



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie

Dopad likvidace fotovoltaických panelů na ŽP

**The impact of the disposal of photovoltaic panels on the
environment**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: doc.Ing. Kudláček Ivan., CSc.

Jan Tesárek

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jan Tesárek**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Dopad likvidace fotovoltaických panelů na ŽP**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracovat materiálovou skladbu běžně používaných fotovoltaických panelů
- 2) Zanalyzovat dopad technologií použitých při likvidaci fotovoltaických panelů na životní prostředí.

Seznam odborné literatury:

- [1] National Renewable Energy Laboratory. Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production. 1999, In: www.nrel.gov/docs/fy99osti/25119.pdf.
- [2] PV CYCLE Association (www.pvcycle.org)
- [3] Wind & Sun.PV mounting structures. In: http://www.windandsun.co.uk/Solar/PV_mounting_structures.htm.

Vedoucí: doc.Ing. Ivan Kudláček, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



Ing. Karel Dušek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Řípka, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 3. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 22. 5. 2015

Tesárek Jan

Poděkování

Děkuji doc.Ing. Ivanu Kudláčkovi, CSc. za konzultace a rady při řešení bakalářské práce a zároveň děkuji firmám First Solar, SolarWorld, 4Re a Aquatest za odborné informace o procesu recyklace fotovoltaických panelů.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá dopadem likvidace fotovoltaických panelů na životní prostředí. Toto téma jsem zvolil pro jeho aktuálnost, jelikož v následujících několika letech vyprší životnost prvních komerčně vyrobených panelů v České republice. Nabízí se tedy otázka jejich likvidace. V první části práce se podrobně věnuji jednotlivým druhům fotovoltaických článků, zejména procesu výroby a jejich následnému sestavení do panelů, na což navazují materiálovou skladbou běžně používaných fotovoltaických panelů. Dále jsem zanalyzoval jednotlivé technologie likvidace fotovoltaických panelů včetně rozpracování jejich kladů a záporů s akcentem kladeným na ovlivňování životního prostředí. V závěru práce tematizuji dopad likvidace fotovoltaických panelů na životní prostředí.

Klíčová slova

Solární panel, výroba, recyklace, životní prostředí.

Abstract

Bachelor thesis deals with the impact of the disposal of photovoltaic panels on the environment. I chose this topic for its topicality, because in the next few years will expire lifetime of the first commercially produced panels in the Czech Republic. The question is their disposal. The first part of my thesis is devoted to the types of photovoltaic cells, particularly the production process and their subsequent assembly into photovoltaic panels, which is related to the material composition of commonly used photovoltaic panels. After that I analyzed the various disposal technologies photovoltaic panels including the elaboration of the pros and cons with emphasis focused on influencing the environment. In conclusion I thematize the impact of the disposal of photovoltaic panels on the environment.

Keywords

Solar panel, manufacturing, recycling, environment

Obsah

Úvod.....	7
1 Sluneční záření.....	9
2 Fotoelektrický jev	11
3 Princip solárního článku.....	12
4 Historie a druhy fotovoltaických článku.....	13
4.1 Generace solárních článků	13
4.2 Moderní trendy fotovoltaických článků.....	14
5 Výroba fotovoltaických panelů	15
5.1 Výroba panelů z krystalického křemíku křemíku.....	15
5.2 Výroba fotovoltaických tenkovrstvých panelů	17
6 Materiálová rešerše běžně dostupných komečních fotovoltaických panelů. 19	
7 Recyklace	23
7.1 Zákonná likvidace fotovoltaických panelů.....	23
7.2 Proces recyklace	24
7.3 Termicko-chemická metoda.....	24
7.4 Mechanicko-chemická metoda	27
7.5 Recyklované materiály a jejich výtěžnost.....	28
8 Životní prostředí.....	31
8.1 Popis jednotlivých dopadů na životní prostředí.....	32
9 Vliv likvidace na životní prostředí.....	34
9.1 Zpracování metodou TOP TWENTY (TT).....	34
9.2 Vyhodnocení přínosů recyklace na životní prostředí	40
9.3 Ekonomické zhodnocení.....	42
Závěr.....	44
Seznam použitých zdrojů	46
Seznam obrázků	48
Seznam tabulek	49
Seznam příloh.....	50

Úvod

Jako téma své bakalářské práce jsem si vybral problematiku likvidace fotovoltaických panelů s akcentem na dopad na životní prostředí. Toto téma jsem zvolil zejména pro jeho aktuálnost. Za zdůraznění stojí fakt, že likvidace panelů, ať již jakoukoliv technologií, je ze zákona povinná a zároveň nezbytná z hlediska použitých zdrojů. V současné době se vedou polemiky o ekologičnosti fotovoltaických panelů. Další důvod, který mě vedl ke zpracování tohoto tématu, je fakt, že proces likvidace panelů nabývá stále větší důležitosti a jsou zdůrazňovány zejména jeho vlivy na životní prostředí, které je třeba minimalizovat.

O důležitosti dané problematiky svědčí i intenzita výstavby nových fotovoltaických elektráren a vzrůstající množství solárního odpadu. Je zřejmé, že největší množství solárního odpadu bude okolo roku 2030, ale i přesto se musíme o danou problematiku zajímat již nyní a podporovat výzkum této oblasti pro zefektivnění procesu recyklace. V současné době se odhaduje množství ročního odpadu přibližně na 4200 tun solárních panelů v Evropě a z toho 180 tun odpadu v České republice. V roce 2020 se odhaduje desetinásobný nárůst solárních panelů pro recyklaci.

Cílem bakalářské práce bylo poskytnout celistvý obraz o teoretickém rozpracování dané problematiky. V úvodních sedmi kapitolách se zabývám obecnými aspekty dané problematiky, což představuje východisko pro navazující část v podobě analýzy vlivu likvidace fotovoltaických panelů na životní prostředí a následné vyhodnocení, zda je recyklace panelů ekologicky a energeticky přínosná.

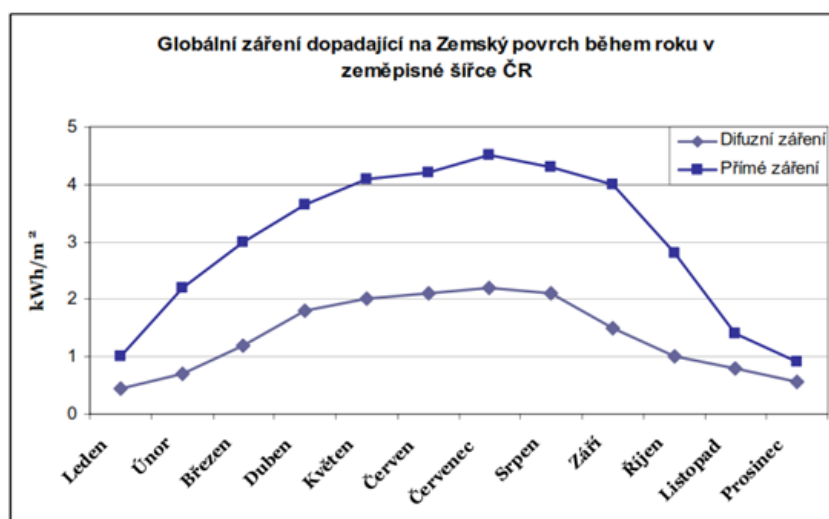
K naplnění cíle bakalářské práce jsem využil následující metody: studium odborné literatury a relevantních oficiálních dokumentů, analýzu materiálů poskytnutých firmami Deutsche Solar AG, Aquatest a 4Re. Při zpracování bakalářské práce jsem používal základní myšlenkové operace, jejichž základ představovalo aktivní čtení. Mezi užití myšlenkové operace patřila analýza získaných odborných poznatků, která mi umožnila vydělit podstatné znaky, které jsem dále mezi sebou komparoval a pomocí syntézy vytvářel učiněné závěry.

V rámci první kapitoly bakalářské práce tematizují základní pojmy spojené se slunečním zářením, mezi které patří sluneční energie, globální záření a faktory, které ho ovlivňují. Dále se zabývám fotoelektrickým jevem a principem solárního článku, na což navazuji popisem historického vývoje jednotlivých druhů solárních článků a jejich výhodami či nevýhodami. Zmiňuji také moderní trendy v oblasti výroby. Jako pátou kapitolu jsem zařadil výrobu panelů. V této kapitole rozebírám technologii výroby běžně komerčně dostupných panelů, mezi které patří panely z krystalického křemíku a tenkovrstvé. S kapitolou o výrobě velmi úzce souvisí dvě následující kapitoly, které jsou zaměřeny na materiálové složení a recyklační procesy běžně dostupných komerčních panelů. Přechod mezi teoretickou a analytickou částí tvoří kapitola popisující jednotlivé možné dopady na životní prostředí. Pro zpracování analýzy vlivu likvidace fotovoltaických panelů na životní prostředí jsem použil data získaná při komunikaci s firmami zajišťujícími recyklaci. Nejprve se v rámci práce věnuji dopadu samotné recyklace na životní prostředí. Následně rozebírám hlediska dopadu recyklace na životní prostředí přiblížená pomocí metody Top Twenty. V poslední části srovnávám přínos výroby článků z recyklovaných materiálů v porovnání s výrobou článků z primárních zdrojů.

1 Sluneční záření

Slunce je naše jediná hvězda sluneční soustavy, která představuje téměř 99,8 % její hmotnosti. Slunce je tvořeno převážně vodíkem. Probíhají v něm termonukleární reakce, při kterých se slučují dva atomy vodíku a vzniká atom helia. Tento proces uvolňuje obrovské množství energie. Množství dopadající energie ze Slunce na povrch planety Země je 10 - 12tisíckrát větší než současná spotřeba lidstva. Doba života Slunce se odhaduje na 4 miliardy let. Z těchto údajů vyplývá značný energetický potenciál pro fotovoltaiku zaměřenou právě na zpracování sluneční energie. Slunce představuje významný zdroj energie a řadí se mezi tzv. obnovitelné zdroje. Vzhledem k délce jeho předpokládané životnosti ho lze považovat za nevyčerpatelný zdroj energie.

Sluneční energie dopadá na Zemi v podobě elektromagnetického záření, které se nazývá globální. Globální záření se skládá z přímého a difuzního záření. Za přímé záření považujeme rovnoběžný paprsek vycházející ze Slunce. Naproti tomu difuzní záření vzniká v atmosféře jako důsledek rozptylu paprsků ze Slunce. Na rozptyl má vliv atmosféra, oblačnost a další klimatické podmínky. [1,2]

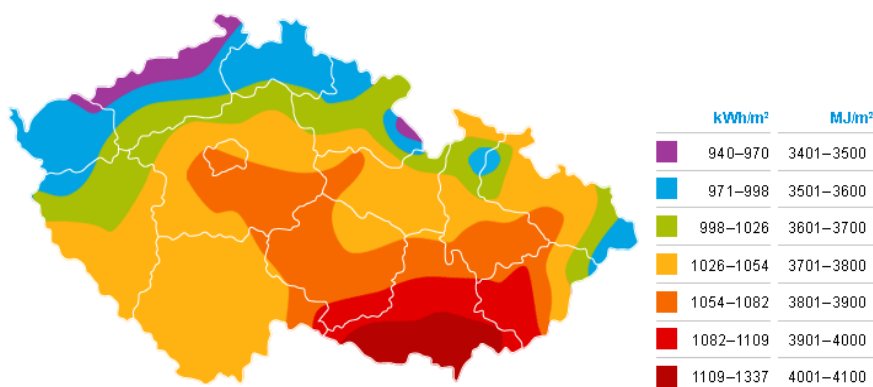


Obrázek 1 Dopadající záření na Zemský povrch (přímé a difuzní) [2]

Pro fotovoltaiku je důležitý nejen druh globálního záření, ale také intenzita dopadající energie. Dopadající energie na plochu se nazývá intenzita záření. Velikost intenzity je jedinečná pro každé místo na povrchu Země. Její velikost ovlivňuje velké množství faktorů, které my nemůžeme ovlivnit, ale musíme s nimi při výstavbě fotovoltaické elektrárny počítat. Největší vliv na velikost intenzity záření má atmosféra. V atmosféře dochází k rozptylu, odrazu a pohlcování dopadajícího záření. Čím je vrstva atmosféry větší, tím nižší je intenzita záření. Vrstva atmosféry totiž ovlivňuje dráhu paprsku a také úhel jeho dopadu. S rostoucím úhlem dopadu prudce klesá velikost dopadající energie. Negativní vliv má nejen šířka vrstvy, ale i znečištění atmosféry.

Většina vlivů má spojitost se zeměpisnou polohou. S polohou a výškou Slunce nad obzorem souvisí úhel dopadu záření, dráha paprsku, počet slunečných dnů, délka slunečního svitu, oblačnost. Další přirozené faktory představují střídání ročních období a také střídání dne a noci. Tyto cyklické změny ovlivňují atmosféru a tím i dopadající paprsky. Velmi důležitou hodnotou je délka slunečního svitu, která určuje množství energie dodané solárními systémům. Další jev, který se ve fotovoltaice zhodnocuje je tzv. globální oteplování, jelikož spolu s rostoucím počtem slunečních dní, roste i množství využitelné energie.

Důležitý faktor při výběru lokality pro fotovoltaické panely představuje množství energie v kWh dopadající na m² plochy, což se odvíjí od geografické polohy daného místa. Pro grafické znázornění tohoto faktoru se užívají tzv. sluneční mapy. Sluneční mapa pro ČR je uvedena v příloze [1.2]



Obrázek 2 Sluneční mapa pro ČR[1]

2 Fotoelektrický jev

Fotoelektrické panely jsou založeny na využití fotoelektrického jevu, při kterém dopadá světelné záření na panel, přičemž dochází k přeměně záření na elektrickou a tepelnou energii. V současnosti rozlišujeme vnější a vnitřní fotoelektrický jev.

K vnějšímu fotoelektrickému jevu dochází při pohlcení záření na povrchu ozářené látky. Při dopadu dojde okamžitě k emisi valenčních elektronů. Pro uskutečnění emise valenčních elektronů musí být splněna podmínka, která souvisí s energií záření a také materiálu ozářené látky. Energie záření souvisí s vlnovou délkou záření, které dopadá na plochu. Čím je hodnota vlnové délky větší, tím má záření větší energii. Minimální energie záření, při které dochází k vnějšímu fotoelektrickému jevu se nazývá výstupní práce. Tato energie je dána rovnicí pro fotoelektrický jev: [1,2]

$$E = h * f = \frac{h * c}{\lambda} , \text{ kde} \quad (1.)$$

E = energie záření,

h = Planckova konstanta,

f = frekvence,

c = rychlost světla ve vakuu,

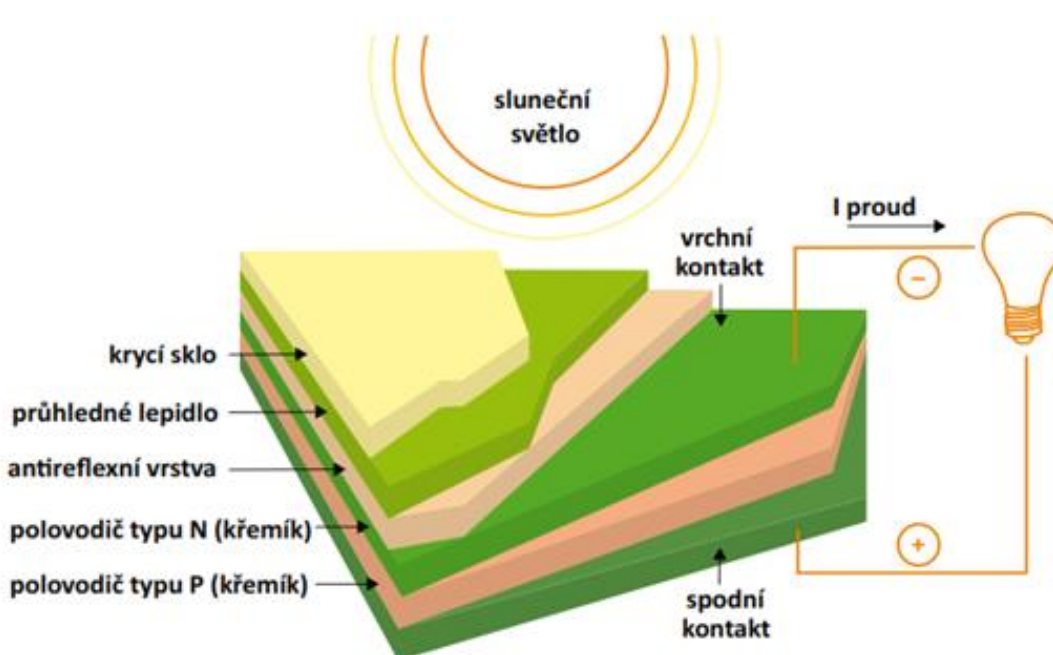
λ = vlnová délka

K vnitřnímu fotoelektrickému jevu dochází při absorpci záření uvnitř krystalické mřížky pevné látky. V krystalické mřížce jsou vázány elektrony, které při absorpci energie mohou excitovat, čímž se stanou volnými a vedou proud. U fotovoltaických panelů se využívá právě tento jev. Nejznámějším materiálem, ze kterého se panely vyrábí je křemíkový polovodič s přechodem PN. Používají se také jiné materiály, založené na podobném principu. Pro polovodičový křemík je minimální výstupní hodnota energie 1,12 eV, která odpovídá vlnové délce infračerveného záření přibližně 1100 nm. Pro fotovoltaiku jsou tedy významné fotony s dostatečnou energií. Po absorpci záření dochází ke generaci páru elektron-díra, což umožňuje vedení elektrického proudu. [1,2]

3 Princip solárního článku

Solární článek je tvořen destičkou obsahující P-N přechod a dalšími příměsemi pro zvýšení spektrální citlivosti. Křemík se dotuje pro vodivost typu N (As, Pb, Sb) a P (Ba, Al, In, Ga). Článek má obvykle rozměry 12x12 cm, což samozřejmě ovlivňuje i jeho odpor a účinnost, která souvisí s teplotou. Při vyšší teplotě dochází ke snížení napětí, což má za následek snížení výkonu. Solární článek vytvoří napětí okolo 0,5 V a proud 3 A.

