

Ekonomická bilance likvidace fotovoltaických modulů instalovaných v České republice během roku 2010

Economic Balance of Recyclation of PV Modules Installed in the Czech Republic during 2010



Ladislava Černá
ČVUT



Tomáš Finsterle
ČVUT



Ivan Kudláček
ČVUT

ABSTRAKT: Celkový instalovaný elektrický výkon z fotovoltaických zdrojů v České republice v současné době dosahuje hodnoty cca 2 GW. To představuje přibližně 10 milionů fotovoltaických (PV) modulů, které bude potřeba v budoucnu zlikvidovat. Protože má vláda z budoucí situace obavy, zavedla poplatek za jejich recyklaci, který musí být placen za každý PV modul buď provozovatelem (moduly instalované před rokem 2013), nebo výrobcem modulu (v současnosti prodávané moduly). Velikost poplatku a oprávněnost jeho zavedení jsou tématy tohoto článku.

KLÍČOVÁ SLOVA: PV modul, recyklace, materiálové složení

ABSTRACT: Currently, there is about 2 GW installed photovoltaics (PV) capacity in the Czech Republic. It represents approximately 10 million of PV modules which shall be disposed in the future. Because of the fear of future situation, the government introduced a fee for their recycling which must be paid for every PV module, either as additional fee to modules installed before 2013 paid by the operator or by the producer in the case of the currently sold modules. The fee level and reasonability of its introduction is discussed in this paper.

KEYWORDS: PV module, recycling, material composition

Úvod

Celkový instalovaný elektrický výkon z fotovoltaických zdrojů v ČR je v současné době zhruba 2 GW, což představuje přibližně 28 000 individuálních instalací. Více než polovina těchto systémů (z hlediska instalované kapacity) byla postavena na základě státní pobídky, tj. „pro investice“ v průběhu roku 2010 a je provozována v režimu tzv. „příмого nákupu“, kdy je veškerá vyrobená elektřina dodávána přímo do sítě za cenu založenou na platném podpůrném tarifu. Jedná se obvykle o volně stojící systémy, popřípadě systémy na střechách průmyslových hal.

Vzhledem k časově omezené platnosti podpůrných tarifů po dobu trvání licence vzniká hypoteticky nebezpečí následné ekologické zátěže po ukončení provozu v důsledku zániku licence zdroje a tím i finanční podpory. Licence jsou obvykle vydávány na 20 nebo 25 let a stavby valné většiny zdrojů jsou povolovány jako „dočasné“. Tyto dočasné stavby mají sice v projektové

dokumentaci zahrnutou také rekultivaci zastavěné plochy (toto je z pohledu zákona nutné pro dočasné vyjmutí pozemku z půdního fondu), avšak kvůli nízké vymahatelnosti práva v ČR může být zvýšené riziko vzniku nadměrného množství odpadu. Z těchto důvodů ministerstvo zavedlo poplatek za budoucí recyklaci fotovoltaických modulů. Poplatek a diskuze o jeho výši jsou popsány v následujícím textu.

Současná situace likvidace PV modulů v České republice

Fotovoltaické moduly uvedené na trh před 1. lednem 2013

Financování separovaného sběru, zpracování, využití a likvidace elektrického odpadu z FV modulů probíhá prostřednictvím takzvaných „kolektivních systémů zpětného odběru elektrických zařízení“ (dále jen „kolektivní systém“). Výše a přesný způsob financování stanoví prováděcí vyhláška č. 352/2005 Sb. [1].

Fotovoltaické moduly uvedené na trh po 1. lednu 2013

Finanční prostředky na separátní sběr, zpracování, využití a likvidaci elektrického odpadu zajišťuje výrobce fotovoltaických modulů (záruka je před uvedením na trh dodána výrobcem). V případě nových modulů může výrobce také uzavřít s koncovým uživatelem smlouvu, která tuto odpovědnost deleguje na druhou osobu. V případě odpovědnosti koncového uživatele je financování zajištěno podobně jako v případě modulů uváděných na trh před 1. lednem 2013. Minimální úroveň poplatku však není stanovena.

Výše poplatku závisí na hmotnosti modulu, která se v případě modulů uváděných na trh po 1. lednu 2013 rovná skutečné hmotnosti modulů a pro moduly uváděné na trh před 1. lednem 2013 se přepočítává podle následující rovnice:

$$M = P \times K \quad (1),$$

kde

M představuje hmotnost solárních panelů instalovaných v solární elektrárně pro účely výpočtu minimální výše příspěvku uvedenou v kg,

P představuje výkon solární elektrárny podle licence na výrobu elektřiny v této solární elektrárně vydané Energetickým regulačním úřadem uvedený ve wattech (Wp),

K představuje průměrnou hmotnost solárního panelu¹ připadající na jednotku výkonu; tato průměrná hmotnost činí dle zákona 0,11 kg.

