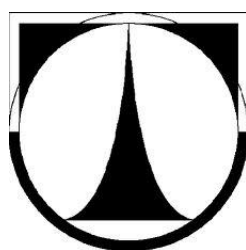


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



BAKALÁŘSKÝ PROJEKT

Studium elektrických a mechanických vlastností materiálu PET

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 Elektronické informační a řídicí systémy

Studium elektrických a mechanických vlastností materiálu PET

Study of electrical and mechanical natures of material PET

Bakalářský projekt

Autor bakalářského projektu: Michal Kohl

Vedoucí bakalářského projektu: Ing. Leoš Beran, Ph.D.

Konzultant bakalářského projektu: Ing. Miroslava Maršálková, Ph.D.

V Liberci 3. 6. 2011

Místo tohoto listu bude vloženo originální zadání s podpisy

Anotace

Tento projekt se zabývá měřením a následným vyhodnocováním dosažených náměrů materiálu PET, který se používá jako izolant ve statorovém vinutí. Hlavní téma této práce je přeměření a porovnání výsledků s výsledky, které naměřil Ing. Jan Vokřínek v roce 2010. Cílem tedy bylo zjištění, zda došlo v materiálu PET zhruba po roce k nějakým změnám. Změnami myslím změny vnitřní rezistivity a podílu krystalické části v materiálu PET.

Klíčová slova: rezistivita, entalpie, krystaličnost

Annotation

This project deal with measurement and resulting evaluation achieved elevations of material PET that the employs like insulating material in stator winding. Head theme of this work is gauge and comparison results with results that Ing. Jan Vokřínek measure out in year 2010. Aim then was discovery, whether get in material PET roughly after a year to some changes. Changes I think ganges of inner resistivity and share of crystallic parts in material PET.

Key words: resistivity, enthalpy, crystallinity

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou projektovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména §60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé projektové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li projektovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Projektovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím projektové práce a konzultantem.

Datum: 3. 6. 2011

Podpis:

Poděkování

Děkuji všem, kteří mi pomáhali při realizaci této projektové práce. Zejména bych chtěl poděkovat Ing. Leoši Beranovi, Ph.D. za cenné rady a trpělivost při měření rezistivity a vypracovávání této práce. Dále také děkuji Ing. Miroslavě Maršákové, Ph.D. za ochotu a pomoc při měření DSC a vyhodnocování dosažených výsledků. Oběma děkuji také za jejich cenný čas.

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	8
Seznam použitých zkratek.....	8
1 Úvod.....	9
2 Charakteristika PET	10
3 Zkoumané materiály.....	11
3.1 Materiál NEN-F 220/125	11
3.2 Materiál Voltaflex 2598.....	11
3.3 Samotná PET fólie.....	12
4 Měření vnitřní rezistivity	13
4.1 Rezistivita	13
4.2 Vnitřní rezistivita.....	13
4.3 Postup měření.....	14
4.4 Naměřené hodnoty a grafy.....	15
4.5 Vyhodnocení	18
5 Termická analýza – DSC.....	19
5.1 Popis metody.....	19
5.2 Krystaličnost polymerů.....	20
5.3 Postup měření.....	20
5.4 Naměřené hodnoty a grafy.....	21
5.5 Vyhodnocení	24
6 Závěr	25

Seznam použitých symbolů

d	m	tloušťka vzorku
S	m^2	plocha elektrod
R_v	Ω	měrný elektrický odpor
ρ_v	Ωm	vnitřní rezistivita
$\overline{X}$		aritmetický průměr
X_i		soubor naměřených hodnot
N		počet měření
$\hat{s}$		střední kvadratická chyba aritmetického průměru
ΔH	J / g	změna entalpie
ΔH_m	J / g	entalpie tání
ΔH_{m0}	J / g	entalpie tání zcela krystalického materiálu
X_C	%	krystaličnost – podíl krystalické části v materiálu
t_a	h	doba tepelného zatěžování

Seznam použitých zkratk

PET	polyethylen-tereftalát
PEPT	jiné označení pro polyethylen-tereftalát
PES	polyesterová rohož
DSC	diferenciální skenovací kalorimetrie

1 Úvod

Bakalářský projekt se zabývá posuzováním vlastností izolačního materiálu PET (Polyethylen-tereftalát) při dlouhodobém zatěžování materiálu PET. Tento materiál se používá jako izolant statorového vinutí elektrických strojů.

PET materiály jsou používány jako izolace pro své dobré chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti. Ovšem tyto vlastnosti se časem mohou zhoršovat. Dochází k tepelnému stárnutí neboli snižování mechanické pevnosti a větším dielektrickým ztrátám. Z tohoto důvodu je výrazně ovlivněna životnost materiálu vlivem tepelného zatěžování.

V první části práce je naznačeno, co to je PET materiál. Jsou zde uvedeny i konkrétní typy materiálu, jež byly hodnoceny.

V druhé části je uvedeno měření vnitřní rezistivity třech konkrétních materiálů PET a vyhodnocení jejich změn v naměřených hodnotách z let 2010 a 2011.

Ve třetí části je provedeno hodnocení změn ve struktuře materiálu pomocí procentuálního vyjádření krystalické části neboli krystaličnosti.

2 Charakteristika PET

Polyetyltereftalát patří chemicky do skupiny polyesterů. Jejich společným znakem je přítomnost esterových vazeb v hlavním makromolekulovém řetězci. PET je známý především jako obalový materiál. Přibližně 60 % vyrobeného PETu se používá na výrobu nevratných obalů na jídlo a nápoje. PET je však materiál s mimořádnými vlastnostmi a jeho potenciál je mnohem širší.

