

# Vodivá směs z recyklovaného ABS

Bc. Jan Maloun

---

Diplomová práce  
2021

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Maloun**  
Osobní číslo: **T19489**  
Studijní program: **N0722A130001 Inženýrství polymerů**  
Studijní obor: **Inženýrství polymerů**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Vodivá směs z recyklovaného ABS**

### Zásady pro vypracování

Recyklace plastového odpadu pocházejícího z automobilového průmyslu představuje v dnešní době zajímavou oblast materiálové úspory. Cílem diplomové práce tedy bude příprava vodivých kompozitů ABS splňujících požadavky pro výrobu vodivých součástí technologií vstřikování. Za tímto účelem by měla výsledná směs vykazovat mimo jiné nízkou cenu, relativně nízký index toku taveniny a hodnotu odporu okolo 10 kiloohm. Výběr vhodného vodivého plniva bude probíhat na základě vzájemného porovnávání mechanických a elektrických vlastností připravených kompozitů ABS, avšak hlavní zřetel v oblasti materiálové skladby vodivého plniva bude kladen na saze a uhlíková vlákna, případně jejich vzájemnou kombinaci.

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerši na zadané téma
2. Příprava směsí ABS drtě a vodivého plniva
4. Experimentální analýza elektrických a mechanických vlastností u připravených kompozitů
5. Vyhodnocení a diskuze získaných výsledků

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

1. VIDAKIS, N., MANIADI, A., PETOUSIS, M., et al. *Mechanical and Electrical Properties Investigation of 3D-Printed Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Graphene and Carbon Nanocomposites*, Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, DOI: 10.1007/s11665-020-04689-x.
2. ANELI, J.N., Gennadij Jefremovič ZAIKOV a L. M. KHANANASVILI. *Structuring and conductivity of polymer composites*. New York: Nova Science Publishers, 1998, 326 s. ISBN 1560725389.
3. CHEN, J., SHI, Y.Y., YANG, J.H., et al. *A simple strategy to achieve very low percolation threshold via the selective distribution of carbon nanotubes at the interface of polymer blends*, Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(42), 22398-22404. DOI: 10.1039/c2jm34295b.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Michal Sedlačík, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **1. února 2021**  
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

L.S.

---

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Jana Navrátilová, Ph.D.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

## PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

**Prohlašuji,**

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Cílem této diplomové práce bylo připravit elektricky vodivý ABS kompaund s nejlepším možným poměrem cena/vlastnosti a zároveň splňující požadavky zákazníka. Pro přípravu vodivé směsi byla firmou Maloun s.r.o. dodána recyklovaná drť ABS z automobilového průmyslu a různé vzorky vodivých sazí pro výběr optimálního typu pro danou směs. Pro nalezení optimálního typu a poměru vodivých sazí byla nejprve směs homogenizována v laboratorním hnětiči. Směs zvolená pro aplikaci byla vybrána na základě nejlepšího poměru mezi mechanickými vlastnostmi, elektrickými vlastnostmi a cenou. Pro vybranou směs byly vybrány vhodné zpracovatelské parametry s využitím laboratorní kompaundační linky. Po ověření potřebných parametrů byla technologie kompaundace převedena na průmyslovou kompaundační linku společnosti Maloun s.r.o.

Klíčová slova: vodivost, směs, ABS, saze, kompaund, recyklace

## **ABSTRACT**

The aim of this Master thesis is preparation of a conductive mixture of recycled ABS for the company Maloun s.r.o. For the preparation of the conductive mixture, Maloun s.r.o. supplied recycled ABS regrind from the automotive industry and various samples of conductive carbon black to select the optimal type for the mixture. The mixture components were mixed using a laboratory kneader to find the optimal type and ratio of conductive carbon black. The mixture for the application was selected on the basis of the best ratio between mechanical properties, electrical properties and price. The selected mixture was first compounded using a laboratory compounding line and finally using a compounding line owned by company Maloun s.r.o. Suitable processing parameters were selected for the selected mixture.

Keywords: conductivity, mixture, ABS, carbon black, compaund, recycling

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Michalu Sedlačíkovi, Ph.D, za podněty, konzultace a cenné rady. Dále děkuji firmě Maloun s.r.o. za poskytnutí potřebných materiálů.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# Obsah

ÚVOD .....	9
I. TEORETICKÁ ČÁST .....	10
1. Akrylonitrilbutadienstyren.....	11
1.1. Příprava Akrylonitrilbutadienstyrenu .....	12
1.1.1. Methylmetakrylát Akrylonitrilbutadienstyren.....	13
1.2. Aplikace akrylonitrilbutadienstyrenu .....	13
1.3. Vodivé akrylonitrilbutadienstyren kompozity .....	14
2. Elektrická vodivost pevných látek.....	14
2.1. Elektronová teorie .....	15
2.2. Elektrický odpor .....	16
2.3. Vodivost polymerních kompozitů a perkolační teorie.....	17
2.4. Vodivá plniva.....	18
2.5. Vodivá plniva na bázi uhlíku .....	19
2.5.1. Saze (CB – Uhlíková černě).....	19
2.5.2. Uhlíková vlákna .....	21
2.5.3. Uhlíkové nanotrubičky .....	22
2.5.4. Grafen.....	23
2.5.5. Grafit .....	24
2.6. Vodivé polymery .....	24
2.7. Vodivá plniva na bázi kovů .....	25
2.8. Elektricky vodivé plastové kompaundy.....	26
3. Recyklace .....	27
3.1. Ekologické aspekty recyklace.....	28
3.2. Recyklace plastových materiálů .....	28
3.2.1. Třídění plastů.....	30
3.2.2. Drcení plastů .....	31
3.2.3. Regranulace plastů .....	33
3.2.4. Kompaundace plastového recyklátu.....	34
3.2.5. Extruze .....	35
3.2.6. Jednošnekové extrudéry .....	37
3.2.7. Dvoušnekové extrudéry.....	37
II. PRAKTICKÁ ČÁST .....	39
4. CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE .....	40

5.	Metodika .....	41
5.1	Použité materiály .....	41
5.2	Příprava směsí .....	41
5.3	Kompaundace .....	42
6.	Výsledky .....	44
6.1	Rezistivita .....	44
6.2	Mechanické vlastnosti .....	45
6.2.1	Rázová zkouška .....	45
6.2.2	Ohybová zkouška .....	46
6.2.3	Zkouška tvrdosti Shore D .....	48
6.3	Tepelné vlastnosti .....	49
6.3.1	Stanovení teploty měknutí podle Vicata .....	49
6.3.2	Stanovení teploty průhybu při zatížení .....	50
6.4	Distribuce .....	52
7.	Diskuze .....	55
	ZÁVĚR .....	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	59
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	63
	SEZNAM TABULEK .....	64



## ÚVOD

V dnešní době je výroba kompaundů z plastových recyklátů zcela běžnou praxí. Výhodou takových materiálů je zejména velké snížení ceny oproti tzv. primárním plastovým materiálům, a to za získání velmi podobných vlastností. Využití recyklovaných materiálů má kromě ekonomických důvodů také environmentální důvody. Recyklace značně přispívá ke snížení množství plastového odpadu. Ten může být tímto způsobem znovu použit, čímž se snižuje skládkování, či spalování. Elektricky vodivé kompaundy se používají např. k řešení problémů souvisejících s hromaděním elektrostatického náboje, ochranou před elektrostatickými výboji nebo elektromagnetickým rušením. Tyto směsi mohou nabízet elektrické vlastnosti od antistatických přes vodivé až po stínění elektromagnetického záření EMI. Využití recyklovaných plastových materiálů pro výrobu vodivých kompaundů není zcela běžné. Důvodem jsou především vysoké požadavky na elektrické a mechanické vlastnosti. Představa výrazného snížení nákladů však vede k využití vodivých směsí z plastového recyklátu pro specifické aplikace. Typickým plnivem pro přípravu vodivých plastových kompaundů jsou speciální typy vodivých sazí. Vodivé saze intenzivně zvyšují vodivost matrice, již při relativně nízkém obsahu. Zároveň je jejich cena nízká v porovnání s jinými vodivými plnivy jako jsou např. uhlíková vlákna, uhlíkové nanotrubičky a další. Přidáním malého procenta těchto drahých plniv, která se vyznačují ještě lepšími vodivými vlastnostmi než vodivé saze, může vést k vylepšení vodivých vlastností výsledné směsi, nebo dokonce k synergickému efektu.

## I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1. Akrylonitrilbutadienstyren

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) je kopolymer akrylonitrilu, butadienu a styrenu. Akrylonitrilbutadienstyren je termoplastický materiál s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi za dostupnou cenu. Je tvrdý, tuhý a má velkou chemickou odolnost a vysokou rozměrovou stabilitu. Obecně má ABS užitečné vlastnosti v teplotním rozmezí od  $-20$  do  $80$  °C. Akrylonitrilbutadienstyren je hořlavý, je-li vystaven vysokým teplotám nebo teplotě nad teplotou skelného přechodu,  $T_g$  a zároveň nižší než jeho teplota tání,  $T_m$ , která je přibližně  $105$  °C. Plastové ABS materiály mají teplotu tání asi  $200$  °C.<sup>[1,3]</sup> Jedná se o neprůhledný amorfnní terpolymer styrenu nabízející nárazovou, tepelnou a chemickou odolnost vyšší oproti polystyrenům. Konečné vlastnosti jsou do určité míry ovlivněny podmínkami, za kterých je materiál zpracován na konečný produkt. Například formování za vysoké teploty zlepšuje lesk a tepelnou odolnost produktu, zatímco nejvyšší rázová houževnatost a pevnost jsou získány formováním při nízké teplotě. Tento polymer lze využít k výrobě lehkých, nerozebíratelných, tvarovaných předmětů, jako například trubek, melodických nástrojů, hlav golfových holí, částí hraček (lego), a to díky svým jedinečným vlastnostem, jako je pevnost, tvrdost a tuhost, vysoká chemická stabilita, vynikající tvárnost, vysoká rázová pevnost, stabilní rozměry, vysoká pevnost v tahu a ohromná tažnost. Je k dispozici v mnoha typech. Například s vylepšenou nehořlavostí je možné tento polymer získat buď mícháním (blending) s polyvinylchloridem (PVC) nebo polykarbonátem, nebo smícháním s halogenovanými aditivami. Kromě toho má ABS relativně nízkou míru smršťování, dobrou dlouhodobou rozměrovou stabilitu a poddajnost. Akrylonitrilbutadienstyren kompaundy jsou mírně hygroskopické a měly by být sušeny před konvenčním vstřikováním, aby se zabránilo vzhledovým vadám tzv. „Splay marks“. Při formování strukturální pěny může vlhkost vést k nadměrnému zápachu u určitých chemických nadouvadel. Dále je ABS náchylný k degradaci a změně barvy po vystavení ultrafialovému (UV) záření. Po přidání UV stabilizátorů je ABS vhodný pro venkovní použití. Modifikace nehořlavosti ABS pomocí halogenových sloučenin významně zvyšuje náklady na pryskyřici a snižuje barevnou stálost.<sup>[2,3]</sup> Pro úpravu barvy ABS materiálů jsou obvykle používány pigmenty, jelikož barva přírodního ABS je slonovinově bílá. Přestože ABS plasty se používají převážně pro mechanické účely, mají také elektrické vlastnosti, které jsou velmi konstantní v širokém rozsahu frekvencí. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny zpracovatelskými podmínkami jen velmi málo. Akrylonitrilbutadienstyren plasty jsou odolné vůči kyselinám, zásadám, koncentrované kyselině chlorovodíkové, kyselině

fosforečné, alkoholům a živočišným, rostlinným a minerálním olejům, ale bobtnají ledovou kyselinou octovou, roztokem chloridu uhličitého a aromatickými uhlovodíky. Mají špatnou odolnost vůči koncentrované kyselině sírové a dusičné. Jsou rozpustné v esterech, ketonech, 1,2-dichlorethenu a acetonu. Výhodou ABS je, že lze recyklovat. Při recyklaci je ABS obvykle mícháno s primárním materiálem.<sup>[3]</sup>



