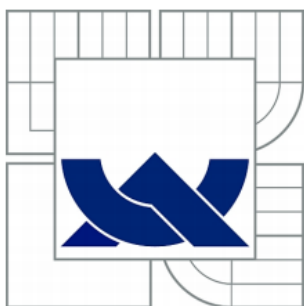
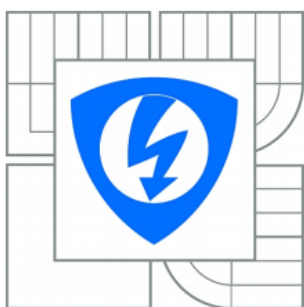




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

DEGRADAČNÍ TESTY POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ VYSTAVENÝCH KLIMATICKÝM PODMÍNKÁM

DEGRADATION TEST OF POLYMER MATERIAL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

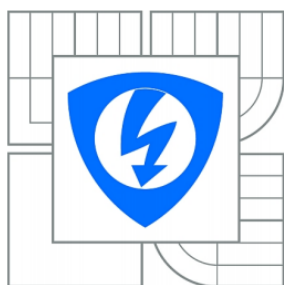
TOMÁŠ DAREBNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Mikroelektronika a technologie

Student: Tomáš Darebný

ID: 147432

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Degradační testy polymerních materiálu vystavených klimatickým podmínkám

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami měření funkčních vlastností materiálů pro pouzření solárních článků, s normami pro degrační testy a zpracujte literární rešerši. Ve spolupráci s firmou Solartec s.r.o. v Rožnově p. R. vyberte pouzřicí materiály a proveďte vyhodnocení dielektrických vlastností vybraných materiálů zvolenými metodami v průběhu zrychleného stárnutí vystavením zvýšené teploty a definované vlhkosti. Zjištěné výsledky vyhodnoťte a porovnejte s požadavky výrobní firmy Solartec s.r.o.

Termín zadání: 10. 2. 2014

Termín odevzdání: 5. 6. 2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Konzultanti semestrální práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt:

V této bakalářské práci jsou shrnuty základní poznatky o fotovoltaické přeměně energie, zařízeních a materiálech, které se ve fotovoltaice používají. Jsou zde popsány druhy degračních činitelů působících na fotovoltaické panely a je zde uvedena norma ČSN EN 61215. Hlavním úkolem práce je sledování změn vnitřní a povrchové rezistivity vybraných pouzdrických materiálů vlivem zvýšené vlhkosti.

Abstract:

Basic knowledge of photovoltaic energy transformation, devices and materials, used in photovoltaics are summarized in this bachelor's thesis. Sort of degradation factors of the photovoltaic panels and the norm ČSN EN 61215, are described there. The main purpose of this research is monitoring the change of volume and surface resistivity of selected covering materials. These covering materials were influenced of increased humidity.

Klíčová slova:

fotovoltaický článek, pouzdricí materiál, polymery, zrychlené stárnutí, relativní permitivita, vnitřní rezistivita, povrchová rezistivita, propustnost vodních par

Keywords:

photovoltaic cell, covering material, accelerated aging, polymers, volume resistivity, surface resistivity, water vapour permeability

Bibliografická citace díla:

DAREBNÝ, T. *Degradační testy polymerních materiálů vystavených klimatickým podmínkám*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 44 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „**Degradační testy polymerních materiálů vystavených klimatickým podmínkám**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2014

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne 5. června 2014

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	8
1 Fotovoltaika	9
1.1 Fotoelektrický jev	9
1.2 Fotovoltaický článek a jeho princip	10
1.3 Výroba křemíkového polotovaru	11
1.4 Konstrukce fotovoltaických panelů	12
1.4.1 Pouzdřicí materiály	12
1.4.2 Objemové krystalické materiály	14
1.4.3 Tenkovrstvé články	15
2 Polymery	16
2.1 Dělení polymerů	16
2.1.1 EVA (Etylenvinylacetát)	16
2.1.2 Tedlar (polyvinylfluorid)	17
2.1.3 TPU (termoplastický polyuretan)	17
3 Dielektrické vlastnosti materiálů	18
3.1 Polarizace dielektrika	18
3.2 Relativní permitivita	18
3.3 Ztrátový činitel	19
3.4 Vnitřní rezistivita	19
3.5 Povrchová rezistivita	20
4 Stárnutí polymerních materiálů	22
4.1 Testování životnosti fotovoltaických panelů	22
4.2 Norma ČSN EN 61215	23
4.3 Degradace fotovoltaických panelů	24
4.4 Zrychlené zkoušky spolehlivosti	24
4.5 Vliv teploty vzduchu	24
4.6 Vliv vlhkosti vzduchu	25
4.6.1 Vliv vysoké vlhkosti vzduchu	25

4.7	Paropropustnost.....	25
5	Experimentální část.....	26
5.1	Vliv vlhkosti na vnitřní a povrchovou rezistivitu	26
5.1.1	Měřicí pracoviště a postup měření.....	26
5.1.2	Vnitřní a povrchová měrná rezistivita – EVA, polyolefin, ionomer.....	28
5.1.3	Vnitřní a povrchová měrná rezistivita - Tedlar.....	32
5.2	Paropropustnost.....	34
	Závěr.....	36
	Seznam použité literatury	38
	Seznam příloh.....	40
	Příloha A – Naměřené a vypočtené hodnoty vnitřní a povrchové rezistivity.....	41
	Příloha B – Doplnující informace k výpočtu rezistivit.....	43
	Příloha C – Analyzátor vlhkosti <i>Radwag Max 60/WH</i>	44

Seznam obrázků

Obr. 1: Schematické znázornění postupu výroby Si polotovaru pro výrobu PV článků.....	11
Obr. 2: Konstrukce FV panelu [12]	12
Obr. 3: Vzhled základních typů solárních článků [12].....	14
Obr. 4: Schéma zapojení pro měření vnitřní rezistivity [21].....	19
Obr. 5: Schéma zapojení pro měření povrchové rezistivity [21].....	20
Obr. 6: Blokové schéma celého testu při certifikaci FV panelu	23
Obr. 7: Měřicí pracoviště pro měření vnitřní a povrchové rezistivity	26
Obr. 8: Vzorky v procesu navlhčování	28
Obr. 9: Závislost měrné povrchové rezistivity vzorků s plošnou elektrodou na čase	30
Obr. 10: Závislost měrné povrchové rezistivity vzorků s kruhovou elektrodou na čase.....	30
Obr. 11: Závislost měrné vnitřní rezistivity vzorků s plošnou elektrodou na čase	31
Obr. 12: Závislost měrné vnitřní rezistivity vzorků s kruhovou elektrodou na čase.....	31
Obr. 13: Vzorky fólií pro měření vnitřní a povrchové rezistivity	32
Obr. 14: Závislost měrné vnitřní rezistivity tedlarových fólií na čase	33
Obr. 15: Závislost měrné povrchové rezistivity tedlarových fólií na čase	33
Obr. 16: Porovnání paropropustnosti tedlarových fólií	35
Obr. 17: Analyzátor vlhkosti <i>Radwag Max 60/WH</i>	44

Seznam tabulek

Tab. 1: Vzorky pro zkoumání změn vnitřní a povrchové rezistivity.....	29
Tab. 2: Měření paropropustnosti tedlarových fólií	35
Tab. 3: Zprůměrované naměřené a vypočtené hodnoty rezistivit materiálů EVA, ionomer a polyolefin.....	41
Tab. 4: Naměřené a vypočtené hodnoty vnitřní a povrchové rezistivity materiálu Tedlar	42
Tab. 5: Tloušťky tedlarových fólií	43
Tab. 6: Doplnující informace pro výpočet rezistivit.....	43

Úvod

Obnovitelné zdroje – v dnešní době velice diskutované téma, neboť je to ekologicky šetrný způsob získávání energie. Tyto zdroje se nacházejí všude kolem nás a jejich využíváním šetříme nejen primární zdroje energie, tedy uhlí, plyn a ropu. Kromě toho šetříme i životní prostředí, které je již zatěžováno více, než by bylo zdrávo. Obnovitelné zdroje se využívají podstatně déle než fosilní. Mlýnské kolo se kupříkladu využívalo již v době středověku. Oproti tehdejším konstrukcím došlo s časem k obrovskému technologickému postupu. V dnešní době se hojně využívá fotovoltaických panelů – tedy možnost získávání energie přímo ze slunečního záření.

Tato bakalářská práce nese název “Degradací testy polymerních materiálů”, proto v jednotlivých kapitolách teoreticky objasním všechny důležité věci, aby běžný čtenář zvládl tuto tematiku komplexně pochopit.

Celá první kapitola je věnována fotovoltaice. Čtenář této práce by z ní měl pochopit základní principy této technologie z fyzikálního, chemického i praktického hlediska. Je zde také popsáno, jak a z čeho se vyrábí solární články. V poslední části této kapitoly jsou uvedeny různé druhy fotovoltaických článků i s jejich charakteristickými vlastnostmi.

Jelikož se tato práce zabývá polymerními materiály, je jim věnována celá druhá kapitola. Stručně jsou v ní charakterizovány tyto materiály a jejich druhy. Podkapitoly jsou zaměřeny především na dva polymerní materiály, a to EVA a Tedlar. Tyto materiály jsou používány pro pouzdření fotovoltaických článků.

Třetí kapitola je zaměřena na stárnutí polymerních materiálů uvedených v předchozí kapitole. Dále popisuje degradační vlivy na fotovoltaické panely a je zde abstraktně shrnutá norma ČSN EN 61215, která určuje, zdali bude moci být vyráběn fotovoltaický panel určitého druhu. Jelikož se panely vyskytují na volných prostranstvích, používají se pro jejich testování zrychlené zkoušky, které se provádějí v laboratořích. Podkapitola paropropustnost nastiňuje problém pronikání vodních par skrze zkoumaný materiál.

Samotná experimentální část zkoumá změny vnitřní a povrchové rezistivity za působení vlhkého tepla. Testovány je více druhů materiálu. V první řadě materiály EVA, ionomer a polyolefin, které jsou nalamínovány na cuprefitu. Tyto materiály podstupovaly navlhání 8 dní. Druhou část tvoří čtyři druhy tedlarových fólií, které byly v procesu navlhání 3 dny. U tedlarových fólií byla navíc měřena propustnost vodních par. Výsledky měření paropropustnosti a změn rezistivity jsou uvedeny v grafech experimentální části.

1 Fotovoltaika

Pojem fotovoltaika pochází ze dvou slov řeckého φώς [phos] = světlo a ze jména italského fyzika Alessandra Volty. Objev fotoelektrického jevu je připisován francouzskému fyzikovi Alexandru Edmondu Becquerelovi, který jej objevil již ve svých devatenácti letech v roce 1839. Fyzikálně se fotoelektrický jev podařilo popsat až v roce 1905 Albertu Einsteinovi, za což byl také ověnčen Nobelovou cenou.

Je to technologie, jež umožňuje výrobu elektrické energie přímo ze slunečního záření. Díky tomu má neomezený růstový potenciál a časově neomezené možnosti, kdy k výrobě energie dochází. Nejedná se pouze o zajímavou technologii, ale také o vyspělé průmyslové odvětví, které zažívá neobvyklý rozvoj. O tuto technologii se zajímá spousta vyspělých zemí včetně mnohých z Evropské unie. Existuje zde jistá potřeba fotovoltaiku podporovat, neboť v současnosti zaujímá a v budoucnosti bude stále zaujímat významný podíl v energetice. [1]

1.1 Fotoelektrický jev

K popsání fotoelektrického jevu je třeba chápat světlo jako proud fotonů, z nichž má každý svoje typické kvantum energie. Foton je vždy popsán svou unikátní vlnovou délkou nebo frekvencí. Fotony s vyšší frekvencí mají více energie.

Lidským okem lze vidět pouze část slunečního spektra v oblasti 380 až 780 nm. Oblast s kratší vlnovou délkou (větší energií) se nazývá ultrafialová (UV) a oblast s delší vlnovou délkou se nazývá infračervená (IČ). Fotoelektrický jev umožňuje přeměnit sluneční záření v elektrickou energii. K tomu dojde, když foton interaguje s elektronem, předá elektronu veškerou energii a to elektronu umožní opustit atom. Vzniká tak volný elektron a díra. Tyto emitované elektrony jsou označovány jako fotoelektrony a jejich uvolňování se označuje jako fotoemise. [1]

Pokud jev probíhá na povrchu látky, jedná se o vnější fotoelektrický jev. Jestliže uvolněné elektrony látku neopouští, ale zůstávají v ní jako vodivostní elektrony, hovoří se o vnitřním fotoelektrickém jevu. A pokud na látku dopadají elektrony, které způsobují vyzařování fotonů, jde o inverzní fotoelektrický jev. V solárních systémech se využívá fotoelektrického jevu vnitřního. [5]

1.2 Fotovoltaický článek a jeho princip

Fotovoltaické články jsou základní prvky systémů pro přeměnu slunečního záření na elektrickou energii. Existuje mnoho různých typů fotovoltaických článků, vždy se však jedná o velkoplošnou polovodičovou součástku s jedním nebo více PN přechody.