Hlavní částí typického solárního článku je křemíková destička nebo jiný materiál s P-N přechodem, který využívá fotoelektrický jev ke generování napětí. V uzavřeném obvodu tedy teče proud a koná elektrickou práci. Na rozhraní P-N vzniká přechod P-N, který se vyznačuje elektrickým polem vysoké intenzity. Toto pole unáší uvolněné elektrony fotoelektrickým jevem z N vrstvy k vrstvě P+ a uzavřeným obvodem prochází proud, čímž se generuje napětí. [1,2,18]



Obrázek 3 Princip solárního článku[1]

¹ Zdroj magazin Asekol, zpětný odběr 2012/02, Dostupné z: <http://www.asekol.cz/tiskove-centrum/casopis-zpetny-odber/>

4 Historie a druhy fotovoltaických článků

Fotovoltaika jako vědní obor má za sebou více než 50 let vývoje. Během tohoto vývoje bylo navrženo a postaveno značné množství typů a konstrukcí panelů. Z hlediska historického vývoje lze rozdělit články do čtyř generací.

4.1 Generace solárních článků

Solárními články první generace jsou články vyrobené z destiček monokrystalického křemíku. Monokrystalické články si lze představit jako velkoplošnou diodu s p-n přechodem. Monokrystalické solární články mají mnoho výhod i nevýhod. Největší výhodou je jejich dlouhodobá časová stabilita výkonu a účinnosti. Mají poměrně dobrou účinnost a to v rozmezí od 14 - 21 % v reálných podmínkách. Jejich nevýhodou představuje cena a energetická náročnost výroby.

Články druhé generace vznikly díky snaze o minimalizaci množství potřebného křemíku k výrobě fotovoltaického článku a snížení ceny pro komerční použití. Mezi články druhé generace patří články z polykrystalického, mikrokrystalického, amorfního křemíku a také tenkovrstvé technologie (CdTe, CdS, CIS, CIGS, GaAs). Výhodou těchto článků je jednodušší výroba oproti první generaci, z čehož vyplývá i nižší ekonomická a energetická náročnost. Nevýhodou představuje jejich menší výkonová stabilita a rychlejší pokles účinnosti při porovnání s články z monokrystalického křemíku. U tenkovrstvých materiálů představuje problém jejich toxicita a nutnost recyklace.

Do třetí generace řadíme články, které separují náboje pomocí jiných metod než p-n přechod. Nejvíce nadějný zástupce této kategorie jsou články založené na organických polymerech. Nevýhodou je prozatimní nízká účinnost, dle predikce a postupu moderních technologií by se však měla i tato nevýhoda postupně eliminovat.

Solární články čtvrté generace se označují jako tzv. tandemové nebo kompozitní. Podstatou těchto článků je vytvoření více vrstev, které dohromady tvoří celek a dokáží pohltit širší část slunečního spektra. Výhodou je široký spektrální rozsah a vysoká účinnost, nevýhodou představuje jejich vysoká cena. [1,7]

4.2 Moderní trendy fotovoltaických článků

Nejvýznamnější surovinou pro výrobu fotovoltaického článku je křemík. Ať ve formě monokrystalického, polykrystalického či amorfního křemíku. O jeho výrobě pojednává 5. kapitola této práce. Další významnou skupinu reprezentují tenkovrstvé články, které představují v současné době zhruba 15 % celkové produkce. Mezi tyto druhy patří články vyráběné z CdTe, amorfního a mikrokystalického křemíku a z GaAs, CIS (CuInSe) a CIGS (CuInGaSe).

Články z diselenidu mědi a india (CuInSe₂) mají značně vysokou absorptivitu pro dopadající sluneční záření a z tohoto důvodu se vyrábějí velmi tenké. I přes tento fakt dosahuje jejich účinnost hodnoty až 21 %, což je vzhledem k jejich tloušťce vysoká účinnost. Nevýhodou představuje použití toxických materiálů např.: sulfidu kademnatého (CdS) nebo cenných kovů jako je indium, galium, germánium a diselenid (CIGS). [1,14,15]

Pro výrobu tenkovrstvých článků s obsahem kadmia a teluru se využívá sulfid kademnatý (CdS) a telurid kademnatý (CdTe). Historicky starší varianta byl PN přechod vytvořený sulfidem měďnatým (CuS) a sulfidem kademnatým (CdS). Výhodou těchto článků byla nízká hmotnost, nevýhodou však nižší účinnost a časová nestabilita. I přesto se používaly pro kosmické průmysl. Další variantou je vytvoření heterogenního přechodu mezi sulfidem kademnatým (CdS) a teluridem kademnatým (CdTe). Výhodou jsou nízké náklady na výrobu těchto článků, ale nevýhodou představuje jejich charakter. Kadmium patří mezi toxické prvky a telur se řadí mezi vzácné prvky, proto je nutná recyklace. V tabulce je uveden přehled účinností jednotlivých technologií. [1,14,15]

Tabulka 1 Přehled účinností jednotlivých technologií

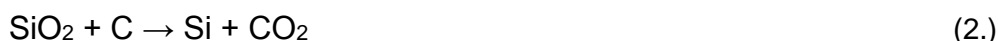
Technologie	Komerční účinnost	Laboratorní účinnost
Monokrystalický křemík	13 - 22	28
Polykrystalický křemík	11- 21	23,4
CIGS/CIS	7 – 15,7	23,3
Kadmium telur	14	19,7
Amorfní křemík	7 – 11,8	11,9 – 16,2

5 Výroba fotovoltaických panelů

Fotovoltaické panely jsou vyráběny různými technologiemi z rozdílných materiálů. Dominantní místo ve fotovoltaice zastává křemík. Z křemíku se vyrábí nejvíce komerčně používaných fotovoltaických panelů. Do této skupiny patří panely z monokrystalické, polykrystalické a amorfního křemíku. Proto se v následujících kapitolách budu zabývat výrobou křemíku a článků z něj vyrobených, poté se zaměřím na výrobu ostatních typů solárních článků z jiných materiálů.

5.1 Výroba panelů z krystalického křemíku křemíku

Výchozím materiálem pro výrobu křemíku je těžbou získaný křemen (oxid křemičitý). Oxid křemičitý se nejprve redukuje uhlíkem v elektrické obloukové peci a výsledným produktem je surový křemík hutní kvality. [4]



Křemík hutní kvality dosahuje čistoty až 99 %. Zbývající 1 % tvoří převážně nežádoucí příměsi jako je železo, hliník, uhlík, bor a další. Pro výrobu fotovoltaických článků je však nezbytná vyšší kvalita, proto následuje proces čistění s cílem dosáhnout vyšší čistoty. Podstatu čistění tvoří převod hutného křemíku na kapalně skupenství (rovnice 3.). Destilací (rovnice 4.) a následnou redukcí (rovnice 5.) na pevnou složku lze získat materiál o vyšší čistotě.

Jednotlivé děje popisují rovnice pod textem. Proces výroby čistého křemíku náročný na energii a také na ochranu životního prostředí a obsluhy. [4]



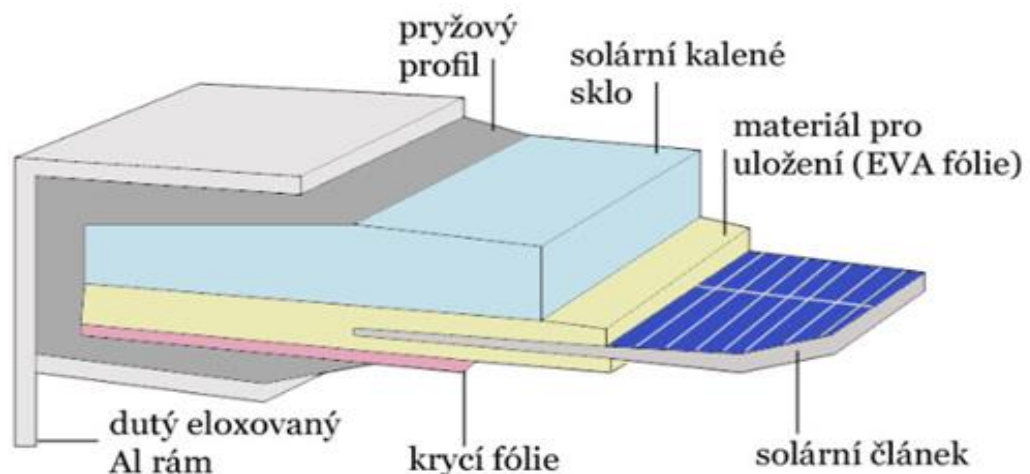
Základem fotovoltaického článku je křemíková destička, která vznikla řezáním z ingotu monokrystalického nebo polykrystalického na destičky o tloušťce cca 0,3 mm až 0,1 mm a její rozměry mohou dosahovat až 20x20 cm.

Monokrystalický ingot se vyrábí nejstarší metodou tzv. Czochralského metodou. Do taveniny o teplotě 1415 °C se pomalu vnoří zárodek monokrystalického křemíku, který se řízeným otáčivým pohybem kolem podélné osy z taveniny vytahuje. Czochralského metoda je velmi náročná na spotřebu energie a materiálu. Z důvodu snížení spotřeby energie a čistého křemíku se uplatnila spíše technologie pro výrobu polykrystalického ingotu, kde výchozí materiál tvoří polotovar čistého křemíku o vysoké čistotě. Roztavením polotovaru vznikne tavenina, která se nalije do forem. Poté následuje řízený proces chladnutí s jasně definovanou rychlostí chladnutí. [1,4]

Po řezání musí být zhmožděná povrchová vrstva destiček upravena odleptáním, po němž následuje chemické opracování. Součástí chemického opracování je nejen texturace a čištění povrchu, ale zejména vytvoření přechodu P-N difúzí fosforu ve vzdálenosti 0,2 – 0,5 μm od povrchu. Poté následuje odstranění fosforsilikátového skla, které vzniklo při vytváření P-N přechodu difúzí. Následně se pomocí chemické látky (TiO₂) vytvoří antireflexní vrstva. Po jejím zhotovení následuje příprava kontaktů sběrnice prováděné síťotiskem. Na přední stranu je nanesena sběrnice pastou obsahující stříbro a na zadní stranu článku se nanese kontakt hlinito-stříbrnou pastou. Poté následuje vysušení pasty a vypálení, při kterém dojde k vytvoření ohmických kontaktů. Posledním krokem základních úprav je odstranění povrchového zkratu na hranách článků a kontrolní měření elektrických parametrů. [1,4]

Skladání fotovoltaických článků v panel představuje v podstatě jednoduchý proces, ale je nutné dodržovat určité postupy. Panel se skládá z navzájem propojených fotovoltaických článků, které jsou dále zapouzdřené a orámované. Přední strana panelu se skládá z vysoce kvalitního a speciálního temperovaného (kaleného) skla. Využívanou vlastností tohoto skla je jeho značná odolnost proti mechanickému poškození (např. kroupy). Poté se na sklo položí plastová folie EVA (etylvinylacetát) a na ní se kladou již propojené fotovoltaické články. Jednotlivé články se propojují pomocí tenkého kovového pásku, vždy přední kontakt jednoho článku se zadním plošným kontaktem dalšího. Přes takto propojené články se opět pokládá EVA folie. Zadní strana článku je opatřena zpravidla ochranným laminátovým materiálem zvaným tedlar. Tedlar je směs

polyvinylidenfluoridu (PVF) a polyethyléntereftalátu (PET). Následuje vyčerpání vzduchu mezi funkčními vrstvami a následné tepelné zpracování. Při tepelném zpracování se panel zahřeje nad teplotu tání EVA-folie. EVA folie se poté rozteče a vyplní všechny prázdné prostory mezi předním sklem a zadním laminátovým materiálem (tedlarem). Na závěr se panel zarámuje hliníkovým rámem a zatmelí silikonovým tmelem. Takto zhotovený panel je odolný vůči mechanickému poškození a přírodním vlivům klimatu. [1,4,18]



Obrázek 4 Struktura fotovoltaického panelu[18]

5.2 Výroba fotovoltaických tenkovrstvých panelů

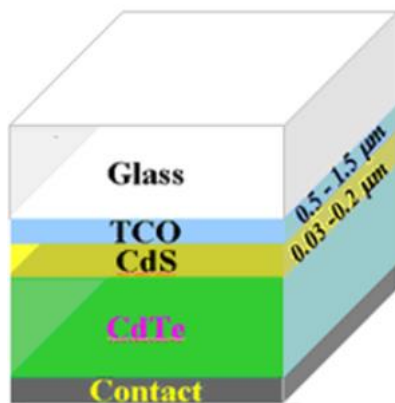
Pro výrobu tenkovrstvého článku se využívá často jako výchozí látka křemík, ale také může být založen na jiné bázi např. CuInSe , CuInGeSe nebo CdTe , případně jiných materiálech. Existuje několik různých technologií. Mezi nejvýznamnější patří napařování, naprašování nebo chemická depozice z plynné fáze tzv. CVD (Chemical vapour deposition). Technologií naprašováním lze vytvořit vrstvy SnO_2 , ITO, ZnO .

Výroba amorfního a mikrokrytalického článku patří do skupiny nízkonákladových technologií. Vrstvy amorfního či mikrokrytalického křemíku lze vytvořit chemickou depozicí z plynné fáze založené na dekompozici silanu na křemík a vodík. Pokud přidáme diboran (B_2H_6) naroste vrstva dotovaná bórem (P^+) a naopak při přidání fosfinu (PH_3), naroste vrstva dotovaná fosforem. Teplota podložky a koncentrace

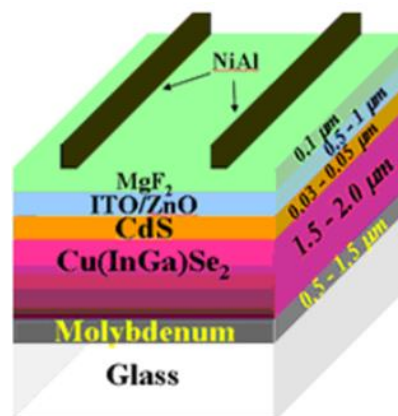
silanu ve směsi s vodíkem ovlivňuje rychlost růstu a strukturu vrstvy. Nižší koncentrace silanu vede k růstu mikrokrytalického článku a vysoká koncentrace k výrobě amorfního křemíku. [1,18]

Pro výrobu CIS, CIGS článků se používá nízkonákladová technologie naprašování a chemické depozice. Nejdříve je na substrát (obvykle sklo) naprášena vrstva molybdenu. Následuje vytvoření vrstev z mědi (Cu), india (In), gallia (Ga) a selenu (Se) pomocí naprašovací technologie. Navazuje selenizace ve vodíkové atmosféře při teplotách vyšších než 400 °C, poté je vytvořena další vrstva sulfidu kademnatého (CdS) pomocí chemické depozice. Následující funkční vrstva vznikne naprášením oxidu zinečnatého (ZnO), který je dotovaný hliníkem. V posledním kroku se vytvoří elektrické kontakty z niklu a stříbra. [1,18]

Pro výrobu tenkovrstvých článků s telluridem kademnatým se používá technologie napařování nebo naprašování. Na vhodný substrát (většinou sklo) jsou napařovány postupně vrstvy: transparentního vodivého oxidu (TCO), sulfidu a telluridu kademnatého (CdS a CdTe). Nakonec je vytvořen zadní kovový kontakt. Jednotlivé vrstvy tenkovrstvého panelu CIGS a CdTe jsou na obrázku pod textem. [1,18]



Obrázek 5 Struktura článku CdTE [18]

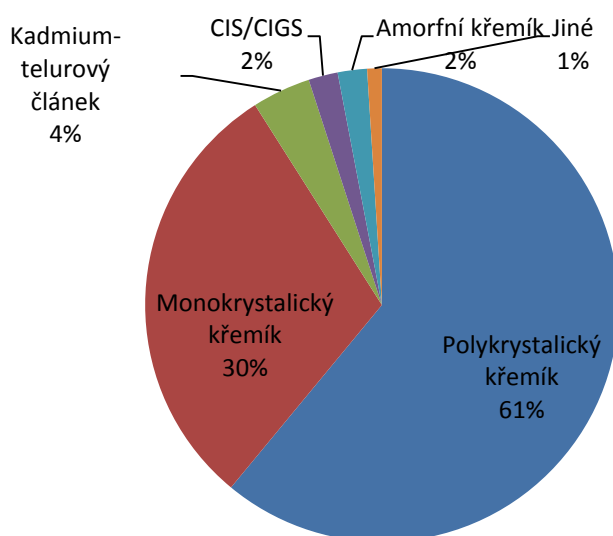


Obrázek 6 Struktura článku CIGS [18]

6 Materiálová rešerše běžně dostupných komečných fotovoltaických panelů

Mezi běžně komerčně dostupné panely patří panely vyrobené z monokrystalického a polykrystalického křemíku. Dále jsou na trhu dostupné panely vytvořené tenkovrstvou technologií (amorfni, mikrokrystalické, CISG a CdTe). V minulých kapitolách byl podrobně rozebrán princip, výchozí materiály pro výrobu, výroba a konstrukce těchto fotovoltaických panelů. Pro návrh a realizaci technologie recyklování jsou nezbytné znalosti o struktuře a zejména o materiálovém složení fotovoltaického panelu. V následujících odstavcích analyzuji zastoupení jednotlivých materiálů ve fotovoltaickém panelu pro proces recyklace. Dominantní zastoupení s 91 % objemu všech solárních panelů zaujímají panely z monokrystalického a polykrystalického křemíku. Jejich výroba, konstrukce a procentuální zastoupení je velmi podobné. Zastoupení jednotlivých technologií je patrné na přiloženém grafu. Mezi zbylých 9 % patří tenkovrstvé panely. Pro přehlednost jsem zpracoval procentuální zastoupení materiálů jednotlivých technologií do tabulek a graficky jsem uvedl procentuální zastoupení vzácných a toxických látek.

