ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Recyklační technologie plastů a využití recyklátů v elektrotechnice

vedoucí práce: **doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.**
autor: **Bc. Monika Menclová**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2011/2012**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Monika MENCLOVÁ**
Osobní číslo:	**E10N0036P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Komerční elektrotechnika**
Název tématu:	**Recyklační technologie plastů a využití recyklátů v elektrotechnice**
Zadávající katedra:	**Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte přehled elektroizolačních materiálů používaných v kabelové technice a způsob jejich aplikace
2. Uveďte druhy recyklací plastů a popište proces získávání izolace kabelů pro recyklaci
3. Zjistěte a porovnejte vlastnosti nového a recyklovaného materiálu
4. Zhodnoťte možnosti využití recyklátu pro aplikace v elektrotechnice

Rozsah grafických prací:	**podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy:	**30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce:	**tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Kuraš, M., aj. Odpady, jejich využití a zneškodňování. VŠCHT Praha 1994**
2. **Nová, D.: Nové trendy bezodpadové technologie a recyklace. ČVUT Praha 1995**
3. **Kudláček, I.: Ekologie průmyslu, Praha, ČVUT 2002**
4. **Firemní a internetové zdroje**

Vedoucí diplomové práce:	**Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.** Katedra technologií a měření
Datum zadání diplomové práce:	**17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce:	**11. května 2012**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan

L.S.

Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Recyklační technologie plastů a využití recyklátů v elektrotechnice

Anotace

Předložená diplomová práce se zabývá recyklačními technologiemi plastů a kaučuků. Podrobněji popisuje druhy recyklací a způsoby technologií, které jsou v současné době pro recyklaci plastů a kaučuků používány. V návaznosti na to srovnává mechanické a elektroizolační vlastnosti původního materiálu a recyklátu. Práce je obecně zaměřena na plasty a elastomery používané v kabelovém průmyslu, u nejvýznamnějších zástupců tohoto elektrotechnického odvětví popisuje jejich vlastnosti a zpracování. Na závěr diplomové práce je zhodnocení využití recyklátů v elektrotechnice.

Klíčová slova

Kabely, izolace, plasty, elastomery, polyvinylchlorid, recyklace, plastový odpad, recyklát, elektrické vlastnosti, mechanické vlastnosti

Recycling technology of polymers and utilization materials recycling in electrical engineering

Abstract

This diploma thesis deals with recycling technologies of plastics and rubbers. It details the types of recycling methods and technologies that are currently in the recycling of plastics and rubbers used. Subsequently, it compares the mechanical and electrical properties of the original material and recycled. Thesis is generally focused on plastics and elastomers, which are used in cable industry, at the most important representatives of this branch of electrical engineering it describes their properties and processing. The conclusion of the thesis is the evaluation of utilization of recycled plastics in electrical engineering.

Keys words

Cables, insulation, plastics, elastomers, polyvinyl chloride, recycling, plastic waste, recycled plastic, electrical properties, mechanical properties

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala 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.

V Plzni dne 7. 5. 2012 Monika Menclová

…….

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucí diplomové práce doc. Ing. Evě Kučerové, CSc. za ochotu, trpělivost, poskytnutí cenných rad a námětů a za odborné vedení práce. Nemalý dík patří Ing. Ondřeji Krpalovi za dohled a spolupráci při praktickém měření. Ráda bych také poděkovala panu Matouškovi ze společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. za poskytnutí informací z praxe, které napomohly ke zpracování této diplomové práce.

Za podporu nejenom při studiu děkuji svým rodičům.

Obsah

OBSAH **8**

ÚVOD **10**

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ **11**

1 ELEKTROIZOLAČNÍ MATERIÁLY V KABELOVÉ TECHNICE **13**

1.1 PLASTY ***14***
1.1.1 Polyetylen (PE) 14
1.1.2 Polyvinylchlorid (PVC) 16
1.1.3 Polypropylen (PP) 18
1.1.4 Polytetrafluoretylen (PTFE) 19
1.2 ELASTOMERY ***20***
1.2.1 Silikonové kaučuky *20*
1.2.2 Etylenpropylenové kaučuky (EPR) *21*
1.2.3 Polychloroprenový kaučuk (CR) *22*
1.3 OPLÁŠŤOVÁNÍ KABELŮ ***23***

2 RECYKLACE PLASTŮ **24**

2.1 MATERIÁLOVÁ RECYKLACE ***26***
2.1.1 Recyklace jednodruhového odpadu 26
2.1.2 Recyklace směsného odpadu 27
2.2 CHEMICKÁ RECYKLACE ***27***
2.2.1 Tepelná depolymerace 27
2.2.2 Solvolýza 28
2.3 SUROVINOVÁ RECYKLACE ***28***
2.4 ENERGETICKÁ RECYKLACE ***29***
2.5 RECYKLACE KAUČUKŮ ***29***
2.5.1 Mechanická recyklace 30
2.5.2 Chemická recyklace 31
2.5.3 Energetická recyklace 32
2.6 RECYKLACE KABELŮ ***32***

3 SROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ NOVÉHO A RECYKLOVANÉHO PVC **35**

3.1 PŘEDSTAVENÍ FIRMY REPLAST PRODUKT, SPOL. S.R.O. ***35***
3.1.1 Postup výroby komodit REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. 37
3.1.2 Recyklované kabelové PVC REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. 40
3.2 SLEDOVANÉ PARAMETRY ***40***
3.2.1 Vnitřní rezistivita 41
3.2.2 Relativní permitivita 42
3.2.3 Elektrická pevnost 43
3.2.4 Mez pevnosti v tahu 44
3.2.5 Stlačitelnost 44
3.3 ZVOLENÉ METODY MĚŘENÍ ***44***
3.3.1 Měření vnitřní rezistivity 44
3.3.2 Měření relativní permitivity 47
3.3.3 Měření elektrické pevnosti 48
3.3.4 Měření meze pevnosti v tahu 49
3.3.5 Měření stlačitelnosti 49

3.4 ZKUŠEBNÍ VZORKY 49
3.5 PROVEDENÁ MĚŘENÍ 50
3.5.1 Vnitřní rezistivita 50
3.5.2 Relativní permitivita 52
3.5.3 Elektrická pevnost 52
3.5.4 Zhodnocení elektrických vlastností 53
3.5.5 Mez pevnosti v tahu 54
3.5.6 Stlačitelnost 55
4 VYUŽITÍ RECYKLÁTU V ELEKTROTECHNICE 57
4.1 VYUŽITÍ RECYKLOVANÉHO KABELOVÉHO PVC REPLAST PRODUKT, SPOL. S.R.O. 57
4.2 DALŠÍ VYUŽITÍ RECYKLÁTŮ 58
4.3 JAK ZLEPŠIT ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI RECYKLÁTU? 59
ZÁVĚR 61
POUŽITÁ LITERATURA 63
SEZNAM PŘÍLOH 65
PŘÍLOHA A: FOTODOKUMENTACE 66
PŘÍLOHA B: TECHNICKÝ LIST MĚKČENÉHO PVC NORMAL 68
PŘÍLOHA C: TABULKY TLOUŠTĚK ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ PRO MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ 69
PŘÍLOHA D: VÝSLEDKY MĚŘENÍ VNITŘNÍ REZISTIVITY 70
PŘÍLOHA E: VÝSLEDKY MĚŘENÍ RELATIVNÍ PERMITIVITY 71
PŘÍLOHA F: VÝSLEDKY MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ PEVNOSTI 72
PŘÍLOHA G: VÝSLEDKY MĚŘENÍ MEZE PEVNOSTI V TAHU 73
PŘÍLOHA H: KŘIVKY NAPĚTÍ / POMĚRNÉ PRODLOUŽENÍ Z MĚŘENÍ PEVNOSTI V TAHU 74
PŘÍLOHA I: VÝSLEDKY MĚŘENÍ STLAČITELNOSTI 75

Úvod

První plast byl poprvé vyvinut již v polovině 19. století, v průmyslu byl pak poprvé použit první plně syntetický plast Bakelit v roce 1909. Plasty jsou tedy využívány něco málo přes 100 let, avšak ne vždy byly doceňovány tak jako dnes. Na začátku doby jejich využívání v průmyslu byly považovány pouze za náhražkový materiál, postupně si však vydobyly rovnocenné postavení mezi ostatními materiály. Dnes už si bez nich průmysl a svět jako takový nelze představit. Plasty nás obklopují všude ve všedním životě, v průmyslu dnes nahrazují tradiční materiály jako je dřevo, kov, sklo, papír nebo pryž a právem můžeme plasty označit jako materiály 21. století.

S rozmachem využití plastů však vzrostl i důraz na otázku, jak použité plasty likvidovat. Jak je všeobecně známo, plasty se rozkládají v přírodě desítky až stovky let, některé druhy se nerozloží nikdy. Ponechání plastového odpadu pouze napospas přírodě by tak mělo fatální následky. Bylo nutné přistoupit k určitým opatřením a dnes již víme, že mimo spalování a skládkování plastového odpadu je možné také použité plasty recyklovat. To znamená plasty opětovně využít. Jak a kde ale můžeme produkty recyklace - tzv. recykláty - uplatnit?

Tato diplomová práce by měla zodpovědět tuto otázku, co se týče využití recyklátů v elektrotechnice. Práci lze rozdělit na pomyslné dvě části. V první teoretické části jsou vyjmenovány základní plasty a kaučuky, jež se využívají v kabelové technice pro výrobu izolací a plášťů kabelů. Následně jsou podrobně popsány možnosti recyklace plastů a kaučuků. Ve druhé části práce je popsána spolupráce se společností REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o., jež je výrobcem komodit z recyklovaného kabelového PVC. V této části práce se nachází zhodnocení a porovnání prakticky provedených měření některých elektrických a mechanických vlastností recyklátu a původního PVC. Na závěr práce je uvedeno zhodnocení využití recyklátu v elektrotechnice.

Seznam použitých zkratek a symbolů

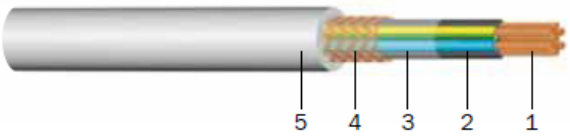
PE		Polyetylen
XLPE		Zesítěný polyetylen
EVA		Kopolymer etylenu s vinylacetátem
PVC		Polyvinylchlorid
PP		Polypropylen
PTFE		Polytetrafluoretylen
ε_r	[-]	Relativní permitivita
tg δ	[-]	Ztrátový činitel
EPR		Etylenpropylenový kaučuk
EPM		Nasycený kopolymer etylenu s propylenem
EPDM		Terpolymer etylenu a propylenu s nekonjugovaným dienem
CR		Polychloroprenový kaučuk
E_p	[V/m]	Elektrická pevnost
PET		Polyetylentereftalát
ρ_v	[Ω.m]	Vnitřní rezistivita
p_{i1}	[-]	Jednominutový polarizační index
p_{i10}	[-]	Desetiminutový polarizační index
i_{15}	[A]	Absorpční proud v 15. sekundě od přiložení napětí
i_{60}	[A]	Absorpční proud v 60. sekundě od přiložení napětí
i_{600}	[A]	Absorpční proud v 600. sekundě od přiložení napětí
R_x, R_v	[Ω]	Izolační odpor, vnitřní odpor
U_{ss}	[V]	Stejnosměrné elektrické napětí
I	[A]	Elektrický proud
A	[m^2]	Efektivní plocha měrné elektrody, plocha počátečního příčného průřezu zkušebního tělesa [mm^2]
h	[m]	Tloušťka

C, C_x	[F]	Kapacita kondenzátoru
ε	[F/m]	Absolutní permitivita, poměrné stlačení [-, %]
S	[m^2]	Plocha elektrod
d	[m]	Vzdálenost elektrod, tloušťka
ε_0	[F/m]	Permitivita vakua
C_0	[F]	Kapacita kondenzátoru, jehož dielektrikem je vakuum
U_p	[V]	Průrazné napětí
σ_M	[MPa]	Mezní napětí v tahu
F_M	[N]	Maximální hodnota síly
ε_c	[%]	Jmenovité poměrné stlačení
ΔL	[mm]	Zkrácení vzdálenosti mezi tlačnými deskami
L	[mm]	Počáteční vzdálenost mezi tlačnými deskami
U	[V]	Elektrické napětí
f	[Hz]	Frekvence
a, b	[m]	Rozměry zkoušeného vzorku

1 Elektroizolační materiály v kabelové technice

Elektrický kabel je používán k přenosu elektrického proudu od zdroje elektrické energie ke spotřebiči. Základní rozdělení elektrických kabelů je na silové, sdělovací a výkonové. Silové kabely slouží pro rozvod elektrické energie v budovách, strojích a různých elektrických zařízeních, sdělovací kabely přenáší signály mezi sdělovacími zařízeními (např. telefonní ústředny, zabezpečovací technika) a výkonové kabely slouží, jak už sám název připomíná, k přenosu velkých výkonů.

Kabely se mohou skládat až z šesti částí (v případě silového kabelu), konstrukční detaily jsou však v různých kabelech odlišné podle jejich použití. První částí, která je pro všechny typy kabelů stejná, je vodič. Skládá se z jednoho nebo více kovových drátů a slouží k vedení elektrického proudu. Vodiče jsou nejčastěji vyráběny z mědi nebo hliníku a jejich velikost průřezu určuje hodnota procházejícího proudu. Druhá část kabelu je izolace. Ta obklopuje vodič a slouží k jeho elektrické ochraně proti okolí. Vodič s izolací vytváří žílu. Následuje společný obal žil, který obaluje duši kabelu. Ta se skládá ze dvou nebo více žil a slouží k plnění, případě k vyrovnání vnějších dutin mezi žilami. Další vrstvou kabelu je stínění, které bývá vyrobeno ze spletených měděných drátků nebo složeno z měděných pásků, případně pokovené fólie nebo z vrstvy vodivého polymeru. Stínění je zapotřebí tam, kde je potřeba eliminovat elektrický šum, který způsobuje rušení přenášeného signálu. Použitím stínění tedy docílíme kvalitnějšího přenosu signálu. Předposlední částí kabelu je pancíř. Ten slouží ke zvýšené mechanické ochranně kabelu především proti tlaku. Je tvořen ovinutím kabelu ocelovými pozinkovanými dráty nebo ocelovou pozinkovanou páskou. Poslední částí kabelu je plášť, který slouží jako vnější obal kabelu. Plášť chrání kabel proti mechanickému poškození, pronikání vody a chemickým vlivům. Materiál, z kterého je vyrobená izolace a plášť se u každého kabelu liší dle jeho použití. Volba správného elektroizolačního materiálu pro izolaci kabelu se odvíjí od velikosti pracovního napětí (to určuje tloušťku izolace) a znalosti pracovních podmínek, ve kterých bude kabel pracovat. Nejdůležitějšími faktory jsou teplota, chemické složení a klimatické podmínky. [1, 2, 3]



Konstrukce:
1 Cu jádro z jemných drátků
2 Izolace (PVC), žíly stočené do duše kabelu
3 Obal (plastová folie)
4 Stínění (opletení z Cu drátků)
5 Plášť (PVC šedý)

Obr. 1: Stíněný ohebný ovládací vodič, olejivzdorný CMFM [1]

V následujících dvou podkapitolách budou podrobněji popsány nejvýznamnější materiály používané pro výrobu izolací a plášťů kabelů a následně v poslední části 1. kapitoly bude popsán způsob jejich aplikace na kabel.

1.1 Plasty

Plasty jsou pevné organické syntetické izolanty. Vedle látek polymerní podstaty obsahují plasty různé přísady (aditiva), které usnadňují snazší zpracování plastů a upravují jejich výsledné vlastnosti. [10]

1.1.1 Polyetylen (PE)

První polyetylen se podařilo připravit roku 1935 polymerací etylenu v plynné fázi za tlaku 100 MPa až 200 MPa při teplotě 150 °C až 400 °C. Jako iniciátor bylo použito malé množství kyslíku. Polymerace je chemická reakce velkého počtu molekul monomeru, při níž následkem uvolnění dvojných vazeb monomeru vzniká vysokomolekulární látka. Dnes se polyetylen vyrábí i dalšími modifikovanými postupy, kromě polymerace v plynné fázi se také uplatňuje suspenzní, emulzní a roztoková polymerace za vysokého tlaku. V roce 1955 došlo k objevu beztlakové polymerace za použití katalyzátorů a padl tak názor, že polyetylen lze vyrábět pouze za vysokých tlaků. Pánové Karl Ziegler, který tento objev uskutečnil, a Giulio Natt, který tento postup výroby PE zavedl do průmyslové aplikace, byli v souvislosti s tím oceněni Nobelovou cenou za chemii. [5]

Základní strukturou polyetylenu je uhlovodíkový řetězec, který nemá žádné substituenty. PE se dělí dle mnoha různých kritérií, ale poněvadž lze všechny vlastnosti odvodit od struktury polymeru, hlavním kritériem bylo zvoleno rozvětvení makromolekul. Existují proto dva základní typy PE, a sice typ lineární a rozvětvený. Lineární typ je zároveň označen jako typ PE o vysoké hustotě (HDPE z anglického High Density – vysoká hustota), jehož hustota se pohybuje od 0,941 g/cm^3 do 0,967 g/cm^3, a rozvětvený naopak jako typ o nízké hustotě (LDPE z anglického Low Density – nízká hustota), jehož hustota je 0,915 g/cm^3 až 0,935 g/cm^3. [4, 6]

Vlastnosti polyetylenu

PE je tuhá, bílá, v tenčích vrstvách průhledná látka. Jedná se o plastickou hmotu, jež je složena z nepolárních molekul. Tato skutečnost vede k tomu, že PE má výborné

elektroizolační vlastnosti, na něž nemá podstatný vliv ani změna teploty nebo vlhkost. Podléhá pouze okamžité elektronové polarizaci a tudíž má malou permitivitu (2,3) a ztrátový činitel (1.10^{-4} až 3.10^{-4}). PE vykazuje velmi dobré mechanické vlastnosti za normálních i velmi nízkých teplot. Jedná se zejména o velkou ohebnost a rázovou houževnatost, jež jsou důsledkem amorfních podílů ve struktuře. Naopak převládající krystalické podíly určují dobrou pevnost. Také chemická odolnost PE roste s krystalinitou. Při běžných teplotách je odolný vůči vodě, kyselinám, zásadám, solím a jejich roztokům a polárním rozpouštědlům. Při vyšších teplotách jeho chemická odolnost poměrně klesá, napadají ho některá polární rozpouštědla, např. benzen či toluen. K tavení PE dochází až při teplotě 115 °C. PE je zdravotně nezávadný, levný a snadno zpracovatelný materiál. V kabelářském průmyslu má PE nezastupitelnou roli v oplášťování a izolaci kabelů. K těmto účelům je nejvhodnější PE s relativní molekulovou hmotností 15 000 až 20 000. Elektroizolační vlastnosti tohoto polyetylenu jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 1: Elektroizolační vlastnosti polyetylenu [7]

	Polyetylen
Měrný elektroizolační odpor [Ω.cm]	10^{16} až 10^{17}
Povrchový izolační odpor [Ω]	10^{14}
Činitel dielektrických ztrát tg δ	0,001 až 0,004
Permitivita ε	2,2 až 2,3
Elektrická pevnost [kV.mm^{-1}]	50 až 60

V kabelářské technice je také velmi rozšířeno používání kabelů s izolací z pěnového PE. Ten totiž díky své buněčné struktuře ještě více zlepšuje dielektrické vlastnosti PE. Obecně se v kabelářském průmyslu PE používá pro izolace dálkových a sdělovacích kabelů, místních telefonních kabelů a silových kabelů. Při použití izolace z tohoto polymeru se však musí pamatovat na určité indispozice PE. Je to zejména nízká pevnost v tahu, sklon k oxidaci a hlavně hořlavost, protože odkapávající hořící tavenina podporuje další rozšíření požáru. [4, 6]

Zpracování polyetylenu

PE lze zpracovávat všemi obvyklými metodami zpracování termoplastů, ať už se jedná o vytlačování, vstřikování, vyfukování, lisování nebo odlévání. Teploty, při nichž je

PE zpracováván, závisí na metodě zpracování. Např. při vytlačování na trubky je teplota v rozmezí 140 °C až 170 °C, při vytlačování na fólie a při vstřikování je teplota vyšší, a sice 200 °C až 280 °C. [6]

Zesítěný polyetylen (XLPE)

U zesítěného PE dochází po vylisování, na rozdíl od termoplastického PE, k chemickým změnám ve struktuře polymeru - vytvoří se nevratné příčné vazby mezi polymerickými řetězci. Struktura je pak podobná síti, odtud tedy název zesítěný polyetylen. Zesítěné polymery se pak už ani za velmi vysokých teplot netaví. To jim umožňuje krátkodobé dosažení i velmi vysoké vrcholové teploty v porovnání s provozní teplotou materiálu. Ani tyto materiály však nelze vystavovat extrémním teplotám dlouhodobě. Dlouhým působením extrémních teplot XLPE degraduje a ztrácí tak své mechanické a elektrické vlastnosti.