Dopadající světelné částice uvolňují z N-vrstvy volné elektrony, které se přesouvají k P-vrstvě. N-vrstva má nadbytek volných elektronů, je tvořena křemíkem se čtyřmi valenčními elektrony s příměsí prvku s pěti valenčními elektrony – nejčastěji fosforu, arsenu nebo antimonu. P-vrstva má naopak volných elektronů nedostatek. Tvořena je opět z křemíku, tentokrát však s příměsí některého z prvků se třemi valenčními elektrony – bóru, hliníku, galia nebo india. Přesun volných elektronů v materiálu se nazývá průtok proudu a probíhá vždy od záporného ke kladnému náboji. [3]

Rozměry komerčně vyráběných článků bývají do 200 mm a jejich tloušťka nepřesahuje 400 μm . Přední strana je uzpůsobena k pohlcování slunečního záření. Články bývají ve většině případů opatřeny z obou stran kovovými kontakty pro připojení sběrných vodičů. Vnější obvodem zapojeným mezi oba kontakty potom protéká stejnosměrný elektrický proud, jenž je přímo úměrný ploše solárního článku a intenzitě dopadajícího slunečního záření. [2]

Solární články lze rozpoznat na první pohled podle tvaru. Monokrystalický článek je vyráběn z kulatých křemíkových ingotů. Ty se nařezávají na tenké plátky a ořezávají na pseudočtvercový průřez, aby byla lépe využita plocha. Naproti tomu polykrystalický má přesně čtvercový tvar. Obecně platí, že polykrystalické články mívají nižší účinnost (cca. 15%), oproti monokrystalickému s cca 17 %. Nicméně celkovou účinnost vykompenzuje svým tvarem (větší plochou). [3]

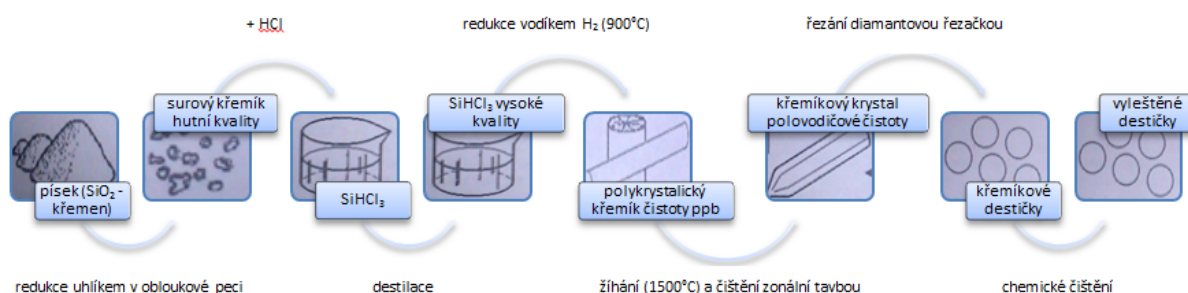
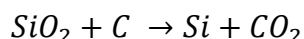
Na svorkách článku lze při maximálním výkonu naměřit napětí 0,5 V a protékající elektrický proud až 3 A. Jednotlivé články se spojují sérioparalelně, aby bylo dosaženo požadovaného výkonu, tedy vyššího napětí (nejčastěji 12 V nebo 24 V) a proudu. V tomto složení tvoří články fotovoltaický panel.

Životnost fotovoltaických panelů se pohybuje v rozmezí 25 – 35 let. V průběhu času ztrácí postupně na účinnosti, ale jedná se pouze o malou ztrátu (cca 0,3 % ročně). Obvykle je garantována účinnost 90 % po dvanácti letech provozu, 25 let starý solární panel by měl dosahovat účinnosti nad 80 % [12]

1.3 Výroba křemíkového polotovaru

Nejvíce rozšířené jsou dnes fotovoltaické články křemíkové (Si – monokrystalické, polykrystalické i amorfni na bázi tenkých vrstev), neboť křemík má řadu výhod. Je hojně zastoupen v zemské kůře dokonce jako druhý nejrozšířenější prvek. Proto je relativně levný, snadno dostupný, není jedovatý a je nejvíce používaným a asi i nejlépe prozkoumaným polovodičem. Šířka zakázaného pásu $\Delta E_G = 1,1$ eV rovněž vyhovuje.

V přírodě se vyskytuje většinou ve formě křemene neboli oxidu křemičitého (SiO_2). V této formě je mechanicky odolný a chemicky stabilní, drobná zrnka křemene tvoří všem dobře známý křemenný písek. Surový křemík se vyrábí z písku redukcí uhlíkem v obloukové peci, kde dochází k celému řetězci chemických reakcí. Pokud započítáme pouze výchozí a výstupní produkty, můžeme zjednodušeně vše vyjádřit jedinou rovnicí.



Obr. 1: Schematické znázornění postupu výroby Si polotovaru pro výrobu PV článků

Obr. 1 naznačuje postup výroby Si polotovaru, kdy je nejprve do obloukové pece vpravován křemen SiO_2 společně s koksem, v dolní části pece se hromadí roztavený křemík (při 2000 °C), který má čistotu až 99 %, zbylé 1 % tvoří nejvíce příměsi Fe, Al a C. Pro použití v polovodičové technologii je zapotřebí křemíku daleko čistšího, proto je třeba surový křemík vyčistit a poté vytvořit finální polotovar pro použití v další polovodičové výrobě. K tomu účelu existují různé technologie, příklad jedné z nich je schematicky znázorněn na obr. 2. Převodem na kapalnou fázi a její destilací lze získat polotovar s čistotou až ppb (nečistoty řádově 10^{-9}), která je potřebná pro výrobu integrovaných obvodů. [7]

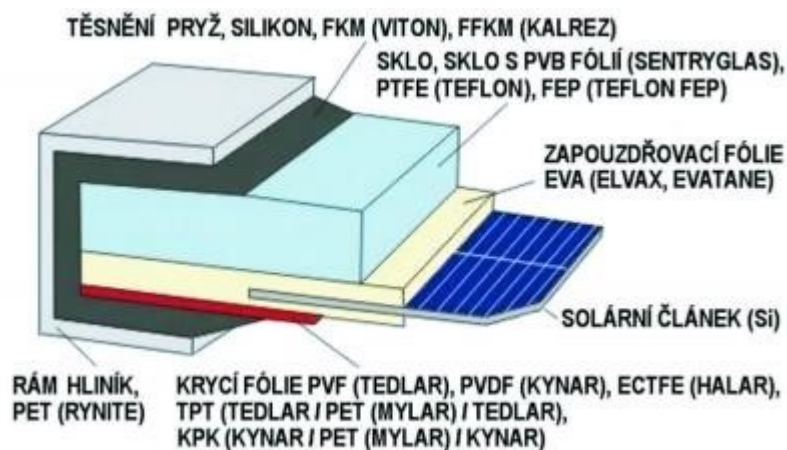
1.4 Konstrukce fotovoltaických panelů

Nejvyužívanějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků je křemík. Vzhledem k šířce zakázaného pásu je u něj vysoká účinnost generace volných nosičů. Zároveň se u křemíku, jako základního materiálu pro mikroelektroniku, podařilo velmi dobře zvládnout všechny technologické operace k vytváření struktur potřebných pro výrobu.

K výrobě fotovoltaických článků se používají křemíkové destičky čtvercového typu o rozměrech až 200x200 mm. Každé z těchto destiček se vyrobí jeden fotovoltaický článek. Nejprve se k výrobě používal pouze monokrystalický křemík, v sedmdesátých letech vedla potřeba snížení ceny k vývoji a využití polykrystalického křemíku.

1.4.1 Pouzdřicí materiály

Fotovoltaické články se musí chránit před vlivy okolního prostředí, aby bylo dosaženo vysoké životnosti. Proto se vkládají do etylvinylacetátových (EVA) či jiných fólií. Přední stranu článku tvoří speciálně tvrzené sklo, které je vysoce průhledné, aby byla zajištěna co největší propustnost slunečního záření. Zároveň chrání články před vlhkostí, větrem, krupobitím a dalšími povětrnostními vlivy. Zadní strana je uzavřena vícevrstvou plastovou fólií nebo dalším tvrzeným sklem. Dále jsou moduly opatřeny hliníkovým rámem, který slouží pro uchycení k nosným konstrukcím. Celkově je fotovoltaický modul kompaktní celek s předepsanými mechanickými, optickými a elektrickými vlastnostmi, jeho rozvrstvení uspořádání je znázorněno na Obr. 2.



Obr. 2: Konstrukce FV panelu [12]

Tvrzené sklo

Označováno též jako kalené. Procesem kalení je sklo zahřáto na teplotu kolem 600 °C a následným rychlým ochlazením proudem vzduchu získává jedinečné vlastnosti. Zvýší se mechanická pevnost a odolnost, zároveň vydrží rychlé změny teplot, které často zapříčiňují popraskání normálního skla.

Tento druh skla se využívá i v automobilovém průmyslu, neboť při rozbití se kalené sklo rozpadne na malé části bez ostrých hran, je tedy bezpečnější.

Speciálním druhem je *Sentryglas* doplněný o trojvrstvou fólii z polyvinylbutyralu (PVB), polyesteru (PE) a speciálního povlaku zaručujícího vyšší odolnost proti oděru. Používá se pro pouzdření přední strany fotovoltaických panelů. [15]

PMMA (polymethylmetakrylát)

Známé pod označením plexisklo. Používá se jako nejsvrchnější krycí vrstva panelů. Plexisklo má malou hmotnost, velkou pružnost a vysokou propustnost světla. Mezi nevýhody patří nízká povrchová tvrdost, absorpce prachu a tepelná roztažnost, proto se používá pro uchycení gumové těsnění. Využívá se jako alternativa k *Sentryglas*.

PVB (polyvinylbutyral)

Bezbarvý, průhledný materiál, který se vyrábí z polyvinylalkoholu a butyaldehydu. Kromě fotovoltaiky se používá jako bezpečnostní sklo u předních skel automobilů. Jeho výhody jsou vysoká životnost a stabilita proti UV záření, na druhou stranu je velice citlivý na vodu, proto je potřeba fotovoltaické panely řádně utěsnit. [9]

Rámy

Jako nosný pouzdřicí materiál se používají většinou hliníkové rámy. V současné době se vyvíjejí rámy vyztužené polyethyletereftalátem (PET). Ty mají oproti hliníku o 30 - 40 % menší hmotnost. Jsou teplotně stálé do 85 °C a odolné vůči UV záření. Předpokládaná životnost rámu je minimálně 20 let. [16]

1.4.2 Objemové krystalické materiály

Monokrystalický křemík

Připravuje se tažením monokrystalu z tavenin. Výsledným produktem je monokrystalický křemíkový válec – ingot o průměru 125 až 300 mm. Tento válec je ořezáván do tvaru hranolu. Rozřezáním speciální drátovou pilou jsou získány křemíkové destičky o tloušťce 200 až 360 μm . Při rozřezávání ingotu dochází k velikým ztrátám materiálu. Proto se vyvíjejí nové technologie, které by tyto ztráty zmenšily.

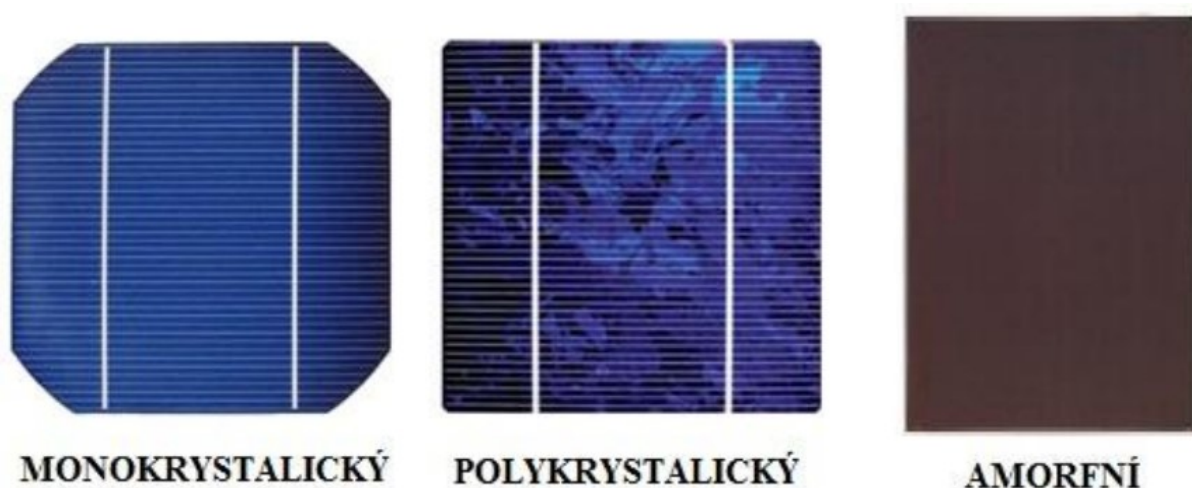
Účinnost sériově vyráběných solárních článků bývá od 14 do 18 %. V laboratorních pokusech se podařilo dosáhnout účinnosti až 25%.

