

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Stanovení stupně síťování etylen-vinyl acetátové
laminovací folie extrakční metodou**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel BENEDIKT**
Osobní číslo: **E11N0004P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Stanovení stupně síťování etylen-vinyl acetátové laminovací fo-
lie extrakční metodou**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište základní aspekty fotovoltaické přeměny solární energie (principy využití solární energie, její výhody a nevýhody).
2. Popište konstrukci a postup výroby solárních panelů se zaměřením na použití etylen-vinyl acetátu v této oblasti.
3. Proveďte rešerši a popište metody, které je možné aplikovat pro stanovení stupně síťování plastů.
4. Na dodaných vzorcích etylen-vinyl acetátové laminační folie změřte stupeň síťování pomocí extrakční metody.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. A.W. Czanderna and F.J. PERN. Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review. Solar energy materials and solar cells. 1996, no. 43, p. 1-81. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0927-0248\(95\)00150-6](http://dx.doi.org/10.1016/0927-0248(95)00150-6).
2. České technické normy
3. Elektronické informační zdroje (databáze SCIENCE DIRECT, Interscience-Wiley apod.)

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Radek Polanský, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na zjištění stupně síťování etylen - vinyl acetátové laminovací folie extrakční metodou. Diplomová práce je rozdělena na dvě hlavní části. V první části se práce zabývá základními aspekty fotovoltaické přeměny solární energie, využitím fotovoltaické energie a dále pak jejími výhodami a nevýhodami. Práce pokračuje výrobou fotovoltaického článku, zde je popsána výroba několika druhů fotovoltaických článků a následně se práce věnuje výrobě celých fotovoltaických panelů se zaměřením na použití EVA folie jako laminovacího materiálu v této oblasti. Na teoretickou část navazuje část experimentální, kde se práce věnuje metodám pro zjištění stupně síťování plastů a samotnému měření stupně síťování EVA folie extrakční metodou. Cílem diplomové práce bylo určení nejlepší teploty pro síťování EVA folie. Měřením bylo zjištěno, že tato teplota je 146 °C.

Klíčová slova

Fotovoltaika, fotovoltaický článek, fotovoltaická energie, fotovoltaický panel, Slunce, etylen-vinyl acetát, stupeň síťování, EVA folie, laminovací materiál, xylen, extrakční metoda.

Abstract

This thesis is focused on determination of crosslinking degree of ethylene-vinyl acetate encapsulant by solvent extraction. The thesis is divided into two main parts. The first part inquires into the basic aspects of photovoltaic conversion of solar energy, use of solar energy and then the advantages and disadvantages of the photovoltaic energy. Thesis then continues with the process of production of the photovoltaic cell, and the production of several types of photovoltaic cells is explained. The work also describes the production of photovoltaic panels focusing on the use of EVA foil as a filler material in this area. The theoretical part is followed by an experimental part, where the work inquires into methods for determining the degree of crosslinking of plastics and measurements of the degree of crosslinking EVA foil by solvent extraction itself. The aim of this thesis was to determine the best temperature for crosslinking EVA foil. The measurements discovered that the temperature is 146 °C.

Key words

Photovoltaic, solar cell, solar panels, photovoltaic panel, The Sun, ethylene-vinyl acetate, degree of crosslinking, EVA foil, encapsulant, xylene, solvent extraction.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 30.4.2013

Pavel Benedikt

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Radkovi Polanskému, Ph.D. za profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval pracovníkům Katedry technologií a měření za pomoc a cenné rady při sestavování aparatury k měření a při samotném měření stupně síťování EVA folie. Dále bych rád poděkoval firmě LINTECH-SOLAR jmenovitě panu Ing. Václavu Šavelovi, Ph.D. za prohlídku firmy, podrobný popis výroby fotovoltaického panelu a za dodání vzorků EVA folie.

Děkuji také svým rodičům za podporu během studia.

Tato práce vznikla s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA FOTOVOLTAICKÉ PŘEMĚNY SOLÁRNÍ ENERGIE	11
1.1 TEORIE POLOVODIČŮ	11
1.2 POLOVODIČ TYPU P	12
1.3 POLOVODIČ TYPU N	12
1.4 PN PŘECHOD.....	13
1.5 PRINCIP FOTOVOLTAICKÉ PŘEMĚNY SOLÁRNÍ ENERGIE.....	13
2 VYUŽITÍ SOLÁRNÍ ENERGIE	16
2.1 FOTOVOLTAIKA INTEGROVANÁ DO BUDOV	16
2.2 SÍŤOVÉ SYSTÉMY ON - GRID	17
2.3 OSTROVNÍ SYSTÉMY OFF - GRID	18
2.4 DROBNÉ APLIKACE	18
3 VÝHODY A NEVÝHODY SOLÁRNÍ ENERGIE	19
4 VÝROBA FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	21
4.1 MONOKRYSTALICKÉ ČLÁNKY	21
4.2 POLYKRYSTALICKÉ ČLÁNKY.....	22
4.3 TENKOVSTVÉ ČLÁNKY	23
4.4 ČLÁNKY CIS (COPPER-INDIUM-DISELENID, DVOJSELENID MĚDI-INDIA).....	23
5 TECHNOLOGIE VÝROBY FOTOVOLTAICKÉHO PANELU	24
5.1 POSTUP VÝROBY FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ.....	25
5.2 ETYLEN - VINYLACETÁT (EVA).....	28
5.3 POUŽITÍ EVA FÓLIE PŘI VÝROBĚ FV PANELU	29
6 METODY PRO STANOVENÍ STUPNĚ SÍŤOVÁNÍ PLASTŮ	30
6.1 NORMA ASTM D2765 - 11.....	30
6.2 NORMA ČSN EN 579.....	31
6.3 HOT - SET TEST.....	32
6.4 DIFERENČNÍ SKENOVAČÍ KALORIMETRIE (DSC)	33
6.5 DYNAMICKÁ MECHANICKÁ ANALÝZA (DMA).....	34
6.6 INFRAČERVENÁ SPEKTROMETRIE S FOURIEROVOU TRANSFORMACÍ (FTIR).....	34
7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	36
7.1 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ DLE PŘEDPISU ETIMEX.....	36
7.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ DLE PŘEDPISU ETIMEX	38
7.3 POSTUP VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	40
7.4 VÝSLEDKY DOSAŽENÉ EXTRAKČNÍ METODOU	41
7.5 MĚŘENÍ POMOCÍ DSC.....	42
7.5.1 Měření pomocí DSC/TGA Q600.....	43
7.5.2 Měření pomocí DSC Q2000	44
7.5.3 Porovnání výsledků měření DSC s extrakční metodou.....	45
ZÁVĚR	46
SEZNAM LITERATURY	47
SEZNAM PŘÍLOH	50
PŘÍLOHY	51
PŘÍLOHA A.....	51
PŘÍLOHA B	52

PŘÍLOHA C	53
PŘÍLOHA D	54
PŘÍLOHA E	55
PŘÍLOHA F.....	56

Seznam symbolů a zkratek

°C	.....	Stupeň Celsia
AC	.....	Střídavý proud
BIPV	.....	Fotovoltaika integrovaná do budov (Building Integrated Photovoltaics)
ČHMÚ	.....	Český hydrometeorologický ústav
DC	.....	Stejnsměrný proud
DMA	.....	Dynamická mechanická analýza (dynamic mechanical analysis)
DSC	.....	Diferenční skenovací kalorimetrie (differential scanning calorimetry)
EVA	.....	Etylen - vinyl acetát
FTIR	.....	Infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací (Fourier transform infrared spectroscopy)
FV	.....	Fotovoltaický
FVE	.....	Fotovoltaická elektrárna
GPC	.....	Gelová permeční chromatografie
kWh	.....	Kilowatt hodina
OZE	.....	Obnovitelné zdroje energie
PET	.....	Polyetylentereftalát
PM	.....	Petriho miska
PVF	.....	Polyvinyl - fluorid
T _c	.....	Teplota krystalizace
T _g	.....	Teplota skelného přechodu
T _m	.....	Teplota tání
V	.....	Volt

Úvod

Kromě primárních zdrojů energie, kam se řadí uhelné a jaderné elektrárny, existují také zdroje sekundární. Mezi tyto zdroje patří tzv. obnovitelné zdroje energie (OZE), které se stávají čím dál více součástí dnešního světa. Jejich nedílnou součástí je energie ze Slunce. Pomocí fotovoltaických panelů je sluneční energie přeměňována na energii elektrickou. Se zvyšujícími se nároky na množství elektrické energie rapidně vzrostl počet výrobců fotovoltaických (FV) panelů. Ne každý výrobce ovšem může zaručit dostatečnou kvalitu FV panelů. Zejména výrobci z Asie se snaží snížit cenu fotovoltaického panelu co nejvíce. Bohužel je tomu tak právě na úkor kvality samotného fotovoltaického panelu. Ve FV panelu je mnoho komponentů a materiálů, které mohou ovlivňovat jeho účinnost, dobu životnosti, atd. Samozřejmě není možné veškerou vinu svádět na výrobce, protože existují i firmy, které vyrábějí panely kvalitní. Dobu životnosti pak určují jiné faktory. Mezi tyto faktory patří zejména klimatické podmínky, ve kterých je panel používán.

Jedním z materiálů, na kterém je závislá kvalita, spolehlivost, účinnost fotovoltaického panelu, je etylen - vinyl acetátová (EVA) folie, která funguje ve fotovoltaickém panelu jako laminovací materiál, který také významně ovlivňuje délku životnosti fotovoltaického panelu. Proto je cílem této diplomové práce určit nejlepší teplotu pro síťování EVA folie.

1 Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny solární energie

Samotná fyzikální podstata fotovoltaické přeměny je založena na polovodičích, které se podle typu nosiče rozdělují na intrinstické neboli vlastní a na příměsové. Příměsové polovodiče mohou být dopované typem N, kde jsou majoritními nosiči náboje elektrony nebo typem P, kde jsou majoritními nosiči náboje díry. Díry se zde chovají jako částice s kladným nábojem. Základním materiálem pro výrobu polovodiče je čtyřmocný prvek. Tento prvek nemá ve struktuře žádné volné elektrony. Všechny elektrony jsou vázané ve valenčních vrstvách. [1] Nejpoužívanějším polovodičem v oblasti fotovoltaiky je křemík. Jeho mikrostrukturou a fyzikálními vlastnostmi se zabývá následující kapitola.

1.1 Teorie polovodičů

Atom křemíku obsahuje čtrnáct elektronů. Krystalová struktura molekuly křemíku je velice podobná struktuře diamantu. Znamená to, kolem každého atomu křemíku jsou čtyři jeho nejbližší sousední atomy. Poslední čtyři valenční elektrony tvoří s těmito sousedními atomy kovalentní vazby. Energie volného elektronu, který nepodléhá působení žádných sil, může nabývat libovolných hodnot na rozdíl od energie elektronu, který je vázán v krystalu křemíku. Ten může nabývat pouze určitých hodnot a to díky jeho pohybu v poli periodického potenciálu. Tyto hladiny energie jsou rozděleny do pásů nazývaných pásy dovolených energií. Dva pásy dovolených energií oddělují tzv. pásy zakázaných energií. [2, 3]

Energetické pásy jsou pro teorii polovodičů nejdůležitější. Patří sem valenční pás, zakázaný pás a vodivostní pás. Valenční pás tvoří energetické stavy valenčních elektronů. Těchto stavů je stejně jako valenčních elektronů v krystalu, proto budou za velmi nízkých teplot všechny tyto stavy obsazeny. Po valenčním pásu následuje pás zakázaný, to znamená, že žádný elektron nemůže mít energii takovou, aby se mohl vyskytovat v tomto pásu. Posledním z energetických pásů je pás vodivostní. Podrobněji se vodivostním pásem bude zabývat následující odstavec. [1, 4]

Energetická hladina, která je ve valenčním pásu nejvýše se značí jako E_V , naopak energetická hladina, která je ve vodivostním pásu nejnižší se značí jako E_C . Šířka zakázaného pásu se vypočítá ze vztahu $\Delta E_G = E_C - E_V$. Zde by bylo vhodné také zmínit, že šířka zakázaného pásu u krystalického křemíku je $\Delta E_G \approx 1,1$ eV a proto jsou křemíkové FV články citlivé na fotony viditelného a blízkého infračerveného spektra s vlnovou délkou kratší než

$\lambda \leq 1100nm$. Důležitá energetická hladina v teorii polovodičů je Fermiho hladina, která se označuje jako E_F . Ve vlastním polovodiči je Fermiho hladina uprostřed zakázaného pásu. Hladiny ve valenčním pásu, které jsou obsazeny, odpovídají počtu valenčních elektronů, které jsou pevně vázány k vlastním atomům. Pokud se atomu dodá tepelná (ve formě fononu) nebo světelná energie (ve formě fotonu) uvolní se některý z elektronů a odtrhne se od svého atomu. Tím se elektron může volně pohybovat uvnitř křemíkového krystalu. Vzniká tak volné místo po dříve pevně vázaném elektronu. Tímto způsobem mohou nastat dva případy, co bude dále následovat. V prvním případě zde uvízne volný elektron. V druhém případě do vzniklého volného místa přeskočí pevně vázaný elektron ze sousedního atomu. Pro takový přesun musí být elektron vybaven dostatečným množstvím energie, kterou využije pro překonání určité energetické bariéry. Přeskočí-li elektron ze sousedního atomu, vznikne tomuto atomu také volné místo. Těmito přeskoky se elektron dále posouvá. Po vložení do elektrického pole, se jak vázané, tak i volné elektrony posunují proti směru intenzity elektrického pole (z důvodu záporného elektrického náboje). Volné místo se naopak pohybuje ve směru pole. [1, 3]

1.2 Polovodič typu P

Pokud z krystalu křemíku chceme vytvořit polovodič typu P, je nutné jej dotovat příměsovými atomy, které mají oxidační číslo tři. Jsou to např. atomy boru, hliníku, galia a india. Přidáním těchto atomů získá krystal křemíku děrovou vodivost (nosiči náboje jsou pozitivní částice) a stane se tím polovodičem typu P. Každý příměsový atom zabere svými elektrony jen tři vazby ze sousedních atomů křemíku. Tím vznikne pozitivně (kladně) nabitá částice, které se říká díra. Tato částice (díra) může být snadno zaplněna elektronem, který přeskočí od sousedního atomu křemíku. Tyto příměsi se tak stávají imobilními zápornými ionty. Jsou nazývány příjemci nebo také akceptory. Díry vytvořené příměsemi se mohou volně pohybovat v polovodiči typu P a jsou zde majoritními nosiči náboje. Z informací uvedených výše vyplývá, že minoritními nosiči náboje jsou v polovodiči typu P elektrony. [5]

1.3 Polovodič typu N

Pokud krystal křemíku obsahuje příměsi atomů s oxidačním číslem pět, jako jsou např. prvky fosfor, arsen a antimon, jedná se o polovodič typu N. Z pěti valenčních elektronů příměsových atomů jsou schopny pouze čtyři uplatnit se v kovalentní vazbě se sousedními atomy křemíku. Páté elektrony, které nejsou uplatněny v kovalentní vazbě, jsou k příměsím

vázány jen slabě a už při nízkých teplotách jsou schopny se volně pohybovat krystalem. Z příměsí tak vznikají kladné imobilní (nepohyblivé) ionty, které se nazývají dárci nebo také donory. V tomto případě je situace opačná než u polovodiče typu P. Elektrony se zde označují jako majoritní nosiče a díry jako nosiče minoritní. Jedná se tedy o polovodič s převládající elektronovou vodivostí. [3, 5]