Izolace kabelů vyrobené ze zesítěného polyetylenu mají vedle izolací z termoplastického PE mnoho výhod. Lze je, jak už bylo řečeno, používat při mnohem vyšších provozních teplotách (120 °C až 130 °C), kdy i za těchto vysokých teplot mají mnohem větší rozměrovou stálost a také lepší mechanické vlastnosti než izolace z termoplastického PE. [9]

Kopolymer etylenu s vinylacetátem (EVA)

Tento kopolymer etylenu, známý rovněž pod názvem etylen – vinylacetát, se vyrábí blokovou radikálovou vysokotlakou polymerací při tlaku 140 MPa a teplotě 180 °C až 250 °C. Obsah vinylacetátové složky ovlivňuje vlastnosti kopolymeru – roste s ním průtažnost, rázová houževnatost a odolnost proti tvorbě trhlin pod napětím a naopak klesá tvrdost a tvarová stálost za tepla. Pro oplášťování kabelů se používají kopolymery s obsahem vinylacetátové složky 40 % až 70 %. [6]

1.1.2 Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid je jedním z nejdůležitějších termoplastů a nejvýznamnějším zástupcem vinylových polymerů. Polymeruje velice snadno za různých podmínek – v průmyslu se pro přípravu PVC využívá suspenzní, emulzní a bloková technika polymerace. Světová výroba PVC v roce 1997 byla 18 mil. tun. Z toho bylo 80 % až 85 % vyráběno suspenzní polymerací, 10 % až 15 % emulzní polymerací a 5 % až 10 % blokovou polymerací. Přitom bloková polymerace je provozně a investičně nejvýhodnější, touto technikou je také připraven

nejčistší polymer. Avšak kvůli potížím s odvodem tepla, což je důležitý faktor pro eliminaci obsahu monomeru v produktu, je tato technika zaváděna až v posledních letech. [6]

Vlastnosti polyvinylchloridu

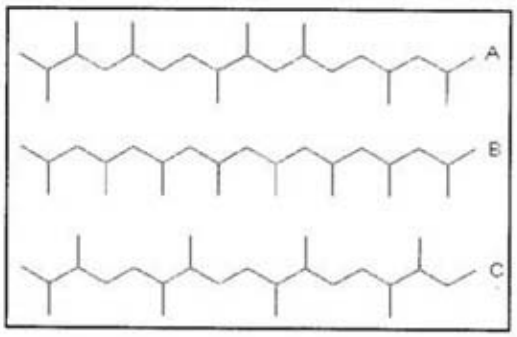
Polyvinylchlorid, který je vyráběn ve formě bílého prášku, se zpracovává ve dvou formách. Buď se změkčovadly, známý pod názvem Novoplast, nebo bez přidání změkčovadel, známý jako Novodur. PVC je dobře chemicky odolný, odolává především neoxidujícím kyselinám, ale i zásadám, benzínu a minerálním olejům, avšak jeho odolnost vůči nim klesá se vzrůstajícím změkčením plastu a zvyšující se teplotou. PVC lze používat dlouhodobě pouze do teploty 60 °C, což je jeho nevýhodou. Měkne při dosažení teploty 85 °C a nad 100 °C se pomalu začíná rozkládat, přičemž se odštěpuje chlorovodík. PVC je dobře odolný proti ohni, což je při jeho aplikaci výhodou, protože splňuje požadavky na bezpečnost. Z mechanických vlastností PVC vyniká zejména jeho značná pevnost v tahu a vysoká houževnatost modifikovaných typů tohoto polymeru. Neměkčený PVC je velice tvrdý, odolný proti oděru, má dobré elektroizolační vlastnosti. Z hlediska izolace a oplášťování kabelů a vodičů je však zapotřebí určitá ohebnost materiálu v požadovaném rozmezí teplot, a proto je k tomuto účelu používán měkčený PVC, který vedle lepší tažnosti a zpracovatelnosti přidáním změkčovadel určité ohebnosti dosáhne. Přidáním změkčovadel se ale na druhou stranu snižuje izolační odpor a elektrická pevnost, permitivita a činitel dielektrických ztrát se naopak zvyšují. V oboru kabelové techniky jsou však dobré elektrické vlastnosti vyžadovány, proto se musí používat co nejčistší jednotlivé složky, neboť s čistotou a kvalitou použitých surovin se zlepšují i elektrické vlastnosti. Směsi pro kabelářský měkčený PVC se skládají kromě samotného PVC ze změkčovadel, stabilizátorů a barviv. Použití v kabelové technice je značně široké, především se ale používá na kabely do 10 kV, někdy až 30 kV. [4]

Zpracování polyvinylchloridu

Neměkčený PVC – směs prášku PVC, stabilizátorů, maziv a barviva – lze zpracovávat ve vytlačovacích strojích při teplotách 150 °C až 200 °C. Fólie z PVC se vyrábějí válcováním, desky pak lisováním. Měkčený PVC – směs prášku PVC, změkčovadel, stabilizátorů a popřípadě pigmentů – se zpracovává na polotuhé až měkké výrobky válcováním, vytlačováním a přetlačováním. [6]

1.1.3 Polypropylen (PP)

Polypropylen se vyskytuje ve třech modifikacích, které se liší prostorovým uspořádáním polymerního řetězce. Můžeme tak rozlišovat izotaktický, syndiotaktický a ataktický PP. Nízkomolekulární produkty – ataktické, rozvětvené molekuly, lze připravit kationtovou nebo radikálovou polymerací propylenu. Izotaktický polypropylen byl poprvé připraven teprve v roce 1954 Giuliem Nattem za pomoci Zieglerových katalyzátorů. Dnešní výroba PP se podobá nízkotlakému způsobu výroby polyetylenu. [4, 5]



A) ataktický polypropylen
B) izotaktický polypropylen
C) syndiotaktický polypropylen

Obr. 2: Molekulární struktura polypropylenu [8]

Vlastnosti polypropylenu

PP je neprůhledná, lidskému zdraví nezávadná látka, která je nejlehčí plastickou hmotou. Oproti PE může být používán při vyšších teplotách, neboť jeho teplota tání se nachází až mezi 160 °C a 170 °C. PP se také vyznačuje nižší hustotou, než má PE, rovněž tak menší odolností vůči mrazu, oxidaci a povětrnosti. Na druhé straně má PP větší pevnost, tvrdost a chemickou odolnost, obzvláště při vyšších teplotách. Např. pevnost v tahu při 100 °C je u PP stejně velká jako u PE za normální teploty. PP se používá na výrobky, u kterých je žádána tuhost, mechanická pevnost a výborné elektroizolační vlastnosti. Těmi se PP může pyšnit, poněvadž podobně jako PE má i tento polymer prakticky nepolární strukturu (jeho relativní permitivita je 2,3). Elektrická pevnost je ale u PP větší, a sice 80 kV/mm. PP nachází uplatnění v kabelové technice zejména jako izolace pro kabelové vedení v prostorách motorů automobilů, a to díky určité odolnosti vůči olejům a vyšší provozní teplotě, než má polyetylen. Kvůli tuhosti polypropylenu se však používá pouze pro izolaci kabelů o malém průměru, obvykle menším, než 10 mm^2. [9, 4]

Zpracování polypropylenu

Polypropylen se v mnohém podobá polyetylenu, nejinak je tomu v případě zpracovatelnosti. PP se zpracovává podobně jako PE, tedy vstřikováním za teplot 205 °C až 280 °C, vytlačováním při teplotách 180 °C až 250 °C, vyfukováním nebo lisováním. [5]

1.1.4 Polytetrafluoretylen (PTFE)

Polytetrafluoretylen, známý hlavně pod názvem Teflon, je významným plastem ze skupiny fluorových polymerů. Připravuje se suspenzní nebo emulzní polymerací fluorových derivátů polyetylenu za přítomnosti katalyzátorů. Polymerace je technologicky náročná a kvůli značné rychlosti polymerace a vysokému polymeračnímu teplu se provádí výhradně ve vodní disperzi. Pokud by se teplo vznikající při polymeraci špatně odvádělo, mohlo by dojít až k explozi za rozkládání monomeru na uhlík a tetrafluormetan. [4, 6]

Vlastnosti polytetrafluoretylenu

PTFE je bílý, krystalický, nepolární polymer. V jeho struktuře jsou atomy uhlíku a fluoru vázány velice pevnou iontovou vazbou, jež je způsobena velkým rozdílem elektronegativit obou prvků. Tato vysoce pevná vazba určuje charakteristické vlastnosti PTFE. Tento polymer je výborně odolný proti vysokým teplotám, je stabilní v rozmezí teplot od -170 °C do +250 °C. Výraznější rozklad, při němž se vytvářejí často toxické plyny, začíná až při dosažení teploty 380 °C. PTFE je chemicky nejodolnějším plastem, odolává silným kyselinám, zásadám a organickým rozpouštědlům. Charakteristickými vlastnostmi PTFE je jeho nerozpustnost a vysoký bod tavení. PTFE patří mezi nejméně hořlavé plasty a díky jeho nepolární lineární struktuře se pyšní výbornými ektroizolačními vlastnostmi, které jsou jen málo závislé na teplotě a frekvenci. Relativní permitivita ε_r je 2,1 při 60 Hz až 10^9 Hz a ztrátový činitel tg δ je 0,0001. PTFE se v kabelové technice využívá zejména k výrobě izolací pro dráty a kabely vystavené vysoké teplotě, dokonce v přítomnosti plamenů nebo požárů PTFE obstojí, protože fluor, který je obsažen v molekulové struktuře, plamen dusí a zamezuje jeho šíření. [1, 4, 6]

Zpracování polytetrafluoretylenu

PTFE má velmi vysoký bod tavení (327 °C) a extrémně vysokou viskozitu taveniny, což způsobuje potíže při jeho zpracovávání. Proto se PTFE zpracovává odlišnými technologiemi,

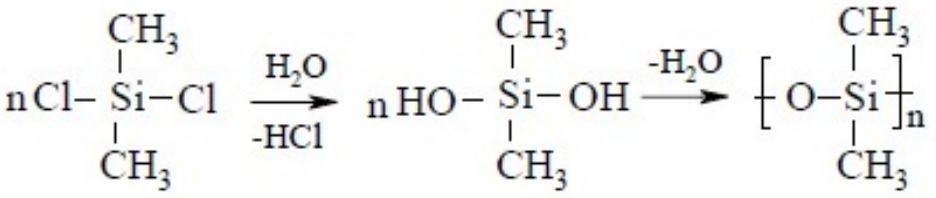
než jsou technologie zpracování ostatních plastů. Metoda zpracování lisování probíhá tak, že se nejdříve prášek polymeru za studena lisuje ve formách a předlisky se poté dle jejich tloušťky nechají určitou dobu slinout v sušárnách při 360 °C až 380 °C. Poté se výlisek ochladí - rychlost ochlazení určuje vlastnosti výsledného produktu. PTFE lze též zpracovávat vytlačováním. Šnekový stroj pro zpracování PTFE se ale liší od extruderů pro zpracování jiných plastů. Využívá se šnekového stroje, který je studený a ke spékání dochází až v hlavě, která je delší než u normálních strojů. Fólie z PTFE lze vyrobit válcováním na nerezových kalandrech při 400 °C. [4, 6]

1.2 Elastomery

Elastomery lze velmi snadno působením malé síly deformovat, po působení deformační síly však rychle obnovují téměř dokonale původní tvar. Elastomerem je tedy každý lineární nebo rozvětvený polymer, který vykazuje tuto vlastnost nazývanou kaučuková elasticita. Dominantní skupina elastomerů jsou kaučuky, kromě nich patří mezi elastomery ještě např. polyizobutylen, měkčené PVC a termoplastické elastomery. Kaučuky jsou elastomery schopné vulkanizace. To je fyzikálně-chemický proces, při němž za podpory tepla nebo katalyzátoru dochází k reakci vulkanizačního činidla. Takovým činidlem je nejčastěji síra. Dochází tak ke změnám ve struktuře – z plastické kaučukové směsi se stává elastická látka, v jejíž struktuře jsou polymerní řetězce navzájem propojeny do dvojrozměrné prostorové struktury a jsou tak plošně zesítěné. Vulkanizací kaučuku se vyrábí pryž. V elektrotechnice se zejména používají tzv. syntetické kaučuky. [10, 19]

1.2.1 Silikonové kaučuky

Silikony obecně jsou organokřemičité sloučeniny (polysiloxany) připravované hydrolýzou dichlorsilanů a jejich následnou samovolnou polykondenzací. Silikonové kaučuky se získávají při dvojnásobném stupni polymerace. Struktura lineárních polysiloxanů, ke kterým silikonové kaučuky patří, představuje řetězec, ve kterém se pravidelně střídá atom křemíku a atom kyslíku. Uhlíkaté organické skupiny se u nich vyskytují jen jako postranní skupiny vázané na křemík. Schéma vzniku lineárního polysiloxanu zobrazuje obrázek 3. Silikonové kaučuky se dělí na dva základní typy – typy vulkanizovatelné za tepla a typy vulkanizovatelné za teploty místnosti. V kabelářském průmyslu se používají typy vulkanizovatelné za vyšších teplot. [5]



Obr. 3: Vznik lineárních polysiloxanů [12]

Zpracování silikonových kaučuků vulkanizovatelných za tepla

Kaučuk tohoto typu je na začátku procesu vulkanizace bezbarvá a ještě tekoucí hmota, což je fakt, který vypovídá o malé soudržnosti řetězců v molekule. Tento kaučuk se prohněte v hnětáku nebo mezi studenými válci s plnivy a peroxidem. Vulkanizace pak probíhá ve formách pod tlakem 4 MPa až 8 MPa při teplotě 110 °C a je následována několikahodinovým temperováním při 150 °C až 200 °C. Výsledkem tohoto procesu jsou výrobky ze silikonové pryže. Pro vulkanizaci silikonových izolací vodičů se používá radiační technika s urychlovači elektronů. [6]

Vlastnosti silikonových kaučuků vulkanizovatelných za tepla

Silikony obecně se vyznačují výbornou tepelnou odolností a ani silikonové kaučuky nejsou výjimkou. Používají se v rozmezí teplot -50 °C až 250 °C, krátkodobě až nad 300 °C. Silikonové kaučuky mají značně nižší pevnost v tahu než běžné kaučuky, do značné míry lze pevnost zvýšit přidáním SiO_2. Při 150 °C jsou však mechanické vlastnosti silikonových kaučuků lepší než u dienových elastomerů. Nevýhoda u těchto elastomerů je, že nejsou dostatečně odolné vůči mnohým organickým rozpouštědlům a především dlouhodobému působení přehřáté vodní páry. Silikonových kaučuků se využívá v kabelářském průmyslu k izolaci tepelně namáhaných vodičů. [6]

1.2.2 Etylenpropylenové kaučuky (EPR)

Etylenpropylenové kaučuky se vyrábějí roztokovou kopolymerací za přítomnosti Zieglerových – Nattových katalyzátorů. Základním typem etylenpropylenových kaučuků je nasycený kopolymer etylenu s propylenem, který se značí EPM. Hmotnostní poměr etylenu ku propylenu se u tohoto typu pohybuje od 1:1 do 3:1. EPM lze vulkanizovat pouze

za použití peroxidů, zatímco druhý typ etylenpropylenových kaučuků terpolymer etylenu a propylenu s nekonjugovaným dienem, značený EPDM, lze vulkanizovat sírou, pryskyřicemi i peroxidy, zejména když je požadována vysoká tepelná odolnost a malá trvalá deformace vulkanizátů. [5]

Vlastnosti etylenpropylenových kaučuků

Oba dva zmíněné typy etylenpropylenových kaučuků jsou velmi odolné proti stárnutí na povětrnosti, v kyslíku a ozonu díky jejich plně nasycenému hlavnímu řetězci makromolekul. Tato vlastnost je u jiných kaučuků jinak nedosažitelná. EPM je více odolný proti degradaci než EPDM. EPDM je odolný vůči kyselinám a alkoholům, naopak proti působení olejů a nepolárních organických rozpouštědel je jeho odolnost malá. Mechanické vlastnosti EPDM se blíží vlastnostem butadien-styrenového kaučuku. Etylenpropylenové kaučuky se používají zejména pro oplášťování vodičů a kabelů, u nichž je velký požadavek na odolnost vůči stárnutí. [5, 6]

1.2.3 Polychloroprenový kaučuk (CR)

Polychloroprenový kaučuk pod označením Neopren byl první vyrobený syntetický kaučuk, který svými vlastnostmi předčil kaučuk přírodní. Stalo se tak ve třicátých letech v USA. U nás byl CR prvním vyráběným syntetickým kaučukem v předválečném Československu firmou Baťa. Byl označen obchodním názvem Baťapren.

Chloropren je monomer, který samovolně polymeruje již za normálních teplot. Při polymeraci i skladování CR je nežádoucí přítomnost kyslíku, neboť s ním tento elastomer reaguje za vzniku peroxidů, což podněcuje další polymeraci. Polymerace se vzhledem k velké reaktivitě monomeru provádí v menších reaktorech, probíhá v emulzi při teplotě kolem 40 °C. [4, 6]

Vlastnosti polychloroprenového kaučuku

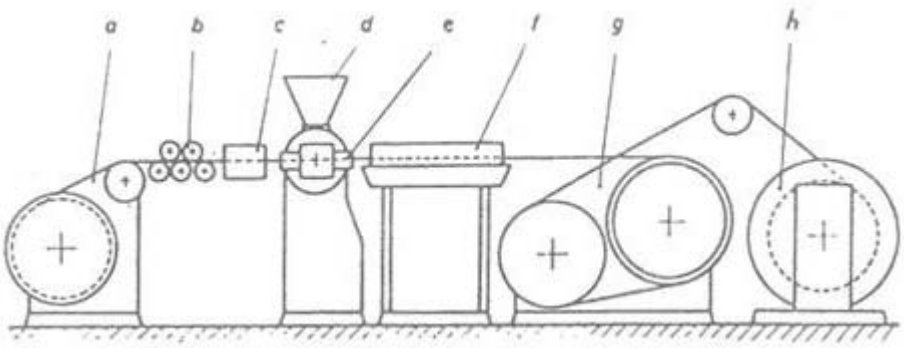
Polymery připravené při teplotě 40 °C jsou ve srovnání s přírodním kaučukem méně krystalické a vykazují vyšší elasticitu. CR patří mezi olejivzdorné elastomery - odolává nepolárním olejům, lepší je ve srovnání s přírodním kaučukem i jeho odolnost vůči rozpouštědlům a taktéž jeho termooxidační stabilita. Má dlouhou životnost a je samozhášivý díky tomu, že obsahuje až 36 % chloru. Je dobře odolný povětrnostním podmínkám, ozonu

a ohni. Jeho elektrické vlastnosti jsou: $\varepsilon = 6{,}7$, $\mathrm{tg}\,\delta = 0{,}025$, $E_p = 16$ kV/mm až 24 kV/mm a měrný vnitřní odpor je 10^{12} Ωcm. CR se používá pro kabelové plášťové vulkanizáty, které mají odolávat povětrnostním vlivům a pro silně namáhané izolace. [4, 6]

1.3 Oplášťování kabelů

V předešlých kapitolách byli uvedeni nejdůležitější zástupci plastů a kaučuků, jež se využívají pro výrobu izolací a plášťů kabelů. V návaznosti na to bude nyní popsán samotný proces oplášťování.