PET je vysoce pevný, tuhý a tvrdý termoplast, který dobře odolává deformacím. Další vlastností je slabá navlhavost, absorbuje jen velmi málo vody. Vyniká velmi dobrou chemickou a tepelnou odolností a malou teplotní roztažností. Může být průhledný a bezbarvý, ale silnější části jsou obvykle matné a neprůhledné. Vyznačuje se velmi dobrými elektrickými vlastnostmi, dále vynikajícími kluznými vlastnostmi a oděruvzdorností.

Materiál PET je vyráběn v různých stupních krystalové struktury, od amorfni až po vysoce krystalickou. Standardně se poměr krystalické části vůči amorfni části pohybuje mezi 30 – 35%. Čím je tento poměr větší, tím jsou lepší elektrické vlastnosti izolačního materiálu.

PET splňuje základní požadavky, které by měl izolační materiál pro použití v elektrických strojích mít. Nejen dobré elektrické, ale i mechanické vlastnosti jsou důležitým hlediskem při jeho výběru. Svými vlastnostmi spojuje požadované normy a je zároveň cenově přijatelný.

Pro své výborné vlastnosti je proto využíván PET jako dielektrikum kondenzátorů, k izolaci vodičů elektrického proudu či elektroizolační lak. Používá se pro magnetické pásy či fotografické filmy. Dále je využíván na řadu finálních výrobků, jako jsou obalové materiály, tkaniny, fólie, vlákna. Tato vlákna se mohou vyskytovat prakticky ve všech spotřebních textilních výrobcích. Spřádají se i spolu s vlnou, bavlnou apod. Využívají se také na technické tkaniny a lana, k výrobě kordů pro pneumatiky [1] .

3 Zkoumané materiály

3.1 Materiál NEN-F 220/125

Prvním materiálem byl materiál NEN-F 220/125, který dodává výrobce EKOBAL Rožnov spol.s.r.o. Jde o plošný materiál, který je složený ze tří vrstev. Uspořádání vrstev vyplývá z označení materiálu. N-polyesterová rohož (PES), E-PETP a poslední vrstva N. Schematické uspořádání vrstev je znázorněno na Obr. 1.



Obr. 1: Uspořádání vrstev izolačního materiálu NEN-F 220/125

Celková tloušťka vzorku je 0,22 mm s tím, že tloušťka nosné fólie je 0,125 mm. Polyesterové rohože zabraňují poškození fólie při výrobním procesu elektrického stroje (vkládání do drážek, vtahování vinutí aj.)

Tento materiál je zařazen do teplotní třídy 180 (H). Jeho maximální pracovní teplota je tedy 180 °C.

Materiál NEN-F byl zatěžován teplotou po dobu 6096 h [1] .

3.2 Materiál Voltaflex 2598

Druhým materiálem byl Voltaflex 2598, který dodává výrobce ISOVOLTA AG, Rakousko.

Voltaflex 2598 je třívrstvý, pružný a ohebný izolační materiál. Skládá se z vrstvy PET filmu, která je chráněna z každé strany zvlákněným PET. Princip ochrany PET filmu je tedy jiný než u materiálu NEN-F. Ochranné vrstvy PET jsou pórovité a propustné. Tloušťka vzorku je 0,23 mm, samotná prostřední vrstva PET fólie je tenká 0,125 mm.

Materiál je zařazen do teplotní třídy F/H. Pracovní teploty jsou tedy 130 - 155 °C, maximální teplota 180 °C.

Materiál Voltaflex byl zatěžován teplotou po dobu 5352 h, z důvodu pozdějšího dodání materiálu výrobcem [1] .

3.3 Samotná PET fólie

K dispozici byla navíc i samotná nosná PET fólie, která byla dodána výrobcem EKOBAL Rožnov. Tepelné zatěžování a měření vlastností samotné PET fólie sloužilo k určení, jakou roli a vliv na sledované parametry mají ochranné vrstvy, a zda chyby měření nemohou vznikat právě díky ochranným vrstvám.

Samotná PET fólie byla zatěžována teplotou pouze po dobu 3504 h. Důvodem bylo pozdější dodání a také nedostatek místa uvnitř horkovzdušného sterilizátoru [1] .

4 Měření vnitřní rezistivity

Při měření elektrického odporu izolantů je nutné rozlišovat různé druhy odporů [1] .

4.1 Rezistivita

Rezistivita ρ je měrný elektrický odpor vztažený k ploše elektrod, pokud se jedná o povrchovou rezistivitu [Ω], nebo vztažený k ploše elektrod a k tloušťce měřeného materiálu, pokud se jedná o vnitřní rezistivitu [m].

Veličiny charakterizující materiál jsou měrný vnitřní a měrný povrchový odpor, které nezávisí na geometrii vzorku. Dále lze říci, že materiál charakterizuje pouze měrný vnitřní odpor, protože měrný povrchový odpor závisí na znečištění a vlhkosti [1] .

4.2 Vnitřní rezistivita

Vnitřní rezistivita je odpor materiálu umístěného mezi dvěma elektrodami (jedna elektroda je umístěna pod vzorkem a druhá leží na jeho povrchu) a je definována poměrem stejnosměrného napětí a proudu tekoucího vnitřkem vzorku.

Rovnice 1 ukazuje, jak se přepočítává vnitřní rezistivita na měrný elektrický odpor:

$$R_v = \rho_v \frac{S}{d}, \quad (1)$$

kde: R_v měrný elektrický odpor [Ω]

ρ_v vnitřní rezistivita [Ωm]

S plocha elektrod [m^2]

d tloušťka vzorku [m]

Nejpravděpodobnější hodnotu výsledku měření lze vypočítat pomocí aritmetického průměru

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}, \quad (2)$$

kde N je počet měření, $\bar{X}$ je aritmetický průměr, X_i je soubor naměřených hodnot.