Obrázek 1 Granulát primárního materiálu ABS<sup>[4]</sup>

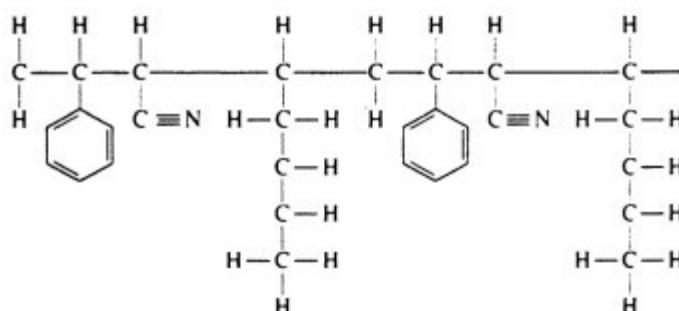
### 1.1. Příprava Akrylonitrilbutadienstyrenu

Akrylonitrilbutadienstyren je amorfni pryskyrice. Jeho vlastnosti závisi na poměru akrylonitrilu, butadienu a styrenu, a dále pak na tom, jak jsou tyto složky polymerovány a na složení výsledného kopolymeru. Pro dobrou chemickou odolnost, tepelnou odolnost a dlouhodobou tepelnou stabilitu musí být složení bohaté na obsah akrylonitrilu. Složení s vysokým obsahem styrenu mají dobrý lesk, vynikající tvarovatelnost a dobrou pevnost a tuhost, zatímco butadien přispívá k nízkým teplotním nárazům a zachování obecných vlastností. Vyrábí se dvěma způsoby:

- a) V prvním způsobu se kopolymery styren akrylonitrilu (SAN) smísí s butadien akrylonitrilovým kaučukem. Kaučuková fáze se rozpadá a rovnoměrně se disperguje v malých částicích jako diskontinuální fáze v kontinuální fázi SAN.
- b) Druhý výrobní postup, který se dnes používá ve většině operací, poskytuje schopnost připravit materiál konkrétních vlastností. Akrylonitril je roubován (chemicky vázán) na butadienový nebo butadien/styrenový kopolymerový řetězec.

Směs polybutadien-SAN není kompatibilní. Pokud se tyto dva materiály smísí, je polybutadien rovnoměrně dispergován v kontinuální fázi SAN ve formě velmi malých částic. I při správné koncentraci a distribuci polybutadienu je houževnatost matrice SAN

pouze okrajově zlepšena vlivem nekompatibility pryskyřice. Pokud je však správný poměr styrenu a akrylonitrilu roubován na polybutadienový základní řetězec, polymer se stane kompatibilním s kopolymerem SAN; oba systémy pryskyřice mohou být smíchány, přičemž výsledná polymerní směs má zlepšenou houževnatost.<sup>[5]</sup>



Obrázek 2 Chemický vzorec ABS<sup>[6]</sup>

### 1.1.1. Methylmetakrylát Akrylonitrilbutadienstyren

Methylmetakrylát akrylonitrilbutadienstyren (MABS) je čirý, průhledný materiál s tepelnými a mechanickými vlastnostmi rovnocennými ABS. Transparentnosti je dosaženo sladěním indexů lomu matricové pryskyřice (transparentní akrylát-akrylonitril-styrenový polymer) s modifikátorem rázové houževnatosti polybutadienem. Jedná se o amorfni termoplast se stejným smrštěním jako ABS a polykarbonát, kdy tedy může být použit pro podobné aplikace jako tyto materiály. Methylmetakrylát akrylonitrilbutadienstyren snadno přilne k PVC spojením s rozpouštědlem. Má nejvyšší odolnost proti nárazu ze všech styrenik.<sup>[7]</sup>

### 1.2. Aplikace akrylonitrilbutadienstyrenu

Výrobci mohou pomocí vhodného relativního množství tří monomerů vyrobit ABS s požadovanými vlastnostmi pro typické aplikace. Mezi jeho běžné aplikace patří, kromě již výše zmíněného, dýmky a kování, těla spotřebičů, jako jsou vysavače, sportovní vybavení, ochranné přilby, zavazadla, nábytek, lékařské vybavení, trubice, čepice, telefonní soupravy a fotoaparáty. Třídy ABS s vysokým leskem se používají pro domácí spotřebiče, konkrétně pračky a skříně chladniček. Některé třídy se používají pro automobilový interiér a skříně domácích spotřebičů. Protipožární třídy ABS se používají k výrobě součástí elektrických spotřebičů, jako jsou televizory, osobní počítače a kryty tiskáren. Transparentní ABS našlo uplatnění v průhledných částech domácích spotřebičů a obchodních zařízení.

Jeden z hlavních trhů pro ABS se nachází v automobilovém průmyslu. Používá se pro výrobu různých automobilových součástí, jako jsou mřížky reproduktorů, kliky dveří, obložení dveří, přístrojové desky, konzole, vnější komponenty a elektrické součásti, jako je kryt navigačního systému.<sup>[8]</sup> Nízká teplota tání (105 °C) tohoto materiálu dále zvyšuje jeho použitelnost. Jak již bylo také uvedeno, ABS je vyroben ze tří různých monomerů, které poskytují různé příznivé vlastnosti, kde tepelná tolerance je zajištěna akrylonitrilem, robustní rázová houževnatost butadienem a styrenem tuhost. Techniky FDM (Fusion Deposition Modeling) a SLS (Selective Laser Sintering) jsou tiskařské technologie, které využívají ABS. V dnešní době je však ABS v 3D tisku stále více nahrazováno jinými materiály, především kyselinou polymléčnou (PLA).<sup>[9]</sup>

### 1.3. Vodivé akrylonitrilbutadienstyren kompozity

Vodivý ABS kompaund je poměrně oblíbený v komerčních a inženýrských aplikacích. Nachází se v potrubí, automobilových součástkách, elektronických součástkách, spotřebičích a dalších specifických aplikacích. Poměrně významné je jeho využití v rámci 3D tisku. Protože má vyšší teplotní odolnost než PLA, je náchylnější k deformaci během 3D tisku. Jako plnivo se nejčastěji používají speciální vodivé saze. Pro využití jako vodivé plnivo je možné použít i další formy uhlíku jako jsou uhlíkové nanotrubičky, uhlíková vlákna nebo grafen. Jejich výraznější využití v dnešní době brzdí vysoká cena těchto materiálů. Další významné plnivo vodivých ABS kompozitů jsou kovové prášky, vlákna a oxidy kovů. Pro tyto kompozity je však poměrně známá (zvláště při využití kovových prášků a vláken) špatná recyklovatelnost těchto materiálů. Materiál ABS se statickými disipativními vlastnostmi se využívá obzvláště pro aplikace, kde statický náboj může poškodit výrobky, zhoršit jejich výkonnost nebo způsobit výbuch v hořlavém prostředí.<sup>[10,11]</sup>

## 2. Elektrická vodivost pevných látek

Pohyb elektronů v pevných látkách ovlivňuje zejména periodický elektrostatický potenciál krystalové mřížky. Pevné látky jsou dle vodivosti děleny do tří skupin – vodiče, polovodiče a izolanty. Mezi vodiče patří hlavně kovy a určité formy uhlíku jako je např. grafit. Polovodiče jsou např. křemík a germanium. Typickým zástupcem izolantů jsou právě polymery a plasty. Výjimku tvoří tzv. vodivé polymery.

**Elektrická vodivost** (konduktance), značena  $G$ , je fyzikální veličina, popisující schopnost látek vést určitý elektrický proud procházející vodičem při jednotkovém napětí. Se zvyšující se vodivostí látky se zvyšuje elektrický proud procházející vodičem při konstantním napětí. Základní jednotkou konduktance je Siemens [S], který lze vypočítat dle vztahu

$$G = \frac{I}{U} \quad (1)$$

[A] je elektrický proud protékající vodičem a  $U$  [V] je elektrické napětí na koncích vodiče.

**Konduktivita** (též měrná elektrická vodivost) je fyzikální veličina, popisující schopnost látek vést elektrický proud. Čím je vyšší konduktivita látky, tím více vede elektrický proud. Konduktivita závisí na teplotě, což je zejména u polovodičů velmi významné. Konduktivitu lze vyjádřit jako převrácenou hodnotou měrného elektrického odporu  $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ]:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

Při znalosti elektrické vodivosti jednodílného bloku látky, je konduktivitu možné spočítat podle vztahu:

$$\sigma = \frac{lG}{S} \quad (3)$$

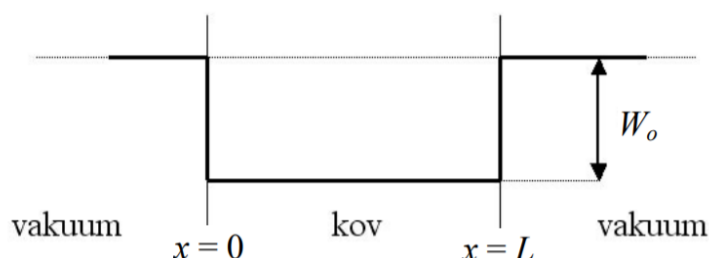
, kde  $l$  [cm] je délka tělesa, na které působí napětí, a  $S$  [ $m^2$ ] je obsah kolmého průřezu.

Pro vysvětlení elektrické vodivosti kovů se nejčastěji používá klasická elektronová teorie. Její nedostatky je možné z části odstranit za pomoci aplikace kvantové teorie volných elektronů. Problémy obou předchozích teorií pak řeší pásová teorie elektrické vodivosti. Přestože elektronová teorie a teorie volného elektronu nejsou zcela vyhovující, zachovávají si svůj význam hlavně pro svoji snadnou a praktickou aplikovatelnost při řešení mnoha problémů. Ačkoliv z důvodu mnoha problémů není elektronová teorie zcela přesná, stále se používá, zejména pro svoji jednoduchost a praktickou aplikovatelnost pro řešení velkého množství různých problematik.<sup>[12]</sup>

## 2.1. Elektronová teorie

Základem klasické elektronové teorie jsou zákony kinetické energie plynů (Boltzmannova konstanta). Elektronová teorie aplikuje tyto zákony pro elektronový plyn. Kromě kovů je elektronová teorie využitelná i pro uhlík, a to pro jeho vodivé formy jako je např. grafit. Elektronová teorie vysvětluje vysokou elektrickou a tepelnou vodivost

následovně: valenční elektrony (elektrony vnější slupky elektronového obalu) lze velmi snadno odtrhnout a vznikne vodivostní (volný) elektron a kladný iont. Jednotlivé valenční elektrony se po odtržení mohou volně pohybovat, čímž vzniká elektronový plyn. Působení napětím na vodič dojde k usměrnění pohybu volných elektronů od záporného ke kladnému pólu zdroje. Elektron nemůže uniknout z kovu z důvodu potenciálové bariéry (~10 eV) mezi povrchem kovu a vnitřním objemem.



