

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra Fyziky



Bakalářská práce

Fotovoltaické panely

Kirill Afanasev

© 2023 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Kirill Afanasev

Procesní inženýrství
Technologická zařízení staveb

Název práce

Fotovoltaické panely

Název anglicky

Solar Photovoltaic Panels

Cíle práce

Cílem práce je porovnání vlastností typů fotovoltaických panelů, včetně jejich výhod a nevýhod, výroby a možnosti likvidace těchto panelů.

Metodika

Proveďte přehled současných typů fotovoltaických panelů. Porovnejte výhody a nevýhody jednotlivých typů panelů. Zhodnoťte náročnost a náklady na jejich výrobu a likvidaci, popř. recyklaci.

Doporučený rozsah práce

50-60 str.

Klíčová slova

fotovoltaické panely, výhody, nevýhody, výroba, recyklace

Doporučené zdroje informací

- Libra, M., Poulek, V.: Fotovoltaika, teorie i praxe využití solární energie. ILSA, Praha, (2010), 165 stran, ISBN 978-80-904311-5-7.
- Libra, M., Poulek, V.: Zdroje a využití energie, ČZU v Praze, Praha 2007, 141 stran, ISBN 978-80-213-1647-8
- LIBRA, M., POULRK, V., JIRKA, V.: Technologie polysiloxanového gelu pro efektivnější využití solární energie. Londýn : KNIHY LTD, 2018, 108 stran, ISBN 978-1-9998308-1-6.
- POULEK, V. LIBRA, M., JIRKA V., PERSIC, I.S.: Polysiloxane Gel Lamination Technology for Solar Panels and Rastered Glazing. Kniha-monografie v angličtině, Praha : ILSA, 2013, 93 stran, ISBN 978-80-904311-8-8.
- POULEK, V., LIBRA, M.: Photovoltaics, theory and practice of solar energy utilization, kniha-monografie v angličtině, ILSA, Praha, 2010, 169 stran, ISBN 978-80-904311-2-6.
-

Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 25. 1. 2021

doc. Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 10. 12. 2022

Čestné prohlášení

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

V Praze dne 31.03.2023

Poděkování

Děkuji mému vedoucímu práce prof. Ing. Jaromíru Volfovi a konzultantu dr. Zbyňku Vondráškovi za přátelský a optimistický přístup při konzultacích a vstřícnost při jakékoliv žádosti o pomoc. Také děkuji své rodině za podporu a možnost studovat na vysoké škole.

Fotovoltaické panely

Abstrakt

Bakalářská práce pojednává o solárních panelech. V první části se práce věnuje zejména teoretickým pojmům, solární energie, druhům solárních článků, principu činnosti fotovoltaického článku, konstrukci a výrobě fotovoltaických článků a panelů, druhům materiálů. V další části se práce věnuje návrhu recyklace pro použití v ČR a jaké základní problémy mohou být při recyklaci. V závěrečné části je uvedeno zhodnocení vlivu recyklace a navrhovaného řešení.

Klíčová slova: Solární panely; záření; přeměna energie; solární energie; solární článek; obnovitelné zdroje energie; neobnovitelné zdroje energie

Solar Photovoltaic panels

Abstract

The first part of the thesis deals with the theoretical concepts, solar energy, types of solar cells, principle of photovoltaic cells, design and manufacture of photovoltaic cells and panels, types of materials. The next part of the thesis deals with the design of recycling for use in the Czech Republic and what basic problems can be in recycling. In the final part an evaluation of the impact of recycling and the proposed solution is given.

Keywords: solar panels; radiation; conversion of energy; solar energy; solar cell; renewable energy sources; non-renewable energy sources

Obsah

1 Úvod	1
2 Cíl práce a metodika	3
3 Základní informace	4
3.1 Výroba elektrické energie ze slunce (princip činnosti)	4
3.1.1 Slunce.....	4
3.1.2 Krátká historie.....	6
3.1.3 Rozvoj solární energetiky ve světě	8
3.2 Princip činnosti fotovoltaického článku	11
3.2.1 Foton a jeho vlastnosti	11
3.2.2 Material	12
3.3 Konstrukce a využití solárních panelů v životě	17
3.3.1 Konstrukce	17
3.3.2 Využití.....	18
3.4 Druhy fotovoltaických článků a panelů.....	21
3.4.1 Základní typy panelů	21
3.4.2 Amorfnní křemíkové články	22
3.4.3 Monokrystalické křemíkové články.....	22
3.4.4 Polykrystalické křemíkové články	24
3.4.5 Teplotní koeficient Mono-Si vs. Poly-Si	24
3.4.6 Mikromorfnní solární články	25
4 Problém recyklace panelů	26
4.1 Recyklace solárních panelů – význam roste	26
4.2 Druhý život solární panely	28
4.3 Výtěžnost recyklace solárního panelu	29
4.4 Získávání užitečných materiálů ze starých solárních panelů	30
4.5 Likvidace tenkovrstých modulů	32
4.6 Místa recyklace solárních panelů	32
4.7 Základní metody recyklace	35
4.8 Proces FRELP	37
4.9 Nová generace baterii z vyřazených solárních panelů	39
4.10 Problém není jen v solárních panelech.....	39
5 Závěr	40
6 Seznam použitých zdrojů	42

Seznam obrázků

Obr. 1 Celkové ozáření v České republice [16]	5
Obr. 2 Průměrná doba slunečního svitu v České republice za rok [17]	5
Obr. 3 Vynálezci Bellovy solární baterie, zleva Gerald Pearson, Daryl Chapin a Calvin Fuller [26]	7
Obr.4 Pokles ceny fotovoltaických modulů [3]	10
Obr.5 Vodivost materialu typu N [3]	14
Obr.6 Vodivost materialu typu P [3]	15
Obr.7 Princip práce fotovoltaického článku [14].....	16
Obr. 8 Konstrukce rámovaného standardního modulu [14]	18
Obr. 9 Standardní modul [8]	18
Obr. 10 Sedlová střecha se standardními moduly [9]	19
Obr.11 Solární elektrárna instalovaná společností Abengoa [7]	20
Obr.12 Mezinárodní vesmírná stanice [10]	20
Obr.13 Schéma alotropických forem křemíku: monokrystalický křemík, polykrystalický křemík a amorfní křemík [6]	21
Obr.14 Tenkovrstvý článek [29]	22
Obr.15 Czochralský proces [4]	23
Obr.16 Konstrukce a přeměna energie v krystalickém křemíkovém solárním článku [14]	25
Obr. 17 Přehled celosvětové prognózy odpadu z fotovoltaických panelů [12]	27
Obr. 18 Kumulativní objemy odpadů v pěti největších zemích pro vyřazené fotovoltaické panely v roce 2050 [12]	28
Obr.19 Základní vymezení systému a jeho hranic.	38

Seznam tabulek

Tab.1 Vývoj podílů obnovitelné energie [18]	11
Tab. 2 Materialy využívané v panelech	13

Seznam použitých zkratek

NDR - Německá demokratická republika

CPV - Koncentračních fotovoltaických systémech

AIST - Institute of Advanced Industrial Science and Technology

FVE - Fotovoltaická elektrárna

EVA - Etylen- vinyl-acetátu

IRENA - Mezinárodní agentura pro obnovitelnou energii

IEA - Mezinárodní energetická agentura

EIT - Evropský inovační a technologický institut

PV - FV - Fotovoltaické panely

FRELP - Full Recovery End-of-Life Photovoltaic (Plná regenerace fotovoltaických zařízení s ukončenou životností)

DWD - Deutscher Wetterdienst - Německá meteorologická služba

1 Úvod

S rostoucí světovou populací roste i poptávka po energii. Přílišná závislost na zdrojích založených na fosilních palivech však vede k řadě environmentálních problémů, jako je změna klimatu, znečištění ovzduší a vody. V poslední době se objevují obnovitelné zdroje energie jako rozhodnutí, jak uspokojit energetické potřeby rostoucí lidské populace a zároveň minimalizovat škodlivé účinky na životní prostředí. Solární energie je jednou z nejrozšířenějších forem obnovitelné energie. Využívá záření ze Slunce. Ukazuje se, že tento zdroj energie je hojný, čistý a dlouhodobě udržitelný. Sluneční záření, které dopadne na Zemi za jednu hodinu, by při plném využití mohlo pokrýt celosvětovou potřebu energie na celý rok. S rostoucím využíváním solárních panelů nabývá na významu jejich správné zpracování a recyklace. Tato práce analyzuje způsoby výroby a významnost recyklace solárních panelů.

Obnovitelné zdroje energie získávají v poslední době na síle kvůli různým faktorům, jako jsou obavy o životní prostředí a otázky energetické bezpečnosti.

Evropská unie (EU) je jedním z regionů světa, které se iniciativně podílejí na recyklaci solárních panelů. V roce 2017 přijala Evropská unie nové nařízení, které ukládá všem členským státům EU povinnost sbírat, přepravovat a recyklovat všechny fotovoltaické (FV) panely. Stalo se tak ve snaze snížit množství odpadu vznikajícího v průmyslu solárních zařízení a elektroniky. Jakmile solární panely dosáhnou konce své životnosti, mohou být buď vyhozeny na skládky, nebo recyklovány. Recyklace solárních panelů je investicí do udržitelnosti životního prostředí.

Je známo, že nesprávná likvidace odpadu způsobuje znečištění, které vede k negativním dopadům na životní prostředí a zdraví. Ukládání odpadu na skládky může způsobit vznik výluhu, což je kontaminovaná voda, která může znečistit zdroje podzemních vod. V případě solárních panelů může nesprávná likvidace vést ke vzniku toxického odpadu, který obsahuje těžké kovy, jako je olovo, kadmium a chrom. Tyto kovy jsou nebezpečné pro lidské zdraví a jejich hromadění v životním prostředí může způsobit znečištění půdy a ovzduší.

Vzhledem k významu obnovitelných zdrojů energie a dopadu odpadu na životní prostředí je udržitelné zpracování a recyklace solárních panelů nesmírně důležité. EU projevila v oblasti recyklace solárních panelů velkou iniciativu, která může sloužit jako vzor pro ostatní světové regiony. Měly by být zavedeny správné politiky nakládání odpadů, aby se minimalizovaly

negativní účinky na životní prostředí a lidské zdraví. Měly by být také zavedeny osvětové programy, které by informovaly veřejnost o významu správného nakládání s odpady. Společným úsilím můžeme zajistit udržitelnou budoucnost pro další generace.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem práce je porovnání vlastností typů fotovoltaických panelů, včetně jejich výhod a nevýhod, výroby a možnosti likvidace těchto panelů.

2.2 Metodika

Přehled současných typů fotovoltaických panelů. Porovnejte výhody a nevýhody jednotlivých typů panelů. Zhodnoťte náročnost a náklady na jejich výrobu a likvidaci, popř. recyklaci.

3 Základní informace

3.1 Výroba elektrické energie ze slunečního záření

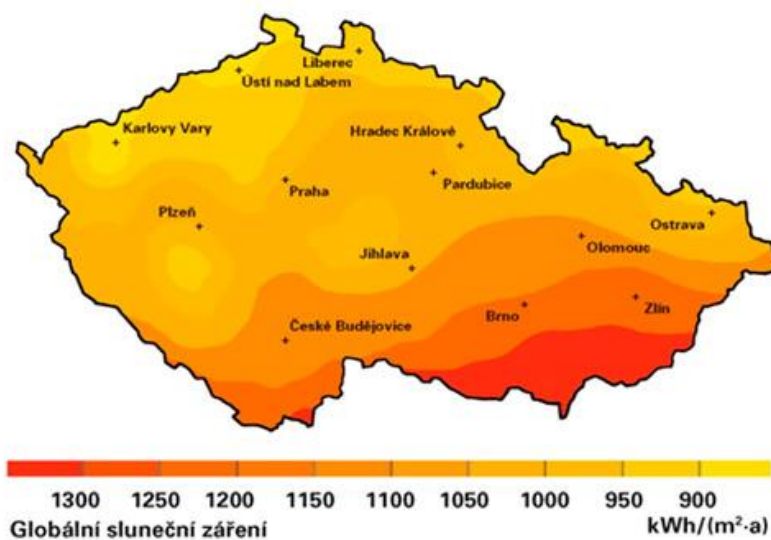
3.1.1. Slunce

Rostliny zachycují energii slunečního záření a využívají ji k fotosyntéze, tj. přeměně vody a oxidu uhličitého na jednoduché cukry (glukózu). To je palivo, které rostliny získávají ze slunce. Přeměnu ultrafialového záření na energii mohou provádět nejen rostliny, ale sluneční záření lze pomocí solárních panelů přeměnit na elektřinu.

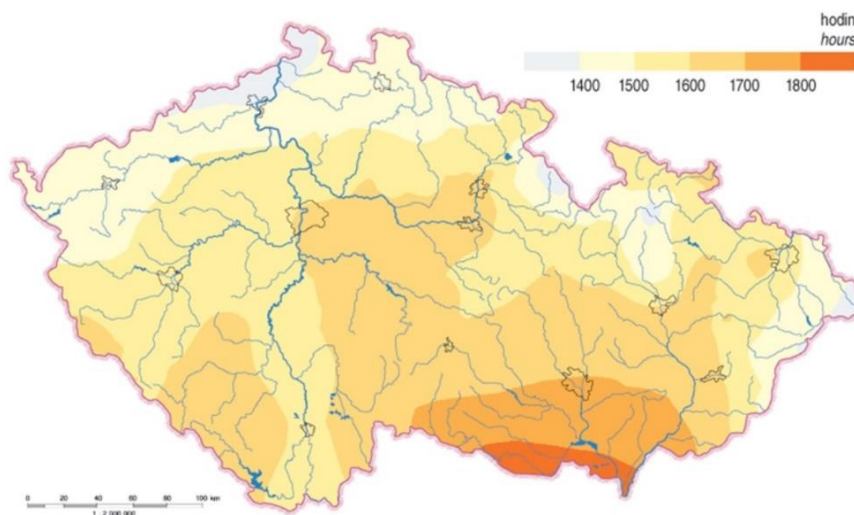
Sluneční energie je čistý, levný a obnovitelný zdroj energie, který lze využít téměř kdekoli na světě, kde dopadá záření na zemský povrch, je potenciálním místem pro výrobu sluneční energie. Jedná se o neomezený zdroj energie. Technologie obnovitelných zdrojů energie vyrábějí elektřinu z velkého množství zdrojů. Porovnejte například výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů s fosilními palivy. Ropa, plyn a uhlí vznikaly stovky tisíc let, pokud se některý z těchto zdrojů spaluje za účelem výroby elektřiny, jedná se o konečný zdroj, který se blíží vyčerpání. Využívání obnovitelných zdrojů, jako je větrná, solární a vodní energie, k výrobě elektřiny tyto zdroje nevyčerpává. Na zemském povrchu bude vždy neustále záření přítomno.

