

Analýza životního cyklu fotovoltaických systémů

B. Bechník¹, R. Bařinka², P. Čech³

^{1,2}Czech RE Agency, o.p.s., Rožnov pod Radhoštěm,

³Solartec s.r.o., Rožnov pod Radhoštěm,

Abstrakt

Přehledová studie vyhodnocuje vývoj energetické náročnosti výroby fotovoltaických článků a kompletace panelů. Vzhledem ke skutečnosti, že spotřeba energie v aktivním provozu je nulová a rovněž náročnost údržby je velmi nízká, jedná se o nejvýznamnější položky z hlediska energetické náročnosti životního cyklu fotovoltaických systémů. Je prezentován historický a dosud pokračující pokles měrné energetické náročnosti výroby monokrystalických křemíkových článků, které v minulosti na trhu dominovaly a nižší energetická náročnost polykrystalických článků, jejichž podíl na trhu je v současnosti srovnatelný. Další snížení energetické náročnosti je možné při přechodu na jiné v současnosti rychle se vyvíjející technologie. Jsou nastíněny některé směry dalšího snižování energetické náročnosti v nejbližší budoucnosti. Pro fázi recyklace panelů na konci životnosti je konstatován nedostatek relevantních dat zejména z důvodu, že praktická realizace této fáze je vzhledem k životnosti panelů prozatím okrajovou záležitostí.

Klíčová slova: životní cyklus výrobku, energetická náročnost výroby, recyklace,

ÚVOD

Fotovoltaické systémy neprodukují žádné odpady ani emise při výrobě elektřiny. Nejdříve je však třeba je vyrobit a nainstalovat a na konci životnosti opět demontovat a zpracovat.

Od roku 1975 do roku 2006 poklesla cena fotovoltaických systémů na 1/20 a roční produkce vzrostla 25 000krát. Na pokles ceny má vliv několik faktorů, nejvýznamnější jsou růst účinnosti článků, pokles ceny křemíku, používání tenkých desek a v neposlední řadě zmiňovaný růst objemu výroby [6].

Energetická návratnost – doba, za kterou systém vyrobí stejné množství energie jako se spotřebovalo na jeho výrobu – se ve stejné době zkrátila na 1/10 [6]. Rovněž tato skutečnost má výrazný vliv na cenu. Dalším pozitivním důsledkem je snižování environmentálních dopadů.

ANALÝZA ŽIVOTNÍHO CYKLU

Analýza životního cyklu produktu (LCA – Life Cycle Assessment) může sloužit například k porovnávání variant výrobního procesu. Moderní metody sledují celou řadu dopadů, jednodušší metody se zaměřují jen na vybrané aspekty.

Životní cyklus výrobku

Životní cyklus výrobku zahrnuje všechny fáze od těžby surovin, výroby polotovarů a konečných výrobků přes dobu užívání až po recyklaci nebo likvidaci na konci životnosti. Ve všech fázích

mohou být sledovány vstupní toky surovin, polotovarů, paliv a energií a výstupní toky produktů, odpadů a emisí.

V případě fotovoltaických (PV) panelů z krystalického křemíku můžeme rozlišit následující fáze životního cyklu:

- těžba surovin
- výroba metalurgického křemíku (mg-Si)
- výroba solárního křemíku (sg-Si)
- výroba ingotu a desek
- výroba článků
- kompletace panelů
- montáž fotovoltaického systému
- provoz – výroba elektřiny
- demontáž systému
- recyklace komponent

K tomu doprava v různých fázích. Podobný řetězec lze vysledovat pro ostatní komponenty fotovoltaického systému – měnič, nosná konstrukce případně tracker a další.