Polykrystalický křemík

Je stále více využíván díky své nižší výrobní ceně oproti monokrystalickému křemíku. Je to dáno tím, že odpadá proces tažení monokrystalu.

Typicky má též nižší účinnost: 12 – 14 %. V laboratořích dosahují články z polykrystalického křemíku účinnosti až 18 %. Destičky jsou čtvercového tvaru a jsou řezány z odlévaného křemíkového ingotu. V průběhu tuhnutí taveniny dochází k tvorbě různě orientovaných krystalů o různých velikostech. Polykrystalická struktura materiálu dodává těmto článkům charakteristický vzhled.

Na pohled lze rozpoznat jednotlivé druhy základních druhů fotovoltaických článků, viz Obr. 3.



Obr. 3: Vzhled základních typů solárních článků [12]

1.4.3 Tenkovrstvé články

Tenkovrstvé články jsou vyvíjeny a vyráběny hlavně z důvodu snížení materiálové spotřeby. Oproti krystalickým solárním článkům s tloušťkou v řádu desetin milimetrů se tenkovrstvé články pohybují v tisících milimetrů.

Amorfní křemík (a-Si:H)

Ve fotovoltaice byl poprvé použit v roce 1974. Uplatnění nachází v aplikacích spotřební elektroniky a v systémech zabudovaných do budov místo prosklených ploch. Pro jejich výrobu je zapotřebí menšího množství křemíku, proto kompenzují svou účinnost nižší cenou. Oproti krystalickým materiálům nejsou vyráběny jednotlivé články, ale celé moduly najednou.

V sériové výrobě dosahují tyto moduly účinnosti 5 až 7 %, experimentálně až 10 %.

Galium Arsenid (GaAs)

GaAs je slitinový polovodičový materiál, z něhož jsou vyráběny solární články s účinností až 30 %. Jsou ovšem mnohonásobně dražší než křemíkové články. Lze u nich měnit poměr Ga/As a dají se použít i doplňující prvky (Al, P, Sb, In). Využívají se pro koncentrátorové moduly a pro kosmické aplikace (družice).

Kadmium Telurid (CdTe)

Telurid kadmennatý je tenkovrstvý film polykrystalického materiálu. Nanáší se elektrodpozicí, sprejováním a vysokorychlostním napařováním. Má téměř ideální velikost zakázaného pásu (1,44 eV) a velkou absorptivitu slunečního záření. Hlavní výhody tkví v nízké ceně a velmi krátké době energetické návratnosti (cca 5 měsíců).

Komerčně vyráběné články mají účinnost kolem 8 %, laboratorní vzorky dosahují účinnosti 16 %.

2 Polymery

Polymery jsou přírodní nebo syntetické látky, v jejichž molekule se jako články v řetězu mnohonásobně opakuje základní monomerní jednotka. Představují tedy chemickou stavebnici, která umožňuje neobyčejnou proměnlivost struktur i vlastních výsledných látek. Syntetické polymery vyvinuté v první polovině 20. století jsou neodmyslitelně spojeny se světovým hospodářstvím. [8]

2.1 Dělení polymerů

- **Podle původu**
 - Přírodní polymery – celulóza, škrob, DNA
 - Syntetické polymery – PET, PVC, PE, PS
- **Podle chování při zahřívání**
 - Termoplasty – při zahřívání měknou, taví se a po ochlazení získávají zpět své původní vlastnosti. Opakovaný ohřev nezpůsobuje změnu struktury. Do této skupiny patří převážně lineární polymery, např. PE, PS. [9]
 - Reaktoplasty – při prvním ohřevu přejdou do plastického stavu, další ohřev způsobí vytvrzení plastu. Dochází k vytvoření 3D struktury. Dále již nelze měnit jejich tvar ohřevem. Jde např. o fenolformaldehydové polymery (Bakelit), epoxidovou pryskyřici, kaučuky, aminoplasty atd.

2.1.1 EVA (Etylenvinylacetát)

Z chemického hlediska jde o kopolymery ethylenu s vinylacetátem a vyrábějí se blokovou radikálovou vysokotlakou polymerací. Vlastnosti závisejí na obsahu vinylacetátové složky. Se stoupajícím obsahem vinylacetátu stoupá jejich průtažnost, rázová houževnatost a odolnost proti tvorbě trhlin pod napětím. Kopolymery jsou průsvitné až průhledné, mají vysokou pevnost, rozpouštějí se v ketonech a v aromatických i chlorovaných uhlovodících. [10]

Tento materiál se velmi často používá jako ochrana křemíkového článku před vlhkostí, mechanickými otřesy, k elektrické izolaci a odvodu tepla ze solárního článku. Tento plast je značně odolný proti vlivu tepla a proti procesům stárnutí. Jeho hlavní nevýhodou je velká citlivost na UV záření. EVA se po dlouhodobém slunečním záření zbarví dohněda. Tím dochází ke snížení propustnosti slunečního záření s výsledným snížením efektivnosti článku. Tento materiál bude využit v experimentální části. [6]

2.1.2 Tedlar (polyvinylfluorid)

Materiál, který výborně odolává povětrnosti a dobře propouští UV záření. Vzhledem k relativně rychlému tepelnému rozkladu nad bodem tání (185 až 210 °C) se v praxi zpravidla nezpracovává z taveniny na polotovary. Největší význam má pro výrobu fólií a laků určených pro vnější aplikace. Fólie se vyrábějí litím z roztoku a nanáší se laminováním, kdy se mezi Tedlar a povrch nanese tepelně aktivované lepidlo. Tedlar je použitelný pro teploty -70 až 110 °C. Slouží pro ochranu stavebních dílů z oceli, hliníku aj., pro krytí solárních kolektorů a fóliových skleníků i jako dělicí fólie. [10]

V experimentální části bude tento materiál použit ve čtyřech různých provedeních pro zkoumání změny vnitřní a povrchové rezistivity vlivem navlhání.

2.1.3 TPU (termoplastický polyuretan)

Jedná se o fólii, která se laminuje na sklo a křemík. Ve srovnání s etylenvinylacetátem (EVA) se využívá pro kratší dobu vytvrzování, nižší náklady a dlouhodobou průhlednost. Použitím TPU se prodlužuje životnost fotovoltaických panelů. [16]

3 Dielektrické vlastnosti materiálů

Dielektrika jsou látky, které po vložení do elektrického pole vytváří své vlastní elektrické pole, protože se zde dokáží polarizovat. Jejich hlavním parametrem je relativní permitivita. Izolanty jsou naproti tomu látky, jejichž hlavní vlastností je zabránit průchodu proudu mezi dvěma místy s různým elektrickým potenciálem. Jejich hlavním parametrem je měrná povrchová a vnitřní rezistivita. Přes uvedené rozdíly spolu obě skupiny souvisí a platí, že každý izolant je dielektrikem, nikoli však každé dielektrikum izolantem. [18]

3.1 Polarizace dielektrika

K polarizaci dojde, vložíme-li dielektrikum do elektrostatického pole. Z hlediska chování různých materiálů se polarizace dělí na dva základní druhy.

Polární dielektrika

Jako celek vykazují vlastnosti elektrického dipólu a mají vlastní elektrický dipólový moment. Příkladem je molekula vody, kyselina chlorovodíková, amoniak apod.

Nejsou-li tato dielektrika v elektrostatickém poli, jsou vektory jejich dipólových momentů orientovány nahodile. Po vložení do vnějšího elektrostatického pole se molekuly budou stáčet tak, aby se směr vektorů jejich dipólového momentu shodoval se směrem intenzity vnějšího elektrostatického pole. [19]

Nepolární dielektrika

Jejich molekuly nemají vlastní elektrické dipólové momenty. Po vložení do vnějšího elektrostatického pole probíhá jejich polarizace s odlišným mechanismem. Síly vnějšího pole způsobí prostorové přerozdělení kladného a záporného náboje a tím získá vnější pole elektrický dipólový moment. Směr je shodný se směrem vektoru intenzity pole a odpovídá situaci, které je ideálně dosaženo u polárních dielektrik. [19]

3.2 Relativní permitivita

Permitivita dielektrika charakterizuje vliv elektrického pole na elektrický stav dielektrika. Vztah pro relativní permitivitu je:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad [-]$$

ε permitivita

ε_r relativní permitivita

ε_0 permitivita vakua $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$

Relativní permitivita ε_r charakterizuje vlastnosti izolantu a je měřítkem jeho polarizace. Permitivita vakua ε_0 je konstanta. Velikost relativní permitivity závisí na druhu polarizace, na vnitřní stavbě dielektrika a na polarizovatelnosti atomů a molekul. Může se měnit v závislosti na teplotě kmitočtu a na intenzitě elektrického pole. [20]

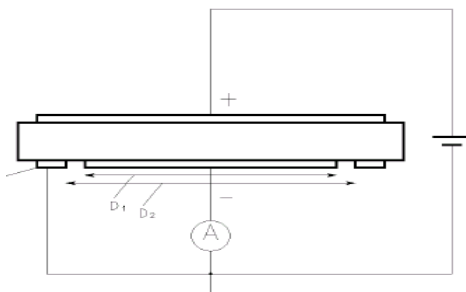
3.3 Ztrátový činitel

Další veličinou, která charakterizuje izolant z hlediska jeho dielektrických ztrát, je ztrátový činitel $\tan\delta$. Čím větší je ztrátový činitel, tím větší je výkon přeměněný na teplo a současně vyšší teplota dielektrika. S teplotou dielektrika souvisí proces tepelného stárnutí s následným nebezpečím tepelné destrukce izolantu. Z tohoto důvodu je snaha dielektrické ztráty minimalizovat, a současně zajistit dostatečné chlazení izolantu.

Ztrátový činitel $\tan\delta$ je bezrozměrná veličina. Číselně je vyjadřována desetinným číslem, násobkem mocniny deseti se záporným exponentem nebo v procentech. Ztrátový činitel je u dielektrik v rozmezí 10^{-5} až 10^{-1} . Hodnotu 10^{-5} má vzduch a běžně používaná dielektrika mají ztrátový činitel v rozmezí 10^{-4} až 10^{-1} . Mezi kvalitní izolanty je možné řadit materiály se ztrátovým činitelem $\tan\delta$ nižším než 10^{-3} . Tato hodnota s degradací materiálu postupně vzrůstá. [6]

3.4 Vnitřní rezistivita

Vnitřní rezistivita materiálu je rovna poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty uvnitř vzorku. Číselně se rovná vnitřnímu odporu krychle zkoušeného materiálu o hraně 1 m, měřenému mezi dvěma elektrodami, které jsou přiloženy na protilehlých stěnách. Schéma zapojení je naznačeno na Obr. 4.



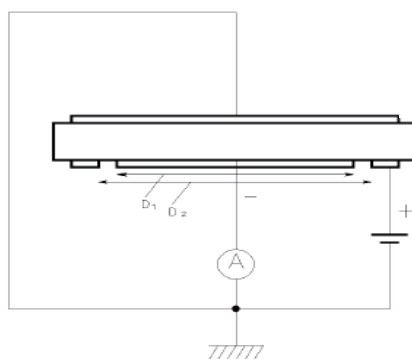
Obr. 4: Schéma zapojení pro měření vnitřní rezistivity [21]

Vodivost izolantů je způsobena přítomností volných nebo slabě vázaných iontů příměsí a nečistot a částečně i iontů vlastní látky, které se za přítomnosti vnějšího elektrického pole mohou pohybovat. Vodivost izolantu je charakterizována vnitřní konduktivitou (měrnou vnitřní vodivostí) κ , která je reciprokou hodnotou vnitřní rezistivity. Koncentrace i pohyblivost nosičů nábojů jsou značně teplotně závislé (rostou s teplotou), proto i vnitřní rezistivita je teplotně závislá.

Měření vnitřní rezistivity se převádí na měření vnitřního odporu R_v , který se počítá z proudu procházejícího vnitřkem izolantu mezi měřicí a napěťovou elektrodou a z přiloženého napětí. Odpor lze měřit přímo megaohmmetrem. Měrná vnitřní rezistivita ρ_v se vypočítá z rozměrů vzorku (elektrodového systému) a odporu R_v , viz experimentální část. [21]

3.5 Povrchová rezistivita

Povrchová rezistivita materiálu je rovna poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty na povrchu vzorku. Číselně se rovná odporu čtverce povrchu zkoušeného materiálu o straně 1 m, měřenému mezi dvěma elektrodami přiloženými na protilehlých stranách. Schéma zapojení je naznačeno na Obr. 5.