Obrázek 3 Potenciální energie vodivostních elektronů v kovu a na jeho povrchu (klasický model)<sup>[12]</sup>

Zákon Lorentzův – Lorentzův: Podíl tepelné a elektrické vodivosti má pro všechny kovy stejnou hodnotu, úměrnou absolutní teplotě. Atomární teplo vodičů by mělo být asi o 50 % vyšší než u izolantů, ale tak tomu není. Tento problém se podařilo vyřešit aplikací kvantové teorie vodivosti.<sup>[12]</sup>

## 2.2. Elektrický odpor

**Elektrický odpor (rezistence)** je fyzikální veličina charakterizující schopnost elektrických vodičů vést elektrický proud. Základní jednotkou elektrického odporu je ohm [ $\Omega$ ]. Elektrický odpor je dán typem materiálu, tvarem a teplotou. Velikost odporu závisí na dalších faktorech jako je délka vodiče (přímo úměrně), obsah průřezu vodiče (nepřímo úměrně), materiál vodiče (měrný elektrický odpor) a na teplotě. Elektrický odpor,  $R$ , vodiče lze určit pomocí vztahu:

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (4)$$

, kde  $\rho$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] je měrný elektrický odpor (rezistivita) materiálu,  $l$  [m] je délka vodiče a  $S$  [ $\text{m}^2$ ] je obsah průřezu vodiče.

Pro výpočet rezistence je také možné použít Ohmova zákona:

$$R = \frac{U}{I} \quad (5)$$



, kde  $I$  [A] je elektrický proud protékající vodičem a  $U$  [V] je elektrické napětí na koncích vodiče.

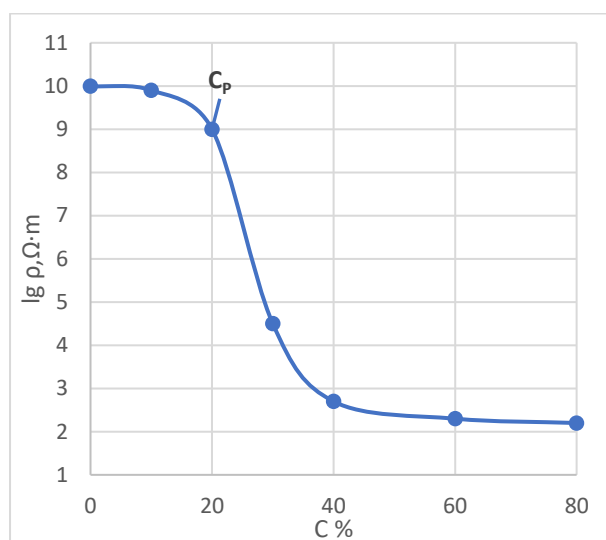
**Měrný elektrický odpor (rezistivita)** je fyzikální veličina, která vyjadřuje elektrický odpor materiálu o jednotkové délce 1 m a jednotkovém obsahu průřezu 1 mm<sup>2</sup> při teplotě 20 °C. Rezistivita charakterizuje elektrickou vodivost dané látky a je pro danou látku vždy konstantní. Rezistivitu lze vyjádřit jako převrácenou hodnotu konduktivity. Pro vodiče je typické, že rezistivita s rostoucí teplotou roste. U polovodičů a izolantů rezistivita naopak s rostoucí teplotou klesá.<sup>[13]</sup>

Tabulka 1 Porovnání rezistivity ABS s různými materiály<sup>[14]</sup>

Materiál	ABS	Sklo	Uhlík (grafit)	Hliník	Stříbro
Měrný el. odpor [ $\Omega \cdot m$ ]	$>10^{15}$	$10^{12}$	$40 - 150 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$

### 2.3. Vodivost polymerních kompozitů a perkolační teorie

Růst vodivosti polymerních kompozitů s nárůstem obsahu vodivého plniva je pravidlo platící bez výjimek. Specifickým rysem této závislosti je skokové zvýšení vodivosti při určité koncentraci plniva, vyvolané přechodem z izolantu na vodič (Obrázek 4). Tento přechod odpovídá takzvanému prahu (bodu) perkolace. Intenzivní zvýšení vodivosti je podmíněno vytvořením spojitého řetězce částic plniva v polymerní matrici – dochází ke vzniku tzv. nekonečného klastru, což je shluk v nekonečné struktuře, který obsahuje nekonečný počet uzlů. V konečné struktuře je nekonečný klastr shluk, jenž propojuje protilehlé kraje mřížky. Zvýšení obsahu plniva podporuje propojení izolovaných shluků do větších systémů až do výskytu nekonečného shluku, čímž vzniká spojitý elektricky vodivý kanál v makrosystému polymerního kompozitu.<sup>[15]</sup> Nekonečný klastr je možné rozdělit na několik částí podle vlastností a vlivu na vodivost struktury. Mrtvé konce nemají vliv na vodivost dané struktury. Naopak páteř obsahuje části struktury, kterými protéká proud při rozdílném napětí na protilehlých stranách mřížky (elektrodách). Elastická páteř je označení pro nejkratší možné propojení elektrod. Kritické vazby jsou části elastické páteře, po jejichž odstranění zůstává struktura nadále vodivá. Jednou z možných metod analýzy nekonečného klastru je metoda hoření. Vodivost struktury s koncentrací plniva pod perkolačním prahem je zkoumána z hlediska kvantové fyziky, jelikož v těchto koncentracích probíhá mechanismus tunelování. Struktury, které mají vyšší koncentraci, než je hodnota perkolačního prahu, jsou propojeny ohmicky.<sup>[16]</sup>



Obrázek 4 Typická závislost specifického objemového elektrického odporu polymerních kompozitů na koncentraci vodivého plniva.  $C_p$  je práh perkolace<sup>[15]</sup>

## 2.4. Vodivá plniva

Polymery jsou většinou typické izolanty, lze je však pomocí vodivých plniv dobře rozmíchaných v polymerní matici, přeměnit ve vodivé materiály. Existují dva hlavní druhy vodivých plniv: uhlík a kov. Plniva na bázi uhlíku zahrnují speciální vodivé saze, uhlíkové nanotrubičky (CNT), uhlíková vlákna (CF) a grafen. Kovová plniva se používají ve formě kovových prášků, kovových vloček, kovových nanočástic a jako kovem potažená vlákna.<sup>[17]</sup> Vodivá plniva na bázi uhlíku jsou používána pro trvalou ochranu před elektrostatickým výbojem, pro prevenci výbuchu a pro aplikace polymerů, které vyžadují měrný elektrický odpor mezi 1 a  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ . Typicky se používají speciální vodivé saze, protože jsou schopné dodat polymerům vodivost při výrazně nižších objemových podílech než konvenční saze. Zároveň jsou výrazně levnější oproti alternativám v podobě CNT, CF a grafenu. Vodivé saze navíc ovlivňují méně konečné mechanické vlastnosti výsledného materiálu než kovy.<sup>[18]</sup> Polymerní kompozity plněné kovy jsou zajímavé pro mnoho oborů strojírenství. Tento zájem vyplývá ze skutečnosti, že elektrické vlastnosti těchto kompozitů jsou blízké vlastnostem kovů, zatímco mechanické vlastnosti a metody zpracování jsou typické pro plasty. Dosažení potřebných elektrických vlastností záleží zejména na dobré distribuci plniva uvnitř polymerní matrice a na velikosti částic.<sup>[19]</sup>

## 2.5. Vodivá plniva na bázi uhlíku

Uhlík (C) je nekovový chemický prvek ve skupině 14 (IV.A) periodické tabulky. Ačkoli je uhlík široce distribuován v přírodě, není příliš hojný - tvoří pouze asi 0,025 % zemské kůry - přesto tvoří více sloučenin než všechny ostatní prvky dohromady. V roce 1961 byl vybrán izotop uhlíku  $C^{12}$ , který nahradil kyslík jako standard, vůči kterému se měří atomové hmotnosti všech ostatních prvků. Uhlík  $C^{14}$ , který je radioaktivní, je izotop používaný při radiokarbonovém datování a radioaktivním značení. Elementární uhlík existuje v několika formách, z nichž každá má své vlastní fyzikální vlastnosti. Dvě z jeho dobře definovaných forem, diamant a grafit, mají krystalickou strukturu, liší se však ve fyzikálních vlastnostech, protože uspořádání atomů v jejich strukturách je odlišné. Třetí formou jsou tzv. fullereny. Jsou to molekuly tvořené atomy uhlíku, jenž jsou uspořádány do vrstev z pětiúhelníku a šestiúhelníků s atomy ve vrcholech a jsou prostorově svinuty do uzavřeného tvaru. Sféroidní fullereny s uzavřenou klecí se nazývají buckminsterfullereny nebo „buckyballs“ a fullereny ve tvaru válců se nazývají uhlíkové nanotrubičky neboli CNT. Čtvrtá forma, nazývaná Q-uhlík, je krystalická a magnetická. Další forma, zvaná amorfni uhlík, nemá žádnou krystalickou strukturu. Jiné formy (např. saze, uhlí, koks) se někdy nazývají amorfni, ale rentgenové vyšetření ukázalo, že tyto látky mají nízký stupeň krystalinity. Jedna z nejnovějších modifikací uhlíku, grafen, objevený teprve v roce 2004, patří dokonce mezi nejpevnější materiály na světě. Diamant a grafit se jako jediní zástupci přirozeně vyskytují na Zemi, ale mohou být také produkovány synteticky.<sup>[20]</sup>

### 2.5.1. Saze (CB – Uhlíková černě)

Jedná se o amorfni uhlík, obvykle získaný částečným spalováním uhlovodíků, používaný hlavně jako zpevňující činidlo v automobilových pneumatikách a jiných pryžových výrobcích, ale také jako extrémně černé pigmenty s vysokou krycí schopností v tiskařských barvách, barvách a v karbonovém papíru. Saze se používají také v ochranných povlacích, plastech a rezistorech elektrických obvodů. Jako výztužné plnivo výrazně zvyšuje odolnost proti opotřebení a otěru. Saze tvoří asi čtvrtinu hmotnosti standardní automobilové pneumatiky. U pneumatik vozidel, u kterých je nutné se vyvarovat elektrostatického náboje, jako jsou cisternové vozidla a nemocniční vozíky, se přidává ještě více sazí, aby byla guma elektricky vodivá.