Environmentální dopady

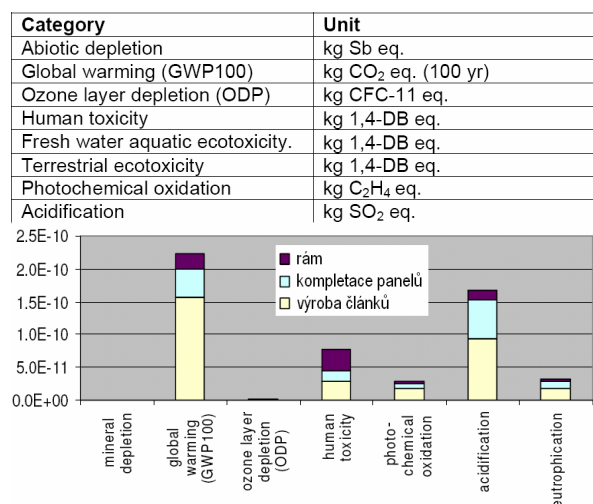
Fotovoltaika je vnímána jako technologie šetrná k životnímu prostředí, i z obchodního hlediska je vhodné toto pojetí posilovat. V případě obnovitelných zdrojů obecně se jedná o zvlášť důležitý aspekt. Sledování environmentálních dopadů je proto třeba věnovat odpovídající pozornost.

Environmentální dopady je možno z hlediska jejich vzniku rozdělit na přímé a nepřímé. Přímé dopady jsou svázány přímo s konkrétním výrobním procesem. Jsou mezi ně počítány například zábor půdy, emise z těžby primárních surovin, spotřeba vody ve výrobě, emise chemických látek

a další. Nepřímé dopady souvisí především s emisemi z výroby spotřebované elektřiny a z dopravy. Z hlediska trvalé udržitelnosti je významná rovněž rychlost čerpání surovinových zdrojů pro vyhodnocení jejich dostupnosti v budoucnosti.

Metody hodnocení životního cyklu

Jednou z nejpoužívanějších metod hodnocení životního cyklu z hlediska environmentálních dopadů je metoda CML [1], v současné verzi CML 2 z roku 2000. Metoda sdružuje různé dopady do několika kategorií, viz Obrázek 1. Na potenciálu globálního oteplování, humánní toxicity a acidifikace (2., 4. a 6. sloupec) se ze 70 % podílí sekundární dopady – emise z výroby spotřebované energie [6]. Redukce spotřeby energie ve výrobě má tedy výrazně pozitivní environmentální dopady.



Obrázek 1: Environmentální dopady výroby PV panelů o výkonu 1 kWp [6]

ENERGETICKÁ NÁROČNOST VÝROBY

Podíl jednotlivých položek

Z hlediska spotřeby energie jsou některé fáze výroby panelů náročnější:

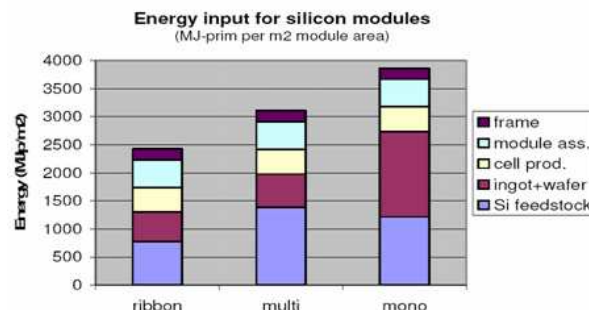
- výroba mg-Si
- rafinace na sg-Si
- výroba ingotů a desek
- výroba článků
- kompletace panelů.

Z hlediska celého životního cyklu může být významná ještě recyklace na konci životnosti.