Díky tomu je solární energie ze své podstaty obnovitelná. Výkon ozáření Sluncem a roční energie ozáření (energie = výkon \times čas) se vztahují na osluněnou plochu a normují se na čtvereční metr. Výkon slunečního záření dopadajícího svisle na atmosférický obal Země činí průměrně $1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Tato střední hodnota se nazývá solární konstanta. Při průchodu zemskou atmosférou se sluneční výkon zmenšuje, neboť molekuly vzduchu, vodní kapky a aerosoly záření odrážejí, pohlcují nebo rozptylují (a vytvářejí tak modř oblohy). Při slunečném počasí dosahuje intenzita záření na povrchu Země kolem poledne špičkové hodnoty $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, a to poměrně nezávisle na stanovišti. Tato hodnota ozáření se používá jako referenční hodnota k určení jmenovitého výkonu solárních modulů. Pro hrubou orientaci při stanovení jmenovitého výkonu solárních modulů nutného k pokrytí požadované energetické potřeby může posloužit pravidlo, že z 1 kW instalovaného výkonu lze za rok získat 800 až 1100 kWh elektrické energie. Sluneční záření na Zemi se skládá z difuzního záření a přímého záření. Za jasných dnů převažuje přímé záření, které přichází ze směru Slunce bez vychylování a vrhá ostré stíny. Naproti tomu při zatažené obloze, kdy slunce na obloze není vidět, je

sluneční záření většinou rozptylováno a vychylováno v oblacích ozonové a prachové vrstvě. Dopadá pak téměř úplně jako difuzní záření bez předem určeného směru. Intenzita záření tím může klesnout na hodnoty pod $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Složení a intenzita slunečního záření jsou ovlivňovány počasím, ale také ročním obdobím, denní dobou a zeměpisnou šířkou, viz. Obr.1 a Obr.2.



Obr. 1 Celkové ozáření v České republice [16]



Obr. 2 Průměrná doba sluneční svitu v České republice za rok [17]

V severním Německu převažuje v celoroční bilanci difuzní sluneční ozáření nad přímým zářením v poměru asi 60:40, kdežto v jižním Německu je poměr vyrovnaný. Solární zařízení využívají přímého i difuzního slunečního záření. Sečteme-li energetický obsah přímého a difuzního slunečního záření všech slunečných hodin v roce, dostaneme roční ozáření Sluncem čili tzv. celkové ozáření v kilowatthodinách na 1 m² plochy a rok. Tato hodnota je regionálně velmi rozdílná a uvádí se pro horizontální plochu. V horkých pouštních oblastech dosahuje tato hodnota až 2500 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ za rok, kdežto v Německu je možno počítat s ročním slunečním ozářením 900 až 1200 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$, v České republice pak 950 až 1340 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$. Pokles ve směru od jihu k severu je znatelný, na základě mikroklimatu však dochází k odchýlkám, například v některých regionech východního Německa. V našich zeměpisných šířkách připadají více než tři čtvrtiny dopadající zářivé sluneční energie na letní polovinu roku od dubna do září. Střední hodnota ozáření v letech 2000 až 2008 se oproti střední hodnotě podle DWD období 1989 až 2000 zvýšila o 3 % [15].

3.1.2. Krátká historie

Vědci Bellových vývojových laboratoří – fyzik Daryl Chapin, chemik Calvin Fuller a fyzik Gerald Pearson si pravděpodobně nikdy nepředstavovali, že jejich vynález solárního článku v budoucnu způsobí revoluci ve fotovoltaickém průmyslu.



Obr. 3 Vynálezci Bellovy solární baterie, zleva Gerald Pearson, Daryl Chapin a Calvin Fuller, kontrolují zařízení na měření množství solární elektřiny získané ze slunečního světla, zde simulované lampou [26]

Tři vědci se pouze snažili vyřešit problémy v rámci telefonní společnosti Bell. Tradiční baterie suchých článků nefungovaly dobře a selhávaly. Společnost proto požádala laboratoře, aby jí prozkoumala alternativní zdroje pro nezávislé napájení. Úkol dostal Daryl Chapin. V té době bylo jeho úkolem testovat větrné stroje, termoelektrické generátory, a parní stroje. Jako odborník na solární energii navrhl, aby se zkoumání týkalo i solárních článků. Jeho nadřízený tento návrh schválil. Chapin začal pracovat v únoru 1952, ale jeho počáteční výzkum se selenem nebyl zprvu příliš úspěšný. Selenové solární články, v té době jediný typ na trhu, měly dosti malou výkonnost - pouhých 5 wattů na metr čtvereční a přeměňují méně než 0,5 % přicházejícího slunečního záření na elektrickou energii. Informace o Chapinových problémech se dozvěděl jiný výzkumník společnosti Bell - Gerald Pearson. Oba dva byli přáteli. Navštěvovali stejnou univerzitu a Pearson dokonce strávil nějaký čas na Chapinově tulipánové farmě. V březnu 1953 se G. Pearson zabýval průkopnickým výzkumem polovodičů s chemikem Calvinem Fullerem. Křemíkové polovodičové zařízení z jejich laboratoře dovedli až ke tvorbě polovodičů vodivosti typů P a N. C. Fuller objevil způsob řízení difúze částic příměsí do křemíku. C. Fuller dále poskytl G. Pearsonovi kousek křemíku, který obsahoval malou koncentrací příměsí 3 – mocného

galia. Příměsí galia v křemíkovém substrátu vznikl polovodič s vodivostí typu P. Tento polovodič byl ponořen do lithiové taveniny. Difúze lithia vytvořila oblast s vodivostí typu N. [1]

3.1.3. Rozvoj solární energetiky ve světě

Čína a Japonsko nyní zaujímají 57 % světového trhu se solární energií. Čína oznámila svůj záměr získat v roce 2015 35 GW výkonnosti ze solárních zařízení. Takový záměr je stimulován potřebou snížit znečištění životního prostředí způsobené spalováním fosilních paliv při stále rostoucích energetických potřebách civilizace.

Japonská fotovoltaická energetická asociace předpovídá, že do roku 2030 dosáhne výkonnost solárních elektráren v zemi 100 GW.

Indie plánuje ve střednědobém horizontu zvýšit výkonnost solárních zařízení další výstavbou ze 2 GW na 20 GW. Poslední trendy v Indii ukazují, že náklady na solární energii dosáhly úrovně 100 dolarů za megawatt, což je srovnatelné s energií získanou z dovozu uhlí nebo plynu.

Autonomní solární zařízení a mikrosítě se rozvíjejí také v Africe, kde má přístup ke zdrojům energie pouze 30 % subsaharského území. Stejně jako v jiných regionech se silným těžebním průmyslem se v Africe rozvíjí solární energetika jako alternativa k dieselovým elektrárnám nebo jako záložní zdroj za nespolehlivé rozvodné sítě.

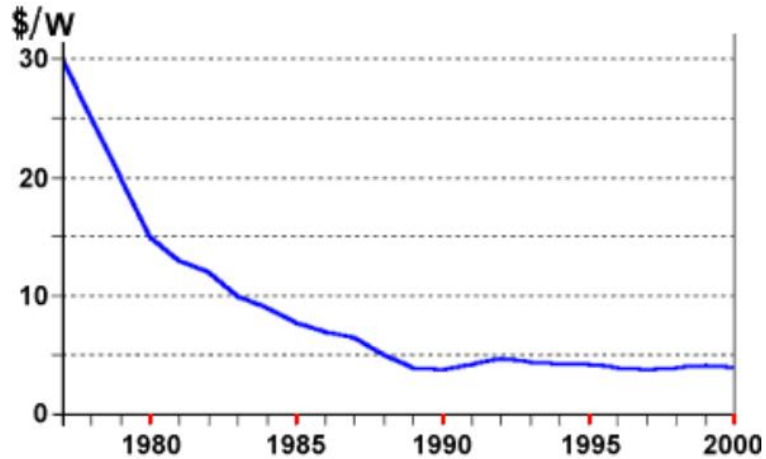
Je třeba mít na paměti, že cena kilowatthodiny solární energie se každé 2,5 roku snižuje na polovinu a od roku 1977 klesla na setinu původní ceny a není důvod, aby se tento trend v budoucnu změnil.[2]

Solární článek s více přechody (multi-junction) byl vyvinut společnostmi Soitec a CEA-Leti ve Francii společně s Fraunhoferovým institutem pro solární energetické systémy ISE v Německu. Přeměňuje až 46 % dopadajícího záření na elektrickou energii. Tato hodnota je rekordem oboru. Světový rekordní článek je čtyřpřechodový a každý z jeho dílčích článků přeměňuje na elektrinu přesně čtvrtinu množství dopadajících fotonů v rozsahu vlnových

délek mezi 300 a 1750 nm. Při použití v koncentrátoru fotovoltaiky se používá velmi malý článek s Fresnelovou čočkou, která koncentruje sluneční světlo na článek. Poslední rekordní účinnost byla naměřena při koncentraci 508 sluncí a byla potvrzena japonským AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), jedním z předních center pro nezávislé ověřování výsledků výkonu solárních článků za standardních testovacích podmínek. [3]

Instalace fotovoltaických systémů je dnes - vzhledem k vysoké ceně solárních modulů - relativně značně nákladná. Vzhledem k předpokládané životnosti nemohou tyto systémy cenově konkurovat elektríně z jiných zdrojů. Výhodnost se však může projevovat jiným způsobem a v jiných situacích:

- Velké autonomní systémy jsou výhodné tam, kde by bylo vybudování přípojky rozvodné sítě příliš nákladné.
- Malé autonomní systémy (odběr do 0,15 kWh za den) jsou efektivní při libovolné vzdálenosti od sítě.
- Fotovoltaika je už dnes výhodná v odlehlých místech, při malé spotřebě energie a při požadavku bezobslužného a bezporuchového provozu.
- Porovnání efektivity autonomního systému s jinými lokálními zdroji elektřiny (např. elektrocentrálami s dieselaagregátem) závisí na potřebě energie v průběhu roku.
- Fotovoltaika na rozdíl od elektrocentrál nezatěžuje životní prostředí zplodinami a hlukem.
- Cena fotovoltaických článků se neustále snižuje, takže klesají pořizovací náklady, a tím i návratnost investice (Obr.4).



Obr.4 Pokles ceny fotovoltaických modulů (dolary na watt instalovaného výkonu) [3]

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

Česká republika také očekává pokračující rozvoj a podporu obnovitelných zdrojů energie. V oblasti klimatu navazují české cíle na ty evropské. V plánu Ministerstva průmyslu a obchodu byl navržen příspěvek ČR k evropskému cíli na úroveň 22% obnovitelných zdrojů z konečné spotřeby energie do roku 2030. Oproti roku 2020 (13%) se jedná o nárůst 9%. ČR má v plánu podporovat obnovitelné zdroje energie hlavně formou dotací, daňových úlev a snížením administrativní zátěže.

Státní energetická koncepce tvoří hlavní strukturu energetické politiky v ČR. Vznikla proto, aby byla pro potřeby obyvatelstva a pro potřeby ekonomiky České republiky zajištěna spolehlivá, bezpečná, šetrná a ekonomicky dostupná dodávka energie. Slouží také k zajištění bezpečnosti, aby byly v krizových situacích nepřerušené dodávky energie, a to v rozsahu nezbytně nutném pro fungování hlavních složek státu a přežití obyvatelstva.

	Na spotřebě elektřiny	Na spotřebě v dopravě	Na vytápění a chlazení	Na konečné spotřebě energie
2010	7,52 %	5,22 %	14,10 %	10,51 %
2011	10,61 %	1,29 %*	15,39 %	10,95 %
2012	11,67 %	6,25 %	16,25 %	12,81 %
2013	12,78 %	6,44 %	17,71 %	13,93 %
2014	13,89 %	7,00 %	19,53 %	15,07 %
2015	14,07 %	6,54 %	19,79 %	15,07 %
2016	13,61 %	6,50 %	19,88 %	14,93 %
2017	13,65 %	6,62 %	19,73 %	14,80 %
2018	13,71 %	6,56 %	20,64 %	15,14 %
2019	14,05 %	7,83 %	22,63 %	16,24 %
2020	14,81 %	9,38 %	23,53 %	17,30 %

Tab.1 Vývoj podílů obnovitelné energie [18]

3.2 Princip činnosti fotovoltaického článku

3.2.1 Foton a jeho vlastnosti

Foton je hmotná, elektricky neutrální částice, kvantum elektromagnetického pole. Foton nelze zastavit: buď se pohybuje rychlostí rovnou rychlosti světla, nebo se nepohybuje; klidová hmotnost fotonu je nulová.