1.4 PN přechod

Chceme-li spojit polovodiče typu P a typu N musíme je spojovat na mikroskopické úrovni. Dojde-li k takovému spojení, vytvoří se na rozhraní polovodiče typu P a typu N tzv. PN přechod. V oblasti PN přechodu dojde k difúzi děr z polovodiče typu P do polovodiče typu N. V místě spojení polovodičů je situace opačná, kdy elektrony z polovodiče N difundují do polovodiče P. Poté dochází k rekombinaci párů elektron-díra. Dojde k vytvoření rovnováhy a na rozhraní polovodičů vznikne vnitřní el. pole. V oblasti PN přechodu nejsou žádné volné elektricky nabitě částice. Tyto částice zde nejsou díky rekombinaci. Připojíme-li polovodič typu N k zápornému pólu zdroje a polovodič typu P ke kladnému pólu, začínají se v polovodiči typu P tvořit díry a do polovodiče typu N jsou dodávány elektrony. Díky vnějšímu poli, které je vytvořeno zdrojem proudu, se díry z oblasti P a elektrony z oblasti N začnou pohybovat ve směru k PN přechodu. Elektrony a díry dále pokračují v rekombinaci a dochází tak k průchodu proudu. Díry se pohybují směrem k N a elektrony směrem k P. Tento případ je typický pro PN přechod, který je zapojen v propustném směru. Zapojíme-li PN přechod opačně, nedochází zde k rekombinaci na PN přechodu a proto neprochází ani žádný proud. V závěrném směru díry zůstávají v polovodiči typu P a stejně tak zůstávají elektrony v polovodiči typu N. PN přechod je zapojen v závěrném směru. PN přechod tedy propouští proud jen jedním směrem. [6]

1.5 Princip fotovoltaické přeměny solární energie

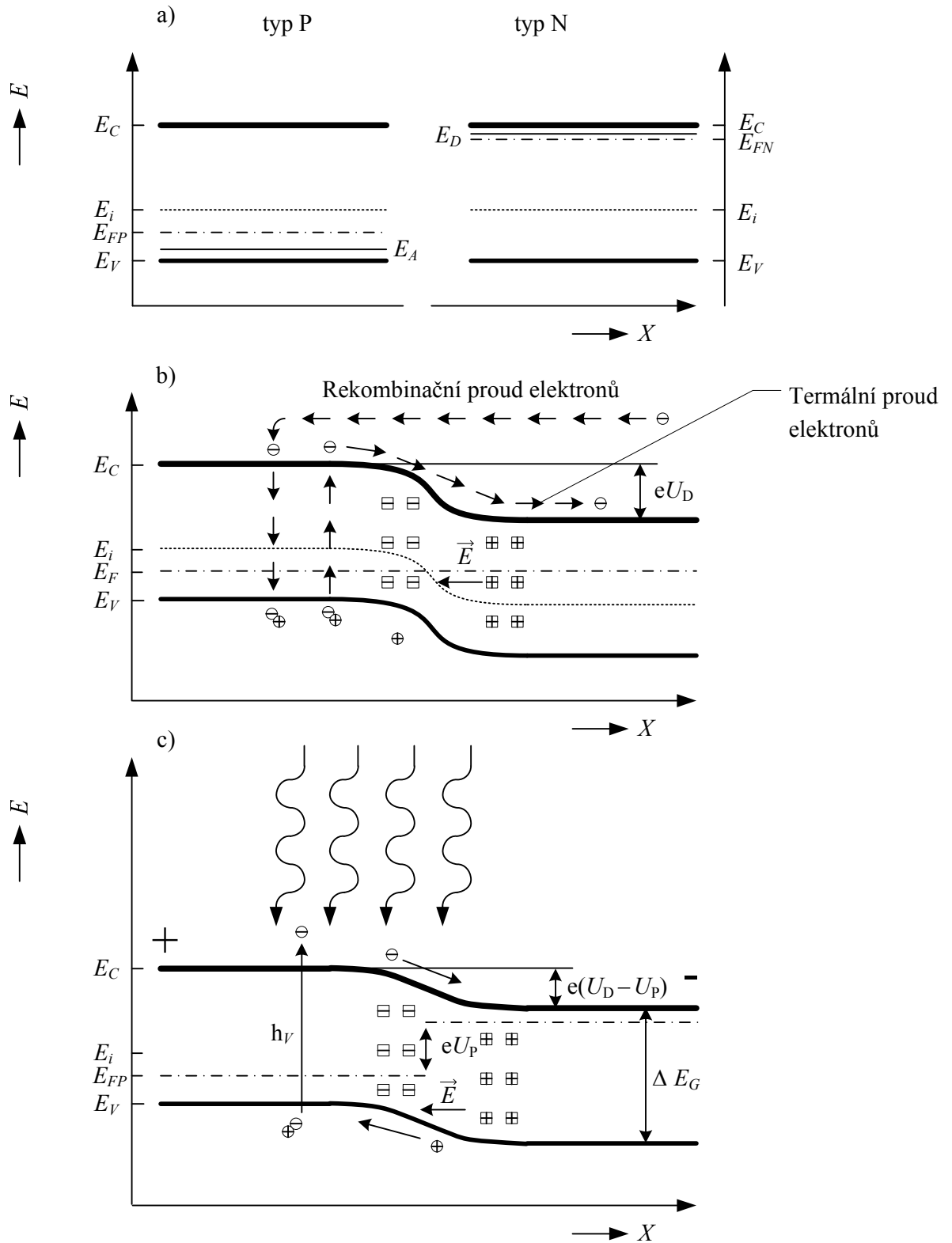
V této kapitole bude popsán samotný princip fotovoltaické přeměny solární energie na elektrickou. Tato transformace probíhá ve fotovoltaických článcích, kde je energie dopadajících fotonů přeměňována na energii elektrickou. Je možné říci, že FV článek je velkoplošná dioda. PN přechod se orientuje tak, aby směřoval kolmo k čelní ploše přední a zadní strany FV článku. Dopadají-li na FV článek fotony, které mají větší energii (tato energie musí být větší než energie zakázaného pásu), pak tyto fotony vytvářejí páry elektron-díra.

Tímto generováním párů odevzdávají fotony svou energii a jsou pohlceny. Generované páry elektron-díra jsou v oblasti PN přechodu odděleny elektrickým polem \vec{E} mezi vázanými prostorovými náboji. Elektrony jsou urychleny proti směru pole, díry jsou urychleny směrem opačným. Tímto způsobem tak mezi opačnými póly fotovoltaického článku vznikne elektrické napětí. Když je poté FV článek připojen do obvodu, obvodem začne protékat stejnosměrný proud. Touto transformací vzniká zdroj elektrické energie z FV článku.

Uvedená přeměna je graficky znázorněna na obr. 1, kde na obr. 1a je schéma energetických hladin v polovodiči typu P a typu N a na obr. 1b je znázorněno vyrovnání Fermiho hladiny a ohyb pásů u přechodu PN ve fotovoltaickém článku, na který nedopadá žádné záření. V obr. 1b je dále znázorněn rekombinační a termální proud elektronů v rovnovážném stavu. Vyznačeny jsou zde oblasti prostorového náboje a difúzní napětí U_D . [2, 7]

Pokud FV článek osvětlíme, nastává situace, kterou ilustruje obr. 1c (článek není zapojen v obvodu). Fotony, které dopadají na čelní plochu FV článku naruší rovnováhu. Tím se zvýší generace párů elektron-díra. Elektrony jsou urychleny proti směru pole, díry jsou urychleny směrem opačným. Proud tedy teče od záporného pólu ke kladnému pólu. Potenciálová bariéra U_D klesne, Fermiho energie se v oblasti PN přechodu rozdělí a vznikne tak fotovoltaické napětí U_P , které odpovídá rozdílu v této oblasti. Hodnota fotovoltaického napětí u křemíkových FV článků dosahuje přibližně $U_P \approx 0,6$ V. [2]

Připojí-li se ozářený FV článek do obvodu, dojde ke spojení obou pólů, po kterém následuje snížení fotovoltaického napětí. Změnou fotovoltaického napětí dojde i ke změně zakřivení pásů. Tato změna vede k opakovanému zvýšení potenciálové bariéry, $U_D - U_P$, a zmenšení rekombinačního proudu a tím dojde ke zvýšení proudu termálního. Díky výše popsaným pochodům bude součet obou proudů větší než nula. Proud který vznikne, bude do obvodu dodáván FV článkem, který zde slouží jako zdroj. [2, 3]



Obr. 1 Model energetických hladin FV článku a fotovoltaické přeměny energie (překresleno z [2])

2 Využití solární energie

V České republice je množství sluneční energie ovlivněno několika faktory. K těmto faktorům řadíme zejména roční období, geografickou polohu, zeměpisnou šířku, lokální oblačnost a znečištění atmosféry. Tyto faktory způsobují rozdíly v dopadu slunečního záření na území ČR. Tento rozdíl může činit až několik desítek procent.

V České republice dopadne na 1 m² vodorovné plochy asi 950 - 1340 kWh energie v závislosti na již zmíněných podnebných podmínkách. Roční množství slunečních hodin se pohybuje okolo 1331 -1844 hod (údaj od Českého hydrometeorologického ústavu - ČHMÚ). Prakticky pak platí, že z jedné instalované kilowaty běžného systému (monokrystalické, polykrystalické články) lze za rok získat v průměru 800 - 1100 kWh elektrické energie. [8]

Způsobů využití sluneční energie je více. Patří sem zejména: [9]

- Fotovoltaická přeměna slunečního záření na elektrickou energii pomocí FV článků.
- Přeměna slunečního záření na teplo pomocí kapalinových či vzduchových kolektorů
- Pasivní přeměna slunečního záření na teplo správným návrhem budovy.

Aby bylo dosaženo nejlepších výsledků při transformaci slunečního záření na využitelnější formu energie, je vhodné kombinovat různé systémy.

2.1 Fotovoltaika integrovaná do budov

V této kapitole se práce zabývá aplikacemi fotovoltaiky, které jsou integrovány do budov, zejména do obvodových plášťů, střech či fasád. Často se v odborné literatuře [7] používá zkratka BIPV (Building Integrated Photovoltaics).

Velmi široká škála pojetí fotovoltaických fasád má původ v kreativité, která je vlastní architektonickému pohledu na životní prostředí člověka. Fotovoltaický panel se v mnoha různých podobách stal výzvou pro architekty a konstruktéry. To v mnohých případech vedlo nejen k novým obvodovým plášťům, ale i k novým koncepcím budov. Obvodové pláště

budov plní mnoho funkcí, které souhrnně zajišťují přijatelné životní podmínky pro uživatele objektu. V závislosti na vnějších podmínkách se zpravidla jedná o fyzické oddělení interiéru od exteriéru poskytující ochranu před vnějšími klimatickými podmínkami, zajištění tepelné pohody, fasády ochraňují vnitřní prostor před přesvětlením, atd. Střechy a fasády budov však mohou plnit i aktivní funkci zdroje energie, a to jak tepelné, tak i elektrické. Pláště budov jsou vystavovány nemalým energetickým tokům v podobě slunečního záření. Využívání této energie pomocí zařízení umístěných na střechách a fasádách budov představuje významný přínos v úspoře primárních energií.[7, 8]

2.2 Síťové systémy On - grid

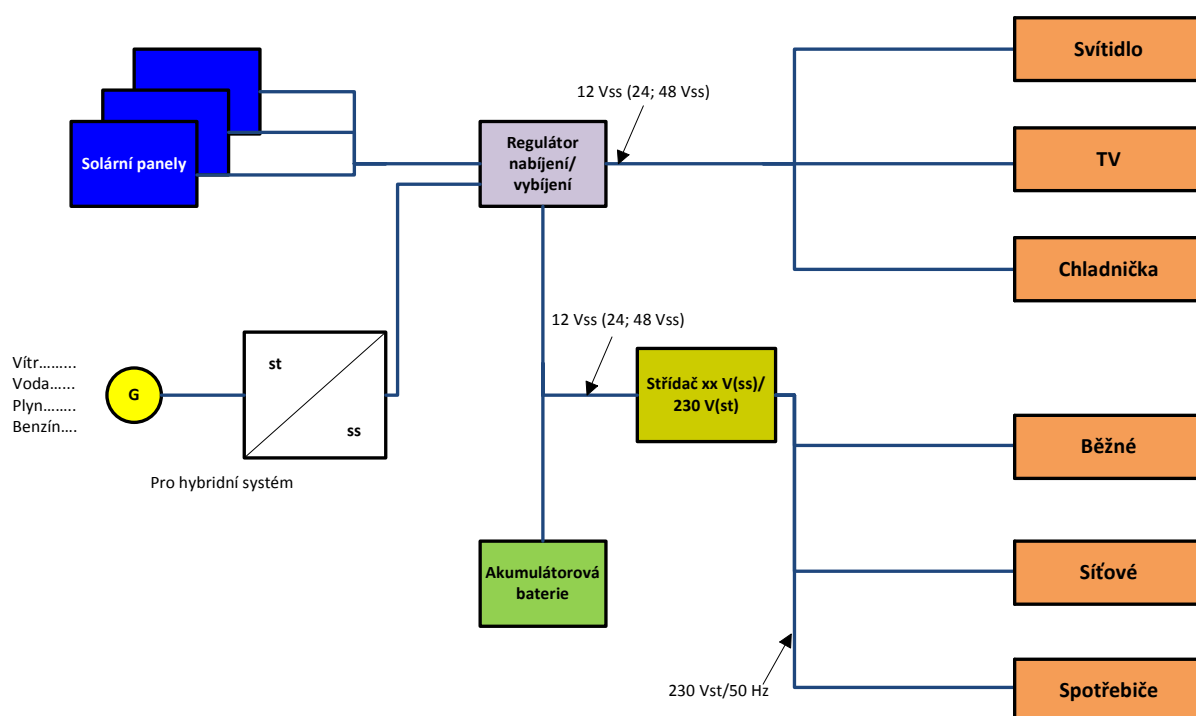
Tyto systémy jsou známe také pod názvem grid - connected. Fotovoltaické systémy na bázi systému on - grid nejsou k distribuční síti připojeny z hlediska nedostatku elektrické energie jako je tomu u systémů off - grid. Motivací pro instalaci tohoto fotovoltaického systému jsou úspory a v nemalé míře také zisk, který může z takové investice plynout. Systémy on - grid jsou instalovány nejvíce na rodinných domech nebo na průmyslových objektech, jak je patrné z obr. 2. Energie získaná z FVE (fotovoltaická elektrárna) je buď spotřebována přímo daným objektem, nebo se její přebytky prodávají do distribuční sítě. Je-li elektrická energie vyrobená fotovoltaickou elektrárnou spotřebována přímo v místě kde je vyrobena, ušetří investor za cenu elektrické energie, kterou by musel jinak nakoupit od distributora. [10]



Obr. 2 Budova jako zdroj proudu - průmyslová hala (převzato z [11])

2.3 Ostrovní systémy Off - grid

Není-li možnost využívat elektrickou energii dodávanou z distribuční sítě, využívají se ostrovní systémy off - grid. Tato situace většinou nastává na místech vzdálených od distribuční sítě, například na chatách, chalupách, zahradních domcích, karavanech či jachtách. Na takových místech se požaduje komfort domova v podobě poslouchání rádia, sledování televize, nabití notebooku nebo uchování potravin v ledniče, případně potřebujeme elektřinu k pohonu nějakého zařízení, například čerpadla. [12] Na obr. 3 je vidět schématické zapojení systému off - grid.



