost panelů se pohybuje kolem 17%, jedná se prozatím o nejvíce používané články. Za nejlepší umístění panelů se považují prostory s určitou odchylkou od ideální orientace. Za jejich přednost se považuje přeměna difuzního záření, tím pádem mohou být orientovány i na jinou světovou stranu než jen na jih.



[Obrázek 9: Polykrystalickýčlánek]

Zdroj: [12]

### Amorfní články

Základním procesem při výrobě amorfních článků je nanášení tenké vrstvy křemíku za pomoci napařování na sklo nebo fólii. Pro tyto panely je typická červeno-hnědá barva a účinnost asi 7 – 9 %, což je o polovinu méně než u polykrystalických článků. Jelikož je jejich cena velmi přijatelná, jsou dosti oblíbené, ale pouze tam, kde se nemusí brát ohled na omezení prostorem. Při jejich instalaci je totiž pro dosažení daného výkonu potřeba zastavět 2,5x větší plochu, než v případě monokrystalických či polykrystalických celků.



[Obrázek 10: Amorfní panel]

Zdroj:[13]

### 3. Materiálová recyklace fotovoltaických panelů

*V nejbližších 10 až 20 letech lze očekávat, že množství panelů vyřazených z provozu bude velmi nízké. Bude se většinou jednat o panely poškozené při nehodách a živelních pohromách. Odhady se pohybují od několika set do 1000 tun ročně. Ve srovnání s celkovou produkcí odpadů v České republice (přes 20 mil. tun) se jedná o zlomky promile. Kvalitní panely instalované v letech 2009 až 2011 budou vyřazovány z provozu ve větších objemech pravděpodobně až po roce 2040.*

Zdroj: [14]

Přesto, že se předpokládá, že v následujících letech bude vyřazeno z provozu jen malé procento panelů, i tak musí být pamatováno na recyklaci panelů poškozených. Pro tyto případy bylo navrženo několik metod, mezi které se řadí například Termická a Mechanicko – chemická recyklace.

#### 3.1 Termická metoda

V současné době se jedná o nejpokročilejší metodu pro recyklaci složek FV panelů, která je vhodná pro všechny typy panelů z krystalických článků. Touto metodou je možné vytěžit až 85% článků pro nové použití a to právě tehdy, pokud jsou panely bez jakéhokoliv poškození. V případě, že u panelů poškození nastalo, dochází ke snížení výtěžnosti o několik procent.

*Způsob recyklace - celé panely jsou zavezeny do speciální pece (Furnace), kde jsou zahřívány na teplotu nad 500 °C. Při této teplotě se plastové materiály odpaří a následně jsou v další komoře (Afterburner) řízeně spalovány. Spaliny jsou před vypuštěním do atmosféry přečištěny (Washer). Uvolněné krystalické články a ostatní materiály jsou separovány ručně*

Zdroj: [15]

MATERIÁL	PODÍL	VÝTĚŽNOST RECYKLACE
SKLO	67%	> 95 %
HLINÍK	18%	100%
PLASTY	11%	-
KŘEMÍK	3%	85%
MĚĎ	1%	80%

[Tabulka 3: Podíl materiálů FV panelu]

Zdroj:[16]

V tabulce č. 3 můžete vidět podíl jednotlivých složek ve fotovoltaických panelech a také procento úspěšnosti jejich recyklace.



[Obrázek 11: Zařízení pro recyklaci článků z krystalického křemíku]

Zdroj:[15]

### 3.2 Mechanicko – chemická metoda

Druhou metodou pro recyklaci FV panelů byla navržena metoda, která se podobá recyklaci LCD televizorů. Tato metoda je vhodná spíše pro tenkovrstvé panely, ale musí se počítat s tím, že na výstupu získáváme pouze drcené suroviny. Při srovnání s termickou metodou je zde menší podíl ruční práce.