Ostatní položky jsou méně významné:

- těžba a zpracování surovin
- montáž systému
- spotřeba energie v provozu
- demontáž systému
- doprava

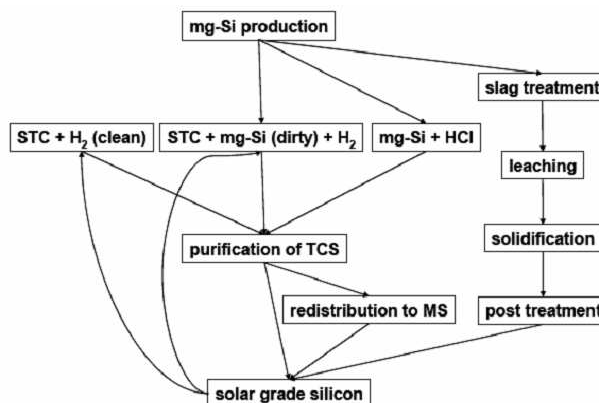
Podíl jednotlivých položek závisí kromě použité metody výroby solárního křemíku a ingotů i na konkrétním výrobcu. Výroba monokrystalických článků je ve srovnání s multikrystalickými energeticky náročnější. Novější provozy však mají v obou případech spotřebu až několikanásobně nižší [1].



Obrázek 2 Podíl jednotlivých fází na energetické náročnosti výroby PV panelů [1]

Výroba solárního křemíku

Zpočátku byl pro výrobu fotovoltaických článků používán odpadní křemík z výroby mikroelektronických součástek, protože požadavky na kvalitu solárního křemíku jsou nižší. S růstem výrobních kapacit však tento zdroj přestal dostávat. Proto byly proto budovány nové kapacity speciálně na výrobu solárního křemíku. Původní výrobní postup Siemens byl s ohledem na nižší požadavky upraven tak, aby se snížila spotřeba energie, viz Obrázek 3. I přes tyto úpravy však podíl výroby desek na celkové spotřebě energie dosahuje 80 %, viz Obrázek 2 nebo Obrázek 8.



Obrázek 3 Metody výroby solárního křemíku [5]

mg-Si = metalurgický křemík, sg-Si = solární křemík
TCS = Trichlorsilan SiHCl₃, STC = Tetrachlorsilan SiCl₄,
MS = Monosilan SiH₄.

Metody produkce solárního křemíku. V současnosti je ve výrobě solárního křemíku zavedeným standardem upravený Siemens postup, v několika variantách, viz Obrázek 3; je používán již více než 10 let. Proces využívající Fluidized Bed Reaktor (FBR) namísto reaktoru Siemens

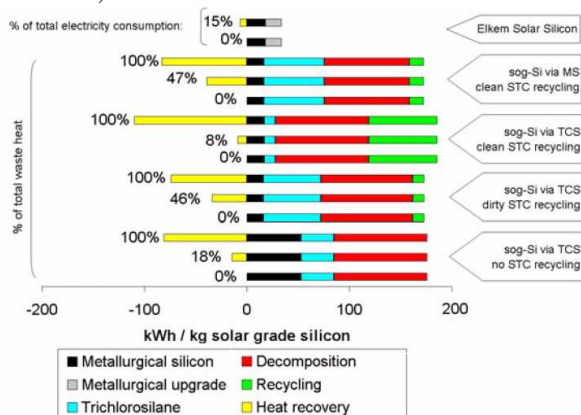
vykazuje nižší spotřebu elektrické energie [1], srovnání spotřeby energie je v Tabulce 1.

Metoda	Jedn.	Siemens	FBR	Elkem
Spotřeba energie				
Elektrina	kWh _{el}	110	30	25
Teplo	MJ _{th}	185	185	-
Celkem	MJ _{prim}	1070	500	300

Tabulka 1: Energetická náročnost výroby sg-Si [1]

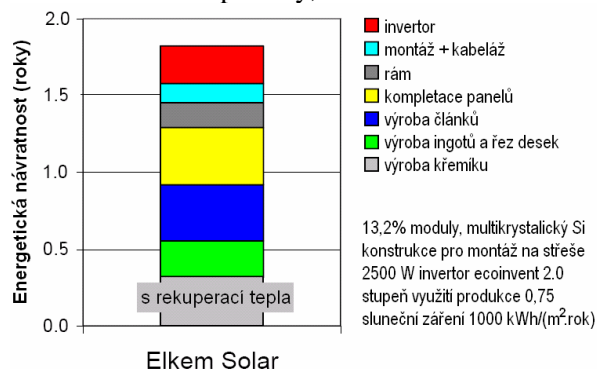
Další snížení energetické náročnosti je možné přechodem na přímou výrobu solárního křemíku z primárních surovin s vynecháním energeticky náročné destilační fáze [5].