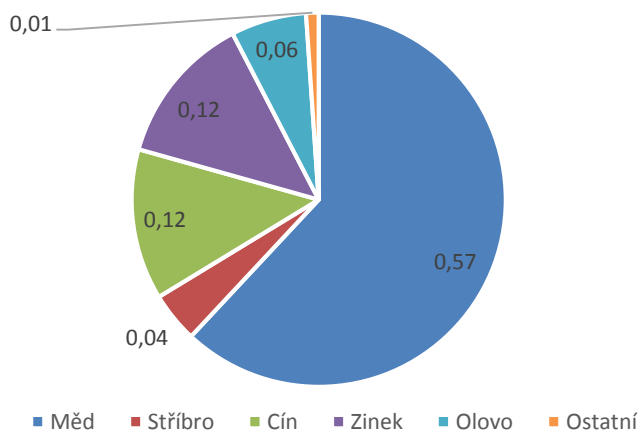
Graf procentuálního zastoupení jednotlivých technologií



Tabulka 2 Procentuální zastoupení polykrystalického a monokrystalického křemíku [12]

Materiál	Sklo	Hliník	EVA	TEDLAR	Adheziva	Měd	Stříbro	Cín	Zinek	Křemík	Olovo	ostatní
Zastoupení v %	74	10,3	6,55	3,6	1,16	0,57	0,01	0,12	0,12	3,35	0,06	0,05

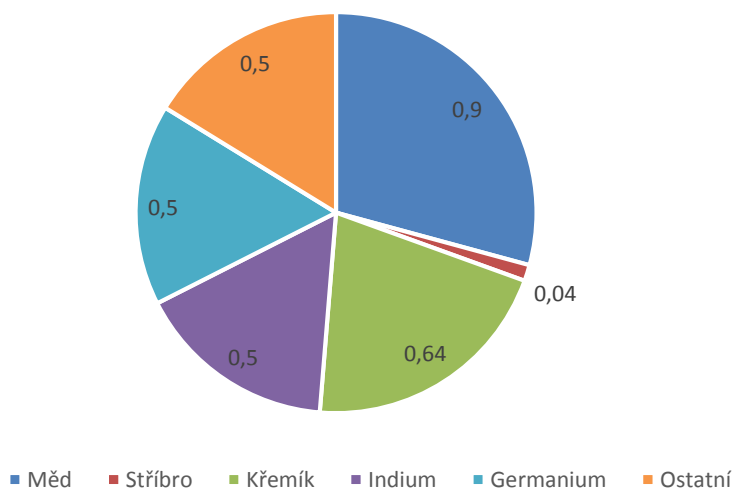
Graf procentuálního zastoupení vzácných a toxických látek v krystalickém panelu



Tabulka 3 Procentuální zastoupení amorfního a mikrokrystalického křemíku[12]

Materiál	Sklo	Hliník	Polyoly	Měd	Stříbro	Křemík	Indium	Germanium	Ostatní
Zastoupení v %	86	0,0035	12	0,9	0,04	0,64	0,5	0,5	0,5

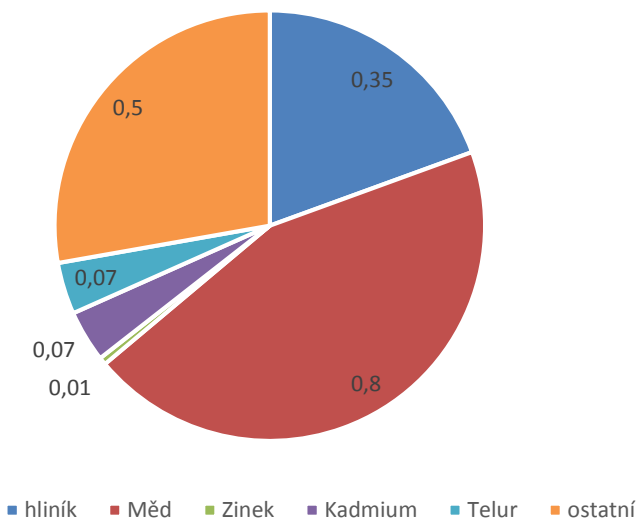
Graf procentuálního zastoupení vzácných a toxických látek amorfního panelu:



Tabulka 4 procentuálního zastoupení tenkovrstvé technologie CdTe[12]

Materiál	Sklo	Hliník	EVA	Měd	Zinek	Kadmium	Telur	Ostatní
Zastoupení v %	95	0,35	3,5	0,8	0,01	0,07	0,07	0,5

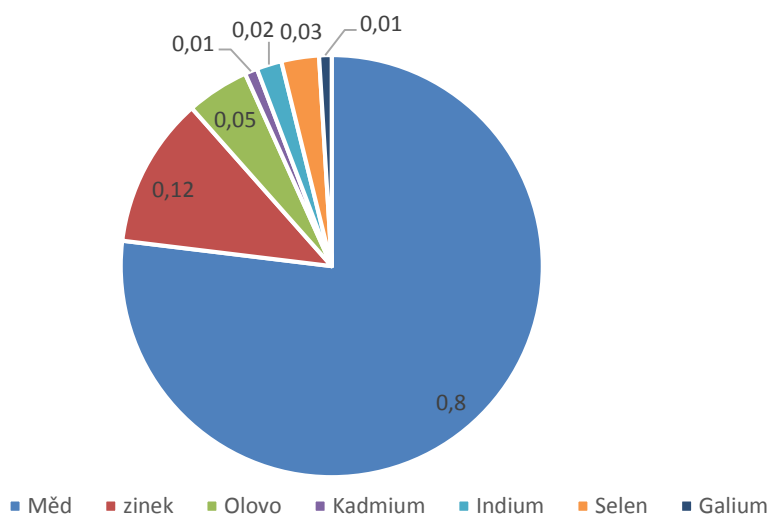
Graf procentuálního zastoupení vzácných a toxických látek v panelu CdTe:



Tabulka 5 procentuálního zastoupení tenkovrstvé technologie CIGS[12]

Materiál	Sklo	Hliník	EVA	Měd	Zinek	Olovo	Kadmium	Indium	Selen	Galium	Ostatní
Zastoupení v %	84	12	3	0,8	0,12	0,05	0,0005	0,02	0,03	0,01	0,5

Graf procentuálního zastoupení vzácných a toxických látek v panelu CIGS:



V následující tabulce je znázorněn přehled materiálového složení jednotlivých technologií, které jsou obsaženy v 1 m² vyrobeného panelu.

Tabulka 6 Materiální složení plochy 1 m² jednotlivých technologií v g[11]

CIS(CIGS)	CdTe	Amorfní křemík	Krystalický křemík
Sklo(13 380)	Sklo(13380)	Sklo(6690)	Sklo(6690)
In(7,7)	Cd(13,1)	Fe(600)	Si(698,7)
Mo(4,3)	Te(10,9)	Si(4,6)	Al(270)
Se(2,7)	Sn(1)	Ge(1,9)	Ag(0,2)
Ga(2,4)	Zn(0,8)	Zn(0,5)	Mg(0,1)
Cu(2,2)	Cu(0,7)	In(0,4)	
Sn(0,4)		Al(0,2)	
Cd(0,2)			
Zn,Al(<0,1)			

Z uvedených tabulek a grafů vyplývá značná spotřeba křemíku, skla, hliníku a plastů. Významnou spotřebovanou skupinu tvoří prvky vzácné a toxické, kam se řadí stříbro, selen, indium, germanium, telur, zinek a toxické kadmium. Pro průmysl je nezbytně nutné tyto vzácné a toxické kovy likvidovat nejlépe recyklací, protože mají většinou vysokou ekonomickou hodnotu a malé zastoupení na planetě, přičemž proces recyklace není tak energeticky náročný jako jejich výroba. Dalším důvodem je jejich toxicita. Této problematice se věnuji v následující kapitole této práce.

7 Recyklace

7.1 Zákonná likvidace fotovoltaických panelů

Likvidace solárních panelů je nejen nezbytná z důvodu obsahu vzácných a toxických prvků, ale také proto, že je ze zákona povinná.

„Směrnice evropského parlamentu a rady 2012/19/EC o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (OEEZ) vstoupila v platnost 13. srpna 2012. Členské státy mají povinnost směrnici zapracovat do národní legislativy do 14. února 2014. Jde o přepracované znění směrnice 2002/96/ES o odpadních elektrických a elektronických zařízeních. Dále dle směrnice byly solární panely zahrnuty do 4. skupiny EEZ Spotřební elektronika a fotovoltaické panely.

Dle zákona č. 165/2001 Sb. o odpadech a novelizací pomocí zákona č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie mají povinnost zajistit financování, předání ke zpracování, využití a odstranění elektroodpadu ze solárních panelů, včetně plnění těchto povinností prostřednictvím provozovatele kolektivního systému dle § 37h odst. 1 písm. c).

Povinnosti spojené s recyklací solárních panelů uvedených na trh před 1. 1. 2013 jsou přeneseny na všechny provozovatele FVE, kteří musí:

- 1) do 31. 6. 2013 uzavřít smlouvu s některým z kolektivních systémů, které mají za 15 až 20 let zajistit ekologickou likvidaci panelů.*
- 2) v období od 1. 1. 2014 do 31. 12. 2018, tj. během pěti let uhradit v pravidelných splátkách do zvoleného kolektivního systému příspěvek, který je stanoven vyhláškou MŽP 352/2005 Sb. na 8,50 Kč na kg panelů.“²*

² Zdroj online web firmy asekol solar.Dostupné z WWW:
<http://www.asekolsolar.cz/legislativa/smernice/>

7.2 Proces recyklace

V současné době se recyklují pouze panely poškozené mechanicky, tedy přírodními vlivy, špatnou manipulací při montáži nebo poškozením panelu při výrobě (defekty). Od roku 2020 lze předpokládat nárůst počtu panelů určených pro recyklaci. (viz. Obrázek)



Obrázek 7 Vývoj recyklace fotovoltaických článků[19]

Proces recyklace začíná již při demontáži v daném místě montáže. Pokud se jedná o polní výstavbu, pak je součástí i rekultivace ploch, kde byla montáž uskutečněna. Poté jsou panely přemístěny na sběrné místo, kde bude provedena konečná likvidace spojená s recyklací materiálu. Likvidace fotovoltaického panelu se uskutečňuje ve specializované recyklační lince. Typ a provedení linky záleží zejména na druhu panelů určených k recyklaci. V současnosti existují hlavní dvě metody recyklace a jejich modifikace dle typu panelu. První metoda se nazývá termicko-chemická recyklace a druhou metodou je tzv. mechanicko-chemická recyklace. Pro obě metody je nezbytné nejdříve odstranit hliníkový rám, poté následuje další zpracování jednou z uvedených metod.

7.3 Termicko-chemická metoda

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

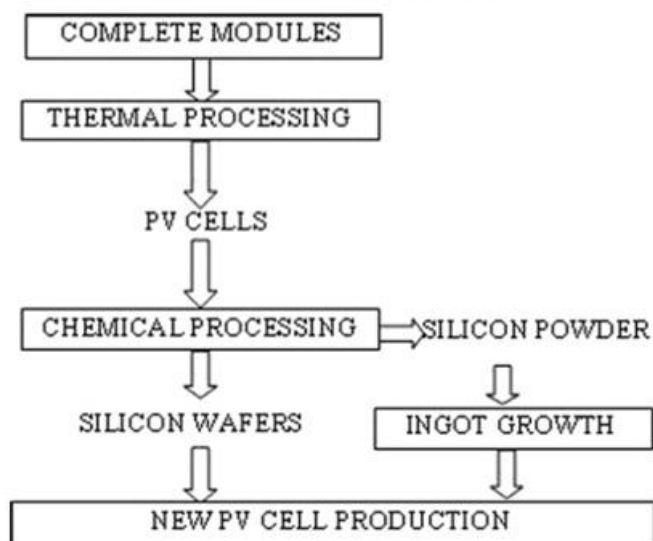
Pro odstranění EVA folie existuje nejen termická metoda, které se věnují níže, ale i metoda chemická, při níž se EVA folie odstraňuje rozpouštědlem. Z důvodů

ekonomických (cena rozpouštědla), ekologických (zpracování použitého rozpouštědla) a také kvůli nutnosti dlouhého časového intervalu použití rozpouštědla při rozkladu EVA folie se tato metoda dosahující pouze nízké účinnosti nepoužívá. [19]

Fotovoltaický panel je opouzdřen folií EVA (kopolymer etylenvinylacetát). Pro možné zpracování je nutné tento obal odstranit a umožnit tak jednotlivé oddělení funkčních vrstev, ze kterých se fotovoltaický panel skládá. Podstatou této metody je odstranění dané vrstvy termicky.

Fotovoltaický panel se vloží do speciální pece, kde se nastaví teplota nad hodnotu 500 °C v SiO₂ atmosféře. Po překročení této teploty se veškeré plastové části fotovoltaického panelu odpaří, což umožní oddělení jednotlivých částí fotovoltaického panelu. Odpařené plasty se po tomto procesu nachází v plynném skupenství a jsou přesunuty do komory pro řízené spalování, v níž dochází k dokonalejšímu spalování, které má méně nepříznivý ekologický vliv na prostředí, v porovnání s nedokonalým spalováním v první komoře. Výhodou termického odstranění obalu panelu je jednoduchost, a proto je termická cesta výhodná pro komerční využití při recyklaci fotovoltaického panelu. Nevýhodou představuje vysoká energetická náročnost a vysoký podíl manuální práce při následném ručním oddělování jednotlivých uvolněných částí. Danou metodou získáme celé nepoškozené články a po následném zpracování je lze použít při výrobě nových článků. [6,7,19]

Po použití termické metody a ručního oddělení materiálu je nutné solární články očistit. Pro čištění se používá chemická metoda.



