

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Recyklace fotovoltaických elektráren**

**Barbora Weiszová**

**2013**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Barbora WEISZOVÁ**  
Osobní číslo: **E10B0573P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Technická ekologie**  
Název tématu: **Recyklace fotovoltaických elektráren**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Zásady pro vypracování:

1. Popište typy a složení fotovoltaických panelů.
2. Analyzujte legislativní prostředí ČR v oblasti recyklace fotovoltaických elektráren.
3. Proveďte rešerši současných technologií recyklace fotovoltaických elektráren zejména fotovoltaických panelů.
4. Posuďte energetickou a ekonomickou náročnost uvedených technologií a jejich dopad na životní prostředí.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. LIBRA, M., POULEK, V.: Fotovoltaika, teorie i praxe využití solární energie, 1. vyd. Praha, ILSA, 2009, 160 s., ISBN 978-80-904311-0-2
2. [www.pvcycle.org](http://www.pvcycle.org)

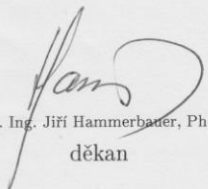
Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Lenka Raková**


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013

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



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

V Plzni dne 15. října 2012

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku recyklací fotovoltaických elektráren, zejména fotovoltaických panelů. Toto téma bylo zvoleno na základě mého zájmu získat přehled o fotovoltaických panelech a jejich následné recyklaci. Tato bakalářská práce se skládá z několika částí. Nejprve byl vytvořen teoretický podklad, ve kterém byly vysvětleny pojmy fotovoltaické panely a fotovoltaická elektrárna. Dále bylo přiblíženo legislativní prostředí pro zkoumanou problematiku. Výstupem této práce je popis recyklace fotovoltaických panelů a analýza ekonomické a energetické náročnosti.

## **Klíčová slova**

Fotovoltaický panel, fotovoltaický článek, recyklace

**Abstract**

This bachelor thesis is focused on the recycling of photovoltaic power plants, especially photovoltaic panels. This theme was chosen on the basis of my interest to get an overview of the photovoltaic panels and their subsequent recycling. This work consists of several parts. The first was a theoretical basis, in which the concepts were explained photovoltaic panels and solar power. In addition, legislation environment has been advanced for investigative issue. The outcome of this work is to describe recycling of photovoltaic panels and analysis of the economic and energy efficiency.

**Key words**

Photovoltaic module, photovoltaic cell, recycling

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

.....  
podpis

V Plzni dne 6. 6. 2013

Barbora Weiszová

## **Poděkování**

Na tomto místě bych ráda poděkovala Ing. Lence Rakové, vedoucí mé práce, za její cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěla k jejímu vypracování.

# Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	10
ÚVOD.....	11
<b>1 FOTOVOLTAICKÉ PANELY.....</b>	<b>12</b>
1.1 PRINCIP FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU .....	12
1.2 GENERAČNÍ VÝVOJ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ .....	13
1.3 TYPY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ .....	14
1.3.1 <i>Křemíkové monokrystalické články</i> .....	15
1.3.2 <i>Fotovoltaické články z polykrystalického křemíku</i> .....	15
1.3.3 <i>Fotovoltaické články z amorfního křemíku</i> .....	15
1.3.4 <i>Další typy fotovoltaických článků</i> .....	16
1.4 GRID-ON SYSTÉM .....	18
1.5 GRID-OFF SYSTÉM.....	19
1.6 ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ .....	19
<b>2 FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA.....</b>	<b>22</b>
2.1 STRÍDAČ .....	22
2.2 AKUMULÁTOR .....	22
2.2.1 <i>Trakční akumulátor se zaplavenými elektrodami</i> .....	23
2.2.2 <i>Trakční akumulátor VRLA</i> .....	23
2.3 KABELY PRO FOTOVOLTAIKU.....	23
<b>3 LEGISLATIVNÍ PROSTŘEDÍ ČR .....</b>	<b>25</b>
3.1 OBLAST FOTOVOLTAIKY.....	25
3.2 ZELENÝ BONUS .....	25
3.3 OBLAST RECYKLACE FOTOVOLTAIKY .....	26
<b>4 RECYKLACE FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ.....</b>	<b>28</b>
4.1 RECYKLACE FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ .....	28
4.2 RECYKLACE KOMPONENTŮ .....	31
4.3 PV CYCLE .....	32
4.3.1 <i>Výhody programu PV Cycle</i> .....	32
4.3.2 <i>Sběrná místa</i> .....	33
<b>5 EKONOMICKÁ A ENERGETICKÁ NÁROČNOST .....</b>	<b>34</b>



<b>5.1</b>	<b>EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....</b>	<b>34</b>
<b>5.2</b>	<b>ENERGETICKÉ ZHODNOCENÍ .....</b>	<b>36</b>
<b>5.3</b>	<b>DOPAD NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ .....</b>	<b>37</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>39</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>40</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>45</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>45</b>
	<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>46</b>

## **Seznam symbolů a zkratk**

DEM .....	Double Encapsulated Module
EPBT .....	Energy pay-back time
EVA .....	Etyl Vinil Acetát
FVE .....	Fotovoltaická Elektrárna
LCA .....	Life Cycle Assessment
OZE .....	Obnovitelné Zdroje Energie
TCO .....	Transparentní Vodivý Oxid
TiO <sub>2</sub> .....	Oxid titaničitý

## Úvod

Tématem této bakalářské práce je recyklace fotovoltaických elektráren. V České republice za poslední roky bylo postaveno mnoho fotovoltaických elektráren o různých výkonech. Díky tomuto rostoucímu trendu stále více lidí využívá energii z obnovitelných zdrojů. Na konci životnosti fotovoltaických panelů je nutné zajistit jejich ekologickou likvidaci nebo recyklaci. Recyklační proces by měl být méně energeticky náročný než výroba nových panelů a zároveň ekonomicky výhodný. Životnost samotných fotovoltaických panelů je relativně dlouhá, proto je problematika recyklace fotovoltaických panelů v samotném počátku.

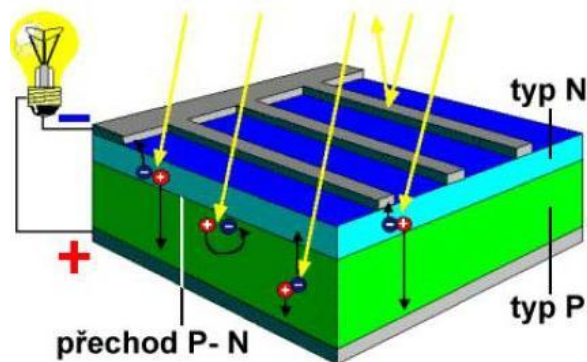
Tato práce je rozdělena celkem do pěti kapitol. První kapitola je věnována fotovoltaickým panelům s popisem základních principů a jednotlivých typů fotovoltaických článků. Závěrem této kapitoly je přiblížena problematika zvýšení efektivnosti a účinnosti fotovoltaických panelů. Druhá kapitola se zaměřuje na fotovoltaickou elektrárnu. Nedílnou součástí je legislativní prostředí, kterému je věnována třetí kapitola. Ve čtvrté kapitole je popsán postup recyklace fotovoltaických panelů. Poslední kapitola vyhodnocuje ekonomickou a energetickou náročnost recyklace. Závěr této kapitoly popisuje dopad recyklace fotovoltaických panelů na životní prostředí.

# 1 Fotovoltaické panely

Fotovoltaický panel je složený z několika fotovoltaických článků v sérioparalelní kombinaci. Výkon panelu je závislý na velikosti plochy článků. Přední stranu panelu tvoří sklo, které je odolné proti nárazům. Na skle je plastová etyl vinil acetátová (dále jen EVA) fólie, na kterou se skládají spojené fotovoltaické články. Přes články je opět EVA fólie a zadní stěna je obvykle tvořena teklarem nebo skleněnou deskou. Mezi jednotlivými vrstvami se odsaje vzduch a panel se zahřívá nad teplotu tání EVA fólie, která se rozteče a spojí články s přední a zadní stěnou. Nakonec se panely zarámují a zatmelí silikonovým tmelem do hliníkových profilů. [9]

## 1.1 Princip fotovoltaického článku

Ve fotovoltaickém článku je v malé hloubce a tenkém plátku křemíku vytvořen P-N přechod. Při dopadu slunečního záření se generují volné nosiče náboje. Napětí článku závisí na použitém polovodiči. Pro křemík se udává hodnota 0,5 V při maximálním výkonu článku. Pro získání většího napětí nebo proudu se fotovoltaické články zapojují sériově nebo paralelně. Následně se z nich sestavují fotovoltaické panely. [10]



Obr. 1 Princip fotovoltaického článku [30]

### Polovodič

Polovodič musí být neutrální, tzn., že jeho celkový elektrický náboj musí být roven nule. Se vzrůstající teplotou část elektronů získá energii potřebnou k přechodu z valenčního do vodivostního pásu a tím vzniká generace nosičů elektrického náboje - elektron, díra. Současně probíhá rekombinace nosičů. Rekombinace je opak generace, ve své podstatě se jedná

o kompenzaci elektrického náboje. Nosiče elektrického náboje mohou vznikat nejen tepelnou generací, ale např. i světelným zářením nebo působením silného elektrického pole.

Polovodiče obsahují určité množství příměsí a strukturních poruch, které značně ovlivňují jejich vlastnosti. Příměsí ovlivňují elektrickou pevnost i teplotní závislost daného polovodiče. Jejich pomocí jsou elektrony do vodivostního pásu dodávány nebo naopak z valenčního pásu přijímány.

- *Polovodič typu N (negativní)*

Vzniká nahrazením některých atomů křemíku pětimocnými atomy např. fosforu, dusíku nebo arsenu. Tyto atomy vytvářejí s atomy křemíku čtyři kovalentní vazby, zbylý elektron se pomocí malého množství energie uvolní a přestoupí do vodivostního pásu. Těmto příměsím se říká donory.

- *Polovodič typu P (pozitivní)*

Vzniká stejným způsobem jako polovodič typu N, ale místo atomů pětimocného prvku se používají atomy trojmocného prvku, které mají pouze 3 valenční elektrony. Po vytvoření chemických vazeb vznikne díra, která je kladně nabitá. Díry se zaplňují volnými elektrony. Příměsí se nazývají akceptory a nejčastěji to bývá bor, hliník nebo indium.