*Způsob recyklace - na začátku se ručně demontuje hliníkový rám. Následuje drcení a třídění velikostních frakcí. K oddělení jednotlivých materiálů slouží separační metody - fluidní a mokré splavy a elektrodynamická separace. Stříbro a další zájmové kovy jsou získávány chemicky a pyrometalurgicky. Získané kovy mohou být použity jako surovina v metalurgickém průmyslu, plasty budou pravděpodobně likvidovány spálením s možností využít teplo.*

Zdroj: [15]

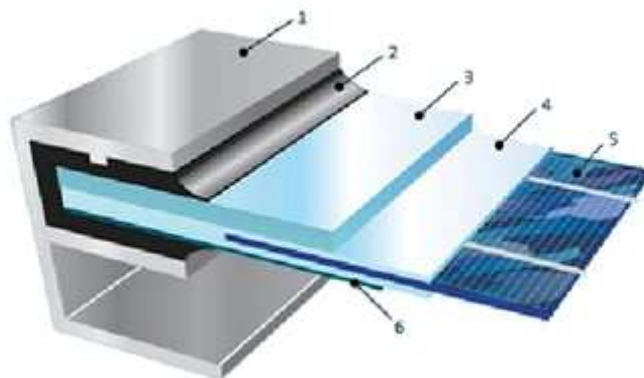


[Obrázek 12: Zařízení pro recyklaci článků z krystalického křemíku]

Zdroj:[15]

### 3.3 Recyklované složky

- hliníkový rám
- těsnění
- tvrzené sklo
- folie EVA
- články z křemíku
- vodotěsná fólie z umělé hmoty



[Obrázek 13: Složení FV panelu]

Zdroj: [17]

Nyní se zaměříme na jednotlivé složky, které jsou základními stavebními prvky fotovoltaických panelů.

#### **Sklo**

Jedná se o základní konstrukční část všech FV panelů. Jak můžete vidět v tabulce č. 3, podíl skla v panelu se pohybuje přibližně kolem 67%. Tvrzené sklo je pro panel velmi důležitou složkou a to nejen z hlediska pevnosti, ale také díky tomu, že při poškození či zničení panelu dochází k téměř 100% recyklaci.

#### **Hliník**

Druhou základní složkou FV panelu je hliník. Tento kov slouží pro výrobu rámců, a proto se jeho podíl v panelu pohybuje kolem 20%. Lze tedy říci, že hned po skle má hliník největší podíl na hmotnosti panelu. V současné době jsou sice vyráběny také FV panely bez hliníkových rámců, avšak tento krok není v praxi nutný, jelikož stejně jako u skla dochází při poškození k úplné recyklaci.

### **Plastové komponenty**

Do této skupiny patří především laminační materiály, které slouží k zapouzdření článku, a také připojovací skříňka. Nevýhodou je fakt, že působením klimatických podmínek plasty degradují. Při recyklaci plastů se tedy obvykle využívá spíše energie, kterou je možné uvolnit jejich spálením.

Plastové komponenty byly také zkoušeny využít k výrobě nosné vrstvy namísto tvrzeného skla. Jejich velkou výhodou je nižší hmotnost, avšak v praxi se tento návrh neprosadil.

### **Fotovoltaické články**

Z hlediska hmotnosti mají články na panelu zanedbatelný podíl, který se pohybuje v rámci jednotek procent. Přesto má ale značný vliv na cenu panelu, a také na spotřebu energie při jeho výrobě. Důležitý je také fakt, že na konci životnosti zůstávají články takřka nezměněny.

### **Těžké kovy**

Z hlediska hmotnosti, ceny i spotřeby energie na výrobu panelů se jedná o zanedbatelné položky. Podíl těžkých kovů na hmotnosti je zhruba takový: olovo 0,12%, stříbro 0,14%, cín 0,12%, a měď 0,37%. I přes to, že recyklace těchto složek je srovnatelná s výrobou z primárních surovin, tak je velmi důležitá. Jelikož jsou těžké kovy toxické, je nezbytné je odloučit od životního prostředí. Lze také očekávat vyčerpání těžitelných zásob a tím zvýšení nákladů – toto je očekáváno zejména u stříbra.



#### 4. Zpracování recyklovaných složek fotovoltaických panelů

I přes to, že životnost FV panelu je okolo 25 let, stále více přichází na scénu otázka „kam s ním“. Provozovatelé těchto panelů jsou toho názoru, že po skončení životnosti se najdou tací, kteří tyto články rádi na své náklady zlikvidují. Tento názor zakládají na faktu, že panely obsahují cenné suroviny, a proto se jim tedy recyklace musí vyplatit. Na první pohled je sice tato úvaha pochopitelná, avšak pokud se na tuto problematiku podíváme zblízka, bohužel zjistíme, že opak je pravdou.