Nejistotu s jakou byl aritmetický průměr měřené veličiny určen, lze odhadnout pomocí střední kvadratické chyby aritmetického průměru [1]

$$\hat{s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{X} - X_i)^2}{N(N-1)}} \quad (3)$$

4.3 Postup měření

Měření vnitřní rezistivity bylo prováděno pomocí měřicího přístroje Keithley 6517A, k němuž byl připojen přípravek Keithley Model 8009. Elektrometr Keithley 6517A je vhodný pro měření vnitřní rezistivity díky vestavěnému zdroji alternujícího napětí 0 až 1000 V. Po dohodě s vedoucím jsem stanovil tuto hodnotu na 800 V.

Keithley Model 8009 je vybaven elektrodami, mezi něž byl měřený vzorek vkládán. Tento přípravek zajišťuje konstantní přtlak elektrod na vzorek, čímž se eliminuje chyba, která by byla způsobena nestejnoměrným přtlakem.

Komunikaci mezi počítačem a Keithley 6517A zajišťoval software Keithley 6517 Hi-R Test. Pomocí tohoto softwaru byla automaticky změřena vnitřní rezistivita.

Pro každou dobu tepelného zatížení na 190 °C byly ve většině případů použity tři vzorky. Každý vzorek byl změřen 3 x z důvodu vyloučení náhodných chyb a větší věrohodnosti měření.

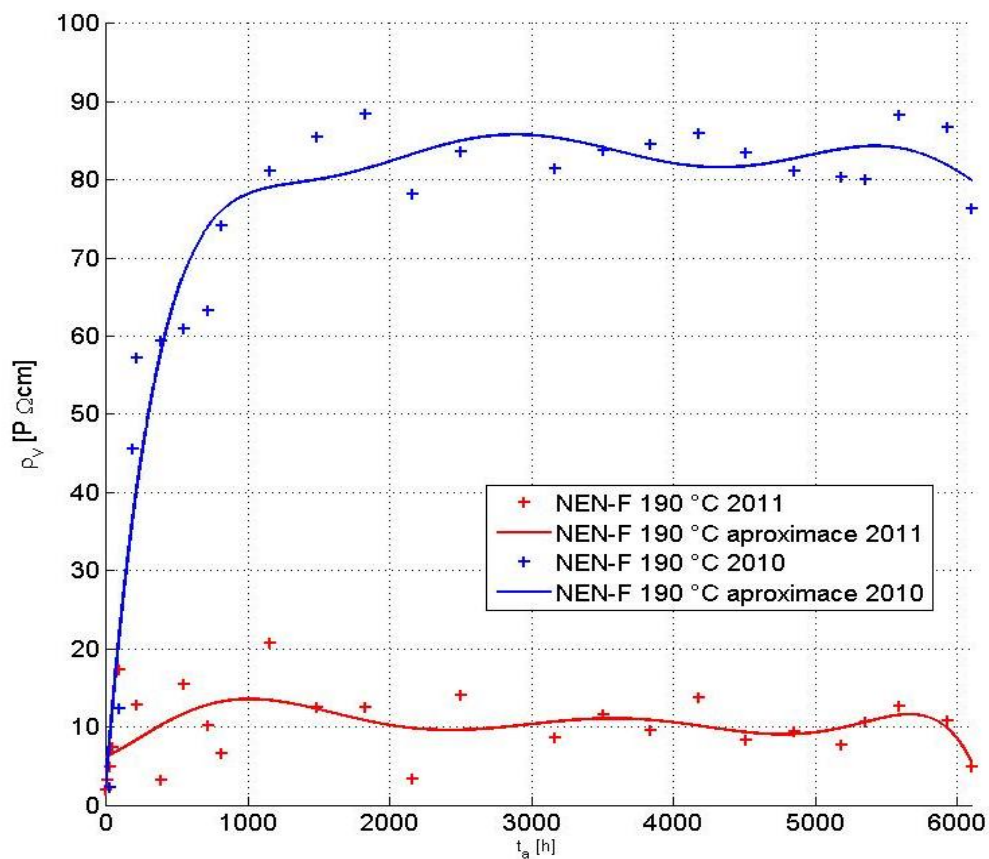
4.4 Naměřené hodnoty a grafy

Porovnání změny vnitřní rezistivity materiálu NEN-F 220/125 z roku 2010 a 2011:

NEN-F 220/125		
t_a [h]	ρ_v [PΩcm] z 2010	ρ_v [PΩcm] z 2011
1	$2,79 \pm 0,01$	$1,93 \pm 0,33$
5	$3,87 \pm 0,01$	$3,16 \pm 0,89$
24	$7,34 \pm 0,01$	$4,96 \pm 0,80$
48	$12,3 \pm 0,01$	$7,34 \pm 0,36$
96	-	$17,3 \pm 5,9$
192	$45,6 \pm 0,1$	-
216	$57,2 \pm 0,1$	$12,8 \pm 1,4$
384	$59,4 \pm 0,1$	$3,16 \pm 0,82$
552	$61,1 \pm 0,2$	$15,4 \pm 7,0$
720	$63,2 \pm 0,2$	$10,17 \pm 0,83$
816	$74,2 \pm 0,2$	$6,6 \pm 3,0$
1152	$81,2 \pm 0,2$	$20,80 \pm 0,48$
1488	$85,5 \pm 0,3$	$12,49 \pm 0,65$
1824	$88,4 \pm 0,3$	$12,54 \pm 0,33$

NEN-F 220/125		
t_a [h]	ρ_v [PΩcm] z 2010	ρ_v [PΩcm] z 2011
2160	$78,2 \pm 0,3$	$3,37 \pm 0,48$
2496	$83,6 \pm 0,3$	$14,1 \pm 1,1$
3168	$81,4 \pm 0,3$	$8,6 \pm 1,7$
3504	$83,8 \pm 0,3$	$11,6 \pm 1,1$
3840	$84,6 \pm 0,3$	$9,5 \pm 1,3$
4176	$85,9 \pm 0,3$	$13,8 \pm 1,2$
4512	$83,5 \pm 0,3$	$8,26 \pm 0,62$
4848	$81,1 \pm 0,4$	$9,40 \pm 0,99$
5184	$80,4 \pm 0,4$	$7,64 \pm 0,72$
5352	$80,1 \pm 0,4$	$10,6 \pm 1,5$
5592	$88,2 \pm 0,4$	$12,7 \pm 1,2$
5928	$86,8 \pm 0,4$	$10,80 \pm 0,13$
6096	$76,3 \pm 0,4$	$4,8 \pm 2,4$