Sazba pro výpočet minimální výše příspěvků a minimální výše uložených peněžních prostředků na účelově vázaném bankovním účtu se pak vypočítá podle vzorce:

$$S = N_{OS} + N_{pr} + N_{adm} - P_{ds} \quad (2),$$

kde

S se rovná sazbě pro výpočet minimální výše příspěvků a minimální výše uložených peněžních prostředků na účelově vázaném bankovním účtu na 1 kilogram hmotnosti elektroodpadu ze solárních panelů,

N_{OS} se rovná předpokládaným nákladům

- na zpětný odběr a oddělený sběr 1 kilogramu hmotnosti elektroodpadu ze solárních panelů, přičemž tyto náklady zahrnují náklady na zřízení a provozování míst zpětného odběru a odděleného sběru v dostatečné dostupnosti v rámci České republiky v souladu s § 37k odst. 6 zákona, pokud jde o solární panely uvedené na trh po dni 1. ledna 2013,

- předání ke zpracování, pokud jde o solární panely uvedené na trh do dne 1. ledna 2013. Místem předání ke zpracování je místo zpětného odběru a/nebo odděleného sběru nebo solární elektrárna, pokud je to stanoveno smlouvou mezi provozovatelem kolektivního

systému a provozovatelem solární elektrárny a pokud jsou pro případ shromažďování (soustředování) solárních panelů určených k předání ke zpracování v místě solární elektrárny splněny požadavky na shromažďování (soustředování) odpadů podle zvláštního právního předpisu.

N_{pr} se rovná předpokládaným nákladům na zajištění přepravy 1 kilogramu hmotnosti elektroodpadu ze solárních panelů z místa zpětného odběru a odděleného sběru nebo z místa předání ke zpracování, pokud jde o solární panely uvedené na trh do dne 1. ledna 2013, ke zpracovateli elektroodpadu ze solárních panelů, včetně zajištění skladování elektroodpadu ze solárních panelů před jeho zpracováním, náklady a vykládky a nákladů na provozování míst, kde budou solární panely shromažďovány a skladovány před předáním zpracovateli.

N_{zpr} se rovná předpokládaným nákladům na zpracování 1 kilogramu hmotnosti elektroodpadu ze solárních panelů za použití nejlepších dostupných technik, a to včetně nákladů na využití a odstranění získaných materiálových složek, včetně kabeláže, připojovacích modulů (tzv. junction boxy) a měničů napětí (tzv. inventory – střídače).

N_{adm} se rovná předpokládaným nákladům na administrativu spojenou s přímým zajištěním plnění povinností výrobce nebo provozovatele solární elektrárny podle ustanovení části čtvrté hlavy II dílu 8 zákona na 1 kilogram hmotnosti elektroodpadu ze solárních panelů (např. provozování dispečinku pro odvoz panelů z místa zpětného odběru a odděleného sběru, výkaznictví a vedení účetnictví a zajištění kontrolních mechanismů systému a jeho účastníků – výrobců, provozovatelů solárních elektráren, provozovatele kolektivního systému, provozovatelů zařízení ke zpracování elektroodpadu).

P_{ds} se rovná předpokládaným příjmům z prodeje druhotných surovin získaných ze zpracování 1 kilogramu hmotnosti elektroodpadu ze solárních panelů.

Minimální sazba příspěvků provozovatele solární elektrárny, který plní povinnosti podle § 37p odst. 2 zákona, a minimální výše uložených peněžních prostředků na účelově vázaném bankovním účtu činí 8,50 Kč za kilogram solárního panelu, vypočtený podle vzorce 1.

Náklady na zpracování elektroodpadu ze solárních panelů musejí být stanoveny tak, aby bylo finančně zajištěno využití elektroodpadu ze solárních panelů v rozsahu nejméně 85 % jeho průměrné hmotnosti a příprava na opětovné použití a recyklace elektroodpadu ze solárních panelů v rozsahu nejméně 80 % jeho průměrné hmotnosti, nakládání s elektroodpadem ze solárních panelů musí být finančně zajištěno i v případě, že dojde k poklesu cen druhotných surovin a růstu cen energií.

Vyhláška dále hovoří o faktu, že každý kolektivní systém, který se přihlásil ke sběru PV modulů, musí při

přihlašování doložit, že výše navržených příspěvků zahrnuje všechny předpokládané budoucí náklady zajištění předání ke zpracování, zpětného odběru a odděleného sběru, zpracování, využití a odstranění elektrodopadu z PV modulů.

Podstatným aspektem je také § 14b odstavec 7 vyhlášky, který stanovuje, že po zajištění splnění povinností (zpětného odběru) se provozovatel kolektivního systému a provozovatel PV elektrárny mají finančně vypořádat, a to buď vrácením přeplatku, nebo doměřením nedoplatku – tj. bez ohledu na to, jak vysoký bude průběžný příspěvek, provozovatel PV elektrárny nakonec vždy zaplatí (jen/právě) skutečné náklady na recyklaci (případně zinkasuje výnos).

Situace v Evropě

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/19/EU ze dne 4. července 2012, o odpadních elektrických a elektronických zařízeních [3]

Tato směrnice (Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment – WEEE direktiva) udává, že členské státy zajistí, aby výrobci financovali náklady na sběr, zpracování, využití a k životnímu prostředí šetrné odstraňování odpadu z elektrických a elektronických zařízení. Mezi tento odpad patří podle této směrnice nově také fotovoltaické moduly. Toto nařízení se vztahuje na všechny moduly uvedené na trh po 13. 8. 2005, tzn. v případě ČR prakticky všechny moduly. Pro samotný sběr a využití předepisuje směrnice využití stávajících systémů sběru a využití.

Česká legislativa tuto úpravu, která je závazná pro všechny členské státy Unie, prakticky ignoruje.