Obrázek 8 Schéma procesu recyklace termickou metodou[7]

Pro další použití solárního článku se musí chemicky odstranit nežádoucí materiály v přesném pořadí: přední kontakt, zadní kontakt, antireflexní vrstva a p-n přechod. Pro odstranění se nejdříve využívá lázeň hydroxidu draselného a poté další chemikálie, u kterých je stěžejní jejich druh, koncentrace, provozní teplota a délka leptání. Tento postup byl optimalizován pro vysokou rychlost a účinnost za použití malého množství toxických látek a rozpouštědel. [6,7,19]

Po odstranění nežádoucích materiálů dochází ke kontrole kvality křemíkové desky. Nakonec se pomocí laserové techniky vytvoří požadovaná ostrost hran desky. Většina křemíkových desek je vhodná jako podklad pro výrobu nových článků. Křemíkové desky nesplňující přísné podmínky jsou použity pro výrobu jiných průmyslových produktů či jako výchozí surovina pro výrobu nových krystalů. Mezi tyto výrobky patří například silikonové gely či jiné látky. [6,7,19]

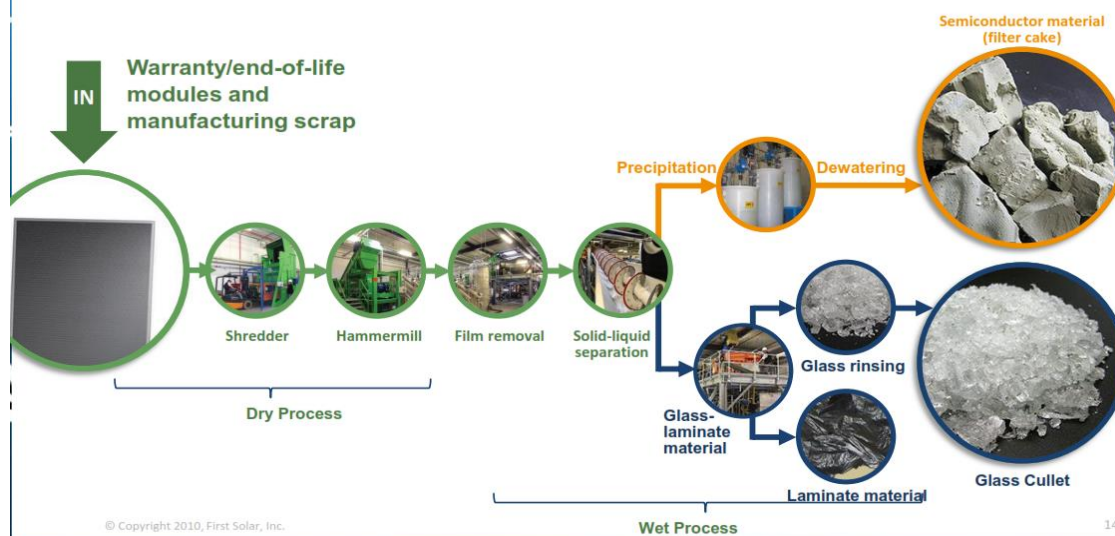
Termicko-chemická metoda se v současně využívá, protože reprezentuje kompromis z energetického, ekonomického a ekologického hlediska.

7.4 Mechanicko-chemická metoda

Zatímco předchozí metoda reprezentovala optimální variantu pro recyklaci komerčně dostupných křemíkových panelů, mechanicko-chemická metoda je výhodná pro tenké a křehké fotovoltaické panely (tenkovrstvé panely a krystalické panely s nízkou tloušťkou či poškozené). V současnosti je trend snižovat množství materiálu a tím i tloušťku článku pro jejich výrobu. Čím je tloušťka článku nižší, tím je článek křehčí a citlivější na manipulaci s ním. Z tohoto důvodu by do roku 2020 neměl být problém recyklovat krystalické panely pomocí termické metody s vyšším podílem ruční práce. Pro likvidaci tenkovrstvých článků (CdTe, atd.) nelze použít termickou metodu, a proto v následujících odstavcích popisují postup jejich likvidace.

Podstatou mechanicko-chemické metody je rozdrcení panelů na malé kousky a následně jejich separace. Nejdříve je nutné oddělit hliníkový rám a přívodní kabely fotovoltaického panelu. Poté jsou panely rozdrceny několika stupni a následně tříděny dle různé velikosti částic. Pro technologii drcení se používají drtiče (bubnové, kotoučové, čelistové) a mlýny. Třídění probíhá několika metodami a jejich kombinací pro separaci jednotlivých částí. Mezi metody třídění patří např. vibrační třídíče. Vibrační třídíče se používají k separaci skla. Sklo se vibrační rozpadává na rozdíl od ostatních materiálů. Mezi separační technologie patří elektrodynamická separace, magnetická separace, fluidní a mokré splavy. V elektrodynamickém separátoru se oddělují barevné vzácné kovy od ostatního materiálu. V magnetickém separátoru se separují materiály ze železa. Ve fluidních a mokřích splavech se využívá různé velikosti měrné hmotnosti tříděného materiálu. V suchém pneumatickém fluidním separátoru se oddělují částice o několika mm a v mokřím gravitačním splavu se oddělují jemnozrné materiály. Následně se získávají těžké, vzácné a toxické prvky pomocí elektrolýzy nebo chemicky či pyrometalurgicky. Ochranné plasty se pravděpodobně termicky spálí. Výsledkem jsou tedy drcené suroviny o různé velikosti pro další průmyslové využití. [10,11,19]

Design of First Solar's Module Recycling Technology



Obrázek 9 Schématický postup recyklace tenkovrstvých panelů firmy First Solar ³

Obrázky demonstrující velikosti částic jako výstupní materiál mechanicko-chemické metody a jejich procentuální zastoupení v drcených materiálech po jejich likvidaci pro krystalické a tenkovrstvé panely CdTe jsou uvedeny v přílohách č. 1 - 4.

7.5 Recyklované materiály a jejich výtěžnost

Procesem recyklace krystalických a tenkovrstvých solárních panelů získáme mnoho materiálu pro následné zpracování a opětovné použití při výrobě solárních panelů nebo jiných technologických výrobků. Mezi tyto materiály patří hliník, sklo, plasty, křemík, vzácné kovy mezi něž patří měď, indium, galium, germanium, stříbro, telur a také toxické kovy jako je kadmium.

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

³ Zdroj obrázku web: www.FirstSolar.com

možné vytěžit při recyklaci. Pro hliník tato hodnota dosahuje téměř 100 % a energetická náročnost takto získaného hliníku ušetří až 70 % energie nutné pro výrobu nového hliníku. Dle mého názoru jde o velmi vysoká čísla a značné snížení spotřeby energie. Dalším ekonomicky výhodným materiálem je křemík. Při termické metodě získáváme celé články, které následně lze po úpravě využít pro výrobu nových článků. Výtěžnost při této metodě dosahuje 85 - 90 % a čistota křemíku je 99,9999%. U mechanicko-chemické metody je výtěžnost křemíku od 75 - 85 % a jeho čistota dosahuje 99,995 %. [10,19]

Další skupinu tvoří vodivé materiály, kam spadá měď a stříbro. Výtěžnost mědi z vodivých kabelů dosahuje hodnot od 78 % do 100 % a technologie zpracování je značně propracovaná. Výtěžnost stříbra se v současné době pohybuje od 40 % do 65 %. Mezi nejlépe recyklovatelné vzácné kovy patří telur. Výtěžnost teluru je v rozmezí od 80 - 95 % s čistotou okolo 99,7 %. Naopak získávání ostatních vzácných kovů jako je indium, galium a germanium dosahuje hodnoty v současnosti od 20 - 40 %, ale probíhá intenzivní výzkum zaměřený na zvýšení této účinnosti. [12]

Tabulka 7 Výtěžnost materiálu při recyklaci[12]

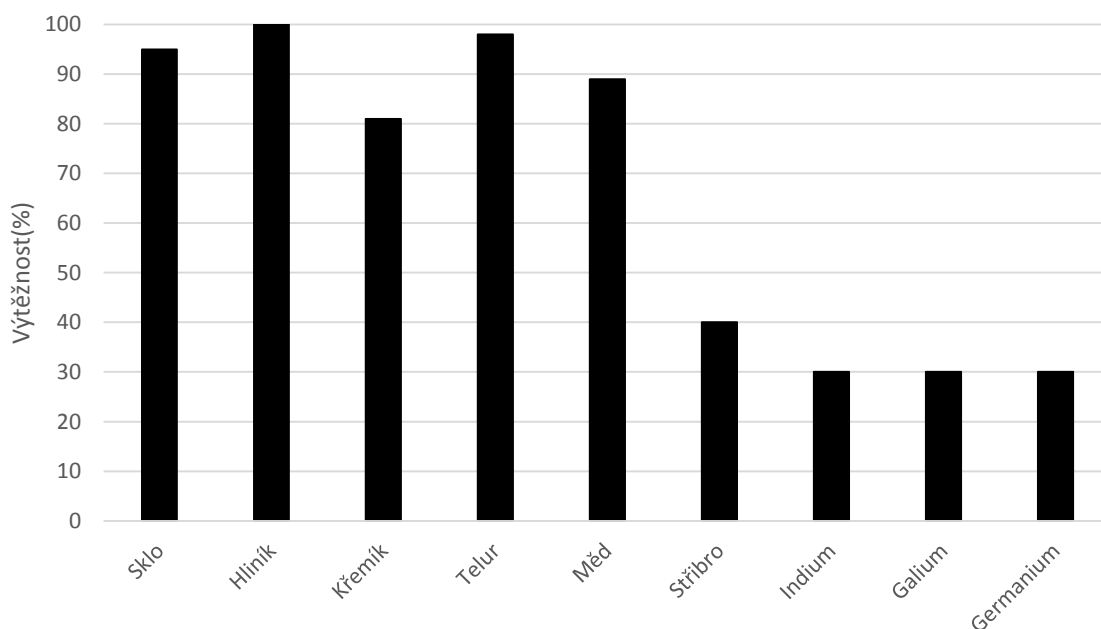
Vytěžený materiál	Výtěžnost	Čistota
Sklo	95 %	99,99975 %
Hliník	100 %	-
Křemík	75-90 %	99,995-99,999%
Telur	80-95 %	99,7 %
Měď	78-100 %	-
Stříbro	30-50 %	-
Indium	20-50 %	-
Galium	20-50 %	-
Germanium	20-50 %	-

Jak již bylo vysvětleno výsledkem mechanicko-chemické metody je drcený materiál. V tomto drceném materiálu jsou obsaženy všechny materiálové součásti fotovoltaického panelu. Nejdůležitějšími materiály jsou křemík, uhlík, vzácné a toxické kovy. Právě tyto prvky jsou obsaženy ve frakcích s nejmenším poloměrem d získaným několikanásobným drcením. Zastoupení jednotlivých kovů a látek je znázorněno v přílohách 1.-4. a v následující tabulce lze též vyčíst množství odpadu z recyklovaných materiálů při současné účinnosti recyklace.

Tabulka 8 Přehled množství odpadů a recyklovaných materiálů (do roku 2050) [12]

Materiál	Odpad(tuny)	Výtěžnost (%)	Získaný materiál(tuny)
Sklo	6 430 255	95	6 108 742
Hliník	617 658	100	617 658
Křemík	162 344	81	131 490
Telur	877	98	850
Měď	56 623	89	50 403
Stříbro	242	40	97
Indium	5132	30	1540
Galium	95	30	29
Germanium	4942	30	1483

Graf výtěžnosti nejvýznamnějších získaných materiálů:



8 Životní prostředí

Likvidace odpadu je možné provést čtyřmi upůsoby. Mezi možnosti patří skládkování, spalování, recyklace, kompostace. Jedinou možností zpracování solárního odpadu je tedy forma recyklace doplněná spalováním a uskladňováním nerecyklovatelných materiálů (např. plast). Fotovoltaické panely a jejich dopad na životní prostředí představuje v současné době velice diskutované téma, o čemž svědčí i množství probíhajících výzkumů v dané oblasti. Nutno zdůraznit, že provoz fotovoltaických panelů téměř neovlivňuje životní prostředí, jelikož neprodukuje emise. Jediným negativním vlivem při provozu je ovlivnění krajiny v případě fotovoltaické elektrárny postavené v podobě polní instalace. Naopak největší dopad na životní prostředí má samozřejmě výroba, transport a recyklace fotovoltaických panelů. Dopady na životní prostředí z hlediska výroby a transportu nejlépe mapuje metoda LCA. V současnosti je o procesu recyklace zvěřejněno nedostačující množství informací potřebných pro komplexní analýzu procesu recyklace metodou LCA. Příčinou je, že v současné době se recykluje malé množství fotovoltaických panelů převážně vadných či poškozených produktů. Z tohoto důvodu zpracuji danou oblast upravenou metodou „top twenty“ s využitím údajů od firem vykonávajících tuto činnost a také podporujících výzkum ve spolupráci s kolektivními systémy pro likvidaci fotovoltaických panelů.

„ Dle zákona č. 100/2001 Sb., o životním prostředí, který je k nahlédnutí zařazen v příloze č. 4 dané práce jsou dopady na životní prostředí následující:

- 1. Vlivy na obyvatelstvo, včetně sociálně ekonomických vlivů*
- 2. Vlivy na ovzduší a klima*
- 3. Vlivy na hlukovou situaci a event. další fyzikální a biologické charakteristiky*
- 4. Vlivy na povrchové a podzemní vody*
- 5. Vlivy na půdu*
- 6. Vlivy na horninové prostředí a přírodní zdroje*
- 7. Vlivy na faunu, flóru a ekosystémy*
- 8. Vlivy na krajinu, hmotný majetek a kulturní památky“ [4]*

⁴Zdroj online. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-100>

8.1 Popis jednotlivých dopadů na životní prostředí

Před použitím metod LCA a zejména TOP TWENTY(TT) nejdříve popíší jednotlivé vlivy a dopady na životní prostředí a obyvatelstvo důležité pro následující analýzu. Dopady na životní prostředí lze rozdělit na dopady globální, regionální a lokální.

Mezi lokální dopady lze zařadit vliv na člověka, živočichy, rostliny, ekosystémy, na materiálové a vodní zdroje. Jak již bylo řečeno, fotovoltaické panely obsahují mnoho látek (i toxické), které mohou mít vliv na živé organismy a ekosystém. Tyto látky se uvolňují v podobě emisí při likvidaci. Mohou tedy proniknout do prostředí a způsobovat nemoci člověka, fauny a flóry. Mezi nejvýznamnější toxické látky patří arsen, kadmium, chlor, germanium a olovo a další. Tyto látky mohou způsobovat anémii, rakovinu, poškozovat centrální nervovou soustavu, selhání ledvin a jater i dýchací potíže. [8,9,14]

Další lokální dopady souvisí s výstavbou a provozem velkokapacitní recyklační linky. Linka zabere velkou plochu, čímž se značně změní celkový krajinný ráz a ekosystém. Dalšími dopady na životní prostředí jsou vibrace, zápach a hluk. Je známo, že nadměrná úroveň hluku poškozují lidské zdraví, ale také zdraví ostatních živočichů.

Mezi regionální dopady patří acidifikace a eutrofizace životního prostředí, ať již se jedná o půdu nebo o vodní systém. Oba tyto jevy probíhají v přírodě přirozeně v množství potřebném pro život, ale lidská činnost tuto rovnováhu narušuje.

Acidifikace je v podstatě proces okyselení životního prostředí. K tomuto procesu dochází při zvýšeném množství vodíkových iontů v atmosféře. Výsledkem jsou v ČR kyselé deště. Vodíkové ionty H^+ vznikají při rozkladu látek v atmosféře z důvodu spalování fosilních paliv. Při spalování fosilních paliv se uvolňuje oxid siřičitý, oxidy dusíku, čpavek, sulfan a kyselina chlorovodíková a jiné látky. Důsledkem těchto reakcí je snížení pH a tím překyselení půdy či vody, což má za následek nepříznivé životní podmínky pro živočichy i rostliny a dochází k jejich vymírání z důvodů kyselosti prostředí. [8,9,14]

Zatímco acidifikace souvisí s kyselostí, tak eutrofizace se zásaditostí životního prostředí. Eutrofizace je tedy proces obohacování životního prostředí o živiny, což způsobuje zásaditost prostředí a opět nepříznivé životní podmínky. Příčinou eutrofizace je dusík (N), fosfor (P) a jejich sloučeniny (amoniak, oxid dusíku). V přírodě z těchto látek vznikají anionty fosforu, které způsobují eutrofizaci. [8,9,14]

Globální problémy lze považovat za nejdůležitější z důvodu jejich celosvětového dopadu. Mezi globální problémy řadíme globální oteplování (tzv. skleníkový efekt), úbytek ozonu, úbytek fosilních a minerálních zdrojů.