Tab. 1: Vnitřní rezistivita materiálu NEN-F 220/125



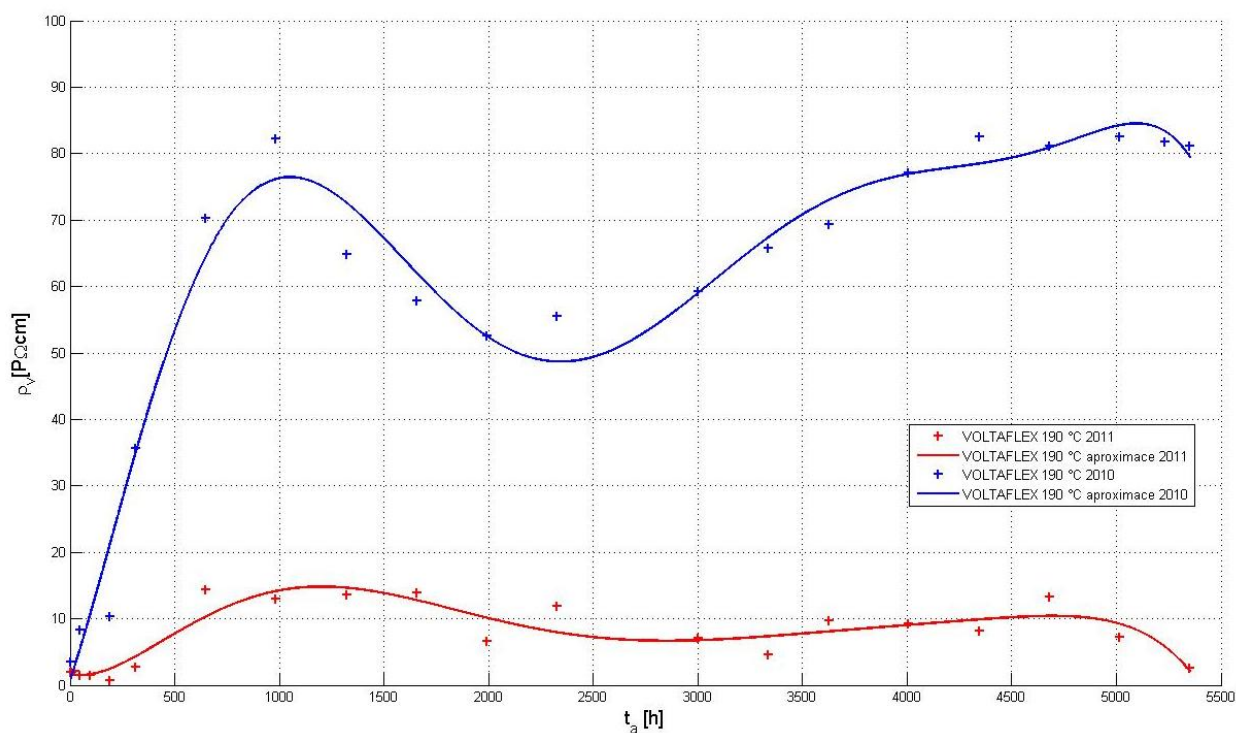
Obr. 2: Závislost vnitřní rezistivity materiálu NEN-F na době tepelného zatížení teplotou 190 °C

Porovnání změny vnitřní rezistivity materiálu VOLTAFLEX 2598 z roku 2010 a 2011:

VOLTAFLEX 2598		
t_a [h]	ρ_v [PΩcm] z 2010	ρ_v [PΩcm] z 2011
1	$4,42 \pm 0,01$	$2,01 \pm 0,38$
5	$5,13 \pm 0,01$	$1,96 \pm 0,53$
24	$7,49 \pm 0,01$	$2,083 \pm 0,065$
48	$8,28 \pm 0,01$	$1,43 \pm 0,57$
96	-	$1,52 \pm 0,41$
192	$10,3 \pm 0,1$	$0,7517 \pm 0,0014$
312	$35,7 \pm 0,02$	$2,76 \pm 0,54$
648	$70,3 \pm 0,1$	$14,32 \pm 0,62$
984	$82,6 \pm 0,2$	$12,9 \pm 6,5$
1320	$64,9 \pm 0,2$	$13,5 \pm 1,9$
1656	$57,9 \pm 0,2$	$13,9 \pm 0,21$

VOLTAFLEX 2598		
t_a [h]	ρ_v [PΩcm] z 2010	ρ_v [PΩcm] z 2011
1992	$52,6 \pm 0,3$	$6,56 \pm 0,60$
2328	$55,5 \pm 0,3$	$11,8 \pm 1,7$
3000	$59,3 \pm 0,2$	$7,0 \pm 1,2$
3336	$65,8 \pm 0,2$	$4,62 \pm 0,26$
3628	$69,3 \pm 0,3$	$9,7 \pm 1,7$
4008	$77,1 \pm 0,3$	$9,3 \pm 1,5$
4344	$82,5 \pm 0,4$	$8,2 \pm 1,0$
4680	$81,1 \pm 0,4$	$13,3 \pm 1,9$
5016	$82,5 \pm 0,4$	$7,2 \pm 1,6$
5352	$81,2 \pm 0,4$	$2,59 \pm 0,63$