Obr. 5: Schéma zapojení pro měření povrchové rezistivity [21]

Pro měření a odečítání proudu tekoucího po povrchu vzorku mezi měřicí a ochrannou elektrodou, z něhož se pak určí měrná povrchová rezistivita, platí stejná pravidla a probíhají stejné děje. Je nutno mít na zřeteli, že proud neprotéká jen po povrchu, ale také částečně pod povrchem, vnitřkem materiálu. Povrchový odpor není tedy možno definovat tak jednoznačně jako vnitřní odpor. U čistého povrchu je naměřený povrchový odpor R_p řádově stejný nebo o něco vyšší než vnitřní odpor. U povrchu znečištěného vodivými částicemi,

zvláště pak při současném navlhnutí nebo degradaci povrchu materiálu, se povrchový odpor prudce snižuje a proud potom teče převážně v povrchové, více vodivé vrstvě. Porovnání ρ_p čistého a znečištěného povrchu pak vypovídá o zhoršených povrchových izolačních vlastnostech materiálu, kdy pak povrch může tvořit svod mezi vodivými částmi pod napětím.

Měrný vnitřní a povrchový odpor jsou důležité materiálové konstanty, na jejichž základě je možné porovnat jednotlivé izolační materiály mezi sebou a současně u daného izolačního materiálu jsou měřítkem pro posouzení jeho stavu. K poklesu měrného povrchového odporu dochází v důsledku elektrického, tepelného, příp. kombinovaného namáhání materiálu, resp. jeho stárnutí. Pokles měrného povrchového odporu pak může indikovat, mimo degradace, znečištění povrchu izolantu. [21]

4 Stárnutí polymerních materiálů

Stárnutí materiálů je definováno jako nevratné změny vlastností v důsledku působení fyzikálních, chemických, biologických a jiných vlivů v průběhu delšího časového úseku. Pro sledování stárnutí by bylo ideální mít možnost reprodukce všech mechanismů způsobujících stárnutí. V praxi je ovšem obtížné tohoto dosáhnout, neboť mechanismy způsobující stárnutí nemohou být úplně známé a pochopené. [13]

Polymerní materiály se vyznačují specifickými vlastnostmi. Míra jejich znehodnocení závisí na chemickém složení, na struktuře, na způsobu a podmínkách zpracování a na podmínkách, kterým bude materiál vystaven. To vše určuje, jak bude materiál odolný proti působení vnějšího prostředí.

Stárnutí se v polymerech projevuje degradací, která je důsledkem rozkladných reakcí, při kterých plast mění svou chemickou strukturu. Depolymerace je jev, kdy se polymer rozkládá na monomery a nízké oligomery.

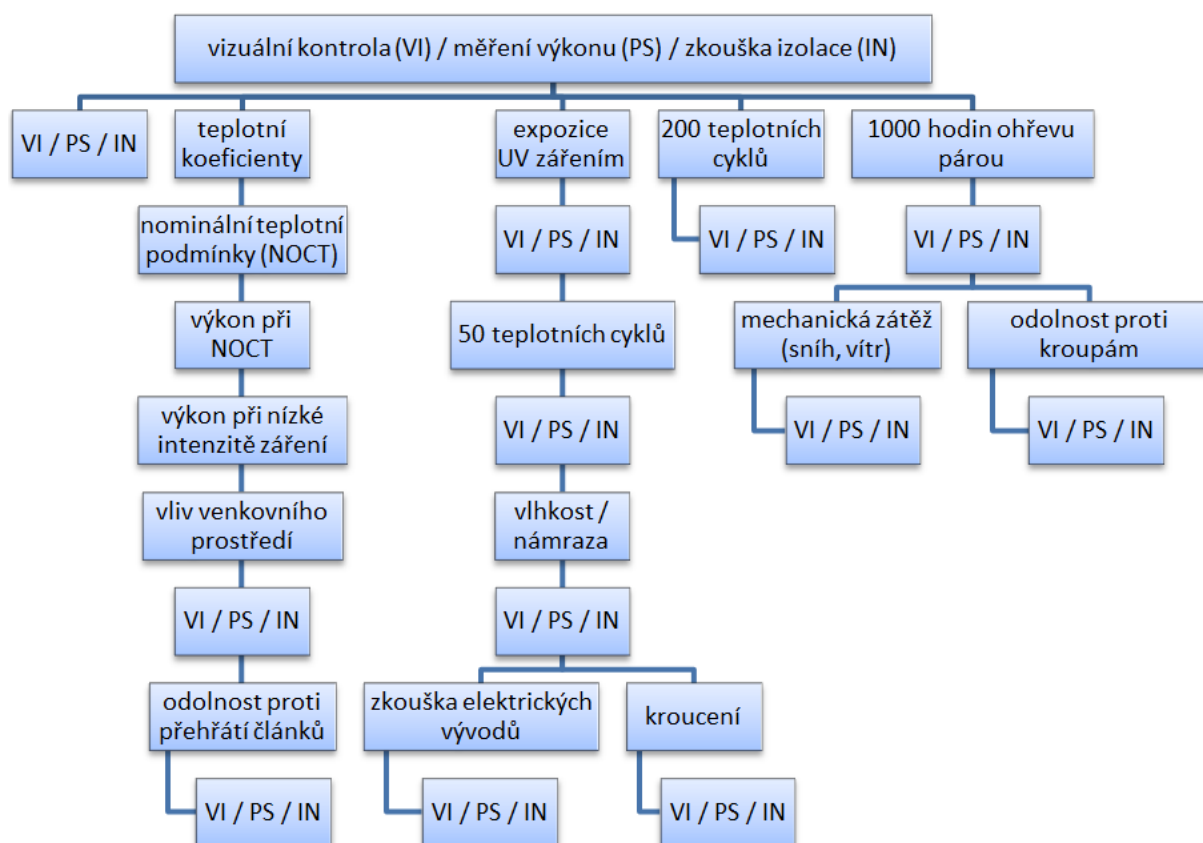
Stárnutí materiálů rozdělujeme podle úrovně znehodnocení na:

- trvalé (permanentní)
- přechodné (tranzitní)
- vratné (reverzibilní)

Trvalá znehodnocení jsou definitivní a nezmizí ani po klesnutí pod kritickou velikost působení činitelů stárnutí. Oproti tomu přechodná znehodnocení zmizí zčásti nebo zcela. Zmizí samovolně nebo například vysušením vlhkého materiálu.

4.1 Testování životnosti fotovoltaických panelů

Na testování FV panelů a článků existuje mezinárodní norma ČSN EN 61215 a autorizovaná pracoviště testující FV panely jsou povinna postupovat podle ní. Norma je poměrně přísná, neboť panely musí odolávat povětrnostním vlivům desítky let po jejich instalaci. Přejde-li na trh nový druh panelu, byť jen s malou změnou oproti ostatním modelům, je nutné provést vlastní certifikaci. Test trvá cca. 4 měsíce a stojí v přepočtu kolem milionu korun. Je tedy patrné, že vlastní certifikace je poměrně nákladná záležitost bez záruky pozitivních výsledků testu. Avšak chce-li výrobce produkt prodávat, musí tato úskalí překonat. Samotná norma je velice obsáhlá a blíže popsána bude v bakalářské práci. Na Obr. 6 je znázorněno základní blokové schéma celého testu při certifikaci FV panelu. [7]



Obr. 6: Blokové schéma celého testu při certifikaci FV panelu

4.2 Norma ČSN EN 61215

Tato mezinárodní norma stanoví požadavky IEC pro posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu pozemních fotovoltaických (PV) modulů vhodných pro dlouhodobý provoz v mírných venkovních klimatických podmínkách, definovaných v IEC 60721-2-1. Platí pouze pro typy modulů z krystalického křemíku. Normy pro tenkovrstvé moduly jsou uvedeny v IEC 61646. Tato norma neplatí pro moduly používané s koncentrátory. Účelem této řady zkoušek je určit elektrické a tepelné vlastnosti modulu a ukázat pokud možno přijatelnými peněžními i časovými náklady, že modul je schopen vydržet prodlouženou expozici v klimatech, popsanych v úvodu normy. Skutečná pravděpodobná délka technického života takto hodnocených modulů bude záviset na jejich konstrukci, prostředí a podmínkách, v nichž pracují. [14]

4.3 Degradace fotovoltaických panelů

FV panely mají konstrukci složenou z více vrstev. Existuje proto mnoho vlivů, které mohou mít negativní účinky na funkčnost a životnost jednotlivých částí panelu. Proto je třeba testovat jednotlivé části. Mezi nejčastější vlivy degradace patří zvětvávání/znečištění předního skla, oxidace pouzdricích materiálů, teplotní změny, UV záření nebo vlhkost – ta se projevuje například u materiálu EVA tím, že postupně tmavne.

4.4 Zrychlené zkoušky spolehlivosti

Jedná se o zkoušky, při kterých se zrychluje mechanismus poruch, např. zvětšením zátěže nebo zrychlením časového průběhu oproti normálnímu stavu. [13]

Hlavní požadavek těchto zkoušek je, aby z chování z určitého souboru téhož typu, podrobeného zvýšenému namáhání, bylo možné předvídat časový průběh sledovaných parametrů při nižších úrovních namáhání. Výsledky lze efektivně využívat ke kontrole běžné výroby a i pro zpětné ovlivňování činností v předvýrobních etapách. Nevýhodou jsou nákladnější zkušební zařízení a rozsáhlé předběžné experimentování a porozumění druhům poruch.

4.5 Vliv teploty vzduchu

Jde o jeden z hlavních činitelů ovlivňujících bezporuchovou činnost. Změny teploty vznikají v důsledku změn teploty proudícího vzduchu, zahříváním samotného zařízení a ve venkovním prostředí i přímým slunečním zářením.

Vysoká teplota způsobuje mechanickou deformaci vznikající z důvodu rozdílné roztažnosti materiálů, které tvoří celek. Způsobuje měknutí a tavení termoplastů, dále pak pokles elektrického odporu a pevnosti izolantů. U vodičů elektrický odpor s teplotou vzrůstá, což může mít za důsledek například pokles výkonu.

Přímým účinkem nízké teploty na materiály jsou například rozměrové změny materiálů. U plastů může dojít k vratným či nevratným změnám ve vlastnostech. Vratné změny jsou již zmíněné rozměrové změny, nevratné změny zahrnují zejména vznik trhlin.

Rychlé změny teplot mohou způsobit nebezpečná pnutí, rozvrstvování laminátů a oxidaci vlivem kondenzace vodních par.

4.6 Vliv vlhkosti vzduchu

Spolu s teplotou vzduchu je jedním z hlavních činitelů ovlivňujících bezporuchovost. Vysoká vlhkost vzduchu způsobuje nejvážnější problémy. Při nízké vlhkosti mohou vysychat izolanty, což vede k možné změně objemu a deformaci součástek. Vniká-li do uzavřeného prostoru vodní pára a dojde k opakovaným změnám teploty, pára se srazí a v uzavřeném prostoru se nahromadí kapalná voda. Orosení zrychluje korozi kovů.

4.6.1 Vliv vysoké vlhkosti vzduchu

Vysoká vlhkost nepříznivě ovlivňuje elektrické vlastnosti, zvláště pak organických izolantů – snižuje izolační odpor. Tento vliv je buď bezprostřední (například vliv na povrchové vlastnosti izolantů) nebo je změna závislá na rychlosti pronikání vlhkosti do materiálů – procesem difuze. Vliv vysoké vlhkosti se projevuje také zvýšením ztrátového činitele a snížením elektrické pevnosti izolantů. U elektronických součástek může mít vlhkost za následek zvýšení vodivosti a tím může docházet k elektrolytickým pochodům při působení elektrického pole. Vodní filmy absorbované na povrchu izolací způsobují povrchové zkratky.

Podstatné jsou i fyzikálně-mechanické změny izolantů. Některé plasty bobtnají, jsou-li dlouhou dobu vystaveny vysoké vlhkosti. Tím vznikají malé trhlinky v povrchové vrstvě, jimiž vlhkost snadněji proniká do materiálu.

4.7 Paropropustnost

Propustnost vodních par, neboli paropropustnost, je metoda měření, která přímo posuzuje kvalitu konkrétního materiálu, např. textilie, a tím vyhodnocuje vhodnost použití v různých aplikacích.

Analyzátor vlhkosti, kterého se pro měření využívá, je vybaven speciální soustavou nádob. Do hliníkové nádoby se umístí dostatečné množství vody, nad ní je upnutý zkoumaný vzorek. To vše je uzavřeno další hliníkovou nádobou.

Velkou výhodou tohoto postupu je velmi krátká doba testování, která trvá přibližně hodinu, kdežto standardní metoda trvá přibližně 72 hodin.