Částice sazí jsou obvykle kulovitěho tvaru a méně pravidelně krystalické než grafit. Saze se přemění na grafit, pokud se zahřívají na 3 000 °C (5 400 °F) po delší dobu. Jednotlivé druhy

sazí se velmi liší velikostí částic v závislosti na procesu, kterým jsou vyráběny. Kanálové saze se vyrábějí nárazem kouřových plamenů z malých trysek na železné kanály; nanosené saze se seškrábnou přesunutím kanálů přes stacionární škrabky. Pecní saze se vyrábějí v žáruvzdorných komorách neúplným spalováním některého z plyných nebo kapalných uhlovodíků. Termické saze se vyrábějí v nepřítomnosti vzduchu, kdy se uhlovodíky rozkládají kontaktem s vyhřívanými žáruvzdornými materiály. Lampové saze, nejstarší známý černý pigment, se vyrábí spalováním oleje, obvykle kreosotu, černouhelného dehtu, v mělkých pánvích, v peci s regulovaným tahem tak, aby vznikl silný oblak kouře. Acetylenová čern se vyrábí v žáruvzdorných komorách v nepřítomnosti vzduchu rozkladem acetylenového plynu předehřátého na 800 °C (1 500 °F). Používá se v aplikacích vyžadujících vysokou elektrickou vodivost, jako jsou zinko-uhlíkové články (suché články).<sup>[21]</sup>

Saze jsou konvenční vyztužovací plnivo používané k vylepšení celkové vlastnosti elastomerů. Kompozity plněné standardními typy sazí (N220, N550 atd.) se vyznačují zlepšenými mechanickými vlastnostmi, dobrou elasticitou a dynamickými vlastnostmi. Vykazují také pozoruhodnou odolnost proti otěru a pružnou regeneraci. Tyto vlastnosti jsou důvodem proč se saze používají v široké škále aplikací, včetně automobilového a textilního průmyslu. Obyčejné saze obvykle nemají dostatečné elektrické vlastnosti. Elektrické vlastnosti polymerních kompozitů silně závisí na jejich mikrostruktuře. Zejména pak na geometrii plniva, dispergaci a na interakcích výplň-výplň a polymer-výplň.<sup>[22]</sup>

### **2.5.1.1. Elektricky vodivé kompozity Polymer/CB**

Vodivé polymery, jako jsou kompozity polymer/saze (CB), jsou široce používány jako antistatické, elektromagnetické stínící a snímací materiály, a to z důvodu jejich nízkých nákladů, snadného zpracování a regulovatelného elektrického odporu. Mnoho úsilí bylo věnováno získání vysoké elektrické vodivosti při nízkém obsahu plniva jak akademickými, tak průmyslovými komunitami, protože vysoké zatížení plnivem vede k vysokým nákladům a pravděpodobně ke zhoršení dalších vlastností, jako jsou mechanické vlastnosti a zpracovatelnost. Obecně je elektrická vodivost kompozitů do značné míry závislá na dobré distribuci a dispergaci plniva v polymerní matici. Přípravou dobré disperze se výrazně zvyšuje účinnost vodivých sazí, ale pouze v případě, že se dispergované částice shromáždí do sítě, teprve pak dochází k transportu elektronů v materiálu, čímž kompozit získá vodivé vlastnosti. Výzkum v oblasti vodivých polymerních kompozitů se proto zaměřuje hlavně na to, jak dispergovat vodivá plniva a jak účinně podporovat jejich sestavení.<sup>[23]</sup> Přítomnost

vodivých částic v izolačním materiálu mění elektrickou vodivost kompozitního systému postupně. Pro nízké hodnoty obsahu vodivého plniva zůstává stejnoměrná vodivost na úrovni nenaplněné izolační matrice. Zvýšení koncentrace vodivé fáze vede k postupnému zvyšování vodivosti systému. S dalším zvyšováním obsahu vodivé fáze je při kritické hodnotě obsahu plniva pozorováno náhlé a významné zvýšení vodivosti. Kritická koncentrace neboli dříve definovaný perkolační práh je rozhodujícím parametrem určujícím přechod mezi izolantem a vodičem nebo polovodičem. Přechod izolátoru na vodič, který lze považovat za kritický jev, je popsán pomocí teorie perkolace.<sup>[24]</sup>

### 2.5.2. Uhlíková vlákna

Uhlíkové vlákna se skládají z atomů uhlíku spojených dohromady za vzniku dlouhého řetězce. Vlákna jsou extrémně tuhá, silná a lehká a používají se v mnoha procesech k výrobě vynikajících stavebních materiálů. Materiál z CF se dodává v různých „surových“ stavebních blocích, včetně přízí, jednosměrných, vazeb, prýmků a několika dalších, které se zase používají k vytváření kompozitních dílů. Vlastnosti CF se blíží vlastnostem oceli a hmotnost se blíží hmotnosti plastu. Poměr pevnosti k hmotnosti (stejně jako poměr tuhosti k hmotnosti) CF je tedy mnohem vyšší než u oceli nebo plastu. Uhlíkové vlákno je extrémně pevné. Uhlíková vlákna jsou vlákna o průměru asi 5–10 mikrometrů a skládají se z atomů uhlíku. Díky velmi dobrým mechanickým vlastnostem jsou uhlíková vlákna velmi populární v leteckém a kosmickém průmyslu, stavebnictví, armádě a motoristických sportech, stejně jako v jiných závodních sportech. Jsou však relativně drahá ve srovnání s jinými vlákny, jako jsou skleněná nebo plastová vlákna. Asi 90 % CF je vyrobeno z polyakrylonitrilu. Zbývajících 10 % je vyrobeno z umělého hedvábí nebo ropné smoly. Všechny tyto materiály jsou organické polymery, které se vyznačují dlouhými řetězci molekul vázaných dohromady atomy uhlíku. Přesné složení každého prekurzoru se u jednotlivých společností liší a je obecně považováno za obchodní tajemství. Během výrobního procesu se používají různé plyny a kapaliny. Některé z těchto materiálů jsou navrženy tak, aby reagovaly s vláknem za účelem dosažení specifického efektu. Jiné materiály jsou navrženy tak, aby nereagovaly nebo nebránily určitým reakcím s vláknem. Stejně jako u prekurzorů je přesné složení mnoha z těchto procesních materiálů považováno za obchodní tajemství.

Uhlíková vlákna mají vysoký poměr pevnosti k hmotnosti (také známý jako specifická síla). Dále mají vysokou tuhost a plast vyztužený CF je více než 4krát tužší než plast vyztužený skly a 2,5krát tužší než plast vyztužený hliníkem. Uhlíkové vlákno je odolné proti korozi a chemicky

stabilní, což znamená, že můžou být využity jako chemické stabilizátory plastů. Uhlíková vlákna se také vyznačují elektrickou vodivostí. Tato funkce může být užitečná, ale v určitých aplikacích i nežádoucí. Při využití v lodním průmyslu může CF usnadnit galvanickou korozi v armaturách. Pečlivá instalace může tento problém snížit. Uhlíková vlákna vzhledem k vysoké ceně nejsou příliš vhodná pro přípravu vodivých plastových kompozitů, ale jejich uplatnění spočívá ve vylepšení mechanických a elektrických vlastností plastových kompozitů.<sup>[25]</sup>

### 2.5.3. Uhlíkové nanotrubičky

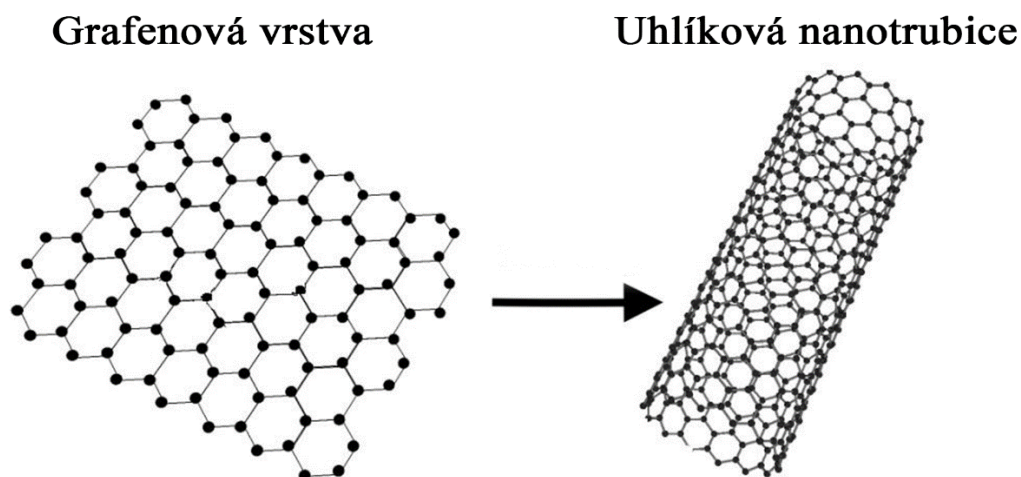
Uhlíkové nanotrubičky jsou velké válcovité molekuly skládající se z hexagonálního uspořádání hybridizovaných atomů uhlíku (Obrázek 5). Uhlíkové nanotrubičky patří mezi fullereny. Jednotlivé typy CNT se můžou vzájemně lišit svou strukturou a dělí se zejména na jedностěnné (SWCNT) a víceštěnné uhlíkové nanotrubičky (MWCNT).<sup>[26]</sup>

SWCNT lze popsat jako dlouhou trubičku vytvořenou zabalením jediného grafenového listu do válce o průměru asi 1 nm, jehož konce jsou uzavřeny fullerenovými klecemi.<sup>[26]</sup> Probíhá intenzivní aktivita zkoumající elektrické vlastnosti těchto systémů a jejich potenciální aplikace v elektronice. Experimenty a teorie ukázaly, že tyto trubičky mohou být buď vodiče nebo polovodiče a jejich elektrické vlastnosti mohou konkurovat nebo dokonce překračovat nejlepší známé kovy nebo polovodiče.<sup>[27]</sup>

MWCNT jsou soustředně uspořádané sestavy SWCNT s různými průměry. Vzdálenost mezi sousedními vrstvami je asi 0,34 nm. Liší se od SWCNT nejen svými rozměry, ale také odpovídajícími vlastnostmi.<sup>[26]</sup>

Uhlíkové nanotrubičky přilákaly zájem, protože jsou předpovídány a skutečně pozorovány jejich pozoruhodné elektrické a jiné fyzikální vlastnosti. Kombinace těchto vlastností s velmi nízkou hustotou naznačuje, že CNT jsou ideálními kandidáty pro polymerní kompozity; v jistém smyslu mohou být novou generací pokročilých materiálů. Existuje však řada zásadních výzev spočívajících v malé velikosti částic těchto plniv. Ačkoli bylo dosaženo významného pokroku při překonávání potíží s výrobou polymerních nanokompozitů, výroba je stále klíčovou výzvou pro plné využití vlastností těchto nanomateriálů. Primárním problémem je dosažení dobré disperze plniva v nanoměřítku do kompozitu, nezávisle na tvaru výplně a poměru stran. Bez správného rozptýlení mají agregáty plniva tendenci působit jako defekty daného místa, které omezují elektrický výkon; takové aglomeráty také nepříznivě ovlivňují fyzikální

vlastnosti kompozitu. Větší využití CNT aktuálně také brzdí velmi vysoká cena těchto materiálů.<sup>[28]</sup>



Obrázek 5 Grafen a jednostěnná uhlíková nanotrubička<sup>[29]</sup>

#### 2.5.4. Grafen

Grafen se ukázal jako jedinečný materiál v oblasti nanotechnologií díky své rigidní planární nanostruktúře grafenu vytvořené z jedné 2D vrstvy atomů uhlíku uspořádaných v hexagonální krystalové mřížce. Grafen lze připravit pomocí různých metod, například mechanickou nebo chemickou exfoliací grafitu, redukcí grafen oxidu a chemickou depozicí par. Mezi těmito metodami je nejspolehlivější mikromechanické štěpení. Jedná se o efektivní způsob výroby grafenu o vysoké kvalitě. Zásadní problém je nízká dispergovatelnost grafenu v běžných organických a anorganických látkách. Úprava grafenu za účelem přizpůsobení jeho rozpustnosti v organickém médiu je kritická pro různé komerční aplikace. Integrace grafenu v polymerních matricích pro vytvoření pokročilého multifunkčního kompozitu je jednou z nejslibnějších cest pro využití grafenu. Důvodem je, že polymerní kompozity obvykle mají výjimečný specifický modul, specifickou sílu a široké uplatnění v leteckém, automobilovém a obranném průmyslu. Kromě toho mohou být polymerní kompozity snadno zpracovatelné. Ve srovnání s uhlíkovými nanotrubičkami, má grafen vyšší poměr povrchu k objemu. Tento fakt činí grafen potenciálně výhodnějším pro zlepšení vlastností polymerních matric, jako jsou mechanické, elektrické, tepelné a mikrovlnné absorpční vlastnosti. Grafenovou nanostrukturu lze výhodně použít jako plnivo pro termoplastické polymery a termosetové pryskyřice, protože poskytuje polymerní kompozity s řadou funkčních charakteristik, kterých nelze dosáhnout pomocí jiných typů plniv. Hlavní charakteristika tohoto zvláštního typu plniva je jedinečný poměr stran (tloušťka grafenové roviny má pouze několik Angstromů).