- *P-N přechod*

Spojením polovodičů typu P a N vzniká P-N přechod. V něm zanikají volné nosiče náboje, protože při kontaktu díry a elektronu dochází k rekombinaci nábojů – zaplnění díry elektronem. Nepohyblivé náboje zapříčiní vznik elektrického pole, které zastaví další difuzi. Tímto jevem dochází ke snížení vodivosti v oblasti P-N přechodu a vytvoření elektrického potenciálu, protože na P je záporný náboj a na N kladný. Připojíme-li na typ P kladný pól zdroje a na typ N záporný pól zdroje, bude procházet elektrický proud. Zapojíme-li zdroj opačně, proud procházet nebude. [8]

## 1.2 Generační vývoj fotovoltaických článků

Roku 1884 Charles Fritts vyrobil první funkční fotovoltaický článek s účinností přibližně 1%. Fotovoltaické články jako takové se začaly používat od 2. poloviny 80. let 20. století. Za 130 let se jejich technologie zlepšila a neustále se vyvíjí. [25]

### 1. generace

Jedná se o fotovoltaické články vyráběné z desek monokrystalického křemíku. Tyto články mají poměrně vysokou účinnost a dlouhodobou stabilitu. I přes to, že jejich výroba je

finančně náročná (velká spotřeba čistého křemíku), patří mezi nejrozšířenější technologie na trhu.

## 2. generace

Snaha o snížení výrobních nákladů tím, že se používají tenkovrstvé články. Nejčastěji jsou používány články z polykrystalického nebo amorfního křemíku. Značnou nevýhodou je nižší účinnost a menší stabilita (účinnost dále klesá s časem). Tenkovrstvé články se používají zejména v aplikacích, ve kterých je požadována ohebnost a pružnost.

## 3. generace

3. generace je v některých knihách rozdělena na 3. a 4. generaci. Hlavním cílem je zvýšení počtu absorbovaných fotonů tím generování párů elektron – díra a větší využití energie dopadajících fotonů. Dobře fungujícími články jsou vícevrstvé struktury. Využívají širokou část slunečního spektra, protože každá vrstva je schopna využít určitý rozsah vlnových délek. Pokud jej nevyužije, propustí ho do hlubších vrstev kde je následně využito. [10, 21]

### 1.3 Typy fotovoltaických článků

Většina dostupných článků se vyrábí z křemíku, jehož technologie výroby je na vysoké úrovni. Je požadována jeho vysoká čistota, proto je poměrně drahý. Křemíkový článek využívá fotony s energií přibližně 1,1 eV. Sluneční záření obsahuje fotony s energií okolo 0,5 eV až 2,9 eV. Křemíkový článek je tedy schopen využít převážnou část slunečního záření. Toto je jeden z důvodů, proč patří mezi nepoužívanější materiály. [10]

#### Výroba křemíku

Hlavním materiálem pro výrobu křemíku je křemen neboli oxid křemičitý (dále jen  $\text{SiO}_2$ ). Nejdříve se  $\text{SiO}_2$  redukuje uhlíkem v elektrické obloukové peci. Tímto způsobem je možno získat křemík o čistotě 98 - 99%. Poté se vzniklý křemík převede na těkavou sloučeninu, která se dobře čistí destilací. Z této sloučeniny získáme křemík při vysoké teplotě rozkladem na povrchu křemíkové tyče, která je zahřívána elektrickým proudem. Takto se vytváří ingoty z polykrystalického křemíku o čistotě 99,999999%. Cena se pohybuje v řádu několika desítek USD/kg. [10]

### 1.3.1 Křemíkové monokrystalické články

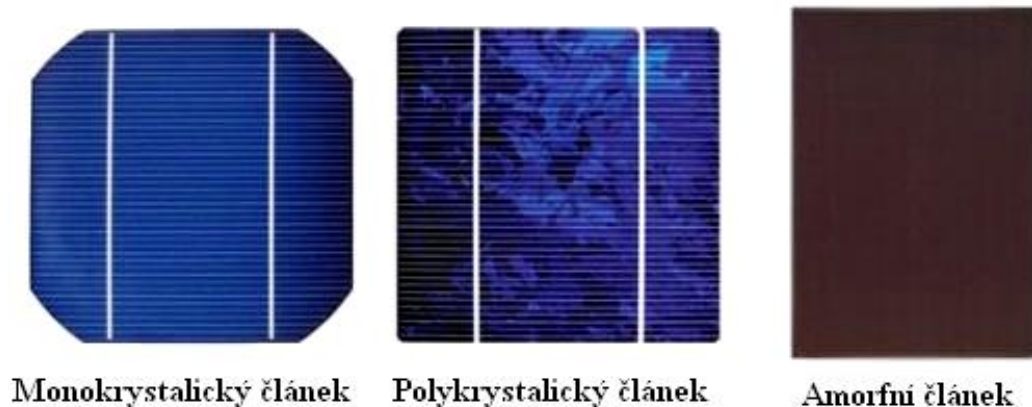
Tyto články jsou vyráběné z monokrystalického křemíku. Rozměr krystalů se pohybuje v desítkách cm a jsou vyráběny z ingotů polykrystalického křemíku. Ingoty se vyrábí pomalým tažením zárodka krystalu z taveniny velmi čistého křemíku. Poté se rozřežou drátovou pilou na tenké plátky. Plátky se zarovnávají, leští a z povrchu se odstraňují nečistoty a nepravidelnosti. P-N přechod se vytvoří přidáním fosforu. Tím vznikne vrstva s vodivostí N. Polykrystalický křemík obsahuje určité množství boru, který tvoří vodivost typu P. Tato metoda je technologicky a energeticky velmi náročná. Laboratorní účinnost těchto článků dosahuje až 25%, zatímco v běžné praxi okolo 16%. I přes to patří k neúčinnějším článkům. [10]

### 1.3.2 Fotovoltaické články z polykrystalického křemíku

Tyto články patří mezi nejběžnější. Vyrábějí se odléváním čistého křemíku do forem. Vzniklé ingoty se poté řezou na tenké plátky. Touto metodou lze vytvářet bloky s čtvercovým nebo obdélníkovým průřezem. Výrobní proces je jednodušší, levnější a vzniká méně zbytků. Nevýhodou těchto článků jsou horší elektrické vlastnosti, protože na styku krystalových zrn je větší odpor. Laboratorní účinnost se pohybuje okolo 20%, v praxi okolo 14%. [10]

### 1.3.3 Fotovoltaické články z amorfního křemíku

Jedná se o články 2. generace. Vyrábějí se rozkladem vhodných sloučenin křemíku např. silanu nebo dichlorsilanu ve vodíkové atmosféře. Takto lze vyrobit velmi tenké vrstvy křemíku na skleněné, plastové nebo nerezové podložce. Struktura toho křemíku je amorfní, tzn., že nemá pravidelnou krystalickou strukturu a obsahuje určité množství vodíku. 1mm silný článek dokáže pohltit až 90% slunečního záření. Články mohou být velmi tenké a ohebné, mohou se použít na oblečení nebo jako krycí fólie na střechy. [10]



Obr. 2 Srovnání fotovoltaických článků [20]

### 1.3.4 Další typy fotovoltaických článků

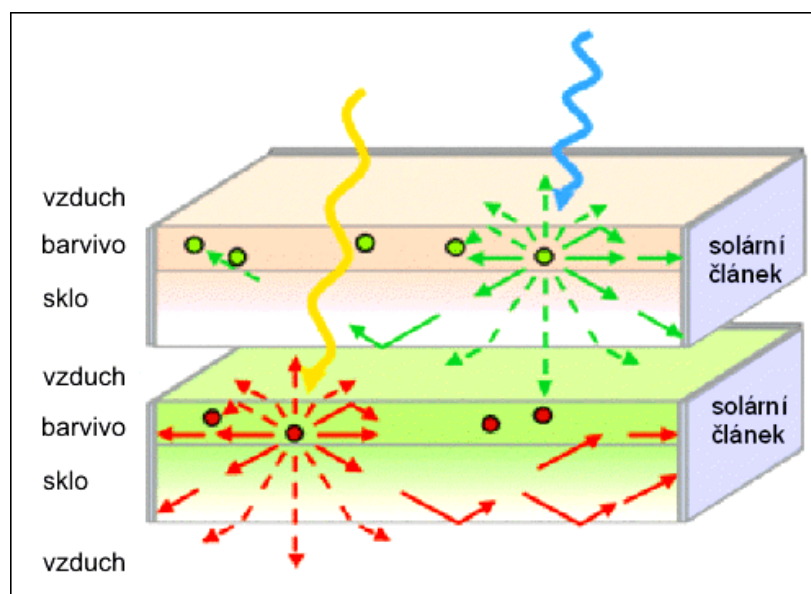
Zásoby křemíku nejsou neomezené a výroba křemíkových článků je poměrně drahá a technologicky náročná. Vývoj v oblasti fotovoltaiky se zaměřuje na snížení výrobních nákladů a zvýšení účinnosti článků.

#### Fotovoltaické články z organických polymerů

Využití organických polymerů nabízí nižší výrobní náklady a vyšší mechanickou odolnost. Tyto články se nevyrábějí ve větším množství z důvodu malé účinnosti přeměny slunečního záření na elektrickou energii. Nejvyšší změřená účinnost článku byla necelých 7%.

Nejúčinnějším organickým článkem je článek složený ze dvou subčlánků v tandemovém uspořádání. Články spojuje mezivrstva oxidu titanu, která slouží pro průchod elektronů a brání průchodu děr. Každý článek pohlcuje jiné spektrum záření. Pro vytvoření elektrické energie je nutný heteropřechod. Heteropřechod je rozhraní polovodičových materiálů, které mají různé šířky zakázaného pásu. [6]





Obr. 3 Organický fotovoltaický článek [10]

Příkladem organických článků jsou fotogalvanické články s organickým barvivem.

- *Fotogalvanické články s organickým barvivem*

Je složen z vysoce porézní a vysoce jemné vrstvy oxidu titaničitého. V oxidu titaničitém je vodný roztok elektrolytu s redoxní dvojicí a barvivem.

Foton je zachycen barvivem, které vytvoří excitovaný stav a přenesse elektron na oxid titaničitý. Elektron projde vrstvou  $\text{TiO}_2$  na elektrodu, která jej odvede do vnějšího obvodu. Po průchodu obvodem se elektron přenesse na jod, s kterým vytvoří trijodidový anion. Anion redukuje barvivo, které je tím připraveno pro další foton.

