

Recyklace solárních fotovoltaických panelů

Ing. Antonín Šperlich, Ústav chemických procesů AV ČR v. v. i., Praha,
e-mail: sperlich@icpf.cas.cz

Souhrn

Dlouhodobé trendy ukazují zvyšující se instalovanou kapacitu solárních fotovoltaických elektráren. S tím je však také spojena velká produkce vyřazených panelů. Odhadované množství odpadních panelů se předpokládá mezi 60 a 80 miliony tun celosvětově okolo roku 2050. Takto velké objemy odpadů mohou tvořit zajímavý zdroj cenných látek, ale také nutnost recyklace kvůli životnímu prostředí. Příspěvek má za cíl popsat možnosti recyklace panelů a jejich využití ke stavbě reálné recyklační linky.

Klíčová slova: recyklace, solární fotovoltaické panely, návrh technologie

Summary

Long-term trends show an increasing installed capacity of solar photovoltaic power plants. However, this is also associated with a large production of discarded panels. It is estimated that by 2050 there will be between 60 and 80 million tonnes of waste panels worldwide. Such large amounts of waste can be an interesting source of valuable materials, but also need to be recycled for environmental reasons. The aim of this paper is to describe the possibilities of recycling panels and using them to build a real recycling line.

Keywords: recycling, solar photovoltaic panels, technology design

Úvod

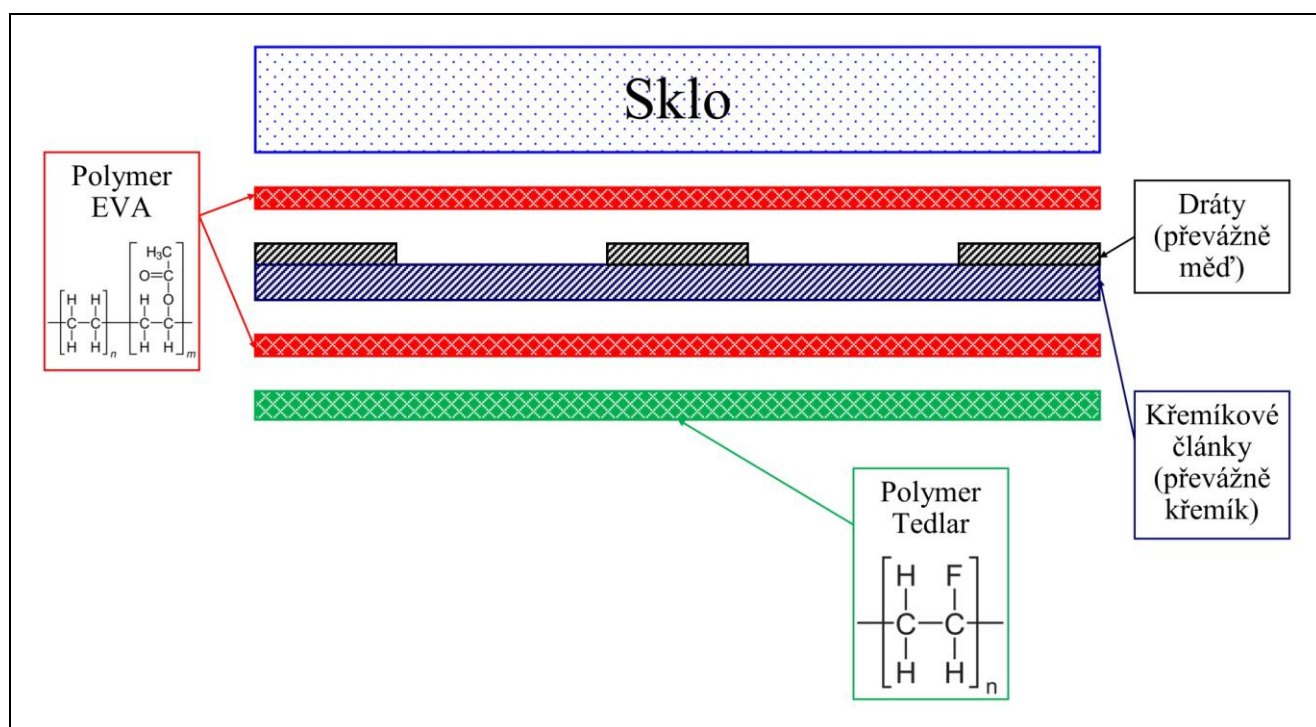
Solární fotovoltaické panely se celosvětově těší veliké oblibě a objem jejich výroby neustále roste [1, 2]. To je dáno zejména snahou o větší využívání obnovitelných zdrojů energie, ale také rostoucí efektivitou a životností nových fotovoltaických solárních panelů. Je však nutno dodat, že v současné době není v dostatečné míře rozvinut zpětný odběr starých fotovoltaických solárních panelů a jejich recyklace na dále využitelné produkty. Ideálním stavem by pak bylo dosažení cirkulární ekonomiky, tedy opětovného využití surovin získaných recyklací pro výrobu nových fotovoltaických solárních panelů.