Nanokompozity polymer/grafen se vyznačují vynikajícími mechanickými, tepelnými, bariérovými a elektrickými vlastnostmi. Zároveň bylo prokázáno, že u některých polymerů může grafen snižovat hořlavost. Zlepšení fyzikálně-chemických vlastností nanokompozitů závisí na distribuci grafenových vrstev v matrici polymeru a na mezifázových vazbách mezi grafenovou vrstvou a polymerní matricí. Mezifázové vazby mezi grafenem a hostitelským polymerem určují konečné vlastnosti grafenem vyztuženého polymerního nanokompozitu. Výraznému rozšíření tohoto materiálu však v současné době brání cenové hledisko.<sup>[30]</sup>

### 2.5.5. Grafit

Grafit je vrstvený materiál na bázi uhlíku, jehož struktura je složena z grafenových vrstev uhlíku a získal velký zájem díky svým výjimečným tepelným, mechanickým a elektrickým vlastnostem. Je termodynamicky stabilní a měkký, přičemž následující vrstvy jsou rovnoběžné se základní rovinou. Vrstvy jsou navzájem spojeny van der Waalsovými silami. Grafit se skládá z uhlíků, které jsou vzájemně hexagonálně vázány kovalentními vazbami s interatomovou separací 0,142 nm a mezivrstvou separací 0,335 nm. Grafit je často modifikován mezi vrstvami, aby se zlepšila jeho disperze v různých polymerních materiálech. Grafit lze rozdělit na dva typy: grafit přírodní a syntetický. Z důvodu rozšíření použití polymerů je začlenění vhodného plniva s požadovanou funkčností nákladově nejefektivnější a nejspolehlivější metodou. Ve srovnání s keramikou a ocelí některé polymery nedosahují požadovaných elektrických, tepelných a mechanických vlastností. Díky jedinečným vlastnostem polymerů, jako je lehkost a tvarovatelnost do různých tvarů, jsou proto vhodnými kandidáty pro různé modifikace. Mezi jinými plnivy se grafit vyznačuje jedinečnými vlastnostmi, jako je vysoká tepelná a elektrická vodivost, nízký koeficient tepelné roztažnosti, výjimečný tepelný odpor, vysoká odolnost proti tepelným šokům, zlepšená tuhost a zvýšená pevnost. Je hojně dostupný a snadno funkcionalizovatelný pro různé aplikace. Tepelná vodivost grafitu a jeho kompozitů má značný význam vzhledem k požadavkům na tepelnou vodivost ve výměnících tepla, deskách plošných spojů, strojích, elektronických zařízeních a mnoha dalších aplikacích.<sup>[31]</sup>

### 2.6. Vodivé polymery

Vodivé polymery (CP) jsou uznávány jako třída organických materiálů s jedinečnými elektrickými a optickými vlastnostmi podobnými vlastnostem anorganických polovodičů a kovů. Vodivé polymery lze syntetizovat pomocí jednoduchých, univerzálních a cenově



efektivních postupů. Mohou být snadno sestaveny do supramolekulárních struktur s multifunkčními schopnostmi pomocí jednoduchých elektropolymerizačních procesů. Byla vyvinuta různorodá řada metodik pro modifikaci a vyladění CP pro jejich integraci a propojení do biomedicínských aplikací, včetně biomateriálů a biosenzorů. Tyto nové inovace jsou vyhledávány v různých oblastech biomedicíny, jako je bioinženýrství, regenerativní medicína a biosenzory, protože by mohly potenciálně položit základ pro budoucí průlomů. Vodivé polymery prokázaly slibné schopnosti indukovat různé buněčné mechanismy, které rozšiřují jejich jedinečné aplikace v biomedicínské oblasti. Kromě toho jsou atraktivní pro různé biomedicínské aplikace díky své inteligentní reakci na elektrické pole z různých typů tkání, včetně svalů, pojivové tkáně, epitelu a nervové tkáně. Vodivé polymery se používají ke zvýšení elektrické citlivosti, rychlosti a stability různých biomedicínských zařízení a jejich rozhraní s biologickými tkáněmi. Je známo, že existují různé typy CP, které interagují s biologickými vzorky při zachování jejich biokompatibility; lze tedy očekávat, že CP by mohly být kvalifikovány jako životaschopní kandidáti pro použití v mnoha biologických a lékařských aplikacích. Existuje velké množství CP a jejich klasifikace jsou založeny na jejich typech elektrického náboje, jako jsou delokalizované  $\pi$  elektrony, vodivé nanomateriály a ionty. Pět hlavních typů vodivých polymerů jsou polyacetylen, polythiofen, polypyrol, polyfenylen a polyanilín. Další pozoruhodná aplikace CP je v oblasti elektricky indukovaných cílených systémů uvolňování léčiv. Elektrický potenciál aplikovaný na kmenové buňky nebo zralé buňky může stimulovat jejich adhezi, růst, migraci a diferenciaci.<sup>[32]</sup>

## 2.7. Vodivá plniva na bázi kovů

Vodivé plasty se používají v různých aplikacích v elektrických, elektronických, komunikačních a počítačových zařízeních. Pro získání vhodných vodivých vlastností pro tyto aplikace je možné použít kovová plniva, jako je hliník, nikl, měď, stříbro, pokovené sklo a další, které dodávají výslednému kompozitu vlastnosti kovů. Mezi nejčastěji používaná kovová plniva patří ocelová vlna, ocelová vlákna, stříbrné částice, měděná vlákna a různé kovové prášky. Polymery získávají nejen zvýšenou elektrickou vodivost, ale zároveň i tepelnou vodivost a zvyšují se mechanické vlastnosti. Často se ke kovovým plnivům navíc přidávají magnetické částice ke zlepšení mikrovlnné a vysokofrekvenční absorpce.<sup>[33]</sup> Typickým příkladem využití kovových plniv jsou stínící kompaundy elektromagnetického záření na bázi nerezavějících ocelových vláken. Lze je dodávat jako masterbatch a přidávat je v nízkých úrovních, což zajišťuje minimální účinek na barevnost a zpracovatelnost. Sloučeniny nejsou abrazivní a lze je pigmentovat. Intenzitu stínění 50 dB je možné dosáhnout přidáním 1 %

objemových vláken. Růst tzv. „clean room“ technologie pro výrobu a balení produktů, jako jsou lékařské přístroje a léčiva, byl faktorem jejich zvýšeného používání.<sup>[34]</sup>

## 2.8. Elektricky vodivé plastové kompaundy

V některých aplikacích dodává elektrická vodivost plastového materiálu významnou hodnotu a užitečnost. Například zvýšená elektrická vodivost plastů umožňuje elektrostatické lakování nárazníků automobilů, snižuje usazování prachu na předmětech pro domácnost, usnadňuje výrobu některých typů plastových fólií, snižuje tzv. „telescoping“ efekt nebo umožňuje vytváření a skladování statické elektřiny. Elektricky vodivé plastové směsi se používají jako oplášťování pro přenosové kabely vysokého výkonu a ke snížení indukovaných proudů z blízkých kabelů. Kromě toho se elektricky vodivé plastové kompaundy používají pro stínění citlivých elektronických součástek.

U plastů jsou popsány tři oblasti elektrické vodivosti:

- Antistatická
- Elektrostatická disipace (ESD)
- Elektromagnetické stínění (EMI)

Antistatické plastové materiály vykazují povrchový odpor  $10^{12}$ – $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ . V oblasti ESD se pohybují plastové materiály, ve kterých vodivá přísada předává dostatečné množství vodivosti plastům a tím sníží jejich povrchový měrný odpor na rozsah  $10^6$ – $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ . Povrchový měrný odpor EMI materiálů je pod  $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ .

Pro dosažení antistatické úrovně se používají antistatické přísady jako jsou např. stearany. Plastové materiály s elektrickou vodivostí v oblasti ESD se vyrábějí kompaundací plastů se sazemí a dalšími speciálními přísadami jako jsou CF, CNT, grafen. Pro přípravu plastového materiálu s elektrickou vodivostí v oblasti EMI jsou zapotřebí kovové prášky nebo dráty.

Vodivost plastových sloučenin ovlivňuje řada faktorů, včetně vlastní vodivosti plastu, úrovně dosažené disperze, vnitřní vodivosti přísady a elektrický potenciál. Antistatické sloučeniny zvyšují povrchovou vodivost plastu absorpcí molekul vody na povrch materiálu, kdy jsou vzájemně propojeny vodíkovými můstky. Elektrostaticky disipativní plastové materiály obvykle využívají jako aktivní složku saze a vodivosti je dosaženo tvorbou vodivých můstků přes tzv. „vodivou zónu“ překrývajících se elektronových struktur, což umožňuje přenos

elektronů. Pro vytvoření vodivých můstků pro elektrony je zapotřebí dostatečného množství sazí v matrici polymeru.<sup>[35]</sup>

### 3. Recyklace

Recyklace je využití a přepracování odpadních materiálů pro jejich opětovné použití. Základními fázemi recyklace jsou sběr odpadních materiálů, jejich zpracování a v případě mechanické recyklace prodej recyklovaných výrobků. Typické materiály, které se recyklují, zahrnují železný a ocelový šrot, hliníkové plechovky, skleněné lahve, papír, dřevo a plasty. Recyklované materiály slouží jako náhražky surovin získaných z vzácných přírodních zdrojů, jako je ropa, zemní plyn, uhlí, minerální rudy a stromy. Recyklace může pomoci snížit množství pevného odpadu ukládaného na skládky, které jsou stále dražší. Recyklace také snižuje znečištění ovzduší, vody a půdy v důsledku likvidace odpadu.

Existují dva typy recyklačních operací: interní a externí. Interní recyklace je opětovné použití ve výrobním procesu materiálů, které jsou odpadním produktem tohoto procesu. Tento druh odpadu označujeme jako „technologický odpad“. Interní recyklace je běžná například v kovozpracujícím průmyslu. Výroba měděných trubek vede k určitému množství odpadu ve formě konců trubek a odřezků; tento materiál je přetaven a přepracován. Jiná forma vnitřní recyklace se objevuje v lihovarském průmyslu, kde se po destilaci sušená obilná kaše suší a zpracovává na jedlou potravu pro dobytek.