Při dopadu usměrněného slunečního záření se na křemíkovém článku shromažďuje náboj. Abychom náboj z destičky odstranili, potřebujeme vodivé "kanály" proudové dráhy. Výkon panelu se zvýší, když bude větší plocha desek, nebo se desky propojí do série nebo paralelně. Když jsou články zapojeny sériově, zvyšuje se výstupní napětí a při paralelním zapojení prvků se zvyšuje výstupní proud. Aby se zvýšil proud i napětí kombinujte tyto dva způsoby zapojení.

Solární panel se tedy skládá z paralelně-sériově zapojených solárních článků. Velikost maximálního možného výstupního proudu z panelu je přímo úměrná počtu paralelně zapojených článků. Kombinací typů zapojení se tedy sestaví panel s požadovanými parametry. Zbývá umístit solární články do zatavené fólie a umístit je pod sklo, které propouští ultrafialové záření. Solární panely lze instalovat kdekoli. Slunce je vždy k dispozici, i když je venku zataženo, panely jsou schopné dodávat elektrickou energii, i když ne v plné výši.

Pro kvalitnější dodávku elektrické energie je vhodné baterii solárních článků doplnit i akumulátorovou baterií. Vzniklá elektrická energie se ukládá do akumulátorových baterií a předává se do zátěže. Akumulátorové baterie jsou chemické zdroje proudu.

Počet solárních článků zapojených sériově a paralelně by měl být tak, aby provozní napětí dodávané, s ohledem na úbytek, bylo mírně vyšší než provozní napětí. Při slabém slunečním svitu nabíjení akumulátoru klesá a akumulátor dodává elektrickou energii do zátěže, tj. akumulátorové baterie neustále pracují v režimu vybíjení a dobíjení.

3.2.2 Materiál

Rostliny zachycují energii slunečního záření a používají ji k přeměně vody a oxidu uhličitého na jednoduchý cukr (glukózu). Je to palivo pro rostliny získané pomocí slunce. Přeměňovat sluneční záření na energii nemusí být schopné jen rostliny, sluneční záření může být přeměněno na elektřinu pomocí solárních panelů.

Solární články na bázi krystalického křemíku dominují dnešnímu trhu podílem 86 %. Křemík je nejedovatý a v elektronice dobře známý a vyzkoušený materiál. Po kyslíku je křemík druhým nejrozšířenějším prvkem na Zemi, a tím snadno dostupný. Nevyskytuje se však v čisté formě, nýbrž se musí získávat z roztaveného křemenného písku při vysokých teplotách. V chemických procesech je křemík dále čištěn, až je dosaženo téměř 100% čistoty. Různé firmy pracují na výrobě levnějšího křemíku. Jakmile se započne se samostatnou výrobou křemíku pro solární technologie, fotovoltaický (FV) průmysl již nebude závislý na výrobě klasické elektroniky. Vysoce čistý křemík je možno různými způsoby zpracovat na monokrystalické nebo polykrystalické solární články. [14]

Solární panely jsou vyrobeny z různých materiálů, včetně kovů, skla, plastů a pěny. Kovové rámy jsou obvykle vyrobeny z hliníku, který je lehký, pevný a odolný proti korozi. Panely jsou obvykle pokryty tenkou vrstvou tvrzeného skla, které je pevné a odolné. Solární články jsou obvykle vyrobeny z tenkých vrstev křemíku, což je polovodičový materiál, který se používá k absorpci slunečního záření a jeho přeměně na elektřinu. Články jsou pak pokryty tenkou vrstvou plastu, která je chrání před povětrnostními vlivy.

Materiál	Funkční jednotka = 1000 kg fotovoltaických modulů c-Si		
	"Surový" scénář	"Recyklovaný" scénář	
	Suroviny (kg)	Recyklované materiály (kg)	Chybějící Materiály
Tvrzené sklo	715.70	687.07	28.63
Hliník	103.00	103.00	0.00
Křemík	34.80	31.67	3.13
Cín	1.20	0.38	0.82
Olovo	0.70	0.67	0.03
Silver	0.10	0.09	0.01
Měď	17.70	15.05	2.66
Plastové	25.50	0.00	25.50
EVA	65.30	0.00	65.30
Tedlar	36.00	0.00	36.00
Celkem	1000.00	837.94	162.06

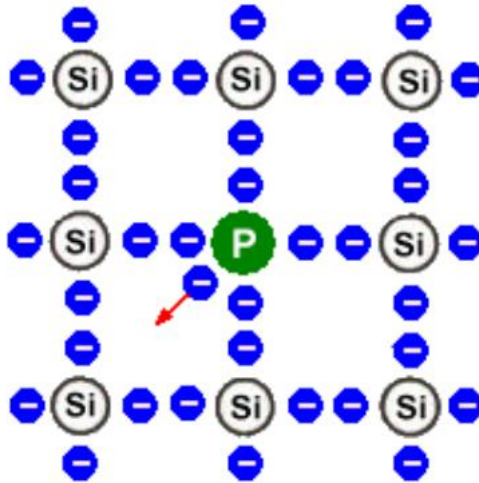
Tab. 2 Materiály využívané v panelech

Solární panely se obvykle montují na stojany, které jsou navrženy tak, aby udržely váhu panelů a poskytly bezpečnou konstrukci pro jejich upevnění. Stojany jsou obvykle vyrobeny z kovu nebo jiného pevného materiálu, například ze skelných vláken. Solární panely lze také namontovat na střechu budovy nebo na sloupy, které jsou ukotveny v zemi.

Výroba solárních panelů vyžaduje mnoho času, odborných znalostí a specializovaného vybavení. Většina materiálů používaných při výrobě solárních panelů se vyrábí v továrnách a poté se montuje na místě. Výroba jednoho solárního panelu trvá zpravidla přibližně dva týdny.

Vodivost typu N (negativní):

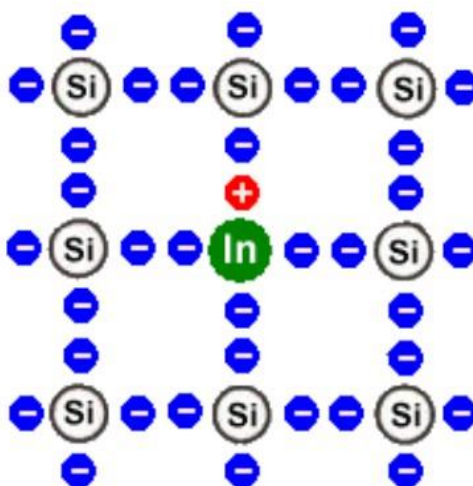
V krystalu křemíku jsou některé atomy nahrazeny pětimocnými atomy, např. fosforu nebo arzenu. Jejich čtyři valenční elektrony se účastní vazeb, ale pátý se již v chemických kovalentních vazbách nemohou uplatnit. Tyto volné elektrony způsobují po připojení zdroje elektronovou vodivost polovodiče typu N (Obr.5).



Obr.5 Vodivost materiálu typu N [3]

Vodivost typu P (pozitivní):

Zabudují-li se do krystalové mřížky křemíku atomy trojmocného prvku se třemi valenčními elektrony, např. india, chybí pro obsazení všech chemických vazeb elektrony. V místě nenasycené vazby vznikne "díra" s kladným nábojem. Tuto "díru" může zaplnit elektron z některé jiné vazby a "díra" se v krystalu přesune na jeho místo. Vzniká tak děrová vodivost polovodiče typu P (Obr.6).



Obr.6 Vodivost materiálu typu P [3]

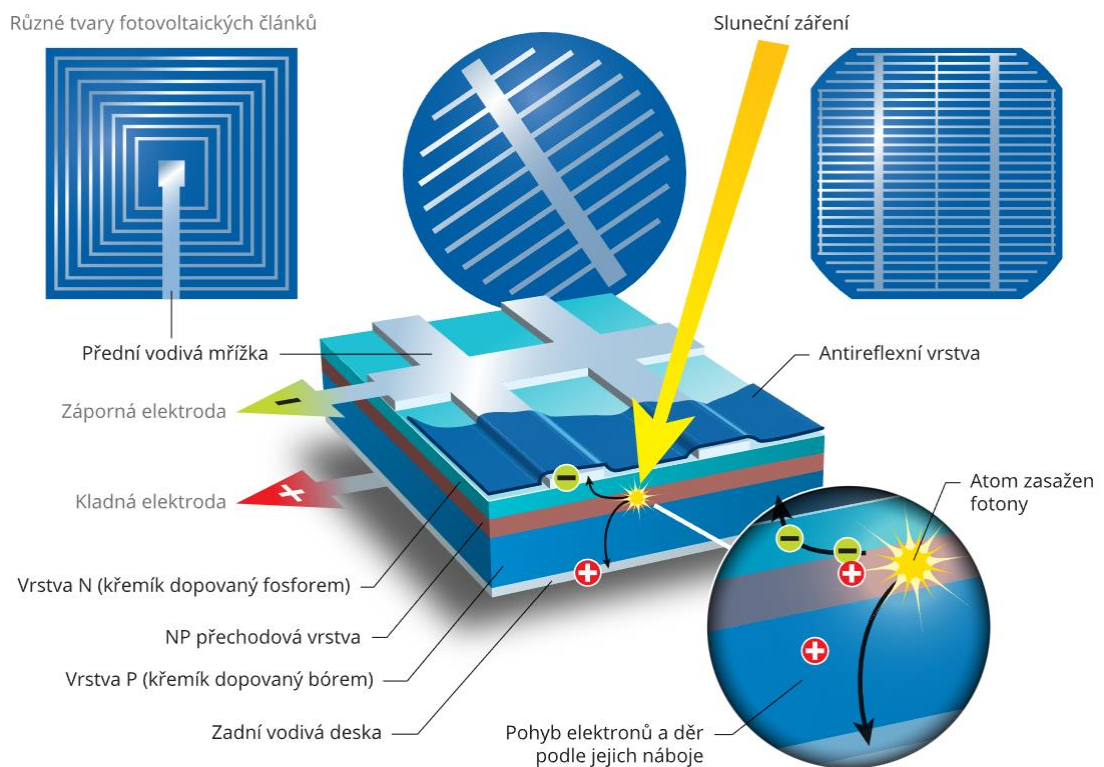
Solární panely se skládají z jednotlivých solárních článků, které jsou obvykle vyrobeny z polovodičového materiálu, jako je křemík. Články obsahují dvě vrstvy, vrstvu typu N a vrstvu typu P, které jsou složeny z polovodičového materiálu s různou úrovní vodivosti. Obě vrstvy jsou odděleny tenkou dielektrickou vrstvou z izolačního materiálu.

Solární články přeměňují světelnou energii na elektrickou právě díky přechodu P-N. V nejjzákladnějším smyslu, když fotony dopadají na článek, excitují elektrony v blízkosti hranice mezi oběma vrstvami a způsobují jejich pohyb. Tím vzniká rozdíl potenciálů mezi oběma vrstvami. Elektrony ve vrstvě typu N jsou excitovány a stanou se volně pohyblivými. Tyto elektrony difundují do vrstvy typu P, kde jsou díry. Elektrony zaplní díry a pokračují v pohybu k elektrodám vrstvy typu P. Tím vzniká ve vnějším obvodu proud.

Aby k tomu došlo, musí mít foton dostatečnou energii, aby dosáhl vrstvy typu N a poté difundoval do vrstvy typu P a překonal elektrické pole na přechodu. Proto jsou solární články konstruovány jako tenké, protože tenčí vrstvy umožňují průchod fotonů s vyšší energií a vytvoření většího proudu.

Klasický krystalický solární článek se skládá ze dvou rozdílně dotovaných křemíkových vrstev. Strana obrácená ke slunečnímu záření je dotována vícemocnou příměsí, vrstva ležící pod ní je dotována méně mocnou příměsí. Aby bylo možné ze solárního článku odebírat proud, jsou na přední a zadní straně umístěny kovové elektrody jako kontakty. Elektrody na zadní straně jsou

většinou provedeny jako celoplošné a jsou upevněny pomocí hliníkové nebo stříbrné pasty. Naproti tomu přední strana musí co nejlépe propouštět záření. Kontakty se zde většinou skládají z tenké mřížky, která zakrývá jen velmi malou část plochy povrchu článku. Umístění elektrod se většinou provádí síťotiskovou technikou. Na povrchu článku by se ultrafialového záření mělo co nejméně odrážet, aby se co nejvíce fotonů absorbovalo. Proto se na povrch článku umísťuje antireflexní vrstva, která dává šedým křemíkovým článkům jejich typickou černou barvu u monokrystalických článků, popřípadě modrou barvu u polykrystalických článků. (Obr.7)



Obr.7 Princip práce fotovoltaického článku [14]

Dopadá-li na solární článek záření, dochází k oddělení nábojů, jak bylo výše popsáno, a při připojení spotřebiče poteče proud. Na solárním článku dochází ke ztrátám rekombinací a odrazem (reflexí), a také zastíněním předními kontakty. Největší podíl energie se ztrácí ve formě dlouhovlnného záření, které nemůže být využito. Např. dlouhovlnné záření článkem prochází (transmise) a nepřispívá k vytváření nosičů náboje. Solární články mohou v důsledku materiálně technických vlastností využívat jen část spektra slunečního záření. Další část nevyužitá energie se absorbuje a mění se na teplo.