Výhodou těchto článků jsou menší nároky na čistotu materiálu, ale naopak jsou problémy s kapalným a korozivním elektrolytem, který musí být dokonale uzavřen, vydržet dlouhou dobu slunečního svitu a nesmí se rozkládat. [10]

### Tandemové fotovoltaické články

Tandemový článek je vytvořen ze dvou či více struktur z polovodičových materiálů, které mají různé šířky zakázaného pásu. Struktury jsou řazeny do série tak, aby sluneční záření procházelo vrstvou s největší šířkou zakázaného pásu. Dále záření postupuje přes vrstvy s nižší šířkou zakázaného pásu. Používají dva i více p-i-n přechodů, které umožňují efektivnější absorpci slunečního záření.

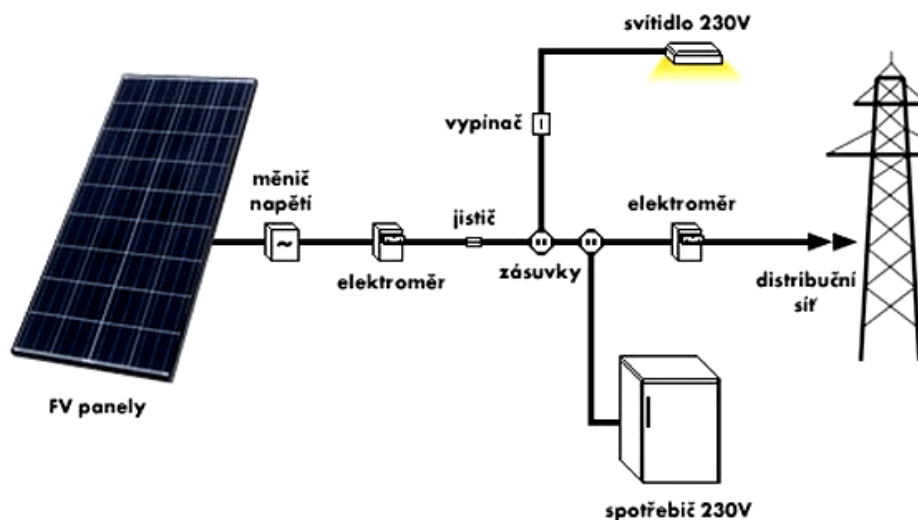
Články jsou tvořeny z několika vrstev - transparentním vodivým oxidem (TCO), substrátem a přechodovou vrstvou. Skrz substrát vstupují do článku fotony. Přechodová vrstva se chová

jako P-N přechod zapojený oproti ostatním částem opačně, proto je nutno zapojit přechod, který zajišťuje rekombinaci elektronů z horního subčlánku a děr z dolního subčlánku. Bez tohoto přechodu by nedocházelo k požadovanému počtu rekombinací a článek by ztrácel elektrické pole a tím by došlo ke zhoršení elektrických vlastností celého článku.

Účinnost článku při standardních testech dosahuje až 12,5%, vlivem Steabler- Wronski efektu klesá na 11%. [5]

## 1.4 Grid-on systém

Je systém připojený na síť. Využívá se u rodinných domů nebo průmyslových budov za účelem úspory peněz za energii, ale i pro zisk. Energie vyrobená sluneční elektrárnou se buď spotřebovává přímo v objektu, nebo je její přebytek prodán do distribuční sítě. Pokud se energie spotřebuje v místě výroby, investor nejen ušetří peníze za energii, kterou by koupil, ale zároveň získá zelený bonus od distributora.



Obr. 4 Systém pro vlastní spotřebu a prodej přebytků do sítě [70]

Režim prodeje přebytku a přímého prodeje se liší pouze v zapojení. U režimu vlastní spotřeby a prodeje přebytků jsou panely připojeny na měnič napětí, elektroměr, samostatný jistič a přepětíovou ochranu do rozvaděče v objektu. Tímto způsobem je možné čerpat vyrobenou energii a v případě přebytku ji prodat do distribuční sítě. Kdežto u režimu přímého prodeje elektrické energie do sítě vynecháváme rozvaděč a systém zapojíme přímo do distribuční sítě. [28]

## 1.5 Grid-off systém

Jedná se o ostrovní systém. Používá se, pokud není možnost využití distribuční sítě. Pro tento systém je vhodné volit spotřebiče, které pracují na stejnosměrný proud o napětí 12V nebo 24V. Pro užívání běžných spotřebičů, které fungují na střídavý proud, je nutné přidat střídač napětí.

Používají se 3 varianty

- *Ostrovní systém s přímým napájením*

Vyžaduje-li se napájení zařízení pouze po dobu dostatečné intenzity slunečního záření. Fotovoltaický panel je přes regulátor připojen přímo ke spotřebiči.

- *Ostrovní systém s akumulací elektrické energie*

Pokud je potřeba elektřiny i v době bez slunečního záření, využívá se speciální akumulátor pro pomalé nabíjení i vybíjení. Regulátor dobíjení zajišťuje nejvhodnější nabíjení a vybíjení baterie. Pro napájení běžných spotřebičů je nutno použít napěťový střídač.

- *Hybridní ostrovní systém*

Používá se, je-li nutný celoroční provoz. V zimních měsících není možno získat takové množství energie jako v letních měsících, proto se tyto systémy navrhují na zimní provoz, což způsobuje vyšší potřebu výkonu a tudíž i růst nákladů. Z tohoto důvodu se hybridní ostrovní systém rozšiřuje doplňkovým zdrojem energie, který pokryje potřebu elektřiny v období s nedostatečným slunečním svitem. Jako doplňkový zdroj se používá např. větrná elektrárna.

[22]

V příloze jsou k vidění schémata zapojení ostrovních systémů (Obr. 11, 12, 13).

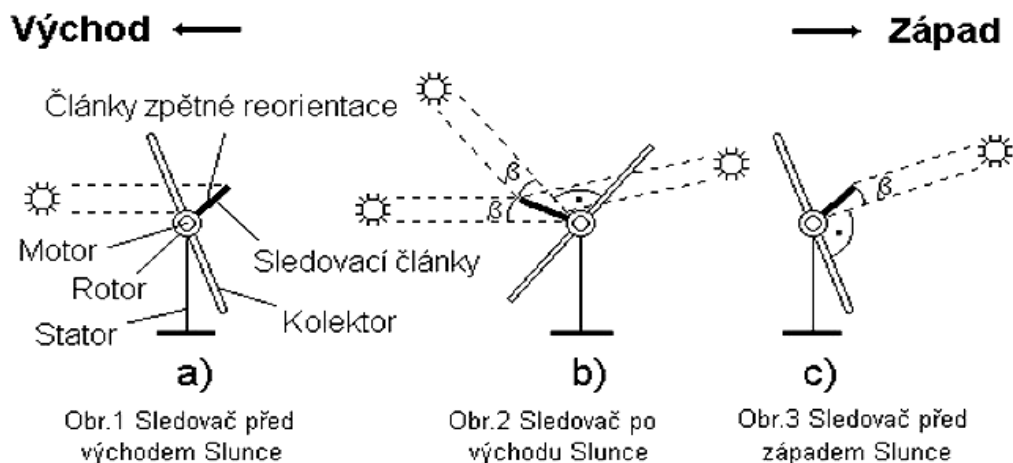
## 1.6 Zvýšení účinnosti fotovoltaických panelů

### Oboustranné panely

Oboustranné panely mají schopnost využít i záření, které se odráží od terénu nebo okolních ploch. Křemenný písek nebo sníh mají vysokou hodnotu odrazivosti oproti trávě nebo hlíně. U fotovoltaických panelů na bázi krystalického křemíku s pohyblivým stojanem mají o 5-12°C nižší teplotu než klasické fotovoltaické panely z krystalického křemíku na střechách. Tento fakt může zvýšit množství vyrobené energie o 3-5%, protože fotovoltaické články jsou schopné při nižší teplotě vyšší přeměny energie. [13]

## Otočný stojan

Umožňuje fotovoltaickému panelu se natáčet kolmo ke slunečním paprskům. Tímto způsobem lze získat až o 40% více energie. Otočný stojan je poháněn motorem, který je připojen k pomocným solárním panelům. Panely s tímto stojanem jsou méně znečištěné od okolního prostředí, tudíž mají i vyšší účinnost. [33]



Obr. 5 Schéma natáčení panelu [60]

## Koncentrátory slunečního záření

Jedná se o zrcadla, která slouží ke shromažďování slunečního záření z velké plochy a soustřeďují jej na solární článek. Koncentrátor je levnější než fotovoltaický článek a zvyšuje jeho účinnost. Aby koncentrátor byl co nejúčinnější, je nutné sledovat Slunce. Proto se instalují pohybové mechanismy. Při instalaci koncentrátoru je potřeba chladicí systém pro fotovoltaický článek, protože koncentrované záření zvyšuje teplotu článku a ohrožuje jeho dlouhodobou stabilitu. [19]

- *Koncentrátory s rovinným zrcadlem*

Výroba rovinného zrcadla je jednoduchá. Je vhodné jej kombinovat s otočnými stojany nebo oboustrannými moduly. [10]

- *Koncentrátory s parabolickým zrcadlem*

Účinnost tohoto typu je až 30%. Mají složitou konstrukci, proto se používají jako malé zdroje elektrické energie a jako solární vařiče. Tímto zrcadlem lze dosáhnout teplot i přes 1000°C. Je důležité použít chlazení. Teplo lze využít např. k ohřevu vody. [27]

- *Koncentrátory s Fresnelovými čočkami*

Fresnelova čočka je optická čočka, která je schopna přenášet světlo s účinností až 80%. Běžné čočky mají účinnost kolem 20%. Průměr může být až 2,5m a okrajové prstence světlo odrážejí určitým směrem. Výhodou těchto čoček je jednodušší sériová výroba než u zrcadel a možnost velmi malých rozměrů koncentrátoru, který dosahuje vysokých hodnot koncentrace.[10,15]

## 2 Fotovoltaická elektrárna

Základem fotovoltaické elektrárny (dále jen FVE) je fotovoltaický panel, který je složený z fotovoltaických článků a střídač proudu. Složení FVE závisí na použitém systému. Pro ostrovní systémy se užívají akumulátory. V elektrárně nalezneme elektroměry, jističe případně i záložní zdroje energie.