*Evropská směrnice EU 2012/19/EU vyžaduje od roku 2015 zajistit u FV panelů při jejich likvidaci 70% recyklaci a 80% využití, tj. minimálně 70 % panelu se musí recyklovat na druhotné suroviny a dalších 10 % se může využít například pro výrobu energie. Pouze zbylých 20 % lze zlikvidovat uložením na skládku.* Zdroj: [18]

Většina instalovaných panelů v České republice obsahuje v převážné většině sklo, hliníkový rám a plastové komponenty, které tvoří např. EVA fólie a tedlar.



[Obrázek 14: Recyklace FV panelu]

Zdroj: [18]

##### 4.1 Recyklace skla

Vzhledem ke složení panelu je logické, že zásadní roly v recyklaci hraje zejména sklo. To však ve FV panelech není volně přístupné, ale jsou na něj navázány další vrstvy – křemíkové články, EVA fólie či tedlar. Tyto vrstvy jde velmi těžko odseparovat. Proto je nutné sklo mechanicky drtit na jemné části a poté ostatní složky oddělit.

*Vzhledem k tomu, že se na výrobu panelů používá více typů skel, včetně tvrzeného (kaleného) skla, jeho drčení způsobuje rychlé opotřebování a snižování výkonu drtičů, a tím i podstatně vyšší náklady. Směsné sklo působí navíc i komplikace při dalším využití ve sklářském průmyslu. Následná separace křemíkových článků, EVA fólie nebo tedlaru, není zdaleka 100%, protože to není technologicky možné. Směsné sklo nelze využít jako běžnou surovinu k výrobě nového skla, ale musejí se hledat další nové aplikace (např. izolační a výplňové stavební hmoty).*

Zdroj: [18]

## **4.2 Recyklace hliníku a plastových komponent**

Pokud se zaměříme na recyklaci hliníku, zjistíme, že tento prvek lze využít k dalšímu zpracování takřka stoprocentně. Tato složka se odděluje převážně mechanicky a po separaci je možné hliník dodávat k běžné recyklaci.

V případě pastových komponentů recyklace tak úspěšná bohužel není. Jak bylo již zmíněno, vlivem nepříznivých klimatických podmínek plasty degradují, a proto je lze recyklovat pouze částečně, anebo vůbec.

## **4.3 Recyklace křemíku**

Díky novým studiím bylo zjištěno, že za pomoci tepelného recyklování může být až 97% materiálů využito pro další zpracování. Tento způsob recyklace je ale určen pouze pro FV panely, které neobsahují křemík, jelikož tento prvek nelze oddělit pomocí chemické lázně.

V případě existence křemíku v panelech je možné využít o něco složitější, ale také dosti efektivní proces recyklace, při které je ale nutné panely mechanicky či manuálně rozebrat. Tento postup je o něco méně účinný než tepelná recyklace, ale i tak se při tomto zpracování mluví až o 95% efektivitě.

*Díky těmto procesům se dají recyklovat téměř všechny materiály obsažené v panelech. Odhaduje se, že z 20 kg panelu je možné recyklovat až 19,5 kg. Toto množství by se ještě zvýšilo, pokud by se podařilo vyvinout efektivnější metodu recyklace křemíku, neboť kvůli jeho neodlučitelnosti od skla tento materiál často končí jako odpad.*

Zdroj: [19]

## 5. Recyklace fotovoltaických panelů

### 5.1 SWOT analýza

MECHANICKO- CHEMICKÁ RECYKLACE - SWOT ANALÝZA		
	Silné stránky	Slabé stránky
Vnitřní prostředí	menší podíl ruční práce	výsledek drcené suroviny pro tenkovrstvé články finančně náročné
Vnější prostředí	Příležitosti	Hrozby
	konstrukční úpravy	nová technologie

[Tabulka 4: SWOT analýza - Recyklace mechanicko-chemická]

TERMICKÁ RECYKLACE - SWOT ANALÝZA		
	Silné stránky	Slabé stránky
Vnitřní prostředí	pro krystalické články až 85% článku pro nové využití snížení energetické náročnosti až o 70%	vysoký podíl ruční práce energeticky náročné
Vnější prostředí	Příležitosti	Hrozby
	konstrukční úpravy	nová technologie

[Tabulka 5: SWOT analýza - Recyklace termická]

Dle SWOT analýzy, kterou můžete vidět v tabulkách číslo 4 a 5, je jisté, že obě dvě metody recyklace FV panelů mají svá pro a proti.