Technologie oplášťování kabelů se používá k izolaci elektrických vodičů a kabelů. Schéma linky na oplášťování je zobrazeno na obrázku 4.



a – odvíjení, b – vodící kladky pro vedení a rovnání drátu,
c – předehřev drátu, d – vytlačovací stroj, e – oplášťovací hlava,
f – chladící vana, g – odtah, h – navíjení

Obr. 4: Linka na oplášťování vodičů [13]

Drát je z cívky odvíjen přes vodicí kladky do předehřívacího zařízení. Nahřátý drát dále vstupuje do příčné oplášťovací hlavy, kde dochází k samotné aplikaci elektroizolačního materiálu na průchozí vodič. Vzniklý plášť se kalibruje, ochlazuje v chladicí vaně, měří a kontroluje se soustřednost pláště, průměr a jeho izolační vlastnosti. Nakonec je oplášťovaný vodič odtahován synchronizovanými odtahovacími válci a přes vodicí kladky je navíjen na cívku v navíjecím ústrojí. Pokud je oplášťování materiálem PE nebo PP, do linky se zařazuje před předehřev ještě ústrojí, které povrch trubky očistí a odmastí a opatří jej vrstvou adheziva. [13]

2 Recyklace plastů

Obrovský rozmach výroby a aplikace plastů v praxi v posledních letech má vedle kladného významu nejen pro elektrotechniku, ale i pro jiná odvětví, i význam negativní. Ten nastává zejména ve chvíli, kdy plastový výrobek přestane plnit svou funkci, skončí jeho doba života a výrobek se stává odpadem. Plastový odpad nemusí vznikat pouze při vyřazení plastového výrobku z užívání (tzv. sběrový odpad), ale také již při výrobě při zpracování plastů. Vznikají tak různé vtoky, přetoky, odřezky a zmetky (tzv. vratný odpad). [14]

Odpad lze dělit podle využitelnosti na využitelný a nevyužitelný. Nevyužitelný je určen k likvidaci, využitelný odpad však lze znovu zužitkovat, označujeme jej jako využitelné druhotné suroviny. Plastový odpad je obecně velký ekologický problém, tím, že budou využívány druhotné suroviny, přispějeme k šetření prvotních surovin (ropa) a energie až o 94 %. [10]

Recyklace, jak říkáme procesu, při kterém je dosaženo využití energie a materiálové podstaty výrobku po ukončení jeho životnosti, má však vedle ekologického významu také význam ekonomický. Tomu tak je, protože energetické nároky na výrobu prvotního polymeru jsou mnohem vyšší, než je energetická spotřeba na opětovné přepracování použitého materiálu. Přepracovat již použitý materiál je tedy mnohem levnější, než vyrobit materiál nový. Tyto výborné předpoklady pro recyklaci jsou však komplikovány tím, že každý druh plastu má jiný průběh recyklačního cyklu, při čemž doba tohoto cyklu je u každého plastu také jiná. To samo o sobě není problém, avšak to, že převážná většina plastového odpadu pochází z komunálního netříděného odpadu, už problém je. Samotné recyklaci tak musí předcházet nejdříve třídění odpadu, což je také finančně náročná záležitost. Je to však zapotřebí, protože podíl plastů v komunálním odpadu i celkový objem plastového odpadu se každým rokem zvyšuje a představuje tak velkou zátěž pro životní prostředí. Zejména proto je téma recyklace více než aktuální a proto se dnes výrobci snaží o vývoj takových plastů, které lze recyklovat. [10, 24]

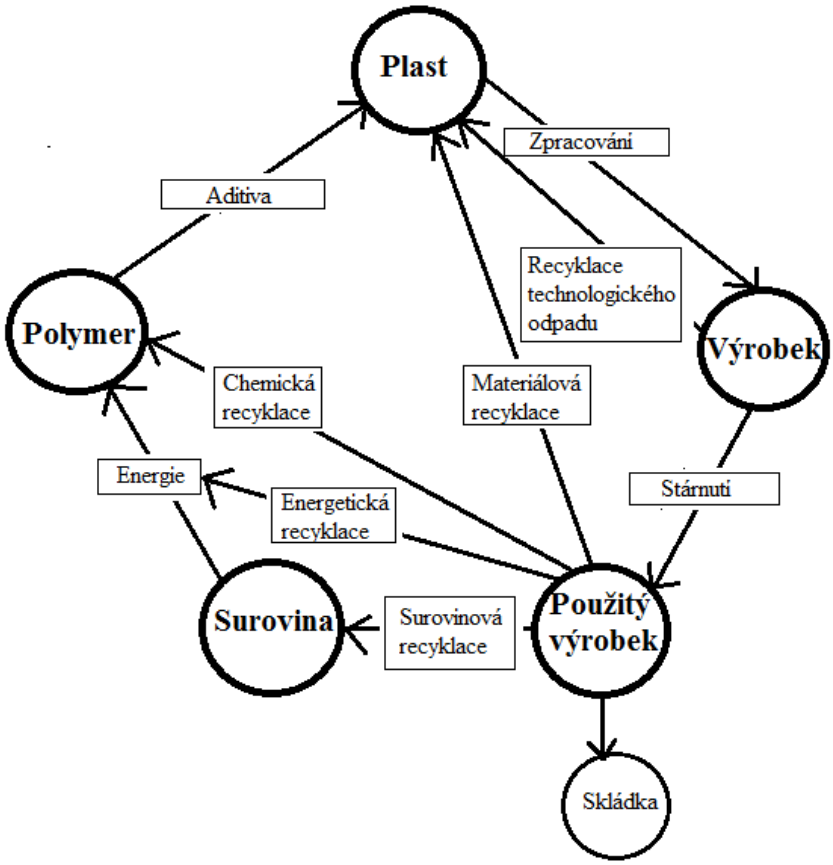
Plastový odpad lze rozdělit do 4 kategorií:

1. *Čistý tříděný odpad* – jedná se o hodnotný odpad, který vzniká přímo při výrobě plastů (např. odřezky fólií, trubek, desek, vtokové zbytky). Je to plastový odpad jediného druhu, který není znečištěný a může být opětně zahrnut do procesu, při kterém vznikl.

2. *Znečištěný tříděný odpad* – jedná se např. o zemědělské fólie, obalové fólie aj. I když je plastový odpad patřící do této skupiny jediného druhu, nemůže být zahrnut do procesů, při kterých vznikl, protože je znečištěný.
3. *Čistý netříděný odpad* – do této skupiny patří plastový odpad, který prakticky neobsahuje neplastové kontaminanty, jsou to např. vícevrstvé desky, syntetické tkaniny, vícevrstvé fólie.
4. *Znečištěný netříděný odpad* – patří sem odpad, který obsahuje i jiné materiály než plasty. Proces zpracování tohoto typu odpadu zahrnuje třídění dle druhu materiálu a velikosti částic materiálu. Jedná se např. o zbytky kabelů. [15, 6]

V závislosti na příslušné kategorii a tedy čistotě plastového odpadu lze odpad zpracovávat čtyřmi druhy recyklací:

- Materiálová recyklace
- Chemická recyklace
- Surovinová recyklace
- Energetická recyklace



Obr. 5: Schéma recyklačního cyklu [převzato z 10]

2.1 Materiálová recyklace

Materiálová recyklace se vyplatí v tom případě, je-li k dispozici velmi čistý odpad, např. odpad z plastikářské výroby nebo vytříděné použité výrobky. Tato technologie recyklace je vhodná zejména pro termoplasty. Jedná se o jeden z nejnáročnějších recyklačních postupů, který zahrnuje procesy od nejjednoduššího mletí opotřebovaných výrobků a následného tepelně mechanického zpracování meliva pro výrobu nových výrobků až po kompatibilizační postupy v tavenině, které slouží k přípravě vícesložkových materiálů ze směsí odpadních plastů. Touto technologií recyklace získáme materiál s vlastnostmi blízkými původnímu polymeru. Docílíme toho dodáním tepelné a mechanické energie a aditiv jako jsou stabilizátory a barviva odpadní surovině, čímž ji přetvoříme. Ekonomický efekt této recyklace je příznivý, pokud má recyklát požadovanou jakost, to znamená, pokud jím můžeme zaměnit původní nerecyklovaný plast v dané aplikaci. Materiálovou recyklaci lze dle čistoty plastového odpadu rozdělit do dvou základních skupin, a sice na recyklaci jednopruhového odpadu a recyklaci směsného odpadu. [10, 16]

2.1.1 Recyklace jednodruhového odpadu

Tento typ recyklace je v některých publikacích taktéž nazýván jako primární recyklace. Jedná se o recyklaci nekontaminovaného odpadu jediného druhu nebo typu plastu. Tato recyklace je často využívána již ve výrobních závodech, kdy při výrobě a zpracování plastů vedle samotných plastových výrobků vzniká také plastový odpad (např. ve formě vtokových zbytků, odřezků fólií či trubek, odpadem se také může stát vyřazený výrobek při kontrole). Takový odpad pak označujeme buď jako vratný nebo technologický. Odpadní surovina je znovu granulována a následně se získaný recyklát přidává k původnímu originálnímu plastu a je znovu zpracováván na plastový výrobek. Protože při zpracování plastů probíhají různé chemické reakce uvnitř struktury, které následně ovlivňují fyzikální vlastnosti plastů, je v mnohých případech nutné k recyklátu přidat stabilizátory, aby nebyla ohrožena kvalita výrobku. [6, 10]

2.1.2 Recyklace směsného odpadu

Recyklace směsného odpadu zpracovává často odpadní plasty, které pochází z komunálního, tedy netříděného odpadu. Tento odpad se zpracovává speciální technologií, jež se nazývá down-cycling. Tato technologie spočívá v tom, že se nejdříve oddělí nepolymerní kontaminanty od odpadních plastů a následně se směs plastů míchá v tavenině ve speciálním extruderu s vysokou hnětací účinností. Bezprostředně poté se vytvořená tavenina vytlačuje do formy, aniž by byly předtím plasty od sebe separovány. Výhodou této technologie je, že jí lze získat i výrobky relativně velkého objemu, nevýhodou jsou horší mechanické vlastnosti recyklátu. Ty jsou způsobeny termodynamickou nemísitelností polymerů různého chemického složení, která vede ke vzniku vícefázových systémů se špatnou přilnavostí mezi fázemi. Významného zlepšení vzájemné mísitelnosti různých typů plastů, a tedy i zlepšení mechanických vlastností recyklátu, lze dosáhnout přidáním kompatibilizátorů, které snižují mezifázovou energii a zabraňují separaci jednotlivých typů plastů během dalšího zpracování na konečné plastové výrobky. [6, 10]

2.2 Chemická recyklace

Při chemické recyklaci je polymerní materiál rozkládán na nízkomolekulární látky, monomery, které lze opětovně použít pro polymerace. Tento typ recyklace je vhodný zejména pro ty polymerní materiály, které nemohou být recyklovány materiálovou recyklací kvůli své náchylnosti k degradaci nebo nejsou dostatečně čisté, což je jeden ze základních požadavků materiálové recyklace. Nevýhodou této technologie recyklace jsou poměrně vysoké investiční náklady na technologické zařízení. [6, 10]

2.2.1 Tepelná depolymerace

Jedná se o nejjednodušší typ chemické recyklace. Za působení vysokých teplot (400 °C až 500 °C) podléhá polystyren a polymetylmetakrylát tepelné degradaci, kdy se z konců polymerních řetězců postupně odštěpují monomerní jednotky. Takový mechanizmus nazýváme zipový. Získané monomery lze po očištění znovu polymerovat na výchozí polymer s původní kvalitou. V současné době se takto recykluje polymetylmetakrylát, jehož spotřeba je ovšem tak malá, že se dále tento typ chemické recyklace nerozšiřuje. [6, 10]

2.2.2 Solvolýza

Solvolýza je souhrnný název pro procesy, kterými získáváme výchozí monomerní jednotky postupem opačným polykondenzaci. Jedná se tedy o rozklad polykondenzátů účinkem nízkomolekulárních látek. To znamená, že tímto postupem lze recyklovat polymery vyráběné polykondenzací nebo polyadicí, jakými jsou polyestery, polyamidy, polykarbonáty nebo polyuretany. Jedná-li se o solvolýzu ve vodě, tzn. rozklad chemické látky nastává účinkem vody, nazýváme tento proces hydrolýza, rozklad účinkem alkoholu je nazýván alkoholýza, dalšími typy solvolýzy je pak např. methanolýza a glykolýza. Praktický význam má solvolýza zejména v recyklaci PET. Produktem hydrolýzy PET je etylenglykol a kyselina tereftalová, které opět slouží jako suroviny pro výrobu nového polyesteru. Na druhé straně methanolýzou při zvýšených tlacích a teplotách se regeneruje etylenglykol a dimethyltereftalát. PET lze také recyklovat glykolýzou, kdy za působení etylenglykolu a teploty 200 °C vznikají diestery kyseliny tereftalové. Uvádí se, že methanolýza je oproti glykolýze výhodnější, neboť proces je méně náchylný na přítomnost cizorodých látek. [6, 10]

2.3 Surovinová recyklace

Surovinová recyklace je chemická přeměna plastového odpadu na výrobní surovinu. Principem tohoto typu recyklace jsou termicky destrukční procesy, které rozkládají polymery na směs plynných a kapalných uhlovodíků. Produktem surovinové recyklace pak jsou energeticky využitelný plyn a směs kapalných uhlovodíků, které lze následně využít jako topné oleje nebo petrochemické suroviny. Surovinovou recyklací se recyklují silně znečištěné směsi různorodých plastových složek, které již není prakticky možné recyklovat na hodnotnější materiál. [6, 10]

Surovinové zhodnocení odpadních plastů může být provedeno chemickým postupem hydrogenace nebo pyrolýzy. Hydrogenace je vysokotlaký katalytický proces, jehož produktem jsou kapalné, nasycené uhlovodíky. Na druhé straně pyrolýza je tepelný rozklad polymerů probíhající za nízkého tlaku a zvýšených teplot bez přítomnosti kyslíku. Produkt pyrolýzy závisí zejména na vstupním materiálu a reakčních podmínkách, avšak obecně lze říci, že produkty pyrolýzy jsou plyny a koks. [6, 10]

Mezi druhy surovinové reakce patří také postupy založené na společném zpracování odpadních plastů a uhlí, při nichž je využíváno schopnosti uhlí předávat vodík. První z těchto postupů je společná pyrolýza. Ta je ze všech postupů založených na společném zpracování plastového odpadu s uhlím nejméně investičně náročná, stejně tak provozní náklady jsou

u společné pyrolýzy nejmenší. Vedle plynných a malého množství kapalných produktů vzniká při společné pyrolýze zejména koks, který má velmi vysoké absorpční účinky a je používán pro čištění odpadních vod a vzduchu. Další možností společného zpracování odpadních plastů a uhlí je společné zkapalnění. Tento postup je sice nejdražší, na druhou stranu ale poskytuje jako produkt lehkou syntetickou ropu, což je v dnešní době, kdy se zásoby ropného bohatství v přírodě rapidně zmenšují, velmi nadějné. Poslední možnost, jak zpracovat plastový odpad s uhlím najednou, je společné zplynění. [6]

2.4 Energetická recyklace

Pokud se plastový odpad nedá využít některou z výše uvedených technologií recyklace, využije se alespoň energetický obsah odpadního plastu spalováním, což je nepochybně lepší řešení, než zavážet plastový odpad na skládky. Užitečným výstupem spalování je tepelná energie. Energetická recyklace je často označována jako ekologicky nepřijatelná kvůli možnému toxickému znečišťování ovzduší ekologicky závadnými plynnými produkty, např. dioxiny, které mohou vznikat při spalování plastů. Vhodně navržené topeniště a technologické podmínky spalování však tuto možnost vylučují. Stejně tak ekologicky závadné produkty vznikající při spalování PVC, polyamidů, polyuretanů a pryží jsou vhodně neutralizovány převedením na pevnou formu. Například chlorovodík, který se uvolňuje při spalování PVC, je vázán do tuhého chloridu vápenatého, síra z pryží na inertní síran vápenatý a oxidy dusíku z polyamidů jsou převedeny na nezávadné dusíkaté soli. Energetická recyklace je ve světě hojně využívaná, ve Švédsku a Německu je takto zpracováno 50 % veškerého pevného komunálního odpadu, v Dánsku je to 65 %, v Japonsku 70 % a ve Švýcarsku dokonce 80 %. [6, 10, 24]

2.5 Recyklace kaučuků

Pryžový odpad se dnes stává stejně jako plastový odpad celosvětovým problémem. Největší podíl v objemu pryžového odpadu tvoří opotřebované pneumatiky, jen v ČR je jich každoročně vyprodukováno 700 000 tun, v celém světě pak vzniká asi 1 miliarda starých pneumatik ročně. Již v sedmdesátých letech 19. stol., brzy po objevení vulkanizace, byla uznávána ekonomická hodnota pryžového odpadu, a proto se již tehdy projevila snaha o využití staré použité pryže. Tato snaha přetrvává dodnes. [5, 17]

2.5.1 Mechanická recyklace

V některých publikacích se můžeme také setkat s názvem fyzikální nebo materiálová recyklace. Tento typ recyklace je technicky i technologicky náročný proces, který je založen na drcení a mletí pryžového odpadu a následné separaci pryže od ostatních látek obsažených v pryžovém odpadu. Jednou z možností mechanické recyklace je tzv. kryogenní metoda, což je metoda drcení v podchlazeném stavu, kdy jsou hrubé frakce pryžového odpadu chlazeny kapalným dusíkem na -80 °C (teplota zeskelnění pryže), čímž se odpad stává dostatečně křehký a je tak snadné ho rozsekat na drobné částice v sekacích strojích. Na rozdrcení kilogramu pryže je potřeba 0,3 kg až 1 kg kapalného dusíku. Množství spotřebovaného dusíku závisí zejména na vstupní teplotě pryže, proto je výhodné provádět proces v zimě. Výsledný produkt kryogenní metody (granulát) má však velkou výrobní cenu a navíc také dojde k podstatné změně vlastností původní pryže. [17, 18]

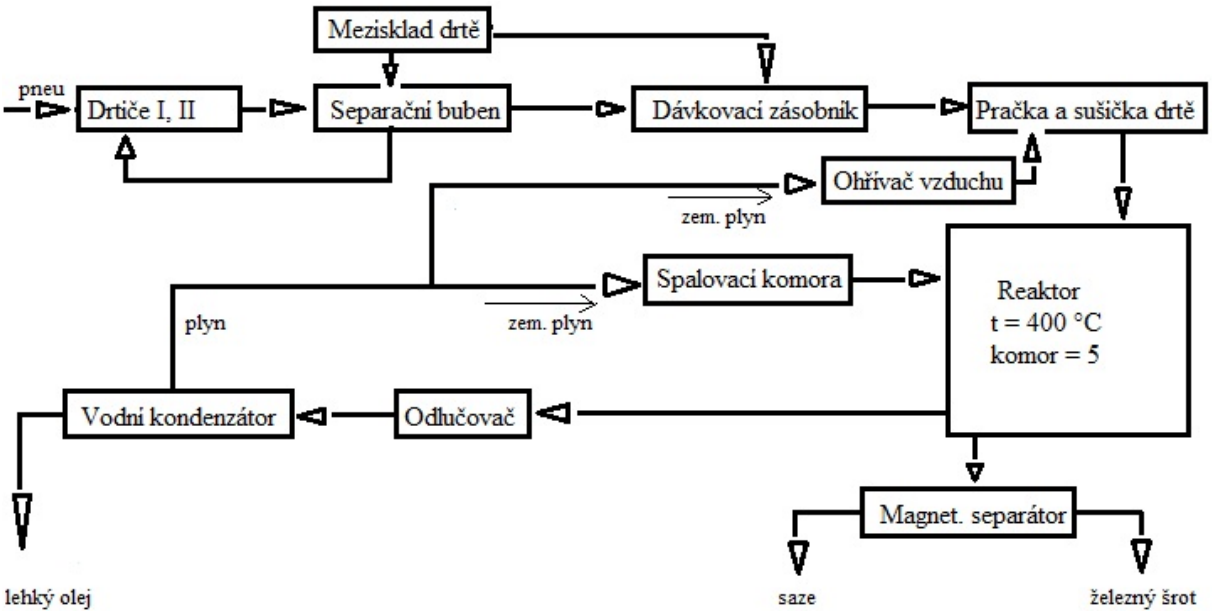
Z tohoto důvodu se v praxi častěji užívá tzv. mechanický způsob. V první části tohoto procesu se nejdříve pryžový odpad rozseká na fragmenty o rozměru 60 mm x 60 mm. Za sekacími stroji, na nichž k rozsekání dochází, jsou umístěné recyklační linky, jež se skládají z mlýnů a separátorů. Na recyklačních linkách dochází k postupnému mletí odpadu na jemnější drť a k separaci ostatních látek, v případě pneumatik k separaci oceli a textilu. Nespornou výhodou mechanického způsobu je bezesporu to, že výsledný produkt si na rozdíl od produktu vzniklého kryogenní metodou ponechá svoji podstatu a tedy i fyzikálně-chemické vlastnosti, které jsou pro pryž tak typické. Jedná se zejména o vysokou elasticitu v širokém rozmezí teplot a vysokou odolnost vůči opotřebení. [18]

Velmi jemnou drť získávanou jednou ze zvýše zmíněných metod je možné využít jako plnivo do kaučukových směsí nebo termoplastických elastomerů. Pryžový odpad se tak po mechanickém rozmělnění stává opět součástí nového pryžového výrobku. Směsi s přídavkem jemné pryžové moučky se oproti směsím bez přidání pryžové moučky vyznačují větší plasticitou a také snazší zpracovatelností ve vytlačovacích strojích, neboť jejich viskozita při větších smykových rychlostech je menší. Drť pryžového odpadu je také využívána v mnohých případech mimo gumárenský průmysl. Používá se např. jako plnivo pro asfalt, na výrobu různých rohoží a díky pozoruhodné schopnosti absorpce uhlovodíků je také využívána jako univerzální absorpční prostředek v případě ekologických havárií spojených s únikem ropy nebo chemických látek. [17]

2.5.2 Chemická recyklace

Stejně jako plastový odpad i odpad z pryže lze recyklovat pyrolytickými procesy. Recyklace pyrolýzou patří mezi destruktivní metody zpracování pryžového odpadu, stejně jako ostatní metody, při nichž se mění chemická struktura materiálu. Při pyrolýze, která probíhá v reaktoru, dochází k rozkladu pryžového odpadu vlivem vysokých teplot. Pryžový odpad se postupně rozkládá na plynné složky a pevný zbytek, což je v případě pneumatik ocel a saze. Produkty pyrolýzy jsou saze, železný šrot a směs podobná lehkému topnému oleji, které je dosaženo kondenzací plynů vznikajících rozkladem pryžového odpadu za vysokých teplot v reaktoru. [17, 18]

Na obrázku 6 je zobrazeno schéma zařízení na zpracování pneumatik pyrolýzou.