Reálná situace v Evropě

Evropské solární společenství – Solar Power Europe (dříve European Photovoltaic Industry Association – EPIA) podnikla v červnu 2015 dotazníkové šetření v evropských státech za účelem zjištění, jak je řešeno nakládání s PV moduly na konci životnosti. Dostupná data týkající se Rakouska, Řecka, Holandska, Portugalska, Švýcarska, UK, Itálie (data poskytnuta RESolar) lze shrnout následujícím způsobem:

1. Ve všech zemích je problematika likvidace PV modulů zakotvena v legislativě.
2. Finanční závazky plynoucí ze sběru a likvidace PV modulů:
 - a) Rakousko – nese výrobce/distributor – prostřednictvím kolektivních systémů, nebo samostatně;
 - b) Řecko – pro moduly uvedené na trh před 14. 2. 2014 nese provozovatel, ale pouze v případě, že výrobce neexistuje. Ve zbytku případů výrobce. V obou případech jsou poplatky vybírány prostřednictvím již fungující sítě s platbou až na konci životnosti;
 - c) Holandsko – nese výrobce/distributor – prostřednictvím kolektivních systémů, nebo samostatně;

d) Portugalsko – nese výrobce/distributor – prostřednictvím kolektivních systémů – průměrná výše poplatku – 28 EUR/tunu PV modulů, 47 EUR/tunu inverterů uvedených na trh. Provozovatel má pouze povinnost odevzdat moduly do sběru nebo výrobci/dodavateli;

e) Švýcarsko – provozovatel platí již při koupi modulu;

f) UK – nese výrobce (distributor je pro tyto potřeby považován za výrobce) prostřednictvím PV Cycle (viz kapitola 2.3). Provozovatel má povinnost demontáže modulů, poplatky platí pouze v případě, že výrobce není z UK;

g) Itálie – v případě modulů uvedených na trh před 30. 6. 2012 nese provozovatel (má-li podpůrný tarif) formou podílu z tarifu, který musí odvést (za desetiletí). V případě systémů po 30. 6. 2012 (nebo před, ale bez podpůrného tarifu) nese závazky výrobce/distributor.

Shrnutí – v případě, kdy nese finanční závazky provozovatel, jsou vybírány buď přímo při koupi modulu, nebo prostřednictvím zpětného podílu z podpůrného tarifu. Ve většině zemí nese odpovědnost za finanční závazky plynoucí ze sběru a následného využití PV modulů výrobce (distributor).

Fotovoltaický modul z pohledu materiálového složení

Fotovoltaický modul je zařízení, které pracuje na principu přímé přeměny slunečního záření na elektrickou energii. Podstata každého PV modulu je tvořena většinou sériově spojenými PV články, které zprostředkovávají přeměnu. Konstrukce PV článků závisí na vlastnostech výchozího materiálu. Pokud má materiál tzv. přímou pásovou strukturu (např. GaAs), je možné sluneční záření plně absorbovat ve vrstvě silné jednotky μm . Pokud je pásová struktura nepřímá (např. křemík), absorpční koeficient roste s energií fotonu pozvolně a pro absorpci dlouhovlnné části slunečního spektra je třeba materiál o tloušťce řádově stovky μm .

Další komponenty jsou materiály, které se používají k zapouzdření samostatných článků. Tyto materiály zajišťují odolnost vůči vlivům prostředí (většinou EVA, sklo, tedlar), kontakty (kontaktní pásky, spojovací krabice, kabely) a konstrukční prvky (rám). Pro určení výše poplatku za 1 kilogramový PV modul je nutné rozdělit moduly do různých kategorií v závislosti na složení materiálu.

Články z krystalického křemíku

Výchozím materiálem je destička krystalického křemíku. Podle technologie výroby je možné je rozdělit do tří skupin:

- monokrystalické,
- multikrystalické (též polykrystalické),
- páskové.

Monokrystalické PV články jsou vyráběny z monokrystalického ingotu křemíku. Ingot je rozřezán

diamantovou pilou na destičky. Následuje odleptání zhmžděné vrstvy, texturace povrchu pro snížení odrazivosti materiálu, difúzní procesy pro vytvoření PN přechodu, depozice antireflexní vrstvy a sitotisk kontaktního systému s následným zažihnutím a odstraněním obvodového zkratu.

V případě článků z krystalického křemíku je napětí na jednom PV článku v pracovním bodě okolo 0,5 V. Pro praktické aplikace je tudíž nízké a je třeba několik článků spojit do série. Pro snazší manipulaci s články, pro ochranu před vlivy okolního prostředí a za účelem získání vyššího napětí se zpravidla několik PV článků spojuje do série dohromady do fotovoltaického modulu. Modulem se rozumí několik sériově zapojených PV článků, které jsou hermeticky zapouzdřeny do soustavy vrstev vysoce transparentních materiálů, a tvoří tak konstrukční díl při instalaci (někdy se používají také termíny solární modul nebo solární panel). Obvykle je spojeno do série 60 nebo 72 článků, aby bylo dosaženo dostatečně vysokého napětí. Výsledná účinnost se u sériově vyráběných PV modulů pohybuje okolo 18 %.