Obr. 3 Systém off - grid (překresleno z [8])

2.4 Drobné aplikace

Tyto aplikace tvoří nejmenší, ale nezanedbatelný podíl na trhu s fotovoltaikou. Do těchto drobných aplikací patří zejména FV článkem napájené kalkulačky, solární nabíječky akumulátorů, napájení parkovacích hodin nebo napájení dopravních semaforů. Trh s drobnými aplikacemi nabírá na významu, protože se zvyšuje poptávka zákazníků po nabíjecích zařízeních pro okamžité dobíjení baterek notebooků, mobilních telefonů, tabletů, fotoaparátů, atp., na dovolených, v kempech nebo jen ve volné přírodě. [8]



Obr. 4 Svítílina s fotovoltaickým článkem jako zdrojem proudu (převzato z [8])

3 Výhody a nevýhody solární energie

Sluneční energie a její využití má mnoho nesporných výhod. Bylo by ovšem vhodné zmínit zde i některé nevýhody využití sluneční energie.

Výhody: [13, 14]

– **určitá nezávislost**

- Určitá nezávislost je zde míněna tím, že FVE instalovány na rodinných domech jsou schopny pokrýt energetickou potřebu majitele. Tím se majitel stává v určité míře nezávislým na distribuční síti.

– **garantovaná životnost**

- Záruka na životnost (výkon) solárních panelů je 25 let. Výrobce garantuje, že po 12 letech bude mít panel 90 % svého výkonu a po 25 letech neklesne jeho výkon pod 80%. Proto je technicky možné, aby panel dodával svou energii i po 30-35 letech. Jedná se o technicky vysoce vyspělé zařízení (např. fotovoltaický panel má odolnost jako čelní sklo automobilu a je odolný do 150km/h rychlosti větru).

– **Bezúdržbovost**

- Bezúdržbovost je myšlena v případě využití několika málo fotovoltaických panelů, protože o areál větší FVE je nutné se bezesporu starat. Je možné s nadsázkou tvrdit, že po nainstalování FV systému už ho jen využíváme a vyděláváme (pokud tedy jsou již splacené počáteční investice). Solární panely není nutné čistit, nebo jakkoliv jinak o ně pečovat. Ovšem musí být počítáno s postupným snížením jejich účinnosti. V našich klimatických podmínkách je nutné také počítat s ročním obdobím. Pokud chceme aby FVE dodávala elektrickou energii i v zimě je potřeba sníh z panelů shrabat nebo využít jiného systému pro odstranění sněhu.

– **Nejčistější a navíc přímá přeměna energie**

- Toto tvrzení se týká samotného využívání fotovoltaické elektrárny, která na rozdíl od všech jiných elektráren (větrná, biomasa, vodní, uhelná, jaderná, atd.) nevytváří žádný odpad, popílek, plyn, pohyb, hluk, či pach. Opět zde nebyl zahrnut postup výroby a zpracování komponentů fotovoltaické elektrárny, při kterých odpad a škodlivé látky vznikají.

Nevýhody: [14]

- Protože přísun slunečního záření během roku kolísá, nelze tento zdroj využít jako samostatný zdroj tepla. Pro celoroční využití je třeba použít doplňkový zdroj energie, který bude pokrývat zvýšenou spotřebu v době, kdy je slunečního záření nedostatek.
- Poměrně vysoká počáteční finanční investice.
- S garantováním životnosti vyvstává otázka, zda firmy konstruující ať panely nebo celé elektrárny budou po celou dobu životnosti panelu existovat. Protože jak je vidět, boom s fotovoltaickými panely pomalu ustupuje a firmy buďto zaniknou nebo se přeorientují na jinou výrobu.
- Nemožnost vyhledání některých výrobců (zejména výrobci z Asie) z důvodu reklamace.
- Celková kvalita elektrárny je v nemalé míře závislá na výrobcu. Pokud bude chtít investor ušetřit na panelech či na příslušenství FVE (např. měniče) může se mu to v budoucnu velice vymstít.

- Při instalaci solární soustavy do stávajícího objektu jsou nutné jeho úpravy (zateplení, úprava topné soustavy, změna doplňkového zdroje).

Jednu z největších nevýhod FV panelů je jejich recyklace. Dvacet let životnosti fotovoltaických panelů se může zdát jako dlouhá doba, avšak kdo nám zaručí, že nově vybudované fotovoltaické elektrárny (FVE) budou v provozu po celou dobu životnosti fotovoltaických panelů a neskončí například při snížené podpoře výkupní ceny? A jaký bude osud FVE, jestliže její provozovatel upadne do konkurzu? [15]

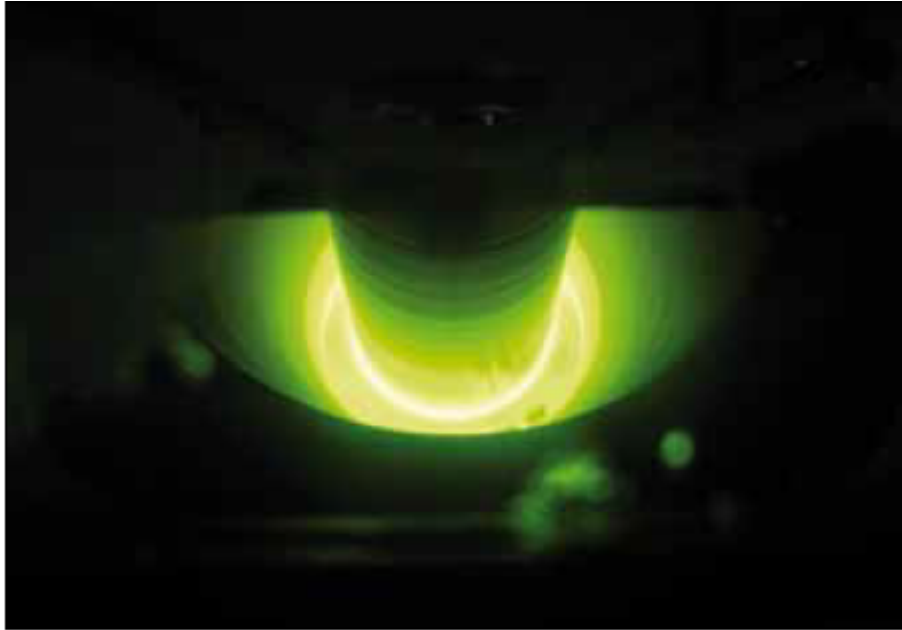
4 Výroba fotovoltaických článků

4.1 Monokrystalické články

Výroba monokrystalických ingotů je založena na tzv. Czochralského metodě. Do křemíkové taveniny o teplotě cca 1 415 °C se zanoří malý držák se zárodkem monokrystalu. Ponořený zárodek se v tavenině začne také tavit, tím se vytvoří vazba na taveninu (semínko). Zárodek společně se semínkem se vytahují z taveniny. Vytahování je rychlejší než při samotném růstu monokrystalu. Tímto způsobem vzniká úzký váleček (průměr jen několik mm). Účelem tohoto válečku je odstranění dislokací, vzniklých při ponoření zárodku do taveniny. Pokud byly odstraněny veškeré poruchy, je rychlost vytahování zárodku snížena. Snížením rychlosti monokrystal postupně narůstá a vzniká tzv. hlava. Poté následuje zarovnání monokrystalu tak, aby se již neměnil jeho průměr. V další fázi probíhá tažení těla monokrystalu. Toto tažení musí probíhat v inertní atmosféře, aby se zabránilo vniknutí nečistot do monokrystalu. Samotné tažení těla monokrystalu je záležitost několika desítek hodin.[16]

Z monokrystalického ingotu se po zchlazení odřízne hlava a špice. Poté, se monokrystalický ingot řeže¹ na malé destičky tzv. wafery, které jsou základem pro monokrystalický fotovoltaický článek. [16]

¹ monokrystalické ingoty se řežou diamantovou pilou



Obr. 5 Detail tažení monokrystalického ingotu v Jiaxingu (Čína) (převzato z [17])

4.2 Polykrystalické články

Polykrystalické ingoty se oproti monokrystalickým vyrábějí jednodušeji. Křemíková tavenina se nalije do formy o velikosti 40×40×40 cm. Hmotnost ingotu, který se vyjme z této formy je více než 100 kg [18]), kde se nechá pomalu chladnout. Chladnutí taveniny je pomalé a řízené indukčním ohřevem. V materiálu tak vzniknou velká monokrystalická zrna. Pomalým chladnutím se také zabraňuje vzniku dislokací v materiálu. Ingoty se po vychladnutí řežou na tenké destičky pomocí řezných diamantových drátů. [19]



Obr. 6 Nařezané křemíkové destičky (vlevo polykrystalická, vpravo monokrystalická) (převzato z [17])

4.3 Tenkovrstvé články

Při výrobě tenkovrstvých článků se materiál fotovoltaických článků (na rozdíl od výše popsaných metod) nanáší v tenké vrstvě několika mikrometrů na sklo. Kromě skla se používají i jiné levnější nosné materiály, např. plasty nebo kovové fólie. Teplota při výrobě tenkovrstvých článků je mezi 200 °C až 500 °C (na místo necelých 1500 °C u krystalických křemíkových článků). Zatímco při výrobě modulů krystalických fotovoltaických článků se články po článku jednotlivě vzájemně propojují pájením, je elektrické propojení tenkovrstvých článků integrováno již do výroby článků. Přední kontakty jsou zde tvořeny vysoce vodivou a průhlednou vrstvou oxidu kovu, tzv. TCO (Transparent Conductive Oxide). Obvyklé materiály TCO jsou oxid zinečnatý a oxid ciničitý. Vrstvy TCO jsou rozhodujícím nákladovým faktorem při výrobě tenkovrstvých článků. Články a moduly se vyrábějí kombinovaným procesem. Přitom se provádí elektrické oddělení a propojení článků strukturálními kroky zahrnutými do výrobního procesu. Jeden článek tak představuje dlouhý, jeden centimetr široký polovodičový proužek. [7]

Mezi tenkovrstvé se řadí amorfnní křemíkové články (a-Si), mikromorfnní solární články (μ -Si, A-Si), články na bázi teluridu kadmnatého (CdTe) a články CIS (Copper-Indium-diSelenid, dvojselenid mědi-india), o kterých bude pojednávat následující kapitola. [20]

4.4 Články CIS (Copper-Indium-diSelenid, dvojselenid mědi-india)

Technika CIS dosahuje v současné době nejvyšších účinností u tenkovrstvých technologií. Při výrobě se nosné sklo ve vakuové komoře při teplotě asi 500 °C potáhne tenkou kontaktní vrstvou, na kterou se nanese absorpční vrstva CIS s vodivostí typu P. Následující nárazníková vrstva² sulfidu kadmia s vodivostí typu n snižuje ztráty způsobené chybami v krystalové mřížce. Solární články CIS nepodléhají procesu stárnutí, které je vyvolané světlem. Jsou u nich však patrné problémy se stabilitou v horkém a vlhkém prostředí. Proto je potřeba dát pozor na kvalitní zapouzdření proti vlhkosti. Moduly CIS jsou tmavošedé až černé. [20]

² Povrchová vrstva, která zvyšuje odolnost proti chemickým látkám nebo korozi [20]



Obr. 7 CIS Tower Manchester - budova, kde při stavbě byly využity CIS články (převzato z [21])

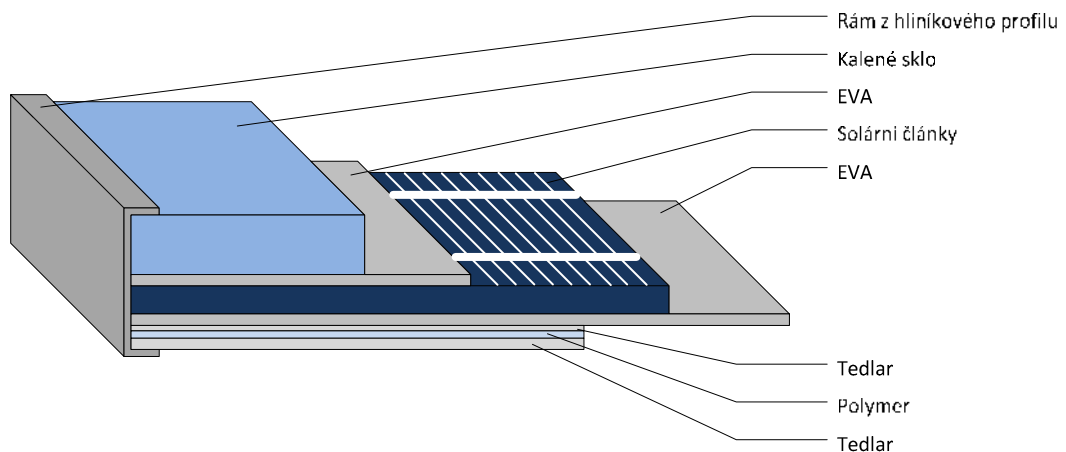
5 Technologie výroby fotovoltaického panelu

Při výrobě fotovoltaických modulů se jednotlivé FV články pokládají do sério-paralelních kombinací kvůli tomu, aby při jejich osvětlení poskytovaly požadované stejnosměrné napětí a požadovaný výkon. Maximální výkon je závislý zejména na velikosti celkové plochy fotovoltaického panelu. Celá montáž panelu začíná čelní stranou a skládá z několika důležitých částí a vrstev. Na jeho přední straně je temperované sklo³. Na spodní stranu skla se pokládá EVA folie a na ni se skládají propojené FV články. Přes propojené články se znovu

³ Je to tvrzené sklo, které se vyrábí tepelnou úpravou - kalením (změna vnitřního napětí - nové vlastnosti). Skla jsou velmi odolná proti nárazu a odolají i poměrně velkým kroupám a silnému větru

pokládá EVA fólie a zadní stěnu tvoří většinou laminátová kompozice PVF-PET-PVF (tedlar-polyetylentereftalát-tedlar⁴), jak je patrné z obr. 8. [19]

Tímto postupem se jednotlivé vrstvy naskládají na sebe, odčerpá se vzduch mezi jednotlivými vrstvami a polotovar se zahřeje nad teplotu tání etylen-vinyl acetátové fólie. Etylen-vinyl acetát se při zahřátí rozteče a zalije tak FV články v prostoru mezi předním sklem a zadní stěnou modulu. Aplikací etylen-vinyl acetátu v této oblasti se zabývá podrobněji kapitola 5.2 této práce.



Obr. 8 Jednotlivé vrstvy fotovoltaického panelu (překresleno z [19])

Poté se panely orámují a zatmelí silikonovým tmelem do speciálních hliníkových profilů a opatří krabičkou s výstupními kontakty. Zkompletované FV panely jsou tímto způsobem neprodyšně uzavřeny proti vodě a nečistotám. [17] Na závěr se provádí měření a testování panelu ve slunečním simulátoru. Podrobným popisem výroby fotovoltaického panelu se zabývá následující kapitola.

5.1 Postup výroby fotovoltaických panelů

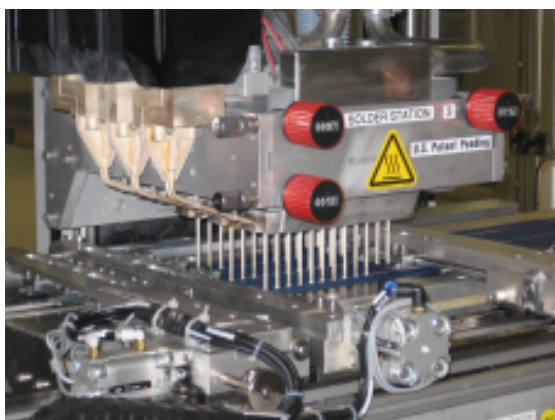
Postup výroby fotovoltaického panelu začíná na myčce skla. Je to automatické zařízení, které slouží k mytí a sušení vstupního materiálu, kterým je sklo. Práce probíhá tak, že do myčky jsou manuálně vloženy tabule skla (rozměry se liší v závislosti na požadované velikosti FV panelu). V krytém prostoru nejprve proběhne opláchnutí skla čistou vodou a

⁴ PVF - Tedlar - ochranná fólie s vysokou odolností používaná zejména ve fotovoltaických panelech [19]

následně je pomocí kartáčů umyto vodou s přísadou saponátu. Poté je sklo osušeno tlakovým vzduchem. Celý tento proces probíhá v uzavřeném okruhu.