Tab. 2: Vnitřní rezistivita materiálu VOLTAFLEX 2598

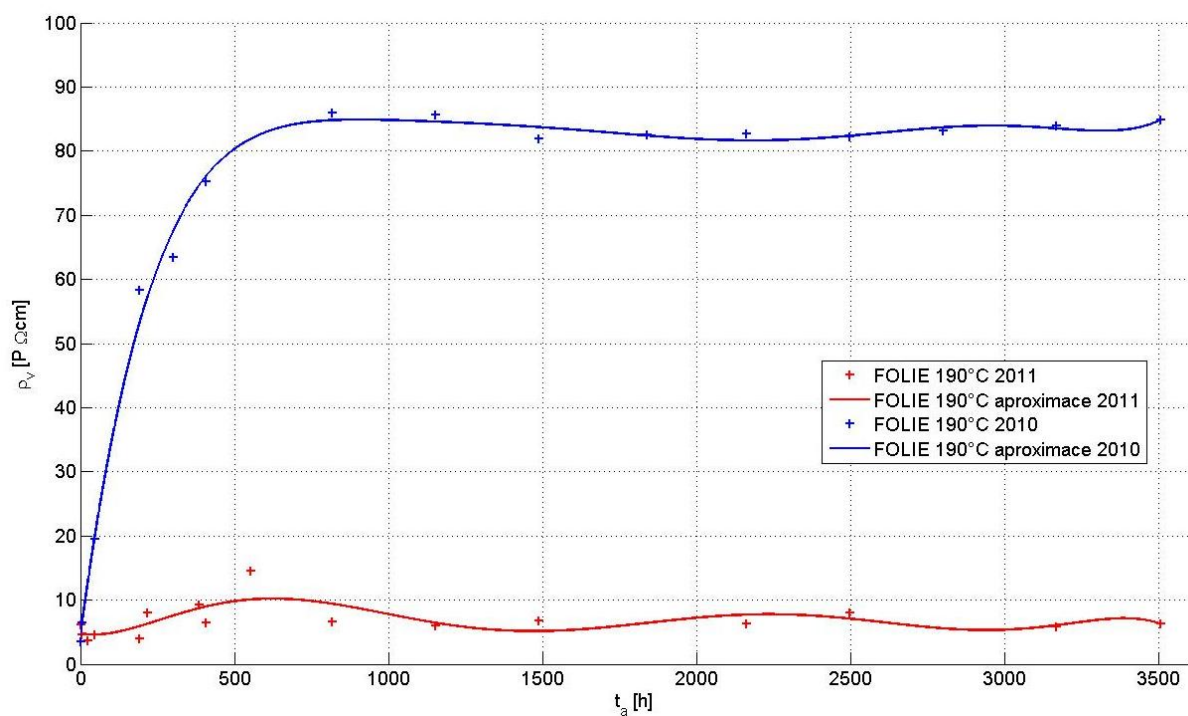


Obr. 3: Závislost vnitřní rezistivity materiálu VOLTAFLEX 2598 na době tepelného zatížení teplotou 190 °C

Porovnání změny vnitřní rezistivity PET fólie z roku 2010 a 2011:

PET fólie		
t_a [h]	ρ_v [PΩcm] z 2010	ρ_v [PΩcm] z 2011
1	$4,95 \pm 0,01$	$6,16 \pm 0,89$
5	$6,53 \pm 0,01$	$4,6 \pm 1,7$
24	$11,2 \pm 0,1$	$3,62 \pm 0,60$
48	$19,5 \pm 0,1$	$4,5 \pm 1,2$
192	$58,3 \pm 0,2$	$3,93 \pm 0,84$
216	-	$8,0 \pm 1,7$
384	-	$9,2 \pm 1,1$
408	$75,2 \pm 0,2$	$6,40 \pm 0,22$
552	-	$14,6 \pm 2,0$
816	$85,9 \pm 0,2$	$6,7 \pm 2,8$
1152	$85,6 \pm 0,2$	$5,9 \pm 3,5$
1488	$81,9 \pm 0,2$	$6,83 \pm 0,27$
2160	$82,7 \pm 0,3$	$6,3 \pm 1,2$
2496	$82,2 \pm 0,3$	$8,018 \pm 0,088$
3168	$83,9 \pm 0,3$	$5,90 \pm 0,59$
3504	$84,8 \pm 0,3$	$6,33 \pm 0,72$

Tab. 3: Vnitřní rezistivita PET fólie



Obr. 4: Závislost vnitřní rezistivity PET fólie na době tepelného zatížení teplotou 190 °C

4.5 Vyhodnocení

U materiálu NEN-F je z grafu patrné, že došlo k výrazně menšímu nárůstu vnitřní rezistivity v rozmezí tepelného zatížení 0 až 1000 h nežli u hodnot naměřených v roce 2010 tedy krátce po tepelném zatížení. V rozmezí 1000 až 6096 h je vidět, že charakteristika z roku 2011 kopíruje tvar té z roku 2010, ovšem dosahuje daleko nižších hodnot.

U materiálu VOLTAFLEX 2598 je zřejmé, že stejně jako u materiálu NEN-F došlo k výraznému poklesu vnitřní rezistivity v závislosti na době tepelného zatížení. Podobně jako u materiálu NEN-F se tato hodnota pohybuje v okolí 10 PΩcm.

U samotné PET fólie je hodnota vnitřní rezistivity lehce pod hranicí 10 PΩcm.

Z naměřených hodnot či grafů je vidět, že se vnitřní rezistivita všech tří materiálů téměř snížila na původní úroveň, které dosahovala ještě před tepelným zatěžováním.

5 Termická analýza – DSC

Úkolem této části práce bylo pomocí diferenciální skenovací kalorimetrie stanovit podíl krystalické části jednotlivých tepelně zatěžovaných vzorků a zjistit změny struktury, ke kterým během dlouhodobého tepelného zatěžování dochází. Cílem bylo také určení vztahu mezi změnami hodnot vnitřní rezistivity vůči změnám ve struktuře materiálu [1] .