Srovnání metalurgické výroby solárního křemíku podle postupu Elkem Solar s variantami metody Siemens ukazuje výrazné snížení energetické náročnosti, viz Obrázek 6.



Obrázek 4: Energetická náročnost výroby sg-Si [5]

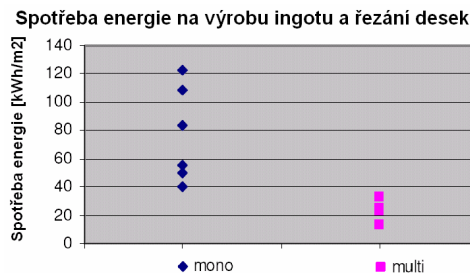
Energetická návratnost kompletního fotovoltaického systému se při použití takto vyrobeného křemíku může zkrátit na méně než 2 roky i v podmínkách České republiky, viz Obrázek 5.



Obrázek 5 Energetická návratnost PV systému [5]

Výroba ingotů a desek

Spotřeba energie na tažení monokrystalických ingotů vykazuje velké rozdíly mezi výrobci, viz Obrázek 6. Nižší spotřebu vykazují novější zařízení [1]. Spotřeba klesá při větších průměrech; je zvládnuto tažení ingotu průměru 450 mm, ve fotovoltaice se přechází na standardní rozměr desek 6" (156 mm × 156 mm).



Obrázek 6 Výroba ingotů a řezání desek [1]

Spotřeba energie na výrobu multikrystalických ingotů je výrazně nižší, viz Obrázek 6. Rozdíly mezi výrobci jsou způsobeny zejména různou velikostí ingotů.

Do budoucna lze zvažovat rekuperaci tepla pro přehřev následující dávky [1]. Problém představuje vysoká investiční náročnost a dlouhá životnost zařízení. Zlepšení lze tedy očekávat v delším horizontu.

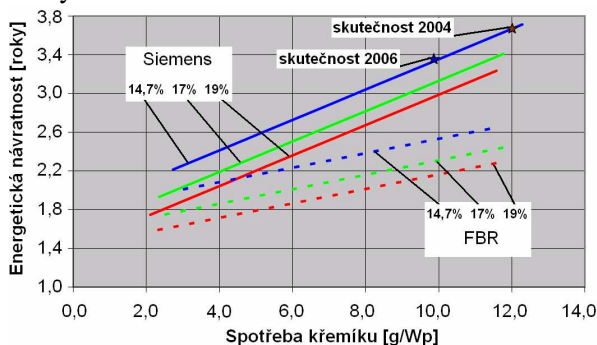
Spotřeba energie na řezání desek závisí na šířce řezu a ploše, její podíl je méně významný, nelze ji podstatným způsobem snížit. Lze snižovat spotřebu pomocných materiálů – recyklovat brusnou emulzi.

Recyklace brusné emulze. Brusná emulze obsahuje karbid křemíku (SiC) a polyethylenglykol (PEG). Spotřeba energie na její výrobu představuje 30 MJ/m² desek. Recyklace může snížit finanční náklady a zároveň spotřebu až o 20 MJ/m² při výtěžnosti 90 % SiC a 85 % PEG [1].

Výroba článků

Z hlediska spotřeby energie nedošlo ve výrobě článků k tak výrazným změnám jako při výrobě solárního křemíku. Jedním z důvodů bylo, že podíl spotřeby energie na výrobu článků byl v celkové bilanci méně významný.