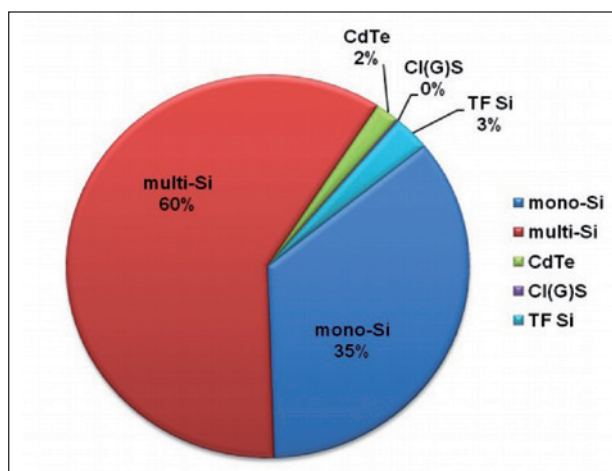
Multikrystalické PV články se vyrábějí z multikrystalického ingotu křemíku obdobným způsobem jako monokrystalické. Pro snížení rekombinačních ztrát na hranicích zrn je navíc prováděna tzv. pasivace (volné vazby na hranicích zrn jsou obsazeny vodíkem). Účinnost konvenčních PV modulů je okolo 16 %.

Páskové Si krystalické články jsou v podstatě speciálním případem multikrystalických, kde se z taveniny táhne multikrystalický pásek, který je dále jen vertikálně rozdělen na jednotlivé články, a díky tomu jsou výrazně sníženy ztráty prořezem. V současné době se již používají jen velmi zřídka.

Kromě křemíkových krystalických článků existují i články z jiných materiálů, které jsou však pro svou vysokou cenu využívány jen pro speciální účely, např. ve vesmírných aplikacích (InP, GaAs) nebo koncentrátorových systémech. Tyto články nejsou z pohledu studie recyklace důležité.

Další články a moduly

Druhou průmyslově významnou skupinu tvoří tenkovrstvé moduly, které pro svou činnost potřebují pouze minimum materiálu. Tyto moduly mají proti klasickým krystalickým modulům sice nižší konverzní účinnost, ale ta je do jisté míry vyvážena nižší cenou a také lepšími vlastnostmi při nízkých úrovních ozáření. Proti krystalickým modulům dosahují díky svým vlastnostem zejména při difúzním ozáření vyšších ročních výnosů, tudíž jejich použití je například v podmínkách ČR vhodné všude tam, kde není omezení dané plochou pro instalaci. Na druhé straně vzhledem k jejich nižší účinnosti je potřeba větší plocha a s tím stoupají nároky na BOS (komponenty balance of system), tudíž cenový rozdíl finálních systémů už není v současné době tak patrný. Další výhodou je možnost nanesení na více



Obr. 1: Procento jednotlivých technologií PV modulů instalovaných v České republice

druhů substrátů, což umožňuje výrobu např. pružných PV modulů.

Při výrobě jsou vrstvy nanášeny na nosný substrát a články jsou vytvářeny řezáním drážek. Při vhodném drážkování jsou články spojeny přímo do požadované sérioparalelní kombinace bez nutnosti pájení. Kontaktování je u modulů provedeno nanášením vrstvy oxidu s velkou šířkou zakázaného pásu, který funguje jako transparentní vodivá elektroda (TCO). Moduly jsou díky tvaru článků (obvykle úzké dlouhé pruhy) méně citlivé na zastínění než konvenční krystalické moduly (pokud není zastíněn celý proužek). Z hlediska materiálu je možné dělení na:

- moduly CuInSe₂ (CIS), Cu(In, Ga)Se₂ (CIGS) a CuGaSe₂ (CGS),
- CdTe moduly,
- moduly z amorfního a mikromorfního křemíku,
- ostatní tenkovrstvé články:
 - vícepřechodové,
 - články využívající nanostruktur,
 - organické články.

Skupina tenkovrstvých modulů měla být dle prognóz v současné době na úrovni 25 % produkce, nicméně kvůli výraznému poklesu ceny krystalického křemíku k tomu nedošlo a pravděpodobně ani nedojde. Distribuce jednotlivých technologií modulů instalovaných v ČR je znázorněna na **obr. 1**. Distribuce byla získána analýzou dat (poskytnutou společností RE Solar) z více než čtvrtinové kapacity instalované v České republice. Na základě poskytnutých údajů a informací v technických listech (hmotnost, délka kabelů, tloušťka použitého skla, nominální výkon) byl vytvořen generický modul pro každou kategorii. Na základě informací z vědeckých prací (viz [2], [3], [4]) a znalostí technologických procesů relevantních v roce výroby PV modulů (typická tloušťka vrstev použitých při výrobě jednotlivých technologií a fyzikální parametry látek) bylo stanoveno materiálové složení jednotlivých typů modulů. Výsledky jsou shrnuty v **tab. 1**.

Tab. 1: Obsah materiálů v jednotlivých technologiích PV modulů - průměrné hodnoty pro moduly instalované v ČR