V současné době představuje globální oteplování jedno z nejdiskutovanějších témat v rámci životního prostředí. Lidská civilizace svou průmyslovou činností značně urychluje změnu klimatu, kterou registrujeme prostřednictvím zvyšující se teploty vzduchu a povrchových vod. Příčinou těchto změn je podle většiny vědců zvyšující se koncentrace tzv. skleníkových plynů. Dominantním zástupcem této skupiny je oxid uhličitý, který se uvolňuje emisemi vznikajícími z činnosti lidské civilizace (spalování fosilních paliv, odlesňování, atd.). Dále se mezi skleníkové plyny řadí fluorové emise, rajsý plyn, methan, ozón a zejména vodní pára. Největší producenti skleníkových plynů jsou elektrárny spalující fosilní paliva, doprava, průmysl, domácnosti a další. Globální oteplování je tedy důsledkem skleníkového efektu. Podstatou skleníkového efektu je propouštění slunečního záření na povrch ohřívání planety a následná absorpce tepelného záření vrstvou atmosféry tvořenou skleníkovými plyny, namísto propouštění zpět do vesmíru. [8,9,14]

Velmi známým problémem je poškozování ozónové vrstvy. Ozón (O_3), podle kterého se daná vrstva nazývá, představuje jeden z nejdůležitějších skleníkových plynů. Působením ozónové vrstvy dochází k ochraně zemského povrchu před ultrafialovým zářením. Ozón je velmi reaktivní a zároveň nebezpečný plyn. Působením freonů tato potřebná ozonová vrstva defeneruje a mizí. [8,9,14]

9 Vliv likvidace na životní prostředí

9.1 Zpracování metodou TOP TWENTY (TT)

Podstatou obecné metody TOP TWENTY (TT) je analýza 20 nejdůležitějších vstupů a výstupů v rámci nějakého procesu podle různých hledisek. U metody top twenty se používají pro zjednodušení pouze ta nejvýznamnější. Tuto komparační metodu jsem použil, protože v současnosti není dostatek veřejně dostupných informací o procesu recyklace při jeho uskutečnění. Použitá metoda TOP TWENTY je upravená pro komparaci jednotlivých dopadů recyklace fotovoltaických panelů na životní prostředí z různých hledisek. Pro analýzu dopadů a jejich komparaci jsem zpracoval recyklaci pomocí termicko-chemické metody, protože ta zatěžuje životní prostředí více než metoda mechanická, kde převažuje drcení. Dopady jsem určil z analýzy procesu recyklace, která obsahuje vstupy a výstupy tohoto procesu. Za nejvýznamnější vstupy jsem považoval solární panely, chemické látky pro zpracování, energii, stroje, obsluhu a dopravu. Do výstupu jsem zařadil získané suroviny recyklací, nerecyklovatelné odpady pro likvidaci, chemické látky určené k likvidaci, teplo uvolněné při spalování plastů a také emise. Proces spalování a chemického čištění zatěžuje životní prostředí spalinami a emisemi. Zároveň je spalování a chemické čištění náročné na spotřebu energie, která se získává spalováním fosilních paliv, což má rovněž významný dopad na životní prostředí.

Tabulka 9 Vstupy a výstupy při procesu recyklace

Vstupy	Výstupy
Solární panely	Získané suroviny pro recyklaci
Chemické látky pro recyklaci	Chemické látky pro likvidaci
Spotřebovaná energie	Teplo
Obsluha, doprava	Odpad pro likvidaci
Stroje pro zpracování - vybavení	Emise

Pro zpracování pomocí metody top twenty jsem si vybral následující dopady na životní prostředí a obyvatelstvo: hluk, vibrace, záření, splodiny, toxicitu pro člověka, toxicitu suchozemského a vodního ekosystému, acidifikaci,

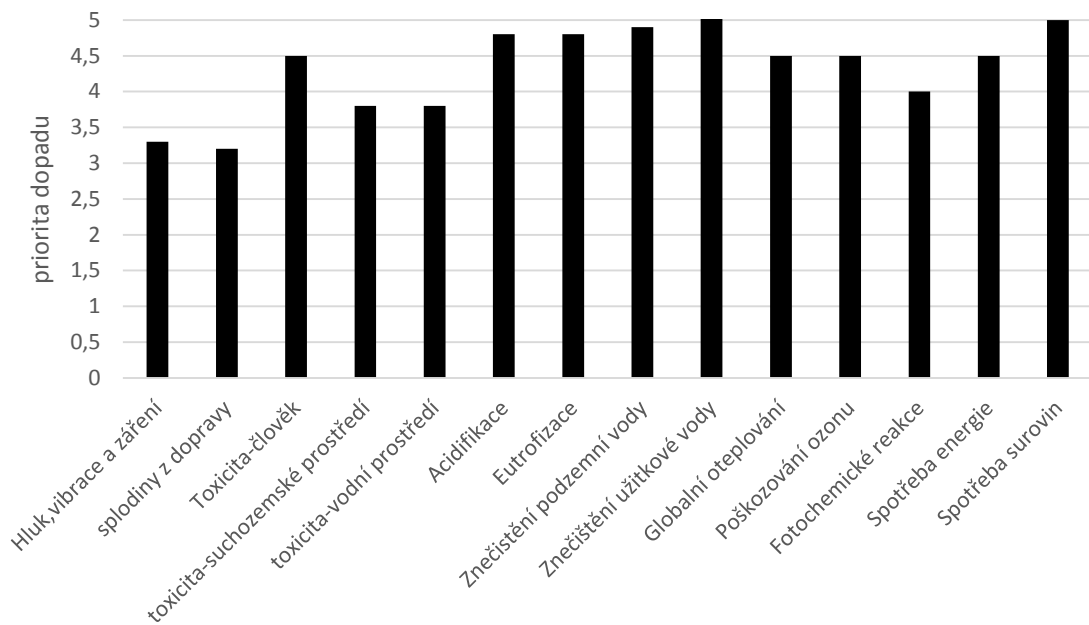
eutrofizaci, globální oteplování, poškozování ozonu, znečištění podzemní a užitkové vody, fotochemické reakce, spotřebu energie a surovin. U daných dopadů na životní prostředí jsem určil prioritu a váhu dopadu. Vynásobením jsem daný dopad znormoval a vypočítal jsem procentuální zastoupení jednotlivých dopadů. Získané dopady z různých hledisek jsem zpracoval do tabulek a grafů.

Tabulka 10 Vyhodnocení dopadů pomocí metody top twenty:

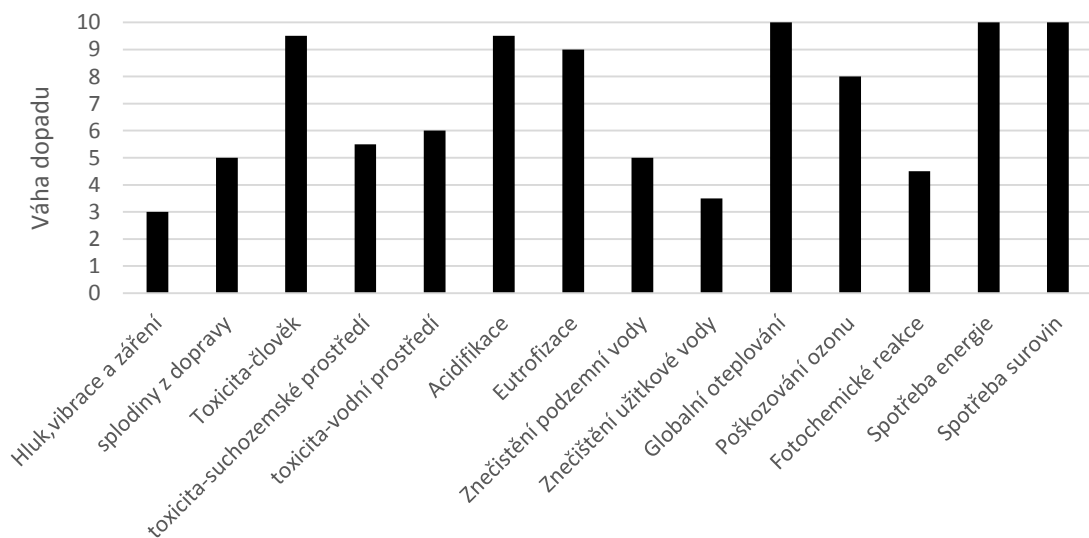
Dopady	Priorita(1-5)	Váha (1-10)	Počet bodů	Procentuální zastoupení (%)
Hluk,vibrace a záření	3,3	3	9,9	2,3
Spodiny z dopravy	3,2	5	16	3,6
Toxicita-člověk	4,5	9,5	42,75	9,7
Toxicita-suchozemské prostředí	3,8	5,5	20,9	4,8
Toxicita-vodní prostředí	3,8	6	22,8	5,2
Acidifikace	4,8	9,5	45,6	10,4
Eutrofizace	4,8	9	43,2	9,8
Znečištění podzemní vody	4,9	5	24,5	5,6
Znečištění užitkové vody	5,5	3,5	19,25	4,4
Globální oteplování	4,5	10	45	10,3
Poškozování ozonu	4,5	8	36	8,2
Fotochemické reakce	4	4,5	18	4,1
Spotřeba energie	4,5	10	45	10,3
Spotřeba surovin	5	10	50	11,4

Na následujících dvou grafech je znázorněna priorita a váha dopadu na životní prostředí a obyvatelstvo, ale také na spotřebu energie a surovin. Mezi

nejvýznamnější dopady patří toxicita pro člověka a ekosystém. Dále se sem řadí acidifikace a eutrofizace ovlivňující kvalitu prostředí a samořejmě globální problémy jako oteplování a poškozování ozonové vrstvy. Posledním významným vlivem z hlediska energetického i ekonomického je spotřeba energie a surovin.

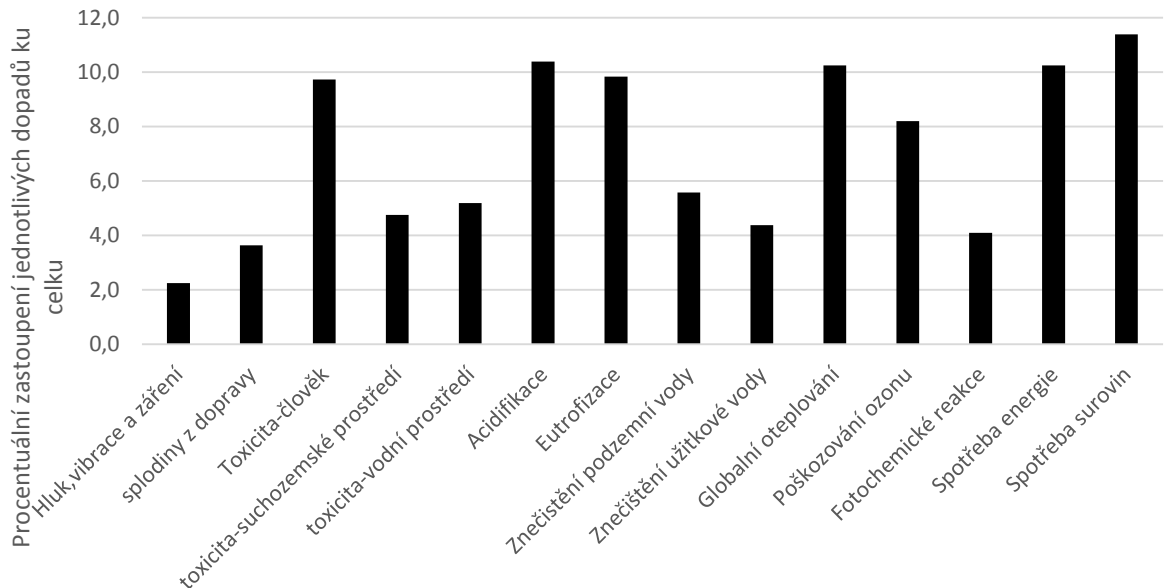


Dopad na životní prostředí a obyvatelstvo

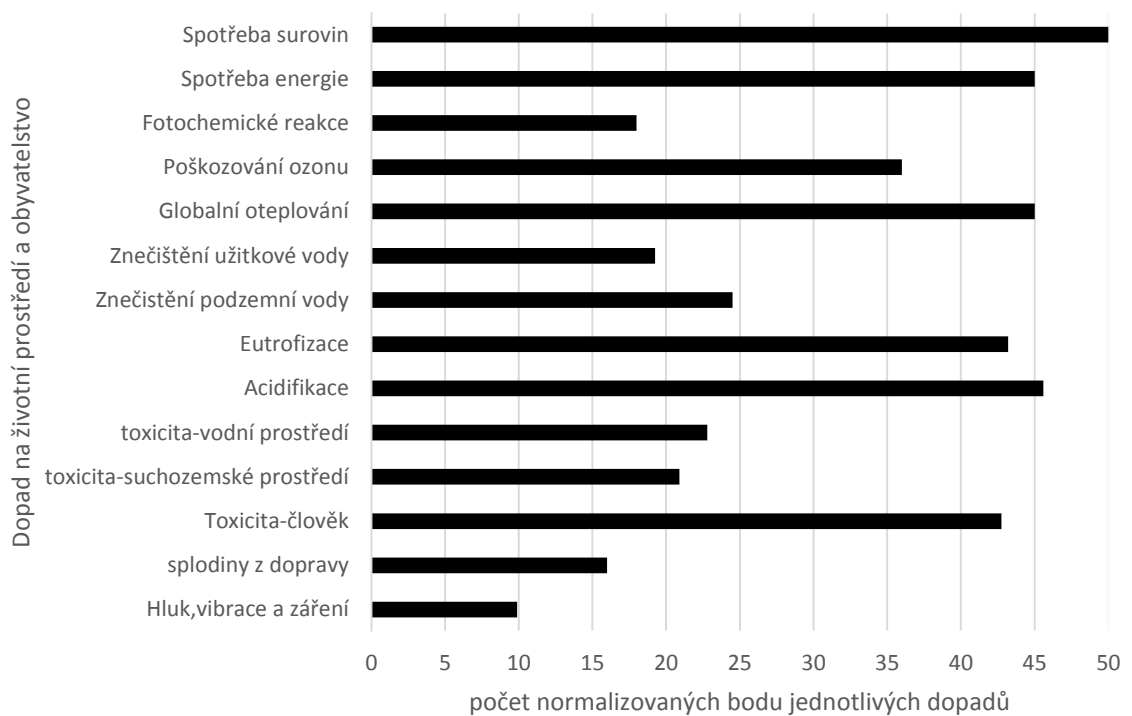


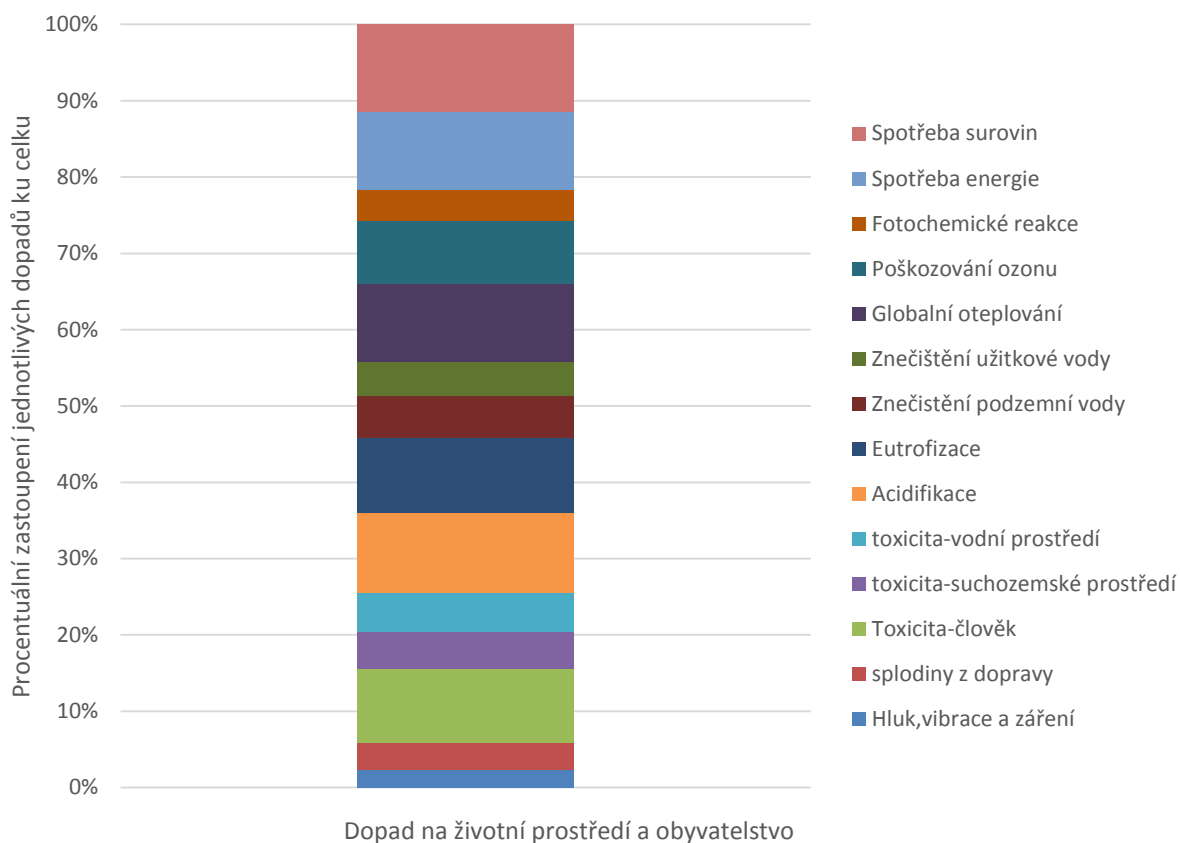
Dopad na životní prostředí a obyvatelstvo

Z následujících grafů vyplývá převažující dopad nejčastěji používaných indikátorů dopadu na životní prostředí jako je spotřeba surovin i energie, globální oteplování, úbytek ozonové vrstvy, acidifikace, eutrofizace a toxicita pro člověka a ekosystém.