V současnosti nad snahou o snižování spotřeby energie ve výrobě článků převažuje snaha o zvyšování účinnosti. V důsledku spotřeby energie ve výrobě mírně narůstá.



Obrázek 7 Energetická návratnost PV panelů v závislosti na spotřebě křemíku a účinnosti článků pro různé technologie výroby sg-Si [6]

Kompletace panelů

Spotřeba energie na samotnou kompletaci panelů je relativně nízká. Rychlotavné formulace EVA mohou přinést jen neznatelné zlepšení [1]. Větší podíl představuje spotřeba energie na výrobu skla, rámu a laminační fólie.

Samotný rám představuje 8 % celkové energetické náročnosti výroby panelů [1]. Proto jsou vyráběny i panely bez rámu. S ohledem na snadnou a energeticky nenáročnou recyklaci však tato praxe není nutná.

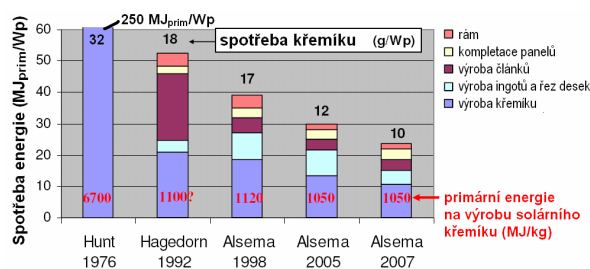
Ostatní komponenty

Spotřeba energie na výrobu investorů, kabeláže a nosné konstrukce případně trackerů se dosud snižovala jen málo. S poklesem energetické náročnosti výroby panelů však relativní podíl ostatních položek vzrůstá, viz Obrázek 8 a Obrázek 5. Relativní podíl ostatních komponent se naopak snižuje u větších systémech.

U ostrovních systémů navíc přistupuje významná položka spotřeby energie na výrobu akumulátoru.

Snižování spotřeby křemíku

Spotřeba křemíku na výrobu článků (g/Wp) klesá jednak snižováním ztrát křemíku ve výrobě, jednak zvyšováním účinnosti článků a panelů. Snižování spotřeby křemíku vesměs snižuje výrobní náklady. Současný standard je spotřeba na úrovni 10 až 12 g/Wp, viz Obrázek 8. V nejbližších letech je očekáván pokles na 4 až 6 g/Wp [1]. Za technologickou mez jsou v současnosti považovány 2 g/Wp. Při tak nízké spotřebě křemíku už vysoce převažuje energetická náročnost ostatních komponent, viz Obrázek 7.



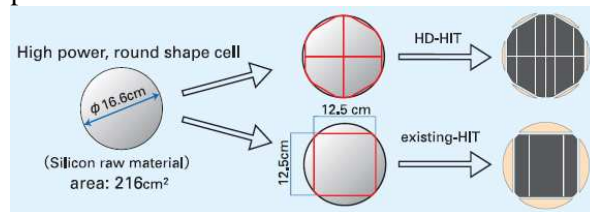
Obrázek 8 Vývoj spotřeby energie v závislosti na spotřebě křemíku [6]

Tloušťka desek postupně klesala až na současný standard 200 μm . V současnosti jsou vyráběny články na deskách o tloušťce 180 i 150 μm . Do budoucna jsou avizovány bezřezné postupy pro výrobu desek o tloušťkách asi 80 μm se ztrátou jen 5 μm . Tenčí desky však vyžadují automatizaci, ruční manipulace je téměř vyloučena, rostou ztráty zlomem desek při výrobě článků.

Ztráty ořezem. Vhodnější tvar – úplný čtverec – mají desky z multikrystalického křemíku; zvláště

u velkých ingotů (přes 300 kg) jsou ztráty ořezem významně redukovány. Čtvercové desky lépe vyplňují plochu panelu.