Krystalické křemíkové	Monokrystalický		Multikrystalický	
	Rámové		Rámové	
Váha modulu	15,7 kg		18,6 kg	
Nominální výkon	188 Wp		217 Wp	
Rozměr modulů	818 × 1 584 × 36 (mm)		954 × 1 600 × 43 (mm)	
Obsah materiálů:				
sklo	11,6 kg		13,7 kg	
hliník	1,19 kg		1,73 kg	
aktivní materiál	0,36 kg Si		0,51 kg Si	
pouzdricí materiály	EVA 1,2 kg; tedlar 13 g		EVA 1,4 kg; tedlar 15 g	
vzácné kovy	Ag - 20 g		Ag - 20 g	
měď	0,7 kg		0,75 kg	
další látky	6,7 g Sn		7,7 g Sn	
toxické látky	Pb - 3,8 g		Pb - 4,3 g	
ostatní materiály (konektory, silikonové těsnění, junction boxy, diody, konektory)	cca 0,5 kg		cca 0,5 kg	
Tenkovrstvý	CdTe bezrámový	Cl(G)S * bezrámový	TF Si rámový	rámový
Váha modulu	12 kg	15 kg	24 kg	18,5 kg
Nominální výkon	75 Wp	76 Wp	105 Wp	100 Wp
Rozměr modulů	600 × 1 200 × 7 (mm)	640 × 1 190 × 7,9 (mm)	1 100 × 1 300 × 7 (mm)	1 055 × 1 268 × 42 (mm)
Obsah materiálů:				
sklo	10,9 kg	13,9 kg	22,6 kg	15,6 kg
hliník	< 1 %	0,3 g	0,8 g	1,35 kg
aktivní materiál	8,4 g CdTe	9,6 g Cl(G)S	5 g Si	4,5 g Si
pouzdricí materiály	EVA 0,3 kg	EVA 0,3 kg	EVA 0,6 kg	EVA 0,6 kg; tedlar - 13 g
vzácné kovy	Te - 4,5 g	Mo - 3,9 g; Sb - 0,05 g; In 2,7 g; Ga 1,7 g; Se - 3,7 g		
měď	0,27 kg	0,33 kg	0,33 kg	0,47 kg
další látky	SnO ₂ - 1,7 g	ZnO - 4,3 g (3,5 g Zn)	SnO ₂ - 13,3 g	SnO ₂ - 12,5 g
toxické látky	CdTe - 8,42 g; CdS - 0,2 g (4,1 g Cd)	CdS - 0,046 g (0,035 g Cd) **		
ostatní materiály (konektory, silikonové těsnění, junction boxy, diody, konektory)	cca 0,5 kg	cca 0,5 kg	cca 0,5 kg	cca 0,5 kg

* V modulech Cl(G)S je uvažován také výrobce Solyndra. Tyto moduly jsou sestaveny z trubek, které kromě výše uvedených materiálů obsahují také silikonový olej. Solyndra také používá vrstvu CdS.

** Kromě modulů používajících tenkou CdS vrstvu existují také moduly Cl(G)S, které jsou bezkadmiové. Jejich rozšíření ve sledovaných letech však není signifikantní.

Výtěžnost materiálů při recyklaci PVM

Procesem recyklace (přepřepování) krystalických a tenkovrstvých solárních modulů získáme mnoho materiálu pro následné zpracování a opětovné použití při výrobě PV modulů nebo jiných výrobků. Mezi tyto materiály patří hliník, měď, sklo, plasty, křemík, vzácné kovy, mezi něž patří indium, galium, germanium, stříbro, molybden, a dnes v mnoha výrobcích stále nezbytné a běžně využívané toxické kovy, jako je kadmium, selen, telur nebo olovo.

Mezi nejlépe recyklovatelné materiály se řadí sklo a hliník. Technologie následného zpracování je jednoduchá a technologicky zvládnutá. V současné době se získané skleněné tabule z termicko-chemické metody nepoužívají pro výrobu nových modulů, protože je zatím výhodnější výroba nových kalených skel. Pro sklo platí, že recyklací lze získat až 95 % skleněného materiálu s čistotou 99,99975 %.

Pro hliník tato hodnota dosahuje téměř 100 % a nízká energetická náročnost procesu ušetří až 70 % energie nutné pro výrobu nového hliníku. Dalším ekonomicky výhodným materiálem je křemík. Při termické metodě získáváme celé články, které následně lze po úpravě

využít pro výrobu nových článků (starší metoda). Výtěžnost relativně čistého materiálu při této metodě dosahuje 85–90 %. U mechanicko-chemické metody je výtěžnost křemíku od 75 do 85 % [4], [5].

Další skupinou materiálů, které se získávají při recyklaci PVM, jsou vodivé materiály, kam spadá hlavně měď a stříbro. Výtěžnost mědi z kabelů dosahuje hodnot od 78 % do 100 % a technologie zpracování je značně propracovaná. Výtěžnost stříbra se v současné době pohybuje od 40 % do 65 %. Mezi nejlépe recyklovatelné vzácné kovy patří telur. Výtěžnost teluru je v rozmezí od 80 % do 95 % s čistotou okolo 99,7 %. Naopak získávání ostatních vzácných kovů, jako je indium, galium a germanium, dosahuje v současnosti hodnoty od 20 % do 40 %, ale probíhá intenzivní výzkum zaměřený na zvýšení této účinnosti [6].

Termicko-chemická metoda

Tato metoda byla navržena, vyzkoušena a je používána německou firmou Deutsche solar. Pro svou univerzálnost je metoda vhodná pro všechny komerčně používané moduly z krystalického křemíku.

Fotovoltaický modul je zapouzdřen fólií EVA (kopolymer

etylvinylacetát). Pro odstranění EVA fólie se používá termická metoda, nebo metoda chemická, při níž se EVA fólie odstraňuje rozpouštědlem. Z ekonomických (cena rozpouštědla) a ekologických důvodů (likvidace použitého rozpouštědla) a také kvůli nutnosti dlouhého časového intervalu aplikace rozpouštědla při rozkladu EVA fólie se tato metoda příliš neuplatňuje [7].