### 2.1 Střídač

- *proudový*

Slouží k přeměně stejnosměrného proudu, který fotovoltaické články vyrábějí, na střídavý. Tato přeměna je důležitá pro odvod proudu do rozvodné sítě. Pomocí spínacích obvodů měnič přemění stejnosměrný proud na střídavý. Tento výsledný proud je transformován na požadované napětí. [10]

- *napěťový*

Z energie malého napětí, které dodávají fotovoltaické články, zvýší napětí energie tak, aby se dalo přenášet. [20]

### 2.2 Akumulátor

Akumulátory se používají, je-li potřeba elektrické energie např. v noci nebo v zimě, kdy je nedostatek slunečního svitu. Vyrábí se několik druhů akumulátorů např. Lithium- iontové, nikl- kadmiové nebo olověné.

- *Lithium- iontové akumulátory*

Lithium je lehké a vysoce reaktivní, čímž poskytuje vyšší napětí článku přibližně 3V. Tyto baterie nemají příliš dlouhou životnost (malé baterie do 5 let), vyšší teplota znatelně zkracuje životnost. Akumulátor postupně ztrácí kapacitu a nesnese hluboké vybíjení, které baterii může zničit.

- *Nikl- kadmiové akumulátory*

Hlavní výhodou těchto akumulátorů je jejich dlouhá životnost (10- 20 let). Nevýhodou je tzv. paměťový efekt, kdy při neúplném vybití dochází ke ztrátě kapacity. Při teplotě nad 25°C dochází k vyššímu samovybíjení. Kadmium se řadí mezi nebezpečný odpad.

- *Olověné akumulátory*

Nejpoužívanější jsou olověné bezúdržbové akumulátory, které přeměňují přijatou energii na chemickou a při vybíjení na elektrickou. Tyto akumulátory dobře snášejí hluboké vybíjení.

### **2.2.1 Trakční akumulátor se zaplavenými elektrodami**

Jedná se o údržbový akumulátor se zátkami pro doplnění elektrolytu. Elektrolyt je tvořen koncentrovanou kyselinou sírovou zředěnou vodou. Při elektrolýze vznikají plyny rozkladem vody na kyslík a vodík, proto je konstruován tak, aby plyny mohly samovolně unikát. Odpařováním a rozkladem vody ubývá elektrolyt, který se musí doplňovat destilovanou vodou. Tento typ lze dobíjet vyššími proudy. [10]

### **2.2.2 Trakční akumulátor VRLA**

Jedná se o bezúdržbový akumulátor se speciálním ventilem pro regulaci pracovního tlaku. Konstrukce akumulátoru je uzavřená. Akumulátory VRLA dále dělíme na AGM akumulátory a gelové akumulátory.

- *AGM akumulátory*

Obsahují tekutý elektrolyt, který je vsáklý do speciálních skelných tkanin. Tento akumulátor je schopen dodávat velký výkon při nízkých teplotách, je vysoce odolný vůči otřesům, má vyšší kapacitu při stejné hmotnosti a spoustu dalších výhod.

- *Gelové akumulátory*

Tyto akumulátory mají stejnou konstrukci jako AGM akumulátory, ale elektrolyt je ve formě hustého gelu. Velkou výhodou je menší citlivost při vyšší pracovní teplotě a lepší schopnost rekombinace plynů. Vlastnosti těchto akumulátorů jsou podobné vlastnostem AGM akumulátorů. [7]

## **2.3 Kabele pro fotovoltaiku**

Kabele pro fotovoltaické aplikace musí splňovat několik podmínek pro jejich použití:

- vysokou mechanickou odolnost a stálost parametrů za různých podmínek,
- vysokou odolnost proti klimatickým podmínkám,
- nízký ztrátový odpor a optimální kapacitu / indukčnost pro minimalizaci ztrát generovaného výkonu.

Velké množství fotovoltaických instalací je ve venkovním prostředí, proto plášť i celý kabel musí být odolný proti vnějším vlivům, jako je teplota, vítr, hydrolýza, UV záření a dalším agresivním látkám. [17]

Samozřejmostí by mělo být plnění normy ČSN IEC 60332-1-2(347107) Zkoušky elektrických a optických kabelů v podmínkách požáru. Kabely se obvykle vyskytují v místech s teplotním rozsahem od  $-40^{\circ}\text{C}$  až do  $120^{\circ}\text{C}$ , z tohoto důvodu by měly být konstruovány tak, aby nedošlo k požáru. [1]

Plášť kabelu je většinou tvořen polyolefinem. Jedná se o fólii, která je vysoce pevná, odolná v tahu a proti průrazu. Plášť zůstává pevný a pružný v širokém rozsahu teplot. [23]



## 3 Legislativní prostředí ČR

### 3.1 Oblast fotovoltaiky

V ČR jsou důležité dva základní zákony, které upravují podmínky podnikání a podporu výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie (dále jen OZE).

#### **Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)**

Tento zákon upravuje podmínky podnikání, výkon státní správy a regulaci v energetických odvětvích, jimiž jsou plynárenství, teplárenství a elektroenergetika. Od jeho vydání byl upraven několika vyhláškami. [32]

#### **Zákon č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů)**

Cílem je podpora využití OZE, trvalé zvyšování podílu OZE na spotřebě primárních energetických zdrojů, přispění k šetrnému využívání přírodních zdrojů, splnění cíle podílu elektřiny z OZE na hrubé spotřebě elektřiny ČR na 8% k roku 2010 a vytvoření podmínek pro zvyšování tohoto podílu po roce 2010. [31]

#### **Vyhlášky Energetického regulačního ústavu**

Doplňující zákony č. 458/2000 Sb. a č. 180/2005 Sb.

- Vyhláška č. 51/2006 Sb., stanovující podmínky pro připojení zařízení k elektrizační soustavě
- Vyhláška č. 363/2007 Sb., kterou se mění vyhláška č. 426/2005 Sb., o podrobnostech udělování licencí pro podnikání v energetických odvětvích
- Vyhláška č. 347/2012 Sb., kterou se stanoví technicko-ekonomické parametry obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny a doba životnosti výroben elektřiny z podporovaných zdrojů [psp]

### 3.2 Zelený bonus

Při výrobě elektřiny z různých zdrojů vznikají rozdílné náklady. Cena elektřiny z obnovitelných zdrojů energie je dražší než elektřina z neobnovitelných zdrojů energie. Zelený bonus tzv. „dorovnávač“ vzniklé rozdíly. Tento bonus je určen pouze pro ty, kteří

vyrobenou elektřinu využívají pro svojí vlastní potřebu a případný přebytek prodávají do distribuční sítě. [34]

Přehled zelených bonusů pro rok 2013 je k vidění v příloze (Tab. 4).

### 3.3 Oblast recyklace fotovoltaiky

#### **Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a změně některých dalších zákonů**

Tímto zákonem jsou stanovena pravidla pro nakládání s odpady a předcházení jejich vzniku při dodržování ochrany životního prostředí a lidského zdraví. Na prvním místě je recyklace odpadu nebo jeho využití. V platnost vešel 1. 1. 2002

Díl 8 čtvrté části se zabývá elektrickými a elektronickými zařízeními. Do této kategorie spadají i solární panely.

*„Pro solární panely uvedené na trh do dne 1. ledna 2013 zajistí financování předání ke zpracování, využití a odstranění elektroodpadu ze solárních panelů, včetně plnění těchto povinností, provozovatel solární elektrárny, jejíž jsou solární panely součástí, prostřednictvím osoby podle § 37h odst. 1 písm. c).*

*Pro solární panely uvedené na trh po dni 1. ledna 2013, zajistí financování odděleného sběru, zpracování, využití a odstranění výrobce. Před uvedením solárních panelů na trh je výrobce povinen poskytnout záruku prokazující, že nakládání s elektroodpadem ze solárních panelů bude finančně zajištěno.“ [30]*

#### **Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/19/EC, o odpadních elektrických a elektronických zařízeních**

Směrnice platí od 13. srpna 2012, členské státy Evropské unie mají povinnost tuto směrnici zapracovat do své legislativy do 14. února 2014. Cílem směrnice je zvýšení ochrany životního prostředí a lidského zdraví snížením nepříznivých vlivů odpadu z elektrických a elektronických zařízení. Do této směrnice byly nově zařazeny fotovoltaické panely do čtvrté kategorie – Spotřební elektronika a fotovoltaické panely. [3]

Podle směrnice mají být výrobci zodpovědní za financování nakládání s odpady. Výrobce je povinen zajistit zdarma dopravu, zpracování fotovoltaických panelů z domácností a náklady na provoz sběrných míst.

Je třeba, aby výrobci převzali plnou odpovědnost a financovali nakládání s odpady z vlastních výrobků. Výrobce může tuto povinnost plnit samostatně nebo pomocí kolektivního systému.

Pro zamezení rizika, že by náklady spojené s nakládáním s odpadem elektrických a elektronických zařízení z bezprizorních výrobků nesli ostatní výrobci či společnost, je nutné, aby každý výrobce poskytl finanční záruku při uvádění svého výrobku na trh.

Směrnice se řídí principem „znečišťovatel platí“, tím se platby za sběr elektrických a elektronických odpadů přesouvají od daňových poplatníků na spotřebitele. [4]

**Zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů**

Pomocí tohoto zákona se zpracovává do zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech a změně některých dalších zákonů, směrnici Evropského parlamentu a Rady 2012/19/EC. Provozovatel fotovoltaické elektrárny je povinen zajistit financování odstranění elektroodpadu ze solárních panelů uvedených na trh do 1. 1. 2013. [3]

## 4 Recyklace fotovoltaických panelů

Jako konec životnosti se u fotovoltaických panelů považuje pokles výkonu o 20%. Výrobci garantují maximální pokles o 10% za 10 let. U kvalitních panelů může být životnost 30 až 40 let od uvedení do provozu. Po poklesu panely stále vyrábějí elektrickou energii, jen s nižší účinností, která bude dále klesat.

Většina doposud vyřazených panelů je z důvodu mechanického poškození nebo použití nekvalitních materiálů. Kolem roku 2040 se očekává velký nárůst vyřazených panelů, do té doby se v České republice nevyplatí výstavba recyklační linky pro fotovoltaické panely. Z tohoto důvodu je možné panely recyklovat pomocí programu PV Cycle na recyklačních linkách v Německu. V ČR jsou zatím dvě oficiální sběrná místa (viz kapitola 4.3.1). [4]

Rok	Instalovaný výkon [MWp]	Množství panelů [t]	Předpokládaný konec životnosti
2007	3	350	2035 až 2045
2008	62	6 600	2035 až 2045
2009	427	41 000	2035 až 2045
2010	1443	135 000	2040 až 2050
2011	27	2 500	2040 až 2050

Tab. 1 Počet fotovoltaických panelů instalovaných v ČR [1t]

### 4.1 Recyklace fotovoltaických článků

Recyklační proces fotovoltaických článků zahrnuje několik kroků.