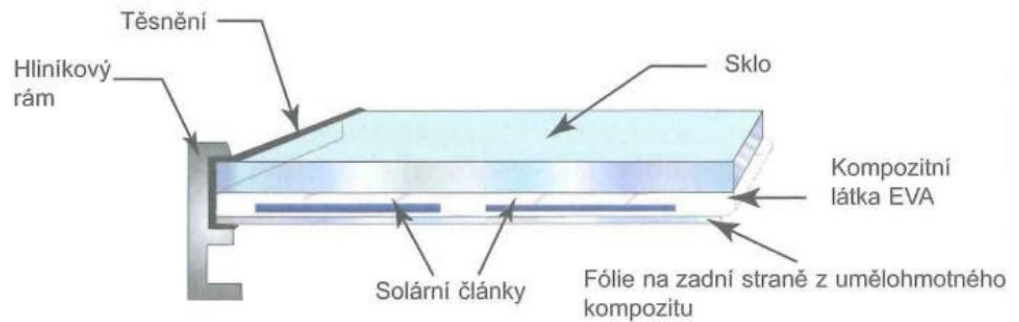
Výroba solárních panelů vyžaduje použití nebezpečných chemických látek. Jedovaté látky, jako je arsen, chrom a rtuť, jsou také pomocné produkty výrobního procesu. Tyto chemikálie mohou způsobit vážné škody na životním prostředí, pokud nejsou správně zlikvidovány.

3.3 Konstrukce a využití solárních panelů v praxi

3.3.1 Konstrukce

Obvyklé krystalické solární články mají v současné době hodnoty výkonu až 4 W s typickým napětím článku 0,5 V. Aby byly k dispozici větší jednotky s běžným napětím jako součástky připravené k připojení, sestavuje se mnoho solárních článků do „solárního modulu“. Obvyklé solární moduly - standardní moduly - mají dnes většinou 36, 48, 54, 60 nebo 72 článků, které jsou většinou elektricky sériově (za sebou) zapojeny do jedné, někdy dvou větví článků („strings“). Začátek a konec každé větve je vyveden na pozdější elektrický vývod z modulu. Při výrobě tenkovrstvých modulů odpadá pájení jednotlivých článků. Tenkovrstvé články se napařují jako tenké pruhy na skleněnou destičku a již v průběhu nanášení vrstvy se zapojují do série.

Při výrobě modulu se obvykle položí 4 nebo 8 řad článků vedle sebe a potom se zapouzdří. Tím vzniknou obdélníkové moduly, které mají rozměry dané velikostí článků. Hotové větve se zapouzdří mezi skleněnou destičku na přední straně a umělohmotnou fólii (např. tedlar) na zadní straně k solárnímu modulu. Přitom se solární články oboustranně zapustí do etylen-vinylacetátu (EVA). Tím jsou články chráněny před povětrnostními vlivy, mechanickým namáháním a vlhkostí. EVA je průhledný a články elektricky izoluje. Působením tepla a tlaku se články se sklem a fólií spékají nebo se laminují tak, že jsou odolné proti povětrnostním vlivům a zlomení. Jako přední sklo slouží speciální, tvrzené solární sklo, které obsahuje jen malé množství oxidu železa a je tudíž zvláště propustné pro ultrafialové záření. Tato nejlevnější a nejlehčí varianta se nazývá modul sklo-fólie. Je-li i zadní strana ze skla, hovoří se o dvojitých skleněných modulech. V mnoha případech mají moduly rám z hliníku, který chrání citlivé hrany skla a využívá se k montáži. Bezrámové moduly se většinou nazývají lamináty.



Obr. 8 Konstrukce rámovaného standardního modulu [14]

3.3.2 Využití

Solární panely se úspěšně využívají v průmyslu, zemědělství, vojenském a kosmickém průmyslu a dokonce i v každodenním životě. Bohužel elektrická vedení, kterými je propojena většina měst planety, stále nedosáhnou do těch nejnepřístupnějších lokalit, což dělá připojení ke zdrojům elektrárenským dražší než instalace solárních panelů.



Obr. 9 Standardní modul [8]

Instalace elektrárny na kapalná nebo pevná paliva je v provozu dražší a škodlivější pro životní prostředí než použití solárních panelů. Nejčastěji se jimi pokrývají střechy domů (Obr. 10), takže za slunečného dne vyrábějí elektřinu, která stačí na osvětlení a provoz domácích spotřebičů. A jistý speciální projekt ve Španělsku se ukázal být ještě úspěšnější. Z ekonomických důvodů byla řada moderních domů vybavena solárními panely, jejichž energie se využívá k ohřevu vody.



Obr. 10 *Sedlová střecha se standardními moduly* [9]

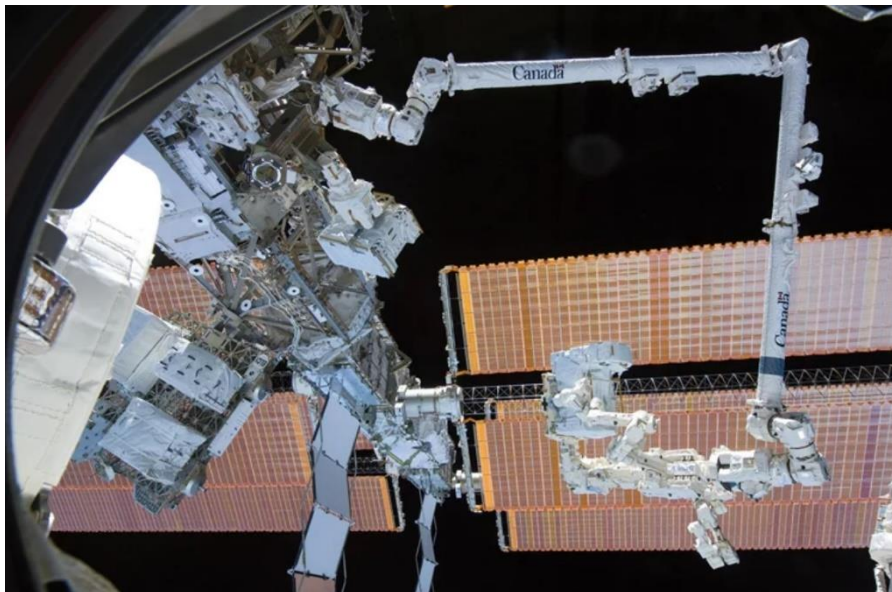
Ve prospěch solárních elektráren hovoří nespočet argumentů, ale ten hlavní je provozní šetrnost k životnímu prostředí. Příkladem může být absence škodlivých emisí ze solárních elektráren do životního prostředí za provozu. Jako první učinila alternativu k tradičním zdrojům elektřiny např. solární elektrárna umístěná poblíž španělského města Sevilla. Solární panely byly instalovány na věži, na kterou byla nasměrována zrcadla odrážející a soustřeďující sluneční záření. Vyrobená elektřina pokryla odběr asi 10 tisíc domácností v okolí.

Ve španělském komplexu Solúcar se provozují solární kolektory a solární elektrárna, která je technologicky ještě vyspělejší. V roce 2007 zde zahájili výstavbu speciální elektrárny PS10, která vyrábí energii pomocí zakřivených zrcadel k soustředění slunečních paprsků do jednoho bodu v dosahu všech zrcadlových oblouků na vyvýšené věži pro ohřev vody a páry. O dva roky později uvedli do provozu také PS20, ještě větší věž se stejným úkolem, viz. Obr.11. [7]



Obr.11 Solární elektrárna instalovaná společností Abengoa [7]

Ukázalo se, že fotovoltaické panely jsou téměř jediným použitelným zdrojem elektřiny mimo Zemi. Jsou jimi vybaveny všechny kosmické lodě. Když na ně svítí Slunce, vyrábějí elektřinu, která je akumulována v palubních akumulátorech a používá se k napájení zařízení v kosmické lodi v místech, kde je záření nedostupné.

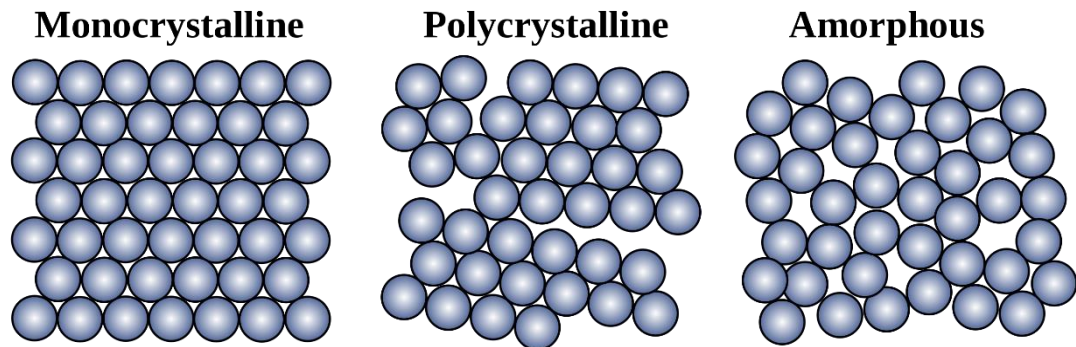


Obr.12 Mezinárodní vesmírná stanice [10]

3.4 Druhy fotovoltaických článků a panelů

3.4.1 Základní typy panelů

Existují dva hlavní typy solárních krystalických článků: monokrystalický křemík a polykrystalický křemík (Obr.13). Tenkovrstvé solární panely jsou na bázi amorfního křemíku.



Obr.13 Schéma alotropických forem křemíku: monokrystalický křemík, polykrystalický křemík a amorfní křemík [6]

Krystalické křemíkové solární články se vyrábějí z vysoce čistého křemíku a nejčastěji se používají v domácnostech. Skládají se ze vzájemně propojených článků o tloušťce přibližně 0,2 mm a jsou účinné při přeměně slunečního záření na elektrickou energii. Jsou také poměrně odolné a mohou vydržet až 25 let provozu.

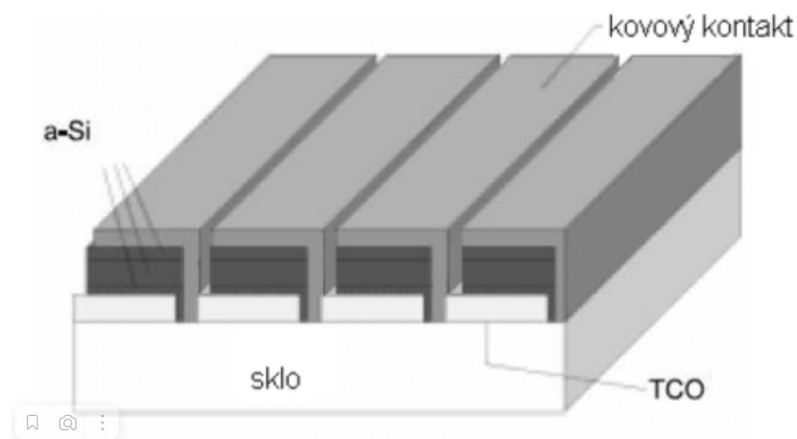
Při zvažování výhod a nevýhod konkrétních typů solárních panelů je důležité zohlednit náklady. Krystalické křemíkové solární články jsou dražší než amorfní, ale jsou odolnější a mají delší životnost. Amorfní články jsou levnější a zabírají méně místa, ale mají kratší životnost a jsou méně účinné při zachycování záření.

Výroba solárních panelů může být obtížná kvůli složitosti výrobního procesu. Krystalické křemíkové články vyžadují velké množství drahého křemíku vysoké čistoty, zatímco tenkovrstvé články se skládají z několika vrstev, z nichž všechny musí být pečlivě laminovány dohromady. Kromě toho musí být články testovány, aby se zajistilo, že splňují normy účinnosti a spolehlivosti.

3.4.2 Amorfní (tenkovrstvé) křemíkové články

Amorfní (tenkovrstvé) křemíkové články jsou vyrobeny z nekystalického křemíku a jsou nejméně účinným typem solárních článků. Skládají se z tenké vrstvy křemíku a vyžadují větší plochu než ostatní typy článků. Hlavní vlastností amorfních křemíkových článků je, že jejich výroba je levnější než u jiných typů solárních článků. S rozvojem nanotechnologií se tento směr může stát více perspektivní, ale zatím průmyslová výroba není moc rozšířená.

Tenké vrstvy jsou deponovány různými technologiemi – napařováním, napařováním, chemickou depozicí z plynné fáze (CVD), elektrochemicky, apod. Vrstvy TCO (SnO_2 , ITO, ZnO) jsou obvykle napařovány. Vrstvy amorfního nebo křystalického křemíku jsou běžně deponovány chemickou depozicí z plynné fáze, založené na dekompozici silanu $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$. Při přidání diboranu (B_2H_6) do směsi silanu s vodíkem narůstá vrstva dotovaná bórem (P+), pokud je do směsi přidán fosfin (PH_3), narůstá vrstva dotovaná fosforem.



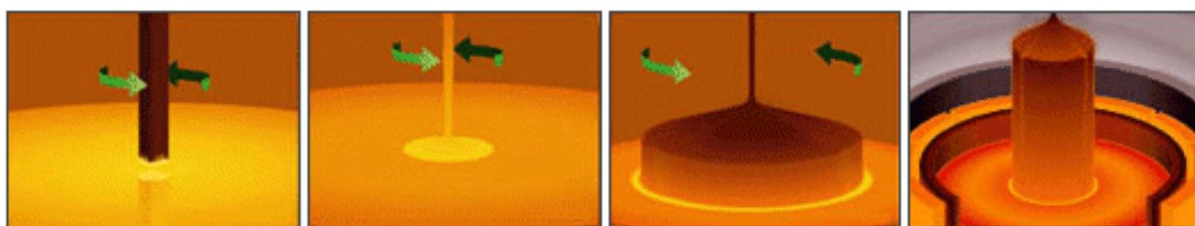
Obr.14 Tenkovrstvý článek [29]

3.4.3 Monokrystalické křemíkové články

Monokrystalické křemíkové články jsou většinou čtvercové nebo čtvercové se zaoblenými rohy (semisquare). Délka hrany čtvercových článků je 10, 12,5 a 15 centimetrů. V mezinárodním měřítku je v solárním průmyslu obvyklé udávat rozměry v palcích: jde tedy o rozměry 4, 5 a 6 palců. Novější poločtvercové články mají délku hrany 15,2 cm a jsou často vybaveny třemi vodivými pásky (busbar - sběrnice). Jsou nabízeny i monokrystalické moduly se zaoblenými články s průměrem 6 palců (odpovídá asi 15 cm), jsou však spíše vzácné. Příčinou jejich

menšího rozšíření je neobvyklost použití zakulacených článků v pravoúhlých modulech a menší účinnost modulů v důsledku menšího využití plochy. V modulech pro integraci do budov, u kterých je žádoucí částečná průhlednost nebo určité vzhledové působení, nebo pro domácí solární systémy však oblé články představují naprosto vhodnou alternativu. Spotřeba materiálu u oblých článků je v důsledku způsobu výroby mnohem menší než u čtvercových článků. Aby se zvýšilo využití plochy a současně se snížila spotřeba materiálu, jsou nabízeny také šestihorné články.