Dalším krokem je pracovní stanice, kde se na připravenou skleněnou desku ručně pokládá EVA folie. Na této stanici je nutné odstranit veškeré vzduchové kapsy. Rozložení EVA folie musí být přesné a dokonalé.

V procesu dále následuje manuální vložení článků do zásobníku. Automatický podavač umístí jednotlivé články na pracovní plochu. Počet článků lze programově nastavit podle druhu sestavovaného panelu. Pracovní plocha má přesně dimenzovanou rozteč mezi jednotlivými články. Po umístění jednotlivých článků na pracovní plochu automat vzájemně proletuje jednotlivé články (obr. 9) do řady. Manipulátor (obr. 10) následně uchopí spojenou řadu článků pomocí přísavek (každý článek je uchopen přísavkou) a tuto řadu přemístí na kontrolní plochu. Zde průmyslová kamera vyhodnotí kvalitu letovaných spojů a kvalitu jednotlivých článků, zda-li při manipulaci nedošlo k jejich poškození. Je-li zjištěno, že některé řady článků jsou nekvalitní (chybné proletování, poškozený křemíkový článek), pracovník toto chybné letování opraví nebo vymění poškozenou křemíkovou destičku za novou.



Obr. 9 Propájení jednotlivých článků



Obr. 10 Manipulátor

Pokud poškození zjištěno není, pak manipulátor uchopí zkontrolovanou řadu a umístí ji na skleněnou tabuli s položenou EVA folií, která je pomocí automatického dopravníku umístěna do prostoru manipulátoru.

Po umístění všech článků na sklo, posune dopravník díl k další operaci, kterou je letování. Zde pracovníci připravují propojovací letovací pásky a propojují jednotlivé řady článků do obvodu. Následuje vizuální kontrola propojení článku.

Dopadne-li vizuální kontrola úspěšně, výroba pokračuje na další stanici. Na té se na polotovar položí EVA folie a speciální Backsheet⁵ folie. Další operací je protažení kontaktů pro připojení sběrnice. Poté je nutné odstranění vzduchu vyhlazením a příprava pro laminaci.

Laminace polotovaru se provádí v laminátoru (obr. 12). Operace probíhá v uzavřeném prostoru ve vakuu a při vysoké teplotě po dobu 15 min. Poté je polotovar automaticky vysunut z laminátoru a pokračuje na další pracoviště.



Obr. 11 Dopravník k laminátoru



Obr. 12 Laminátor

Na pracovišti Edge trim je polotovar umístěn na otočný stůl, kde se ručně oříznou folie, které přesahují hranu skleněné tabule. Následuje vizuální kontrola a přemístění k automatické rámovačce.

Automatická rámovačka je zařízení, které na polotovar vzniklý v laminátoru nasadí hliníkový rám. A to tak, že na polotovar jsou vloženy jednotlivé strany hliníkového rámu, následuje nástřik silikonu kvůli těsnění a poté automatické stlačení. Po uvolnění tlaku dochází k odstranění přebytečného silikonu a k vizuální kontrole (obr. 13).

Po dokončení těchto operací se modul měří a testuje. Slouží k tomu sluneční simulátor, kde je měřen výkon vyrobených panelů a dosahované elektrické parametry. Toto testování a měření je prováděno zvlášť na každém panelu (obr. 14).

Posledním krokem je připevnění sběrnice pomocí silikonového tmelu a kontrola obvodu. Postup výroby je graficky znázorněn na obr. 15.

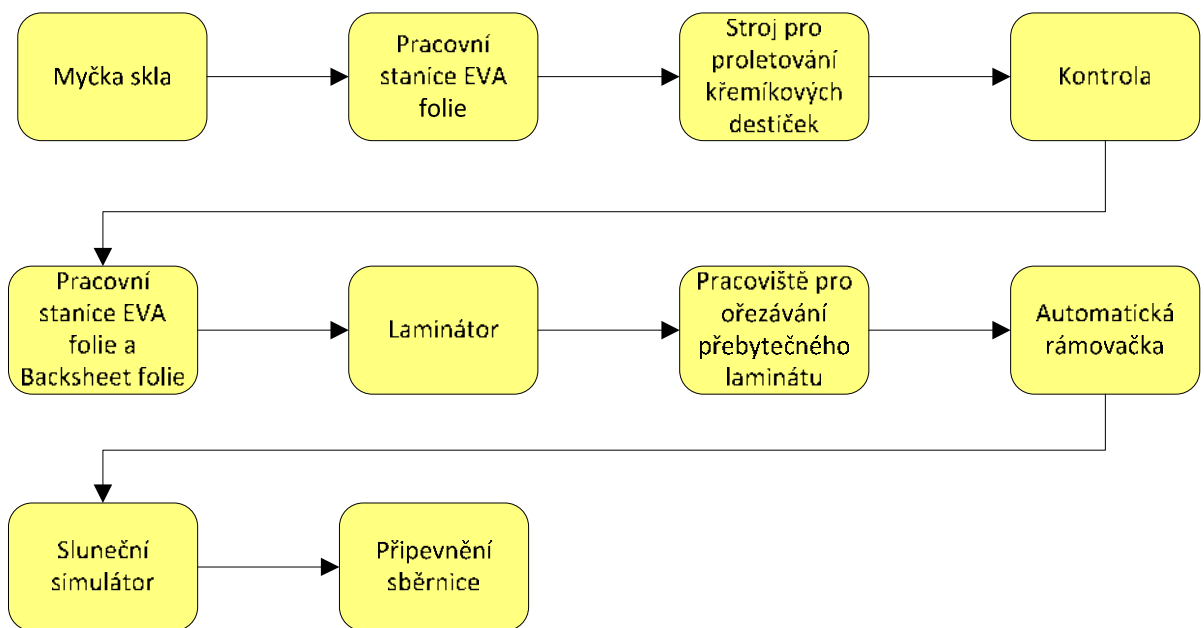
⁵ speciální laminátová kompozice PVF - PET - PVF (polyvinylidenfluorid-polyetyltereftalát-polyvinylidenfluorid) [19]



Obr. 13 Odstraňování přebytečného silikonu



Obr. 14 Sluneční simulátor



Obr. 15 Postup výroby FV článku

5.2 Etylen - vinylacetát (EVA)

Etylenvinyl - acetát je kopolymer, který vzniká kopolymerací etylenu a vinylacetátu. Mechanickými vlastnostmi se etylen - vinylacetát spíše blíží elastomerům, ale jeho zpracování se provádí jako u termoplastů. EVA se vyznačuje nízkou hustotou, vysokou pevností v tahu, pružností, odolností vůči ultrafialovému záření a povětrnostním vlivům a výbornými elektroizolačními vlastnostmi. Jak mechanické, tak i elektrické parametry EVA jsou závislé na koncentraci vinylacetátu ve výrobní směsi. Při nízkém obsahu vinylacetátu kolem 7 - 20 % vzniká polymer, který se vyznačuje vyšším stupněm krystalinity, což

způsobuje lepší elektrické parametry v porovnání s polymerem, který obsahuje 22 – 30 % vinyl acetátu. Tento druhý typ se vyznačuje lepšími mechanickými parametry, jako je pevnost v tahu a pružnost. [22]

Pokud budeme chtít zlepšit mechanické vlastnosti a zvýšit tepelnou odolnost, může se EVA síťovat. Pro sekundární síťování etylenvinyl acetátu existují dvě cesty. Buď radiačním zářením, nebo chemickou cestou. Chemická cesta je méně finančně náročná, proto i více využívaná. [23]

5.3 Použití EVA fólie při výrobě FV panelu

Na dnešním trhu existuje mnoho druhů fotovoltaických panelů (některé z nich byly popsány výše) od různých výrobců. Je na každém výrobcu jaký použije laminovací materiál, avšak každý z výrobců by si měl uvědomit, že funkce laminovacího materiálu v jakémkoliv FV panelu zůstává prvořadá, protože (jak bylo zmíněno v úvodu) významně ovlivňuje kvalitu celého FV panelu.

Ve fotovoltaických aplikacích je kopolymer EVA tvořen z 33 hmotnostních procent vinylacetátu. Molekulární složení pro tyto aplikace je - (CH₂-CH₂)₆₋₁₄-(CH₂-CHac), kde acacetát je skupina -OCOCH₃. Při nedodržení tohoto poměru dochází k rychlejšímu stárnutí materiálu. Ve fotovoltaické panelu se u EVA folie po několika letech provozu může začít objevovat zežloutnutí. Toto zežloutnutí bylo způsobeno kyselinou octovou vznikající při stárnutí materiálu (především za zvýšených teplot). [24]

Pro použití laminovacího materiálu EVA ve fotovoltaice je důležitá zejména jeho teplota skelného přechodu a teplota tavení. Teplota tavení je jednou z omezujících vlastností použití EVA folie ve fotovoltaickém průmyslu, protože nastává již při 65 °C (u zesíťovaného materiálu). Při použití ve fotovoltaických panelech může být tato hodnota z určité části překročena. Pokud bude tato teplota překročena o několik desítek stupňů, může dojít k teplotně degradačním účinkům a i ke změknutí laminovacího materiálu. V extrémním případě (panel však z konstrukčních důvodů neumožní) by mohlo dojít ke „stečení“ materiálu do spodní části fotovoltaického panelu. [25]

Existují čtyři základní úkoly laminovacího materiálu EVA ve fotovoltaickém panelu:

- poskytovat strukturální podporu a umístění pro solární články během manipulace, skladování, dopravy, montáže a instalace do provozu;
- dosažení a udržení maximálního optického spojení mezi fotovoltaickým článkem a dopadajícím slunečním zářením (ztráta menší než 5 % i po 20ti letech);
- poskytovat a udržovat fyzikální izolaci fotovoltaických článků a obvodových součástí před přírodními vlivy jako jsou např. reaktivní prvky, sloučeniny, soli, atd.;
- spolehlivá elektrická izolace fotovoltaických článků v provozu. [25]

6 Metody pro stanovení stupně síťování plastů

Pro zjištění stupně síťování plastů existuje několik metod a způsobů. Tato práce se zabývá zejména normou ASTM D2765 - 11a normou ČSN EN 579. Obě normy jsou založeny na extrakční metodě a budou blíže vysvětleny v následujících kapitolách. Jako další způsob pro zjištění stupně síťování plastů budou zmíněny i další metody. Mezi ně patří např. zkouška odolnosti prodloužení při tepelném a mechanickém zatížení (tzv. HOT SET test), která má základ v technické normě ČSN EN 60811 - 2 - 1. Dále bude zmíněna diferenční skenovací kalorimetrie (DSC), dynamická mechanická analýza (DMA) a infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací (FTIR). Všechny posledně jmenované metody jsou zmiňovány v této práci pouze jako alternativní, protože při jejich použití pro účely zjištění úrovně síťování plastů, nemají takovou vypovídací schopnost jako metody extrakční (normované).

6.1 Norma ASTM D2765 - 11

Pro určení stupně síťování plastů se nejčastěji používají extrakční metody. Pro tyto metody se používají rozpouštědla typu xylen nebo dekahydronaftalen. Po extrakci se počítá objem gelu (nerozpustné složky) v přípravku. Příprava a provedení extrakce jsou popsány v americké normě ASTM D2765 - 11. V této normě jsou uvedeny tři postupy pro určení stupně síťování plastů: Testovací metoda A, Testovací metoda B a Testovací metoda C. [26]

Testovací metoda A umožňuje úplnou extrakci za nejkratší dobu a v této normě se doporučuje jako metoda hlavní. Testovací metody B a C jsou alternativní. První z nich (testovací metoda B) se od hlavní metody A liší v přípravě vzorků. Při přípravě vzorků pro metodu A se používá hrubá drť. U metody B se používá vzorek ve formě hoblinek. Vzhledem k tomu, že celková plocha vzorku je u metody B menší než u hlavní metody A, výsledné

hodnoty jsou o 1 - 2 % nižší. Druhá z alternativních testovacích metod (metoda C) je určena zejména pro typy materiálů, pro které jsou výše jmenované metody příliš hrubé nebo jejich pracovní teploty jsou příliš vysoké. U této metody se připravuje navážka z jednoho kusu vzorku. [26]

Obecný postup pro všechny tři metody je stručně popsán v následujícím textu. Vzorky zesíťovaného plastu se zváží a po zvážení se ponoří do extrakčního rozpouštědla o dané teplotě a po určitou dobu (tyto parametry závisí na použité metodě)⁶. Po vyjmutí přípravku z extrakční aparatury se vzorky musí vysušit a znovu zvážít. Objem gelu tzv. swell ratio se spočítá podle následujícího vzorce [23]:

$$Swell\ ratio = \frac{W_2 - W_3}{(W_2 - W_1) - F \cdot (W_2 - W_1)} \cdot 100 = \frac{W_2 - W_3}{(1 - F) \cdot (W_2 - W_1)} \cdot 100[\%] \quad (6.1)$$

kde: W_1 je hmotnost klece,
 W_2 je hmotnost vzorku společně s klecí před extrakcí,
 W_3 je hmotnost vzorku společně s klecí po extrakci,
 F je poměrové množství pojiv.

Mnoho důležitých vlastností plastů se liší v závislosti na objemu gelu. Z tohoto důvodu je stanovení objemu gelu v plastech důležité, protože poskytuje informace o daném materiálu a díky tomu je zde možnost zvýšení kvality celkového výrobku. Extrakční testy umožňují ověřit správný objem gelu daného síťovaného plastu a také možnost porovnání plastů mezi sebou.

6.2 Norma ČSN EN 579

Další možností, jak určit stupeň síťování je extrakční metoda podle normy ČSN EN 579. Tato norma má také svůj mezinárodní ekvivalent, kterým je norma ISO 10147. Stejně jako v normě ASTM D2765 - 11 (testovací metoda B) se i v této normě připravují vzorky jako podélné hoblinky. Takto předpřipravený vzorek je vložen do kapsle, která je vyrobená z jemné ocelové síťoviny popř. se vzorek vloží do vaničky, ve které je navrtán velký počet otvorů. Tyto otvory zde musí být kvůli difundaci roztoku ke vzorku. [27] Testování vzorků je

⁶ **Testovací metoda A:** teplota 138 - 141 °C (xylen), 189 - 191 °C (dekahydronaftalen), doba trvání 6 hod (dekahydronaftalen), 12 hod (xylen); **testovací metoda B:** teplota 110 °C (silan), doba trvání 24 hod; **testovací metoda C:** teplota 27,3 °C (xylen), doba trvání 24 hod.

podobné testovací metodě B normy ASTM D2765 - 11. Vzorek zesítného plastu se zváží a po zvážení se ponoří do extrakčního rozpouštědla (zde je rozpouštědlem xylen). Xylen má ve chvíli ponoření vzorku teplotu nejméně 130 °C, což je jeho bod varu. Všechny vzorky musí být ponořené pod hladinu xylenu. Zkouška touto metodou probíhá po dobu 8 hodin ± 5 minut. Po 8 hodinách se přípravky vyjmou z rozpouštědla a vysuší se. Pro vysušení jsou v metodě uvedeny dva postupy. První postup je takový, že se vzorky přemístí na 3 hodiny do vakuové sušičky, která je předeřtá na teplotu 140 °C při tlaku vakua 85 kPa. Druhý postup je takový, že se vzorek přesune do pece s nuceným větráním. Teplota zde musí být jako v předešlém případě 140 °C. Po uplynutí 3 hodin se přípravek ochladí na okolní teplotu a znovu se váží. [23, 27]

Stupeň zesíťování se potom spočítá podle následujícího vzorce [23, 27]:

$$G_i = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 \quad (6.2)$$

kde: G_i je stupeň zesíťování každého zkušební tělesa, vyjádřený v procentech

m_1 je hmotnost klece a víka v miligramech,

m_2 je součet hmotností původního zkušební tělesa v miligramech,

m_3 je součet hmotností zbytku zkušební tělesa v miligramech.