Obr. 6: Schéma zařízení na zpracování pneumatik pyrolýzou [převzato z 17]

Moderní metodou chemické recyklace odpadní pryže, která vznikla v USA je tzv. zkapalňování starých pneumatik. Princip této technologie je založen na suché destilaci rozřezaných pneumatik ve starém oleji při 400 °C. Bohužel provozní náklady této pyrolytické technologie jsou tak vysoké, že není v širokém měřítku využívána, avšak výzkum v této oblasti neustále pokračuje. [19]

2.5.3 Energetická recyklace

Odpadní pryž má vysokou výhřevnost, jak lze vidět v tabulky 2, kde jsou pro názornost srovnány hodnoty výhřevnosti několika průmyslových odpadů včetně pryže a hnědého uhlí spalovaného u nás. Vysoká výhřevnost pryže jasně mluví pro energetické zhodnocení a využití odpadní pryže jako paliva. Spalování celých, předem nedrcených pneumatik probíhá v cementárnách nebo ve speciálních pecích, které byly navrženy tak, aby celý proces spalování pryžové drtě probíhal energeticky co nejvýhodněji a zároveň tak, aby nezatěžoval životní prostředí. Během spalování v cementárnách se totiž uvolňují oxid siřičitý, který se dále oxiduje na oxid sírový, a další kyselé oxidy, které jsou však bezpečně vázány přítomným oxidem vápenatým. Energetické zhodnocení je doposud nejekonomičtější možnou cestou recyklace odpadní pryže, avšak rozhodně není dlouhodobým řešením problému. Pryžový odpad by se v budoucnu mohl stát výhodnou surovinou v chemickém průmyslu, energetickou recyklací se však nenávratně ničí. [19, 24]

Tab. 2: Hodnoty výhřevnosti průmyslových odpadů [19]

Palivo	**Výhřevnost [MJ.kg^{-1}]**
Kaly ze zpracování ropy	9
Severočeské hnědé uhlí	8 - 12
Papírové a lepenkové odpady	15
Kožený odpad	16
Odpady z výroby barev a laků	17
Odpady ze zpracování dřeva (piliny)	19
PVC odpad	18 - 26
PET odpad	23
Pryžový odpad (ojeté pneumatiky)	21 - 31

2.6 Recyklace kabelů

Použití plastů pro izolaci kabelů představuje významné procento v aplikaci plastů napříč celým odvětvím elektrotechniky, a proto musel být nalezen způsob, jak recyklovat i plasty použité právě pro tento účel. Jak již bylo řečeno v 1. kapitole této práce, kabel se skládá minimálně ze dvou částí, a sice vodiče a izolace. Pro zajištění co nejlepších vlastností budoucího výrobku z recyklovaného plastu je bezpodmínečně nutné zajistit co největší homogenitu a čistotu plastu před samotným procesem recyklace. V praxi to v případě kabelů znamená separovat plast od kovu.

Získávání izolace kabelů pro recyklaci pak probíhá ve třech krocích. Prvním je rozsekání nebo drcení celých kabelů, následuje jemná granulace, která ústí v granulát směsi plastu a kovu a posledním krokem je již zmíněná separace, kdy je kov od plastu oddělen. [20]

Rozsekání a základní rozmělnění celých kabelů probíhá v drtičích či v nožových mlýnech. Nožový mlýn se skládá z několika pevných, kolem rotoru radiálně uložených nožů, které nesou další nože. Jelikož se rotor rychle otáčí, materiál, který sem přichází z násypky, je mezi noži důkladně rozsekán na frakce o velikosti ok síta, jimiž materiál propadává. Takto lze získat části o velikosti 15 mm až 25 mm. Za zařízením pro drcení jsou dále nainstalovány magnety, které slouží k odstraňování oceli z kabelů, které mají pancíř. [15]

Obr. 7: Drcení kabelů [20]

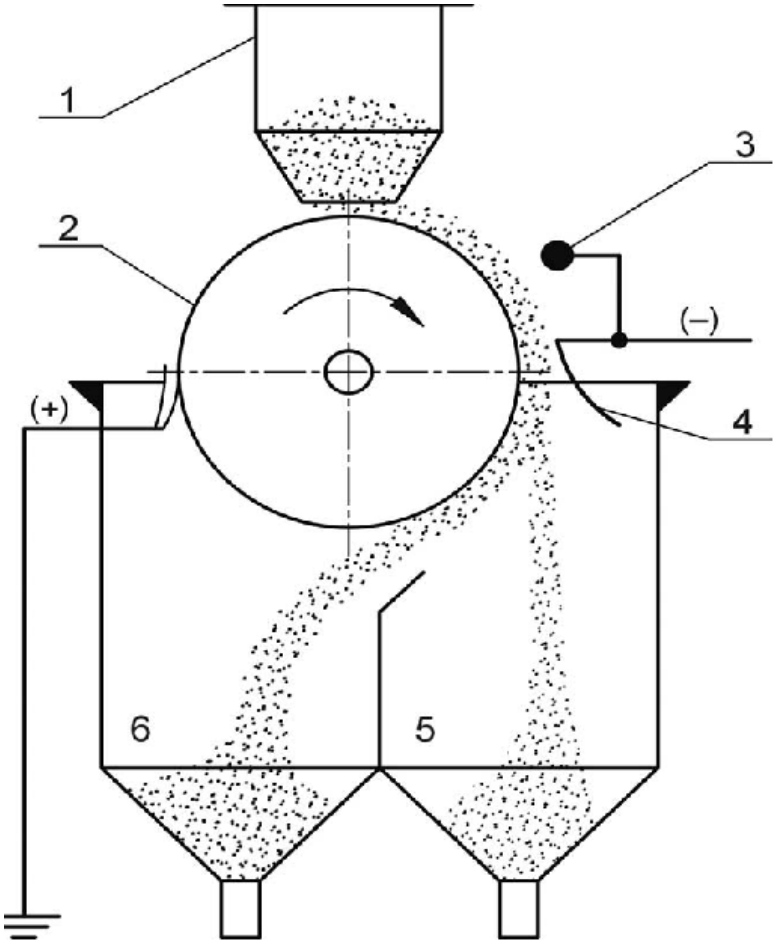
Jemnost mletí nožových mlýnu lze sice regulovat výměnou síta, ale důkladnější granulace je v každém případě dosaženo v tzv. granulátoru. V něm lze získat granulát o velikosti 4 mm až 7 mm. Granulačních technologií je více, rozlišujeme tak granulaci z pásu, granulaci strun za studena a za horka nebo granulaci pod vodou. Principem většiny granulátorů je vytlačování materiálu ve formě strun nebo pásků a jejich sekání na stejnosměrné kousky. Výsledný granulát se skládá ze stejných částic (válečky, hranolky, čočky), přičemž tvar granulí je velmi důležitý pro další zpracovatelský postup plastu. Granule jsou výhodné díky jejich snazšímu a přesnějšímu dávkování násypek vytlačovacích a vstřikovacích zařízení a také díky tomu, že umožňují pravidelný přísun materiálu k šnekové části, aniž by docházelo k lepení granulí na stěny násypky, jako je tomu např. v případě prášku. [14, 15]

Obr. 8: Jemná granulace kabelů [20]

Posledním krokem recyklace kabelů je oddělení frakce plastických hmot (izolace) od frakce čistých kovů, jakými v kabelech bývá měď nebo hliník. Pro tuto operaci se využívá elektrostatický princip a k odloučení rozdílných frakcí dochází v tzv. elektrostatickém separátoru.

Elektrostatická separace je založena na oddělení materiálů s různou elektrickou vodivostí, plast jakožto nevodivý materiál je oddělen od vodivého kovu. Jedná se o zvláště efektivní způsob, jak očistit plast od kovových částic před jeho dalším zpracováním.

Na obrázku 9 je znázorněn elektrostatický separátor s rotujícím válcem, který je někdy také nazýván bubnový separátor. Toto zařízení je napájeno vysokým napětím o velikosti 15 kV až 40 kV. Granule jsou vsypány do násypky a rotujícím válcem dopraveny k sršící elektrodě, která je připojena na záporný zdroj vysokého napětí. Částice se nabíjejí vedením od elektrody prostřednictvím ionizovaného vzduchu. Při nabíjení platí pravidlo, že látka s větší relativní permitivitou získává kladný náboj, látka s nižší relativní permitivitou náboj záporný. V průběhu transportu částic rotujícím válcem jsou tak kovové kladně nabité částice přitahovány druhou záporně nabitou elektrodou, která se nazývá odchylovací, zatímco záporně nabité plastové granule jsou elektrostatickými silami přitahovány k válci. Úměrně své povrchové vodivosti a tomu, jak ztrácejí svůj získaný elektrický náboj, pak částice odpadávají do jednotlivých výsypek. Jelikož vodivé materiály ztrácejí svůj náboj velmi rychle, odpadávají kovové granule první, zatímco plastové částice ztrácející svůj náboj jen velmi pomalu zůstávají přichycené k válci déle a padají tak do jiné výsypky. [21]



Obr. 9: Elektrostatický separátor [21]
1 - násypka, 2 - válec, 3 - sršící elektroda, 4 - odchylovací elektroda,
5 a 6 - zásobníky rozdružených produktů

Tímto způsobem lze oddělit od kovu všechny druhy plastů, které jsou používány pro výrobu izolací a plášťů kabelů. Platí ale, že nelze elektrostaticky od sebe oddělit více druhů plastů, tedy na výrobu pláště i izolace musí být v kabelu použit jeden a ten samý plast. [23]

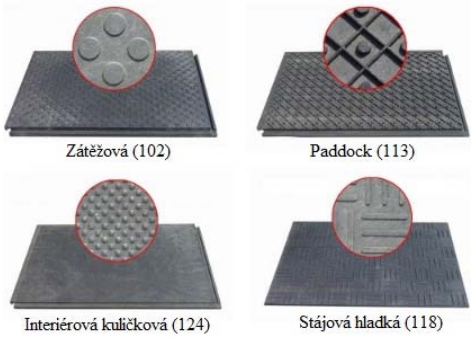
3 Srovnání vlastností nového a recyklovaného PVC

Jak vyplývá z předchozí kapitoly, dá se předpokládat, že vlastnosti recyklovaného materiálu se od vlastností nerecyklovaného podstatně liší. V této kapitole bude porovnání vybraných vlastností prakticky provedeno. Srovnávat budeme původní polyvinylchlorid zakoupený od firmy Jaroslav Bažant – Plastic Port a recyklovaný polyvinylchlorid společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. získaný recyklací elektrických kabelů.

3.1 Představení firmy REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o.

Firma REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. vznikla v roce 1993 jako dceřiná společnost firmy Replast holding spol. s.r.o. Hlavní činností společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o., jež je držitelem mnohých významných ocenění, je výroba a prodej výrobků z recyklovaného PVC. V dnešní době obsahuje výrobní portfolio firmy zhruba 80 druhů různých výrobků, přičemž mezi hlavní komodity patří podlahové desky a komponenty pro dopravní značení.

Podlahové desky vyrobené z recyklovaného PVC nalézají uplatnění v mnohých odvětvích. V zemědělství jsou např. používány pro položení na podlahy ve stájích nebo chlévech, výborně se také hodí pro venkovní výběhy koní nebo dojírny. V průmyslu slouží podlahové desky jako pokládka v průmyslových podnicích ve skladech nebo výrobních halách, využití našly podlahové desky společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. i ve sportu a kultuře, kde se deskami překrývá fotbalový trávník na stadionu v době pořádání koncertů a upravují se jimi výstavní plochy při pořádání různých výstav a veletrhů. Povrchová textura podlahových desek je vždy upravena tak, aby plně vyhovovala účelu použití, prostředí, kde bude využívána, a přání zákazníka. Některé ukázky povrchových textur jsou zobrazeny na obrázku 10. Nespornou předností podlahových desek z recyklovaného PVC je jejich snadná údržba, rychlá montáž i demontáž a snadná manipulace. [22, 23]



Obr. 10: Ukázka textur podlahových desek firmy REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. [22]

Druhou hlavní výrobní komoditou firmy REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. jsou komponenty pro dopravní značení. Společnost vyrábí širokou škálu výrobků, které se umisťují na vozovky coby přechodné značení - podstavce pro dopravní značky všeho druhu, nebo jako zpomalovací a vodící prahy, obrubníky a jiné. Praktická ukázka aplikace komponent pro dopravní značení je zobrazena na obrázcích 11 a 12. [22]

Obr. 11: Vodící a zpomalovací prahy – horní parkoviště u nákupního střediska Kaufland, ul. Otýlie Beníškové, Plzeň [22]

Obr. 12: Podstavce pro dopravní značky v praxi [22]

V současné době je roční produkce společnosti 11 tisíc tun výrobků, které nacházejí své uplatnění u nás i v zahraničí. Vedle tuzemských zákazníků, spolupracuje REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. i se zákazníky ze Skandinávských zemí, Německa, Francie, Anglie, Slovenska, Íráku, USA, Itálie a dalších zemí. [23]

3.1.1 Postup výroby komodit REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o.

Veškerá produkce společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. se vyrábí dvěma způsoby. První z nich je klasický způsob, kdy je vstupní surovina – kabelová drť (blíže je popsána v následující kapitole) - zpracována na výrobek v extruderu a lisu, druhý způsob je za využití vstřikovací linky, kdy se všechny děje provádí automaticky a na jednom místě. Oba dva způsoby si nyní popíšeme detailněji. [23]

Při klasickém způsobu je využívána technologie vytlačování a lisování. Na začátku celého procesu je drť kabelového PVC, která je v jednošnekovém nebo dvoušnekovém vytlačovacím stroji (extruderu) zpracována na těstovitou hmotu a následně vytlačena do volného prostoru. Drť se do stroje přivede násypkou a pomocí šneku, který se otáčí rychlostí 50 otáček za minutu, je za současného stlačení dopravována vlivem gravitace a tření směrem k vytlačovací hlavě. Tato část extruderu se nazývá zóna dopravy tuhého materiálu. Následuje zóna tavení, kde je hmota za působení tepla (přiváděného pouzdrem stroje i vzniklým třením materiálu o pouzdro i šnek) a tlaku plastikována, promíchávána a dále stlačována. V poslední vytlačovací zóně je tavenina kontinuálně pod tlakem uváděna do vytlačovací hlavy. Tlak ani teplota nejsou po celé délce extruderu stejné, směrem k vytlačovací hlavě jejich hodnoty rostou. Vytlačovací stroj je ohříván elektrickým topením až na 200 °C, výsledná tavenina plastu dosahuje pak teploty 160 °C a je tak vhodná pro další zpracování lisováním. Celý proces plastifikace v extruderu od přivedení kabelové drtě po vytlačení konečné hmoty trvá zhruba 5 minut, výkon stroje společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o., který je zobrazen na obrázku 13, je 250 kg až 500 kg vyprodukované hmoty za hodinu. [23]

Obr. 13: Extruder a lis společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. [23]

Vytlačená tavenina z extruderu je přesně odvážena a přenesena k lisu, kde je dávka materiálu vložena přímo do dutiny formy. Forma je tvořena dvěma díly, spodní díl tzv. tvárnice se nachází na nepohyblivém stole lisu, naopak horní díl formy tzv. tvárník je upevněn na beranu lisu. Beran, který je pohyblivý, působí silou proti nepohyblivému stolu, čímž dojde k uzavření formy. Mezi tvárníkem a tvárnicí vznikne dutina, která určuje tvar výlisku a ve které je tavenina tvářena pod tlakem minimálně 3,8 MPa do požadovaného tvaru. Délka trvání celého procesu lisování je tvořena zejména dobou nutnou pro tuhnutí výrobku. Proto jsou desky formy vybaveny chladícími kanály, ve kterých cirkuluje voda o teplotě 10 °C až 12 °C. Tuhnutí pak s tímto chlazením trvá u podlahových desek 8 min, u dopravních komponent, které mají větší tloušťku než podlahové desky, je doba nutná k tuhnutí 15 min. Po uplynutí této doby se forma lisu otevře a výrobek je hotov. Vyjmutí provádí obsluha lisu ručně, stejně tak jako poslední úkon, čímž je odřezání možných vzniklých přetoků. [23]

Druhou možností, jak zpracovat materiál na výrobek ve společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o., je pomocí automatické vstřikovací linky, kde, jak už název sám napovídá, je využito technologie vstřikování. Firma vlastní automatickou vstřikovací linku (obr. 14), která plní stejné funkce jako šnekový vytlačovací stroj a lis zároveň. Všechny procesy se odehrávají na jednom místě a plně automaticky. V první části vstřikovacího stroje je drť, přivedena sem násypkou, přeměněna šnekem na homogenní taveninu plastu, která je následně napuštěna do zásobníku, kde je přesně odměřován objem potřebný pro vyplnění

formy. Plastikační kapacita, tedy množství plastu, které lze za hodinu převést do taveniny odpovídající kvality, je 350 kg. Po dosažení potřebného objemu je materiál vstříknut pod tlakem 10 MPa do druhé části vstřikovacího stroje tzv. uzavírací jednotky, funkčně analogické lisu. Tavenina plastu je vstřikována do formy horizontálně, což je výhoda, protože výrobek z formy vypadne po ochlazení sám vlastní tíhou. Doba ochlazování výrobku je 12 minut, proto pro zvýšení produkce výrobků má vstřikovací stroj čtyři otočně uspořádané uzavírací jednotky, které se střídají u jedné vstřikovací jednotky. Taková vstřikovací linka vyprodukuje pak 17 výrobků za hodinu. Po době nutné pro ochlazení výrobku se forma otevře a výrobek vypadne. Posledním úkonem je odříznutí vtokového zbytku z výstřiku, což je pozůstatek po vstřikování. Tento úkon provádí již obsluha linky ručně. [23]

Technologie vstřikování je přesnější, efektivnější a výrobky takto tvořené jsou kvalitnější než ty, které jsou produkovány klasickým způsobem. Přesto jsou případy, kdy je klasický způsob zpracování vhodnější a lepší než vstřikování. Jedná se např. o výrobu výrobků komplikovanějších tvarů, které jsou vyztuženy ocelovými výztužemi. [23]

Obr. 14: Vstřikovací linka společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. [23]

3.1.2 Recyklované kabelové PVC REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o.

Vstupní surovinou pro recyklační výrobu podlahových krytin a komponentů silničního značení ve firmě REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. je drť recyklovaného kabelového měkčeného PVC, kterou obstarává a připravuje sesterská firma RECYKLO, spol. s.r.o. Drť není zcela homogenní, vedle plastových částic všech barev jsou v ní místy obsaženy i kovové částice mědi nebo hliníku, které pozůstaly v recyklátu vlivem nedokonalé separace kovových částic od plastových během procesu recyklace elektrických kabelů. Vybrané vlastnosti recyklovaného kabelového PVC jsou uvedeny v následující tabulce 3. [23]

Tab. 3: Vlastnosti recyklovaného kabelového PVC REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. [23]

	Recyklované kabelové PVC
Modul pružnosti v tahu [MPa]	68
Poissonovo číslo	0,38 ÷ 0,4
Modul pružnosti ve smyku [MPa]	24
Hustota [kg.dm^{-3}]	1,2 ÷ 1,3
Součinitel tepelné vodivosti [W.m^{-1}.K^{-1}]	0,14 ÷ 0,17
Součinitel měrného tepla [kg.K]	850 ÷ 900
Mez pevnosti v tahu [MPa]	3,545
Mez kluzu [MPa]	1,27
Tvrdost [SHORE]	95
Třída reakce na oheň	E

3.2 Sledované parametry

Vzhledem k tomu, že součástí této diplomové práce je navržení využití recyklátů v elektrotechnice, je z tohoto důvodu zásadní stanovení elektroizolačních vlastností materiálu. Rozhodla jsem se tedy z elektrických vlastností pro porovnání hodnot vnitřní rezistivity ρ_v, relativní permitivity ε_r a elektrické pevnosti E_p recyklovaného a původního PVC. Dále jsem pak zvolila měření pevnosti v tahu a stlačitelnosti, jakožto zástupce mechanických vlastností, neboť i ty jsou pro praktické využití materiálů v elektrotechnice důležité, pokud vezmeme v úvahu, že při provozu může docházet k značnému mechanickému namáhání.