#### 1. Oddělení křemíkových článků z poškozených nebo vysloužilých fotovoltaických panelů

Procesem delaminace je nutné odstranit EVA fólii a oddělit od sebe materiály jako je sklo, hliníkový rám, Tedlar, plasty atd. Proces delaminace je prováděn chemickou nebo termickou metodou.

- *Chemická metoda*

Provádí se použitím tetrahydrofuranu, díky kterému je možné od sebe materiály oddělit. Pro dosažení optimálních výsledků touto metodou je zapotřebí příliš mnoho času při vysokých finančních nákladech použitého rozpouštědla.

- *Termická metoda*

Pro oddělení křemíkových fotovoltaických článků se panel zahřívá nad teplotu tání EVA fólie.

Pro delaminaci se upřednostňuje termická metoda, kterou navrhla a odzkoušela firma Deutsche Solar AG. Termickou metodou lze za přijatelných nákladů dosáhnout poměrně vysoké účinnosti. Chemické sloučeniny pro chemickou metodu mají vysokou cenu a vznikají dodatečné náklady na jejich likvidaci.

## **2. Povrchové čištění křemíkových destiček**

Po oddělení materiálů je nutné vyčistit křemíkové destičky. Pro čištění se používá chemické a laserové čištění povrchu.

- *Chemické čištění*

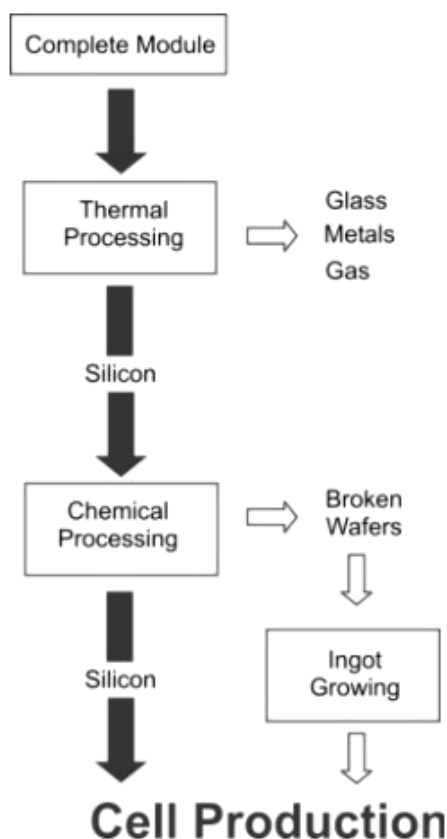
Z fotovoltaického článku je nutné odstranit veškeré ochranné vrstvy např. čelní metalizaci, spodní metalizaci, antireflexní vrstvu.

Článek se ponoří do roztoku hydroxidu draselného, opláchne se ve vodě a vkládá se do dalších leptacích roztoků podle vrstev článku. Největším problémem je správný výběr leptacího roztoku, jeho koncentrace a optimální provozní teplota.

- *Laserové čištění*

Použití laseru je velice nákladné a zdoluhavé. Při experimentu se podařilo touto metodou odstranit metalizaci i antireflexní vrstvu. Odhaduje se, že za 1 min se odstraní 1 cm<sup>2</sup>.

Pro čištění křemíkových destiček je vhodnější chemické čištění, které není tak nákladné jako laserové čištění. Proces chemického čištění je mnohem rychlejší, destička se čistí celá najednou ponořením do chemikálie. [14]



Obr. 6 Recyklační proces společnosti Deutsche Solar AG [40]

Kromě separace za použití termické metody lze fotovoltaické články recyklovat pomocí kombinované metody, tj. mechanicko-chemické.

### Termická metoda

Panely jsou vloženy do pece, kde jsou zahřívány nad 500°C. Plastové materiály se při této teplotě odpaří a v další komoře se spalují. Zbylý materiál se od sebe odděluje ručně. Z nepoškozených panelů je možné získat přes 80% článků, které lze znovu využít. Tímto způsobem je možné snížit spotřebu energie na výrobu nových panelů až o 70%. Nevýhodou této metody jsou emise při spalování plastových materiálů.

### Mechanicko-chemická metoda

Panel se odmontuje z hliníku rámu a od připojovacího boxu. Následně se rozdrtí a roztřídí podle velikosti úlomků. Pro oddělení materiálů je nutné použít další metody např. fluidní a mokré splavy a elektrodynamická separace. Elektrolýzou, chemicky a pyrometalurgicky získáváme těžké kovy, jako je stříbro, olovo, cín a měď. Plasty se likvidují spálením. Výhodou oproti termické metodě je méně ruční práce, ale výsledkem jsou drcené suroviny. Tato metoda je vhodná pro tenkovrstvé články a rozbité krystalické články.

Malý objem fotovoltaických panelů lze recyklovat jako odpadní sklo, ale tímto způsobem jdou cenné materiály do odpadu. [4]

Obrázky recyklačních linek jsou v příloze (Obr. 14, 15).

### **Konstrukční úpravy**

Konstrukční úpravy jsou navrhovány za účelem usnadnění demontáže fotovoltaických článků z panelu na konci jeho životnosti. Nejběžnější jsou metody zapouzdření. Příkladem je dvojité zapouzdření s nízkou přilnavostí k článkům, Double Encapsulated Module (DEM)

- *Double encapsulated module*

Před laminací do EVA fólie se samotné články zapouzdří do silikonu. Účinnost se při dodatečných vrstvách sníží zhruba o 3%. Při samotné demontáži se zahřeje a odstraní vrstva Tedlaru, rozřízne se EVA fólie a pomocí speciálního přípravku se článek oddělí od podkladu. [2]

## **4.2 Recyklace komponentů**

Fotovoltaické panely nejsou složeny jen z fotovoltaických článků. Proto je nutné zrecyklovat i ostatní komponenty jako je např. rám, kabely, kterými je panel připojen atd.

### **Hliníková rám**

Při recyklaci hliníkových rámců se demontují panely, které procházejí jiným recyklačním procesem. Hliník je 100% recyklovatelný, bez ztráty vlastností, které se tavením nemění. Oproti výrobě je recyklace hliníku energeticky úsporná, recyklace a roztavení šetří přibližně 97% energie, která je potřeba na výrobu kovu. Hliník se drtí a taví do hliníkových ingotů, které se dále zpracovávají. [16]

Pokud nejsou hliníkové rámy poškozeny lze je znovu využít pro FVE.

### **Recyklace fotovoltaických kabelů**

Na vstupu recyklačního procesu jsou kabely nadrceny na drobné části. V dalším kroku jsou části kabelů rozmělněny na jemné granule, které jsou pomocí vzdušného cyklónu, magnetu a vodního splavu očištěny od nežádoucích částic. Účinnost této technologie je 99,5%. Výsledný granulát je dále zpracován. [26]

## Recyklace akumulátorů a měničů

Z akumulátorů a měničů se metalurgické závody snaží získat co nejvíce kovů a znovu je využít.

### 4.3 PV CYCLE

Jedná se o neziskovou společnost, která byla založena v roce 2007 a zajišťuje pro dovozce, dodavatele nebo výrobce z evropských zemí zpětný odběr vysloužilých fotovoltaických panelů. V tomto programu je přibližně 90% výrobců z evropského trhu s fotovoltaikou. [24]



Obr. 7 Princip PV Cycle [80]

#### 4.3.1 Výhody programu PV Cycle

Vstupem do kolektivu se snižují administrativní a provozní náklady. PV Cycle se specializuje pouze na fotovoltaické panely, čímž se snižují náklady na třídění a případnou kontaminaci s jiným odpadem.

PV Cycle nepředstavuje pouze recyklační nebo dopravní společnost, podporuje i jednotné recyklační řešení. Organizace spolupracuje s externími, nezávislými společnostmi. Snaží se najít nejlepší řešení pro shromážděné panely.



Členové mají možnost podílet se na strategii a organizaci.

Jak již bylo zmíněno, zachází se pouze s fotovoltaickými moduly. Pro většinu evropského trhu je PV Cycle preferovaným partnerem, který využívá dlouholeté zkušenosti v oboru odpadového hospodářství fotovoltaiky.

PV Cycle je funkční systém pro všechny systémy fotovoltaických technologií v Evropě. Použití nejlepší dostupné techniky přináší vysoký výkon recyklace trvale udržitelným a nákladově efektivním způsobem. [29]

### 4.3.2 Sběrná místa

V každém sběrném místě přijímají nepoškozené panely od výrobců, kteří jsou členy PV Cycle. Tenkovrstvé panely se recyklují jiným způsobem než krystalické, proto v místě sběru jsou umístěny kontejnery na křemíkové a tenkovrstvé panely. Pro menší množství panelů (méně než 40) je zapotřebí vyplnit dodací formulář a panely je možné odvézt do sběrného místa. V případě většího množství (více než 40) je nutné kontaktovat společnost PV Cycle, která zařídí přímý odběr. [24]

Sběrná místa jsou v Evropě zastoupena v hojném počtu jak je vidět na obrázku č. 8. Itálie má vlastní pobočku PV Cycle.



Obr. 8 Sběrná místa PV Cycle v Evropě [70]

V České republice jsou dvě sběrná místa. V Plané firma Terms a.s. a v Brně firma Krannich Solar s.r.o.

## 5 Ekonomická a energetická náročnost

Tato část je zaměřena na zhodnocení ekonomické a energetické náročnosti recyklace dosud nepoužívanějších fotovoltaických panelů, tedy křemíkových.

### 5.1 Ekonomické zhodnocení

Aby se recyklační proces z ekonomického hlediska vyplatil, byla by nutná kapacita recyklační linky kolem 20 tisíc tun panelů za rok. V ČR lze takové množství očekávat kolem roku 2040, kdy budou vyřazovány panely, které byly instalovány v roce 2010.

Nejvíce speciálních linek na recyklaci fotovoltaických panelů bude s největší pravděpodobností v Německu, které má nejvyspělejší trh s fotovoltaikou a působí zde program PV Cycle.