Jelikož se materiál článku skládá z jediného krystalu, je povrch článků homogenně tmavomodrý až černý. Elektrická kvalita monokrystalických solárních článků je velmi vysoká. Dosahují účinnosti přes 21 %, průměrná účinnost monokrystalických článků je 15 až 17 %. Tvar článků je určen procesem výroby. Při výrobě monokrystalického křemíku se většinou používá tzv. Czochralského (Cz) proces (Obr.15), kdy pomocí ponořeného zárodku krystalu se z vysoce čisté křemíkové taveniny při pomalém otáčení vytahuje kulatá monokrystalická tyč až do průměru 30 cm a několika metrů délky. Předtím se křemík musí roztavit při teplotě 1420 °C. Krystalizace je energeticky nejnáročnější proces ve fotovoltaice. Kulatá tyč se přiřízne na čtvercový průřez a poté se řeže na destičky (plátky, wafers) o tloušťce 0,3 mm. Při úpravě tvaru tyčí a řezání na destičky přijde velká část křemíku nazmar jako odpad při řezání. Podle toho, co všechno se z plátkové destičky odřeže, vzniknou později kruhové, poločtvercové nebo čtvercové články.



Obr.15 Czochralský proces [4]

Na destičky, které jsou již dotovány příměsí typu P, se napaří tenká vrstva dotovaná difuzí fosforu. Po umístění zadní kontaktní vrstvy a také kontaktního palce a antireflexní vrstvy jsou solární články kompletní. Antireflexní vrstva zajišťuje, že se od povrchu článku odráží co nejméně světla. Čím méně se od povrchu solárního článku odráží, tím více ultrafialového záření lze využít k získávání elektrické energie. Během roků vývoje se osvědčily různé antireflexní vrstvy (u solárních článků) a různá antireflexní skla (u solárních modulů). Stále více jsou povrchy článků opatřovány mikroskopicky malými strukturami. Byly k tomu vyvinuty různé

metody: pomocí laseru nebo mechanickým či chemickým zpracováním jsou vytvářeny malé pyramidální nebo rýhované struktury, které fungují jako pohlcovače záření a tak ještě jednou značně snižují reflexi ve srovnání s dielektrickými antireflexními vrstvami.[14]

3.4.4 Polykrystalické křemíkové články

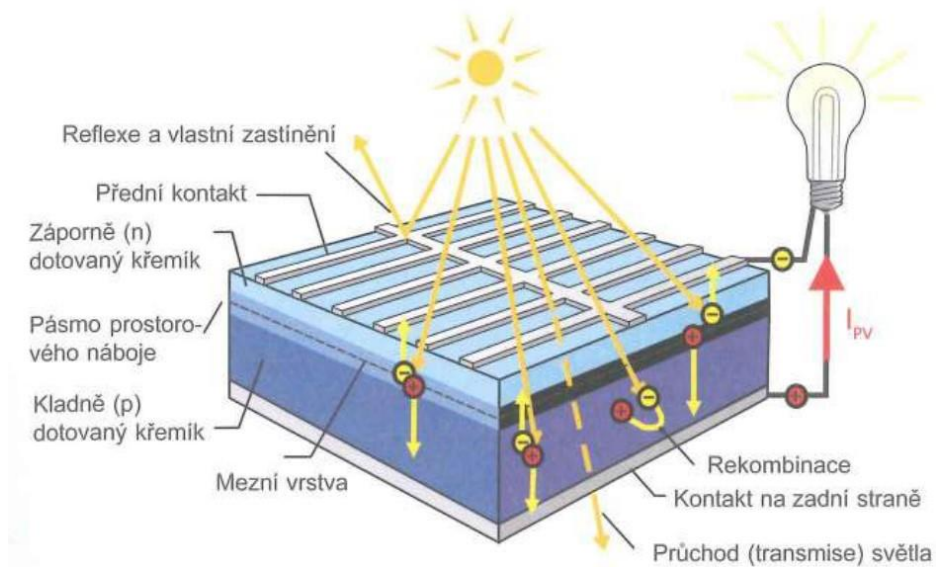
Polykrystalické články jsou vyrobeny z více krystalů křemíku a mají nižší účinnost než monokrystalické články. Hlavní vlastností polykrystalických článků je, že vyžadují větší plochu než monokrystalické články. Při výrobě se používá technologie získávání krystalizačních center, a v důsledku toho, malých krystalů v ingotu. Tyto destičky procházejí stejným tepelným zpracováním jako monokrystalické, ale jejich elektrické vlastnosti jsou výrazně horší. Jejich cena je však výrazně nižší. Navenek je lze rozlišit podle přítomnosti ploch, které se liší odstíny a obrysy. Protože je každý polykrystalický článek složen z příliš mnoha krystalů, je v něm méně prostoru pro pohyb elektronů, což má za následek nižší účinnost výroby elektřiny. Přestože monokrystalické články mají vyšší účinnost, rozdíl mezi monokrystalickými a polykrystalickými články není tak velký. Většina polykrystalických fotovoltaických článků má účinnost mezi 13 % a 16 %, což je stále velmi dobrý poměr a očekává se, že v budoucnu bude jen vyšší.

3.4.5 Teplotní koeficient Mono-Si vs. Poly-Si

Dalším velkým faktorem, který je velmi přehlížen, je teplotní koeficient. Teplotní koeficient udává, jak dobře funguje solární článek při zvýšení teploty. Udává ztrátu účinnosti za každý stupeň, o který se zvýší teplota.

Jak teplota ovlivňuje účinnost monokrystalických solárních panelů? Většina monokrystalických solárních článků má teplotní koeficient přibližně $-0,3 \% / ^\circ\text{C}$ až $-0,5 \% / ^\circ\text{C}$. Když tedy teplota stoupne o 1 stupeň Celsia nebo 32 stupňů Fahrenheita, monokrystalický solární článek dočasně ztratí 0,3 až 0,5 % své účinnosti.

Jak teplota ovlivňuje účinnost polykrystalických solárních panelů? Polykrystalické fotovoltaické články mají vyšší teplotní koeficient než monokrystalické. To znamená, že polykrystalické panely ztrácejí více ze své účinnosti, když se zvýší teplota, což je činí neoptimálními pro použití v horkých oblastech. [13]



Obr.16 *Konstrukce a přeměna energie v krystalickém křemíkovém solárním článku [14]*

3.4.6 Mikromorfnní solární články

Mikromorfnní solární články jsou kombinací mikrokrytalického a amorfnního křemíku v tandemových článcích. Při výrobě se podobně jako u amorfnních solárních článků se silanem vyrobí při teplotě kolem 2000 °C plazma a na sklo se nanese amorfnní křemíková vrstva o tloušťce asi 0,3 mikrometru. Změnou odlučovacích parametrů plazmy (teplota, tlak a mikrovlnná frekvence) pak na straně odvrácené od skla vznikne krystalická struktura o tloušťce 0,25 mikrometru, mikrokrytalická křemíková vrstva (μ -Si). Nejlepší elektrické vlastnosti se vytvoří, když se změní na mikrokrytaly ještě ne všechny amorfnní materiál. Vrstvy se přitom strukturují, takže vzniknou povrchové struktury co nejvíce pyramidového tvaru, které mají lepší optické a elektrické vlastnosti než hladké struktury. Vznikající tandemový článek může lépe využívat sluneční spektrum a oproti čistě amorfnním článkům má dvojnásobnou účinnost. Kromě vyšší účinnosti, která v současnosti dosahuje až 11 %, je výhodou také mnohem pomalejší počáteční degradace[14].

4. Problém recyklace panelů

4.1 Význam recyklace solárních panelů

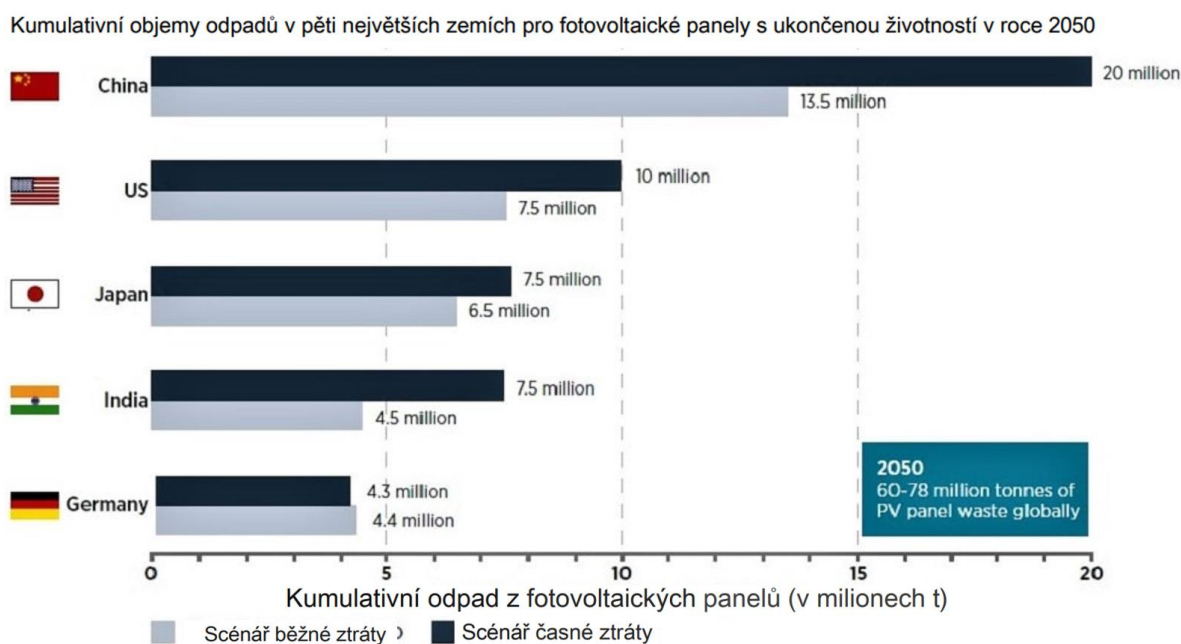
Solární moduly, které dosloužily (životnost prvních fotovoltaických modulů je v průměru 25-30 let), patří do kategorie elektronického odpadu (e-odpad). Roční celosvětový objem e-odpadu v roce 2021 činil přibližně 57 milionů tun. Fotovoltaické panely dnes tvoří pouze zlomek procenta celosvětového objemu elektronického odpadu. Ano, solární energetika je mladé odvětví a zatím nevyprodukovalo přílišné množství odpadu. Zároveň víme, jak rychle se rozvíjí. Mezinárodní agentura pro obnovitelné zdroje energie (IRENA) předpovídá, že do roku 2050 skončí životnost až 78 milionů tun solárních panelů a že ročně vznikne na světě asi 6 milionů tun nového solárního elektronického odpadu. Ačkoli toto číslo představuje jen malý zlomek celkového množství vyprodukovaného elektronického odpadu, standardní metody recyklace elektroniky nejsou pro solární panely vhodné. K získání nejcennějších materiálů z nich, včetně stříbra a křemíku, jsou zapotřebí individuální recyklační řešení. A pokud se nám nepodaří vyvinout tato řešení spolu s politiky, které podporují jejich široké přijetí, dojde ke zhoršení ekologické situace a solární panely skončí na běžných skládkách [11].

Rozšíření využití solární energie je příspěvkem k celosvětovému snížení emisí CO₂. V roce 2019 bylo celosvětově ze solárních panelů vyrobeno 720 terawatthodin energie, což představuje přibližně 3 % celosvětové výroby elektřiny. A k tomu bylo zapotřebí asi 46 milionů tun solárních panelů.

V roce 2016 zveřejnily Mezinárodní agentura pro obnovitelné zdroje energie (IRENA) a Mezinárodní energetická agentura (IEA) společnou zprávu o strategii likvidace solárních panelů. Předpokládá se, že do roku 2030 bude světový fotovoltaický odpad (kumulovaný celkový objem) činit 1,7-8 milionů tun, podle toho, zda se bude jednat o pravidelný úbytek (moduly, které dosáhly svou životnost za 25-30 let), nebo o předčasný úbytek (předčasně stažené moduly, před koncem jejich životnosti z řady důvodů - výměna zastaralého zařízení, mechanické poškození panelů apod.). Do roku 2050 bude odhadovaný objem odpadních fotovoltaických modulů, které dosloužily, činit 60-78 milionů tun (Obr. 17 a Obr.18).