Externí recyklace je zpětné získávání materiálu z produktu, který byl opotřebený nebo zastaralý. Tento druh odpadu označujeme jako „užitný odpad“. Příkladem externí recyklace je sběr starých novin a časopisů pro rozvlákňování a výrobu nových papírových výrobků. Hliníkové plechovky nebo skleněné lahve jsou dalšími příklady každodenních předmětů, které jsou externě recyklovány v širokém měřítku. Tyto materiály jsou shromažďovány jednou z hlavních metod:

1. Domácnosti a podniky třídí své odpadní materiály a ukládají je do správného kontejneru určeného ke sběru centrální agenturou.
2. Společnosti zabývající se recyklací nakupují odpadní materiály, které byly tříděny a dováženy spotřebiteli

Společnost se obvykle rozhoduje, zda a kolik recyklovat zejména v závislosti na ekonomických faktorech. Recyklace se stává ekonomicky atraktivní teprve tehdy, když jsou náklady

na přepracování odpadu nebo recyklovaného materiálu nižší než náklady na likvidaci materiálů nebo na zpracování nových surovin.<sup>[36]</sup>

### 3.1. Ekologické aspekty recyklace

Recyklační procesy vyžadují k provozu energii a neprobíhají bez emisí. Ve srovnání s výrobou materiálů z primárních zdrojů však recyklace spotřebuje podstatně méně energie a produkuje méně škodlivých emisí. Základním důvodem tohoto rozdílu je, že recyklace obvykle zahrnuje pouze mechanickou a fyzickou manipulaci s hmotou (drcení, přemísťování, tavení), která obvykle vyžaduje o jeden až dva řády méně energie než chemická manipulace zapojená do primární výroby (syntéza). Není však jednoduché určit, zda je recyklace v konkrétní situaci prospěšná. Hliník představuje typický příklad: známé tvrzení, že recyklace hliníku „vyžaduje pouze 5 % energie primární výroby“, se vztahuje pouze na krok opětovného tavení (skutečná hodnota je téměř dvojnásobně vysoká). Srovnání navíc ignoruje skutečnost, že u mnoha materiálů při výrobě nejsou primární a sekundární materiály oddělené, ale úzce spojené. Například při výrobě recyklovaných plastových materiálů se často k recyklátu přidává primární materiál pro zvýšení kvality recyklátu. Naopak při využití primárního materiálu se často využívá recyklát pro snížení ceny výrobku.<sup>[37]</sup>

### 3.2. Recyklace plastových materiálů

Recyklaci plastových materiálů dělíme na tři základní skupiny: mechanická recyklace, chemická recyklace a energetická recyklace. Mechanická recyklace plastů se týká zpracování plastového odpadu na druhotnou surovinu nebo výrobky, aniž by došlo k významné změně chemické struktury materiálu. V zásadě lze všechny druhy termoplastů mechanicky recyklovat s minimálním nebo žádným zhoršením kvality. V současné době se jedná o hlavní formu recyklace v Evropě.<sup>[38]</sup> Plastové materiály jsou recyklovány interním i externím způsobem.

Externí recyklace plastů, jak již bylo naznačeno v úvodu této kapitoly zabývající se recyklací, je problematická zejména kvůli problému s tříděním plastů. Pro získání kvalitního plastového recyklátu je potřeba získat jednodruhový plastový materiál s minimem kontaminací. Třídění plastů z komunálního odpadu (mísení velkého množství různých druhů plastových materiálů) je obvykle neefektivní a časově a ekonomicky náročné. Využití pro vícedruhové materiály (s výjimkou blendů) je pak výrazně užší. Dalším výrazným problémem při recyklaci plastového odpadu je špatná recyklovatelnost některých výrobků. Jedná se zejména o výrobky, ve kterých je plastový materiál kombinován s jiným materiálem. Typickým příkladem takových výrobků

je tetrapak (nápojové kartony), elektronické zařízení (počítačová klávesnice, myš), plastové díly s kovovými inserty atd. Recyklace takových výrobků na plastové materiály je obvykle možná, ale vysoce ekonomicky neefektivní. Zároveň existuje velké množství materiálů, které lze externí recyklací zpracovat velmi efektivně např. stará PVC okna nebo polypropylenové hračky.

Interní recyklací se nejčastěji, jak již také bylo naznačeno v úvodu této kapitoly zabývající se recyklací, získávají vysoce kvalitní recyklované plastové materiály. Při zpracovávání plastů, zejména vstřikováním, např. v automobilovém průmyslu, dochází ke vzniku velkého množství nekvalitních výrobků, které neprojdou výstupní kontrolou. Takové výrobky jsou poté obvykle drceny a opět využity danou zpracovatelskou společností nebo jsou prodávány do specializovaných firem zabývajících se recyklací plastových materiálů. Tyto specializované firmy pak z recyklátů vyrábějí regranuláty nebo kompaundy, které mohou mít velmi specifické vlastnosti. Vlastnosti takových materiálů mohou být velmi podobné primárním materiálům, ačkoliv za výrazně nižší cenu.<sup>[36]</sup>

Chemickou recyklací se rozumí proces, kdy dochází ke změně chemické struktury plastového odpadu. Při chemické recyklaci je materiál štěpen na kratší molekuly pro následné použití při nových chemických reakcích. Například procesy jako zplyňování a pyrolýza rozkládají plastový odpad za produkce syntézního plynu (syngas) a dalších kapalných a polotekutých produktů. Kromě toho se vyvíjejí nové depolymerizační procesy, které přeměňují některé typy plastů zpět na monomery pro výrobu nových primárních plastů. K efektivnímu rozkladu na monomery však dochází pouze u minimálního množství plastů (např. polyoxymethylen).<sup>[38]</sup> Chemická recyklace plastů je doplňkovou technologií, která může pomoci odklonit určitý plastový odpad ze skládek, který nelze udržitelným způsobem recyklovat mechanickými procesy. Příklady vhodných materiálů pro chemickou recyklaci zahrnují laminované plasty, kompozitní plasty a kontaminované plasty.<sup>[38]</sup>

Energetické využití je cennou alternativou pro odpadní frakce bohaté na plasty, které nelze udržitelně recyklovat. Některé plasty nemohou být recyklovány ekologicky efektivním způsobem z důvodů, jako jsou: množství, čistota, složení, tržní požadavky na kvalitu a normy, nedostupné třídící technologie. U těchto plastů je přeměna na energii nejúčinnějším dostupným řešením ve srovnání se skládkováním nebo dokonce s nucenou recyklací. Moderní kombinovaná zařízení na získání tepla a elektřiny mohou využívat odpadní plasty spolu s dalšími vstupními materiály. To poskytuje cenný zdroj tepla a energie, který může

představovat až 10 % energetické potřeby některých zemí EU. Všechny procesy energetické recyklace využívají pouze nejlepší dostupnou technologii k zajištění jejich bezpečné, ekologické a efektivní instalace.<sup>[38]</sup>

Plasty tvoří téměř 10 % hmotnosti obsahu komunálního odpadu. Plastové obaly a další výrobky pro domácnost se stále více recyklují a stejně jako papír musí být před zpracováním tříděny. Zejména termoplasty lze znovu tepelně tvarovat a vyrábět z nich nové výrobky. Termoplasty je třeba před přetavením roztrždit podle typu. Naproti tomu termosetové plasty, jako jsou polyuretanové a epoxidové pryskyřice, nelze přetavovat; obvykle jsou broušeny nebo drceny pro použití jako plniva nebo izolační materiály.<sup>[36]</sup>

### 3.2.1. Třídění plastů

Důvod, proč je nutné od sebe třídít termoplasty a termosety je zcela zjevný, jelikož termosety není možné znovu přetavit na rozdíl od termoplastů. Nicméně jednotlivé termoplasty jako např. PP, PET, PVC je také třeba oddělit před zpracováním. V případě hromadné recyklace plastových materiálů dochází ke vzniku směsi s často velmi špatnými mechanickými vlastnostmi. Důvodem je rozdílné chemické složení polymerů, které může způsobovat špatnou mísitelnost. Místo získání jediné polymerní směsi s jednou sadou vlastností, by se směs skládala z velkého množství oblastí s různými polymery, které nejsou vzájemně nijak vázány. Proto je pro dobré vlastnosti materiálů nutná separace.<sup>[39]</sup>

Proces přípravné separace zahrnuje např. následující počáteční procesy třídění materiálu:

- proces ručního oddělování: odstraňování fólií, lepenky a objemných předmětů,
- proces zmenšení velikosti: drcení nebo řezání,
- síta, třídění pomocí vzduchu a proces balistické separace: odstraňování malých, lehkých nebo 2D kusů, jako jsou filmy a papír, a těžkých kousků, jako je sklo a kameny,
- proces magnetické separace: odstraňování železných kovů,
- proces separace pomocí vířivých proudů: odstraňování neželezných kovů, např. hliník,
- optické oddělení počátečních materiálů: odstranění 2D položek, jako je papír a karton z 3D předmětů, jako jsou kontejnery,
- proces indukční separace: odstranění kovů z proudu plastů,

Celkovým cílem těchto procesů je jednoduše snížit množství kontaminací v plastu, jako jsou kovy, sklo, jiné druhy polymerů a jiné nečistoty (např. olej, zemina, kameny a někdy mrtvá zvířata) a také přísady v plastové matici.<sup>[40]</sup>

Technologie separace polymerů jsou převážně automatizované technologie třídění obvykle spojené se třemi základními aspekty: dopravník, snímač/regulátor a pneumatický systém. Každý automatizovaný systém má na svém konci namontovaný dopravník se senzorem, který analyzuje materiály do něj vložené. Informace z analýzy se odešlou do počítačového systému, který určuje, jak bude materiál tříděn. Pneumatický systém odděluje materiály do požadovaných toků. Proces třídění polymerů může zahrnovat vlastní dílčí procesy, např:

- proces zmenšování velikosti: drcení nebo řezání,
- proces čištění plastů: mytí a sušení plastů,
- optická separace polymerů: dělení polymerů podle typu a barvy,
- separace na základě rozdílné hustoty: dělení polymerů na základě jejich hustoty.

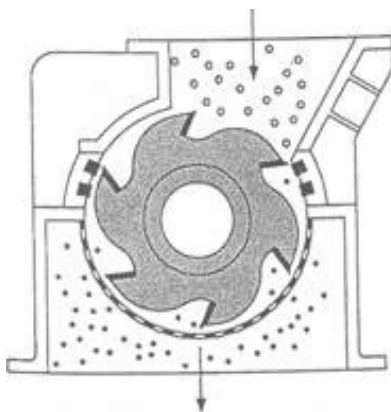
Pro separaci polymerů jsou výlučně specifické optické, hustotní a elektrostatické oddělovací techniky, v závislosti na vstupním materiálu, požadovaném výstupním proudu, jeho čistotě a požadavku na úroveň kvality. Technologie třídění/separace polymerů zahrnují širokou škálu možností včetně nejmodernějších a vyspělých technologií, jako jsou: sink-float, flotace, hydrocyklon, centrifugace, triboelektrostatická a elektrostatická separace, střední infračervená termografie, analýza barev/viditelné třídění, blízké infračervené záření, energeticky disperzní rentgenová fluorescence, Ramanova spektroskopie atd.<sup>[40]</sup>

### 3.2.2. Drcení plastů

Drtiče a mlýny jsou schopné zpracovat plastový odpad na plastovou drť použitelnou pro nové aplikace nebo další úpravy (regranulace). Odpady, vznikající při zpracování plastů lze dělit na technologické a užité odpady. Technologické plastové odpady jsou zejména vtokové systémy, vadné výlisky a odstříky. Výrobci plastových dílů technologický odpad buď prodávají společností specializujícím se na výkup a zpracování plastového odpadu, nebo si ho sami recyklují a recyklát přidávají k primárnímu materiálu pro snížení ceny a efektivní využití odpadu. Užité odpady představují výrobky po skončení své funkční doby. Užité odpady vykazují velmi často horší kvalitu, je znečištěn a daný polymer je více či méně znehodnocen stárnutím.

Použití pouze drceného materiálu je obvyklé u tepelně citlivých materiálů (nejsou znovu tepelně namáhány). Nevýhodou je nerovnoměrná velikost drtě a zvýšený obsah plastového prachu. Tuto nevýhodu lze odstranit použitím vhodných sít, pomalým mletím anebo odsáváním prachu. Pro drcení plastového odpadu se používají různé typy mlýnů (kladivový, třecí, nožový, kulový, atd.) a ke zmenšování rozměrů může docházet různým způsobem (řezem, tlakem, smykem). Pro zvolení způsobu drcení je důležité být obeznámen s fyzikálními vlastnostmi rozměňovaného materiálu, jako je tvrdost a charakter lomu.