Recyklace je však ztížena faktem, že solární fotovoltaické panely obsahují celou řadu látek, jako jsou například kovy, polymery nebo sklo. Panel má podobu tenkého plátu a jednotlivé vrstvy jsou pevně spojeny. Jako nejcennější část se z dostupných informací jeví křemíkové solární články (u křemíkového typu panelu, který však na trhu zcela dominuje [3]) a kovové vodiče.

Ekologickým a současně i technologickým problémem jsou panely patřící do skupiny tzv. tenkovrstvých fotovoltaických solárních panelů, konkrétně typ CdTe a CIGS. První zmíněná technologie používá telurid kadmenný, přičemž oba kovy jsou jedovaté. Druhá zmíněná technologie používá měď, indium, gallium a selen (název pochází z počátečních písmen anglických názvů kovů). V této technologii jsou potenciálně nebezpečnými kovy indium a selen [4, 5].

Charakterizace solární fotovoltaických panelů

Základem smysluplné technologie je dostatečně velký materiálový tok surovin (což je splněno, viz výše) a dále dostatečně velký obsah cenných látek. Prvotním úkolem je tedy charakterizovat jednotlivé části panelu a následně vytipovat části vhodné ke znovuzískávání. Strukturu typického solárního fotovoltaického panelu křemíkového typu lze vidět na následujícím obrázku.



Obr. 1: Typická struktura solárního fotovoltaického panelu křemíkového typu.

První (horní) vrstva je tvořena sklem. Sklo tvoří (z hlediska hmotnosti) největší část solárního fotovoltaického panelu. Druhou vrstvu tvoří kopolymer ethylvinylacetátu (EVA), který funguje jako lepidlo, které drží jednotlivé vrstvy pohromadě. Třetí (kovová) vrstva je tvořena křemíkovými články spolu se sběrnými vodiči. Čtvrtá vrstva je opět tvořena kopolymerem EVA. Pátá vrstva je tvořena fluorovaným polymerem, který tvoří spodní ochrannou vrstvu. Jeho obchodní název je Tedlar [6].

Měření chemického složení jednotlivých vrstev

Jednotlivé vrstvy byly ručně odděleny za pomoci nože. Pro charakterizaci chemického složení skla bylo využito XRF. Sklo bylo omyto vodou a vyžeháno v peci při 550 °C, kvůli odstranění případných zbytků polymerů. Následně bylo ve vibračním mlýnu rozemleto na jemný prášek a ten byl měřen na XRF. Mezi nalezenými prvky byly pouze prvky typické pro sklo.

Další částí byly křemíkové články a dráty. Vzhledem k nehomogenitě a v případě drátů také k pravděpodobnému výskytu vrstev napříč drátem, byly v tomto případě oba vzorky vylouženy kyselinami a přefiltrované výluhy změřeny na ICP-OES. Filtrační koláč, tedy nerozložený podíl, byl i s filtračním papírem přemístěn do porcelánového kelímku. Ten byl následně vyžehán do konstantní hmotnosti a po zchlazení na pokojovou teplotu zvážen. Z těchto údajů bylo možné dopočítat nerozložený podíl, který je vzhledem k povaze materiálu, tvořen převážně křemíkem. Z výsledků vyplynulo, že dráty jsou tvořeny především mědí s příměsí olova a cínu (pájky). Podstatným výsledkem jsou však vyšší koncentrace stříbra (v řádu desetin hmotnostních procent), o kterém se předpokládá, že sehraje důležitou roli v ekonomice celého procesu [7].