Po odstranění EVA fólie je možné oddělit jednotlivé vrstvy, ze kterých se fotovoltaický modul skládá. Fotovoltaický modul se vloží do speciální pece, kde se nastaví teplota nad hodnotu 500 °C. Po překročení této teploty se veškeré plastové části fotovoltaického modulu odpaří, což umožní oddělení jednotlivých částí fotovoltaického modulu. Odpařené plasty se po tomto procesu nachází v plynném skupenství a jsou přesunuty do komory pro řízené spalování, v níž dochází k dokonalejšímu spalování, které má méně nepříznivý ekologický vliv na prostředí v porovnání s nedokonalým spalováním v první komoře. Vzniklé teplo je navíc možné dále využít přímo v recyklačním procesu. Výhodou termického odstranění obalu modulu je jednoduchost. Proto je termická cesta výhodná pro komerční využití při recyklaci fotovoltaického modulu. Nevýhodou je energetická náročnost a vysoký podíl manuální práce při následném ručním oddělování jednotlivých uvolněných částí. Danou metodou se získají celé nepoškozené články a po následném zpracování je lze použít při výrobě nových článků [8], [9], [10].

Po použití termické metody a ručního oddělení materiálu je nutné PV články očistit. Pro čišťení se používá chemická cesta, při které se odstraní v přesném pořadí: přední kontakt, zadní kontakt, antireflexní vrstva a p-n přechod. Nejdříve se aplikuje lázeň hydroxidu draselného a poté další chemikálie, u kterých je stěžejní jejich druh, koncentrace, provozní teplota a délka leptání. Tento postup byl optimalizován pro vysokou rychlost a účinnost za použití malého množství toxických látek a rozpouštědel [8], [9], [10].

Po odstranění nežádoucích materiálů dochází ke kontrole kvality křemíkové desky. Většina křemíkových desek je vhodná jako podklad pro výrobu nových článků. Křemíkové desky nesplňující přísné podmínky jsou použity pro výrobu jiných průmyslových produktů nebo jako výchozí surovina pro výrobu jiných materiálů na bázi křemíku (např. silikonové gely či jiné látky) [7], [8], [11].

Vzhledem k současné ceně křemíku (a také jeho ceně v době výroby modulů instalovaných v ČR) nelze tuto metodu považovat za cenově efektivní. Články mají navíc výrazně nižší tloušťku, než pro kterou byla tato metoda navržena.

Mechanicko-chemická metoda

Zatímco předchozí metoda reprezentovala optimální variantu pro recyklaci dříve komerčně dostupných křemíkových modulů, mechanicko-chemická metoda je

výhodná pro tenké a křehké fotovoltaické moduly (tenkovrstvé moduly a krystalické moduly s nízkou tloušťkou destiček či poškozené). V současnosti je trend snižovat množství materiálu a tím i tloušťku článku pro jejich výrobu. Brzy lze očekávat takovou tloušťku destiček, která prakticky znemožní běžnou ruční manipulaci s články.

Podstatou mechanicko-chemické metody je rozdrčení modulů na malé kousky a následně jejich separace. Nejdříve je nutné oddělit hliníkový rám a přívodní kabely fotovoltaického modulu. Poté jsou moduly v několika stupních rozdrčeny a následně tříděny dle různé velikosti částic.

Pro technologii drčení se používají drtiče (bubnové, kotoučové, čelistové) a mlýny. Třídění probíhá několika metodami a jejich kombinací pro separaci jednotlivých částí. Mezi metody třídění patří například vibrační třídiče. Vibrační třídiče se používají k separaci skla. Sklo se na rozdíl od ostatních materiálů vibrací rozpadává. Mezi separační technologie patří elektrodynamická separace, magnetická separace, fluidní a mokré splavy. V elektrodynamickém separátoru se oddělují vzácné kovy od ostatního materiálu. V magnetickém separátoru se separují materiály ze železa. Ve fluidních a mokřích splavech se využívá různé velikosti měrné hmotnosti tříděného materiálu. V suchém pneumatickém fluidním separátoru se oddělují částice o několika mm a v mokřím gravitačním splavu se oddělují jemnozrnné materiály. Následně se získávají těžké, vzácné a toxické prvky pomocí elektrolýzy nebo chemicky či pyrometalurgicky. Ochranné plasty se termicky spálí. Výsledkem jsou pro další průmyslové využití drčené suroviny o různé velikosti [4], [11], [7].

Výtěžnost materiálů při recyklaci PVM

Výsledkem mechanicko-chemické metody je drčený materiál. V tomto drčeném materiálu jsou obsaženy všechny materiálové součásti fotovoltaického modulu. Nejdůležitějšími materiály jsou křemík, uhlík, vzácné a toxické kovy. Pro další zpracování jsou nevhodnější frakce s nejmenším poloměrem získaným několikanásobným drčením. ^{Ze zastoupení} jednotlivých materiálů

v modulech instalovaných na území ČR ^{znázorňuje} ~~tab. 2, z níž lze též odvodit množství odpadu z recyklovaných materiálů při současné účinnosti recyklačních postupů. lze při zohlednění účinnosti recyklačních postupů odvodit množství získaných druhotných surovin - viz Tab. 2.~~