Výsledek této analýzy je dán jako procentní podíl množství vodní páry prošlé skrz zkoumaný vzorek ku množství vodní páry prošlé bez zkoumaného vzorku. [17]

5 Experimentální část

5.1 Vliv vlhkosti na vnitřní a povrchovou rezistivitu

V této části bylo zkoumáno, jaký degradační vliv má vlhkost na pouzdrící materiály. Díky vnitřní a povrchové rezistivitě můžeme porovnávat jednotlivé materiály mezi sebou a následně vyhodnotit jejich výstupní stav.

5.1.1 Měřicí pracoviště a postup měření

K měření jsme využili Megaohmmetr *HP 4339B* připojený k pracovní stanici. Vzorky byly umísťovány do tříelektrodového systému opatřeného krytem. Měřicí napětí bylo možné nastavit pouze v případě, byl-li kryt správně uzavřen. Měření bylo téměř automatizováno. Stačilo měnit vzorky a zapisovat hodnoty naměřených hodnot do programu *MS Excel*. V něm bylo dále potřeba dopočítat hodnoty měrné vnitřní a povrchové rezistivity a graficky znázornit vypočtené hodnoty. Celé měřicí pracoviště je vyfoceno na Obr. 7.



Obr. 7: Měřicí pracoviště pro měření vnitřní a povrchové rezistivity

Všechny vzorky podstupovaly navlhání při standardní teplotě v laboratoři, tedy 20 °C. Před vlastním měřením byly pomocí mikrometru zjištěny tloušťky vzorků, které je nutné znát pro výpočet měrné vnitřní rezistivity. Pro dodržení obdobných parametrů měření byly vzorky měřeny dle následujícího postupu:

1. Vložit vzorek do elektrodového systému zkoumanou stranou směrem dolů.
2. Přitlačit silou 7 kg a uzavřít kryt. Kabel přepnout do polohy *Volume* pro měření vnitřního odporu.
3. Zapnout *Megaohmmetr HP 4339B*.
4. Na počítači spustit program *RvRp* s nastaveným nabíjecím napětím 300 V a délkou nabíjení 60 s. Po 60 s se objeví v uživatelském panelu hodnota vnitřní rezistivity R_v . Následně se vypočítá hodnota vnitřní měrné rezistivity dle vztahu:

$$\rho_v = \pi \frac{D_1^2}{4h} R_v [\Omega m]$$

kde D_1 je průměr měřicí elektrody, h je tloušťka vzorku a R_v je naměřený vnitřní odpor.

5. Po vybití vzorku (2 minuty) přepnout do polohy *Surface* pro měření povrchové rezistivity. Z naměřené hodnoty povrchové rezistivity R_p vypočítat hodnotu povrchové měrné rezistivity podle vzorce:

$$\rho_p = \pi \frac{(D_1 + c)}{c} R_p [\Omega]$$

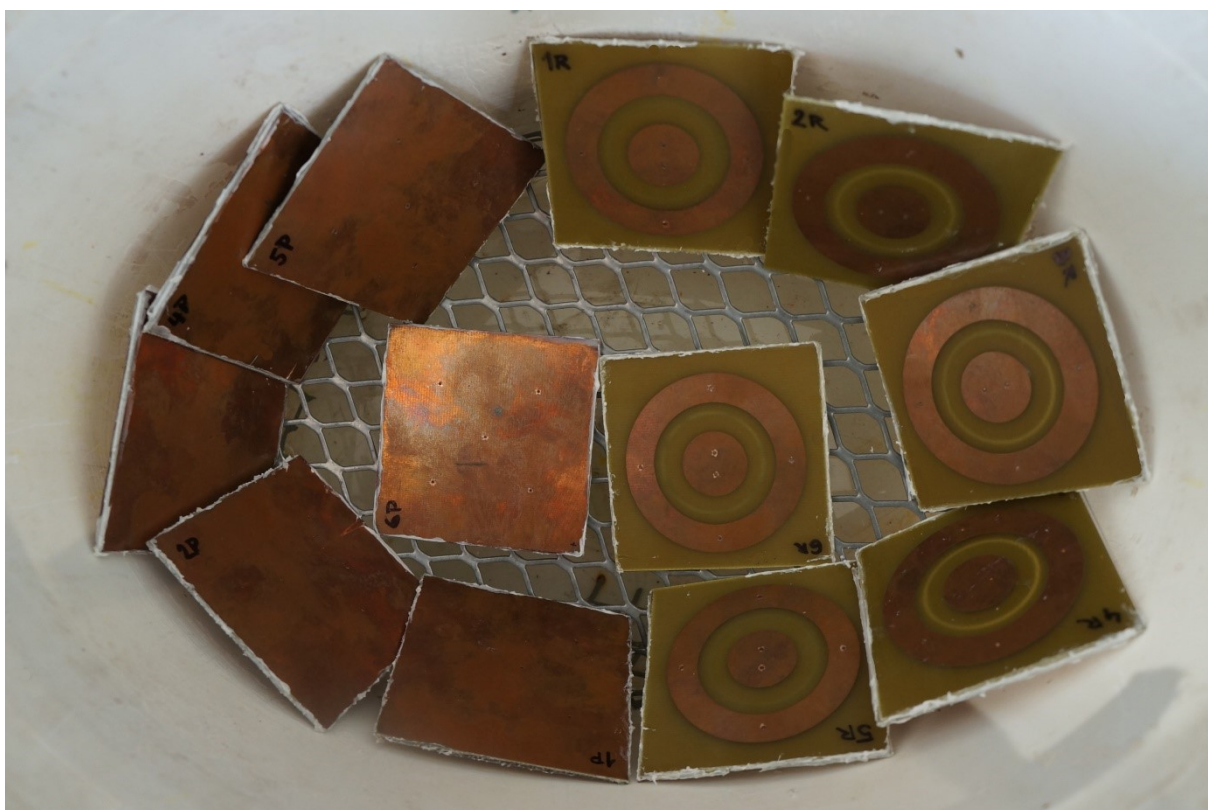
kde D_1 je průměr měřicí elektrody, c je mezera mezi měřicí a ochrannou elektrodou a R_p je naměřený povrchový odpor.

6. Z vypočítaných (případně i zprůměrovaných) hodnot vnitřní a povrchové měrné rezistivity znázornit graficky závislost rezistivit na čase.

5.1.2 Vnitřní a povrchová měrná rezistivita – EVA, polyolefin, ionomer

Pro toto měření byly využity materiály EVA, polyolefin a ionomer. Tyto materiály byly nalaminovány na cuprexfitu, který sloužil jako nosný substrát. Vzorky poskytla firma Solartec s.r.o. pro zkoumání změny vnitřní a povrchové rezistivity.

Vzorky byly vystaveny vlhkosti uvnitř nádoby z polypropylenu, v níž byla v dolní části voda a na ní umístěný držák na vzorky, viz Obr. 8. Tento držák byl do nádoby umístěn, aby neměly vzorky kontakt s vodou, ale pouze přirozeně navlhávaly.



Obr. 8: Vzorky v procesu navlhávání

Celkem bylo zkoumáno 12 vzorků, přičemž polovina z nich byla s kruhovou elektrodou a druhá polovina s plošnou elektrodou. Dále se vzorky lišily fólií, která na ně byla nalaminována. Ve stejném počtu to byly fólie z materiálu EVA, polyolefin a ionomer. Pro přehlednost jsou vzorky popsány v Tab. 1.

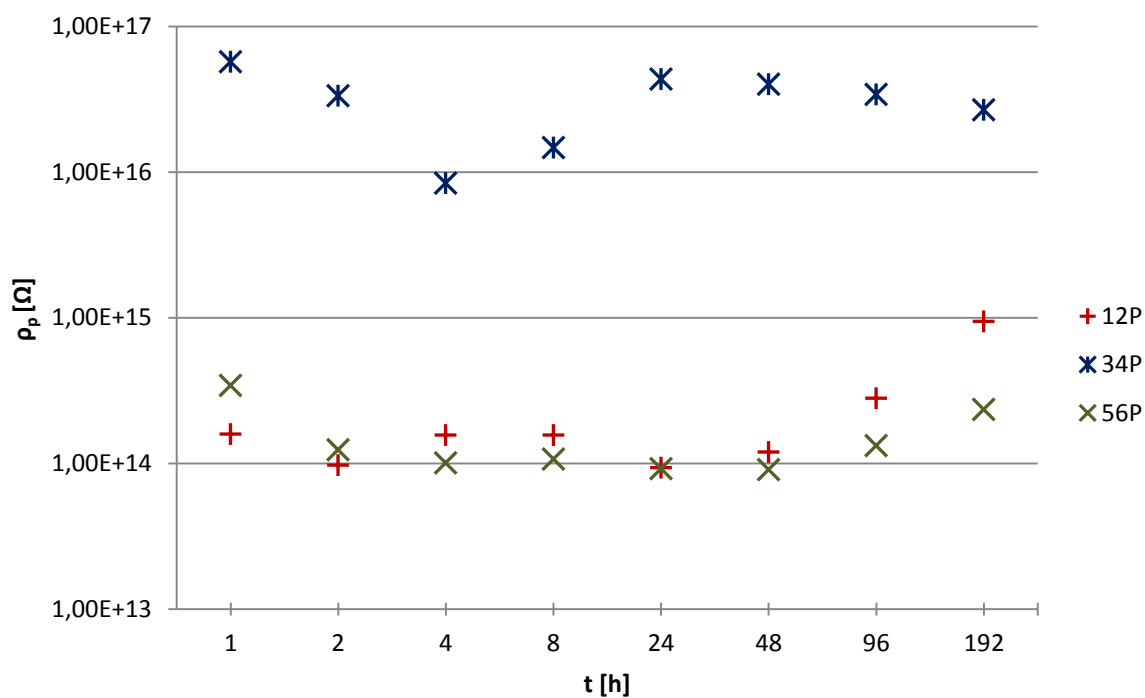
Tab. 1: Vzorčky pro zkoumání změn vnitřní a povrchové rezistivity

označení	struktura	rozměr; tloušťka [mm]	fólie
1R	kruhová elektroda	60 x 60; 1,8	EVA
2R	kruhová elektroda	60 x 60; 1,8	EVA
3R	kruhová elektroda	60 x 60; 1,8	polyolefin
4R	kruhová elektroda	60 x 60; 1,8	polyolefin
5R	kruhová elektroda	60 x 60; 1,8	ionomer
6R	kruhová elektroda	60 x 60; 1,8	ionomer
1P	plošná elektroda	60 x 60; 1,8	EVA
2P	plošná elektroda	60 x 60; 1,8	EVA
3P	plošná elektroda	60 x 60; 1,8	polyolefin
4P	plošná elektroda	60 x 60; 1,8	polyolefin
5P	plošná elektroda	60 x 60; 1,8	ionomer
6P	plošná elektroda	60 x 60; 1,8	ionomer

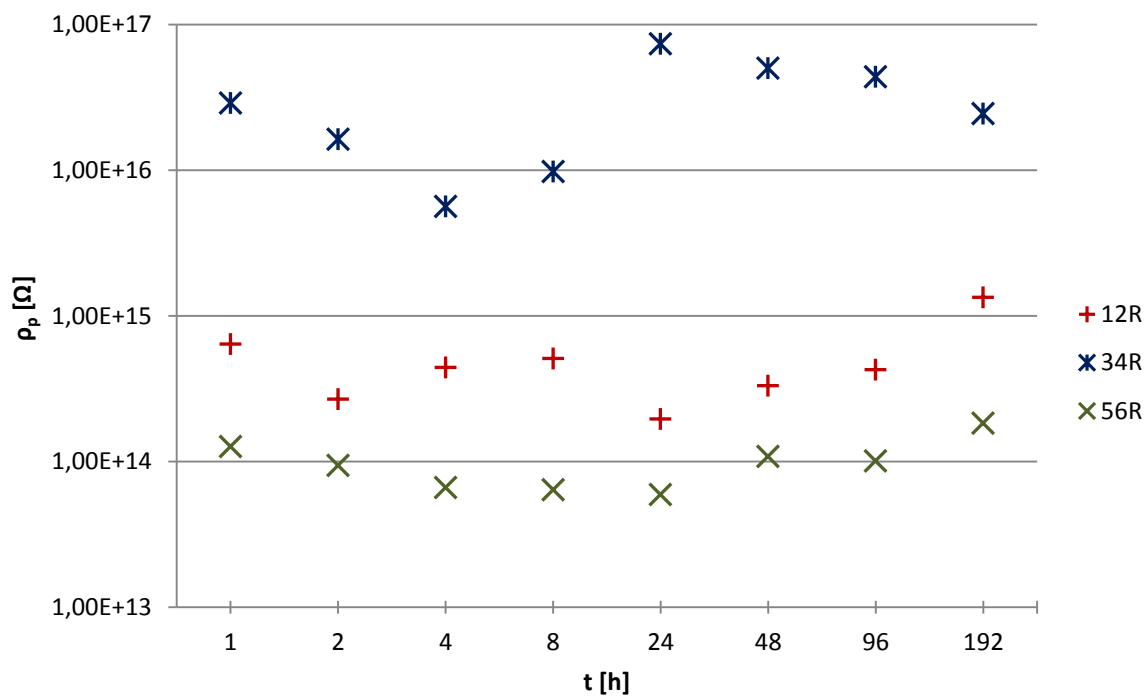
Níže uvedené grafy představují závislosti měrné vnitřní a povrchové rezistivity na čase. Vždy je uveden jeden graf ze zprůměrovaných hodnot vzorků s plošnou elektrodou, druhý s elektrodou kruhovou. Zprůměrovány byly vždy dvě hodnoty (například 1R a 2R byly zprůměrovány na 12R). Grafy nebyly nikterak prokládány, neboť osa X neodpovídá skutečnému časovému měřítku, a to z důvodu přehlednosti grafů. Všechny vzorky byly před podrobením procesu navlhání zatmeleny silikonem, aby vlhkost neprostupovala do vzorků z bočních hran.