Využitím univerzálních metod recyklace, se sice zlevní samotný recyklační proces, ale nelze tímto způsobem využít speciální fotovoltaické materiály a jejich potencionální prodej.

V tabulce (Tab. 2) je vidět procentuální podíl jednotlivých materiálů v celém fotovoltaickém panelu.

Materiál	Podíl na hmotnosti [%]	Výtěžnost recyklace [%]
Sklo	65 – 80	> 95
Hliník	10 – 20	> 99
Plasty	5 – 10	-
Křemík	3 – 4	85
Měď	1	> 80
Olovo	0 – 0,1	-
Stříbro	0,1 – 0,2	-
Cín	0,1 – 0,2	-
Ostatní	< 1	-

Tab. 2 Průměrné materiálové složení krystalických panelů [1t]

- *Sklo*

V ČR se nepodařilo zjistit cenu odpadního čirého skla. Předpokládá se, že recyklované sklo bude uplatněno bez dalších nákladů. Na britském trhu je cena relativně stabilní. Cena se pohybuje okolo 25 -30 £ za tunu čirého skla. Obsahu 75% skla ve fotovoltaickém článku odpovídá 0,5 až 0,7 Kč/kg.

- *Hliník*

Čisté nebo barvené profily hliníku se v ČR vykupují za 30 Kč/kg. Podíl hliníku na panelu je 10 - 20%, tedy 3 až 6 Kč/kg.

- *Křemík*

Cena polykrystalického křemíku je 20 až 25 \$/kg. Při výtěžnosti recyklace 80% z 3% křemíku obsaženého ve fotovoltaických panelech z 1 kg se cena bude pohybovat okolo 10 Kč. Pokud bude křemík znečištěn, jeho cena ještě klesne.

- *Stříbro*

Výkupní cena stříbra je zhruba 20 Kč/g. Při podílu 0,1% stříbra je cena 20 Kč/kg.

### **Demontáž**

Demontáž panelu může být rentabilní bez dalších nákladů na zpracování. Konstrukce bývají hliníkové nebo ocelové. Jejich sběr a recyklace jsou na poměrně vysoké úrovni. Měděné vodiče a kabely s izolací se vykupují za 35 až 40 Kč/kg, bez izolace až za 135 Kč/kg. Hliníkové vodiče s izolací za 3 Kč/kg a bez izolace až za 35 Kč/kg.

### **Doprava**

V některých případech jsou náklady na dopravu zahrnuty v recyklačním poplatku. Platí-li se doprava zvlášť, účtuje se většinou 1 Kč/kg přepravovaných panelů při překročení určité vzdálenosti nebo naopak při menší vzdálenosti je doprava zdarma.

PV Cycle udává celkové náklady 0,15 €/kg recyklovaných panelů. Z této částky je 0,05 €/kg za recyklaci a 0,1 €/kg jsou náklady na dopravu, výrobu sběrných kontejnerů a další.

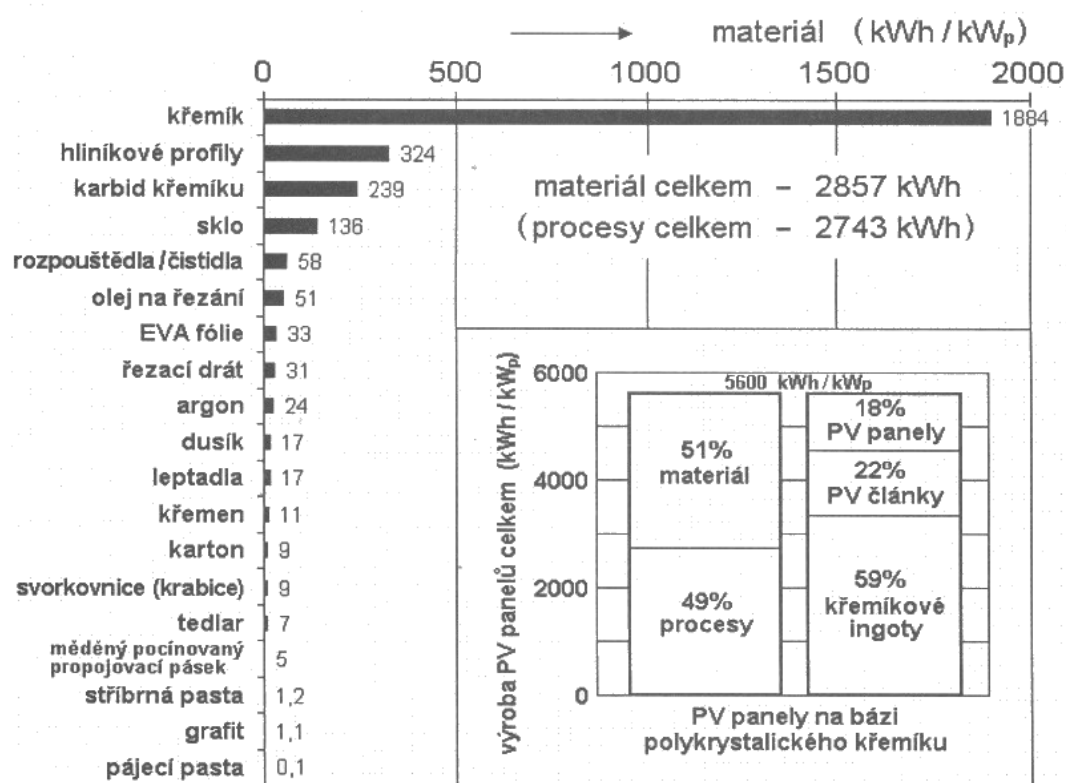
Průměrné náklady na dopravu jsou odhadnuty na 0,50 až 1 Kč/kg. [4]

## 5.2 Energetické zhodnocení

Výroba čistého křemíku pro fotovoltaické články je poměrně drahá a energeticky náročná metoda. Recyklace článků umožňuje opětovné použití křemíkové destičky, není-li poškozená, a tím snižuje cenu celého panelu.

Celková spotřeba energie recyklačního procesu je rozdělena na elektrickou energii potřebnou k čištění spalin v průběhu tepelného zpracování a na energii pro provoz leptací linky. Pro výrobu křemíkových destiček je důležitá vysoká vstupní energie

Množství potřebné energie pro výrobu polykrystalického panelu s maximálním výkonem 1 kWp je uvedeno v obrázku 10.



Obr. 9 Bilance energie potřebné k výrobě polykrystalického panelu s maximálním výkonem 1 kWp [11o]

### Srovnání panelu s novými křemíkovými destičkami a s recyklovanými křemíkovými destičkami

Tato analýza byla provedena pro recyklační systém společností Deutsche Solar AG. Týká se 72 polykrystalických článků o rozměrech 12,5 x 12,5 cm o výkonu 160 Wp.

Pro recyklaci 72 destiček bylo spotřebováno 92 kWh, což odpovídá 30% energie nutné na výrobu 72 nových destiček. Energy pay-back time (EPBT) panelu s recyklovanými destičkami je o 1,7 roku kratší než u standardního modulu. [11]

Spotřebovaná energie je uvedena v tabulce (Tab. 3).

Úkon	Modul s novými destičkami	Modul s recyklovanými destičkami
Výroba destiček [kWh]	306	-
Recyklace [kWh]	-	92
Zpracování článku [kWh]	49	49
Sestavení panelu [kWh]	45	45
Celkem [kWh]	400	186
Výroba energie [kWh/rok]	120	120
EPBT [rok]	3,3	1,6

Tab. 3 Spotřeba energie při výrobě a recyklaci polykrystalického článku [2t]

### 5.3 Dopad na životní prostředí

Pro posuzování životního cyklu se používá metoda LCA (Life Cycle Assessment). Provádí se porovnáváním environmentálních dopadů produktů po jejich celý životní cyklus. V potaz se berou emise při výrobě, užívání i odstraňování produktu.

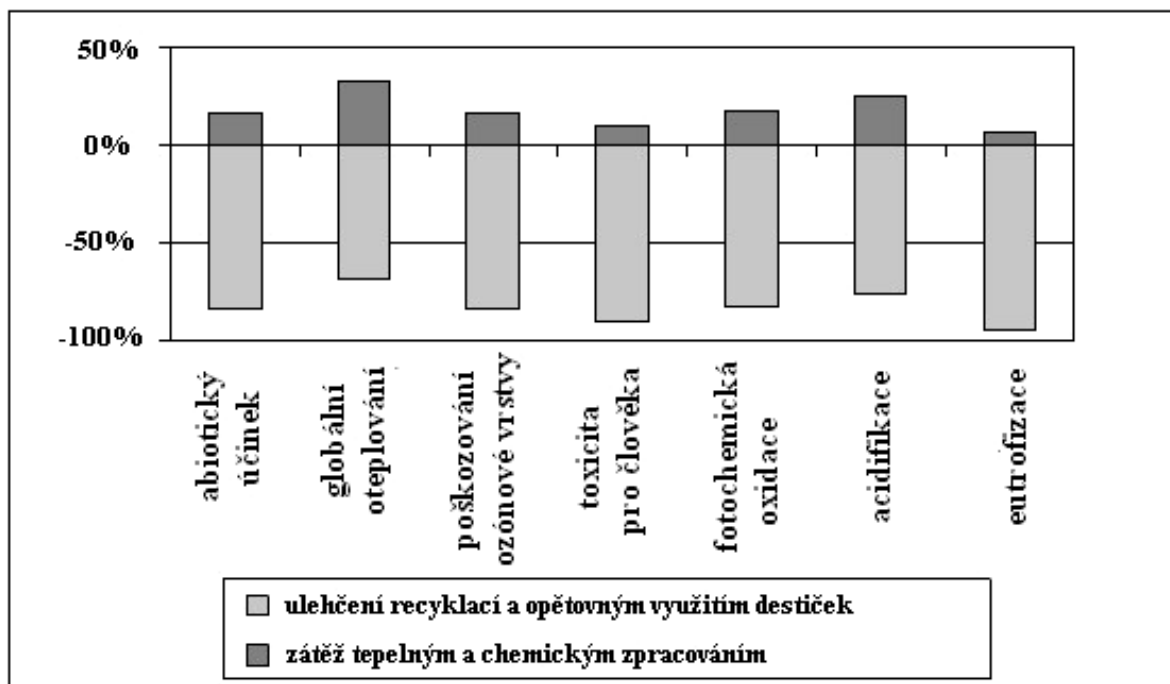
Metoda je prováděna podle mezinárodních norem ISO 14040. Pro zpracování se používají komerčně dostupné databáze procesů, materiálových a energetických toků. [18]

Hlavní fáze LCA

- definice cílů a rozsahu
- inventarizační analýza
- hodnocení dopadů
- interpretace životního cyklu

Pomocí metody LCA byl zkoumán standardní panel se 72 články o rozměrech 12,5 x 12,5 cm, zadní stěnou tvořenou Tedlarem a s hliníkovým rámem. Byla použita metoda institutu vědy o životním prostředí v Leidenu a analýza byla provedena softwarem 6.0 Simparo. Pro výpočty

byly použity údaje společnosti Deutsche Solar. Proces je hodnocen z hlediska 7 kategorií, přičemž každá má svůj specifický ukazatel. Z tohoto důvodu byly hodnoty v obrázku (Obr. 10) převedeny na procenta, aby bylo možné jejich porovnání.