Po přepočtení na počty modulů v ČR pro jednotlivé typy modulů lze získat přehled o množství a složení odpadu, který po skončení životnosti PVM bude v ČR ~~potřeba likvidovat.~~ Vzhledem k faktu, že byla analyzována čtvrtina instalovaného výkonu v ČR, jsou uvedené hodnoty uvažované jako čtyřnásobek vypočítaných hodnot. Pro stanovení množství odpadu byly použity hodnoty účinnosti recyklace, které dnes představují nejlepší variantu (různé zdroje: [12], [13], [14], [15]). Maximální hodnoty byly uvažovány s ohledem

Tab. 2: Ekonomická rovnováha recyklace fotovoltaických modulů

Komodita	Výnosy z prodeje komodit (Kč)					
	mono c-Si	multi c-Si	CdTe	CIGS	a-Si bezrámový	a-Si rámový
sklo	49 152 895	85 704 291	6 448 600	511 340	11 927 848	2 399 887
hliník (Al)	51 983 598	111 572 295	0	114	4 353	2 141 057
měď (Cu)	183 471 523	290 216 952	9 880 574	750 911	10 773 259	4 472 430
křemík (Si)	126 988 504	265 596 881	0	0	219 682	57 630
stříbro (Ag)	170 366 414	251 521 358	0	0	0	0
telur (Te)	0	0	2 346 636	0	0	0
kadmium (Cd)	0	0	18 567	10	0	0
molybden (Mo)	0	0	0	9 518	0	0
zinek (Zn)	0	0	0	1 672	0	0
selen (Se)	0	0	0	42 097	0	0
indium (In)	0	0	0	575 983	0	0
gallium (Ga)	0	0	0	159 569	0	0
olovo (Pb)	402 628	672 636	0	0	0	0
cín (Sn)	6 519 464	11 061 619	0	0	0	0
Celkem výnosy (Kč)	588 885 027	1 016 346 031	18 694 378	2 051 213	22 925 142	9 071 003
Celkem odpad (kg)	56 765 143	100 162 469	6 089 107	475 510	10 904 343	2 451 642
Pds/kg (Kč)	10	10	3	4	2	4
S/kg (Kč)	-2	-2	5	4	6	4
S/kg – bez diverzifikace technologií (Kč)				-1		

na předpokládaný pokrok v technologiích recyklace, kde lze usoudit, že účinnost recyklace se nebude snižovat, ale naopak zvyšovat.

Ekonomické zhodnocení likvidace PV modulů

Existuje mnoho faktorů, které ovlivňují ekonomickou bilanci recyklace modulů (viz rovnice 2). Současný poplatek za recyklaci dostatečně pokrývá pouze dopravu, správu a další zpracování, ale neuvažuje nutnost demontáže nebo materiálových toků (i když v rámci rovnice 2 jsou tyto faktory zahrnuty). Nejdůležitější je stanovit potenciální příjmy z prodeje druhotných surovin. Výnosy z prodeje komodit závisí na aktuální situaci na komoditní burze, takže odhadované ceny vycházejí z pětiletého kurzu. Přibližná očekávaná cena burzy v roce 2030 byla zamýšlena s použitím exponenciálních trendových linek. Odhady nezohledňovaly významné vrcholy, takže ve všech případech byl uplatněn konzervativnější přístup. Výsledná cena jednotlivých materiálů, která byla použita pro kalkulaci, je o 40 % nižší než očekávaná cena komodity na burze. Tato cena pak byla použita pro odhad budoucích výnosů – Pds, s ohledem na množství PV modulů instalovaných na území ČR. Vzhledem k aktuálně předpokládaným nákladům na zpětný odběr, přepravu a administrativu je možné zhodnotit ekonomickou bilanci. Výsledky jednotlivých technologií jsou uvedeny v (0,035 g Cd) **.

Tab. 2

Závěr

Zavedení „poplatku za recyklaci“ pro fotovoltaické moduly bylo založeno na předpokladu, že všechny moduly budou likvidovány po ukončení platnosti licence. To je velmi sporné, protože skutečná životnost fotovoltaických modulů je mnohem delší než platnost licence (po 25 letech se předpokládá pouze 25% snížení

výkonu) a obzvláště u volně stojících zařízení lze očekávat, že majitelé požádají o prodloužení.

Analýza materiálů modulů instalovaných v ČR spolu s budoucími výnosy z prodeje druhotných surovin dále ukázala, že ekonomická rovnováha recyklace PV modulů je pozitivní. Skutečná úroveň poplatků za „recyklaci“ je zbytečně vysoká. Zápornou ekonomickou bilanci lze očekávat v případě novějších fotovoltaických modulů, kde je nižší obsah stříbra a křemíku.

Poděkování:

Tento článek vznikl za podpory Operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání projektu Evropských strukturálních fondů, Centra pokročilé fotovoltaiky CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_003/0000464, Inovačního Vouchery IPR Praha 2015 a Laboratoře diagnostiky fotovoltaických systémů.



Poznámky:

¹Z důvodu využití přesné citace z příslušných předpisů je v tomto případě zachována i nesprávná terminologie, tzn. solární panel = fotovoltaický modul.