Pokud se zaměříme na metodu mechanicko-chemickou, tedy na tabulku číslo 4, zjistíme, že její největší předností je celkem nízký podíl ruční práce. Naopak její největší nevýhodou, z hlediska České republiky, je fakt, že je vhodná spíše pro tenkovrstvé články, kterých je v našich krajinách naprosté minimum.

Další metodou pro likvidaci FV panelů je recyklace termická. Z tabulky číslo 5 vidíme, že je vhodná také pro krystalické články, kterých je v České republice většina. U této metody je sice problém s její energetickou náročností, ale pokud vezmeme v úvahu, že panely nebudou žádným způsobem poškozené, je možné získat až 85% článku na další využití. Z toho faktu tedy plyne, že lze energetickou náročnosti při výrobě nových panelů snížit až o 70%.

Z obou dvou tabulek je jisté, že ke zdokonalení dosud známých metod může dojít za pomoci konstrukčních úprav. V současné době se zatím spekuluje o 2 úpravách, které by měli zjednodušit likvidaci panelů, avšak jejich provedení by bylo velmi finančně náročné.

Velkou hrozbou pro tyto možnosti recyklace je vytvoření nových, účinnějších metod, které budou méně finančně náročné a budou mít velkou procentuální šanci pro další využití materiálu ke zpracování na nové články. Z důvodu, že jde věda a výzkum stále kupředu, věřím, že až téma „recyklace FV panelů“ bude aktuální, dostane se nám na výběr větší množství metod pro jejich zpracování.

Jelikož jsou v současné době známy pouze dvě metody recyklace, termická a mechanicko-chemická, při porovnání kladů a záporů se osobně přikláním k likvidaci vyřazených panelů, na území našeho státu, za pomoci termické metody. Velkou výhodou oproti mechanicko-chemické recyklaci je fakt, že je vhodná pro krystalické články, kterých je v České republice naprostá většina.

## 5.2 Zodpovědnost za recyklaci

Zamyslím-li se nad tím, že je v České republice instalováno okolo deseti milionů kusů panelů, v první chvíli mě zcela jistě napadne otázka:

*„Kdo bude mít za úkol zajistit recyklaci vyřazených panelů na konci životnosti?“*

při zamyšlení nad touto otázkou mě napadají pouze 2 možnosti:

### **Zodpovědnost výrobců:**

- Jako první možnost určitě každého, stejně tak jako mě, logicky napadne, že by se o vysloužilé panely měli postarat samotní výrobci. Zde však nastává určitý problém. Musíme brát v úvahu, že do 1.1.2013 nebyly v ceně panelu započítány žádné poplatky za jejich likvidaci. To znamená, že výrobci by museli v současné době nastavit tak vysokou cenu, že by si obyčejný člověk nemohl fotovoltaické panely vůbec dovolit.

### **Zodpovědnost provozovatelů:**

- V tomto případě nastává však podobný problém jako v předchozím bodě. Každý subjekt má nést zodpovědnost za své vlastní panely, a proto by bylo nesmyslné, kdyby provozovatelé byli nuceni platit poplatky nejen za sebe, ale také za ostatní provozovatele, kteří na trh s panely vstoupili před rokem 2013.

Jelikož na danou otázku v tuto chvíli neexistuje zcela jasná odpověď, můžeme jen doufat, že se postupem času objeví nová strategie, ve které budou zahrnuty jak logistické, tak skladovací náklady. Při současných postupech je nepravděpodobné, že by recyklace FV panelů přinášela kladný zisk.

## **Závěr**

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo popsání problematiky recyklace fotovoltaických panelů na konci své životnosti.

V práci byl nejprve popsán vývoj fotovoltaických panelů v České republice i v zahraničních státech, spolu s principy funkce panelu a rozdělení podle druhu. V dalším kroku byl rozebrán fotovoltaický článek na jednotlivé komponenty, u kterých byla popsána možnost dalšího zpracování pro nové fotovoltaické panely. Velmi podstatnou částí se stala třetí a pátá kapitola, která se zabývala popisem metod, které jsou v současné době pro recyklaci panelů nejvhodnější. Jedná se o termickou a mechanicko-chemickou recyklaci, pro které byla vytvořena také SWOT analýza s následným rozebráním jejich kladných a záporných vlastností.