Obr. 10 Ulehčení a zátěž recyklačního procesu Deutsche Solar AG [10o]

Proti sobě jsou zobrazeny zátěž životního prostředí (pozitivní) a ulehčení životnímu prostředí (negativní) recyklačním procesem.

Proces recyklace dosahuje vyšších hodnot dopadu na životní prostředí ve srovnání s ukládáním odpadu s nízkými dopady na životní prostředí, ale bez možnosti recyklace materiálu a opětovného využití jednotlivých součástí.

Zátěž velice úzce souvisí se spotřebou energie při tepelném zpracování a použitím chemických látek na leptání. Snížením spotřeby energie a chemických látek je možné snížit i dopady na životní prostředí. [11]

## Závěr

Fotovoltaické panely na konci životnosti se dají zlikvidovat dvěma způsoby, ekologickou likvidací, po které zůstává další odpad, nebo recyklací. Recyklace je výhodná, neboť snižuje energetickou náročnost výroby a výrobní náklady na nové fotovoltaické panely opětovným použitím některých součástí. Nejdražší součástí fotovoltaických panelů je křemík, který je možné díky recyklaci získat z vysloužilých nebo porouchaných panelů a pokud není poškozený, je možné jej znovu použít.

Pro recyklaci byly navrženy dvě základní metody, termicko-chemická a mechanicko-chemická, a také konstrukční úpravy, které usnadňují oddělení článků od panelů. Nejpoužívanější metodou recyklace je termická metoda. Při termické úpravě dochází ke spalování fólie a plastových komponentů a vznikají emise, které zatěžují životní prostředí. Dalším nepříznivým dopadem na životní prostředí této metody je použití chemických roztoků. Metoda je však časově i finančně úsporná oproti mechanicko-chemické metodě, u které je sice menší podíl ruční práce, ale výsledkem je pouze drcený produkt bez opětovného použití součástí.

Technologie fotovoltaických článků se stále vyvíjí, snaží se vytvořit co nejtenčí články, pro úsporu materiálu, s co největší účinností. Tenkovrstvé články je poměrně složitě recyklovat právě z důvodů jejich tloušťky. Pro tenkovrstvé články je vhodná mechanicko-chemická metoda, protože křemíkové destičky těchto článků bývají při separaci a čištění často poškozeny.

Výrobci jsou od ledna roku 2013 povinni odebrat vysloužilé panely a řádně je zlikvidovat nebo zrecyklovat. Nevládní organizace PV Cycle umožňuje výrobcům i provozovatelům fotovoltaických elektráren zpětný odběr vysloužilých panelů a jejich likvidaci bez dalších nákladů.

Z doposud dostupných analýz se recyklace jeví jako vhodný a výhodný způsob likvidace fotovoltaických panelů. Větší objemy panelů k likvidaci budou vyřazovány kolem roku 2040. Do té doby je možné současné metody zlepšit, zvýšit jejich účinnost a případně vytvořit metody nové.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BADALÍK, Antonín. *Ucelený systém kabelů a konektorů pro fotovoltaiku*. Tzb-info.cz [online]. 17. 10. 2008 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: < <http://www.tzb-info.cz/5145-uceleny-system-kabelu-a-konektoru-pro-fotovoltaiku> >
- [2] BECHNÍK, B., BAŘINKA, R., ČECH, P. *Analýza životního cyklu fotovoltaických systémů*. CZE RE AGENCY [online]. 2009 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: < <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika/ziv-cyklus> >
- [3] BECHNÍK, Bronislav. *Legislativa k recyklaci fotovoltaických panelů: Srovnání evropské směrnice a českého zákona*. Tzb-info.cz [online]. 20. 8. 2012 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: < <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/8945-legislativa-k-recyklaci-fotovoltaickych-panelu> >
- [4] BECHNÍK, Bronislav. *Náklady na recyklaci fotovoltaických panelů*. CZEPHO [online]. 2012 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: < <http://czepho.kurzor.net/attachments/article/8/RecyklaceFVpanelu20120808a.pdf> >
- [5] BENEŠOVÁ, Hana a ŠKORPIL, Jan. *Tandemové fotovoltaické články - jeden ze směrů výzkumu a vývoje v oblasti fotovoltaiky III. generace*. Digitální knihovna Západočeské univerzity v Plzni [online]. 2012 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: < <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/675/1/r6c1c3.pdf> >
- [6] HAVRÁNEK, Miroslav. *Organické polymery jako zdroj energie*. ALDEBARAN BULLETIN [online]. 2007 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: < [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2007\\_30\\_org.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2007_30_org.php) >
- [7] HNILICA, Pavel. *Jaké akumulátory (trakční baterie) budou potřebovat pro solární ostrovní systém*. Solarnimoduly.cz [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: < <http://www.solarnimoduly.cz/jaky-akumulator.html> >
- [8] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. 174 s. ISBN 80-7082-940-0
- [9] LIBRA, Martin a POULEK, Vladislav. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie*. 1. vyd. Praha: ILSA, 2009. 160 s. ISBN 978-80-904311-0-2
- [10] MURTINGER, Karel, BERANOVSKÝ, Jiří a TOMEŠ, Milan. *Fotovoltaika, elektřina ze slunce*. 1. vyd. Brno: ERA, 2007. vii, 81 s. 21. století. ISBN 978-80-7366-100-7



- [11] MÜLLER, Anja, WAMBACH, Karsten and ALESMA, Erik. *Life Cycle Analysis of Solar Module Recycling Process*. ResearchGate [online]. 2006 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: < [http://www.researchgate.net/publication/46689298\\_Life\\_cycle\\_analysis\\_of\\_a\\_solar\\_module\\_recycling\\_process/file/d912f50890ded08ed7.pdf](http://www.researchgate.net/publication/46689298_Life_cycle_analysis_of_a_solar_module_recycling_process/file/d912f50890ded08ed7.pdf) >
- [13] POULEK, Vladislav a LIBRA, Martin. *Vysoce účinné fotovoltaické systémy s trackery a koncentrátory záření*. Tzb-info [online]. 21. 9. 2006 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: < <http://www.tzb-info.cz/3542-vysoce-ucinne-fotovoltaicke-systemy-s-trackery-a-koncentratory-zareni> >
- [14] RADZIEMSKA, Eva, OSTROWSKI, Piotr, CENIAN, Adam a SAWCZAK, Mirosław. *CHEMICAL, THERMAL AND LASER PROCESSES IN RECYCLING OF PHOTOVOLTAIC SILICON SOLAR CELLS AND MODULES*. Ecological Chemistry and Engineering [online]. 2010 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: < [http://tchie.uni.opole.pl/freeECE/S\\_17\\_3/RadziemskaOstrowski\\_17\(S3\).pdf](http://tchie.uni.opole.pl/freeECE/S_17_3/RadziemskaOstrowski_17(S3).pdf) >
- [15] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. *Fresnelova čočka*. Encyklopedie fyziky [online]. 2013 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: < <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1534-fresnelova-cocka> >
- [16] TURČINEK, Petr. *Analýza světové těžby a spotřeby hliníku a chrómu*. Kunovice, 2010. Bakalářská práce. Evropský polytechnický institut, s.r.o. Vedoucí práce RNDr. Lubomír MITÁČEK. Dostupné z: < [http://edice.vos.cz/files/pdf/679\\_bc\\_final.pdf](http://edice.vos.cz/files/pdf/679_bc_final.pdf) >
- [17] VOJÁČEK, Antonín. *Začínáme s fotovoltaickými panely*. Tzb-info [online]. 23. 11. 2009 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: < <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/6068-zaciname-s-fotovoltaickymi-panely> >
- [18] *Co je LCA?*. LCA [online]. 3. 5. 2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: < <http://www.lca.cz/cz/106-co-je-lca> >
- [19] *Concentrator Photovoltaic Systems*. EERE [online]. 22. 4. 2013 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: < [http://www.eere.energy.gov/basics/renewable\\_energy/concentrator\\_pv\\_systems.html](http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/concentrator_pv_systems.html) >

- [20] *Jak funguje měnič napětí ve fotovoltaické elektrárně?*. Diskuze.elektrika.cz [online]. [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: < <http://diskuse.elektrika.cz/index.php/topic,19263.0.html/view> >
- [21] *Fotovoltaika pro každého*. CZECH RE AGENCY [online]. 2009 [cit. 2013-04-06]. Dostupné z: < <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika> >
- [22] *Ostrovní systémy*. SOLARENVI [online]. 2013 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: < <http://solarenavi.cz/slunecni-elektrarny/typy-instalaci/off-grid-ostrovni-system> >
- [23] *Polyolefin*. Bohemia Trade CZ [online]. 2013 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: < <http://bohemia-trade-cz.trade.cz/polyolefin> >
- [24] *Procedure End-User*. PV CYCLE [online]. 2013 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: < <http://www.pvcycle.org/procedure-end-user> >
- [25] *První fotovoltaické články*. SOLARENVI [online]. 2013 [cit. 2013-04-06]. Dostupné z: < <http://www.solarenavi.cz/slunecni-elektrarny/technicke-informace/historie-fotovoltaiky> >
- [26] *Recyklace kabelů*. DEMOKOV OK [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: < [http://www.demokov-ok.eu/index.php?option=com\\_content&view=article&id=11&Itemid=117](http://www.demokov-ok.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=11&Itemid=117) >
- [27] *Solární kolektory*. CEZ [online]. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: < <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k23.htm> >
- [28] *Systémy připojené na síť*. SOLARENVI [online]. 2013 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: < <http://www.solarenavi.cz/slunecni-elektrarny/typy-instalaci/fve-pripojene-na-sit> >
- [29] *The PV CYCLE Advantage: Intelligent solutions for PV module waste*. PV CYCLE [online]. 2013 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: < [http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/PVCycle-FOLDER\\_Advantage\\_en\\_2013\\_web.pdf](http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/PVCycle-FOLDER_Advantage_en_2013_web.pdf) >
- [30] Zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech a změně některých dalších zákonů. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: < [http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/8FC3E5C15334AB9DC125727B00339581/\\$file/Zakon\\_185\\_2001.pdf](http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/8FC3E5C15334AB9DC125727B00339581/$file/Zakon_185_2001.pdf) >

[31] *Zákon č. 180/2005 o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů)*. Tzb-info [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z:

< <http://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/zakon-c-180-2005-sb-a-souvisejici-predpisy> >

[32] *Zákon č. 458/2000 Sb. - energetický zákon a související předpisy*. Tzb-info [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: < <http://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/zakon-c-458-2000-sb-a-souvisejici-predpisy> >

[33] *Zařízení pro orientaci kolektorů solární energie*. Poulek Solar [online]. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: < <http://www.pvpumps.com/p-ces-2.htm> >

[34] *Zelený bonus*. Sun Pi s. r. o. [online]. 2013 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z.