Jeden z nejčastěji používaných typů mlýnů je nožový mlýn. Nožový mlýn (Obrázek 6) má několik radiálně uložených nožů kolem rotoru. Další nože jsou umístěné přímo na rotoru. Velikost drtě závisí na velikosti ok síta ve spodní části mlýnu. Využitím nožového mlýnu je možné dosáhnout rovnoměrné velikosti recyklátu s malým množstvím prachu. Další výhodou je konstrukce nožového mlýnu, která umožňuje snadné čištění.



Obrázek 6 Nožový mlýn<sup>[41]</sup>

Dalším druhem často používaného mlýnu je talířový nárazový mlýn. Talířový nárazový mlýn se používá tehdy, pokud je materiál nutné velmi jemně rozemlít na rovnoměrnou zrnitost až 100  $\mu\text{m}$ , která je vhodná např. pro stříkání, fluidní nanášení, apod. Velikost štěrby mezi bočnicemi udává velikost zrna. Nepoužívají se zde síta a nedochází k přehřívání materiálu. Další druhy mlýnů jsou např. nosový a kolíkový mlýn, které se však používají v mnohem menší míře než nožové mlýny. Obvykle jsou využívány pro mletí měkkého odpadu.<sup>[41]</sup>

Speciálním způsobem drcení polymerů je tzv. kryomletí. Používá se tehdy, pokud je materiál příliš měkký, má nízkou  $T_m$  nebo vysokou elasticitu. Materiál je silně podchlazen zkapalněnými plyny, jako jsou dusík, vodík, oxid uhličitý, kdy po zmrazení je křehký a snadno se rozdrť. Jedná se o metodu, která je relativně mladá, avšak velmi efektivní.<sup>[42]</sup>

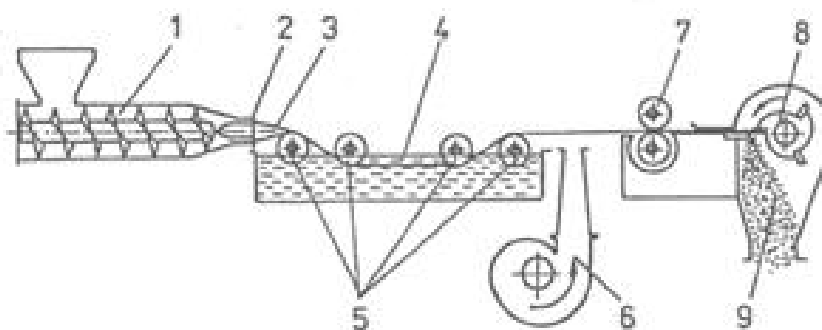


### 3.2.3. Regranulace plastů

Regranulace plastového recyklátu je proces, při kterém dochází k formaci recyklovaného plastového materiálu do rovnoměrně velkých granulí. Regranulací se zároveň výrazně snižuje podíl plastového prachu v materiálu. Při regranulaci je možné k plastovému materiálu přidávat aditiva (stabilizátory, plniva, maziva, barviva, apod.) pro zlepšení užitných a zpracovatelských vlastností. Nevýhodou regranulace je nutnost dokonalého vysušení drtě většiny plastů a energetická náročnost. Granule mají obvykle tvar válečků, čoček, krychliček nebo kuliček.

Granulační metoda je vybírána v závislosti na ekonomii, prostoru, vlastnostech zpracovávané taveniny nebo na požadovaném výkonu. Jedna ze starších technologií je granulace z pásu. Tato metoda je poměrně málo produktivní a není vhodná pro tvrdé materiály. Principem je rozřezání materiálu na proužky, které jsou rozsekány na granule.

Častěji používané metody jsou založené na extruzi strun s jejich následnou granulací. Tyto metody dělíme na granulaci za tepla a za studena. Při granulaci za studena (Obrázek 7) je polymerní tavenina vytlačována přes vytlačovací hlavu, která taveninu formuje do tvaru určitého počtu strun. Horké struny jsou chlazeny ve vodní lázni. Za vodní lázní se nachází sušící zařízení např. ve formě horkého vzduchu a poté jsou struny navedeny do granulovacího zařízení s noži, které struny seká na granule o požadované velikosti. Nevýhodou je nebezpečí praskání a slepování jednotlivých strun.<sup>[41]</sup>



Obrázek 7 Granulace za studena:

- 1 – šnekový vytlačovací stroj; 2 – granulační hlava; 3 – struny; 4 – chladicí kapalina; 5 – vodící válečky; 6 – ventilátor; 7 – podávací vlečky; 8 – nože; 9 – granule<sup>[41]</sup>

Při granulaci za tepla nejsou vytlačovány struny. Namísto toho jsou granule seřezávány přímo z čela granulační hlavy s mnoha otvory.

### 3.2.4. Kompaundace plastového recyklátu

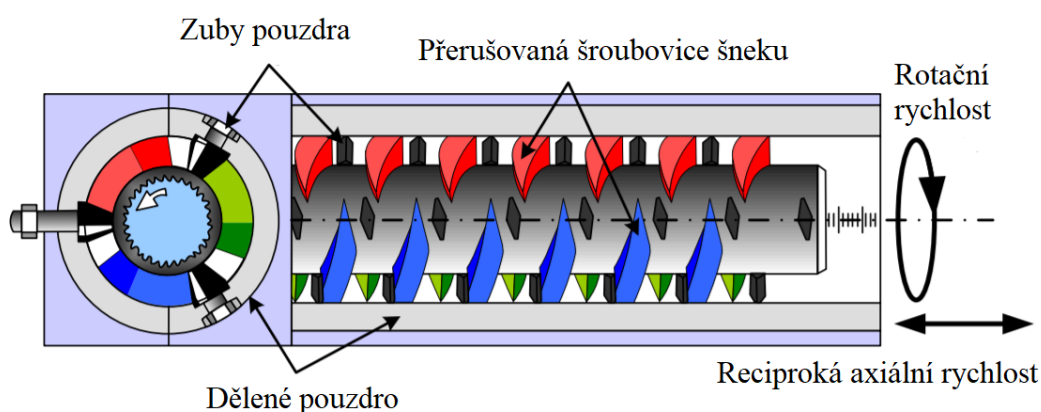
Při procesu regranulace je k plastovému materiálu možné přidávat různá aditiva. Tímto způsobem jsou společnosti schopny vyrábět kvalitní recyklovaný kompaund s garantovanými vlastnostmi v určitém rozsahu a obchodním názvem. Kompaundace se používá jako snadný a ekonomický způsob začlenění přísady, které usnadňují zpracování nebo dodávají různým výrobkům užitečné vlastnosti. Při polymerním míchání jsou tendence modifikovat polymer, aby se dosáhlo specifických vlastností a také se udržovaly fyzikální, mechanické a jiné vlastnosti materiálu.

Kompaundace je tedy proces začlenění přísad, jako jsou stabilizátory, maziva, barviva, levné anorganické chemikálie, tak aby nahradily část polymeru v materiálu bez zhoršení mechanických vlastností a charakteristiky zpracování. Tímto způsobem lze ekonomiku materiálu podstatně zlepšit. Naopak při výrobě kompaundu z recyklovaného materiálu je možné k recyklátu přidávat primární materiál, který zvýší cenu materiálu, ale zlepší jeho vlastnosti. Kompaundace může zlepšit zpracování materiálu zkrácením výrobního cyklu a snížením plastového odpadu. Začlenění správné přísady do směsi může vést ke zlepšení požadované vlastnosti, jako je elektrická a tepelná vodivost, schopnost elektromagnetického stínění, reologické chování, hořlavost, UV stabilita, zvětrávání, fyzikální zesíťování, povrchová aktivita, adsorpční charakteristiky a bariérové vlastnosti.<sup>[43]</sup>

Pro technologii kompaundace je stěžejní míchání. Míchání lze rozdělit na disperzní a distributivní. Míchání označujeme za disperzní tehdy pokud dochází ke změně tvaru a velikosti částic. Změna velikosti částic je obvykle způsobena smykovými a tlakovými silami. Pomocí distributivního míchání je dosaženo homogenity směsi bez výrazné změny velikosti částic, přičemž poměr jednotlivých komponentů je v každém místě stejný. Hnací silou změny polohy částic je intenzita rotace materiálu v míchací komoře a celkový počet otáček aplikovaných na jednu dávku. K míchání dochází především během procesu tavení. Tavenina vzniká mezi stěnou válce a tuhým lože. Směšovací mechanismy se dělí na extenzivní a disperzní (intenzivní). Míchání velmi viskózních polymerních systémů je do značné míry dosaženo tokem, který může mít laminární nebo distribuční charakter.<sup>[43,44]</sup>

Míchání při kompaundaci nejčastěji zajišťují kontinuální mixéry. Kontinuální mixéry jsou stroje vycházející ze šnekového extrudéru. Na rozdíl od konvenčních extrudérů mají výrazně vyšší míchací účinnost, které dosahují zařazením různých bariér a hnětacích elementů, čímž dochází k výraznému zvýšení smykového namáhání. Kompaundační extrudér má drážkované

pouzdro, jenž je rozdělené do více sekcí o rozdílných průměrech a hloubkách drážek. Drážky pouzdra jsou pro zlepšení míchacího účinku extrudéru orientovány opačně vůči závitům šneku. Vlivem drážek dochází k opakovanému přenosu materiálu ze šneku na pouzdro a vzniku vírů. S každým přenosem taveniny mezi pouzdrem a šnekem extrudéru dochází ke změně směru toku taveniny. Kompaundační extrudér obvykle zahrnuje tzv. evakuační zónu sloužící pro odstranění plynů a přebytečné vlhkosti z taveniny a bývá zakončen širokou kónickou sekcí s proměnnou intenzitou míchání. Pro kontinuální kompaundaci je také možné využít hnětiče. Tento způsob není v recyklaci příliš používaný. Nevýhodou hnětičů je pulzace materiálu způsobená axiálně oscilačním pohybem šneku. Pro vyrovnání pulzace je nutné přidat kolmo na hnětič extrudér s krátkým šnekem.<sup>[46]</sup>



Obrázek 8 Schématický obrázek KO hnětiče <sup>[50]</sup>

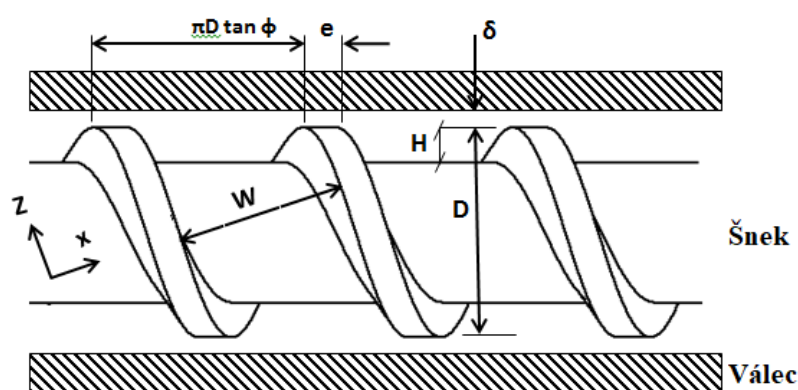
Pro kompaundaci recyklovaných plastových materiálů se běžně využívají dvoušnekové extrudéry.

### 3.2.5. Extruze

Extruze je kontinuální proces, při kterém je plastická tavenina vytlačována přes vytlačovací hlavu, jenž udává tvar vytlačované hmoty, do volného prostoru. Extruze je vykovávána pomocí strojů zvaných extrudéry neboli vytlačovací stroje. Jednou z nejdůležitějších částí je šnek extrudéru. Podle počtu šneků se extrudéry nejčastěji dělí na jednošnekové a dvoušnekové. Šnek extrudéru je vřeteno se závitem, jehož stoupání se obvykle zvyšuje po délce šneku. Stoupání závitů se může velmi lišit v závislosti na typu šneku. Úhel stoupání je nejčastěji  $17,66^\circ$  a v závislosti na typu šneku se pohybuje mezi  $12^\circ$  až  $20^\circ$ .