Výsledek G_i se poté zaokrouhlí na celé číslo. [26]

6.3 HOT - SET test

Tato metoda má základ v normě IEC 60811-2-1, která má český ekvivalent v podobě normy ČSN EN 60811-2-1. Tato metoda se používá k určení poměrného prodloužení při tepelném a mechanickém zatížení. HOT SET test se používá v mnoha průmyslových odvětvích, kde se používají sítované plasty, pryže, elastomery. Stejně jako předchozí metody se HOT SET test používá pro určení stupně sítování plastů. V průmyslových odvětvích musí být výsledky testovaného materiálu známy velmi rychle a právě v tomto ohledu je HOT SET test mnohem lepší než extrakční metody (z časového hlediska). U této metody již po 15 minutách známe výsledek. [28] Extrakční metody jsou sice zdoluhavé, ale velice přesné. V porovnání s extrakční metodou je HOT SET test rychlý, ale méně přesný.

HOT SET test se velmi často používá také v kabelové technice, a proto následující text bude vztažen k měření kabelové izolace. Příprava měření probíhá tak, že se z pláště a izolace

každé žíly odříznou dva vzorky. Tyto vzorky mají definované rozměry a tvar lopatičky. U předpřipravených vzorků se vyznačí referenční značky, podle kterých po testu určíme měrné prodloužení. Tyto značky jsou ve vzdálenosti 20 mm od sebe. [29]

Zkouška se provádí v horkovzdušné komoře. Zkušební tělísko se v komoře volně zavěsí do speciálně připravených čelistí, přičemž jeho horní část je uchycena pevně v horní čelisti a dolní část ve spodní čelisti. Na spodní čelist se poté zavěsí závaží o takové hmotnosti, aby na zkušební těleso působila síla normou předepsaná pro daný materiál. Po 15 minutách se změří vzdálenosti mezi značkami. Zatížení zkušebních tělísek se potom odstraní a zkušební tělíska se nechají zotavit. Doba zotavení testovacího vzorku na 98 % je přibližně 5 minut při stanovené teplotě. [28] Následně se znovu změří vzdálenost mezi značkami. [29]

Pro určení poměrného prodloužení se používá následující vzorec: [30]

$$\varepsilon = \frac{d_1}{d_2} \cdot 100 [\%] \quad (6.3)$$

kde: d_1 je délka prodloužení oblasti, po 15 minutách zkoušky,
 d_2 je délka oblasti před zkouškou. [30]

Podmínkou pro splnění této zkoušky je, aby se zkušební vzorek nepřetrhl v důsledku působení závaží.

6.4 Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)

Diferenční skenovací kalorimetrie nebo-li DSC je termoanalytická technika. DSC může být použita k měření velkého množství charakteristických vlastností vzorku. Při použití této techniky je možné pozorovat fúzní a krystalizační události, stejně tak je možné pozorovat teploty skelného přechodu T_g . DSC se používá také ke studiu oxidací a dalších chemických reakcí. Se stoupající teplotou se amorfnní pevná látka stává viskózní. V určitém okamžiku získají molekuly dostatek volnosti a mohou se spontánně uspořádat do krystalické podoby. Tomuto jevu se říká teplota krystalizace (T_c). Tento přechod amorfnní látky do krystalické látky je exotermní proces a projeví se jako vrchol signálu DSC. Pokud se teplota působící na vzorek stále zvyšuje, vzorek dosáhne teploty tání T_m . To se projeví endotermickým vrcholem na křivce DSC. Schopnost zjistit přechodové teploty a entalpii staví DSC do pozice cenného nástroje pro vytváření fázových diagramů pro různé chemické systémy. [31]

Jak bylo zmíněno výše, DSC se široce používá k posuzování polymerních materiálů pro určení jejich tepelných přechodů. Tepelné přechody mohou být použity pro porovnávání materiálů. [31]

Samotné síťování je doprovázeno výraznou exotermní reakcí, jejíž entalpii lze pomocí DSC vyhodnotit. To nám umožňuje mimo jiné určit tzv. reziduální (zbytkovou) entalpii u částečně síťovaných vzorků. Tedy DSC může pomoci určit nepřímou i stupeň síťování. Tento postup byl také použit pro měření, které je uvedeno v kapitolách 7.5.1 a 7.5.2 této diplomové práce.

6.5 Dynamická mechanická analýza (DMA)

Dynamická mechanická analýza (DMA) se používá pro studium a chování kovových a polymerních materiálů. Na rozdíl od DSC je zde vzorek vystaven nejen teplotnímu, ale i mechanickému namáhání. Principem metody je sledování odezvy materiálu na tyto vibrace (buzené kmity). Testování vzorků touto metodou umožňuje zjistit skelný přechod, teplotu tání, teplotu krystalizace, stabilitu a viskozitu materiálu, úroveň krystalinity, atd. Z hlediska krystalinity může DMA poskytnout informace týkající se úrovně síťování, protože úroveň krystalinity ovlivňuje teplotu skelného přechodu. [23, 32]

6.6 infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací (FTIR)

Tato měřicí technika umožňuje záznam infračerveného spektra. Infračervené světlo je vedeno přes interferometr a pak přes vzorek. Pohybující se zrcadlo uvnitř přístroje mění rozložení infračerveného světla, které prochází interferometrem⁷. Signál je pak zaznamenán ve formě interferogramu. Ten ukazuje světelný výkon, který byl zachycen po odražení vnitřním zrcadlem. Pro zpracování dat je použita Fourierova transformace, která přepočítá změřená data do požadovaného výsledku, což je světelný výkon jako funkce vlnové délky. [33]

Infračervená spektroskopie je spolehlivá metoda široce využívaná jak v oblasti výzkumu, tak v oblasti průmyslu. Používá se v organické i anorganické chemii. Infračervená spektroskopie je také užitečná pro měření stupně polymerace při výrobě polymerů. Změny

⁷ Interferometr je optické zařízení, které rozděluje vlnu na dvě, které jsou v interferometru rozděleny, fázově zpožděny, je měněn směr, následně opět sloučeny a je detekována intenzita záření při jejich superpozici. [34]

charakteru nebo množství jednotlivých spojení se hodnotí pomocí měření při specifické frekvenci. Tento nástroj může zaznamenávat údaje velice rychle (až 32krát za sekundu), což umožňuje např. přesnější vyjádření chemických reakcí. [33] Tuto metodu je možné použít ke sledování změn, které probíhají během síťování. Při použití této metody pro zjištění síťování je potřeba se zaměřit na změny absorpance části spektra, které odpovídají strukturním změnám během síťování. [23]

7 Experimentální část

Experimentální část této práce se zabývá určením nejlepšího stupně pro síťování EVA folie. Nejlepší stupeň síťování je ten, kde je objem gelu větší než 65 %. Dodavatelem vzorků EVA folie (Vistasolar 486 - příloha A) byla firma Lintech Solar. Firma se zaměřuje na výrobu fotovoltaických panelů, kde je důležitým prvkem ovlivňujícím spolehlivost celého panelu právě folie EVA. Jak bylo zmíněno již dříve, EVA folie může ovlivnit životnost a účinnost fotovoltaického panelu. Síťování je proces, kdy na EVA folii působí zvýšená teplota a tlak a tím se zvyšuje objem gelu v materiálu. Proto cílem tohoto měření bylo zjistit objem gelu po extrakci v jednotlivých vzorcích, které byly síťovány za určité teploty. Přičemž pokud v daném vzorku bylo množství gelu větší než 65 % (jak bylo zmíněno výše) byla teplota síťování EVA folie dostatečná. Postup měření byl založen na metodě popsané v normě ASTM D 2765 – 01 a na normě ČSN EN 579.

Kromě analýzy úrovně síťování pomocí extrakce v xylenu, která tvoří jádro experimentální části této práce, byla uvažována i jedna z alternativních metod, která byla blíže popsána v kapitole 6.4. Jednalo se o diferenční skenovací kalorimetrii (DSC), jejíž výsledky jsou uvedeny v kapitole 7.5.

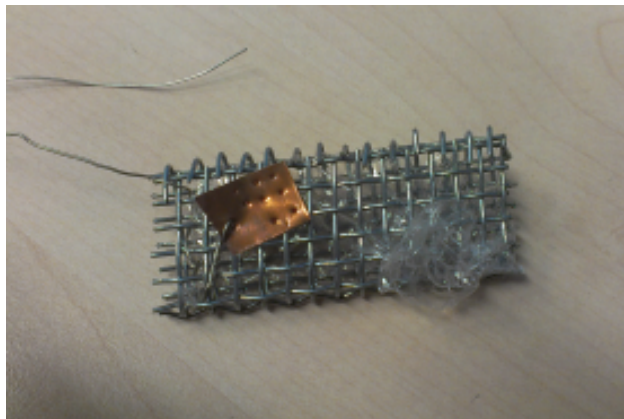
7.1 Příprava měření dle předpisu ETIMEX

Prvním krokem před měřením bylo z EVA folie ve formátu A4 vyrazit vzorky pro měření. K vyražení vzorků byl vyroben razník na míru z ocelového jákl profilu o rozměru 15×15 mm s vnitřním rozměrem 12×12 mm (rozměry vzorku byly tedy 12×12 mm). Tento razník byl na jednom konci naostřen. Vyrážení se provádělo na epoxidové desce s pryží.

K měření bylo použito celkem 9 sad s různou teplotou síťování, přičemž každá sada obsahovala 5 EVA folií ve formátu A4. Z každé EVA folie bylo pomocí razníku vyraženo 10 ks vzorků s rozměrem 12×12 mm. Tím pro každou teplotu síťování vzniklo 50 vzorků. Vzorky byly následně vloženy do uzavíratelných igelitových sáčků. Společně se vzorky EVA folie byl do sáčků vložen také silikagel kvůli omezení vzdušné vlhkosti. Poté byly sáčky umístěny do černé folie zabraňující průchodu světla. Bylo tak učiněno proto, že se EVA folie na světle samovolně dosítovává. Následně byly sáčky se vzorky vloženy také do lednice a to

ze stejného důvodu. Veškerá manipulace se vzorky byla prováděna v gumových rukavicích a s pinzetou tak, aby se omezila případná kontaminace vzorků.

V dalším stádiu příprav bylo potřeba vymyslet přípravky (kapsle), do kterých se vzorky z EVA folie budou vkládat. První kapsle byly vyrobeny z nerezového síta s oky o velikosti 3×3 mm, toto síto bylo naohýbáno dle potřeby tak, aby pojalo cca 1 g vzorku. Jak bylo následně zjištěno, takto vyrobené kapsle při měření nevyhovovaly, protože většina vzorků při vaření vytekla do rozpouštědla (viz obr. 16). Díky velkým okům tak vznikla chyba měření, která byla neakceptovatelná.



Obr. 16 Vytekla EVA folie v důsledku velkých ok síta

Z tohoto důvodu, bylo nutno přípravky pro měření modifikovat a měření provést znovu. Tvar kapslí musel být zároveň přizpůsoben kónusovému vstupu (29/32 mm) baňky. V dalších fázích experimentu bylo zjištěno, že lze použít měděnou trubku o průměru 22 mm, ze které byly nařezány jednotlivé kapsle o jmenovité délce 45 mm. Plášť kapslí byl následně provrtán na mnoha místech (40 děr ve 4 řadách) vrtákem o průměru 1 mm a jejich dno opatřeno fixním nerezovým sítkem (průměr oka cca 0,5 mm) - viz obr. 17. Vstup do kapslí byl z důvodu snadného přístupu nechán otevřen až do okamžiku těsně před zkouškou. Po vložení vzorků bylo použito k uzavření kapslí stejné nerezové sítko jako na dno kapsle.



Obr. 17 Výroba měděných kapslí

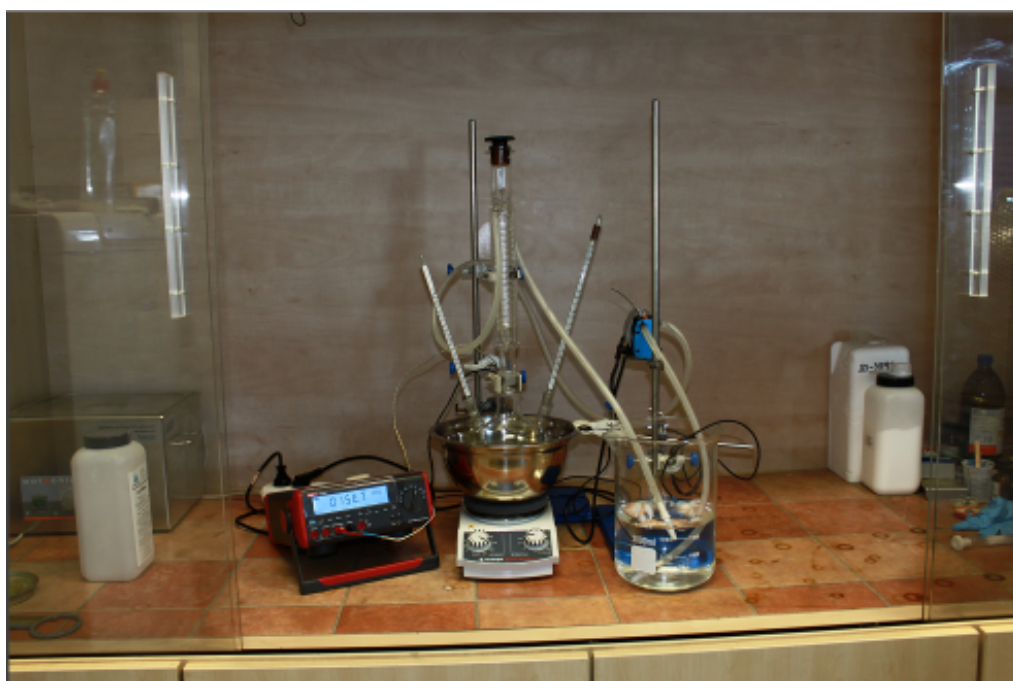


Obr. 18 Uzavřené kapsle s navázkou v igelitovém sáčku se silikagelem

Posledním krokem před samotným měřením bylo sestavení měřicí aparatury dle normy ASTM D 2765 – 01, která popisuje její konstrukční uspořádání.

Součástí laboratorního uspořádání byly následující části (viz obr. 19):

- spirálový chladič dle Dimrotha,
- teplotonosná látka ve formě silikonového oleje, jehož teplota byla sledována jedním termočlánkem,
- plotýnkový vařič s magnetickou míchačkou (tělísko umístěno v oleji),
- xylen, jehož teplota byla sledována dvěma teploměry (jeden sledoval teplotu par, druhý teplotu samotného xylenu),
- okružové čerpadlo pro chladič chlazený vodou,
- skleněná baňka o objemu 1000 ml.