3.2.1 Vnitřní rezistivita

Měření vnitřní rezistivity ρ_v a polarizačních indexů je založeno na jevu dielektrické absorpce. Pod tímto pojmem si můžeme představit děje probíhající v dielektriku a vnějších obvodech elektrodového uspořádání, ve kterém se dielektrikum nachází, po přiložení stejnosměrného napětí na elektrody. V praxi to znamená, že se dielektrikum po připojení na zdroj stejnosměrného napětí nenabije okamžitě, ale až po určité době. Tento jev nazýváme dielektrická absorpce. Stejně tak se bude s určitým zpožděním i vybíjet – dielektrická resorpce. Tyto jevy jsou způsobeny pomalými polarizacemi, které se odehrávají ve struktuře dielektrika. Hodnoty naměřené z absorpčních a resorpčních charakteristik poskytují cenné rady o stavu materiálu, nevychází se z nich pouze pro stanovení vnitřní rezistivity, ale i jiných elektrických parametrů. V tomto případě byly z naměřených hodnot nabíjecích proudů nejprve vyhodnoceny polarizační indexy, které jsou velmi dobře využitelné pro zjištění stavu izolace a následně izolační odpor, z něhož se dále vycházelo pro stanovení vnitřní rezistivity. Ta je definována jako poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a hustoty ustáleného proudu uvnitř elektroizolačního materiálu. Je to vnitřní odpor redukovaný na objemovou jednotku. [25]

Jednominutový a desetiminutový polarizační index jsou definovány vzorci 1 a 2:

$$p_{i1} = \frac{i_{15}}{i_{60}} \tag{1}$$

$$p_{i10} = \frac{i_{60}}{i_{600}} \tag{2}$$

kde i_{15} ... je hodnota absorpčního proudu v patnácté sekundě od přiložení napětí [A]

i_{60} … je hodnota absorpčního proudu v šedesáté sekundě od přiložení napětí [A]

i_{600} … je hodnota absorpčního proudu v šestisté sekundě od přiložení napětí [A]

p_{i1} … je hodnota jednominutového polarizačního indexu [-]

p_{i10} … je hodnota desetiminutového polarizačního indexu [-]

Izolační odpor je poměr stejnosměrného napětí přivedeného na elektrody a celkového proudu mezi nimi v daném čase po připojení napětí.

$$R_x = \frac{U_{ss}}{I} \tag{3}$$

kde R_x ... je hodnota měřeného izolačního odporu [Ω]

U_{ss} … je přiložené stejnosměrné napětí [V]

I … je celkový proud protékaný materiálem [A]

(v tomto případě proud v desáté minutě)

Vnitřní rezistivitu můžeme vyjádřit pomocí izolačního odporu, avšak musí být brány v úvahu rozměry elektrod a samotného vzorku.

$$\rho_v = R_x \frac{A}{h} \tag{4}$$

kde ρ_v ... je vnitřní rezistivita [Ω.m]

R_x ... je vnitřní odpor [Ω]

A ... je efektivní plocha měrné elektrody [m^2]

h … je průměrná tloušťka zkušebního tělesa [m] [25]

3.2.2 Relativní permitivita

Relativní permitivita izolantů má praktický význam jako veličina charakterizující chování izolantů v elektrickém poli, tedy jejich schopnost se polarizovat. Je to bezrozměrná veličina, která se může měnit v závislosti na frekvenci a teplotě, popřípadě i na intenzitě elektrického pole. Relativní permitivitu lze definovat ze vztahu pro deskový kondenzátor:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{d} = \varepsilon_r C_0 \tag{5}$$

kde C … je kapacita kondenzátoru [F]

ε … je absolutní permitivita [F/m]

S … je plocha elektrod [m^2]

d … je vzdálenost elektrod [m]

ε_r … je relativní permitivita [-]

ε_0 … je permitivita vakua [F/m]

C_0 … je kapacita kondenzátoru, jehož dielektrikem je vakuum [F]

Pak platí, že:

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} \tag{6}$$

kde ε_r … je relativní permitivita [-]

C … je kapacita kondenzátoru, jehož dielektrikem je uvažovaný izolant [F]

C_0 … je kapacita kondenzátoru téhož uspořádání a rozměrů, jehož dielektrikem je vakuum [F]

Ze vzorce (6) je pak vidět, že kapacita deskového kondenzátoru se vsunutím dielektrika o relativní permitivitě $\varepsilon_r > 1$ zvětší ε_r – krát oproti kapacitě shodného kondenzátoru, jehož dielektrikum tvoří vakuum o $\varepsilon_r = 1$ nebo vzduch, jehož relativní permitivita je velice blízká 1. [10, 25]

3.2.3 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je základní veličina, která jednoznačně charakterizuje daný izolant vzhledem k jeho hlavnímu poslání – vzájemně od sebe elektricky oddělit místa s různým elektrickým potenciálem. Pokud přikládané napětí – tedy lokální intenzita elektrického pole – překročí pro daný materiál charakteristickou kritickou mez, dojde v něm k prudkému nárůstu koncentrace volných nosičů elektrického náboje a také ke zvýšení jejich pohyblivosti. To má za následek prudký pokles rezistivity a následně prudký nárůst konduktivity izolantu. Tato skutečnost vede až k výboji, kdy dojde ke spojení dvou původně izolovaných míst vodivou cestou. Následně se projeví degradační účinky a u pevných látek dojde k průrazu, u plynných a kapalných izolantů pak k přeskoku. Tyto dva pojmy označují souhrn jevů, jež provádí vznik výboje, průraz i přeskok jsou vždy doprovázeny poklesem napětí na elektrodách, nárůstem proudu a trvalým zhoršením izolačních vlastností materiálu v oblasti, kde došlo ke spojení vodivou cestou. V případě přeskoku jsou tyto zhoršené izolační vlastnosti pouze dočasné, u pevných látek při průrazu trvalé. Kritická úroveň elektrického napětí, při němž dojde k průrazu či přeskoku se nazývá průrazné napětí U_p. Pokud průrazné napětí přepočítáme na tloušťku daného izolantu, získáme vztah pro elektrickou pevnost.

$$E_p = \frac{U_p}{d} \tag{7}$$

kde E_p ... je elektrická pevnost [kV/mm]

U_p ... je průrazné napětí [kV]

d … je tloušťka izolantu [mm]

V homogenních elektrických polích elektrická pevnost představuje intenzitu elektrického pole, při níž dojde k průrazu. V nehomogenních polích lze srovnání různých materiálů provést pouze za předpokladu, že byla měření provedena za stejných podmínek, protože E_p je velmi závislá na teplotě, vlhkosti, frekvenci, tloušťce izolantu, druhu přiloženého napětí atd. [10,25]

3.2.4 Mez pevnosti v tahu

Mez pevnosti v tahu je jeden ze základních parametrů, který udává informace o mechanických vlastnostech materiálu a charakterizuje tak použitelnost materiálu jako izolantu v daném prostředí za daných podmínek. Mez pevnosti v tahu σ_M je definována jako maximální napětí v tahu působící na zkušební těleso během zkoušky.

$$\sigma_M = \frac{F_M}{A} \tag{8}$$

kde σ_M ... je mezní napětí v tahu [MPa]

F_M ... je maximální naměřená hodnota síly [N]

A … je plocha počátečního příčného průřezu zkušebního tělesa [mm^2] [25]

3.2.5 Stlačitelnost

Dalším parametrem popisujícím mechanické vlastnosti materiálu je stlačitelnost. Tu definuje tzv. jmenovité poměrné stlačení ε_c, které je stanoveno jako zkrácení délky zkušebního tělesa vztažené na původní délku zkušebního tělesa. ε_c je pak definováno z pohybu tlačných desek měřicího přístroje následovně:

$$\varepsilon_c = 100 \times \frac{\Delta L}{L} \tag{9}$$

kde ε_c ... je jmenovité poměrné stlačení [%]

ΔL … je zkrácení vzdálenosti mezi tlačnými deskami [mm]

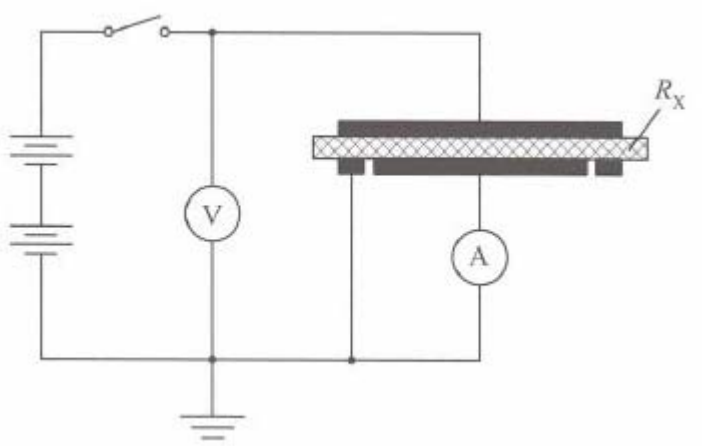
L ... je počáteční vzdálenost mezi tlačnými deskami [mm]

3.3 Zvolené metody měření

3.3.1 Měření vnitřní rezistivity

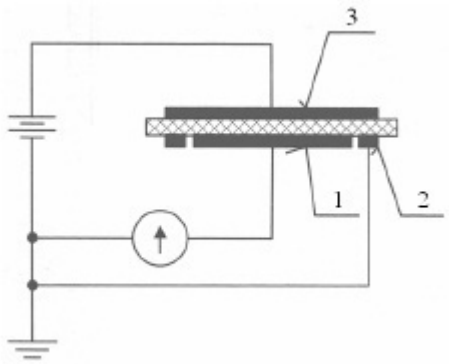
Mezi nejpoužívanější metody měření odporu patří voltampérmetrová metoda. Patří mezi metody přímé, které jsou založeny na současném měření stejnosměrného napětí připojeného na neznámý odpor a proudu, který tímto odporem protéká. Voltampérmetrová metoda, která je zobrazena na obrázku 15, je doporučena pro měření vnitřní i povrchové rezistivity. Použité napětí, jehož hladina byla při měření této diplomové práce 500 V, se měří stejnosměrným voltmetrem, proud měříme odpovídajícím přístrojem na měření proudu. Při měření byl použit

ELECTROMETER 6517A. Neznámý odpor R_x se vypočítá dle dříve zmíněného vzorce (3). [25]



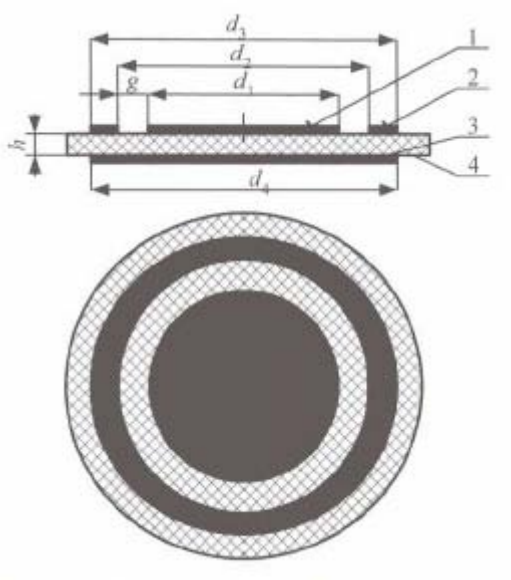
Obr. 15: Voltampérmetrová metoda pro měření odporu izolantů [25]

Pro možnost vzájemného porovnání materiálů mezi sebou vypočítáme vnitřní rezistivitu. Nejčastější elektrodové uspořádání a zapojení elektrod pro měření vnitřní rezistivity jsou zobrazeny níže na obrázku 16 a 17.



1 – chráněná (měrná) elektroda
2 – ochranná elektroda
3 – nechráněná (napěťová) elektroda

Obr. 16: Zapojení pro měření vnitřního odporu [25]



1 – chráněná (měrná) elektroda
2 – ochranná elektroda
3 – ochranná elektroda
4 – vzorek

Obr. 17: Elektrodové uspořádání pro měření vnitřního odporu [25]

Jelikož bylo při mém měření použito kruhové uspořádání elektrod přístroje RESISTIVITY TEST FIXTURE 8009, vypočítá se efektivní plocha elektrod A nutná pro výpočet vnitřní rezistivity ρ_v následovně:

$$A = \frac{\pi(d_1 + g)^2}{4} \qquad (10)$$

kde A ... je hodnota efektivní plochy měrné elektrody [m^2]
d_1 … je průměr měrné elektrody [m]
g … je velikost vzduchové mezery [m]

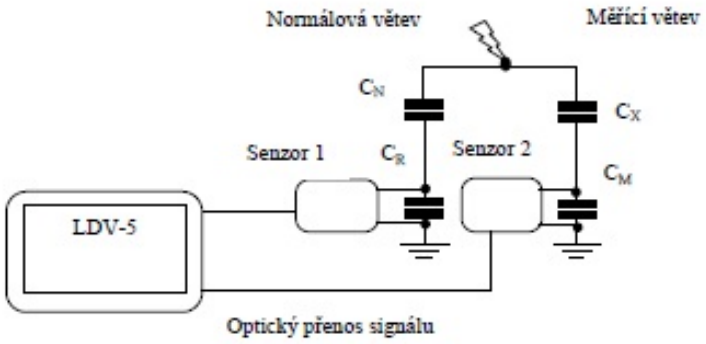
[25]

Efektivní plocha A je pak tedy vypočítána takto:

$$A = \frac{3{,}14(0{,}054 + 0{,}003175)^2}{4} = 0{,}002566\left[m^2\right]$$

3.3.2 Měření relativní permitivity

Principem měřicích metod v oblasti permitivity a dielektrických ztrát je určení prvků náhradního schématu dielektrika. Já jsem pro toto měření zvolila metodu automatického můstku, kdy jsem měření vyhodnocovala pomocí počítačového systému LDV-5. Jde o tříelektrodový systém TETTEX INSTRUMENTS 2914 a zdroj HIGH VOLT SYSTEM 22501. Můstek vychází z klasického principu Scheringova můstku, schéma je zobrazeno na obrázku 18.



Obr. 18: Zapojení automatického můstku LDV-5 [25]

Vysokonapěťový kondenzátor C_x představuje kapacitu zkoušeného objektu a je zapojen do série s nízkonapěťovou impedancí. S referenčním napětím, které je odvozeno z referenčního děliče skládajícího se ze sériového spojení normálového kondenzátoru C_N s další nízkonapěťovou impedancí, je porovnáván napěťový úbytek na nízkonapěťové části. Automatický můstek nemusí být oproti konvenčním můstkům zcela vyvážený, je to proto, že měří fázový úhel mezi dílčími napětími na nízkonapěťových impedancích. Tento princip nabízí zejména eliminaci chyb měření způsobených rozptylovými kapacitami. Získaná napětí jsou digitalizována senzory s bateriovým napájením a následně jsou digitalizované signály přenášeny optickými kabely do počítače, kde jsou zpracovány s použitím rychlé Fourierovy transformace. Takto je stanoven ztrátový činitel tg δ. Z dělícího poměru měřící větve se pak určuje C_x. [25, 28]

Výpočet relativní permitivity pak vychází ze vzorce (5).

$$\varepsilon_r = \frac{C * d}{S * \varepsilon_0} \tag{11}$$

kde ε_r … je relativní permitivita [-]

C … je kapacita kondenzátoru, jehož dielektrikem je uvažovaný izolant [F]

d … je vzdálenost elektrod [m]

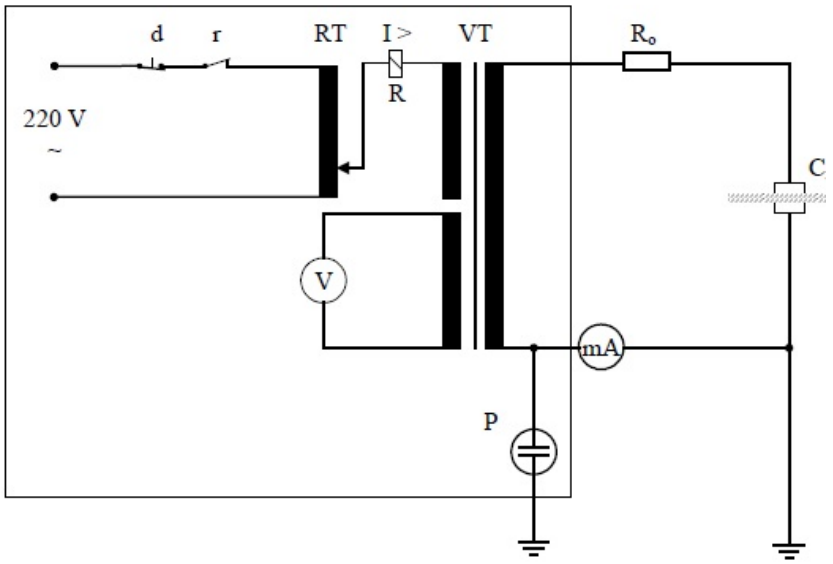
S … je plocha elektrod [m^2]

(v tomto případě 0,002 m^2)

ε_0 … je permitivita vakua [F/m]

3.3.3 Měření elektrické pevnosti

Elektrická pevnost byla měřena tzv. krátkodobou zkouškou s rychlým nárůstem napětí. Při tomto měření byly použity přístroje HIGH VOLTAGE SYSTEM SM4 Control module 22501, POWER MODULE LM30 a elektrodový systém zobrazený na obrázku 26 v příloze A. Schéma zapojení měření je zobrazeno na obrázku 19. Napětí je plynule zvyšováno od nuly až do hodnoty, kdy dojde k průrazu. Velikost nárůstu napětí se volí tak, aby došlo k průrazu mezi 10 a 20 sekundou od přiložení napětí. [25]



d – dveřní kontakt
R, r – nadproudé relé
R_0 – ochranný odpor
C_x – měřený vzorek
P – přepěťová ochrana
RT – regulační autotransformátor
VT – vysokonapěťový transformátor

Obr. 19: Schéma zapojení měření elektrické pevnosti [27]

3.3.4 Měření meze pevnosti v tahu

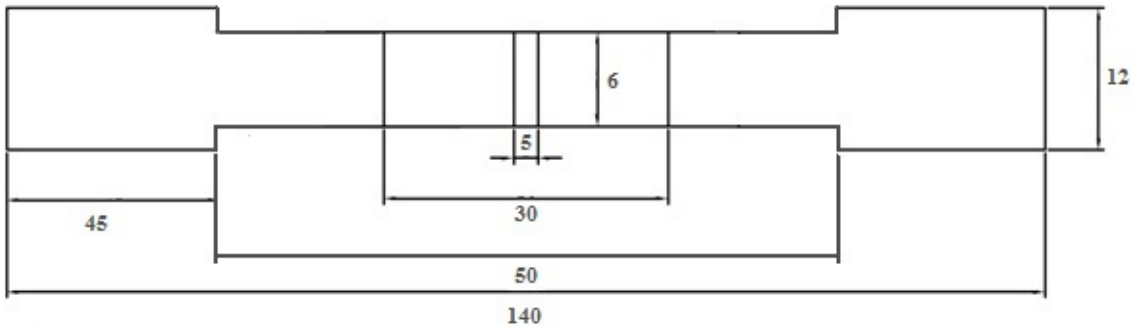
Zkouška spočívá v deformaci zkušební tyče tahovým zatížením, které přetrvává obvykle do lomu. Při zkoušce byl použit tahový zkušební stroj řízený počítačem Labor Tech typ LabTest 3.030. Čelisti pro upínání vzorků musí umožnit osové umístění a namáhání vzorků a musí zajistit, že vzorky nebudou vyklouzávat. Zkušební těleso nesmí být při zkoušce deformováno nebo krouceno. Mez pevnosti v tahu se vypočte dle vzorce (8). [25, 29]

3.3.5 Měření stlačitelnosti

Zkušební těleso je stlačováno mezi dvěma deskami stálou rychlostí do porušení nebo do okamžiku, kdy zatížení nebo zkrácení délky dosáhne definované hodnoty. Při měření této diplomové práce byla konstantní rychlost stlačování deskami 10 mm/s. Desky působí proti sobě silou, která je během zkoušky zaznamenávána do počítače. Z této síly se pak vypočítá jmenovité poměrné stlačení dle vzorce (9). Měření bylo provedeno na měřicím přístroji LaborTech, typ LabTest 3.100.