U obou polymerů bylo pozorováno jejich chování za vyšších teplot. Hodnocení bylo prováděno jak vizuálně, tak kvantitativním výpočtem úbytku hmotnosti v závislosti na teplotě. Toto měření bylo provedeno zahřátím vzorku na danou teplotu po dobu jedné hodiny s následným dopálením v peci při teplotě 550 °C kvůli korekci na nespalitelné složky (např. sklo). Z tohoto měření paradoxně vyplynulo, že Tedlar měkne a taví se již při teplotě vyšší, než 150 °C. Naproti tomu kopolymer EVA měkne a taví se při teplotě vyšší, než 300 °C. Při teplotě 350 °C však dochází k úplnému rozkladu a hmotnostní úbytek je prakticky 100%.

Technologie pro průmyslové zpracování panelů

Na základě zjištěného chemického složení a vlastností jednotlivých složek mohou být následně navrženy metody pro recyklaci. Obecným pravidlem je nejprve využití fyzikálních metod. Tyto metody slouží zejména k mechanickému rozdělení vstupní suroviny a následnému zakoncentrování cenných látek v jednotlivých frakcích. V případě solárních fotovoltaických panelů jde o jejich stříhání na menší kousky, odsítování odpadnuvšího skla apod. Po fyzikálním zpracování následují chemické metody, které produkují již využitelné suroviny. V případě solárních fotovoltaických panelů lze zmínit například spalování polymerů (za účelem jejich odstranění) a loužení kovů pomocí kyselin.

Závěr

Na základě provedených experimentů bylo zjištěno, že vyřazené fotovoltaické solární panely obsahují řadu potenciálně zajímavých a využitelných látek. Chemické složení jednotlivých částí (sklo, dráty a křemíkové články) bylo zjištěno pomocí XRF a ICP-OES. Bylo zjištěno, že dráty obsahují řádově desetiny hmotnostního procenta stříbra, jehož loužení může velmi pozitivně ovlivňovat ekonomiku celého procesu.

Tyto zjištěné informace nám pomohly vytipovat fyzikální metody pro prvotní zpracování. V další fázi tedy bude zkoumáno využití drtičů pro nastříhání solárních fotovoltaických panelů z původní velikosti na malé kousky. Pro oddělení jednotlivých vrstev se momentálně jeví jako nejlepší metoda spalování kopolymeru EVA. V neposlední řadě bude nutné navrhnout a optimalizovat kyselinové loužení kovových částí a následné získávání kovů z roztoků.

Poděkování

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

Použitá literatura

- [1] Venkatachary, S. K.; Samikannu, R.; Murugesan, S.; Dasari, N. R.; Subramaniam, R. U. Economics and impact of recycling solar waste materials on the environment and health care. *Environmental Technology & Innovation* **2020**, *20*, 101130-101130. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101130.
- [2] Ansanelli, G.; Fiorentino, G.; Tammaro, M.; Zucaro, A. A Life Cycle Assessment of a recovery process from End-of-Life Photovoltaic Panels. *Applied Energy* **2021**, *290*, 116727-116727. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116727.
- [3] Włodarczyk, R. Analysis of the Photovoltaic Waste-Recycling Process in Polish Conditions—A Short Review. *Sustainability* **2022**, *14* (8), 4739-4739. DOI: 10.3390/su14084739.
- [4] Padoan, F. C. D. S. M.; Schiavi, P. G.; Belardi, G.; Altimari, P.; Rubino, A.; Pagnanelli, F. Material flux through an innovative recycling process treating different types of end-of-life photovoltaic panels: Demonstration at pilot scale. *Energies* **2021**, *14* (17). DOI: 10.3390/en14175534.
- [5] Isherwood, P. J. M. Reshaping the Module: The Path to Comprehensive Photovoltaic Panel Recycling. In *Sustainability (Switzerland)*, MDPI: 2022; Vol. 14.
- [6] Peplow, M. Solar Panels Face Recycling Challenge. *ACS Cent Sci* **2022**, *8* (3), 299-302. DOI: 10.1021/acscentsci.2c00214 From NLM PubMed-not-MEDLINE.
- [7] Deng, R.; Chang, N. L.; Ouyang, Z.; Chong, C. M. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd: 2019; Vol. 109, pp 532-550.