Obr. 19 Extrakční kolona - laboratorní uspořádání

7.2 Průběh měření dle předpisu ETIMEX

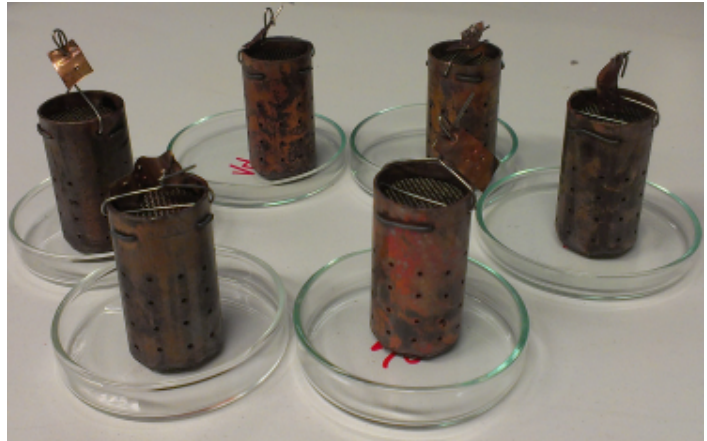
Samotné kapsle byly nejprve naplněny jednotlivými vzorky z EVA folie a uzavřeny nerezovým sítkem, které bylo upevněno vazačským drátem. Každá z kapslí byla následně označena měděným štítkem. Kapsle musely být před měřením zváženy na analytických vahách s přesností na 4 desetinná místa (tj. X.XXXX g). Četnost kapslí pro každou sadu vzorků byla 3.

Hmotnost kapsle před vařením byla zaznamenána do tabulky. Bylo také potřeba zvážit Petriho misku (PM), protože po vyjmutí z baňky se kapsle na PM pokládala a někdy se kapsle

k Petriho misce přilepila. Proto veškeré vzorky byly po vyjmutí váženy s PM. Petriho miska byla označena stejným symbolem jako kapsle s navázkou.



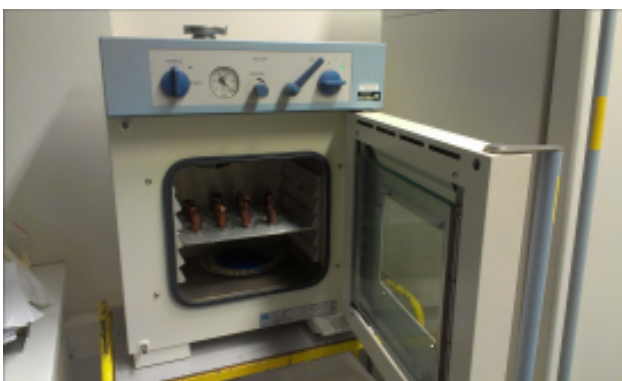
Obr. 20 Analytické váhy



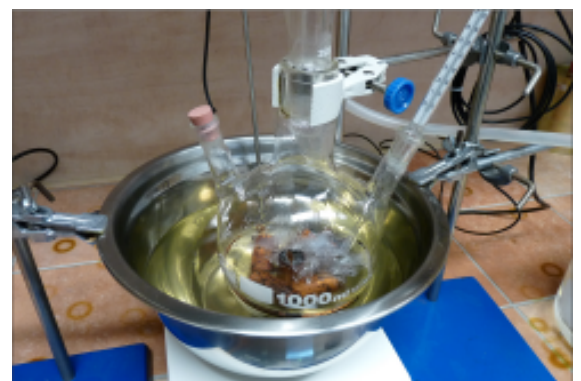
Obr. 21 Kapsle po extrakci na PM

Pro každé měření bylo použito 100 ml xyleny. Množství xyleny bylo odměřeno v odměrné kádince a z té se poté xylen nalil do skleněné baňky.

Před vložením kapslí do xyleny bylo potřeba zahřát xylen na teplotu varu, která je cca 130 °C. Aby teplota xyleny dosáhla bodu varu, musel mít silikonový olej teplotu přibližně 160 °C. Pro urychlení ohřevu silikonového oleje byla použita magnetická míchačka. V okamžiku ohřátí xyleny na bod varu byla uvolněna baňka a byly do ní opatrně vsunuty kapsle s navázkami. Xylen byl následně udržován na teplotě varu po dobu 4 hodin, kdy se vzorky extrahovaly. Kontrola teploty byla prováděna průběžně pomocí dvou teploměrů (jeden měřil teplotu xylenových par, druhý teplotu uvnitř samotného xyleny) a jednoho termočlánku, který měřil teplotu silikonového oleje.



Obr. 22 Vakuová sušička



Obr. 23 Skleněná baňka s kapslemi v silikonové lázni

Celý měřicí systém bylo díky vysokým teplotám nutno také průběžně chladit. Chlazení se provádělo pomocí spirálového chladiče, okružového čerpadla a studené vody. Voda byla napuštěna v 3000 ml kádi, kam byl v průběhu extrakce dodáván led pro její ochlazení.

Během extrakce byla zapnuta vakuová sušička, která musela být vždy předehřátá na 80 °C před vyjmutím vzorků z extrakční kolony. Předehřev trval asi dvě a půl hodiny, po kterých si již sušička udržovala konstantní teplotu. Mezi jednotlivými extrakcemi byly připravovány a váženy další sady vzorků, aby nedocházelo k časovým prodlevám, protože toto měření bylo velice časově náročné. Po uplynutí 4 hodin byl opatrně vylit xylen do předem připravené lahve a vzorky byly pomocí pinzety vyjmuty na Petriho misky. Během pár minut byly vzorky přemístěny do předehřáté vakuové sušičky, kde byly vzorky vysušovány po dobu dalších 4 hodin. V průběhu sušení se musela omýt baňka, ve které se vařily vzorky, protože po extrakci zbyly na stěnách nepatrné částičky EVA folie, což by při dalších měřeních mohlo způsobit chybu. Teprve po umytí a vypláchnutí baňky mohl začít proces vaření dalších vzorků.

Po 4 hodinách sušení byly vzorky vyndány z vakuové sušičky. Bylo tak učiněno pomocí pracovních rukavic, protože kapsle s PM byly horké. K vychladnutí stačilo pár vteřin a kapsle bylo možné znovu zvážit na analytických vahách (tentokrát po extrakci). Hodnoty hmotnosti byly opět zaznamenány do připravené tabulky.

7.3 Postup vyhodnocení měření

Po zvážení posledního extrahovaného vzorku byly všechny hodnoty přepsány do MS Excelu. Pomocí tohoto programu byly prováděny veškeré dílčí výpočty potřebné ke zjištění objemu gelu v každém ze vzorků. Z dílčích výpočtů bylo následně dosazeno do hlavního vzorce pro výpočet objemu gelu:

$$\text{objem gelu} = \frac{\text{hmotnost vzorku po extrakci}}{\text{hmotnost vzorku před extrakcí}} \cdot 100 [\%] \quad (7.5)$$

Konkrétní dílčí výpočty jsou vidět v příloze F této práce.

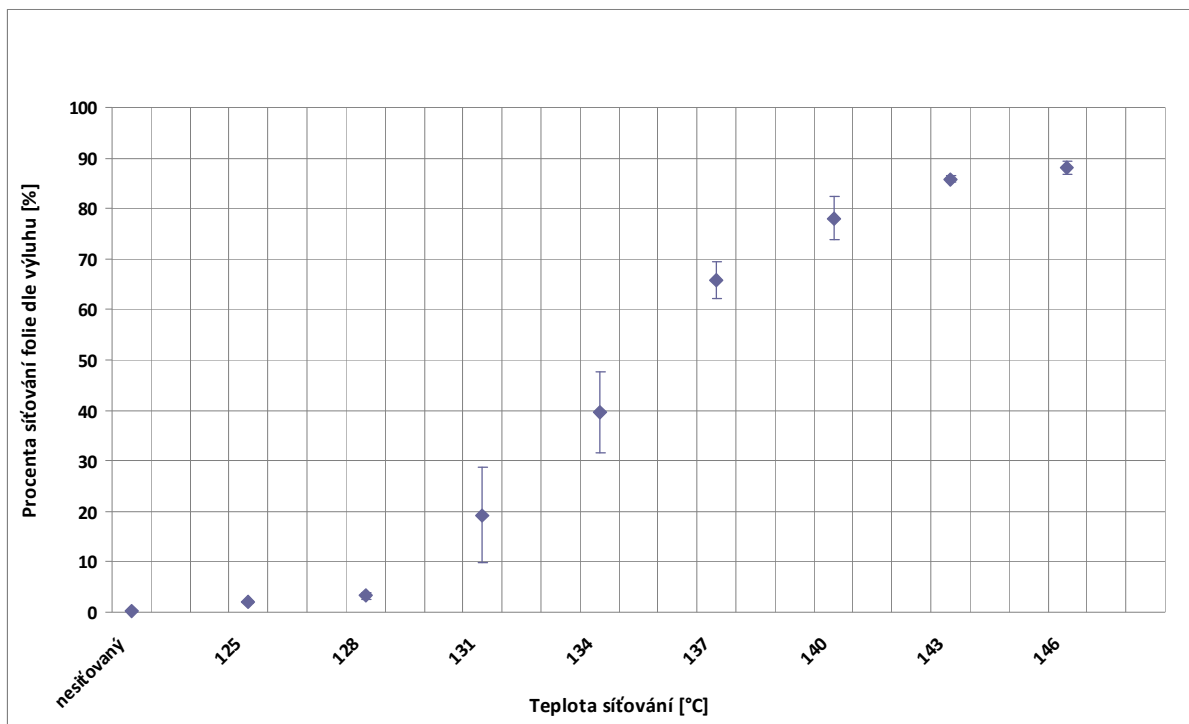
7.4 Výsledky dosažené extrakční metodou

Jak je patrné z tabulky 1, nejvyšší stupeň síťování EVA folie byl naměřen u následujících sad vzorků: sada 5, 6, 7 a 8. Tyto sady byly síťovány při teplotách 137 °C, 140 °C, 143 °C a 146 °C. Ve všech těchto případech přesáhlo množství gelu minimální požadovanou hranici 65 %. U sady vzorků č. 8 bylo měřením zjištěno vůbec největší množství gelu. Objem gelu zde byl 88,12 %, což je o 23,12 % více, než byl požadavek. Z toho vyplývá, že nejvyššího stupně síťování lze dosáhnout použitím nejvyšší teploty, tj. 146 °C. Na druhou stranu je nutné zvážit energetickou náročnost tohoto teplotního programu, protože požadovaný minimální stupeň síťování (65 %) lze dosáhnout i s použitím výrazně nižší teploty (137 °C).

Tab. 1 Množství gelu v jednotlivých vzorcích

	teplota [°C]	% gel (četnosti)	% gel (průměr)	Sm. odch.	Var. koef.	stupeň síťování podle normy (>65%)
Sada 1	125	2,0326	2,0489	0,3542	0,1729	Nedostatečné
1 až 5		1,6235				
		2,4907				
Sada 2	128	2,5498	3,2659	0,5652	0,1731	Nedostatečné
6 až 10		3,3162				
		3,9316				
Sada 3	131	10,3794	19,2471	9,4827	0,4927	Nedostatečné
11 až 15		14,9685				
		32,3933				
Sada 4	134	29,0116	39,5988	7,9770	0,2014	Nedostatečné
16 až 20		48,2660				
		41,5189				
Sada 5	137	66,9639	65,7378	3,6724	0,0559	Dostatečné
21 až 25		60,7542				
		69,4954				
Sada 6	140	71,9696	78,0730	4,3514	0,0557	Dostatečné
26 až 30		81,8059				
		80,4433				
Sada 7	143	86,8397	85,8575	0,7042	0,0082	Dostatečné
31 až 35		85,5087				
		85,2240				
Sada 8	146	89,2556	88,1236	1,3191	0,0150	Dostatečné
36 až 40		88,8418				
		86,2735				
Sada 9	bez síťování	0,1143	0,1913	0,0659	0,3444	Nedostatečné
41 až 45		0,1844				
		0,2752				

Procentní množství gelu ve vzorcích EVA folie bylo přeneseno do grafu, který je uveden na obr. 24. Zde můžeme vidět trend, kdy s rostoucí teplotou roste i objem gelu. Pokud by byla teplota síťování dále zvyšována, došlo by k saturaci v hodnotách úrovně síťování, objem gelu by se nadále již neměnil a výrobní proces by se stával neefektivním.



Obr. 24 Vliv velikosti síťovací teploty na úroveň síťování testované EVA folie

7.5 Měření pomocí DSC

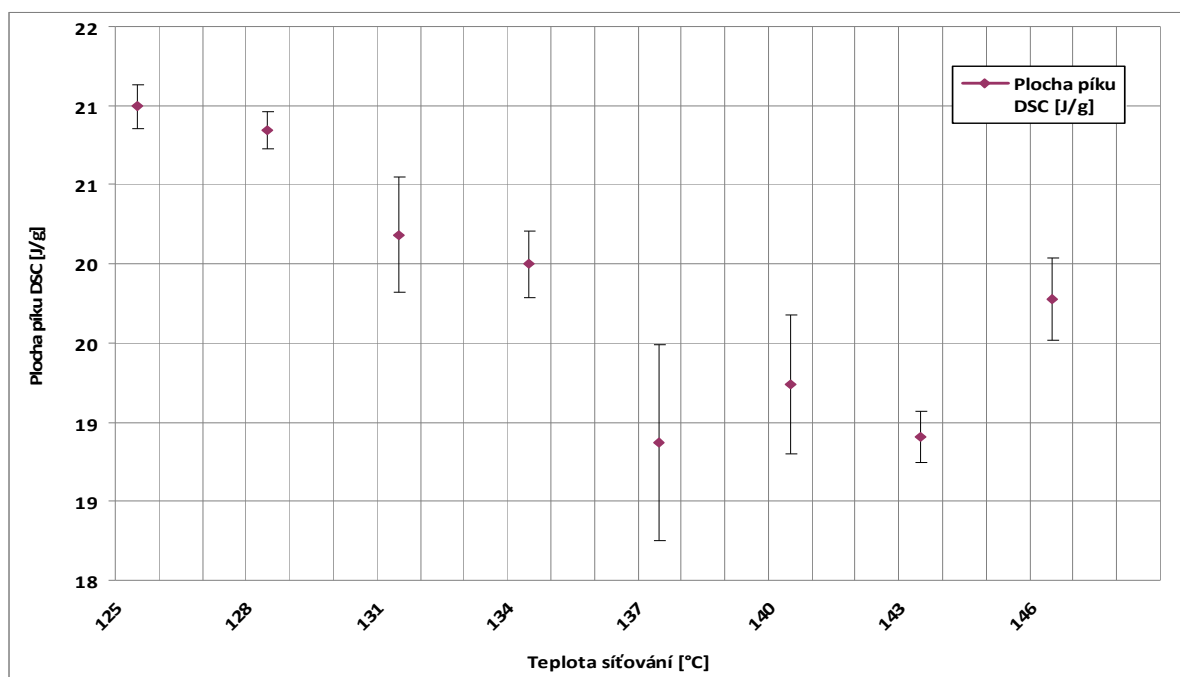
Jak bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, kromě extrahování vzorků v xylenu, byly dodané vzorky testovány také pomocí DSC. Tato měření probíhala ve spolupráci s laboratoří strukturálních analýz na Katedře technologií a měření, jejíž pracovníci prováděli samotné testování. Měření na DSC tvoří hlavní část této práce, proto budou v následujícím textu uvedeny pouze výsledky experimentu. Naměřené hodnoty jsou zařazeny pouze jako možnost srovnání metod.

K měření bylo použito dvou přístrojů a to DSC/TGA Q600 (viz příloha D) a DSC Q2000 (viz příloha E). Tyto přístroje jsou založeny na stejné metodě měření, avšak každý z nich má jiné konstrukční uspořádání.