Jsou používány jiné tvary monokrystalických desek, viz Obrázek 9, které lépe využívají plochu monokrystalu a zároveň dobře vyplňují plochu panelu.



Obrázek 9 Snížení ztrát ořezem

Ztráty při krystalizaci. Relativně klesají u větších ingotů.

Ztráty prořezem – již naráží na technologické limity, v současnosti téměř nelze snižovat tloušťku prořezu, odpadu je více než využitého materiálu

Recyklace odpadu z ingotů a desek. Odřezané části ingotů a desek lze ve výrobě recyklovat jen částečně. Materiál může být znečištěn, což má vliv na kvalitu výroby.

tažení desek přímo z taveniny (ribbon)

Zvyšování účinnosti článků. Současný standard jsou články s účinností 18 %. Špičkové články však dosahují účinnosti kolem 22 %.

RECYKLACE PANELŮ NA KONCI ŽIVOTNOSTI

Recyklaci fotovoltaických panelů byla dosud věnována menší pozornost. Jejich životnost je delší než u spotřebního zboží a množství panelů k recyklaci je dosud nízké – v rámci celé EU pouze několik stovek tun ročně [3]. Existují dva přístupy – recyklace panelů bez ohledu na technologii výroby a úpravy konstrukce s cílem recyklaci usnadnit.

Recyklované materiály

Největší podíl na hmotnosti panelů připadá na sklo (63 %) a hliníkový rám (22 %) [3]. Oba tyto materiály jsou běžně recyklovány. Ostatní materiály lze recyklovat jen částečně.

Hliník – primární produkce je energeticky náročná – 200 MJ/kg elektřiny a představuje asi 8 % spotřeby energie na výrobu panelu. V současnosti jsou proto vyráběny i panely bez rámu. Tato praxe však není nutná, hliník lze snadno recyklovat

s velmi nízkou spotřebou – 8 MJ/kg převážně tepelné energie, výtěžnost se u kusového hliníku blíží 100 %.

Sklo nebo jiný transparentní materiál je základní konstrukční díl, který nelze vynechat. Recyklace skla může snížit spotřebu energie na jeho výrobu asi o 40 %. Významnější je však snížení nároků na těžební a skládkové kapacity. Ve většině případů lze recyklované sklo použít na výrobu stejného produktu.

Plastové komponenty, vzhledem k jejich degradaci působením klimatických podmínek, je obtížné recyklovat. Možné je pouze využití tepelné energie při spalování.

Fotovoltaické články mají zanedbatelný podíl na hmotnosti panelů. Podílí se však 50 % na ceně panelu a 80 % na spotřebě energie na jeho výrobu. Na konci životnosti jsou přitom články v podstatě nezměněny. S recyklací článků nebo desek jsou již první praktické zkušenosti [3].

Těžké kovy představují z hlediska hmotnosti, ceny i spotřeby energie na výrobu panelů zanedbatelné položky. Podíl olova na hmotnosti panelů je pouze 0,12 %, stříbra 0,14 %, cínu 0,12 % a mědi 0,37 % [3]. Energetická i materiálová náročnost recyklace je srovnatelná s výrobou z primárních surovin.

Recyklace je však nutná z jiných důvodů. Těžké kovy jsou toxické a je proto nutno je oddělit od životního prostředí. Mimoto zejména u stříbra lze očekávat v blízké budoucnosti vyčerpání ekonomicky těžitelných zásob a v důsledku toho růst nákladů na těžbu.

Termická recyklace (TR)

Nejpropracovanější metodou recyklace panelů je termický proces navržený Deutsche solar AG, pro který existuje demonstrační jednotka [3][4].

Metoda je použitelná pro všechny stávající konstrukce panelů. Recyklační proces je energeticky náročný, lze však vytěžit až 85 % článků pro nové použití a tím snížit spotřebu energie na výrobu nových panelů až o 70 %.