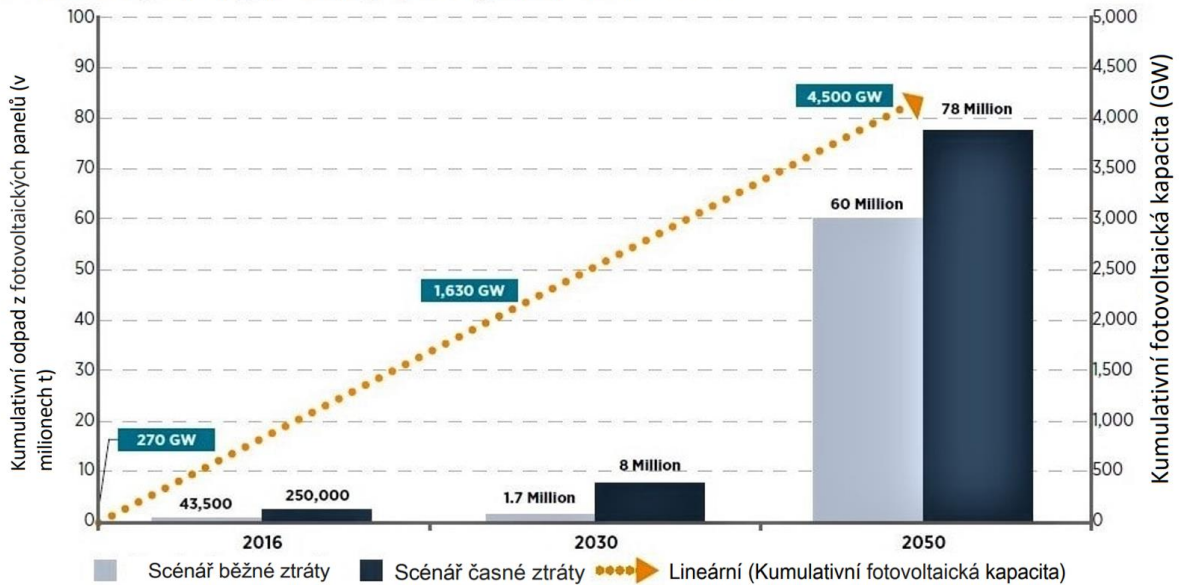
Když dnes solární panely doslouží, čeká je několik možných scénářů. Podle právních předpisů EU musí výrobci zajistit, aby jejich solární panely byly řádně recyklovány. V Japonsku, Indii a

Austrálii se požadavky na recyklaci připravují. Ve Spojených státech, s výjimkou zákona státu Washington, neexistují žádné požadavky na recyklaci solárních panelů. Dobrovolné recyklační úsilí vyvíjené průmyslem má omezený rozsah. "V současné době jsme si celkem jisti, že se recykluje asi 10 % solárních panelů," tvrdí Sam Vanderhoff, generální ředitel společnosti Recycle PV Solar, jedné z mála amerických společností, které se zabývají recyklací fotovoltaických panelů. Zbytek podle něj putuje na skládky nebo se vyváží do zahraničí k opětovnému použití v rozvojových zemích se slabou ochranou životního prostředí.



Obr. 17 Přehled celosvětové prognózy odpadu z fotovoltaických panelů [12]

Přehled celosvětových prognóz odpadu z fotovoltaických panelů, 2016-2050



Obr. 18 *Kumulativní objemy odpadů v pěti největších zemích pro vyřazené fotovoltaické panely v roce 2050 [12]*

4.2 Druhý život solárních panelů

Některé společnosti se snaží opravit a znovu použít panely, které ztratily účinnost, nebo alespoň zachránit některé jejich součásti. Opětovné použití je nejjednodušší a nejlevnější způsob "recyklace" panelů - vyžaduje nejmenší zpracování a je nákladově nejefektivnější.

Použitý panel lze znovu prodat přibližně za polovinu ceny nového. Podle Menga Taa, profesora inženýrství na Arizonské státní univerzitě a zakladatele startupu na recyklaci solárních panelů s názvem TG Companies, lze použité komponenty panelů prodat celkem až za 18 dolarů - to je o 10-15 % méně, než kolik stojí použitý solární panel. Přestože někteří prodejci nabízejí použité panely k prodeji zákazníkům z řad domácností, nenabízejí výraznou úsporu ceny. Panely tvoří maximálně polovinu celkových nákladů na solární elektrárnu a zbytek připadá na ostatní zařízení a výdaje. Vzhledem k tomu, že použité panely nevyrábějí tolik elektřiny jako nové, nemusí se ušetřené peníze za jejich nákup vyplatit.

Když panel dosáhne záruční doby, neznamená to, že ztrácí schopnost vyrábět energii. I přes snížení účinnosti lze použité panely využít na dobrovolnické projekty, což potvrzuje i společnost WFTSS.

Společnost WFTSS uvedla, že dříve uložila na skládky více než 100 tun solárních materiálů. Přepřacované panely prodávali výrobci solárních panelů a společnostem, které hledaly náhradní díly pro ty stávající. WFTSS tak může financovat své hlavní poslání, kterým je bezplatné poskytování solárních projektů původním obyvatelům Mexika. WFTSS spolupracuje s dobrovolnickou organizací, která staví domy pro lidi v nouzi v přibližně 20 zemích včetně Mexika. Obecně společnost WFTSS přepřacovává, recykluje a také věnuje použité fotovoltaické moduly na charitativní účely.

Ve Spojených státech amerických existují další společnosti, které nabízejí služby pro opravy a opětovné využití solárních panelů. Nejprve panely zhodnotí a poté je opraví. Protože jsou tyto moduly repasované, prodávají se za nižší cenu než nové panely (od 0,05 do 0,15 dolarů za watt).

4.3 Výtěžnost recyklace solárního panelu

Solární panely jsou sestaveny ve formě sendviče s články uprostřed. Přibližně 90 % komerčních solárních panelů využívá křemík jako polovodič, který přeměňuje záření na elektřinu. Tenké proužky kovu, obvykle stříbra, křížují povrch krystalů křemíku v každém článku a přenášejí elektřinu do měděných vývodů panelu.

Fotovoltaické panely obsahují relativně malé množství nebezpečných látek. Ty se vyplaví pouze v případě, že se panely rozbijí - to je bohužel při jejich vyhození na skládku prakticky jisté. V malém množství může být toxicita zanedbatelná, ale pokud se jedná o miliony tun panelů, je riziko kontaminace prostředí vážným problémem. Stříbro, cín a olovo (zejména ve starých panelech) jsou nebezpečnými složkami monokrystalických a polykrystalických křemíkových panelů (podle odhadů tvoří 70 až 90 % trhu); tenkovrstvé panely obsahují indium, galium, selen, kadmium, tellur a olovo.

Solární články mají ochrannou fólii, obvykle vyrobenou z průhledného plastu zvaného EVA. Na ní je další vrstva skla a zadní stranu pokrývá další plast, například PET. To vše je uzavřeno v hliníkovém rámu. Tato vícevrstvá konstrukce chrání prvky před vlivy prostředí tím, že propouští sluneční záření, ale může být obtížné ji separovat, když panely dosáhnou konce své životnosti.

Vzhledem k tomu, že stříbro je velmi drahé a jeho množství je omezené, pracují někteří výzkumníci na snížení množství stříbra v nových solárních panelech nebo dokonce na jeho nahrazení jiným kovem. To sice může dále snížit jejich cenu, ale zároveň to sníží ekonomickou proveditelnost recyklace.

4.4 Získávání užitečných materiálů ze starých solárních panelů

Proces zpracování fotovoltaických panelů na bázi křemíku začíná demontáží samotného výrobku na jednotlivé hliníkové a skleněné části. Zbývající materiály se zpracovávají při teplotě 500 °C v jednotce tepelného zpracování, aby se usnadnilo oddělení prvků panelu. Díky vysoké teplotě se odpaří těsnicí plast a křemíkové prvky zůstanou připraveny k dalšímu zpracování. Podpurná technologie zajišťuje, že ani tento plast nepříjde nazmar, takže je znovu použit jako zdroj tepla pro další tepelné zpracování.

Po tepelném zpracování se materiál fyzicky oddělí. Z 80 % jej lze snadno znovu použít a zbytek se dále zpracovává. Křemíkové částice, nazývané desky, se leptají kyselinou fluorovodíkovou. Rozbité destičky se roztaví a znovu použijí pro výrobu nových křemíkových modulů, čímž se dosáhne 85% míry recyklace křemíkového materiálu.

Ukázalo se, že tavení skla také není tak snadné. Při tavení odpadu vzniká a uniká do ovzduší kouř obsahující kadmium a olovo. Dešťová voda vyluhuje kadmium z poškozeného solárního panelu po dobu několika měsíců. A svou toxicitou se kadmium podobá rtuti nebo arsenu.

V současné době lze izolovat a recyklovat 85 až 95 % materiálů solárních panelů. Některé poškozené nebo předčasně porouchané panely lze opravit a znovu prodat na sekundárním trhu nebo do rozvojových zemí za zvýhodněné ceny, což umožní přístup k solárním technologiím těm, kteří by si je jinak nemohli dovolit. Sklo, měď, olovo, hliník a nebezpečné polovodičové materiály lze zlikvidovat kombinací mechanických a chemických procesů, které mají relativně malý dopad na životní prostředí a buď je lze roztavit při recyklaci, nebo je lze prodat jako suroviny pro použití při výrobě nových solárních panelů a další elektroniky, což snižuje množství energie vynaložené na jejich výrobu.

Čína, USA, Japonsko a země EU aktivně investují do výzkumu a vývoje v oblasti zpracování solárních panelů. K dnešnímu dni existují dva způsoby zpracování fotovoltaických modulů -

hrubé a jemné. První zahrnuje extrakci hlavních materiálů modulu - hliníku, mědi, skla, ale plast se jednoduše spálí. Při jemném zpracování je možné extrahovat všechny chemické prvky. Složení solárních modulů zahrnuje suroviny, které lze použít podruhé. V procentech tedy panel vyrobený z krystalického křemíku tvoří 76 % skla, 10 % polymerních materiálů, 8 % hliníku, 5 % křemíkových polovodičů, 1 % mědi, méně než 0,1 % stříbra, cínu a olova. U tenkovrstvých modulů je podíl skla mnohem vyšší - 89 % (CIGS) a 97 % (CdTe).

Použité panely, které nelze dále prodat, se ukládají na skládku nebo se recyklují. EU například požaduje, aby výrobci sbírali a recyklovali použité solární panely a financovali výzkum recyklace použitých panelů.

Některé závody na recyklaci odpadu mohou solární panely recyklovat mechanicky. Většina z nich odstraní hliníkový rám a rozele veškeré sklo, křemík a další kovy na směs zvanou kulatina, kterou lze prodat pro výrobu stavebních materiálů nebo jiné průmyslové využití. Kulatina umožňuje výnos asi 3 dolarů za směs získanou z jednoho panelu. A není jasné, zda se najdou kupci pro veškerou kulatinu získanou zpracováním mnohem většího počtu solárních panelů. Schopnost získávat čisté cenné materiály může pomoci zvýšení ziskovosti recyklace.

V současné době se v Evropě získává k opětovnému použití 65-70 % (hmotnostních) materiálů, z nichž se skládají solární moduly, což je v souladu se směrnicí EU o odpadcích z elektrických a elektronických zařízení. Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice CENELEC vypracoval další normy pro sběr a recyklaci panelů (EN50625-2-4 a TS50625-3-5). Norma specifikuje různé administrativní, organizační a technické požadavky, jejichž cílem je zabránit znečištění a nesprávné manipulaci, minimalizovat emise, podpořit zvýšení podílu zpětně získaných materiálů a hloubkové zpracování. Zabraňuje také přepravě odpadních modulů do zařízení, která nesplňují standardní požadavky na ochranu životního prostředí a zdraví.

Nedávné ekonomické analýzy skutečně ukazují, že cena šrotu z fotovoltaických elektráren (především oceli a mědi) převyšuje náklady na vyřazení z provozu, což činí recyklaci výhodnější než likvidaci odpadu. Ve scénářích hlubokého zpracování může čistý příjem v důsledku vyřazování z provozu činit 0,01-0,02 dolarů/watt (bez hodnoty pozemku). Při správné organizaci tedy může být recyklace odpadu ze solárních elektráren výhodná i bez dalších pobídek/regulačních opatření.

4.5 Likvidace tenkovrstvých modulů

Tenkovrstvé panely se zpracovávají destruktivněji. Prvním krokem je jejich vložení do drtiče. Poté se v kladivovém mlýně zajistí, aby všechny částice nebyly větší než 4-5 mm, což je velikost, při které se rozpadá vrstvení držící vnitřní materiály pohromadě, a lze je tedy separovat. Na rozdíl od fotovoltaických panelů na bázi křemíku se zbytek látky skládá z pevného i kapalného materiálu. K jejich oddělení se používá rotační šnek, který podporuje především rotaci pevných částí uvnitř trubice, zatímco kapalina proudí do nádoby.

Kapaliny procházejí procesem odpařování a kondenzace, aby byla zajištěna jejich čistota. Výsledná látka prochází zpracováním kovů, aby se zcela oddělily různé polovodičové materiály. Poslední krok závisí na konkrétní technologii použité při výrobě panelů; v průměru se však 95 % polovodičového materiálu znovu použije.

Pevné látky jsou znečištěny tzv. mezivrstvami, které jsou lehčí a lze je odstranit pomocí vibračního procesu. Nakonec se materiál promyje. Zůstane čisté sklo, čímž se ušetří 90 % skleněných prvků pro snadnou opětovnou výrobu.

Američané vyvinuli technologii zpracování tenkovrstvých CdTe modulů v roce 2000. Poprvé ji použila společnost First Solar. Díky vyvinuté technologii lze znovu použít 95 % polovodičových materiálů a 90 % skla. Všechny demontované prvky fotovoltaických modulů se zpracovávají v jednom cyklu.

4.6 Místa recyklace solárních panelů

Likvidaci odpadu ze solárních elektráren v Evropské unii upravuje směrnice o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (2012/19/EU). Výrobci jsou povinni financovat recyklaci solárních modulů prodaných v Evropě. Zákon ukládá povinnost recyklovat 80 % odpadu ročně.