7.5.1 Měření pomocí DSC/TGA Q600

Tab. 2 Výsledky měření pomocí DSC/TGA Q600

	Číslo vzorku	Teplota síťování [°C]	Plocha píku DSC [J/g]	Průměr [J/g]	Sm. odch. [J/g]
Sada 1	3	125	21,19	21,00	0,14
	4		20,87		
	5		20,93		
Sada 2	8	128	20,78	20,84	0,12
	9		21,01		
	10		20,74		
Sada 3	13	131	19,81	20,18	0,37
	14		20,68		
	15		20,06		
Sada 4	18	134	20,09	20,00	0,21
	19		19,71		
	20		20,20		
Sada 5	23	137	19,03	18,87	0,62
	24		19,54		
	25		18,05		
Sada 6	28	140	19,85	19,24	0,44
	29		19,05		
	30		18,82		
Sada 7	33	143	18,69	18,91	0,16
	34		19,06		
	35		18,97		
Sada 8	38	146	20,07	19,78	0,26
	39		19,83		
	40		19,44		
Sada 9	43	nesíťovaný	23,15	23,49	0,40
	44		23,28		
	45		24,05		

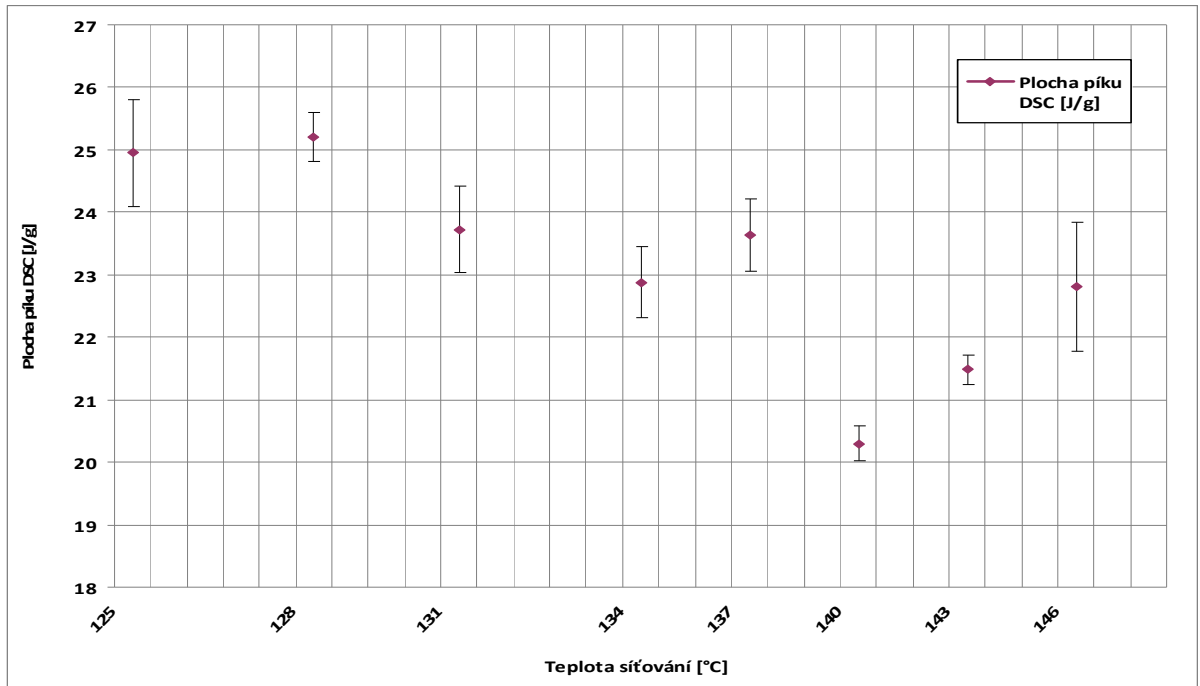


Obr. 25 Grafické znázornění výsledků měření pomocí DSC/TGA Q600

7.5.2 Měření pomocí DSC Q2000

Tab. 3 Výsledky měření pomocí DSC Q2000

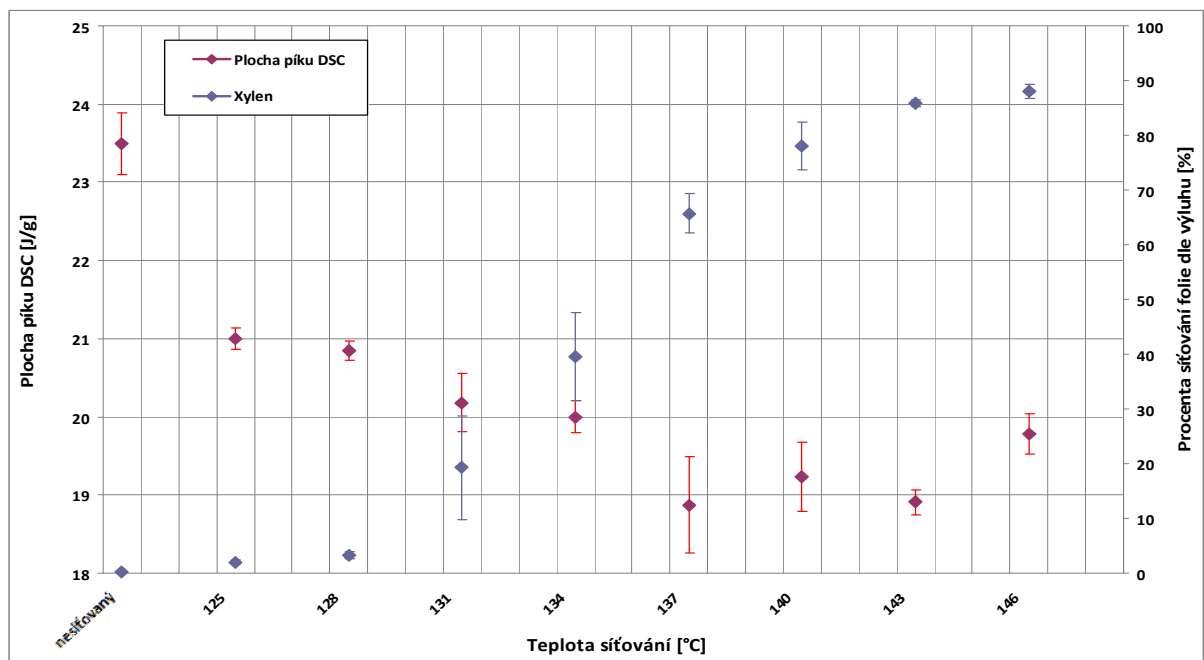
	Číslo vzorku	Teplota síťování [°C]	Plocha píku DSC [J/g]	Průměr [J/g]	Sm. odch. [J/g]
Sada 1	1	125	23,95	24,95	0,85
	2		26,04		
	3		23,96		
	4		25,58		
	5		25,24		
Sada 2	6	128	25,35	25,21	0,39
	7		25,77		
	8		24,96		
	10		24,75		
Sada 3	11	131	23,78	23,72	0,70
	12		24,72		
	13		23,71		
	14		22,54		
	15		23,86		
Sada 4	18	134	23,68	22,88	0,57
	19		22,47		
	20		22,48		
Sada 5	23	137	24,21	23,64	0,58
	24		23,06		
	25		X		
Sada 6	28	140	20,02	20,30	0,27
	29		20,57		
	30		X		
Sada 7	33	143	21,24	21,48	0,24
	34		X		
	35		21,72		
Sada 8	38	146	24,18	22,81	1,04
	39		22,59		
	40		21,67		
Sada 9	43	nesíťovaný	24,09	24,03	0,19
	44		23,78		
	45		24,23		



Obr. 26 Grafické znázornění výsledků měření pomocí DSC Q2000

7.5.3 Porovnání výsledků měření DSC s extrakční metodou

Z hlediska teoretických předpokladů vyšel lépe experiment měření pomocí DSC/TGA Q600, než pomocí DSC Q2000. Na obr. 25 je možné pozorovat klesající trend potřebné energie (J/g) na dosíťování vzorků EVA. Po srovnání měření pomocí DSC/TGA Q600 a extrakční metody (obr. 27) je vidět určitá korelace obou metod, avšak měření pomocí xylenu bylo přesnější a jeho výsledky jsou spíše akceptovatelné, než měření pomocí DSC.



Obr. 27 Grafické srovnání metod měření pomocí DSC/TGA Q600 a pomocí extrakce

Závěr

Diplomová práce se zabývala stanovením stupně síťování etylen - vinyl acetátové laminovací folie extrakční metodou. Extrakční metoda se používá pro stanovení objemu gelu ve vzorcích a je jediná akceptovatelná s velice přesnými výsledky měření, což dokazuje i praktická část této diplomové práce.

Z pohledu struktury byla diplomová práce rozdělena do dvou hlavních částí. Na část teoretickou a část experimentální. V teoretické části byly popsány základní aspekty přeměny solární energie. Byly zde zmíněny také výhody a nevýhody fotovoltaické energie. Dále následovala část o využití solární energie. Podstatný úsek teoretické části tvořila výroba a popis konstrukce fotovoltaického panelu. V další části diplomové práce byla provedena rešerše a popsání metod, které je možné použít pro stanovení stupně síťování plastů. Byly zde uvedeny dvě extrakční metody a pět alternativních metod. Toto byla závěrečná kapitola teoretické části a dále práce pokračovala částí experimentální.

Hlavním praktickým cílem diplomové práce bylo na dodaných vzorcích EVA folie změřit stupeň síťování pomocí extrakční metody. A z výsledků následně vyhodnotit, jaký z dodaných vzorků má nejlepší stupeň síťování. Pomocí extrakční metody bylo změřeno, že při teplotě 146 °C bylo dosaženo maximálního síťování materiálu. Tato teplota odpovídala sadě vzorků označené číslem 8. Vzorky v této sadě obsahovaly více jak 88 % gelové složky.

Sada číslo 8 není jediná, která měla více jak 65 % gelové složky. Jak je zmíněno výše, nad 65 % gelu měly také sady vzorků číslo 5, 6 a 7. Pokud bude cena síťování ovlivňovat cenu celého panelu, bude záležet pouze na výrobcu, zda bude chtít investovat do optimalizace výroby a zda použije ten či onen teplotní profil síťování. Z hlediska výrobce by bylo vhodné použít sadu vzorků číslo 5, která testem prošla o 0,73 %. Náklady na její zesíťování nebudou takové jako u sady vzorků číslo 8.

Seznam literatury

- [1] DIVIŠ, Jozef. Polovodiče. *Základy elektroniky* [online]. 2012 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zel/pn.htm>
- [2] POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. *ELEKTRO: Fyzikální podstata fotovoltaiické přeměny solární energie* [online]. 2005, č. 1 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/sv010532.pdf>
- [3] Kvantová mechanika: Pásová teorie pevných látek. [online]. 2010 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://imhfyzikafbi.wz.cz/prednaskyIFpdf/pasova%20teorie%20pevných%20latek.pdf>
- [4] Cs.scribd: Polovodiče. [online]. 2010, 2013 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://cs.scribd.com/doc/25145109/3-Polovodi%C4%8De>
- [5] Polovodiče: Polovodič typu P. [online]. 2008 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://oktava.gvn.cz/predmety/fyzika7a-polovodice.pdf>
- [6] REICHL, Jaroslav. Fyzikální podstata přechodu pn. In: [online]. 2006 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/265-fyzikalni-podstata-prechodu-pn>
- [7] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaiika: Budovy jako zdroj proudu*. 1. vyd. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [8] Czech RE Agency: Fotovoltaiika pro každého. [online]. 2003, 2009 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaiika#syst1>
- [9] Czech RE Agency: Fototermika. [online]. 2003, 2009 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fototermika>
- [10] Solareni. *Systémy připojené na síť* [online]. 2012, 2013 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.solareni.cz/slunecni-elektrarny/typy-instalaci/fve-pripojene-na-sit/>
- [11] PROWIND. *Fotovoltaiika - praktické informace: Umístění fotovoltaiické elektrárny* [online]. 2009 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.prowind.cz/fotovoltaiika-prakticke-informace.php>
- [12] Solareni. *Ostrovni systémy* [online]. 2012, 2013 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.solareni.cz/slunecni-elektrarny/typy-instalaci/off-grid-ostrovni-system/>
- [13] Solární energie. *Výhody a nevýhody solární energie* [online]. 2011 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.solarni-energie.info/vyhody.php>
- [14] DOKTORKA.CZ. *Výhody a nevýhody solární energie* [online]. 2010 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://zdravy-domov.doktorka.cz/vyhody-a-nevyhody-solarni-energie/>
- [15] BENEDIKT, Pavel. *Analýza dlouhodobého provozu fotovoltaiické elektrárny nad 100 kW*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. ZČU. Vedoucí práce Pavel Štekl.
- [16] ŠUK, Tomáš. Pctuning. *Od písku k procesoru: Výroba křemíkového waferu* [online]. 2012 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: <http://pctuning.tyden.cz/hardware/procesory-pameti/24350-od-pisku-k-procesoru-vyroba-kremikoveho-waferu?start=4>
- [17] POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. *ELEKTRO: Konstrukce a výroba fotovoltaiických článků a panelů* [online]. 2010, č. 3 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40646
- [18] JOHANSSON, Thomas B., Henry KELLY, Amulya K. REDDY a Robert H WILLIAMS. *Renewable energy: Sources for fuels and electricity* [online]. Connecticut Avenue NW, Washington, D.C.: Island Press, 1993, 1071 s. [cit. 2013-04-09]. ISBN 1-55963-139-2. Dostupné z:

- http://www.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=40XtqVMRrOUC&oi=fnd&pg=PA337&dq=production+of+polycrystalline+ingots&ots=j_HuD_lSu&sig=j-1fJsLDMcrQd-5y0_tyICruqys&redir_esc=y#v=onepage&q=production%20of%20polycrystalline%20ingots&f=false
- [19] POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. *ELEKTRO: Fotovoltaická transformace energie* [online]. 2010, č. 2 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40431
- [20] KAPUR, V.K., R.D. MCCONNELL, D. CARLSON, G.P. CEASAR a A. ROHATGI. *Photovoltaics for the 21st. century* [online]. Salem, Massachusetts: Clearance Center, 1999, 117 s. [cit. 2013-04-09]. ISBN 1-56677-233-8. Dostupné z: <http://books.google.cz/books?id=o0VYDjHmUGsC&pg=PA79&dq=CIS+cells&hl=cs&sa=X&ei=BCJkUZDmOObh4QSE4YD4CQ&ved=0CDMQ6AEwAQ#v=onepage&q=CIS%20cells&f=false>
- [21] CIS Tower Manchester. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cc/CIS_Tower_Manchester.jpg
- [22] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠNUPÁREK. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7.
- [23] ČERMÁK, Michal. *Analýza úrovně síťování kabelové izolace vedoucí*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. ZČU. Vedoucí práce Radek Polanský.
- [24] CZANDERNA, Alvin W. a John F. PERN. *Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review. Solar energy materials and solar cells*. 1996, 81 s. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0927-0248\(95\)00150-6](http://dx.doi.org/10.1016/0927-0248(95)00150-6).
- [25] BARTUŇKOVÁ, Monika. *Analýza síťování ethylen-vinyl acetátu používaného ve fotovoltaických panelech*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. ZČU. Vedoucí práce Radek Polanský.
- [26] ASTM D 2765 - 01. *Standard test methods for determination of gel content and swell ratio of crosslinked ethyleneplastics*. Barr Harbor Drive, 2006.
- [27] ČSN EN 579. *Plastové potrubní systémy - Trubky ze síťovaného polyethylénu (PE-X) - Stanovení stupně zesíťování extrakční metodou*. Plasy, Český Normalizační Institut, 1996.
- [28] Determination of thermal stretching and thermal shrinkage by the hot set method. In: [online]. [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: <http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=0CH4QFjAJ&url=http%3A%2F%2Fwww.tradekey.com%2Fbrochure%2F28968-2145319-4%2F.pdf&ei=PyZkUb-HH4LTtAb6r4HYCg&usg=AFQjCNGmsNeUsfOZeTJFnSTpUEM6o7GbvQ&bvm=bv.44990110,d.Yms>
- [29] ČSN EN 60811 - 2 - 1. *Všeobecné zkušební metody izolačních a plášťových materiálů elektrických a optických kabelů: Specifické metody pro elastomerové směsi - Zkouška odolnosti vůči ozónu, poměrné prodloužení při tepelném a mechanickém zatížení a zkouška ponořením do minerálního oleje*. Praha: ČSN, 1999.
- [30] ČSN EN 60811 - 1 - 1. *Všeobecné zkušební metody izolačních a plášťových materiálů elektrických kabelů - Metody pro všeobecné použití - Měření tlouštěk a vnějších rozměrů - Zkoušky pro stanovení mechanických vlastností*. Praha: ČSN, 1997.
- [31] Differential scanning calorimetry. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-04-09]
- [32] Dynamic mechanical analysis. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-04-09].