Dopad na životní prostředí a obyvatelstvo





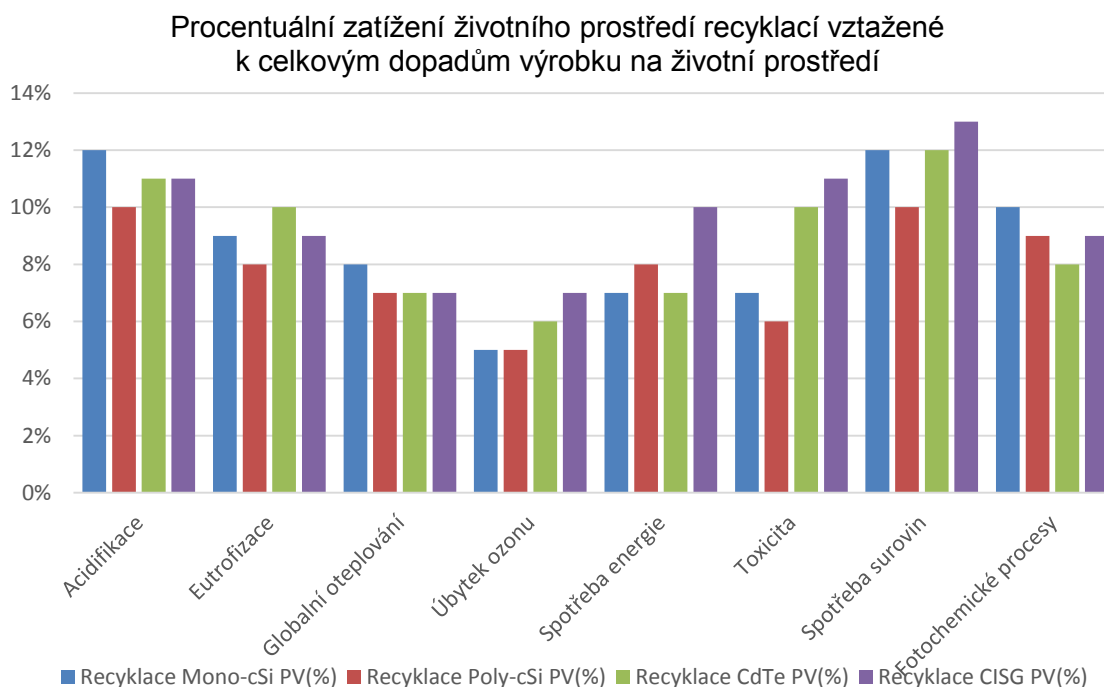
V posledním grafu vyhodnocení pomocí priorit a vah znázorňují procentuální zastoupení jednotlivých dopadů v rámci celkového dopadu na životní prostředí. Z uvedeného grafu je patrný dopad úbytku surovin a energie. Dále dopad acidifikace a eutrofizace na suchozemský a vodní ekosystém, ale i dopad toxických látek na člověka. Další dominantní dopad představuje globální oteplování a úbytek ozonové vrstvy. Dále je patrné, že fyzikální vlivy jako hluk, vibrace a záření nelze zanedbat z důvodu jejich vlivu na obyvatelstvo a ekosystém nebo na horninové podlaží a také na vodní a minerální zdroje v dané lokalitě.

V tabulce č. 11 se zabývám ekologickou zátěží procesu recyklace na životní prostředí a obyvatelstvo z hlediska nejdůležitějších dopadů na životní prostředí vyhodnocené metodou top twenty. V tabulce je uvedeno procentuální zastoupení jednotlivých dopadů vztažené k celkové ekologické zátěži dané životním cyklem výrobku.

Tabulka 11 Procentuální zastoupení samotné recyklace vztaheno k celkovému dopadu

Dopad	Recyklace Mono-Si PV (%)	Recyklace Poly-Si PV (%)	Recyklace CdTe PV (%)	Recyklace CISG PV (%)
Acidifikace	12%	10%	11%	11%
Eutrofizace	9%	8%	10%	9%
Globalní oteplování	8%	7%	7%	7%
Úbytek ozonu	5%	5%	6%	7%
Spotřeba energie	7%	8%	7%	10%
Toxicita	7%	6%	10%	11%
Spotřeba surovin	12%	10%	12%	13%
Fotochemie	10%	9%	8%	9%

Následující graf vypovídá o procentuálním zatížení životního prostředí recyklací vztahené k celkovým dopadům výrobku na životní prostředí. Z grafu je patrné, že největší vliv mají lokální a regionální dopady jako je acidifikace, eutrofizace a toxicita, ale ani globální dopady nejsou zanedbatelné. Dále vyplývá, že při recyklaci za účelem znovupoužití zrecyklovaných surovin se spotřebovává značné množství energie i materiálů.



9.2 Vyhodnocení přínosů recyklace na životní prostředí

Podstatou LCA metody je analýza všech vstupních a výstupních materiálů a energie v životním cyklu celého výrobku. Obecný životní cyklus výrobku obsahuje hlavní části jako je těžba surovin, výroba materiálu, výroba produktu, doprava, instalace, vlastní užívání a recyklace. Jednotlivé části cyklu se liší svými dopady z důvodů použitých látek, energií a emisí. LCA je zpracovávána dle mezinárodních norem řady ISO 14 000 a jejich harmonizováním do norem ČSN. Schématické znázornění celého životního cyklu výrobku pro posouzení pomocí LCA je přiloženo v přílohové části práce. [13]

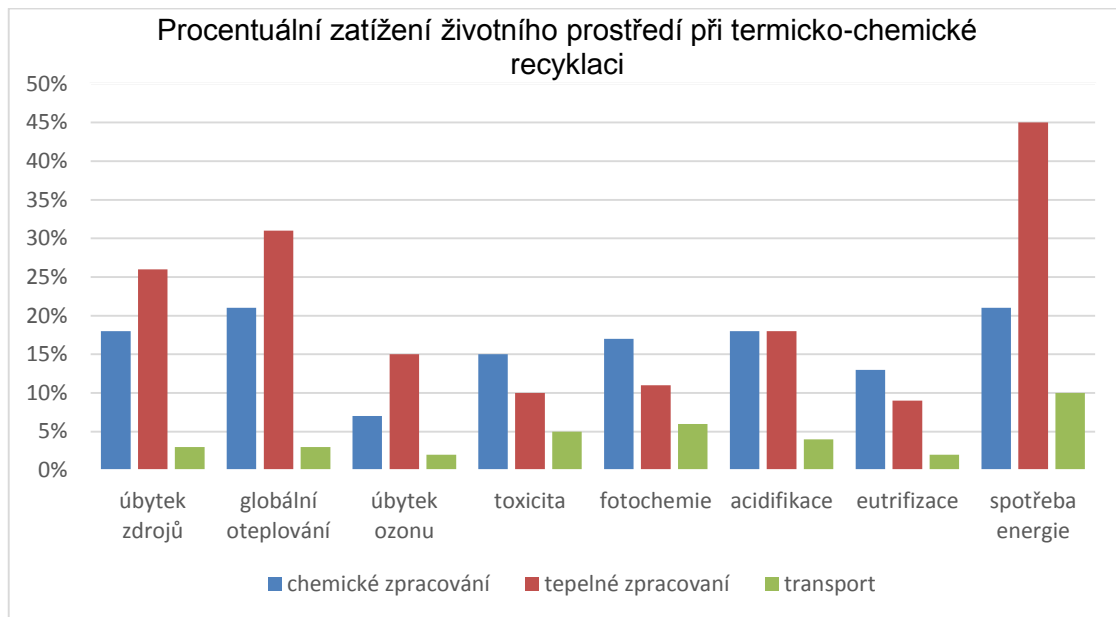
Pro vyhodnocení přínosů recyklace solárních panelů na životní prostředí jsem provedl zjednodušenou studii posuzování životního cyklu (LCA), která se zabývala pouze samotným procesem recyklace termicko-chemickou metodou. Pro zjednodušení jsem vyhodnotil dopad procesu recyklace na životní prostředí pomocí softwaru SimaPro a procentuálně ho vyjádřil z hlediska celého životního cyklu výrobku. Výsledky jsem zpracoval formou tabulek a vynesl do grafu. Data pro analýzu jsem získal z databází GaBi, ecoinvent a porovnal je s informacemi od firem Aquatest, 4RE, Solarworld a Asekolsolar.

Při recyklaci pomocí termické metody se spalují plasty, chemickou cestou se čistí a získávají se materiály. Tento proces samořejmě zatěžuje životní prostředí stejně jako výroba, doprava a instalace fotovoltaických systémů a má přímý dopad na kvalitu životního prostředí. Znázornění dopadů je zpracováno v tabulce a vyhodnoceno graficky.

Tabulka 12 Dopady na životní prostředí pomocí metody top twenty z hlediska výroby článku z recyklovaných materiálů

Operace	Úbytek zdrojů	Globální oteplování	Úbytek ozonu	Toxicit a	Fotoc hemie	Acidif ikace	Eutrif izace	Spotřeba energie
Chemické zpracování	18%	21%	7%	15 %	17%	18%	13%	21%
Tepelné zpracování	26%	31%	15%	10 %	11%	18%	9%	45%
Transport	3%	3%	2%	5%	6%	4%	2%	10%

Z grafu procentuálního zatížení životního prostředí při termicko-chemické recyklaci je patrný největší dopad na životní prostředí při spalování plastů. Při spalování plastů se uvolňuje oxid uhličitý v podobě emisí a teplo. Pro zvýšení ekonomické účinnosti je dobré získanou energii využívat pro vytápění nebo jiné podpůrné procesy v recyklační lince. Chemické čištění má také značný dopad na životní prostředí, ale i doprava má vliv a neměla by být zanedbávána. Dokonce se kvůli dopravě navrhuje mobilní recyklační linky.

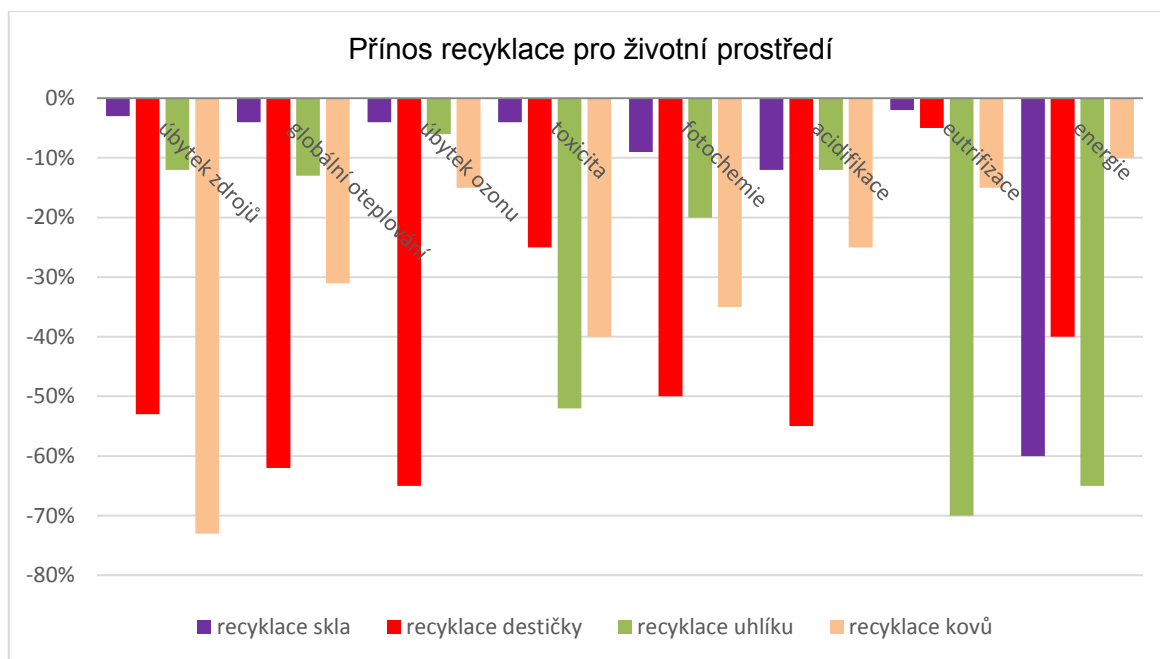


Následně jsem zpracoval nepřímý dopad recyklace na životní prostředí. Smyslem recyklace je získat vzácné kovy a také zlikvidovat solární odpad. Dalším přínosem recyklace je znovupoužití získaných materiálů, čímž dojde ke snížení celkového dopadu výroby nových solárních panelů z recyklovaných materiálů. V tabulce je porovnán dopad výroby solárních článků z primárních zdrojů s výrobou článků z recyklovaných materiálů. Přínos recyklace je znázorněn znaménkem mínus a znamená, že výrobou panelu z recyklovaných materiálů lze snížit dopad na životní prostředí o uvedená procenta.

Tabulka 13 Charakterizace dopadů na životní prostředí pomocí metody top twenty při výrobě článků z recyklovaných materiálů

Operace	Úbytek zdrojů	Globální oteplování	Úbytek ozonu	Toxicita	Fotochemie	Acidifikace	Eutrofizace	Energie
Recyklace skla	-3%	-4%	-4%	-4%	-9%	-12%	-2%	-60%
Recyklace destičky	-53%	-62%	-65%	-25%	-50%	-55%	-5%	-40%
Recyklace uhlíku	-12%	-13%	-6%	-52%	-20%	-12%	-70%	-65%
Recyklace kovů	-73%	-31%	-15%	-40%	-35%	-25%	-15%	-10%

Z grafu přínosů recyklace pro životní prostředí je patrný přínos recyklace z ekologického hlediska pro všechny použité materiály (kromě plastů). Rozhodnutí, zda recyklovat daný materiál předurčuje samořejmě trh a ekonomická cena recyklovaného materiálu.



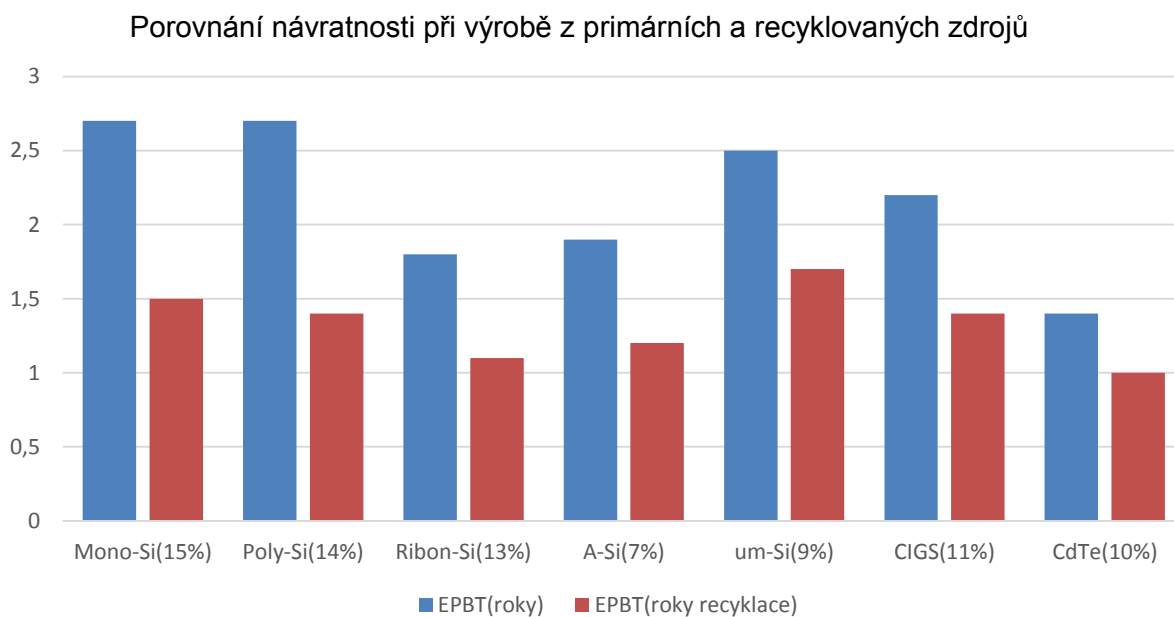
9.3 Ekonomické zhodnocení

Důležitým ekonomickým hlediskem je doba energetické návratnosti (EPBT), která je dána podílem spotřebované energie pro výrobu solárního článku a energie vyprodukované solárním systémem při dané účinnosti. V tabulce a grafu je znázorněna doba návratnosti pro panely vyrobené z nových a recyklovaných materiálů. [11]

Tabulka 14 Návrtnost EPBT [11,15]

Typ panelu	EPBT(roky)	EPBT(roky recyklace)
Monokrystalický Si(15%)	2,7	1,5
Polykrystalický-Si(14%)	2,7	1,4
Ribon-Si(13%)	1,8	1,1
Amorfní-Si(7%)	1,9	1,2
Mikrokrystalický-Si(9%)	2,5	1,7
CIGS(11%)	2,2	1,4
CdTe(10%)	1,4	1

Při porovnání doby návratnosti nových panelů při výrobě z primárních a recyklovaných zdrojů je patrné, že výroba nových článků z recyklovaných materiálů má kratší dobu návratnosti než články z primárních zdrojů. Důvodem je nižší energetická náročnost výroby panelů z recyklovaných materiálů.