V procesu zpracování fotovoltaických modulů uspěli Němci, kteří byli spolu se Severoameričany v této oblasti průkopníky. V Německu je běžná stejná technologie zpracování tenkovrstvých CdTe modulů jako v USA, tj. zpracování všech prvků FV modulů v jednom cyklu. Technologie byla upravena - proces zpracování fotovoltaických modulů se stal

ekologičtějším a méně energeticky náročným než výroba primárních surovin pro fotovoltaické panely.

EU investuje velké prostředky do projektů recyklace solárních panelů. Jedním z takových projektů je ELSi, který zpracovává německá společnost Geltz Umwelt-Technologie. Podstatou jejich recyklační technologie je opětovné využití materiálů získaných z fotovoltaických modulů (což je asi 95 %). Produktivita podniku je 50 tisíc fotovoltaických modulů ročně.

V roce 2018 se o rozruch postarala francouzská společnost Veolia, která otevřela továrnu na recyklaci fotovoltaických modulů. Dříve se ve Francii použité nebo rozbité solární panely jednoduše recyklovaly v univerzálních závodech na recyklaci skla. Při tomto procesu bylo možné získat sklo a hliníkové rámy, vše ostatní se pánilo. Nyní v novém závodě společnosti Veolia rozebírají fotovoltaické panely roboty, které z nich získávají sklo, křemík, plast, měď a stříbro. Poté jsou tyto prvky rozdraceny na granule a podávány jako hotové suroviny pro výrobu nových solárních panelů.

Evropská unie v rámci programu EIT RawMaterials vyčlenila na realizaci projektu ReProSolar 4,8 milionu eur. Projekt řídí společnost Veolia, jeden z největších světových hráčů v oblasti recyklace odpadů. Společně s partnerskými společnostmi z veřejného i soukromého sektoru vyvíjí speciální vysoce účinný proces likvidace vyřazených fotovoltaických modulů, který umožňuje úplné využití cenných materiálů. Například čistý křemík, stříbro a sklo mohou být po obnově znovu dodány výrobnímu průmyslu.

“Proces je založen na nové technologii stratifikace, která umožňuje efektivní oddělení materiálů solárních článků od skleněné desky. „Inovativní fyzikálně-chemické postupy pak umožňují získat zpět všechny materiály bez nutnosti broušení fotovoltaických modulů,“ vysvětluje vedoucí projektu Antoine Driancourt ze společnosti Veolia Umweltservice GmbH. V současné době žádný průmyslový proces na světě neumožňuje získat stříbro a křemík s velmi vysokým stupněm čistoty ze starých solárních článků. Pro celý solární průmysl to bude z hlediska současných recyklačních standardů velký průlom.

Financování projektu ze strany EU začalo v únoru 2021 a skončí v lednu 2025. Využití technologie v průmyslovém měřítku budou do konce roku 2025 testovat partneři FLAXRES

GmbH v Drážďanech a ROSI Solar v Grenoblu. Podle Veolie by se v demonstračním závodě mělo do roku 2023 zpracovat 5000 tun vyřazených fotovoltaických modulů ročně.

Francouzský startup ROSI Solar, založený v roce 2017, plánuje výstavbu nového recyklačního závodu ve francouzském Grenoblu. Společnost vyvinula proces na získávání stříbra, křemíku a dalších cenných materiálů z použitých panelů.

Soren rovněž spolupracuje s francouzskou logistickou společností Envie 2E Aquitaine, která se pokusí najít další využití pro vyřazené solární panely.

Společnost ROSI se zaměřuje na získávání vysoce čistého stříbra a křemíku, protože náklady na tyto dva materiály tvoří více než 60 % nákladů na panel. Pro zbývající vrstvy používá společnost patentovaný chemický proces, který se zaměřuje na extrakci drobných stříbrných vláken. Společnost dokáže extrahovat téměř veškeré stříbro v pevné formě, takže je snadnější oddělit ho od ostatních kovů, jako je olovo a cín. Společnost také získává křemík v dostatečně čisté formě pro zpracování a opětovné použití v nových panelech.

Pokud budeme hovořit o ekologické stránce recyklace vyřazených fotovoltaických modulů, pak zde bude rozhodně velké plus proti představě vyhození předpokládaného množství odpadu z fotovoltaických modulů do roku 2050 (60-78 milionů tun) na skládku... Vzhledem k tomu, že dnes vyráběné solární články obsahují toxické látky, budou škodlivé pro životní prostředí.

A samozřejmě nelze opomenout ani charitativní aspekt. Americká společnost WFTSS v praxi ukázala, jak lze solární panely, které dosloužily, dále využívat v soukromém sektoru pro potřeby chudých.

Recycle PV Solar je jednou z amerických společností, která recykluje použité solární panely. Pokud by se podařilo účinně oddělit a vyčistit cennější složky solárního panelu, konkrétně křemík a stříbro, mohlo by to zlepšit poměr nákladů a výnosů. O to se snaží malý počet specializovaných zpracovatelů solárních fotovoltaických modulů. Recycle PV Solar zpočátku používala "proces tepelného a kulového mlýna", který dokázal zachytit více než 90 % materiálů přítomných v panelu, včetně stříbra a křemíku nízké čistoty. Společnost však nedávno obdržela od svých evropských partnerů nové zařízení, které dokáže zpracovat více než 95 % materiálů a zároveň tyto materiály mnohem lépe oddělit.

Někteří výzkumníci chtějí dosáhnout ještě více. Tým vedený vědci z Národní laboratoře pro obnovitelnou energii vyzývá k vývoji nových recyklačních procesů, při nichž budou všechny kovy a minerály extrahovány s vysokou čistotou, aby byla recyklace co nejvíce ekonomicky životaschopná a ekologicky výhodná. Jak vysvětluje hlavní autor studie Garvin Heath, takové procesy mohou zahrnovat použití tepelného nebo chemického ošetření k oddělení skla od křemíkových prvků a následné použití dalších chemických nebo elektrických metod k oddělení a vyčištění křemíku a různých stop kovů. [27]

4.7 Základní metody recyklace

V [22] byly použity tepelné, chemické a mechanické přístupy. Jednalo se o fotovoltaické moduly c-Si na bázi polyethylentereftalátu (PETP) se složením 59,51 % skla (přední sklo), 14,7 % hliníku a 8,65 % oceli (rám), 1,9 % mědi a 2,85 % plastů a lepidel (spojovací skříňka a kabely), 4,52 % EVA (zapouzdřovací hmota) a 1,91 % PET (zadní fólie) a 1,82 % křemíku, 2,01 % hliníku, 1,99 % mědi a 0,12 % stříbra (solární článek). Bylo analyzováno několik přístupů včetně tepelného a chemického zpracování a destruktivní a selektivní mechanické separace. Během tepelného a chemického zpracování probíhal proces pyrolýzy při teplotě přibližně 400 °C, aby se rozpadly polymery (EVA a zadní fólie) a uvolnily se fotovoltaické články a skleněná vrstva. Další chemické ošetření pomocí HNO₃ (kyselina dusičná) umožnilo získat kovy z PV článků (měď a stříbro). Díky tepelnému a chemickému ošetření byla míra regenerace materiálu 98 % pro sklo, 86 % pro hliník, 85 % pro měď a 74 % pro stříbro. Při použití selektivní mechanické separace činil podíl 98 % skla, 86 % hliníku, 95 % mědi a 95 % stříbra.

V [23] byly analyzovány tři metody recyklace fotovoltaických modulů: chemická, tepelná a mechanická. Tepelná recyklace byla mnohem rychlejší, ale uvolňují se při ní nebezpečné plyny. Jednalo se o fotovoltaické moduly c-Si na bázi Tedlaru se složením 74 % skla (přední sklo), 10,3 % hliníku (rám), 1,16 % plastů a lepidel (spojovací skříňka a kabely), 6,55 % EVA (zapouzdřovací hmota), 3,6 % Tedlaru (zadní fólie) a 3,35 % křemíku, 0,57 % mědi, 0,17 % stříbra, 0,12 % cínu a 0,06 % olova (solární článek). Podíl získaného materiálu činil 95 % skla, 100 % hliníku, 100 % mědi, 81 % křemíku, 50 % stříbra, 100 % cínu a 100 % olova.

V [24] byl analyzován fyzikálně-chemický proces recyklace fotovoltaických modulů EoL. Složení EoL PV modulů bylo uvažováno jako 69,5 % skla, 11,25 % EVA, 10 % hliníku (rám); 4,3 % Tedlar (zadní fólie); 3,7 % křemíku, 1,08 % mědi, 0,12 % hliníku a 0,05 % stříbra. Předpokládalo se, že recyklátoři obdrží od obce, sběračů fotovoltaických panelů a výrobců fotovoltaických panelů poplatek ve výši přibližně 0,25-0,50 dolarů/kg fotovoltaického odpadu. Předpokládala se recyklační kapacita 79 200 milionů tun/rok. K rozkladu EVA byl použit roztok HNO_3 . Z analýzy vyplývá, že přibližně 33 % celkových příjmů pochází z poplatků. Přibližně 30 % pochází ze zpětně získaného stříbra a 37 % z ostatních zpětně získaných materiálů. Celkem 49 % provozních nákladů závisí na práci. Očekává se, že zařízení bude generovat přibližně 43 % hrubé marže a doba návratnosti bude 1,4 roku.

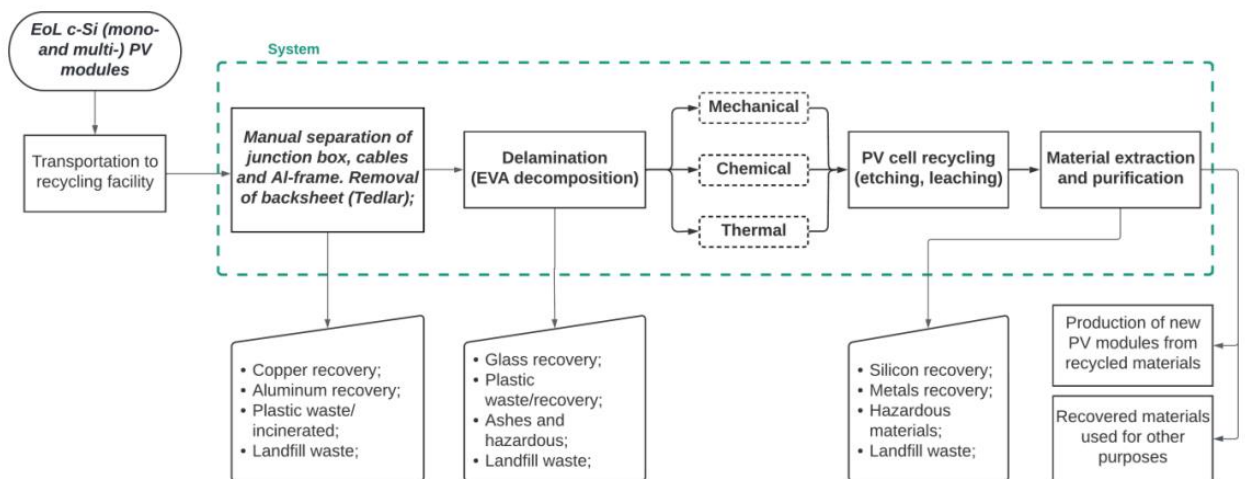
V [25] byly polyc-Si fotovoltaické moduly upraveny fyzikálním a chemickým procesem. Chemický proces zahrnoval použití rozpouštědel k oddělení vrstev skla, polyc-Si a polymeru. K obnově vrstvy křemíku při 400 °C byly použity HNO_3 a H_3PO_4 (kyselina fosforečná). Dále se uvažovalo o předúpravě ultrazvukem a tepelné úpravě. Rozpouštědla bylo možné obnovit odpařením a následnou kondenzací, což mělo zjevné výhody. Fyzikální proces zahrnoval nejprve demontáž hliníkové slitiny, poté bylo použito řezání modulů, drcení/frézování, prosévání a separace těžkého média. Všechny moduly byly předběžně rozřezány na čtverce (mechanický přístup) nebo pruhy (chemický přístup). Při fyzikálním postupu bylo prvním krokem drcení. Separace pak byla provedena nejprve vodou, poté chloridem sodným a následně pomocí polytungstanu sodného ($\text{Na}_6[\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40}]$). Celkem bylo získáno 100% kovů, ale s nízkou kvalitou (přibližně 67 %, obsahující sklo a EVA). Bylo získáno celkem 76% skla. Bylo zjištěno, že nejlepšími chemickými látkami jsou toluen a xylen. Předběžná tepelná úprava byla irelevantní a intenzita ultrazvuku neměla na účinek vliv. Při použití toluenu bylo zjištěno, že optimálními podmínkami jsou 60 °C, doba setrvání kratší než 60 minut, použití ultrazvuku a menší předúprava.

4.8 Proces FRELP

Proces FRELP je smíšený proces využívající mechanické, tepelné a chemické postupy. Projekt FRELP byl financován z evropské výzvy LIFE+ a probíhal v letech 2013 až 2017. Měl rozpočet téměř 5 milionů eur a hlavními zúčastněnými partnery byly společnosti Sasil Spa, SSV a PV CYCLE. Cílem projektu bylo otestovat a demonstrovat použití stávajících technologií k recyklaci 100 % fotovoltaických modulů EoL (monokrystalických i polykrystalických) ekonomicky životaschopným způsobem. Cílem bylo zpětné získání vysoce kvalitního extra čírého skla, které se využije v průmyslu dutého a plochého skla, a zpětné získání kovového křemíku, který se využije jako ferosilicium nebo se přemění na amorfní křemík, pro použití v tenkých vrstvách. Pro proces FRELP bylo použito tepelné zpracování pro separaci skla, pyrolýza byla použita pro plast při zpětném získávání energie a nakonec bylo použito leptání kyselinou dusičnou pro oddělení křemíku od ostatních kovů. Selektivní elektrolyza byla použita k filtraci a získání ostatních kovů. Nakonec byla ve spolupráci se Společným výzkumným střediskem (JRC) provedena analýza životního prostředí.