3.4 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky, na nichž byly měřeny vybrané elektrické a mechanické vlastnosti, vyrobila společnost REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. Pro každou zkoušku bylo zajištěno 10 zkušebních těles. Pro zkoušky elektroizolačních vlastností byly zajištěny vzorky o rozměrech 100 mm x 100 mm a tloušťce 5 mm. Pro měření mechanických vlastností pak byly vyrobeny dva druhy vzorků. Měření stlačitelnosti probíhalo na zkušebních vzorcích, které měly tvar destičky o rozměrech 50 mm x 50 mm a tloušťce 5 mm, pro měření pevnosti v tahu pak byly nařezány tyčinky, jejichž tvar je znázorněn na obrázku 20.



Obr. 20: Nákres zkušebního tělesa pro měření pevnosti v tahu

Pro porovnání mechanických a elektroizolačních vlastností původního a recyklovaného PVC byly vzorky nařezány vždy z recyklovaného kabelového PVC REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o a z desky původního měkčeného PVC od firmy Jaroslav Bažant – Plastic Port. Technický list původního PVC, z něhož je zakoupená deska vyrobena, je uveden v příloze B.

3.5 Provedená měření

Před samotným měřením bylo nutné vzorky nejprve označit, aby nedošlo k chybně vypočteným hodnotám vlivem promíchání vzorků. Dalším krokem bylo stanovení průměrné tloušťky každého vzorku, jež byla vypočtena z pěti hodnot tlouštěk, které byly naměřeny digitálním multimetrem v různých místech vzorku. Tabulka s tloušťkami je uvedena v příloze C. Všechna měření elektrických vlastností byla prováděna v laboratoři EL 403 Katedry technologií a měření, na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni, měření mechanických zkoušek probíhalo v laboratoři EL 409.

3.5.1 Vnitřní rezistivita

Jak vyplývá z kapitoly 3.3.1., použila jsem pro měření vnitřní rezistivity voltampérmetrovou metodu. Před samotným měřením byly vzorky uvedeny do dielektricky stabilního stavu tím, že byly minimálně na 15 minut v případě vzorků z recyklátu vloženy do zkratovacích knížek pro důkladné vybití povrchového a vnitřního náboje. Vzorky vyrobené z původního PVC byly ve zkratovacích knížkách po 3 dny před měřením. Označené vzorky pak byly vkládány do tříelektrodového systému KEITHLEY takovým způsobem, aby byl měřený vzorek co nejvíce ve středu měrné elektrody a aby s touto měl správný kontakt celým jejím povrchem. Problémy nastaly se vzorky z původního PVC, neboť deska, z níž byly vzorky pro měření nařezány, byla zaslána stočená v roli. I když pak byly destičky 3 dny zatížené, stále se ohýbaly a řádně tak nedosedaly na měrnou elektrodu. To značilo i otlačení ve tvaru kruhu na povrchu destičky po vyndání vzorku poté, co byl 10 minut v elektrodovém systému. Zřejmě tedy nebyla v tomto případě dostatečně využita celá efektivní plocha A, s níž je v rovnici (4) pro vnitřní rezistivitu počítáno. Elektrodový systém byl umístěn v hliníkové krabici, která byla po vložení vzorku do obvodu uzavřena víkem. Hliníková krabice plní funkci stínění, neboť je nutné při měření eliminovat účinek vnějších elektromagnetických polí, která by mohla zkreslovat údaje. Vstupní napětí bylo 500 V, absorpční proudy byly

vizuálně odečítány v 15., 60. a 600. sekundě od připojení napětí. Měření probíhalo při standardních podmínkách laboratoře – při teplotě 23 °C, vlhkosti 51 % a tlaku 97 kPa.

Naměřené a vypočtené hodnoty měření vnitřní rezistivity jsou uvedeny v příloze D. V tabulce 4 jsou pro srovnání uvedeny průměrné hodnoty polarizačních indexů, vnitřního odporu a vnitřní rezistivity u recyklátu a původního PVC.

Tab. 4: Průměrné hodnoty výsledků měření vnitřní rezistivity

	Recyklát	Původní PVC
Øh [m]	0,005567	0,005122
p_{i1} [-]	1,0329	0,9644
p_{i10} [-]	0,9611	0,9311
R_v [Ω]	1,098E+11	7,125E+09
ρ_v [Ω.m]	5,059E+10	3,565E+09

Během měření nebyly potvrzeny předpoklady, že zaznamenávaný absorpční proud bude po dobu měření u obou materiálů klesat. U recyklátu absorpční proud klesal zhruba do 60. vteřiny od připojení napětí, poté až do konce měření mírně stoupal, kdy v 600. vteřině znovu dosáhl hodnoty podobné hodnotě absorpčního proudu měřené v 15. vteřině od připojení napětí. V případě materiálu původního PVC hodnota absorpčního proudu rostla hned od začátku připojení napětí. Toto může být následkem nedokonalé přilnavosti materiálu na měrnou elektrodu, jak bylo již zmíněno. Výsledné hodnoty polarizačních indexů se tak u obou materiálů blíží jedné, což vypovídá o špatném stavu dielektrika, protože u materiálů, které jsou v dobrém izolačním stavu, polarizační index dosahuje hodnot 3 až 6. Lze tak říci, že recyklát, u kterého je předpokládán správný průběh zkoušky, obsahuje velký počet volných nosičů elektrického náboje, což nastává zejména u znečištěné izolace.

Hodnoty R_v a ρ_v vychází z naměřených absorpčních proudů, vidíme, že i výsledné hodnoty těchto parametrů vypovídají o tom, že je za daných podmínek měření recyklát lepší izolant než původní PVC. Do jaké míry za tento fakt ale může nesprávně doléhající materiál na elektrodu, se lze jen dotazovat. I přes tuto skutečnost je ale výsledná hodnota vnitřní rezistivity recyklátu nepříliš velká. Pro srovnání vnitřní rezistivita polyetylenu dle [14] je až 10^{14} Ω.m, na druhou stranu třeba fenoplasty mají ρ_v 10^9 Ω.m.

3.5.2 Relativní permitivita

Při tomto měření jsem měřila relativní permitivitu pomocí automatického můstku LDV-5. Stejné vzorky, které byly použity pro měření vnitřní rezistivity, byly nyní postupně upevňovány do elektrodového systému měrného kondenzátoru. Pomocí utahovacího zařízení se u každého vzorku docílilo kvalitního a stejného přilnutí zkušebního vzorku k elektrodám. Relativní permitivita byla počítána při napětí 500 V a frekvenci 50 Hz. Napětí bylo souvisle zvyšováno od nuly do zvolené hodnoty pomocí páky, vždy při dosažení 500 V byly výsledky zaneseny do počítače. U 9. vzorku z recyklátu R9 došlo k průrazu, hodnota napětí nedosáhla ani 500 V. Tento jev vyhodil celý systém a měření na zbylých vzorcích muselo být provedeno znovu. Po prozkoumání vzorku R9 bylo zjištěno, že v místě průrazu byla skrz celou tloušťku vzorku hliníková částice o velikosti 5 mm x 3 mm pozůstalá v recyklátu vlivem nedokonalé separace kovu a plastu při recyklaci kabelů. Měření probíhalo za teploty 21 °C, vlhkosti 49 % a tlaku 97,8 kPa.

Naměřené a vypočtené hodnoty měření relativní permitivity jsou uvedeny v příloze E. V tabulce 5 jsou pro srovnání uvedeny průměrné hodnoty relativní permitivity recyklátu a původního PVC.

Tab. 5: Průměrné hodnoty výsledků měření relativní permitivity

	Recyklát	Původní PVC
Ød [m]	0,005567	0,005122
ε_r [-]	4,89	5,92

Porovnáme-li vypočítané hodnoty relativní permitivity recyklátu a původního PVC, zjistíme, že recyklát má zhruba o jednotku menší ε_r než původní PVC.

3.5.3 Elektrická pevnost

Pro měření elektrické pevnosti jsem zvolila krátkodobou zkoušku s rychlým nárůstem napětí. Měření bylo prováděno při frekvenci 50 Hz, teploty 21 °C, vlhkosti 49 % a tlaku 97,8 kPa. Vzorky byly postupně vkládány do elektrodového systému, který byl ponořen v transformátorovém oleji pro zabránění přeskokům na povrchu zkušebního tělesa. Elektrodový systém se nacházel ve vysokonapěťovém prostoru měření, který byl oddělen uzemněnou klecí. Zkouška byla řízena z místa mimo ochrannou klec. Měřící přístroj souvisle

zvyšoval napětí, dokud nedošlo k průrazu. Každý zkušební vzorek byl měřen pouze jednou, vzorek R9, u kterého došlo v předcházejícím měření relativní permitivity k průrazu, znovu měřen nebyl a jako průrazné napětí je u tohoto vzorku uvedeno napětí 500 V.

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze F. V tabulce 6 jsou pro srovnání uvedeny průměrné hodnoty elektrické pevnosti recyklátu a původního PVC.

Tab. 6: Průměrné hodnoty výsledků měření elektrické pevnosti

	Recyklát	Původní PVC
Ød [mm]	5,567	5,122
U_p [kV]	44,435	51,123
E_p [kV.mm^{-1}]	7,985	9,982

Z výsledných hodnot je vidět, že vyšší průrazné napětí a tedy i elektrickou pevnost má původní PVC. U obou dvou materiálů jsem si mohla při měření všimnout, že hodnoty průrazných napětí mají velký rozptyl, to je způsobeno nehomogenitou materiálů. V případě recyklátu není o hodnotě elektrické pevnosti toto měření zcela vypovídající, neboť by byly výsledky zcela odlišné, kdyby byla u více vzorků vložena náhodně mezi elektrody ta část, kde by se nacházela kovová částice, jako se tomu stalo v případě vzorku R9. K nevypovídající hodnotě této zkoušky přispívá i fakt, že tloušťka vzorků není po celém povrchu stejná důsledkem toho, že zkušební vzorky byly broušeny z vyrobených podlahových desek. Tento fakt ovlivňoval všechny námi provedené zkoušky elektrických vlastností.

3.5.4 Zhodnocení elektrických vlastností

Výsledné hodnoty měřených elektrických vlastností budou nyní porovnány s hodnotami, které jsou uvedeny pro měkčený polyvinylchlorid v literatuře. Dle [6] je vnitřní rezistivita měkčeného PVC větší než 10^{11} Ω.m, z měření této diplomové práce vyšla vnitřní rezistivita recyklátu 5,059. 10^{10} Ω.m a vnitřní rezistivita původního PVC 3,565.10^{9} Ω.m. Výsledná hodnota vnitřní rezistivity původního PVC je zřejmě, jak již bylo zmíněno, následkem špatného dosedání vzorku na elektrodový systém při měření. Z porovnání hodnoty ρ_v uvedené v literatuře a výsledné hodnotyρ_v recyklátu lze usuzovat, že PVC má po recyklaci nejméně o jeden řád menší vnitřní rezistivitu, než jakou měl před recyklací. Relativní permitivita původního měkčeného PVC je při frekvenci 50 Hz dle [6] 4 až 8. Výsledná hodnota relativní

permitivity v této práci je pro recyklát 4,89 a pro původní PVC 5,92, což potvrzuje v obou případech hodnoty z literatury. Elektrická pevnost je pak dle [6] u měkčeného PVC 300 kV/cm až 400 kV/cm. Z měření této práce vyšla elektrická pevnost recyklátu 7,985 kV/mm, elektrická pevnost původního PVC pak vyšla 9,982 kV/mm. Je vidět, že hodnoty uvedené v literatuře se od naměřených liší, avšak např. dle [14] je elektrická pevnost měkčených polyvinylchloridů Neralit 11,1 kV/mm až 15,3 kV/mm podle typu Neralitu. Z toho vyplývá, že velmi záleží na typu měkčeného PVC.

3.5.5 Mez pevnosti v tahu

Mez pevnosti v tahu byla měřena za normálních podmínek laboratoře při teplotě 22,5 °C, vlhkosti 42 % a tlaku 98,6 kPa. Nejprve bylo nutné označit vzorky a změřit jejich rozměry. Mez pevnosti v tahu se vypočítává dle rovnice (8), multimetrem jsem tedy u každého vzorku změřila šířku a tloušťku zúžené části, z nichž jsem dále spočítala průřez. Poté jsem na každém vzorku vyznačila pracovní oblast, ve které bylo předpokládáno přetržení materiálu po dosažení meze pevnosti v tahu. Tato počáteční měřená délka byla 30 mm. Takto označené tyčinky se pak jedna po druhé upínaly mezi čelisti tahového zařízení, které bylo ovládáno počítačovým softwarem. Před započetím samotné zkoušky byly vždy do počítače zadány rozměry vzorku a počáteční měřená délka. Při měření byla na zkušební tělesa vyvíjena souvisle se zvyšující tahová síla, až do té doby, než systém vyhodnotil přetržení vzorku. Takto byla zkouška vyhodnocena u 12 vzorků vyrobených z recyklátu, u dvou z nich došlo však k přetržení mimo pracovní oblast, proto nejsou v našich tabulkách naměřených a vypočtených hodnot uvažovány. V případě vzorků z původního PVC bylo naměřeno 13 vzorků, u třech z nich ale došlo softwarem k chybnému indikování přetržení nebo ke špatnému uchycení mezi čelisti stroje, proto bylo vyhodnoceno 10 vzorků.

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze G. V příloze H jsou pak znázorněny křivky napětí / poměrné prodloužení vzorku recyklátu a vzorku původního PVC. V tabulce 7 jsou pro srovnání uvedeny průměrné hodnoty meze pevnosti v tahu recyklátu a původního PVC.

Tab. 7: Průměrné hodnoty výsledků měření meze pevnosti v tahu

	Recyklát	Původní PVC
ØA [mm^2]	26,97	28,28
ØF_M [N]	95,57	201,68
Øσ_M [MPa]	3,55	7,14

Z výsledků vidíme, že původní PVC má dvojnásobnou hodnotu meze pevnosti v tahu, než je mez pevnosti v tahu recyklátu, a sice 7,14 MPa. Ve firemních podkladech společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o., ze kterých vychází i tabulka 3 v kapitole 3.1.2., je uvedeno, že mez pevnosti v tahu recyklátu je 3,545 MPa. Toto tvrzení bylo měřením této diplomové práce potvrzeno.

3.5.6 Stlačitelnost

Poslední zkouškou, která byla provedena pro stanovení vlastností recyklátu a jeho porovnání s původním PVC, bylo měření stlačitelnosti. Toto měření probíhalo při standardních podmínkách laboratoře, a sice při teplotě 23 °C, vlhkosti 40 % a tlaku 97 kPa. Dle normy ČSN EN ISO 604 mají být zkušební tělesa při měření tlakových vlastností bez viditelných nedokonalostí, hrany a povrchy nesmí obsahovat prohlubeniny nebo vrypy a plochy, které jsou ve styku s tlačnými deskami, musí být s těmito rovnoběžné a kolmé k podélnému směru působící síly. Toto doporučení však nebylo dodrženo, neboť vzorky vyrobené z recyklátu měly na povrchu viditelné nedokonalosti a různé prohlubeniny, které jsou způsobeny povahou materiálu. Vzorky vyrobené z původního PVC měly sice rovnoběžné plochy bez viditelných nedokonalostí, avšak na hranách zkušebního tělesa se nacházely vrypy následkem nedokonalého nařezání vzorků. Všechna zkušební tělesa byla označena a změřeny byly jejich rozměry. Při prvních zkušebních měřeních bylo v softwaru zadáno jako ukončení zkoušky stlačení na 50 % počáteční délky zkušebního tělesa. Program však toto stlačení chybně detekoval, neboť po fyzickém změření tělesa multimetrem byla naměřena tloušťka jen o pár desetin milimetru menší, než byla tloušťka původní. Poté tedy bylo zkušební těleso vloženo mezi tlačné desky na výšku, avšak ani toto nebylo vyhovující, neboť vzorek při přiblížení tlačných desek vypadl. Nakonec byla zvolena varianta, kdy byla destička vložena mezi tlačné desky na plocho. Postup zkoušky byl nastaven tak, že po přiložení tlačných desek na těleso byla počítačem nastavena velikost tlačné síly 50 N – v tuto chvíli jsem měla 15 vteřin na změření vzdálenosti tlačných desek L mikrometrem. Následně se začaly desky dále přibližovat, až bylo dosaženo nastavené konečné hodnoty tlačné síly 50 000 N.

Po dosažení této síly jsem opět změřila vzdálenost tlačných desek a mohla jsem tak vypočítat zkrácení vzdálenosti tlačných desek ΔL. Aby bylo zaručeno působení síly rovnoměrně po celém povrchu vzorku, byla zkušební tělesa vložena mezi železné destičky, na které pak při měření působily silou tlačné desky. Tloušťka železných destiček pak byla při měření vzdálenosti tlačných desek odečítána. Před započetím samotné zkoušky byly vždy do počítače zadány rozměry vzorku. Četnost měření byla 10.

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze I. V tabulce 8 jsou pro srovnání uvedeny průměrné hodnoty jmenovitého poměrného stlačení recyklátu a původního PVC.

Tab. 8: Průměrné hodnoty výsledků měření stlačitelnosti

	Recyklát	Původní PVC
ØΔL [mm]	0,74	0,98
Øε_c [%]	13,46	19,79

Z měření vyšlo, že zkrácení vzdálenosti tlačných desek při zatížení 50 N a 50 kN je u recyklátu průměrně 0,74 mm. Tato hodnota pak odpovídá jmenovitému poměrnému stlačení 13,46 %. Původní PVC se stlačí při stejných hodnotách zatížení průměrně o 0,98 mm, čemuž odpovídá jmenovité poměrné stlačení 19,79 %. Původní PVC je tedy za daných podmínek o zhruba 6 % lépe stlačitelné než recyklát.