Největší povrchovou rezistivitu měl materiál polyolefin (34R, resp. 34P), a to i přestože neměl jako jediná série vzorků nalaminovanou tedlarovou fólii, která by rezistivitu měla ještě zvýšit. Lze z toho usoudit, že tento materiál je vhodný pro aplikaci na místech, kde je žádaná vysoká hodnota povrchové rezistivity. Vzorky s nalaminovanými fóliemi z materiálu EVA a ionomer měly povrchovou rezistivitu velice podobnou, přičemž v případě materiálu EVA dosahovaly po 192 hodinách navlhání hodnoty $1\text{E}+15 \Omega$. Celkově byly hodnoty po různé době navlhání dosti rozdílné, což neodpovídá teoretickým předpokladům. V úvahu je třeba brát znečištění vzorků, které bylo provedeno pouze před samotným měřením. Grafy jsou zobrazeny na Obr. 9 a Obr. 10.

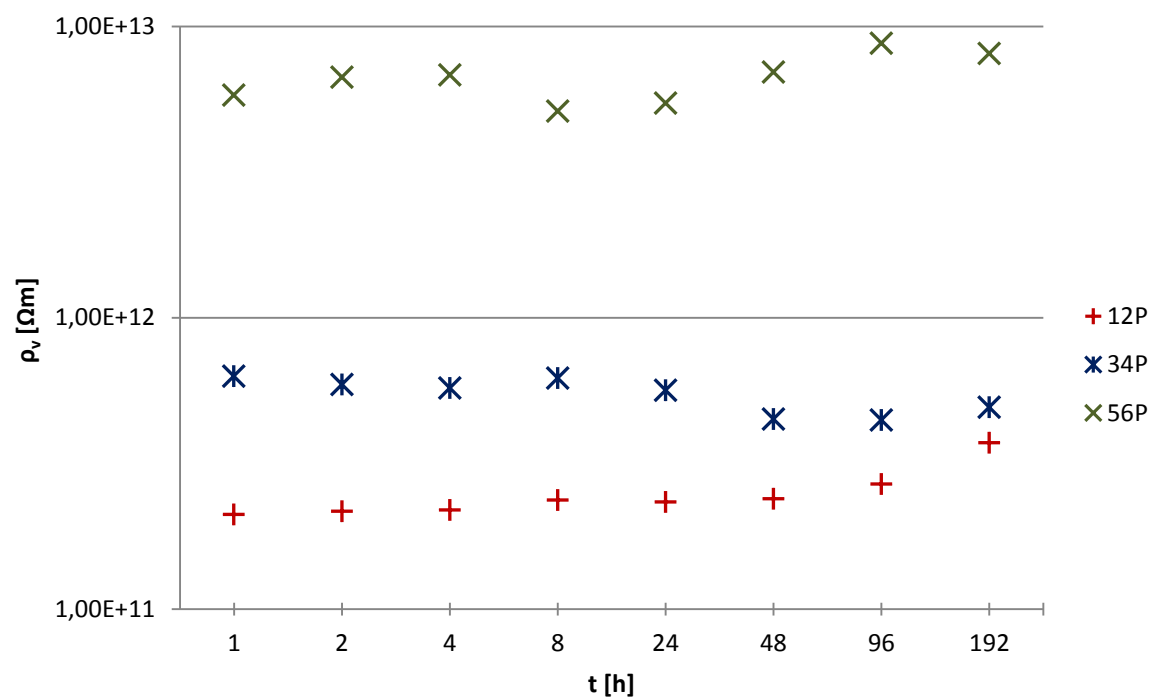
Průběhy vnitřní rezistivity na čase jsou stálejší a jednoznačnější. Nejvyšších hodnot dosahovaly vzorky s materiálem ionomer jejich průběh v závislosti na procesu navlhání však vykazoval vysoké rozdíly hodnot, lze z toho usoudit, že je při zvýšené vlhkosti dobrým, ale nestálým materiálem. Vnitřní rezistivita polyolefinu se pohybovala mezi $1\text{E}+11$ a $1\text{E}+12 \Omega$ stejně jako materiál EVA. Rezistivita polyolefinu s časem navlhání klesala, naopak u materiálu EVA se postupně zvyšovala, viz Obr. 11 a Obr. 12



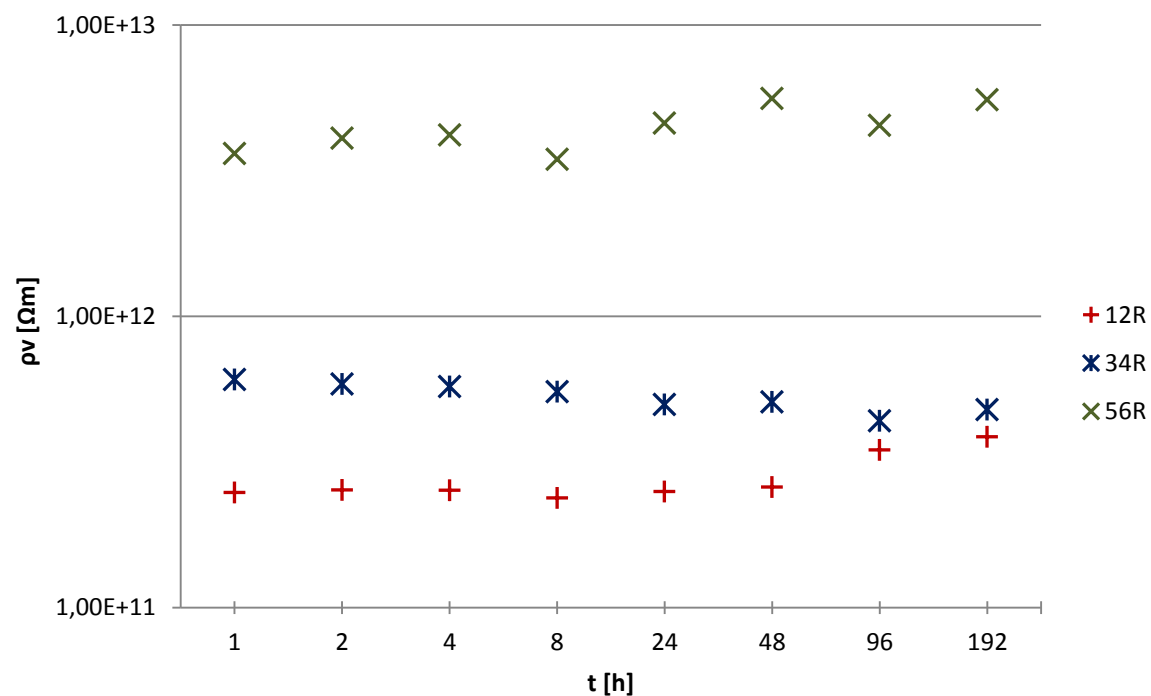
Obr. 9: Závislost měrné povrchové rezistivity vzorků s plošnou elektrodou na čase



Obr. 10: Závislost měrné povrchové rezistivity vzorků s kruhovou elektrodou na čase



Obr. 11: Závislost měrné vnitřní rezistivity vzorků s plošnou elektrodou na čase



Obr. 12: Závislost měrné vnitřní rezistivity vzorků s kruhovou elektrodou na čase

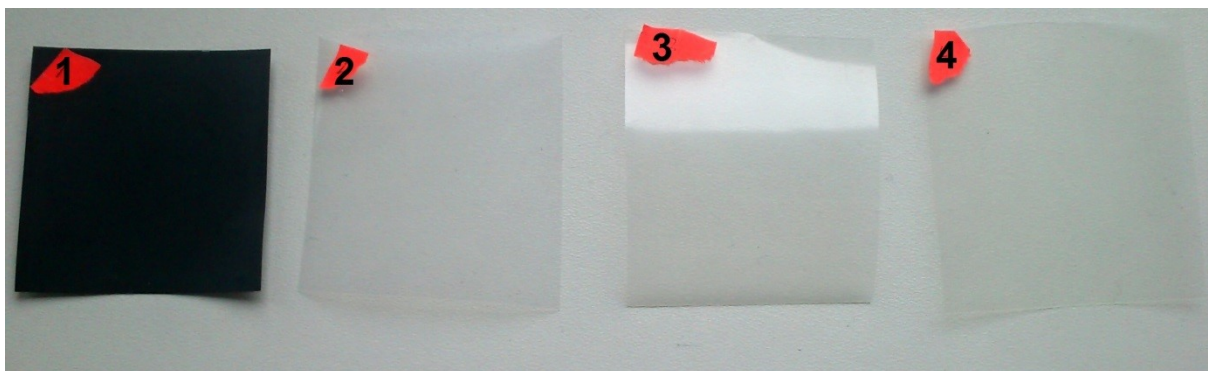
5.1.3 Vnitřní a povrchová měrná rezistivita - Tedlar

Tentokrát byly využity vzorky, které byly na žádost poslány od firmy Solartec s.r.o. Tyto vzorky nebyly nalaminovány na cuprefit jako v předchozím případě. Šlo pouze o čtyři druhy fólií z materiálu Tedlar, který se využívá pro pouzdření fotovoltaických panelů.

První fólie byla černá s tloušťkou 1,8 mm, druhá byla průhledná a její tloušťka byla pouhý 1 mm. Třetí a čtvrtá fólie byly opět průhledné a jejich tloušťky byly shodně 1,5 mm. V uvedeném pořadí jsou na Obr. 13.

Tyto fólie byly vystaveny vlhkosti v uzavíratelné skleněné nádobě s vodou. Nad hladinou byl opět kovový držák, který zabraňoval vzájemnému dotyku vzorků s kapalinou.

V tomto případě byla pro každý druh fólie měřena v určitém čase pouze jedna hodnota, a to z toho důvodu, aby vzorky během naměření hodnot neztrácely svou vlhkost. Hodnoty se tedy neprůměrovaly jako v případě vzorků EVA, ionomer a polyolefin.