5.1 Popis metody

Termická analýza je experimentální metodika, která umožňuje měření fyzikálních vlastností látek (v tomto případě polymerů) v závislosti na teplotě.

Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) je jednou z nejvýznamnějších termo-analytických metod. DSC je metoda, při které je registrován tepelný příkon do vzorku, potřebný k udržení nulového tepelného rozdílu mezi vzorkem a srovnávací látkou. Principem je tedy udržování konstantní teploty měřeného vzorku a referenčního vzorku, v průběhu ohřevu ve zvoleném teplotním programu.

Vzorek je lineárně ohříván a měří se rychlost tepelného toku ve vzorku, která je úměrná okamžitému měrnému teplu. DSC křivky jsou tedy grafické závislosti rozdílů v příkonech tepelné energie do měřeného a referenčního vzorku na teplotě.

Základním jevem důležitým pro metody termické analýzy je změna entalpie studovaného materiálu (ΔH).

Entalpie je fyzikální veličina, která vyjadřuje tepelnou energii uloženou v jednotkovém množství látky, je označována H a měřená v joulech. Její absolutní hodnotu nelze změřit, stanovuje se jen změna entalpie ΔH .

Metoda DSC se používá především k určení [1] :

- teploty tání a krystalizace
- teploty zesklnění
- entalpie jednotlivých fyzikálních přechodů
- hodnoty krystaličnosti
- měrné tepelné kapacity

5.2 Krystaličnost polymerů

Polymery, mezi které patří i PET, se liší nejen chemickou strukturou, ale i strukturou nadmolekulární. Podle pravidelnosti uspořádání mohou být krystalické, amorfní nebo částečně krystalické (semikrystalické).

Látku označujeme jako krystalickou, jestliže se její elementární strukturní jednotky opakují v pravidelných vzdálenostech ve třech prostorových směrech, jež neleží v jedné rovině. Krystalická struktura se tedy vyznačuje pravidelnou strukturou řetězců.

Polymery v amorfním stavu mají nejnížší stupeň uspořádanosti, makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici. Polymery v amorfním stavu jsou tvrdé a křehké.

Žádná ze základních vlastností neovlivňuje fyzikální vlastnosti polymerů tak výrazně jako krystaličnost. Významně se odráží v tuhosti, hustotě, bodu tání apod. Měření krystaličnosti za využití DSC umožňuje předpověď ostatních fyzikálních vlastností polymerů.

Rozdíly v krystalické fázi jsou dány různou velikostí krystalů. Proto se k posouzení krystaličnosti využívá hlavně entalpie (teplo) tání ΔH_m . Při kalorimetrických měřeních se předpokládá, že krystaličnost (X_C) je přímo úměrná ploše pod píkem, který odpovídá teplu tání (Δp_m). Konstantou úměrnosti je teplo tání zcela krystalického materiálu (ΔH_{m0}), které musí být hodnotou průměrnou vztaženou na celý interval tání [1] :

$$X_C = \frac{\Delta H}{\Delta H_{m0}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

5.3 Postup měření

Měření byla prováděna pomocí přístroje DSC6, ve kterém byla komora, do níž byl umístěn měřený a referenční vzorek. Ke chlazení byl používán chladicí přístroj Minicholler.

Vzorky byly vykrojeny z větších vzorků, tak aby jejich výsledná hmotnost byla v rozmezí 10 až 15 mg. Tyto vzorky byly uzavřeny do hliníkové kapsle pomocí mechanismu pro hermetické uzavírání vzorků. Takto upravené vzorky byly vkládány do komory v přístroji DSC6.

Komunikace počítače a DSC6 byla zajištěna pomocí softwaru PE Pyris Series. V softwaru PE Pyris Series bylo nastaveno ohřívání z teploty 25 °C na teplotu 275 °C s krokem 15 °C. Po dosažení teploty 275 °C byl vzorek ochlazován na 25 °C s krokem 15 °C. V tomto programu byly později vyhodnocovány také naměřené izotermické křivky, které nešlo v jiném softwaru otevřít.