4 Využití recyklátu v elektrotechnice

4.1 Využití recyklovaného kabelového PVC REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o.

Hlavním posláním izolantu je vzájemně od sebe elektricky oddělit místa s různým elektrickým potenciálem. Plasty se v elektrotechnice užívají zejména díky této jejich vlastnosti - mají dobré izolační vlastnosti a toto poslání izolantů tak splňují dokonale. Jak ale vyplývá z výsledků měření recyklovaného kabelového PVC společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. uvedených v kapitole 3.5.4, je jasné, že přímé využití kabelového recyklátu v elektrotechnice jako prostředku k elektrickému oddělení míst s různým potenciálem není vzhledem k jeho elektroizolačním vlastnostem vhodné. Horší elektroizolační vlastnosti jsou následkem nedokonalé separace kovu od plastu v průběhu procesu recyklace kabelů, avšak otázkou i přesto zůstává, zda by bylo možné recyklát v elektrotechnice použít jako izolant v případě, že by separace kovu a plastu byla 100% úspěšná. Pravděpodobně ne, neboť recyklát zřejmě nikdy nedosáhne takových elektrických vlastností, jaké měl původní plast.

Z výše popsaného vychází, že pokud chceme využít recyklát v elektrotechnice, tak pak musíme uvažovat ty aplikace, kde nejsou prvotně důležité elektroizolační vlastnosti materiálu, ale vlastnosti mechanické. Ty jsou u recyklátu dobré a jsou dostačující k využití recyklovaného kabelového PVC jako mechanické ochrany kabelů, což do jisté míry využití v elektrotechnice bezesporu je. Recyklované kabelové PVC se tak využívá pro výrobu kabelových mostů nebo kabelových chrániček. Výrobou těchto komponent se zabývá mimo jiných firem zpracovávajících recyklované plasty i společnost REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. Kabelové mosty vyrobené z recyklovaného kabelového PVC slouží k ochraně kabelů, hadic a trubek, které jsou položeny přes vozovku nebo se nachází ve výrobních provozech. Mezi výhody těchto kabelových mostů patří jejich chemická odolnost, protiskluznost, stabilita, snadná údržba, nesnadná hořlavost a v neposlední řadě rychlá montáž a demontáž. Kabelová chránička pak slouží k mechanické ochraně zemních vysokonapěťových elektrických kabelů, sdělovacích kabelů a telekomunikačních kabelů vedených pod zemí. Vedle výhod, které jsou uvedeny u kabelového mostu, je bezesporu velkou výhodou kabelové chráničky společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. i to, že je zcela bezúdržbová. Kabelová chránička se skládá ze spodního dílu a víka, výrobek je navržen tak, aby jeho aplikace v zemním výkopu byla co nejsnazší a přitom byly zachovány

požadované technické vlastnosti, kdy největším požadavkem, co se týče mechanických vlastností, je odolnost kabelové chráničky vůči zatížení od zeminy a provozního zatížení. I další požadavky na nehořlavost a vyluhovatelnost materiálu, ze kterého je kabelová chránička vyrobena, recyklované kabelové PVC splňuje. [22, 23]

Obr. 21: Kabelový most (265+266) [22]

Obr. 22: Kabelová chránička (277+278) [22]

Nepřímým využitím kabelového recyklátu v elektrotechnice je využití pontonových desek, které jako jeden z mnoha zákazníků společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. využívá společnost ČEZ, a.s., jež je výhradním poskytovatelem elektrické energie v České republice. Pontonové terénní desky jsou odolné, opakovaně použitelné, určené pro vytvoření stabilních ploch v nezpevněném terénu. Jsou to vysokozátěžové, protiskluzové desky s nosností 1000 t/m^2. ČEZ, a.s. používá tyto desky pro vytvoření provizorních přístupových komunikací v terénech pro těžkou techniku např. v případě, že je nutné někde opravit sloup elektrického vedení. [23]

4.2 Další využití recyklátů

Recyklované plasty obecně lze využít v mnoha oborech, lze říci, že v určitých místech uplatnění nahrazují dřevo a beton. Je tomu zejména proto, že recyklované plasty jsou odolné vůči povětrnostním vlivům, hnilobě, plísním a běžným chemikáliím. Jsou lehké, snesou velké zatížení, nenavlhají a mají velmi dlouhou životnost, bez toho aniž by byla nějak náročná jejich údržba. Recyklované plasty se používají pro výrobu obrubníků, záhonových chodníků, plotů, teras, zábradlí, schodů, přepravních palet, zahradního nábytku a mnohých dalších výrobků. Např. společnost Capacco, spol. s.r.o. je výrobcem střešních krytin, které jsou

vyrobeny z recyklovaného plastu kabelových izolací. Jedná se o měkčené PVC s nepatrnou příměsí jiných termoplastů a zbytky kovu a pryže, které nejsou v tomto případě uplatnění na závadu. Hlavním požadavkem totiž je, aby materiál zabránil průniku tekoucí vody, což tento recyklát splňuje. Recyklované PVC nachází také uplatnění ve výrobě PVC oken, kde se uvnitř profilů nachází recyklované PVC jádro a na povrchu čisté PVC. Touto technologií vyrábí okna např. firma DECRO BZENEC, spol. s.r.o.. Jiným směrem, kterým se z pohledu aplikovatelnosti recyklovaných plastů lze ubírat, se vydala firma RESINEX Czech republic s.r.o. Tato firma dodává na trh mnoho typů plastů, mimo jiné skupinu konstrukčních plastů v průmyslové kvalitě vyráběných jejich mateřskou firmou RAVAGO. Plasty v průmyslové kvalitě jsou svými vlastnostmi blíže k materiálům první kvality a přitom nabízejí výrazně nižší cenu. Jsou vhodné pro aplikace, které jsou náročné na technické vlastnosti a nenáročné na vzhled, jsou tak stále více využívány v automobilovém průmyslu. Materiály prochází přísným testováním vlastností, které jsou u každé šarže dokládány materiálovým atestem. Mezi materiály průmyslové kvality firmy RAVAGO patří materiál, který se nazývá Ravamid ® AB K, jedná se o polyamid 66, ve kterém je v malé míře obsažený i recyklovaný plast. Tento materiál se používá pro výrobu částí elektrického nářadí, držáků kabelů, krytů kol automobilů, krytů motorů Audi a schválen je taktéž pro aplikace ve vozech koncernu PSA Peugeot Citroën. Dle vyjádření firmy RESINEX Czech republic s.r.o. se průmyslová kvalita (natož recykláty) pro aplikace v elektrotechnickém průmyslu nedoporučují, neboť jsou v tomto oboru kladeny vysoké požadavky na vlastnosti materiálu (materiály např. musí obsahovat retardéry hoření), které průmyslová kvalita nesplňuje. [30, 31, 32]

4.3 Jak zlepšit elektrické vlastnosti recyklátu?

Jak již bylo řečeno, hlavním důvodem, proč nelze recyklát v elektrotechnice jako izolant použít, je, že v něm zůstává vlivem nedokonalé recyklace kabelů velké množství hliníkových nebo měděných částic. Ty pak způsobují zhoršení elektroizolačních vlastností recyklátu. Pokud by se tedy zlepšila účinnost recyklace kabelů, lze předpokládat, že by se zlepšily také elektroizolační vlastnosti recyklátu a ten by následně bylo možné využít v elektrotechnice v mnohem větší míře než v současné době.

Firma RECYKLO, spol. s.r.o., která obstarává drť recyklovaného kabelového PVC společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o., využívá pro recyklaci kabelů elektrostatický separátor, jehož princip je podrobně popsán v kapitole 2.6. Jinou možností jak recyklovat kabely by pak mohlo být využití Separátoru neželezných kovů. Ten funguje na principu

různého působení vířivých proudů na materiály s různou elektrickou vodivostí. Rozdrcené kabely jsou pásem dopravovány k rotujícímu magnetickému indukčnímu válci, který je složený z mnoha střídajících se magnetických pólů. Rotující indukční válec vytváří rychle se měnící magnetické pole, které vytváří vířivé proudy v kovových částicích obsažených v kabelové drti. Ty jsou následně vymršťovány pryč, neboť vířivé proudy působí proti příčině, která je vyvolala a vznikají tak odpudivé síly mezi kovem a nejbližším magnetickým pólem indukčního rotoru. Plastové částice jsou ovlivňovány magnetickým polem rotoru jen velmi málo nebo vůbec, a proto padají působením gravitace směrem dolů na konci dopravníku. Dalším způsobem recyklace kabelů může být využití vzduchového separátoru, který je propojen s nožovým mlýnem. Po vhození kabelů do násypky a následném semletí padá drť směsi kovu a plastu na separační stůl vlivem gravitace. Díky systému vibrujícího stolu a proudícího vzduchu je dosaženo na separačním stole k oddělení mědi nebo hliníku od plastu. Vytříděný kov vystupuje pak ze stroje na pravé straně a plastová frakce na straně levé. [33, 34]

Oba popsané způsoby recyklace kabelů jsou však taktéž jako elektrostatický separátor založeny na drcení celých kabelů a následném oddělování kovu od plastu. Jinou možností a lze předpokládat, že účinnější, by bylo, kdyby na začátku procesu recyklace kabelů byl kov od plastu zcela oddělen ještě před drcením. Za využití páračky kabelů by tak byl kabel nejdříve podélně párán, následně by se oddělili jednotlivé části kabelu a teprve pak by byla izolace drcena. Tímto řešením by bylo docíleno naprostého oddělení izolantu od kovu a recyklát by tak byl stoprocentně čistou surovinou. Tento způsob využívá v současné době firma RECYKLO, spol. s.r.o. pouze u velkých kabelů, které nemá smysl drtit, neboť obsahují velký podíl kovu a drcení a následná separace by byla neefektivní. Pro zlepšení elektroizolačních vlastností recyklátu by tedy bylo zapotřebí uplatňovat tuto metodu u všech kabelů.

Závěr

V elektrotechnice jsou plasty využívány zejména pro jejich dobré elektroizolační vlastnosti, plasty slouží jako prostředky pro elektrické oddělení míst s různým elektrickým potenciálem. Z výsledků měření recyklovaného kabelového PVC společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o. však vyplývá, že přímé využití kabelového recyklátu jakožto izolantu není v elektrotechnice vhodné. Zhoršené elektroizolační vlastnosti jsou zejména způsobeny nedokonalou separací kovu od plastu během recyklace kabelů, neboť v recyklátu zůstává velké množství kovových částic.

Z měření byla vyhodnocena vnitřní rezistivita recyklátu $5{,}059.10^{10}$ Ω.m, stejný parametr původního PVC vyšel $3{,}565.10^{9}$ Ω.m. Srovnáme-li tyto výsledky s hodnotami z literatury, kde je uvedena vnitřní rezistivita měkčeného PVC větší než 10^{11} Ω.m, můžeme usuzovat, že po recyklaci se vnitřní rezistivita PVC zhoršila nejméně o jeden řád. Výsledná hodnota vnitřní rezistivity původního PVC vyšla navzdory předpokladům menší než vnitřní rezistivita recyklátu. Tato skutečnost byla způsobena nepřesným a neodpovídajícím měřením, kdy zkušební vzorky z původního PVC nedosedaly řádně na elektrodový systém. To bylo důsledkem špatného dodání materiálu, neboť ten byl zaslán v roli. Vzorky nařezané z tohoto materiálu se pak i po třídenním zatížení stále ohýbaly. Z časových a finančních důvodů nemohl být zakoupen pro účely měření jiný materiál. Další měření bylo provedeno na stanovení relativní permitivity. Z měření vyplývá, že relativní permitivita recyklátu je za normálních podmínek 4,89, původního PVC pak 5,92. V tabulkách vlastností měkčeného PVC je uvedena relativní permitivita 4 až 8, můžeme tedy předpokládat, že recyklace má na hodnotu relativní permitivity PVC pouze malý vliv. Z posledního měření elektrických vlastností byla stanovena elektrická pevnost recyklátu 7,985 kV/mm, původní PVC má pak elektrickou pevnost 9,982 kV/mm. Literatura a tabulky se v hodnotách elektrické pevnosti měkčeného PVC rozcházejí, dle [6] je E_p měkčeného PVC 300 kV/cm až 400 kV/cm, [14] pak udává 11,1 kV/mm až 15,3 kV/mm. Je jasné, že recyklát má horší elektrickou pevnost kvůli tomu, že jsou v něm obsaženy kovové částice pozůstalé ve struktuře recyklátu vlivem nedokonalé separace kovu od plastu během recyklace kabelů.

Pro praktické využití recyklátu v elektrotechnice nemůžeme uvažovat pouze elektrické vlastnosti materiálu, ale musíme brát v úvahu jak elektrické, tak mechanické vlastnosti. Mez pevnosti v tahu recyklátu vyšla z provedeného měření 3,55 MPa, původní PVC má mez pevnosti v tahu dvojnásobnou, a sice 7,14 MPa. Stlačitelnost je pak u recyklátu 13,46 %, u původního PVC 19,79 %. Z naměřených a vypočtených výsledků zkoušek mechanických

vlastností lze předpokládat, že by recyklát mohl být vhodný pro výrobu mechanické ochrany kabelů ve formě kabelového mostu či kabelové chráničky, kde se také používá.

Recykláty je jistě možné uplatnit v mnohých odvětvích, lze z nich vyrobit velké množství užitečných výrobků, avšak pro aplikace v elektrotechnickém průmyslu jako izolantu, kde jsou veškeré vlastnosti materiálů přísně hlídané normami, nejsou recykláty kvůli různorodým vlastnostem plastových odpadů vhodné a nelze je tak doporučit. V případě recyklovaného kabelového PVC by jistě došlo ke zlepšení elektroizolačních vlastností, pokud by bylo dosaženo 100% úspěšnosti separace kovu od plastu během recyklace kabelů. Pokud by se nejdříve na páracím stroji a následně ručně separovaly jednotlivé části kabelu a teprve poté by byla izolace drcena, získal by se čistý recyklát bez nejmenšího kousku kovu, jehož elektrické vlastnosti by byly jistě lepší, než jsou elektrické vlastnosti recyklátu získaného současnou technologií recyklace. Tyto předpoklady dávají prostor pro zpracování jiné diplomové práce, stejně tak by mohly být prostudovány další způsoby získávání PVC recyklací jiných výrobků, než kabelů, kdy by mohla být porovnána kvalita recyklátu získaného recyklací odlišných výrobků.

Použitá literatura

[1] - <http://www.prakab.cz/fileadmin/content/prakab/Vyrobky/PRAKAB_Katalog_produktu_2009-2010.pdf> [cit. 17. listopadu 2011]

[2] - <http://blog.pasivnistavba.cz/elektromagneticke-pole-ii/ > [citováno 17. listopadu 2011]

[3] - BOČEK, Václav. *Výrobní a technologické procesy*.(přednáška) Plzeň: ZČU, 12. 11. 2009

[4] - MENCLOVÁ, Monika. *Polymery užívané v silnoproudé elektrotechnice*. Plzeň, 2010. 50 s. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, KET.

[5] - DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha:Vydavatelství VŠCHT Praha, 2005. 354 s.

[6] - MLEZIVA, J.; ŠŇUPÁREK, J. *Polymery výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles, 2000. 544 s.

[7] - HASSDENTEUFEL, Josef; KVĚT, Karel. *Elektrotechnické materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1967. 860 s.

[8] - <http://www.petroleum.cz/vyrobky/polypropylen.aspx> [cit. 26. listopadu 2011]

[9] - <http://www.encables.cz/data/elektricke-kabely-obecne.pdf> [cit. 26. listopadu 2011]

[10] - KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2002. 174 s.

[11] - <http://vyuka.fel.zcu.cz/ket/mse/Prednasky/10.%20prednaska%20MSE.pdf> [cit. 3. prosince 2011]

[12] - <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-978-80-7080-662-3/pdf/178.pdf> [cit. 3. prosince 2011]

[13] - <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/06.htm#063> [cit. 3. prosince 2011]

[14] - ŠKEŘÍK, Jan. *Plasty v elektrotechnice a elektronice*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1991, 516 s.

[15] - KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999, 203 s.

[16] - KUDLÁČEK, Ivan. *Ekologie průmyslu*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997, 209 s.

[17] - <http://etext.czu.cz/img/skripta/64/tf_43d-1.pdf> [cit. 4. února 2012]

[18] - <http://www.ucitsnadno.cz/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=117&category_id=12&option=com_virtuemart&Itemid=64> [cit. 4. února 2012]

[19] - DUCHÁČEK, V.; HRDLIČKA, J. *Gumárenské suroviny a jejich zpracování*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2009, 199 s.

[20] - < http://www.arcon-environmental.cz/applications/42/> [cit. 10. února 2012]

[21] - < http://users.fs.cvut.cz/~jiroutom/vyuka/hmz/hmz16_rv.pdf> [cit. 11. února 2012]

[22] – < http://www.replast-plzen.cz/> [cit. 25. února 2012]

[23] – Firemní podklady společnosti REPLAST PRODUKT, spol. s.r.o.

[24] - KURAŠ, Mečislav. *Odpady, jejich využití a zneškodňování*. Praha: ČEÚ pro VŠCHT, 1994, 243 s.

[25] - MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha : Nakladatelství BEN - technická literatura, 2006. 240 s.

[26] - ČSN EN ISO 604. *Plasty - Stanovení tlakových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

[27] - <http://vyuka.fel.zcu.cz/ket/mse/Cviceni/07%20uloha%20-%20Elektrick%e1%20pevnost.pdf> [cit. 22. dubna 2012]

[28] - MALÝ, Roman. *Porovnání variant dvousložkových kompozitů aplikovatelných v elektrotechnickém opravárenství*. Plzeň, 2011. 115 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, KET.

[29] - ČSN EN 10002-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty*. Praha: Český normalizační institut, 2002.

[30] - <http://www.recyklace.cz/cs/produkty/> [cit. 26. dubna 2012]

[31] - <http://www.decrobzenec.com/technologie.html> [cit. 26. dubna 2012]

[32] - Firemní podklady společnosti RESINEX Czech republic s.r.o.