Literatura:

- [1] Decree no. 352/2005 Coll. details of waste electrical equipment and on conditions for the financing of waste management (Act on details of waste). In: Journal of Laws. September 5, 2005.
- [2] MULLER, A., WAMBACH K., ALSEMA E. Life Cycle Analysis of solar modulerecycling process. In: MRS Proceedings. Cambridge University Press, 2005. p. 0895-G03-07. Dostupné z: http://www.researchgate.net/profile/EA_Alsema/publication/46689298_Life_cycle_analysis_of_a_solar_module_recycling_process/links/0912f50890ded08ed7000000.pdf.
- [3] GOE, M., GAUSTAD, G., MOSCARDINI, E., HAVLIK, T., TORO, L., WEIR, G. Strengthening the case for recycling photovoltaics: An energy payback analysis: An energy payback analysis. Applied Energy [online]. 2014, vol. 120, issue 10, s. 41-48 Dostupné z: <http://80.www.sciencedirect.com/dialog.cvut.cz/science/article/pii/S0306261914000555>.
- [4] GRANATA, G., PAGNANELLI, F., MOSCARDINI, E., HAVLIK, T., TORO, L., WEIR, G. Recycling of photovoltaic panels by physical operations. Solar

Energy Materials and Solar Cells [online]. 2014, vol. 123, issue 10, s. 90-108. Dostupné z: <http://80.www.sciencedirect.com/dialog/cvut.cz/science/article/pii/S13640321140726686>.

[5] BECHNÍK, B. Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti. TZB-info [online]. 26. 9. 2011. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/7868-recyklace-fotovoltaickych-panelu-na-konci-zivotnosti>.

[6] PAIANO, A., GAUSTAD, G., MOSCARDINI, E., HAVLIK, T., TORO, L., WEIR, G. Photovoltaic waste assessment in Italy. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2015, vol. 41, issue 10, s. 99-11. Dostupné z: <http://80.www.sciencedirect.com/dialog/cvut.cz/science/article/pii/S1364032114006686>.

[7] Bechník, B. Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti. TZB-info [online]. 26. 9. 2011 [cit. 2015-07-16]. Dostupné z: <http://oze.tzbinfo.cz/fotovoltaika/7868-recyklace-fotovoltaickych-panelu-na-konci-zivotnosti>.

[8] RADZIEMSKA, E., OSTROWSKI, P., CENIAN. CHEMICAL, Thermal and LaserProcesses in Recycling of Photovoltaic Silicon Solar Cells and Modules. Ecological Chemistry and Engineering [online]. 2010 [cit. 2015-08-21]. Dostupné z: [http://tchie.uni.opole.pl/freeECE/S_17_3/Radziemska-Ostrowski_17\(S3\).pdf](http://tchie.uni.opole.pl/freeECE/S_17_3/Radziemska-Ostrowski_17(S3).pdf).

[9] ZHONG, Z.W., SONG, B., LOH, P.E. LCAs of a polycrystalline photovoltaic module and a wind turbine: note II. Renewable Energy. 2011, 36(8): 2227- 2237. DOI: 10.1016. ISSN 09601481.

[10] Held, M. LCA screening of recycling proces for silicon based PV modules. Fraunhofer IBP[online]. 28. 3. 20031 [cit. 2015-08-23]. Dostupné z: http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/Fraunhofer_3rd-RC_2013.pdf.

[11] KLUGMANN-RADZIEMSKA, E., OSTROWSKI, P. Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules. Renewable Energy [online]. 2010, vol. 35, issue 8, s. 1751-1759 [cit. 2015-08-20]. Dostupné z: http://80.www.sciencedirect.com/dialog/cvut.cz/science/article/pii/S09601481_09005199#.

[12] FTHENAKIS, Vasilis. Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells. Renewable and Sustainable Energy Reviews

[online]. 2009, 13(9): 2746-2750 [cit. 2015-09-12]. DOI: 10.1016/j.rser.2009.05.001. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032109000896>.

[13] Recycling photovoltaic modules. Projektinfo [online]. 2010, 2(10) [cit. 2015-09-12]. ISSN 0937 – 8367. Dostupné z: http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Englische_Infos/projekt_0210_engl_internetx.pdf.

[14] Goe, M. Sustainability Informed Management of End-of-Life Photovoltaics: Assessing Environmental and Economic Tradeoffs of Collection and Recycling (2014). Thesis. Rochester Institute of Technology.

[15] TAO, Meng. Terawatt solar photovoltaics: roadblocks and opportunities. Aufl. 2014. London: Springer London, 2014. ISBN 978-144-7156-437.

Ph.D.

Ing. Ladislava Černá, 1986 – České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie – Laboratoř diagnostiky fotovoltaických systémů

Ing. Tomáš Finsterle – České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie – Laboratoř diagnostiky fotovoltaických systémů

doc. Ing. Ivan KUDLÁČEK, CSc. – České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie – ~~Laboratoř diagnostiky fotovoltaických systémů~~

Agentura NKL Zámek ZBIROH

Energetická situace v ČR, energetická bezpečnost a dopady evropského energetického systému.

Velký sál paláce Žofín, 19. února 2018 od 13:00 hod.

Na 218. Žofínském fóru vystoupí a zodpoví dotazy: **Tomáš Hüner**, ministr průmyslu a obchodu, **Vladimír Outrata**, předseda Rady Energetického regulačního úřadu, **Dana Drábová**, předsedkyně Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, **Václav Hrabák**, předseda energetické sekce Hospodářské komory ČR, **Jiří Gavor**, výkonný ředitel Asociace nezávislých dodavatelů energií.

Na Žofínském fóru vystoupí rovněž vrcholoví manažeři energetických společností a další hosté.

Přihlášky a více info na www.zofin.cz