Obrázek 10 Třídění surovin při termické recyklaci

Konstrukční úpravy

Cílem konstrukčních úprav je usnadnit demontáž celých článků na konci životnosti panelu. Jsou navrhovány metody zapouzdření článků bez laminace nebo dvojité zapouzdření do materiálu s nízkou přilnavostí k článkům [10] (DEM – Double Encapsulated Module).

Double Encapsulated Modules (DEM). Články jsou před laminací zapouzdřeny do silikonu, který má srovnatelný index lomu jako EVA, ale nízkou adhezí k článkům [10]. Byly zkoušeny i jiné materiály [9]. Dodatečné vrstvy snižují účinnost v nejlepších případech o 3 %

Při rozebírání se nejdříve nahřeje a sloupne vrstva Tedlaru. Následně se prořízne EVA v okolí článku. EVA se sloupne i s mezivrstvou. Kritický je následující krok – oddělení článku od podkladu, k tomu byl navržen speciální přípravek.

Problém obou zmiňovaných metod je manipulace s články, zejména v budoucnosti, kdy je předpokládán přechod na výrazně tenčí desky.



Obrázek 11 Odlupování EVA a mezivrstvy

proces	ze surovin		TR		DEM		jednotka
	mc-Si	sc-Si	mc-Si	sc-Si	mc-Si	sc-Si	
výroba mc-Si a rafinace na sg-Si	2250	2250					MJ _{prim} /m ²
krystalizace a řezání	1000	2550					MJ _{prim} /m ²
celkem řezu	3250	4800	760	760			MJ _{prim} /m ²
výroba článků	600	550	600	550			MJ _{prim} /m ²
celkem články	3850	5350	1360	1310	300	300	MJ _{prim} /m ²
celkem panely	4200	5700	1710	1660	650	650	MJ _{prim} /m ²
změna účinnosti panelu	-	-	-	-	-4%	-4%	%
výkon panelu	130	140	130	140	126	136	Wp/m ²
spotřeba elektřiny na výrobu	408	554	166	161	63	63	kWh/m ²
energie vyrobená panelem	117	126	117	126	113	122	kWh/(m ² .rok)
EPBT	3,49	4,40	1,42	1,28	0,56	0,52	roky
úspora energie oproti TR					1060	1010	MJ _{prim} /m ²
rozdíl výroby energie			0,00	0,00	-3,51	-3,78	kWh/(m ² .rok)
rozdíl spotřeby elektřiny					-103	-98	kWh/(m ² .rok)
návratnost DEM vzhledem k TR					29	26	roky
předpoklady							
spotřeba energie na kompletaci panelů 350 kWh/m ²							
je uvažována 35% účinnost při přepočtu energie z primárních zdrojů na elektřinu							
výroba elektřiny panelem 900 Wh/(Wp.rok)							

Tabulka 2 Porovnání metod recyklace

ZÁVĚR

Výroba krystalických křemíkových článků prochází obdobím prudkého snižování energetické náročnosti. Zároveň se snižuje spotřeba materiálů a vedlejší produkty výroby jsou dle možností recyklovány.

Při použití dostupných výrobních technologií lze dosáhnout v podmínkách České republiky energetické návratnosti kratší než 2 roky.