FRELP skládá z následujících kroků. Stroj nejprve odstraní z fotovoltaických modulů hliníkový rámeček a spojovací skříňku. Poté se laminovaná struktura zahřeje na 90-120 °C a sklo se oddělí a obnoví. V dalším kroku se zbývající struktura obsahující zapouzdření, křemíkové články, elektrody a zadní fólii zahřeje na 500 °C a kovy se oddělí. Odpadní plyn ze spalování polymerů se poté recykluje pro spalování a oddělené kovy se chemicky upraví. Křemíkové články se leptají HNO_3 a křemík se rafinací obnoví. Poté se elektrolyzou a úpravou hydroxidem vápenatým získají další kovy (stříbro a měď). Ve studiích [19,21] bylo provedeno srovnání procesu FRELP se současným recyklačním procesem používaným v jiných evropských zařízeních na recyklaci OEEZ. Recyklační procesy byly hodnoceny z hlediska účinnosti zdrojů, přínosů pro životní prostředí a zátěže. Proces FRELP vyšší dopady, ale také vyšší přínosy, a to ve všech kategoriích dopadů. Vysoce efektivní logistika by díky předběžnému zpracování fotovoltaického odpadu na místě a jeho dalšímu zpracování v centralizovaném zařízení mohla výrazně snížit dopad recyklačního procesu FRELP na životní prostředí.

LCI pro pět různých procesů recyklace fotovoltaických modulů jsou vypracovány v reportu, včetně procesu FRELP. V procesu FRELP bylo přibližně 88 % vstupního materiálu a 95 % skla získáno v dobré kvalitě (spálené polymery tvoří přibližně 7 % vstupní hmotnosti). Uvádí se, že tyto tři recyklační procesy spotřebují 50 až 100 kWh/t vstupního modulu u mechanických procesů a 494 kWh/t u recyklátoru fotovoltaických panelů, který používá jemné mletí pro zvýšení výtěžnosti skla a kovů. Společnost FRELP spotřebovala přibližně 50 kWh/tunu elektrické energie pro svůj mechanický proces a 76 kWh/tunu ekvivalentu zemního plynu pro své tepelné a spalovací procesy, celkem 126 kWh/tunu. Výtěžnost skla se pohybovala od 59 % do 75 % a neželezné kovy byly získávány v rozmezí 13,5 % až 21,8 %. Podobné výsledky byly uvedeny v [19,20,21].



Obr.19 Základní vymezení systému a jeho hranic [28]

4.9 Nová generace baterií z vyřazených solárních panelů

Materiáloví odborníci z australské Deakin University tvrdí, že objevili způsob, jak nejen získat křemík z použitých solárních panelů pro opětovné použití, ale také prokázali jeho potenciál užití na anody pro vysokoenergetické akumulátorové baterie.

Chemik Mokhlesur Rahman a jeho výzkumný kolega Ying Chen přišli s technikou, která je založena na přeměně křemíku v nanorozměrech na materiál pro lithium-iontové baterie. Zdá se, že tento proces dává materiálu nepravidelný tvar, ale jak vysvětluje Rahman, skutečně přináší výsledek.

Od chemika M.Rahmana pochází následující tvrzení: *"Předpokládá se, že výsledný nanokřemík může mít různorodou velikost a tvar v důsledku morfologických a strukturálních defektů, které se vyskytují v různých fázích jeho obnovy,". "Tento typ nanokřemíku může poskytnout další výhodu oproti komerčnímu nanokřemíku. Protože křemíkové nanočástice s nejednotným tvarem a velikostí znamenají více volného prostoru uvnitř s dodatečnou pórovitostí, která usnadňuje transport elektrolytu, může to zlepšit využití objemu baterie."*

Vědci dále tvrdí, že jejich křemík v nanorozměrech je schopen uchovávat 10krát více energie na přibližně stejném prostoru jako běžný křemík, a v této fázi je teoreticky možné, že to povede ke zvýšení účinnosti baterií. V každém případě se může stát novým zdrojem materiálu pro výrobce panelů, který v současné době má cenu přibližně 30 000 dolarů za 1 kg.

4.10 Problém není jen v solárních panelech

Problém recyklace se týká i dalších technologií obnovitelných zdrojů energie. Odborníci například očekávají, že pokud nebudou vybudována významná zpracovatelská zařízení, pak jen ve Spojených státech skončí v příštích 20 letech na skládkách více než 720 000 tun odpadu z obřích lopatek větrných turbín. Podle převládajících odhadů se v současné době recykluje pouze pět procent akumulátorových baterií do elektromobilů, což se snaží výrobci automobilů napravit, protože v současnosti počty prodaných elektromobilů meziročně rostou o 40 %.

5. Závěr

Solární energie se stala oblíbeným zdrojem obnovitelné energie díky svým ekologickým přínosům a dlouhodobým úsporám nákladů. Stejně jako všechny druhy technologií však mají solární panely omezenou životnost a nakonec je zapotřebí jejich obměny. Místo likvidace použitých solárních panelů je z ekologických a ekonomických důvodů stále důležitější recyklace jejich součástí - jednotlivých prvků včetně hlavního materiálu solárního panelu - křemíku.

Recyklace solárních panelů má zásadní význam z ekologických a ekonomických důvodů. Ukládání použitých solárních panelů na skládky může vést k úniku toxických chemikálií, jako je olovo a kadmium, které mohou kontaminovat půdu a podzemní vody. Solární panely také obsahují cenné materiály, jako je stříbro, měď a křemík, které lze z životního prostředí obtížně získat. Recyklace umožňuje tyto materiály znovu použít, čímž se snižuje potřeba nové těžby.

Při recyklaci solárních panelů se jejich součásti nejprve demontují, aby se oddělily jednotlivé materiály. Sklo z horní vrstvy solárního panelu lze snadno recyklovat, protože se skládá z běžných materiálů. Poté se odstraní stříbrné a měděné kontakty a roztaví se, aby mohly být znovu použity v jiných výrobcích. Zadní sklo a většina materiálu panelu se rozemele a oddělí, aby se získal křemík, který se před použitím při výrobě nových solárních panelů vyčistí.

Křemík je náročný materiál na recyklaci kvůli své křehké struktuře a obtížnosti jeho účinné extrakce. Byly však vyvinuty nové recyklační technologie pro účinnou extrakci a čištění křemíku ze solárních panelů. Proces zahrnuje rozdrcení použitých solárních panelů na malé kousky a jejich vložení do pece k rozkladu. Křemík pak prochází řadou spalování, kyselých lázní a dalších procesů, jejichž cílem je jeho extrakce a čištění. Vyčištěný křemík se pak používá k výrobě nových solárních panelů a dalších výrobků. V současné době existují dva hlavní způsoby recyklace solárních panelů: mechanická a tepelná. Mechanická metoda zahrnuje ruční drcení a třídění různých součástí solárního panelu. Tepelná metoda zahrnuje umístění panelů do pece a použití intenzivního tepla ke spálení všech plastů ze článků. Obě metody mají své výhody i nevýhody, ale v obou recyklačních technologiích bylo dosaženo pokroku a stále se zlepšují.

Přestože se recyklace solárních panelů v posledních letech zvýšila, v současné době se recykluje pouze malé procento použitých panelů. K tomuto nízkému podílu přispívá nedostatečné povědomí veřejnosti a nedostatečná recyklační infrastruktura. V současné době není možné recyklovat všechny solární panely na Zemi vzhledem k současným omezením a zdrojům. S vhodnými investicemi a vzděláváním však můžeme zvýšit míru recyklace solárních panelů a udržet tak udržitelný růst v odvětví obnovitelných zdrojů energie.

Recyklace solárních panelů je nezbytná pro dosažení dlouhodobé udržitelnosti životního prostředí a snížení vyčerpání přírodních zdrojů. Recyklace součástí a materiálů obsažených v solárních panelech může pomoci snížit emise uhlíku, znečištění životního prostředí a potřebu nové těžební činnosti. Existují metody, jak úspěšně recyklovat solární panely, a recyklační technologie se stále zlepšují, ale stále čelí výzvam. Důležitější je, že pro neustálý růst odvětví obnovitelných zdrojů energie a zároveň pro udržení udržitelného rozvoje planety je nezbytná informovanost veřejnosti a investice do recyklační infrastruktury.

6. Seznam použitých zdrojů:

- [1] National Renewable Energy Laboratory (NREL) [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/33947.pdf>
- [2] Silfab Solar raises \$125M to fund U.S. cell manufacturing plant [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <http://www.renewableenergyworld.com>
- [3] New world record for solar cell efficiency [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html>
- [4] Solární (fotovoltaické) články [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [5] Polovodiče [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k31.htm>
- [6] Solar cells: a shining technology between politics and science [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://greentechresearch.wordpress.com/2013/06/07/solar-cells-a-shining-technology-between-politics-and-science/>
- [7] Štítok: ekológia [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://zaujimavosti.net/tag/ekologia/>
- [8] Stavba elektrárny II. [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://vyrobaprvozuj.webnode.cz/vlastni-elektrina/ostrovni-solarni-elektrarna/stavba-elektrarny-ii-/>
- [9] Euronom [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <http://www.euronom.cz/solarni-systemy/solarni-system-eurosol-1>
- [10] Jak se sluní ISS: Mezinárodní vesmírná stanice dostane nové panely [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.abicko.cz/clanek/precti-si-technika-vesmir/27889/jak-se-sluni-iss-mezinarodni-vesmirna-stanice-dostane-nove-panely.html>
- [11] Global landscape of renewable energy finance 2023 [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-landscape-of-renewable-energy-finance-2023>
- [12] IRENA and IEA PVPS – End-of-Life Management Solar PV Panels, 2016: p.12
- [13] Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://ases.org/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>
- [14] Ralf Haselhuhn.: Fotovoltaika. Budovy jako zdroj proudu. (HEL) ISBN 978-80-86167-33-6

- [15] Quaschnig V.: Eingluss von Strahlungsquellen und Klimaschwankungen auf die Ertragsprognose für PV-Anlagen. In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut (OTTI) e.V., Regensburg (Hrsg.): 24.Symposium Photovoltaische Solarenergie. Staffelstein, 04.-06.März 2009. 2009.
ISBN 978-3-934681-93-4
- [16] Fotovoltaika. Fotovoltaická elektrárna [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <http://www.regam.cz/fotovoltaika.php?lang=cz>
- [17] Fotovoltaika v podmínkách České republiky [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/slunecni-zareni-v-cr.aspx>
- [18] Vývoj podílů obnovitelné energie [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/vyvoj-podilu-obnovitelne-energie--264684>
- [19] 15. Latunussa, C.E.L.; Ardente, F.; Blengini, G.A.; Mancini, L. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels . Sol. Energy Meter. Sol. Cells 2016, 156, 101-111 .
- [20] 26. Libby, C.; Shaw, S.; Heath, G.; Wambach, K. Photovoltaic Recycling Processes. In Proceedings of the 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), Waikoloa, HI, USA, 10-15 June 2018; pp. 2594-2599.
- [21] 57. Ardente, F.; Latunussa, C.E.L.; Blengini, G.A. Recyklace kritických a vzácných kovů z odpadních křemíkových fotovoltaických panelů. Waste Manag. 2019, 91, 156-167 .
- [22] Duflou, J.R.; Peeters, J.R.; Altamirano, D.; Bracquene, E.; Dewulf, W. Demanufacturing photovoltaic panels: Srovnání strategií zpracování na konci životnosti pro lepší využití zdrojů. Cirp Ann. Manuf. Technol. 2018, 67, 29-32.
- [23] . Strachala, D.; Hylský, J.; Vane'k, J.; Fafílek, G.; Jandová, K. Metody recyklace fotovoltaických modulů a jejich vliv na životní prostředí a těžbu surovin. Acta Mont. Slovaca 2017, 22, 257-269 .
- [24] Granata, G.; Petrides, D. Recyklace solárních fotovoltaických panelů s ukončenou životností - modelování procesu a analýza nákladů pomocí programu SuperPromDesigner@. Simulace procesů těžby a recyklace kovů. 2021. Dostupné online:https://www.researchgate.net/publication/348923589_Solar_PhotoVoltaic_Panel_Recycling_Process_Modeling_and_TechnoEconomic_Assessment_TEA_using_SuperPro_Designer

- r?channel=doi&linkId=60172e4d299bf1b33e3d35a1&showFulltext=true (přístup 18. Zář 2022).Energie 2022, 15, 8419
- [25] Flore Azeumo, M.; Germana, C.; Maria Ippolito, N.; Franco, M.; Luigi, P.; Settimio, S. Recyklace fotovoltaických modulů, fyzikální a chemický proces obnovy. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2019, 193, 314-319 .
- [26] Gerald Pearson: trapping the vast power of the sun [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://spie.org/news/photronics-focus/julyaugust-2021/gerald-pearson-co-inventor-of-the-silicon-solar-cell?SSO=1>
- [27] Norgren, A.; Carpenter, A.; Heath, G. Design for Recycling Principles Applicable to Selected Clean Energy Technologies: Crystalline-Silicon Photovoltaic Modules, Electric Vehicle Batteries, and Wind Turbine Blades. J. Sustain. Metall. 2020, 6, 761–774.
- [28] MDPI [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/journal/energies> Recycling c-Si PV Modules: A Review, a Proposed Energy Model and a Manufacturing Comparison
- [29] Polovodiče: Fotovoltaické články z krystalického křemíku a tenkovrstvé články [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/polovodice-fotovoltaicke-clanky-krystalickeho-kremiku-tenkovrstve-clanky>