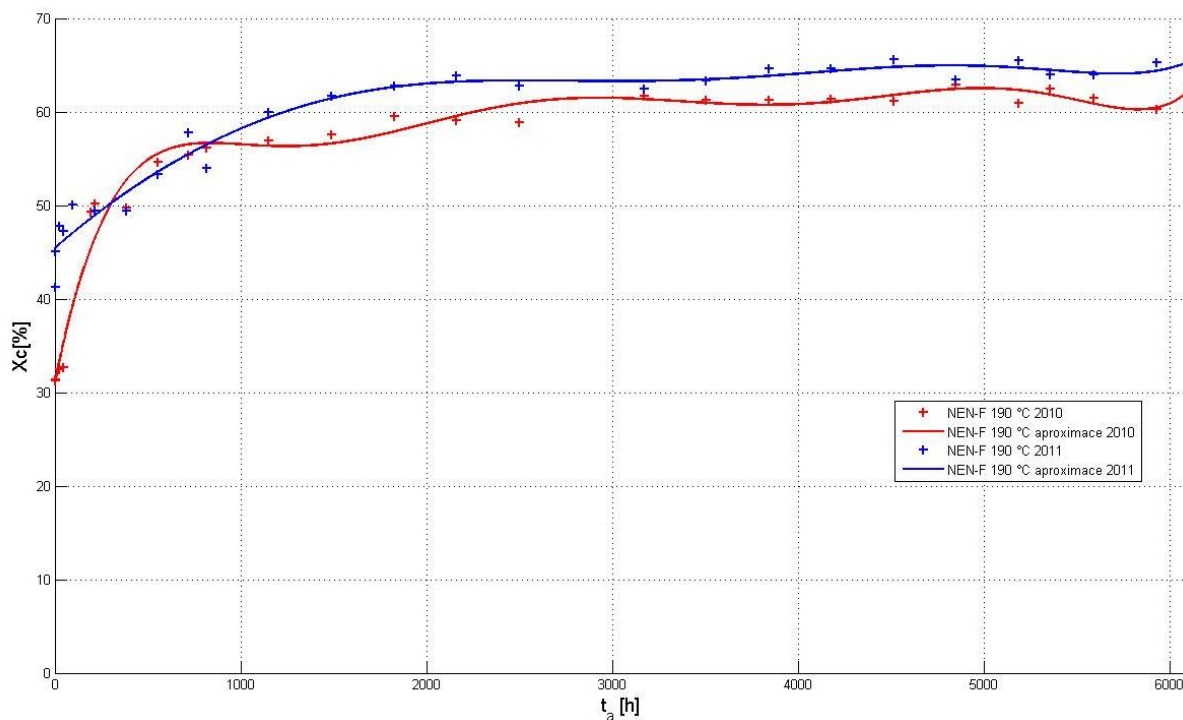
5.4 Naměřené hodnoty a grafy

Vypočtené hodnoty krystaličnosti X_C – NEN-F 220/125:

NEN-F 220/125		
t_a [h]	X_C [%] z 2010	X_C [%] z 2011
1	31,3	41,3
5	31,4	45,1
24	32,4	47,8
48	32,7	47,2
96	-	50,1
192	49,3	-
216	50,2	49,4
384	49,7	49,4
552	54,6	53,3
720	55,4	57,8
816	56,1	54,0
1152	56,9	59,9
1488	57,6	61,7
1824	59,5	62,8

NEN-F 220/125		
t_a [h]	X_C [%] z 2010	X_C [%] z 2011
2160	59,1	63,9
2496	58,9	62,8
3168	61,7	62,5
3504	61,3	63,3
3840	61,2	64,6
4176	61,4	64,6
4512	61,1	65,6
4848	62,9	63,4
5184	60,9	65,5
5352	62,5	64,0
5592	61,5	64,0
5928	60,3	65,3
6096	62,1	64,8

Tab. 4: Podíl krystalické části v materiálu NEN-F 220/125



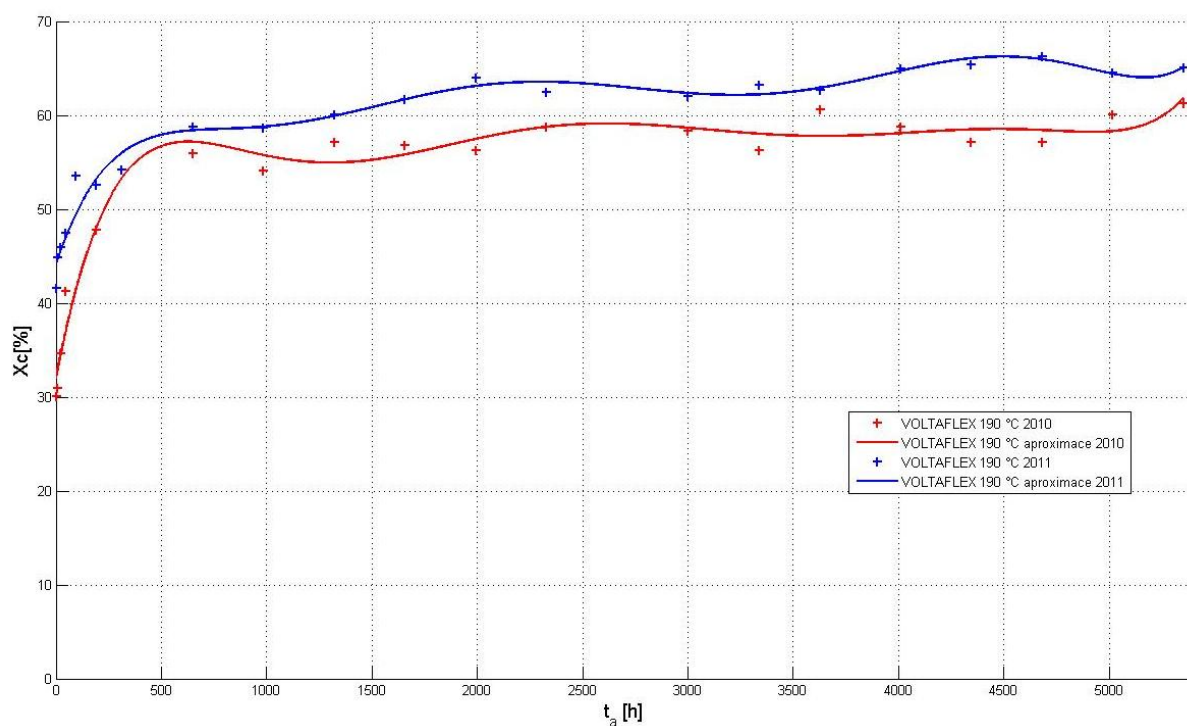
Obr. 5: Závislost krystaličnosti materiálu NEN-F 220/125 na době tepelného zatížení 190 °C

Vypočtené hodnoty krystaličnosti X_C – VOLTAFLEX 2598:

VOLTAFLEX 2598		
t_a [h]	X_C [%] z 2010	X_C [%] z 2011
1	30,1	41,6
5	30,9	44,8
24	34,6	45,9
48	41,3	47,5
96	-	53,5
192	47,8	52,6
312	54,2	54,2
648	55,9	58,8
984	54,1	58,6
1320	57,1	60,1
1656	56,8	61,7

VOLTAFLEX 2598		
t_a [h]	X_C [%] z 2010	X_C [%] z 2011
1992	56,3	64,0
2328	58,8	62,5
3000	58,3	62,0
3336	56,2	63,2
3628	60,6	62,7
4008	58,8	64,9
4344	57,1	65,4
4680	57,1	66,3
5016	60,1	64,5
5352	61,3	65,1