opatření	potenciál	synergie	hlavní bariéry pro zavedení
nový způsob výroby primární suroviny se sníženou spotřebou energie	+++	ano	technologická komplexnost kvalita materiálu kapitálové náklady
snížování spotřeby křemíku	++	ano	kvalita řezů technologie řezání manipulace s řezy pevnost kontaktů
konstrukce s ohledem na recyklaci	++	?	hledá se vhodný kandidát není urgentní
recyklace odpadu z výroby řezů	+	ano	vztah ke snížení kvality?
zvýšení energetické efektivity výroby článků a panelů	+	ano	není urgentní
moduly bez rámu	+	téměř ne	vztah k životnosti modulu
recyklace panelů na konci životnosti	+	nejisté	rozebírání panelů je náročné dlouhá životnost panelů komplikuje organizování sběrného systému
snížení emisí fluorovaných uhlovodíků	+	ne	není urgentní, vyšší náklady
snížení emisí NO _x z procesu leptání	+	?	není urgentní, vyšší náklady
bezolovnaté pasty a pájky	+	ne	není urgentní, technické problémy
redukce spotřeby vody	?	ne	není urgentní, vyšší náklady
kontakty bez stříbra	+	možná	není vhodný kandidát
zvýšení energetické efektivity výroby ingotů (mono i multi)	+	malá	nejistota ohledně nákladů dlouhá životnost zařízení

Tabulka 3 Navrhovaná opatření, potenciál snížení environmentálních dopadů, synergie s finančními náklady

Další snížení energetické náročnosti výroby krystalických článků je možné v souvislosti se snižováním tloušťky desek a zvyšováním účinnosti článků.

Řada navrhovaných úprav výrobního postupu zároveň snižuje finanční náročnost výroby, proto jsou průběžně zaváděny do praxe.

REFERENCE

- [1] *Impact assessment methods*. [online]. Dostupné na: http://www.pre.nl/simapro/impact_assessment_methods.htm
- [2] ALSEMA, E. A.; de WILD-SCHOLTEN, M. J. Reduction of the environmental impact in crystalline silicon manufacturing production. *In: 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milano, Italy, 3-7 September 2007.*
- [3] WAMBACH, K.; SHLENKER, S.; RÖVER, I.; MÜLLER, A. *Recycling of Solar Cells and Photovoltaic Modules.*
- [4] MÜLLER, A.; WAMBACH, K.; ALSEMA, E. A. *Reduction of environmental impacts of PV by the recycling process of Deutsche Solar,*
- [5] de WILD-SCHOLTEN, M. J.; GLÖCKNER, R.; ODDEN, J.-O.; HALVORSEN, G.; TRONSTAD, R. LCA Comparison of the Elkem Solar Metallurgical Route and Conventional Gas Routes to Solar Silicon. *In: 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1-5 September 2008, Valencia, Spain*
- [6] ALSEMA, E. A.; de WILD, M. J. Reduction of Environmental Impacts in Crystalline Silicon

Photovoltaic Technology, An Analysis of Driving Forces and Opportunities, *In: MRS Fall 2007, Boston, 26-29 November 2007*

- [7] de WILD-SCHOLTEN, M. J. et al. Fluorinated Greenhouse Gases in Photovoltaic Module Manufacturing. Potential Emissions and Abatement Strategies. *In: 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milano, Italy, 3-7 September 2007*
- [8] Sanyo. *HIT photovoltaic module*, karalogový list
- [9] DOI, T.; IGARI, S.; TSUDA, I. Development of a recyclable PV module: Evaluation of electrical characteristics of recycled cells. *In: EuroPV 2004, Slovenia*
- [10] SÁNCHEZ-FRIERA, P.; GALÁN, J. E.; GUARDE, D.; MANJÓN, D. *Simple design of recyclable PV modules.*

Kontaktní údaje:

¹Ing. Bronislav Bechník, Ph.D.
Czech RE Agency, o.p.s. ,
Televizní 2618, 756 61 Rožnov pod Radhoštěm,
tel: +420 602 771 371,
e-mail: bronislav@czrea.org

²Ing. Radim Bařinka,
Czech RE Agency, o.p.s. ,
Televizní 2618, 756 61 Rožnov pod Radhoštěm,
tel: +420 602 771 371,
e-mail: radim@czrea.org

³Ing. Pavel Čech,
Solartec s.r.o.,
Televizní 2618, 756 61 Rožnov pod Radhoštěm,
tel: +420 602 662 964,
e-mail: pcech@solartec.cz