- [33] Fourier transform infrared spectroscopy. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-04-09].
- [34] JEŘÁBEK, Vítězslav. *Optické interferometry - příklady* [online]. Praha, 2008 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CD8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.micro.feld.cvut.cz%2Fhome%2FX34NOS%2Fvicieni%2FMach-Zehenderuv%2520interferometr%2520a%2520prikklady.ppt&ei=dXt-Uae7PMaVtQaF4IHOCQ&usg=AFQjCNHaNwQQ3QgsEa65KPAwRMcQcHoqWw&sig2=N6ElkIdj4qhEeUw7jb51KA&bvm=bv.45645796,d.Yms>. Prezenatce. ČVUT.
- [35] TA Instruments SDT-Q600 Simultaneous TGA / DSC. *Artisan technology group* [online]. 2012 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: http://www.artisan-tg.com/Scientific/74393/TA_Instruments_SDT_Q600_Simultaneous_TGA_DSC
- [36] TA Instruments - Thermal Analysis and Differential Scanning Calorimeters. *Semiconductor-technology.com* [online]. 2012 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://www.semiconductor-technology.com/contractors/test/waterchinaltd/waterchinaltd2.html>

Seznam příloh

Příloha A - Materiálový list EVA

Příloha B - Základní technické specifikace stolního digitálního multimetru UNI - T UT804

Příloha C - Technické specifikace vakuové sušičky VACUCELL VUK-B2V/VU 22

Příloha D - Technické specifikace DSC Q600

Příloha E - Technické specifikace DSC Q2000

Příloha F - Kompletní výsledky měření extrakce EVA folie

Přílohy

Příloha A - Materiálový list EVA folie



Product Data Sheet
VISTASOLAR® EVA Encapsulant
 Type: 486 – Fast Cure – Transparent



SOLUTIA SOLAR GMBH
 A subsidiary of Eastman Chemical
 Industriestr. 3
 D-89165 Dietenheim Germany
 Telephone: +49 (0) 7347 9223-0

Technical Properties	Test method	Unit	Uncured	Cured
Density	ISO 1183-3	g/cm ³	0.95	0.96
Tensile strength	MD ISO 527-3 TD	N/mm ²	6-7 6-7	20-25 ⁽¹⁾ 20-25 ⁽¹⁾
Elongation at break	MD ISO 527-3 TD	%	> 1,000 > 1,000	> 500 - 700 ⁽¹⁾ > 500 - 700 ⁽¹⁾
Secant modulus at 1% elongation	ISO 527-3	N/mm ²	5-8	10-14 ⁽¹⁾
Shrinkage on glass (120°C/5 min)	Solutia Internal	MD%	–	< 5
		TD%	–	< 5
Hardness shore A	DIN 53 505	–	–	68-72 ⁽¹⁾
Thermal elongation at temperature	ISO 11359-2			
< -43°C (glass transition)		K ⁻¹	1.0 x 10 ⁻⁴	.90 x 10 ⁻⁴
-43 bis -20°C		K ⁻¹	2.0 x 10 ⁻⁴	2.0 x 10 ⁻⁴
-19 bis +10°C		K ⁻¹	6.0 x 10 ⁻⁴	2.0 x 10 ⁻⁴
> 10°C		K ⁻¹	15.0 x 10 ⁻⁴	4.0 x 10 ⁻⁴
Optical reflection (390–1105 nm)	Solutia Internal	%	–	8-9
Optical transmission (390–1105 nm)	Solutia Internal	%	–	> 92
UV Cut off	Solutia Internal	nm	–	360
Refractive index	ATM D542	–	–	1.479
VISTASOLAR 486.00	Surface		Structured non-sticky (one side)	
VISTASOLAR 486.10			Structured non-sticky (both sides)	

⁽¹⁾ These are typical values which may change according to cure conditions. Gel content recommended 80 – 90%.

This technical information is intended as a guideline only.

Notice: Although the information and/or recommendations as may be set forth herein (hereafter "Information") are presented in good faith and believed to be correct at the date hereof, Solutia Inc. and its affiliates (hereinafter "Solutia") make no representations or warranties as to the completeness or accuracy thereof. Information is supplied upon the condition that the persons receiving same will make their own determination as to its suitability for their purposes prior to use. In no event will Solutia be responsible for damages of any nature whatsoever resulting from the use of or reliance upon Information or the product to which Information refers. Nothing contained herein is to be construed as a recommendation to use any product, process, equipment or formulation in conflict with any patent and Solutia makes no representation or warranty, express or implied, that the use thereof will not infringe any patent.

NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR ANY OTHER NATURE ARE MADE HEREUNDER WITH RESPECT TO INFORMATION OR THE PRODUCT TO WHICH INFORMATION REFERS.

© 2012 Solutia Inc. All rights reserved. Saflex®, VISTASOLAR®, Solutia and Radiance Logo™ are trademarks of Solutia Inc., a subsidiary of the Eastman Chemical Company. As used herein, ® denotes registered status in the U.S. only.

Příloha B - Základní technické specifikace stolního digitálního multimetru UNI - T UT804

Funkce	Rozsah / Popis
DC Napětí	0 - 1000 V
AC Napětí	0 až 1000 V
Základní přesnost	DC Napětí: 0,025 %
	AC Napětí: 0,4 %
DC Proud	0 - 10 A
AC proud	0 - 10 A
Odpor	0 - 40 MΩ
Kapacita	0 - 40 mF
Frekvence	0 - 400 MHz
Teplota	40°C - 1000°C



Obr. 28 Digitální multimetr UNI - T UT804 s teplotou silikonového oleje

Příloha C - Technické specifikace vakuové sušičky VACUCELL VUK-B2V/VU 22

Technické údaje		Model	22
Vnitřní prostor	objem	litrů	22
	šířka	mm	340
	hloubka	mm	260
	výška	mm	300
Police	vedení pro police - prolisy v bočních stěnách komory, počet	počet max.	5
Vzdálenost mezi policemi	výška	mm	40
Využitelný rozměr police	šířka x hloubka	mm	280 x 236
Vnější rozměry včetně dveří a madla	šířka	max. mm	560
Hmotnost	hloubka	max. mm	490
	výška	max. mm	700
	netto	kg	65
	brutto	kg	79
Pracovní teplota		od 5°C nad okolní teplotu do °C	200
Odchytky teploty - Al police	prostorově při 100°C	do ± °C	2
	prostorově při 200°C	do ± °C	<5
	časově	do ± °C	0,4
Odchytky teploty - nerez police	prostorově při 100°C	do ± °C	10
	prostorově při 200°C	do ± °C	18
	časově	do ± °C	0,5
Doba náběhu na 98 % při napětí 230 V - Al police	na teplotu 100°C	minut	60
	na teplotu 200°C	minut	80
Doba náběhu na 98 % při napětí 230 V - nerez police	na teplotu 100°C	minut	130
Vysálané teplo do okolí	na teplotu 200°C	minut	170
	při 100°C	W	150
	při 200°C	W	300
Připojení vakua	vakuová přípojka	DN mm	16
	měřící průchodka	DN mm	40
	jehlový ventil na inertní plyn nebo vzduch	∅ mm	8
	dosažitelné vakuum	mbar	$5 \cdot 10^{-3}$
Elektrické parametry - síť 50/60 Hz	max. příkon	kW	0,8
	příkon v pohotovostním stavu	W	5
	proud	A	3,5
	jmenovité napětí	V	230
Maximální přístupné zatížení polic	nosnost jedné police	kg	20
	nosnost celkem	kg	35

Příloha D - Technické specifikace DSC/TGA Q600

DSC Q600	
System Design	Horizontal Balance & Furnace
Balance Design	Dual Beam (growth compensated)
Sample Capacity	200 mg (350 mg including sample holder)
Balance Sensitivity	0,1 µg
Furnace Type	Bifilar Wound
Temperature Range	Ambient to 1500 °C
Heating Rate - Ambient to 1000 °C	0,1 to 100 °C/min
Heating Rate - Ambient to 1500 °C	0,1 to 25 °C/min
Furnace Cooling	Forced Air (1500 to 50 °C in < 30 min, 1000 °C in 50 °C in < 20 min)
Thermocouples	Platinum/Platinum-Rhodium (Type R)
Temperature Calibration	Curie Point or Metal Standards (1 to 5 Points)
DTA Sensitivity	0,001 °C
Calorimetric Accuracy/Precision	+/- 2 % (based on metal standards)
Mass Flow Controller with Automatic Gas Switching	Included
Vacuum	to 7 Pa (0,05 torr)
Reactive Gas Capability	Included - separate gas tube
Dual Sample TGA	Included
Auto-Stepwise TGA	Included
Sample Pans	Platinum: 40 µL, 110 µL, Alumina: 40 µL, 90 µL



Obr. 29 DSC/TGA Q600 (převzato z [35])

Příloha E - Technické specifikace DSC Q2000

DSC Q2000		
Technologies	Tzero Technology	Advanced
	MDSC	Available
	Direct Cp Measurement	Included
	Platinum software	Included
Hardware Features	SVGA Touch Screen	Included
	User Replaceable Tzero Cell	Yes
	50-Position Autosampler	Available
	Autolid	Included
	Dual Digital Mass Flow Controllers	Included
	Full Range of Cooling Accessories (LNCS, RCS90, RCS40, FACS, QCA)	Available
	Pressure DSC	Available
	Photocalorimeter	Available
Performance	Temperature Range	Ambient to 725 °C
	With Cooling Accessories	-180 to 725 °C
	Temperature Accuracy	+/-0,1 °C
	Temperature Precision	+/-0,01 °C
	Calorimetric Reproducibility (indium metal)	+/-0,05 %
	Calorimetric Precision (indium metal)	+/-0,05 %
	Dynamic Measurement Range	>+/-500 mW
	Baseline Curvature (Tzero; -50 to 300 °C)	10 μW
	Baseline Reproducibility with Tzero	+/- 10 μW
	Sensitivity	0,2 μW
	Indium Height/Width (mW/°C)	60



Obr. 30 DSC Q2000 (převzato z[36])

Příloha F - Kompletní výsledky měření extrakce EVA folie

	teplota [°C]	hmotnost vzorku [g]	hmotnosti četností [g]	hmotnost kapsle [g]	hmotnost v kapsli před vařením [g]	hmotnost Petriho misky [g]	celková hmotnost v kapsli s PM po vaření [g]
Vzorek 1	125	3,0051	1,0430	24,8305	25,8735	7,8939	32,7456
1 až 5			1,0471	24,8885	25,9356	12,8070	37,7125
			0,9154	24,9809	25,8963	12,2855	37,2892
Vzorek 2	128	3,0153	1,0432	24,8999	25,9431	12,2760	37,2025
6 až 10			1,0313	24,8869	25,9182	13,3427	38,2638
			0,9411	24,9412	25,8823	12,0455	37,0237
Vzorek 3	131	3,0516	1,0068	24,9695	25,9763	15,9989	41,0729
11 až 15			1,0168	24,8285	25,8453	13,3433	38,3240
			1,0283	24,9690	25,9973	15,4818	40,7839
Vzorek 4	134	3,0371	1,0127	24,8840	25,8967	12,2752	37,4530
16 až 20			1,0092	24,8669	25,8761	12,0456	37,3996
			1,0152	24,8558	25,8710	12,5129	37,7902
Vzorek 5	137	3,0288	0,9980	24,9489	25,9469	11,7950	37,4122
21 až 25			1,0210	24,9219	25,9429	15,2754	40,8176
			1,0087	25,0320	26,0407	12,3493	38,0823
Vzorek 6	140	3,0300	1,0271	24,9174	25,9445	16,2883	41,9449
26 až 30			1,0377	24,7760	25,8137	12,2388	37,8637
			0,9654	24,9061	25,8715	13,1020	38,7847
Vzorek 7	143	3,0463	1,0015	24,7589	25,7604	11,6526	37,2812
31 až 35			1,0634	24,6970	25,7604	15,1378	40,7441
			0,9820	24,7340	25,7160	15,4913	41,0622
Vzorek 8	146	3,0235	1,0452	24,8733	25,9185	16,1297	41,9359
36 až 40			0,9903	24,8301	25,8204	15,6721	41,3820
			0,9886	24,9317	25,9203	12,8076	38,5922
Vzorek 9	bez síťování	3,0377	1,0498	24,6760	25,7258	12,3489	37,0261
41 až 45			1,0306	24,8659	25,8965	8,1233	32,9911
			0,9447	24,9294	25,8741	16,2679	41,1999

	teplota [°C]	celková hmotnost v kapsli po vaření [g]	hmotnost vzorků po vaření [g]	% gel (četnosti)	% gel (průměr)	sm. odch.	stupeň síťování podle normy (>65%)
Vzorek 1	125	24,8517	0,0212	2,0326	2,0489	0,3542	Nedostatečné
1 až 5		24,9055	0,0170	1,6235			
		25,0037	0,0228	2,4907			
Vzorek 2	128	24,9265	0,0266	2,5498	3,2659	0,5652	Nedostatečné
6 až 10		24,9211	0,0342	3,3162			
		24,9782	0,0370	3,9316			
Vzorek 3	131	25,0740	0,1045	10,3794	19,2471	9,4827	Nedostatečné
11 až 15		24,9807	0,1522	14,9685			
		25,3021	0,3331	32,3933			
Vzorek 4	134	25,1778	0,2938	29,0116	39,5988	7,9770	Nedostatečné
16 až 20		25,3540	0,4871	48,2660			
		25,2773	0,4215	41,5189			
Vzorek 5	137	25,6172	0,6683	66,9639	65,7378	3,6724	Dostatečné
21 až 25		25,5422	0,6203	60,7542			
		25,7330	0,7010	69,4954			
Vzorek 6	140	25,6566	0,7392	71,9696	78,0730	4,3514	Dostatečné
26 až 30		25,6249	0,8489	81,8059			
		25,6827	0,7766	80,4433			
Vzorek 7	143	25,6286	0,8697	86,8397	85,8575	0,7042	Dostatečné
31 až 35		25,6063	0,9093	85,5087			
		25,5709	0,8369	85,2240			
Vzorek 8	146	25,8062	0,9329	89,2556	88,1236	1,3191	Dostatečné
36 až 40		25,7099	0,8798	88,8418			
		25,7846	0,8529	86,2735			
Vzorek 9	bez síťování	24,6772	0,0012	0,1143	0,1913	0,0659	Nedostatečné
41 až 45		24,8678	0,0019	0,1844			
		24,9320	0,0026	0,2752			