Tab. 5: Podíl krystalické části v materiálu VOLTAFLEX 2598

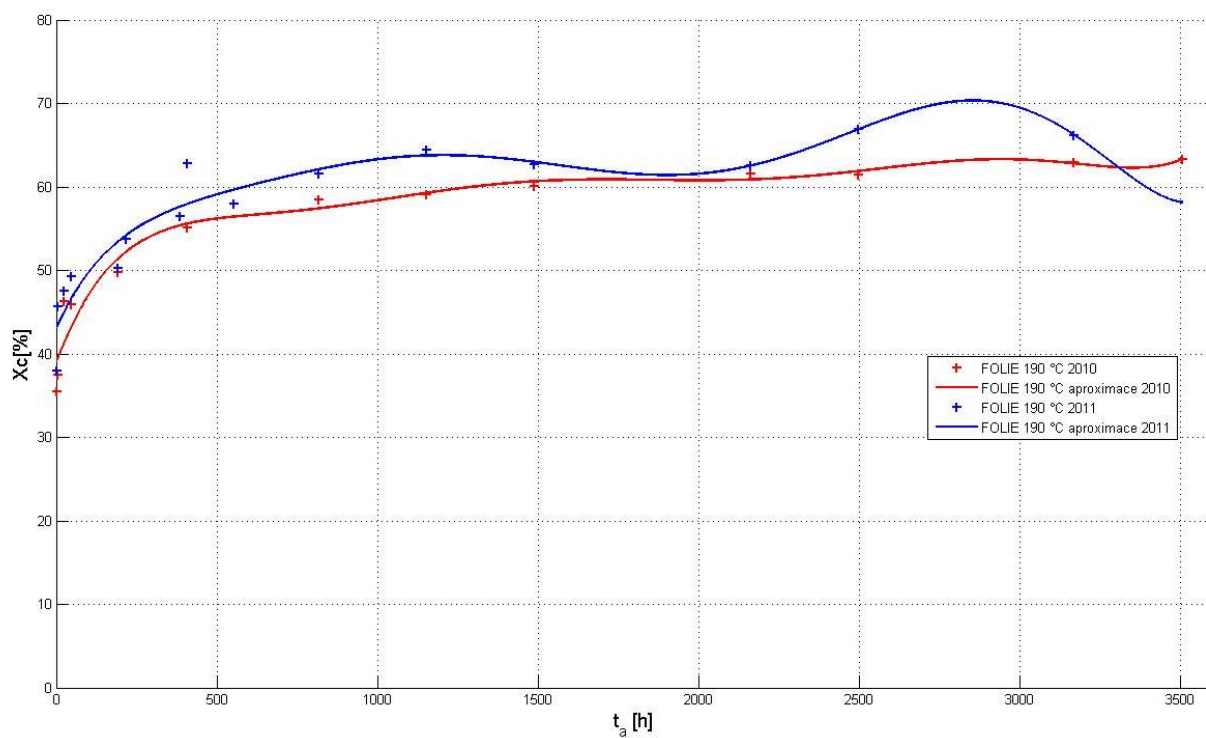


Obr. 6: Závislost krystaličnosti materiálu VOLTAFLEX 2598 na době tepelného zatížení 190 °C

Vypočtené hodnoty krystaličnosti X_C – PET fólie:

PET fólie		
t_a [h]	X_C [%] z 2010	X_C [%] z 2011
1	35,5	38,0
5	37,4	45,7
24	46,3	47,5
48	45,9	49,2
192	49,7	50,2
216	-	53,7
384	-	56,5
408	55,1	62,8
552	-	57,9
816	58,4	61,6
1152	59,1	64,4
1488	60,1	62,7
2160	61,6	62,6
2496	61,4	66,9
3168	62,9	66,2
3504	63,3	-

Tab. 6: Podíl krystalické části v PET fólii



Obr. 7: Závislost krystaličnosti PET fólie na době tepelného zatížení 190 °C

5.5 Vyhodnocení

Z grafů všech tří materiálů je vidět, že se procentuální podíl krystaličnosti těchto materiálů lehce zvýšil. Toto navýšení bych přisoudil spíše individuálnímu hodnocení izotermických křivek, jelikož velikost hodnoty entalpie ΔH odpovídá tomu, jak velká je plocha pod píky. Tuto plochu jsme mohli každý určit trochu jinak velkou. Z toho usuzuji, že se podíl krystalické části ve všech třech materiálech nezměnil.

6 Závěr

Vyhodnocování naměřených dat a i jejich samotné měření bylo časově velice náročné. Cílem těchto měření bylo ověření hodnot, které naměřil Ing. Jan Vokřínek v roce 2010. Z mnoha naměřených hodnot vyplývá, že se u všech tří materiálů PET výrazně snížila rezistivita téměř na původní hodnotu, které dosahovala ještě před tepelným zatěžováním a to zhruba na $10 \text{ P}\Omega\text{cm}$.

Kvůli této výrazné změně vnitřní rezistivity jsem po konzultaci s vedoucím upustil od bodů 3 a 4 původního zadání a raději jsem se snažil zjistit, zda došlo také ke změnám i ve struktuře materiálu respektive podílu krystalické části.

Pro měření krystaličnosti jsem použil metodu DSC. Z grafů je zřejmé, že se krystaličnost nezměnila. Vyhodnocování izotermických křivek bylo velice časově náročné, ale za pomoci své konzultantky jsem vše stihl v daném časovém rozmezí.

Všechny podrobnější náměry, grafy a M-files, které byly použity v této práci, jsou uloženy na přiloženém CD-ROM.

Literatura

[1] VOKŘÍNEK, Jan. *Hodnocení izolačního materiálu PET*. Liberec, 2010. 69 s. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.