< <http://www.sunpi.cz/zelenybonus> >

[1o] Zdroj [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008\\_34\\_ter.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_34_ter.php)

[2o] Zdroj: <http://www.cne.cz/seniori/fotovoltaiicke-systemy/uvod-do-fv-systemu>

[3o] Zdroj: <http://www.energyservis.cz/cs/fotovoltaiika/fotovoltaiika-princip/> [cit. 2013-05-19]

[4o] Zdroj: <http://isc-konstanz.de/fileadmin/1/doc/DRESDEN-BOMBACH%20et%20al..pdf>

[5o] Zdroj: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaiika/7868-recyklace-fotovoltaiickych-panelu-na-konci-zivotnosti>

[6o] Zdroj: <http://www.pvpumps.com/p-ces-2.htm>

[7o] Zdroj: <http://www.pvcycle.org/collection-points>

[8o] Zdroj: [http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/PVCycle-FOLDER\\_Producer-IT\\_en\\_2013\\_web.pdf](http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/PVCycle-FOLDER_Producer-IT_en_2013_web.pdf)

[9o] Zdroj: <http://solarenavi.cz/slunecni-elektrarny/typy-instalaci/off-grid-ostrovni-system/>

[10o] Zdroj: [http://www.researchgate.net/publication/46689298\\_Life\\_cycle\\_analysis\\_of\\_a\\_solar\\_module\\_recycling\\_process/file/d912f50890ded08ed7.pdf](http://www.researchgate.net/publication/46689298_Life_cycle_analysis_of_a_solar_module_recycling_process/file/d912f50890ded08ed7.pdf)

[11o] Zdroj: LIBRA, Martin a POULEK, Vladislav. *Fotovoltaiika: teorie i praxe využití solární energie*. 1. vyd. Praha: ILSA, 2009. 160 s. ISBN 978-80-904311-0-2, str.95.

[1t] Zdroj: <http://czepho.kurzor.net/attachments/article/8/RecyklaceFVpanelu20120808a.pdf>

[2t]Zdroj:[http://www.researchgate.net/publication/46689298\\_Life\\_cycle\\_analysis\\_of\\_a\\_solar\\_module\\_recycling\\_process/file/d912f50890ded08ed7.pdf](http://www.researchgate.net/publication/46689298_Life_cycle_analysis_of_a_solar_module_recycling_process/file/d912f50890ded08ed7.pdf)

[3t] Zdroj: <http://www.solareni.cz/slunecni-elektrarny/typy-instalaci/fve-pripojene-na-sit>

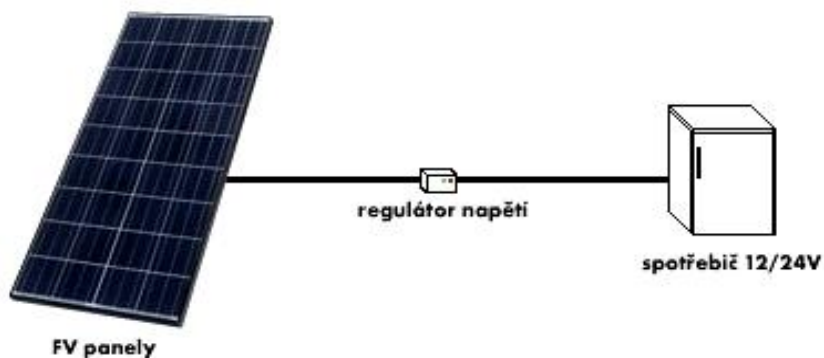
## Seznam obrázků

OBR. 1	PRINCIP FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU [30]	12
OBR. 2	SROVNÁNÍ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ [20]	16
OBR. 3	ORGANICKÝ FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK [10]	17
OBR. 4	SYSTÉM PRO VLASTNÍ SPOTŘEBU A PRODEJ PŘEBYTKŮ DO SÍTĚ [70]	18
OBR. 5	SCHÉMA NATÁČENÍ PANELU [60]	20
OBR. 7	RECYKLAČNÍ PROCES SPOLEČNOSTI DEUTSCHE SOLAR AG [40]	30
OBR. 8	PRINCIP PV CYCLE [80]	32
OBR. 9	SBĚRNÁ MÍSTA PV CYCLE V EVROPĚ [70]	33
OBR. 10	BILANCE ENERGIE POTŘEBNÉ K VÝROBĚ POLYKRystalického PANELU S MAXIMÁLNÍM VÝKONEM 1 kWp [110]	36
OBR. 11	ULEHČENÍ A ZÁTĚŽ RECYKLAČNÍHO PROCESU DEUTSCHE SOLAR AG [100]	38
OBR. 12	SYSTÉM S PŘÍMÝM NAPÁJENÍM [90]	46
OBR. 13	SYSTÉM S AKUMULACÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE 12/24 V [90]	46
OBR. 14	HYBRIDNÍ SYSTÉM [90]	46
OBR. 15	RECYKLAČNÍ LINKA PRO TERMICKOU METODU [50]	47
OBR. 16	RECYKLAČNÍ LINKA PRO MECHANICKO-CHEMICKOU METODU [50]	47

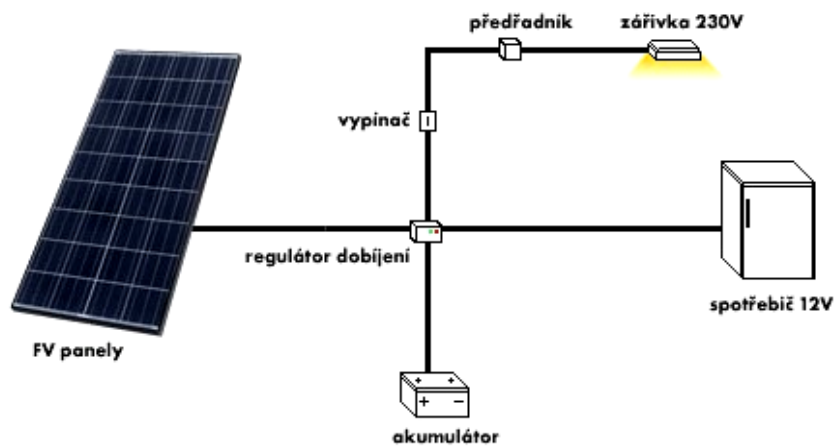
## Seznam tabulek

TAB. 1	POČET FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ INSTALOVANÝCH V ČR [1T]	28
TAB. 2	PRŮMĚRNÉ MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ KRystalických PANELŮ [1T]	34
TAB. 3	SPOTŘEBA ENERGIE PŘI VÝROBĚ A RECYKLACI POLYKRystalického ČLÁNKU [2T]	37

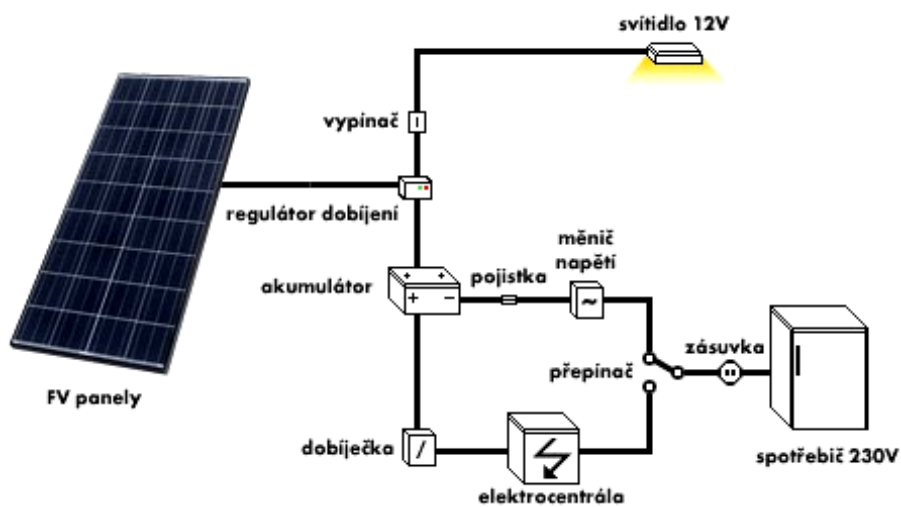
## Přílohy



Obr. 11 Systém s přímým napájením [90]



Obr. 12 Systém s akumulací elektrické energie 12/24 V [90]



Obr. 13 Hybridní systém [90]



Obr. 14 Recyklační linka pro termickou metodu [50]



Obr. 15 Recyklační linka pro mechanicko-chemickou metodu [50]

připojeno od	připojeno do	výkon od	výkon do	výkupní cena	zelený bonus
1.1. 2013	30.6. 2013	0 kWp	5 kWp	3,41 Kč/kWh	2,86 Kč/kWh
1.1. 2013	30.6. 2013	5 kWp	30 kWp	2,83 Kč/kWh	2,28 Kč/kWh
1.7. 2013	31.12. 2013	0 kWp	5 kWp	2,99 Kč/kWh	2,44 Kč/kWh
1.7. 2013	31.12. 2013	5 kWp	30 kWp	2,43 Kč/kWh	1,88 Kč/kWh

Tab. 1 Přehled zelených bonusů pro rok 2013 [3t]