Jelikož se recyklace fotovoltaických panelů stala v současné době velmi probíraným tématem, jsem moc ráda, že jsem si vybrala ke zpracování mé bakalářské práce právě tuto problematiku. Protože se výroba elektrické energie za pomoci fotovoltaických elektráren stala v posledních letech velkým hitem, bude velmi důležité zajistit vhodnou metodu jejich recyklace a ekologické likvidace. Věřím, že až bude toto téma aktuální, bude výzkum a vývoj tak dokonalý, že zajištění recyklace panelů nebude žádným problémem.

**Seznam tabulek**

[Tabulka 1: Přehled největších elektráren světa]	14
[Tabulka 2: Největší FVE v ČR]	15
[Tabulka 3: Podíl materiálů FV panelu]	21
[Tabulka 4: SWOT analýza - Recyklace mechanicko-chemická]	27
[Tabulka 5: SWOT analýza - Recyklace termická]	27

**Seznam obrázků**

[Obrázek 1: První FV elektrárna v ČR]	12
[Obrázek 2: Největší FV farma v Evropě]	13
[Obrázek 3: Elektrárna Nyngan]	13
[Obrázek 4: Hotel Vertical Village – Dubaj]	14
[Obrázek 5: Mapa FVE, rok 2008]	16
[Obrázek 6: Fotovoltaický článek]	17
[Obrázek 7: FV panel na trackeru]	19
[Obrázek 8: Monokrystalický článek]	19
[Obrázek 9: Polykrystalický článek]	20
[Obrázek 10: Amorfní panel]	20
[Obrázek 11: Zařízení pro recyklaci článků z krystalického křemíku]	22
[Obrázek 12: Zařízení pro recyklaci článků z krystalického křemíku]	22
[Obrázek 13: Složení FV panelu]	23
[Obrázek 14: Recyklace FV panelu]	25



**Elektronické zdroje**

- [1] ING. BRONISLAV BECHNÍK, PH.D.. *Stručná historie fotovoltaiiky* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://oze.tzb-info.cz>
- [2] Z. OPAVA. *Sluneční elektrárna ČEZ* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <https://www.cez.cz>
- [3] DAVID VOBOŘIL. *Největší solární elektrárna byla uvedena do provozu* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://oenergetice.cz/>
- [4] RADOMÍR DOHNAL. *Největší solární farma v Evropě bude stát u Bordeaux* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.ekobydleni.eu/>
- [5] CAT DISTASIO. *Two solar power plants usher in “the birth of large-scale solar in Australia* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://inhabitat.com/>
- [6] JAN HORČÍK. *Pohádkový Dubaj – chystá se Vertikální vesnice* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.ekobydleni.eu/>
- [7] NWT A.S.. *Největší české elektrárny* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.fotovoltaiickepanely.eu/>
- [8] CZECH RE AGENCY. *Mapa instalací fotovoltaiických elektráren* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.czrea.org/>
- [9] Z. OPAVA. *Solární (fotovoltaiické) články* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <https://www.cez.cz>
- [10] ROBERT KNOB. *Fotovoltaiika princip* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.ceska-solarni.cz/>
- [11] JAN HORČÍK. *Fotovoltaiický panel na trackeru* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.ekobydleni.eu/>
- [12] UDT, S.R.O.. *Fotovoltaiické články* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.stresniinstalace.cz/>
- [13] ACTIVE INTERNET S.R.O.. *FV panely* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://wolfsolar.webnode.cz/>

- [14] ING. ALEŠ PORUBA, PH.D.. *Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://oze.tzb-info.cz/>
- [15] BRONISLAV BECHNÍK. *Fotovoltaika: recyklace panelů I - metody recyklace* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.czrea.org/>
- [16] BRONISLAV BECHNÍK. *Fotovoltaika: recyklace panelů II – recyklované materiály* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.czrea.org/>
- [17] ENVI ENERGY CZECH. *Fotovoltaické panely Kyocera* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.envienergyczech.cz/>
- [18] SOLARNI NOVINKY. *Je recyklace solárních panelů výhodný byznys?* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.solarninovinky.cz/>
- [19] JMARTIN KNÁPEK. *Je recyklace fotovoltaických panelů jejich největší slabinou?* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupný na WWW: <http://oenergetice.cz/>