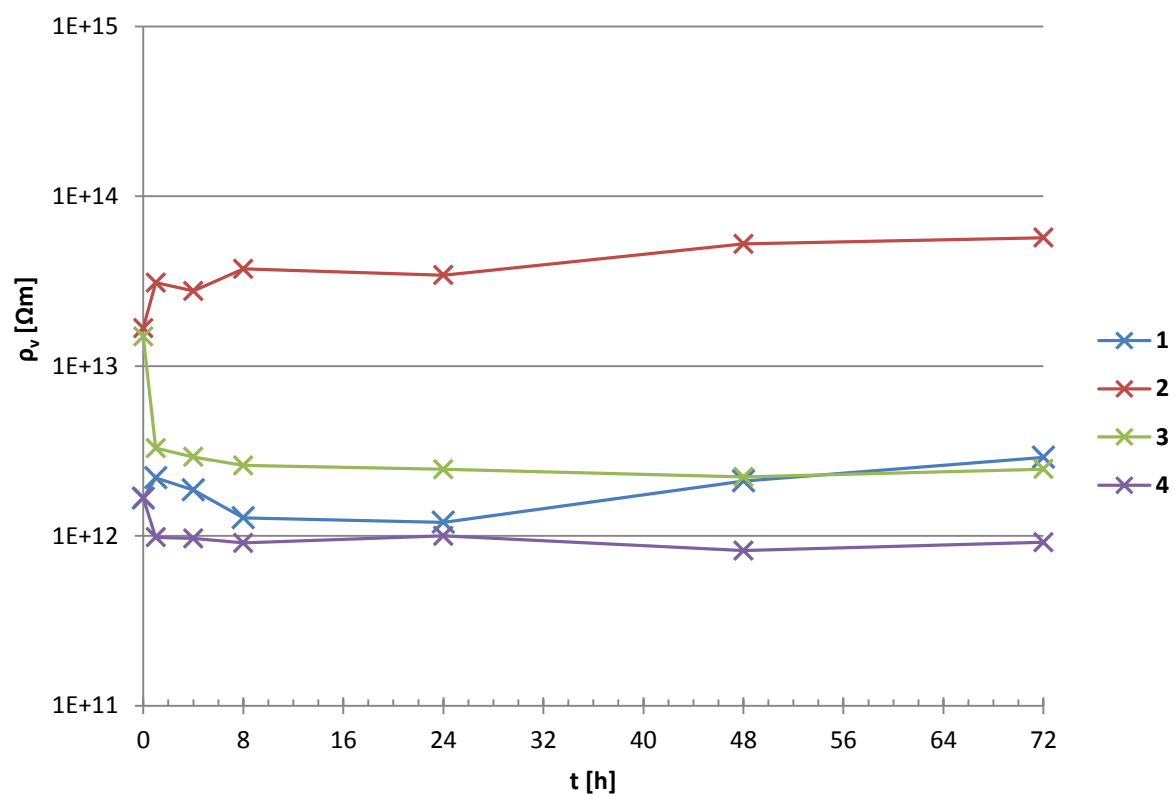


Obr. 13: Vzorky fólií pro měření vnitřní a povrchové rezistivity

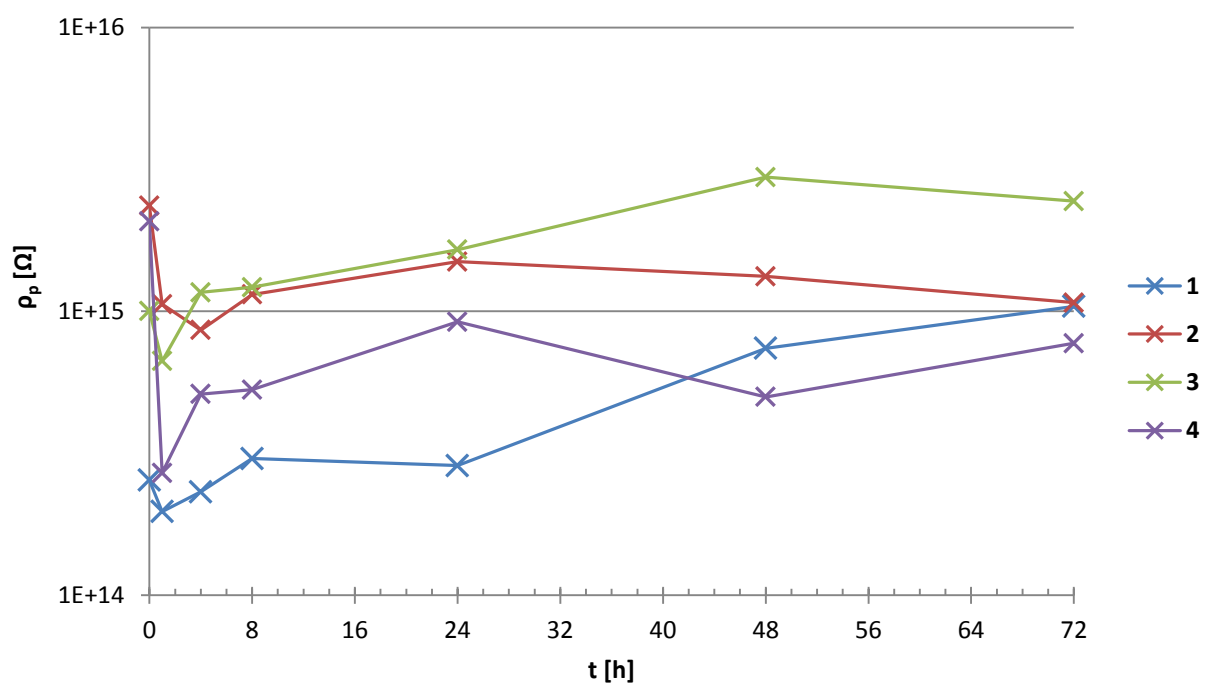
Grafické vyjádření v tomto případě obsahuje reálnou časovou osu, dovolil jsem si proto proložit graf spojnicemi bodů, aby bylo dosaženo vyšší přehlednosti grafů.

Průběh vnitřní rezistivity všech čtyř tedlarových fólií na čase je znázorněn na Obr. 14. Čtvrtá fólie s tloušťkou 1,5 mm měla vnitřní rezistivitu nejmenší, ale držela se téměř konstantně kolem hodnoty $1\text{E}+12 \text{ } \Omega\text{m}$. Druhá fólie měla vnitřní rezistivitu zhruba o jeden řád vyšší a celkově nabývala nejstabilnějších hodnot a to u obou typů rezistivit.

Povrchová rezistivita nezávisí na tloušťce vzorků. V prvních čtyřech hodinách testování docházelo u všech fólií ke značným výkyvům, po 72 hodinách působení vlhkosti se však začaly ustalovat na hodnotě kolem $1\text{E}+15 \text{ } \Omega\text{m}$. Graf povrchové rezistivity v závislosti na čase je znázorněn na Obr. 15.



Obr. 14: Závislost měrné vnitřní rezistivity tedlarových fólií na čase



Obr. 15: Závislost měrné povrchové rezistivity tedlarových fólií na čase

5.2 Paropropustnost

Tato metoda je popsána již v teoretické části. V experimentální části byla zkoumána propustnost vodních par na čtyřech tedlarových fóliích, které byly použity již v části s povrchovou a vnitřní rezistivitou, tyto byly ovšem nové, nedegradované působením vlhka. Měření probíhalo pomocí analyzátoru vlhkosti *Radwag Max 60/WH* (Obr. 17 v příloze) a měřicího kitu *Sampler 2000*.

V následujících bodech je shrnuto, jak měření probíhalo. V první řadě bylo potřeba provést “zero test”, kdy je měřeno množství vodní páry, která se odpaří za danou dobu bez zkoumaného vzorku.

Bez zkoumaného vzorku:

- Tlačítkem *Test menu* nastavit sušicí program na teplotu 40 °C a testovací čas na 60 minut, jednotky v gramech.
- Umístit sestavu hliníkových nádob bez zkoumaného vzorku na podpěrný kříž měřicího ústrojí.
- Tlačítkem *0/T (Zero/Tare)* vytárovat (vynulovat) váhu.
- Vyjmout soustavu nádob, do spodní nádoby pipetou nanést 5 ml destilované vody.
- Uzavřít soustavu nádob.
- Umístit kompletní soustavu hliníkových nádob zpět do analyzátoru.
- Po uzavření víka začne automaticky měření.

Se zkoumaným vzorkem:

- Tlačítkem *Test menu* nastavit sušicí program na teplotu 40 °C a testovací čas 60 minut, jednotky v gramech.
- Umístit sestavu hliníkových nádob včetně zkoumaného vzorku na podpěrný kříž měřicího ústrojí.
- Tlačítkem *0/T (Zero/Tare)* vytárovat (vynulovat) váhu.
- Vyjmout soustavu nádob, do spodní nádoby pipetou nanést 5 ml destilované vody.
- Uzavřít soustavu nádob, přičemž vzorek je nad spodní nádobou.
- Umístit kompletní soustavu hliníkových nádob zpět do analyzátoru.
- Po uzavření víka začne automaticky měření.

Výpočet:

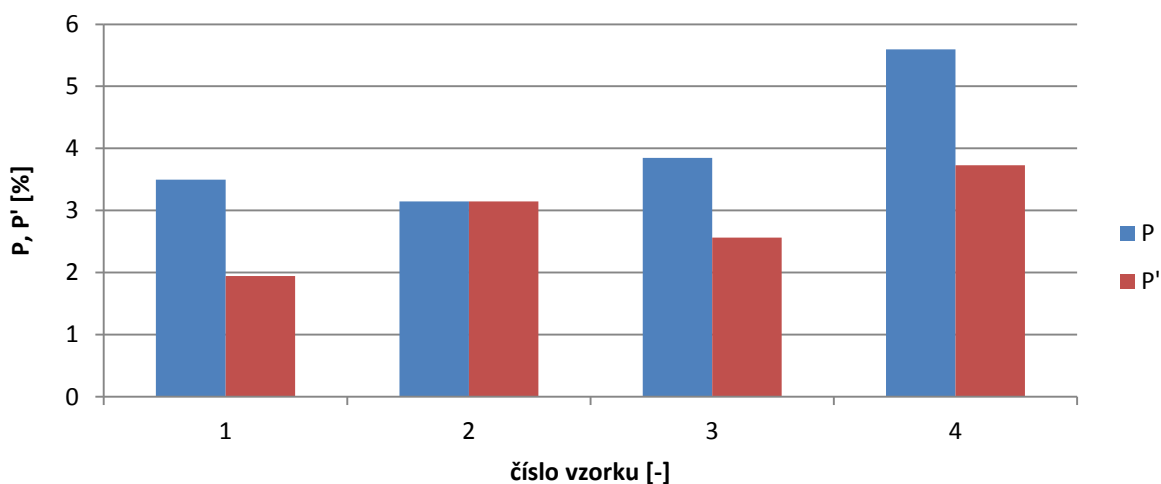
$$P = \frac{M_1 - M_2}{M_{01} - M_{02}} * 100 \text{ [%]}$$

- P = propustnost vodních par [%]
- M_1 = počáteční množství destilované vody při testování vzorku [g]
- M_2 = konečné množství destilované vody při testování vzorku [g]
- M_{01} = 4,922 g = počáteční množství destilované vody bez zkoumaného vzorku
- M_{02} = 4,636 g = konečné množství destilované vody bez zkoumaného vzorku

Výsledky měření:

Tab. 2: Měření paropropustnosti tedlarových fólií

číslo vzorku	tloušťka [mm]	M_1 [g]	M_2 [g]	P [%]	P' [%]
1	1,8	4,907	4,897	3,497	1,943
2	1	4,898	4,889	3,147	3,147
3	1,5	4,873	4,862	3,846	2,564
4	1,5	4,837	4,821	5,594	3,729



Obr. 16: Porovnání paropropustnosti tedlarových fólií

Z hodnot propustnosti vodní par P je patrné, že nejvíce částic vody prošlo skrze čtvrtý materiál. Sloupec P' vyjadřuje vzorky přepočtené na stejnou tloušťku odpovídající třetí fólii – 1 mm. Bylo tak provedeno pro větší objektivitu měření. Po tomto přepočtu měl největší paropropustnost opět čtvrtý vzorek, u ostatních vzorků došlo postupně k výrazným změnám, to je zřejmé z Tab. 2 a Obr. 16.

Závěr

Na začátku této práce byl čtenář seznámen s principem fotovoltaiky. Dozvěděl se, jak se sluneční záření mění na elektrickou energii, získal základní přehled o výrobě a konstrukci samotných fotovoltaických článků a panelů a o jejich dělení na jednotlivé druhy. V další části byly popsány polymerní materiály včetně jejich dělení. Jsou zde také uvedeni dva zástupci – EVA a Tedlar, které byly blíže zkoumány v teoretické části. Třetí kapitola byla zaměřena na všechny degradační vlivy, které působí na jednotlivé části fotovoltaických panelů. Norma ČSN EN 61215 přímo popisuje, jaké parametry musí panely splňovat, aby bylo možné je vyrábět a používat. K testování se používají zrychlené zkoušky, které nahrazují měření v podmínkách, kde se fotovoltaické panely vyskytují – na volných prostranstvích.

Poslední kapitolou byla experimentální část. Bylo v ní zkoumáno, jak bude na materiály EVA, polyolefin, ionomer a Tedlar působit vlhké teplo. Měření probíhalo v laboratoři, kde byl Megaohmmetr *HP 4339B* připojený k pracovní stanici. Vzorky byly umístovány do tříelektrodového systému opatřeného krytem. Z naměřených hodnot vnitřního a povrchového odporu byla pomocí dalších parametrů uvedených v přílohách vypočítána měrná vnitřní a povrchová rezistivita.

Jak již bylo uvedeno v předešlém odstavci, na vzorky působila vlhkost. Toho bylo docíleno umístěním vzorků do nádob, na jejichž dně byla voda. Aby vzorky nepřicházely do přímého kontaktu s vodou, byly umístěny na podstavci, který sahal nad úroveň kapaliny. Takto vzorky podstupovaly navlhávání – celkem 72 hodin v případě tedlarových fólií, 192 hodin u ostatních materiálů, jejichž vyhodnocení je níže.

Největší povrchovou rezistivitu měl materiál polyolefin. Lze z toho usoudit, že tento materiál je vhodný pro aplikaci na místech, kde je kladen důraz na tuto dielektrickou vlastnost. Vzorky s nalamínovanými fóliemi z materiálu EVA a ionomer měly povrchovou rezistivitu velice podobnou, byla ovšem o zhruba dva řády nižší. Celkově byly hodnoty po různé době navhlání dosti rozdílné, což neodpovídá teoretickým předpokladům. V úvahu je třeba brát znečištění vzorků, které bylo provedeno pouze před samotným měřením.