Závěr

Při zpracovávání bakalářské práce jsem využíval základní myšlenkové operace, prostřednictvím nichž jsem hodnotil a porovnal poznatky uvedené v pramenech, čímž naplnil jsem cíl bakalářské práce, kterým bylo teoretické rozpracování dané problematiky. Dílčí cíl představovala analýza dopadů recyklace fotovoltaických panelů na životní prostředí, pro jejíž zpracování jsem využíval zejména materiály poskytnuté firmami zainteresovanými v dané problematice. Ačkoli jsou informace o této problematice stále ještě nedostatečné pro hloubkový výzkum, z důvodu trvající životnosti panelů a likvidace pouze poškozených či jinak znehodnocených panelů, domnívám se, že nejdůležitější informace jsem zachytil. Je však nepochybné, že v budoucnu se o této problematice bude moci napsat hlubší studie, až se celý proces začne realizovat.

Pro přehlednost analýzy dopadů recyklace na životní prostředí jsem učiněné závěry vynesl do grafů, jež poskytují lepší orientaci, než strohé popisování. Přílohová část slouží k dokreslení jednotlivých pojmů a procesů rozvedených v teoretickém rozpracování.

Při psaní bakalářské práce jsem musel čelit nedostatku informací, jelikož celý proces recyklace ještě není zcela zaběhnut a jeho nedostatky či výhody se v plném rozsahu projeví až v následujících letech, přesto se domnívám, že jsem získal relevantní informace, jež v současné době o tomto tématu existují.

V rámci analýzy dopadů recyklace fotovoltaických panelů na životní prostředí jsem dospěl k následujícím závěrům: v současné době převažuje recyklace křemíkových panelů za pomoci termicko-chemické metody, ovšem v budoucnu lze předpokládat zmenšování tloušťky panelů a z tohoto důvodu bude daná metoda nevyhovující, kvůli přílišné křehkosti panelů, po jejichž recyklaci by bylo ekonomicky výhodnější vyrábět nový panel z primárních surovin, nikoli ze surovin získaných po recyklaci dřívějšího panelu. Další učiněný závěr souvisí se samotnou recyklací. Pokud se budeme zabývat procesem recyklace jako takové, dospějeme k závěru, že ta životní prostředí zatěžuje, ovšem vztáhneme-li toto zatížení k zatížení, jež by vznikalo, pokud by nebylo možné využívat suroviny získané recyklací a bylo by nutné vyrábět všechny solární panely z primárních surovin, jeví

se recyklace jako účinná metoda ekologické likvidace. Zároveň při ní dochází k minimalizaci nepříznivých dopadů toxických prvků jako jsou kadmium, arzen, olovo... na životní prostředí. Tyto prvky by bez využití recyklace bylo nutné znovu vytěžit a upravit do potřebné kvality, přičemž vznikají emise znečišťující životní prostředí. Tento aspekt v sobě skýtá nejen ekologickou, ale i ekonomickou stránku věci.

Pokud bych se měl zabývat ekonomickým hlediskem procesu recyklace, pak je výhodnější zrecyklovat staré panely, protože tím nedojde ke ztrátě nedostatkových prvků jako je stříbro, tellur, germanium, galium, indium,... a nebude tedy nutné vynakládat finance na znovu vytěžení a zpracování.

Mám-li navrhnout určitá doporučení pro praxi v této oblasti, pak akcentuji zejména zvyšování účinnosti recyklace skrze zdokonalení současně užívaných technologií. Dále bych zdůraznil současnou ztrátovost, co se týče výtěžnosti prvků, jež panely obsahují, např.: u galia, germania a india se výtěžnost pohybuje v rozmezí 30 – 40 % při získávání prvků zpracovaných v panelech. Rovněž bych chtěl zdůraznit úlohu mobilních recyklačních linek, díky nimž by bylo možné snížit negativní dopady na životní prostředí, ke kterým dochází dopravou panelů určených k recyklaci.

Při zpracovávání bakalářské práce jsem si prohloubil znalosti o jednom z velice diskutovaných témat, jímž recyklace solárních panelů bezesporu je. Danému tématu bych se rád věnoval i při dalším bádání, zejména poté, co se proces recyklace začne plně využívat na panely, jejichž životnost již skončila a odhalí se tak pravá podstata záporů a kladů recyklace.

Seznam použitých zdrojů

- [1] LIBRA, Martin a POULEK, Vladislav. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. 1. vyd. Praha: ILSA, 2009. 160 s. ISBN 978-80-904311-0-2
- [2] MURTINGER, Karel, BERANOVSKÝ, Jiří a TOMEŠ, Milan. Fotovoltaika, elektřina ze slunce. 1. vyd. Brno: ERA, 2007. vii, 81 s. 21. století. ISBN 978-80-7366-100-7
- [3] Environment Canada. Assessment of the Environmental Performance of Solar Photovoltaic Technologies, Government of Canada, 2012 . ISBN 978-1-100-21268-5
- [4] LIBRA, M. – POULEK, V.: Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. Elektro 3/2010. Dostupné z: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40646.pdf>>
- [5] BECHNÍK, B., BAŘINKA, R., ČECH, P. Analýza životního cyklu fotovoltaických systémů. CZE RE AGENCY [online]. 2009 [cit. 2015-02-17]. Dostupné z: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika/ziv-cyklus>>
- [6] KLUGMANN-RADZIEMSKA, Ewa a OSTROWSKI. Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules. Renewable Energy [online]. 2010, vol. 35, issue 8, s. 1751-1759 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <<http://80.www.sciencedirect.com/dialog/cvut.cz/science/article/pii/S0960148109005199#>>
- [7] RADZIEMSKA, Eva, OSTROWSKI, Piotr, CENIAN. CHEMICAL, THERMAL AND LASER PROCESSES IN RECYCLING OF PHOTOVOLTAIC SILICON SOLAR CELLS AND MODULES. Ecological Chemistry and Engineering [online]. 2010 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <[http://tchie.uni.opole.pl/freeECE/S_17_3/RadziemskaOstrowski_17\(S3\).pdf](http://tchie.uni.opole.pl/freeECE/S_17_3/RadziemskaOstrowski_17(S3).pdf)>
- [8] ZHONG, Z.W., B. SONG a P.E. LOH. LCAs of a polycrystalline photovoltaic module and a wind turbine: note II. *Renewable Energy*. 2011, **36**(8): 2227-2237. DOI: 10.1016. ISSN 09601481. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148111000437>
- [9] MÜLLER, Anja; WAMBACH, Karsten; ALSEMA, Erik. Life Cycle Analysis of solar module recycling process. In: *MRS Proceedings*. Cambridge University Press, 2005. p. 0895-G03-07. Dostupné z: <http://www.researchgate.net/profile/EA_Alsema/publication/46689298_Life_cycle_analysis_of_a_solar_module_recycling_process/links/0912f50890ded08ed7000000.pdf>
- [10] GRANATA, G., F. PAGNANELLI, E. MOSCARDINI, T. HAVLIK, L. TORO a Golda WEIR. Recycling of photovoltaic panels by physical operations. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2014, vol. 123, issue 10, s. 90-108 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <<http://80.www.sciencedirect.com/dialog/cvut.cz/science/article/pii/S13640321140726686>>

- [11] GOE, Michele, Gabrielle GAUSTAD, E. MOSCARDINI, T. HAVLIK, L. TORO a Golda WEIR. Strengthening the case for recycling photovoltaics: An energy payback analysis: An energy payback analysis. Applied Energy [online]. 2014, vol. 120, issue 10, s. 41-48 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <<http://80.www.sciencedirect.com/dialog/cvut.cz/science/article/pii/S0306261914000555>>
- [12] PAIANO, Annarita, Gabrielle GAUSTAD, E. MOSCARDINI, T. HAVLIK, L. TORO a Golda WEIR. Photovoltaic waste assessment in Italy. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2015, vol. 41, issue 10, s. 99-112 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <<http://80.www.sciencedirect.com/dialog/cvut.cz/science/article/pii/S1364032114006686>>
- [13] VLADIMÍR KOČÍ. Metoda posuzování životního cyklu. Unilever [online]. 26.9.2011 [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <<http://www.unilevervyzva.cz/udrzitelnost/35.metoda-posuzovani-zivotniho-cyklu/>>
- [14] R. Frischknecht, R. Itten, F. Wyss, I. Blanc, G. Heath, M. Raugei, P. Sinha, A. Wade, 2014, Life cycle assessment of future photovoltaic electricity production from residential-scale systems operated in Europe, [online]. 25.3.2015 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <<http://becquerelinstitute.org/wp-content/uploads/2015/02/Future-PV-LCA-IEA-PVPS-Task-12-March-2015.pdf>>
- [15] First Solar [online]. First Solar. (COPYRIGHT © 2015 FIRST SOLAR). [cit. 2015-3-22]. Dostupné z: <<http://www.firstsolar.com/en>>
- [16] STOPPATO, A. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation [online]. 2011, vol. 15, issue 3 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: <<http://80.www.sciencedirect.com/dialog/cvut.cz/science/article/pii/S0360544207002137>>
- [17] Solarworld [online]. SOLARWORLD AG. (COPYRIGHT © 2015 SOLARWORLD AG). [cit. 2015-3-22]. Dostupné z: <<http://www.solarworld.de/home/>>
- [18] Prof. Ing. Vítězslav Benda, CSc, Ing. Kamil Staněk, Ing. Petr Wolf. Fotovoltaické systémy. Vutbr [online]. 15.4.2011 [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: <http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_04_1104.pdf>
- [19] Ing. Bronislav Bechník, Ph.D.. Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti. TZB-info [online]. 26.9.2011 [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <<http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/7868-recyklace-fotovoltaickych-panelu-na-konci-zivotnosti>>
- [20] Michael Held. LCA screening of recycling proces for silicon based PV modules. Fraunhofer IBP [online]. 28.3.20031 [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: <http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/Fraunhofer_3rd-RC_2013.pdf>

Seznam obrázků

Obrázek 1 Dopadající záření na Zemský povrch (přímé a difuzní)	9
Obrázek 2 Sluneční mapa pro ČR	10
Obrázek 3 Princip solárního článku.....	12
Obrázek 4 Struktura fotovoltaického panelu	17
Obrázek 5 Struktura článku CdTE	18
Obrázek 6 Struktura článku CIGS	18
Obrázek 7 Vývoj recyklace fotovoltaických článků	24
Obrázek 8 Schéma procesu recyklace termickou metodou	26
Obrázek 9 Schématický postup recyklace tenkovrstvých panelu	28

Seznam tabulek

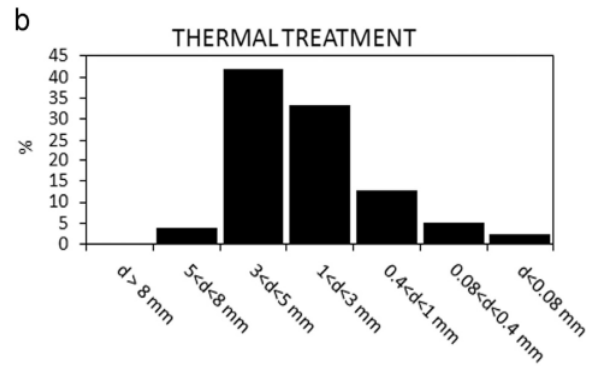
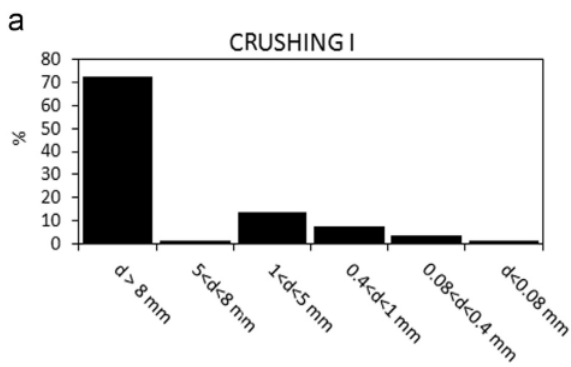
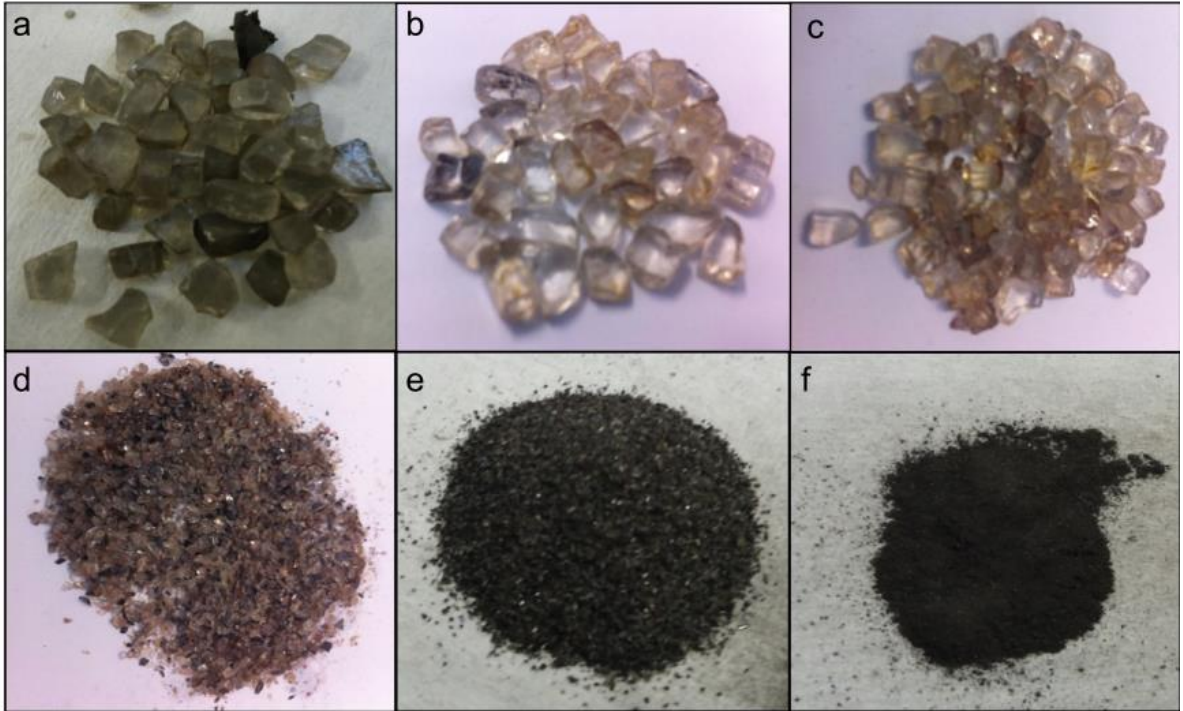
Tabulka 1 Přehled účinností jednotlivých technologií	14
Tabulka 2 Procentuální zastoupení polykrystalického a monokrystalického křemíku	20
Tabulka 3 Procentuální zastoupení amorfního a mikrokrystalického křemíku....	20
Tabulka 4 procentuálního zastoupení tenkovrstvé technologie CdTe	21
Tabulka 5 procentuálního zastoupení tenkovrstvé technologie CIGS	21
Tabulka 6 Materiální složení plochy 1 m ² jednotlivých technologií v g	22
Tabulka 7 Výtěžnost materiálu při recyklaci	29
Tabulka 8 Přehled množství odpadů a recyklovaných materiálů (do r. 2050) ...	30
Tabulka 9 Vstupy a výstupy při procesu recyklace.....	34
Tabulka 10 Vyhodnocení dopadů pomocí metody top twenty	35
Tabulka 11 Procentuální zastoupení samotné recyklace vztaženo k celkovému dopadu	39
Tabulka 12 Dopady na životní prostředí pomocí metody top twenty z hlediska výroby článku z recyklovaných materiálů	40
Tabulka 13 Charakterizace dopadů na životní prostředí pomocí metody top twenty při výrobě článků z recyklovaných materiálů.....	42
Tabulka 14 Návratnost EPBT	43

Seznam příloh:

Příloha 1. Velikost frakci zpracovaného krystalického křemíku 1	51
Příloha 2. Velikost frakci zpracovaného krystalického křemíku 2.....	52
Příloha 3. Velikost frakcí zpracovaného tenkovrstvého modu CdTe 1.....	53
Příloha 4. Velikost frakcí zpracovaného tenkovrstvého modu CdTe 2.....	54
Příloha 5. Schématické znázornění celého životního cyklu výrobku	
pro posouzení pomocí LCA	55

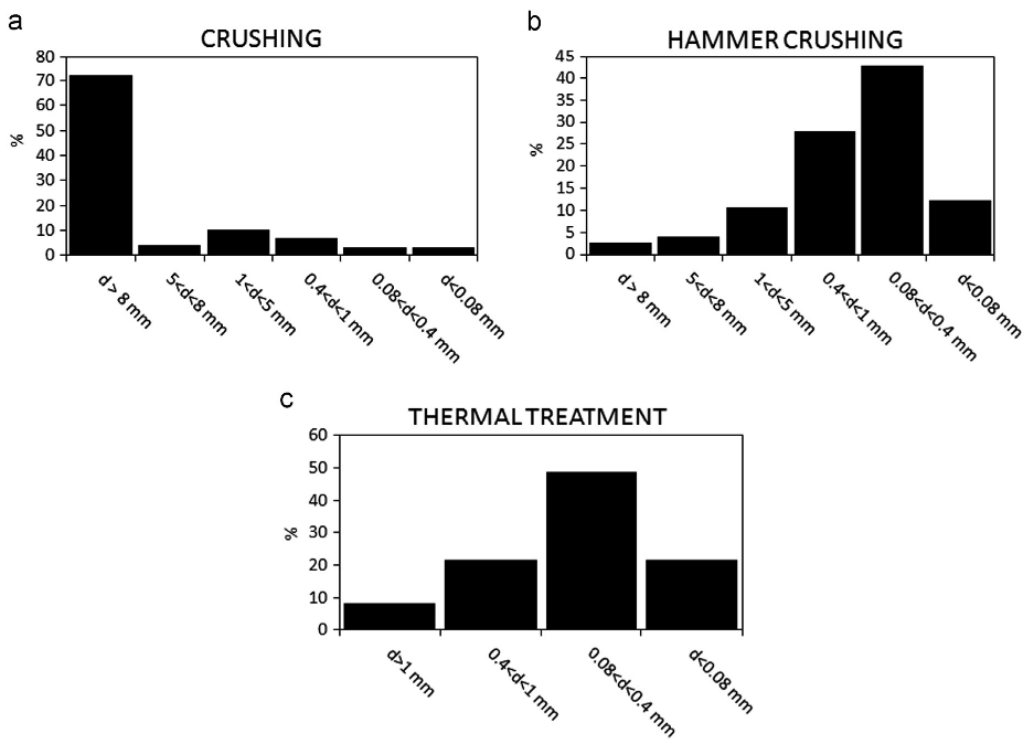
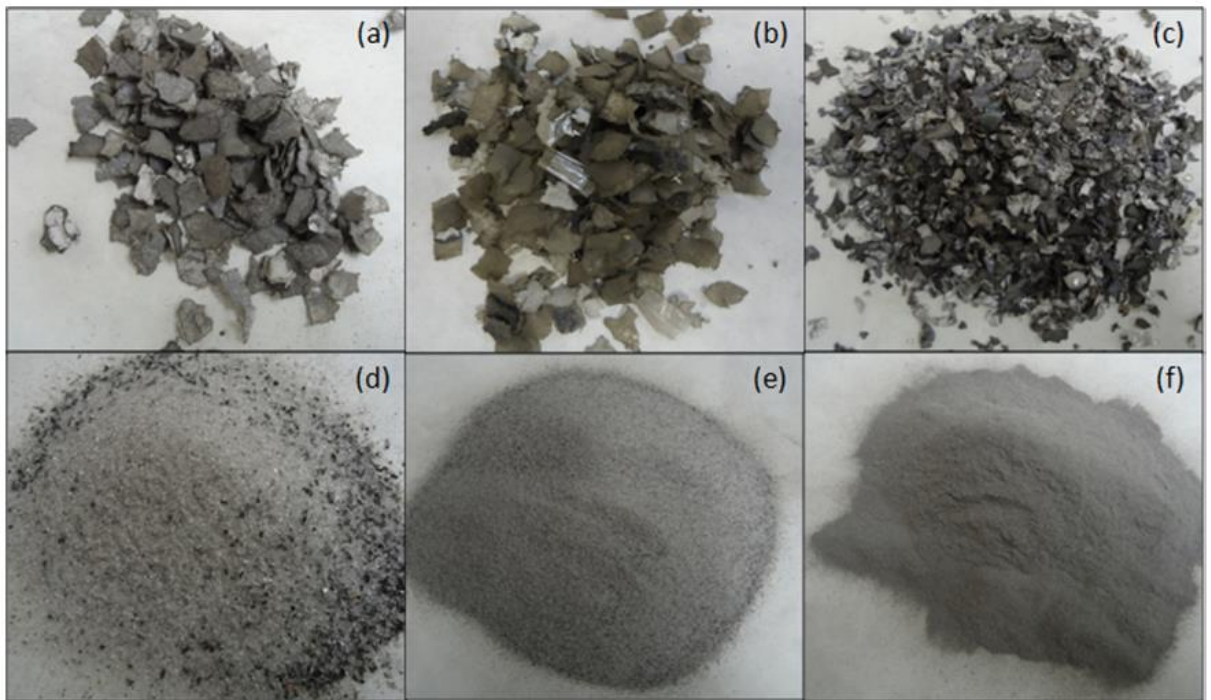
Příloha 1. Velikost frakcí zpracovaného krystalického křemíku 1

Velikost a zastoupení frakcí obsažených materiálů po drcení a termickém zpracování krystalického modulu (a) $d > 8$ mm ; (b) $5 < d < 8$ mm; (c) $1 < d < 5$ mm; (d) $0,4 < d < 1$ mm; (e) $0,08 < d < 0,4$ mm; (f) $d < 0.08$ mm [10]



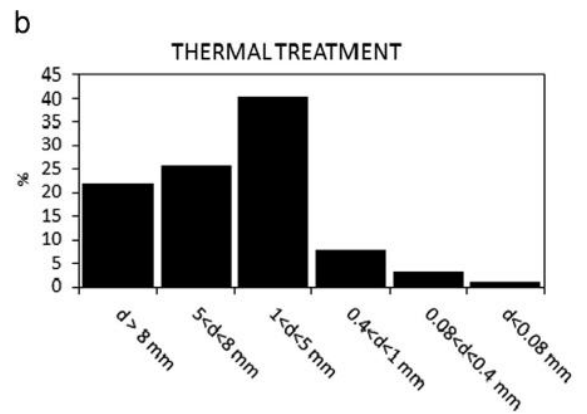
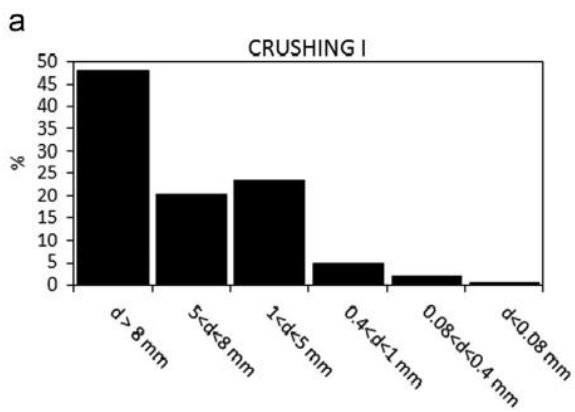
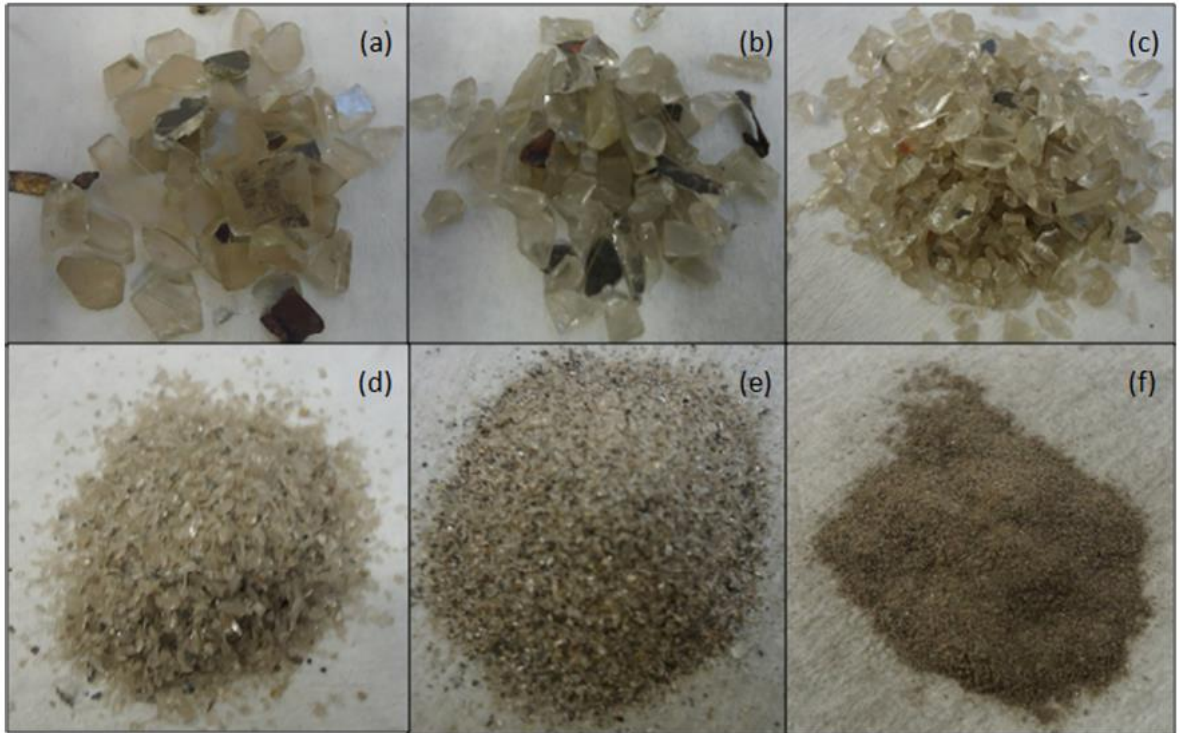
Příloha 2. Velikost frakcí zpracovaného krystalického křemíku 2

Velikost a zastoupení frakcí obsažených materiálů po drcení dvěma různými technologiemi a následném termickém zpracování ($d < 0,08$ mm) krystalického modulu (a) $d > 8$ mm ; (b) $5 < d < 8$ mm; (c) $1 < d < 5$ mm; (d) $0,4 < d < 1$ mm; (e) $0,08 < d < 0,4$ mm; (f) $d < 0,08$ mm. [10]



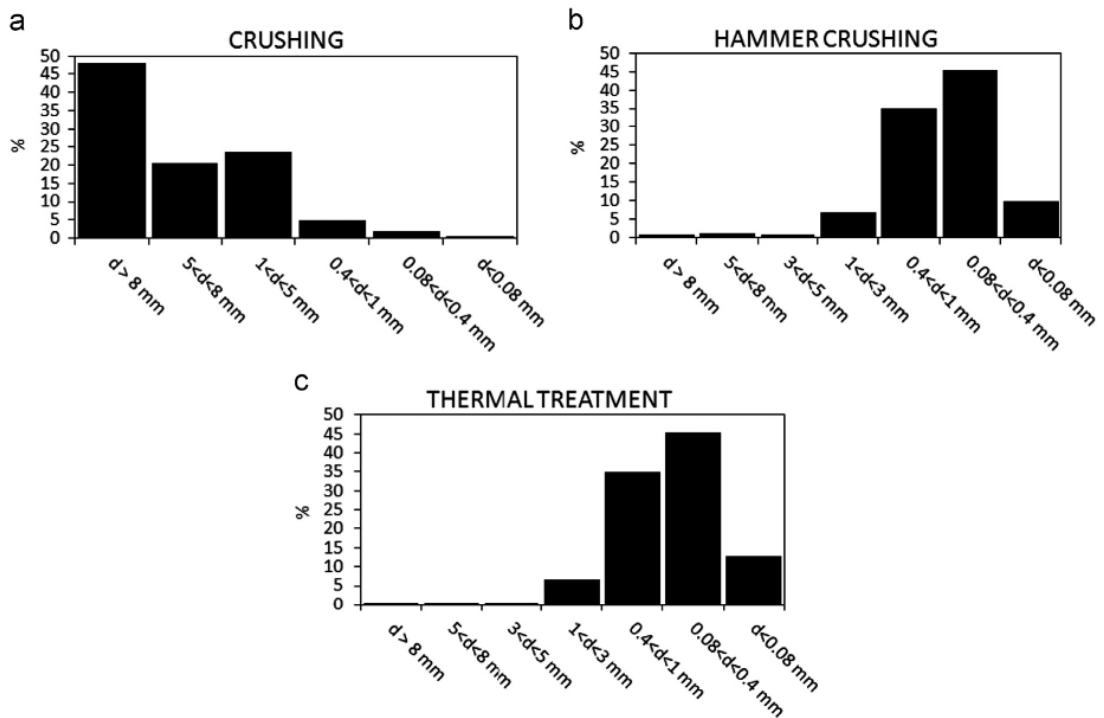
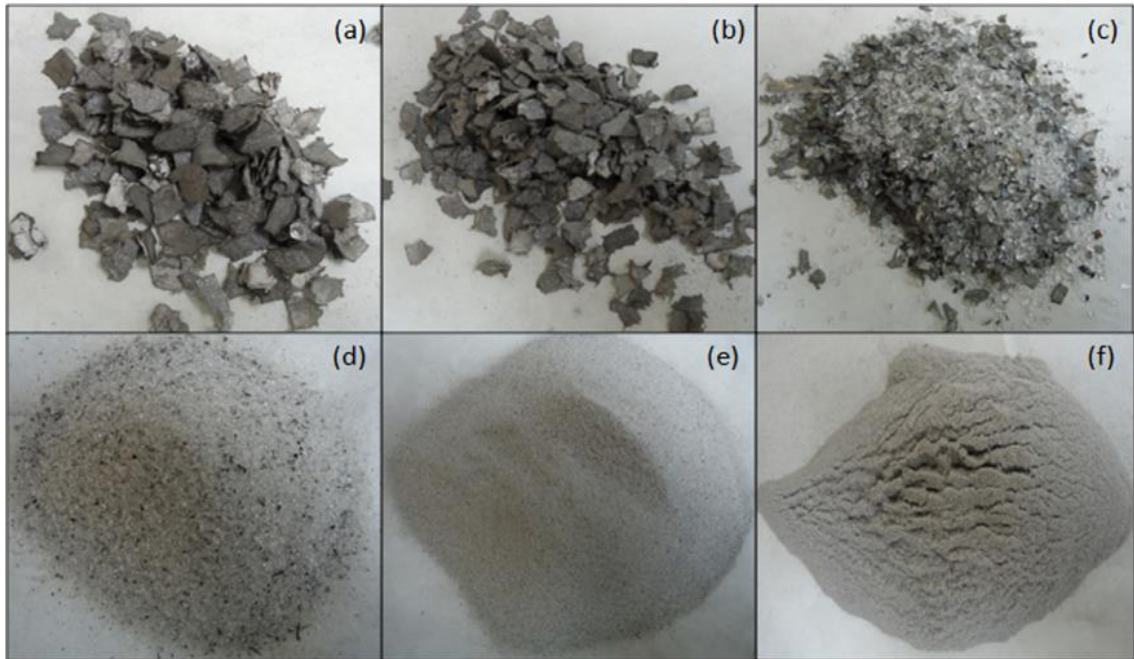
Příloha 3. Velikost frakcí zpracovaného tenkovrstvého modu CdTe 1

Velikost a zastoupení frakcí obsažených materiálů po drcení a po termickém zpracování tenkovrstvého CdTe modulu (a) $d > 8$ mm ; (b) $5 < d < 8$ mm; (c) $1 < d < 5$ mm; (d) $0,4 < d < 1$ mm; (e) $0,08 < d < 0,4$ mm; (f) $d < 0,08$ mm. [10]



Příloha 4. Velikost frakcí zpracovaného tenkovrstvého modu CdTe 2

Velikost a zastoupení frakcí obsažených materiálů po drcení dvěma různými technologiemi a následném termickém zpracování ($d < 0,08$ mm) tenkovrstvého CdTe modulu (a) $d > 8$ mm ; (b) $5 < d < 8$ mm; (c) $1 < d < 5$ mm; (d) $0,4 < d < 1$ mm; (e) $0,08 < d < 0,4$ mm; (f) $d < 0,08$ mm. [10]



Příloha 5. Schématické znázornění celého životního cyklu výrobku pro posouzení pomocí LCA [13]