[33] - <http://www.magnety.sk/cz/magneticke-separatory/separatory-nezeleznych-kovu/> [cit. 3. května 2012]

[34] - < http://www.vlcektrade.com/20101011110/Easy-180-elekricke-kabely.html> [cit. 3. května 2012]

Seznam příloh

Příloha A: Fotodokumentace

Příloha B: Technický list měkčeného PVC NORMAL

Příloha C: Tabulky tlouštěk zkušebních vzorků pro měření elektrických vlastností

Příloha D: Výsledky měření vnitřní rezistivity

Příloha E: Výsledky měření relativní permitivity

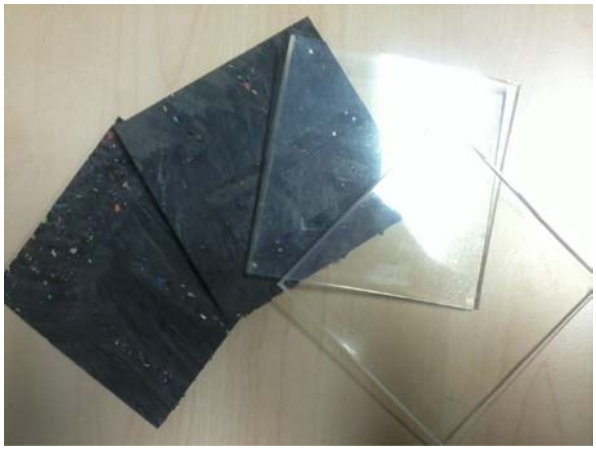
Příloha F: Výsledky měření elektrické pevnosti

Příloha G: Výsledky měření meze pevnosti v tahu

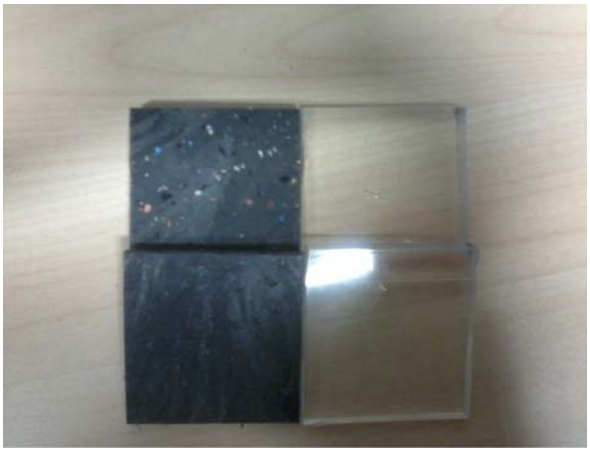
Příloha H: Křivky napětí / poměrné prodloužení z měření pevnosti v tahu

Příloha I: Výsledky měření stlačitelnosti

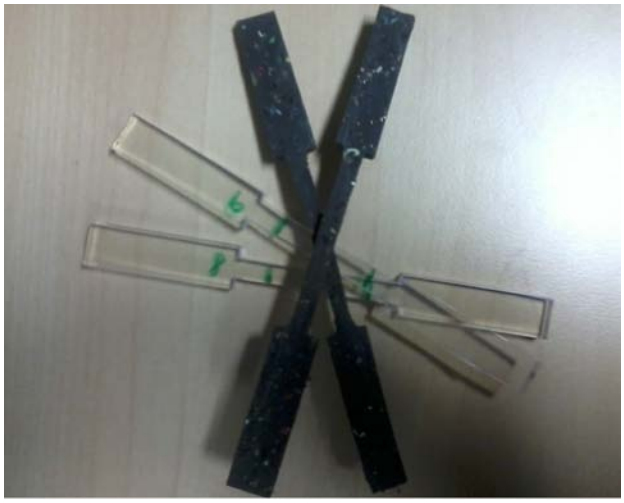
Příloha A: Fotodokumentace



Obr. 23: Zkušební vzorky pro měření elektrických vlastností



Obr. 24: Zkušební vzorky pro měření stlačitelnosti



Obr. 25: Zkušební vzorky pro měření meze pevnosti v tahu

Obr. 26: Elektrodový systém pro měření elektrické pevnosti

Obr. 27: Přístroje Labor Tech pro měření stlačitelnosti a meze pevnosti v tahu

Příloha B: Technický list měkčeného PVC NORMAL

TECHNICKÝ LIST MĚKČENÉHO PVC NORMAL			
CHARAKTERISTIKA	**NORMA**	**JEDNOTKA**	**ÚDAJ**
Specifická váha	DIN 53479	g/cm^3	cca 1,22
Stupeň tvrdosti	DIN 53505	Shore	cca 75
Pevnost v tahu	DIN 53455/5/VII	N/mm^2	> 15
Pevnost v protažení		%	> 300
Průvěs zatížením	40 N/50 mm po 6 týdnech	%	3
Zkouška v trhu	DIN 53356	N	cca 300
*Laboratorní zkouška		^oC	-30
Pružnost 60 ^{o} C	DIN 53457	N/mm^2	až 2,6
40 ^{o} C			až 4,5
0 ^{o} C			až 8
0 ^{o} C			až 26
-20 ^{o} C			až 165
-40 ^{o} C			až 850
Odpor	DIN 53482		10^{10}
Tepelná vodivost	DIN 53612	W/K.m	0,16
Absorbce vody (při 23 ^{o}C za 4 dny)	DIN 53495	%	0,08
Propustnost světla		%	85
Odolnost povětrnostním vlivům	DIN 53389 XENON 450	změna po 2000 hodinách užití není zřetelná	
Odolnost vůči ohni	DIN 4102		B 2
Hořlavost	US-FMV SS 302		nehořlavé
Tlumení zvuku	DIN 52210	dB	30
*Laboratorní zkouška = jde o odolnost materiálu bez změn vlastností, tzv. zkouška pevnosti při pádu kuličky při určitých teplotách			
Všechny uvedené vlastnosti udává výrobce pro materiál tl. 7 mm při zkušební teplotě 23 ^{o}C. Měkčené PVC si je zachovává beze změny v teplotním rozmezí od -10 ^{o}C do + 40 ^{o}C.			

Příloha C: Tabulky tlouštěk zkušebních vzorků pro měření elektrických vlastností

Příloha C, Tab. 9: Tloušťky zkušebních vzorků z recyklátu pro měření elektrických vlastností

vzorek	h1 [m]	h2 [m]	h3 [m]	h4 [m]	h5 [m]	Øh [m]
R1	0,005401	0,005607	0,005627	0,005545	0,005582	0,005552
R2	0,005424	0,005261	0,005412	0,005296	0,005314	0,005341
R3	0,005591	0,005833	0,005720	0,005776	0,005535	0,005691
R4	0,005744	0,005790	0,005524	0,005603	0,005721	0,005676
R5	0,005781	0,005749	0,005809	0,005789	0,005733	0,005772
R6	0,005333	0,005530	0,005543	0,005456	0,005411	0,005455
R7	0,005586	0,005360	0,005826	0,005338	0,005884	0,005599
R8	0,005734	0,005252	0,005781	0,005508	0,005590	0,005573
R9	0,005471	0,005516	0,005504	0,005483	0,005566	0,005508
R10	0,005609	0,005342	0,005553	0,005515	0,005490	0,005502

Příloha C, Tab. 10: Tloušťky zkušebních vzorků z původního PVC pro měření elektrických vlastností

vzorek	h1 [m]	h2 [m]	h3 [m]	h4 [m]	h5 [m]	Øh [m]
P1	0,005119	0,005097	0,005030	0,005089	0,005123	0,005092
P2	0,005021	0,005079	0,005094	0,005108	0,005077	0,005076
P3	0,005199	0,005165	0,005218	0,005133	0,005200	0,005183
P4	0,005093	0,005080	0,005072	0,005083	0,005104	0,005086
P5	0,005088	0,005115	0,005175	0,005162	0,005129	0,005134
P6	0,005200	0,005226	0,005256	0,005234	0,005270	0,005237
P7	0,004954	0,005045	0,005066	0,005021	0,005042	0,005026
P8	0,005149	0,005107	0,005129	0,005117	0,005135	0,005127
P9	0,005095	0,005098	0,005061	0,005076	0,005091	0,005084
P10	0,005174	0,005183	0,005171	0,005160	0,005186	0,005175

Příloha D: Výsledky měření vnitřní rezistivity

Příloha D, Tab. 11: Naměřené a vypočtené hodnoty z měření vnitřní rezistivity - recyklát

vzorek	Øh [m]	i_{15} [nA]	i_{60} [nA]	i_{600} [nA]	p_{i1} [-]	p_{i10} [-]	R_v [Ω]	ρ_v [Ω.m]
R1	0,005552	5,4813	5,3824	5,4778	1,0184	0,9826	9,128E+10	4,219E+10
R2	0,005341	4,6241	4,3804	4,6632	1,0556	0,9394	1,072E+11	5,151E+10
R3	0,005691	4,0651	3,7391	3,8250	1,0872	0,9775	1,307E+11	5,894E+10
R4	0,005676	4,2218	4,0332	4,2174	1,0468	0,9563	1,186E+11	5,360E+10
R5	0,005772	5,7132	5,7068	5,9580	1,0011	0,9578	8,392E+10	3,731E+10
R6	0,005455	4,9012	4,7109	4,9207	1,0404	0,9574	1,016E+11	4,780E+10
R7	0,005599	3,0732	2,9454	3,0443	1,0434	0,9675	1,642E+11	7,528E+10
R8	0,005573	4,6651	4,5143	4,5637	1,0334	0,9892	1,096E+11	5,045E+10
R9	0,005508	4,7824	4,7238	5,0707	1,0124	0,9316	9,861E+10	4,594E+10
R10	0,005502	5,1256	5,1753	5,4372	0,9904	0,9518	9,196E+10	4,289E+10

Příloha D, Tab. 12: Naměřené a vypočtené hodnoty z měření vnitřní rezistivity - původní PVC

vzorek	Øh [m]	i_{15} [nA]	i_{60} [nA]	i_{600} [nA]	p_{i1} [-]	p_{i10} [-]	R_v [Ω]	ρ_v [Ω.m]
P1	0,005092	74,236	76,221	80,284	0,9740	0,9494	6,228E+09	3,139E+09
P2	0,005076	71,643	75,392	82,678	0,9503	0,9119	6,048E+09	3,057E+09
P3	0,005183	39,732	41,189	44,089	0,9646	0,9342	1,134E+10	5,615E+09
P4	0,005086	74,869	77,382	82,292	0,9675	0,9403	6,076E+09	3,065E+09
P5	0,005134	73,143	75,707	81,416	0,9661	0,9299	6,141E+09	3,070E+09
P6	0,005237	48,098	49,572	53,521	0,9703	0,9262	9,342E+09	4,578E+09
P7	0,005026	59,783	61,844	66,771	0,9667	0,9262	7,488E+09	3,824E+09
P8	0,005127	70,078	73,419	79,236	0,9545	0,9266	6,310E+09	3,158E+09
P9	0,005084	72,525	75,667	83,032	0,9585	0,9113	6,022E+09	3,039E+09
P10	0,005175	74,156	76,343	79,912	0,9714	0,9553	6,257E+09	3,103E+09

Příloha E: Výsledky měření relativní permitivity

Příloha E, Tab. 13: Naměřené a vypočtené hodnoty z měření relativní permitivity – recyklát

vzorek	Ød [m]	U [V]	f [Hz]	C_x [F]	ε_r [-]
R1	0,005552	500,43	49,99	1,5464E-11	4,849
R2	0,005341	500,92	50,00	1,6308E-11	4,919
R3	0,005691	499,95	50,00	1,5279E-11	4,910
R4	0,005676	500,25	50,01	1,4870E-11	4,767
R5	0,005772	499,85	49,99	1,5309E-11	4,990
R6	0,005455	499,99	49,98	1,6240E-11	5,002
R7	0,005599	500,29	50,00	1,5481E-11	4,895
R8	0,005573	500,04	50,00	1,5214E-11	4,788
R9	0,005508				
R10	0,005502	500,24	50,01	1,5759E-11	4,896

Příloha E, Tab. 14: Naměřené a vypočtené hodnoty z měření relativní permitivity - původní PVC

vzorek	Ød [m]	U [V]	f [Hz]	C_x [F]	ε_r [-]
P1	0,005092	500,94	50,01	2,3263E-11	6,689
P2	0,005076	501,33	50,00	2,3042E-11	6,605
P3	0,005183	500,41	50,01	2,2224E-11	6,505
P4	0,005086	501,35	50,00	2,3297E-11	6,692
P5	0,005134	499,93	50,00	2,3033E-11	6,677
P6	0,005237	500,55	50,01	2,1708E-11	6,420
P7	0,005026	499,95	50,00	2,2500E-11	6,385
P8	0,005127	500,23	49,99	2,1925E-11	6,348
P9	0,005084	501,11	49,98	2,2790E-11	6,543
P10	0,005175	500,20	50,02	1,2650E-12	0,370

Příloha F: Výsledky měření elektrické pevnosti

Příloha F, Tab. 15: Naměřené a vypočtené hodnoty z měření elektrické pevnosti – recyklát

vzorek	Ød [mm]	U_p [kV]	E_p [kV.mm^{-1}]
R1	5,552	51,840	9,337
R2	5,341	61,470	11,509
R3	5,691	49,070	8,622
R4	5,676	59,350	10,456
R5	5,772	43,530	7,542
R6	5,455	52,900	9,698
R7	5,599	39,100	6,983
R8	5,573	53,650	9,627
R9	5,508	0,500	0,091
R10	5,502	32,940	5,987

Příloha F, Tab. 16: Naměřené a vypočtené hodnoty z měření elektrické pevnosti - původní PVC

vzorek	Ød [m]	U_p [kV]	E_p [kV.mm^{-1}]
P1	5,092	44,800	8,798
P2	5,076	61,280	12,072
P3	5,183	53,210	10,266
P4	5,086	54,830	10,781
P5	5,134	54,890	10,691
P6	5,237	49,640	9,479
P7	5,026	45,910	9,135
P8	5,127	51,250	9,996
P9	5,084	48,070	9,455
P10	5,175	47,350	9,150

Příloha G: Výsledky měření meze pevnosti v tahu

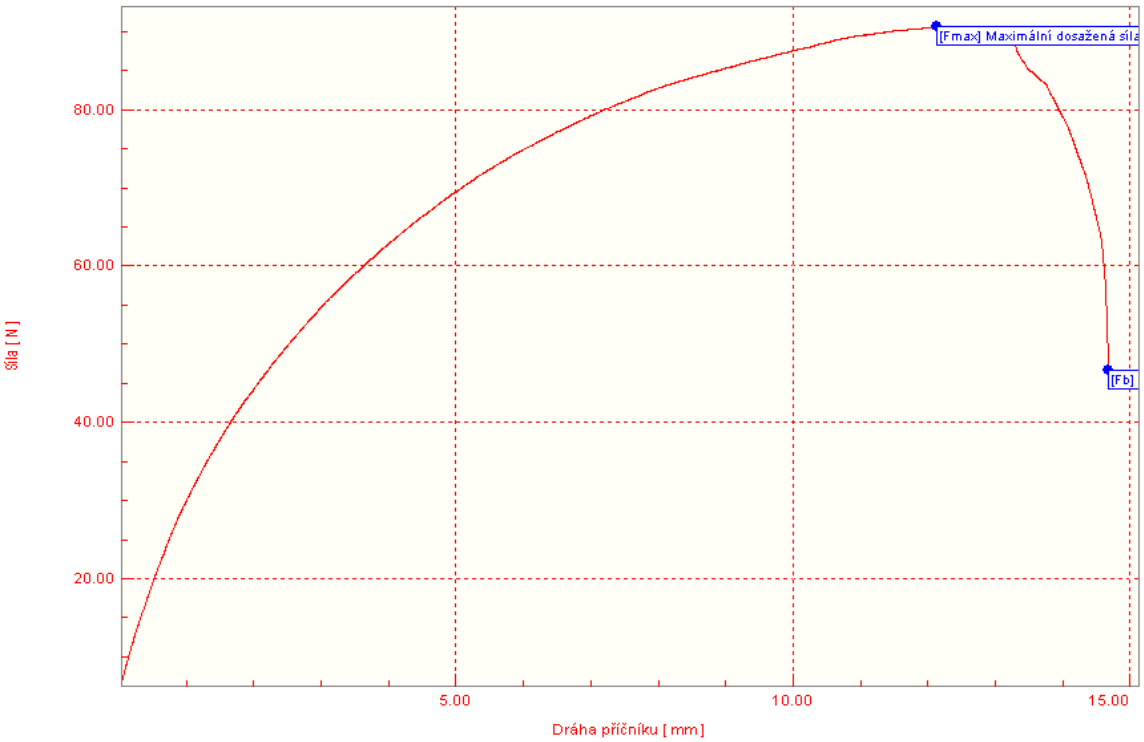
Příloha G, Tab. 17: Naměřené a vypočtené hodnoty z měření meze pevnosti v tahu – recyklát

vzorek	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	F_M [N]	σ_M [MPa]
R1	5,25	5,18	27,20	98,42	3,62
R2	5,58	5,15	28,74	110,61	3,85
R3	5,28	5,12	27,03	76,35	2,82
R4	5,30	5,10	27,03	93,58	3,46
R5	5,27	4,94	26,03	98,75	3,79
R6	5,15	4,95	25,49	92,36	3,62
R7	5,48	4,93	27,02	95,16	3,52
R8	5,35	5,05	27,02	95,46	3,53
R9	5,45	5,13	27,96	90,55	3,24
R10	5,35	4,90	26,22	104,48	3,99

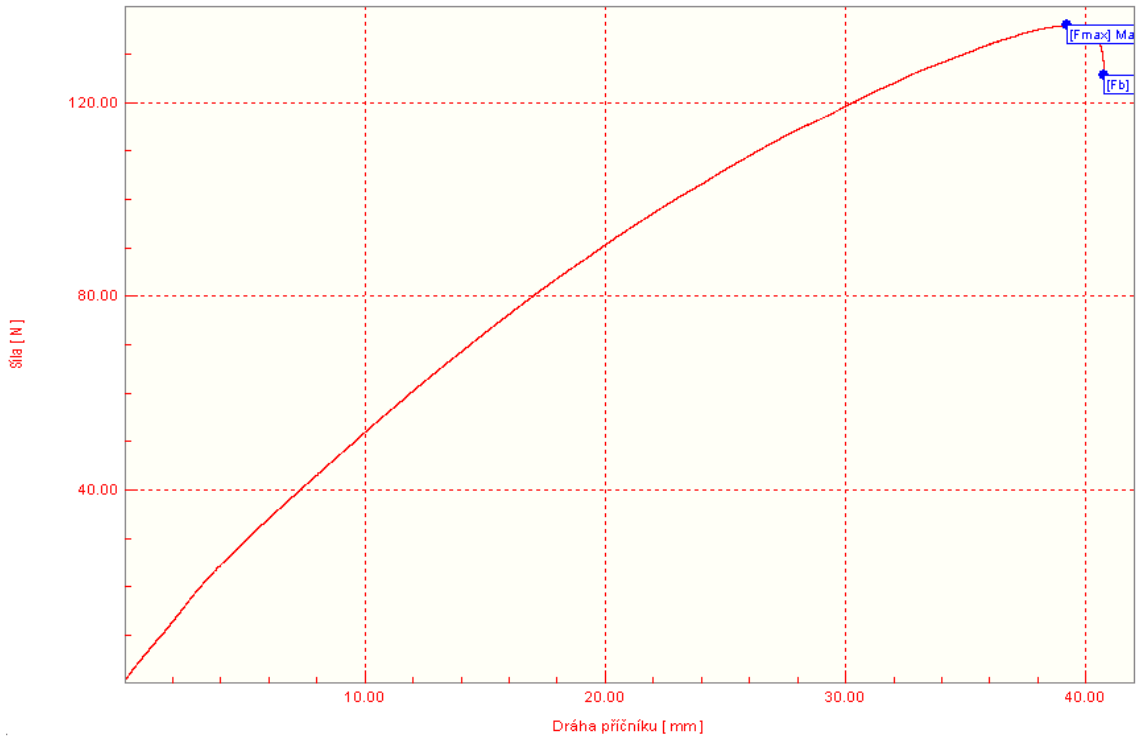
Příloha G, Tab. 18: Naměřené a vypočtené hodnoty z měření meze pevnosti v tahu - původní PVC

vzorek	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	F_M [N]	σ_M [MPa]
P1	5,07	5,00	25,35	173,19	6,83
P2	5,00	5,00	25,00	179,28	7,17
P3	5,06	5,63	28,49	226,71	7,96
P4	5,13	5,55	28,47	215,98	7,59
P5	5,05	5,50	27,78	135,94	4,89
P6	4,95	5,55	27,47	252,21	9,18
P7	5,08	5,90	29,97	220,23	7,35
P8	5,09	6,42	32,68	222,99	6,82
P9	5,10	5,70	29,07	190,42	6,55
P10	5,04	5,65	28,48	199,84	7,02

Příloha H: Křivky napětí / poměrné prodloužení z měření pevnosti v tahu



Příloha H, Obr. 28: Křivka napětí/prodloužení vzorku R9



Příloha H, Obr. 29: Křivka napětí/prodloužení vzorku P5

Příloha I: Výsledky měření stlačitelnosti

Příloha I, Tab. 19: Naměřené a vypočtené hodnoty z měření stlačitelnosti – recyklát

vzorek	a [mm]	b [mm]	A [mm^2]	L [mm]	ΔL [mm]	ε_c [%]
R1	49,88	50,15	2501,48	5,10	0,30	5,88
R2	49,78	50,50	2513,89	5,34	0,62	11,61
R3	50,09	50,45	2527,04	5,63	1,71	30,37
R4	49,15	50,50	2482,08	5,98	0,93	15,55
R5	50,34	49,96	2514,99	5,13	0,61	11,89
R6	49,96	50,39	2517,48	4,93	0,33	6,69
R7	49,63	50,26	2494,40	5,86	0,50	8,53
R8	50,29	49,99	2514,00	4,90	0,65	13,27
R9	50,32	49,77	2504,43	5,90	0,46	7,80
R10	50,53	49,47	2499,72	5,74	1,32	23,00

Příloha I, Tab. 20: Naměřené a vypočtené hodnoty z měření stlačitelnosti – původní PVC

vzorek	a [mm]	b [mm]	A [mm^2]	L [mm]	ΔL [mm]	ε_c [%]
P1	49,99	50,56	2527,49	4,95	1,03	20,81
P2	50,73	50,32	2552,73	4,90	1,46	29,80
P3	49,57	51,03	2529,56	4,80	1,28	26,67
P4	51,11	50,85	2598,94	5,08	0,89	17,52
P5	49,17	51,15	2515,05	5,16	1,67	32,36
P6	51,00	51,03	2602,53	4,89	0,73	14,93
P7	50,15	51,24	2569,69	4,78	0,53	11,09
P8	49,96	50,91	2543,46	5,12	0,82	16,02
P9	50,01	50,97	2549,01	4,99	0,78	15,63
P10	49,44	50,73	2508,09	4,82	0,63	13,07