Průběhy vnitřní rezistivity na čas jsou teoreticky stálejší a jednoznačnější. Nejvyšších hodnot dosahovaly vzorky s materiálem ionomer, jejich průběh v závislosti na procesu navlhání však vykazoval vysoké rozdíly hodnot, lze z toho usoudit, že je při zvýšené vlhkosti dobrým, ale nestálým materiálem. Vnitřní rezistivita polyolefinu se pohybovala mezi $1\text{E}+11$ a $1\text{E}+12 \Omega$ stejně jako materiál EVA. Rezistivita polyolefinu s časem navlhání klesala, naopak u materiálu EVA se postupně zvyšovala, rozdíly nebyly tak velké, jako v případě ionomeru.

Měření rezistivit tedlarových fólií proběhlo již v rámci semestrálního projektu. Povrchová rezistivita nezávisí na tloušťce vzorků. V prvních čtyřech hodinách testování docházelo u všech fólií ke značným výkyvům, po 72 hodinách působení vlhkosti se však začaly ustalovat na hodnotě kolem $1\text{E}+15 \Omega\text{m}$.

Čtvrtá fólie s tloušťkou 1,5 mm měla vnitřní rezistivitu nejmenší, ale držela se téměř konstantně kolem hodnoty $1\text{E}+12 \Omega\text{m}$. Druhá fólie měla vnitřní rezistivitu zhruba o jeden řád vyšší a celkově nabývala nejstabilnějších hodnot a to jak v případě vnitřní, tak i povrchové rezistivity.

Poslední částí experimentální části bylo změřit propustnost vodních par skrz tedlarové fólie. Byly použity stejné typy fólií jako pro měření rezistivity – nové, nedegradované působením vlhka. Z hodnot propustnosti vodní par P je patrné, že nejvíce částic vody prošlo skrze čtvrtou fólii. Sloupec P' vyjadřuje vzorky přepočtené na stejnou tloušťku odpovídající třetí fólii – 1 mm. Bylo tak provedeno pro větší objektivitu měření. Po tomto přepočtu měl největší paropropustnost opět čtvrtý vzorek, u ostatních vzorků došlo postupně k výrazným změnám.

Pokud jste práci dočetli až do tohoto místa, rád bych Vám poděkoval a doufám, že pro Vás byla práce alespoň v některých částech naučná či zajímavá.

Seznam použité literatury

- [1] Czech RE Agency: *Fotovoltaika pro každého*. [online]. 2009 [cit. 28. 11. 2013].
Dostupné z: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>>
- [2] ŘEHÁK, J., BÁRTEK, J., BAŘINKA, R.. *Fotovoltaika a fotovoltaické systémy v podmínkách ČR a jejich navrhování*. Praha: Česká energetická agentura, 2010, 61 s.
- [3] ISOFEN ENERGY s.r.o.: *Teorie fotovoltaiky*. [online]. 2009 [cit. 11. 12. 2013].
Dostupné z: <<http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx>>
- [4] Green Rhino Energy: *The Principles of Photovoltaics*. [online]. 2013 [cit. 12. 12. 2013].
Dostupné z: <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_cells.php>
- [5] ČADA, M. *Degradační testy polymerních materiálů vystavených elektrickému poli*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [6] CHLEBOUN, J. *Degradační testy polymerních materiálů vystavených klimatickým podmínkám*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 59 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [7] LIBRA, M., POULEK, V. *Solární energie: fotovoltaika - perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*. 1. vyd. V Praze: ČZU, 2005, 122 s. ISBN 80-213-1335-8.
- [8] ŠORČÍK, V. *Polymery „stručně“*. [online]. Praha [cit. 14. 12. 2013].
Dostupné z: <<http://www.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>>
- [9] MORAVEC. *Polymery: Polymery, historie, využití, příprava, struktura*. [online]. [cit. 15. 12. 2013].
Dostupné z: <http://www.vyuka.z-moravec.net/download/_chemie/1-01polymery.pdf>
- [10] MLEZIVA, J. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7.
- [11] MASTNÝ, P. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. ISBN 978-80-01-04937-2.

- [12] Czech Nature Energy: *Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny*. [online]. 2013 [cit. 18. 12. 2013].
Dostupné z: <<http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>>
- [13] POLSTEROVÁ, H. *Spolehlivost v elektrotechnice*. Brno: Vysoké učení technické, 2003. 82 s.
- [14] ČSN EN 61215: *Fotovoltaické (FV) moduly z krystalického křemíku pro pozemní použití – posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu*. Praha: Český normalizační institut, 1997. 40 s.
- [15] DuPont: *DuPont Glass Laminating Solutions Technical Information..* [online]. 2014 [cit. 13. 4. 2014].
Dostupné z: <http://www2.dupont.com/SafetyGlass/en_US/tech_info/index.html>.
- [16] ABUŠINOV, A. *Plasty se podílejí na solárním boomu*, [online]. 2014 [cit. 13. 4. 2014].
Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-se-podileji-na-solarnim-boomu.html>>
- [17] Radwag: *Moisture analyzer MAX series*. [online]. 2014 [cit. 16. 4. 2014].
Dostupné z: <http://www.radwag.com/pliki/instrukcje/moisture_analyzer_max.pdf>
- [18] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [19] HOFMAN, J. *Polarizace dielektrika*. [online]. 2005 [cit. 27. 4. 2014].
Dostupné z: <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_ekniha-001/pdf/227.pdf>
- [20] ŠAVEL, J. *Elektrotechnologie*. 2. rozšířené vydání. Praha: BEN, 2003. 264 s.
- [21] JIRÁK, J., AUTRATA, R., LIEDERMANN, K., a kolektiv. *Materiály a technická dokumentace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně

Seznam příloh

Příloha A – Naměřené a vypočtené hodnoty vnitřní a povrchové resistivity.

Příloha B – Doplnující informace k výpočtu rezistivit.

Příloha C – Analyzátor vlhkosti *Radwag Max 60/WH*

Příloha A – Naměřené a vypočtené hodnoty vnitřní a povrchové rezistivity

Tab. 3: Zprůměrované naměřené a vypočtené hodnoty rezistivit materiálů EVA, ionomer a polyolefin

vzorky [-]	R_p [Ω]	R_v [Ω]	ρ_p [Ω]	ρ_v [Ωm]	R_p [Ω]	R_v [Ω]	ρ_p [Ω]	ρ_v [Ωm]
	1 hodina				24 hodin			
12P	9,48E+12	7,17E+11	1,59E+14	2,11E+11	5,56E+12	7,90E+11	9,32E+13	2,33E+11
34P	3,41E+15	2,14E+12	5,71E+16	6,30E+11	2,59E+15	1,91E+12	4,33E+16	5,63E+11
56P	2,05E+13	1,97E+13	3,43E+14	5,81E+12	5,47E+12	1,85E+13	9,17E+13	5,45E+12
12R	3,81E+13	8,41E+11	6,38E+14	2,48E+11	1,17E+13	8,48E+11	1,95E+14	2,50E+11
34R	1,72E+15	2,06E+12	2,88E+16	6,06E+11	4,38E+15	1,69E+12	7,33E+16	4,98E+11
56R	7,53E+12	1,23E+13	1,26E+14	3,62E+12	3,54E+12	1,56E+13	5,92E+13	4,60E+12
	2 hodiny				48 hodin			
12P	5,80E+12	7,34E+11	9,72E+13	2,16E+11	7,12E+12	8,11E+11	1,19E+14	2,39E+11
34P	1,99E+15	2,00E+12	3,34E+16	5,89E+11	2,39E+15	1,52E+12	4,01E+16	4,48E+11
56P	7,40E+12	2,27E+13	1,24E+14	6,68E+12	5,39E+12	2,36E+13	9,03E+13	6,97E+12
12R	1,59E+13	8,58E+11	2,67E+14	2,53E+11	1,97E+13	8,79E+11	3,30E+14	2,59E+11
34R	9,72E+14	1,99E+12	1,63E+16	5,85E+11	2,99E+15	1,72E+12	5,01E+16	5,08E+11
56R	5,60E+12	1,38E+13	9,38E+13	4,08E+12	6,43E+12	1,89E+13	1,08E+14	5,58E+12
	4 hodiny				96 hodin			
12P	9,34E+12	7,41E+11	1,57E+14	2,19E+11	1,67E+13	9,10E+11	2,80E+14	2,68E+11
34P	5,00E+14	1,94E+12	8,38E+15	5,73E+11	2,03E+15	1,51E+12	3,41E+16	4,46E+11
56P	6,01E+12	2,31E+13	1,01E+14	6,80E+12	7,89E+12	2,96E+13	1,32E+14	8,74E+12
12R	2,63E+13	8,57E+11	4,40E+14	2,53E+11	2,54E+13	1,18E+12	4,26E+14	3,48E+11
34R	3,35E+14	1,94E+12	5,62E+15	5,73E+11	2,60E+15	1,48E+12	4,36E+16	4,37E+11
56R	3,95E+12	1,42E+13	6,62E+13	4,19E+12	6,01E+12	1,53E+13	1,01E+14	4,51E+12
	8 hodin				192 hodin			
12P	9,32E+12	8,03E+11	1,56E+14	2,37E+11	5,62E+13	1,26E+12	9,42E+14	3,72E+11
34P	8,77E+14	2,10E+12	1,47E+16	6,20E+11	1,60E+15	1,67E+12	2,67E+16	4,92E+11
56P	6,37E+12	1,73E+13	1,07E+14	5,11E+12	1,40E+13	2,74E+13	2,35E+14	8,07E+12
12R	3,03E+13	8,06E+11	5,07E+14	2,38E+11	7,97E+13	1,31E+12	1,33E+15	3,85E+11
34R	5,82E+14	1,87E+12	9,75E+15	5,51E+11	1,46E+15	1,62E+12	2,44E+16	4,78E+11
56R	3,81E+12	1,17E+13	6,38E+13	3,46E+12	1,09E+13	1,88E+13	1,83E+14	5,53E+12

Tab. 4: Naměřené a vypočtené hodnoty vnitřní a povrchové resistivity materiálu Tedlar

vzorek [-]	R_v [Ω]	R_p [Ω]	ρ_p [Ω]	ρ_v [Ωm]
bez navlhnutí				
1	5,65E+12	1,52E+13	1,67E+13	2,54E+14
2	3,15E+13	1,40E+14	1,67E+14	2,35E+15
3	4,21E+13	5,98E+13	1,49E+14	1,00E+15
4	4,72E+12	1,24E+14	1,67E+13	2,08E+15
1 hodina				
1	7,44E+12	1,18E+13	2,19E+13	1,97E+14
2	5,83E+13	6,32E+13	3,09E+14	1,06E+15
3	9,26E+12	3,98E+13	3,28E+13	6,68E+14
4	2,77E+12	1,61E+13	9,79E+12	2,70E+14
4 hodiny				
1	6,31E+12	1,38E+13	1,86E+13	2,31E+14
2	5,21E+13	5,13E+13	2,76E+14	8,59E+14
3	8,23E+12	6,96E+13	2,91E+13	1,17E+15
4	2,73E+12	3,05E+13	9,65E+12	5,11E+14
8 hodin				
1	4,32E+12	1,81E+13	1,28E+13	3,03E+14
2	7,03E+13	6,84E+13	3,73E+14	1,15E+15
3	7,33E+12	7,25E+13	2,59E+13	1,21E+15
4	2,57E+12	3,16E+13	9,09E+12	5,29E+14
24 hodin				
1	4,07E+12	1,71E+13	1,20E+13	2,86E+14
2	6,45E+13	8,93E+13	3,43E+14	1,50E+15
3	6,96E+12	9,84E+13	2,46E+13	1,65E+15
4	2,82E+12	5,48E+13	9,99E+12	9,18E+14
48 hodin				
1	7,13E+12	4,43E+13	2,10E+13	7,41E+14
2	9,86E+13	7,92E+13	5,24E+14	1,33E+15
3	6,27E+12	1,77E+14	2,22E+13	2,97E+15
4	2,31E+12	2,98E+13	8,18E+12	4,99E+14
72 hodin				
1	9,82E+12	6,21E+13	2,90E+13	1,04E+15
2	1,07E+14	6,40E+13	5,70E+14	1,07E+15
3	6,98E+12	1,46E+14	2,47E+13	2,44E+15
4	2,59E+12	4,60E+13	9,16E+12	7,72E+14

Příloha B – Doplnující informace k výpočtu rezistivit

Tab. 5: Tloušťky tedlarových fólií

Tloušťky tedlarových fólií [m]	
h_1	1,80E-04
h_2	1,00E-04
h_3	1,50E-04
h_4	1,50E-04

Tab. 6: Doplnující informace pro výpočet rezistivit

D1 [m]	0,026
D2 [m]	0,038
c [m]	0,006
doba nabíjení [s]	60
U [V]	300

Příloha C – Analyzátor vlhkosti *Radwag Max 60/WH*



Obr. 17: Analyzátor vlhkosti *Radwag Max 60/WH*