Základními charakteristiky šneku (Obrázek 9) jsou:

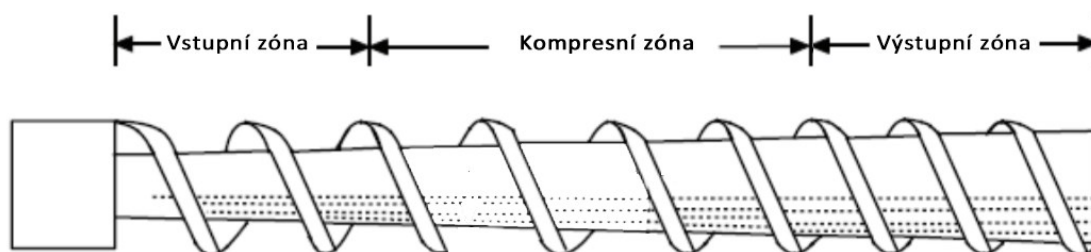
- poměr  $L/D$  (Poměr délky ku průměru),
- kompresní poměr - poměr hloubky závitů na začátku šneku ku hloubce závitů na konci šneku,
- úhel šroubovice (stoupání),
- vzdálenost mezi závitů šroubovice.



Obrázek 9 Charakteristiky šneku<sup>[47]</sup>

Pro samotné extrudéry je významnou charakteristikou také hloubka válce. Typický  $L/D$  poměr jednošnekových extrudérů se pohybuje mezi 15:1 a 30:1 a kompresní poměr mezi 2:1 a 5:1. Šneky jsou obvykle vyráběny z vysoce chemicky odolné oceli.<sup>[48]</sup> Šnek extrudéru slouží zejména k dopravě materiálu. Vlivem klesající hloubky válce dochází k nárůstu tlaku v tavenině. Prostřednictvím sil viskózního tření dochází k míchání jednotlivých proudů taveniny. Pro zvýšení homogenity toku se do šneku přidávají různé míchací elementy (vločky). Extrudéry lze v ose postupu dělit na 3 základní zóny (Obrázek 10). Vstupní zóna extrudéru je zásobována materiálem z násypky. Jejím úkolem je dávkovat vytlačovací stroj požadovaným množstvím materiálu bez fluktuací. Kanál ve vstupní zóně je většinou hluboký tak, aby pojal co největší množství materiálu. Intenzita dopředného pohybu je dána tzv. třecími poměry mezi materiálem, šnekem a válcem. Maximální výkon je dán minimálním třením mezi materiálem a šnekem (leštěný povrch) a maximálním třením mezi materiálem a válcem (zdrsněný povrch, chlazení pod násypkou, drážkování válce). Kompresní (těž tavící, přechodová) zóna slouží k postupnému přitlačování polymerního materiálu k vyhřívané stěně válce. V kompresní zóně hloubka kanálu klesá a dochází k tavení materiálu. Na stěně válce extrudéru vzniká film taveniny, který je sbírán žebrem závitů po dosažení vyšší tloušťky, než je mezera mezi šnekem

a válcem. Tento proces způsobuje vysoké tření, které zvyšuje disipaci materiálu. Výstupní zóna slouží k dopravě a míchání taveniny. Ve výstupní zóně dochází k protlačení taveniny ven z extrudéru přes trysku. Výkon vytlačovací stroje je dán všemi třemi zónami. Tlakový vzrůst na začátku vstupní zóny má největší vliv na výkon extrudéru. Průběh tlaku závisí také na geometrii šneku a typu použitého materiálu.<sup>[49,46]</sup>



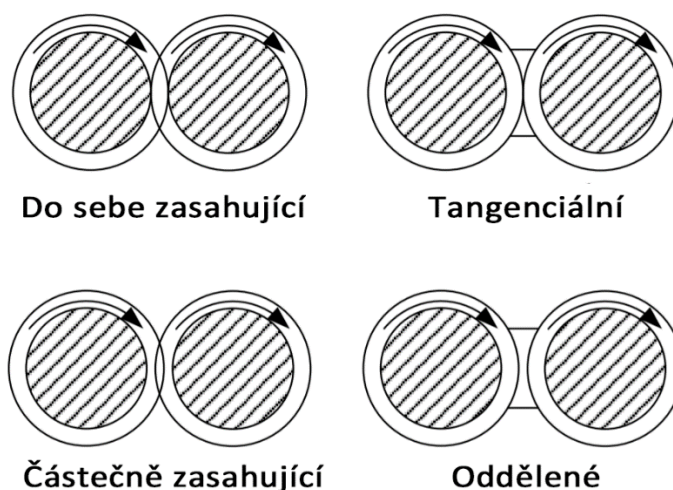
Obrázek 10 Šnek s vyznačenými zónami<sup>[46]</sup>

### 3.2.6. Jednošnekové extrudéry

Jednošnekové extrudéry jsou nejběžnějším typem extrudérů pro zpracování polymerů, které však nevykazují dostatečný míchací účinek pro kompaundaci materiálů. Ke zvýšení výkonnosti míchání je zapotřebí zvětšit průměr šneku nebo počet otáček, popřípadě přidat do šneku míchací vložku, což vede ke zvýšenému tření a smykovému namáhání materiálu.<sup>[46]</sup>

### 3.2.7. Dvoušnekové extrudéry

Dvoušnekové extrudéry dosahují vyšší efektivity míchání a při dopravě materiálu dochází k výrazně nižšímu tření. K dispozici jsou různé typy dvoušnekových extrudérů, které se vzájemně liší konstrukčními a provozními principy. Dvoušnekové extrudéry lze klasifikovat podle směru rotace (Obrázek 11). Pokud se oba šneky otáčejí ve stejném směru, je extrudér označován za souběžný dvoušnekový extrudér. Pokud se šneky otáčejí v různých směrech, je extrudér označován za protiběžný dvoušnekový extrudér. Protiběžné dvoušnekové extrudéry vykazují nižší míchací efektivitu než souběžné, ale vytvářejí strmějšího nárůst tlaku podél šneku. Souběžné extrudéry pracují při výrazně vyšších otáčkách než protiběžné, což klade větší nároky na motor, ale dosahují zároveň větších vytlačovacích výkonů. Typy dvoušnekových extrudérů se dále dělí na základě vzdálenosti mezi jednotlivými šneky na oddělené, tangenciální, částečně do sebe zasahující nebo zcela do sebe zasahující.



Obrázek 11 Dělení dvoušnekových extrudérů podle vzdálenosti mezi šneky<sup>[50]</sup>

Konstrukce extruderu závisí dále na aplikaci. Každý extrudér má jiné funkční charakteristiky, jako je propustnost, směšovací kapacita, vývoj tlaku, zdržná doba atd. Do dvoušnekových extrudérů se velmi často přidávají míchací elementy, které zlepšují míchací efektivitu, podobně jako u jednošnekových extrudérů. Dvoušnekové extrudéry pro využití při regranulaci, velmi často obsahují evakuační zónu pro odstranění přebytečné vlhkosti a plynů. Nejvíce používaným typem jsou souběžné extrudéry s do sebe zasahujícími šneky. Tyto jsou široce používány díky flexibilitě při výběru šneku, efektivnímu míchání (nejlepší pro distribuční míchání) a efektu samočištění.<sup>[50]</sup>

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

#### 4. CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Praktická část této diplomové práce se zabývá především výběrem ideálního typu a poměru vodivých sazí pro výsledný vodivý ABS kompaund. Cílem diplomové práce pak bylo vytvoření kvalitního vodivého kompaundu z recyklovaného ABS materiálu (Tabulka 2) s rezistivitou pohybujícím se okolo  $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$  za co nejvyššího zachování mechanických vlastností. Bylo vybráno více druhů sazí od různých společností s odlišnou cenou a parametry (Tabulka 3). Akrylonitrilbutadienstyren recyklát byl nejdříve míchán v různých poměrech s jednotlivými typy sazí. Směsi s hodnotami rezistivity blízkými požadovaným byly následně kompaundovány ve dvoušnekovém extrudéru. Výsledné kompaundy byly porovnávány na základě mechanických vlastností, tepelných vlastností, elektrických vlastností a ceny.



## 5. Metodika

### 5.1 Použité materiály

Jako polymerní matrice byla využita recyklovaná drť ABS. V Tabulce 2 jsou zobrazeny základní, k práci relevantní vlastnosti. Pro dosažení požadované hodnoty rezistivity byly k této matici přimíchávány různé druhy vodivých sazí (Tabulka 3) o různých koncentracích.

Tabulka 2 Materiálové vlastnosti recyklovaného ABS materiálu

Materiál	MFI [g/10 min]	El. odpor [Ω]	Vrubová houževnatost [kJ/m <sup>2</sup> ]	Youngův modul [MPa]	VICAT [°C]	HDT [°C]
ABS	6,86	2,07E+12	10,1	1507	111,9	88,6

Tabulka 3 Vybrané saze a porovnání jejich základních vlastností (hodnoty získány z materiálových listů)

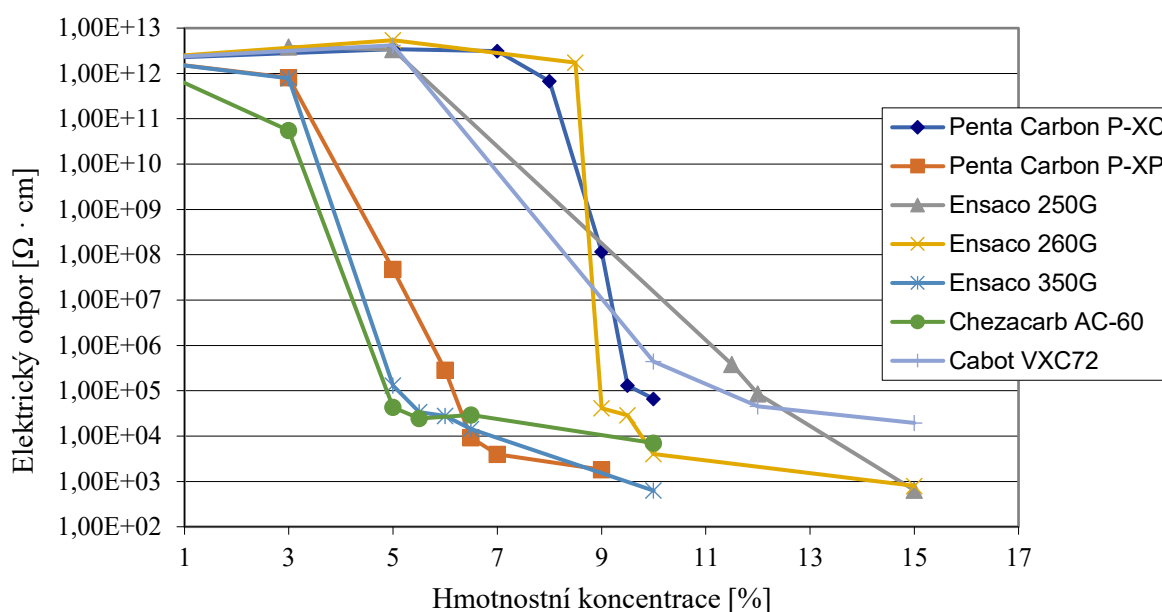
Výrobce	Typ sazí	Měrný elektrický odpor [Ω.cm]	Sypná hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	BET měrný povrch [m <sup>2</sup> /g]	Cena
Penta Carbon	P-XP	max.10	min.115	240-280	25,13 €
Penta Carbon	P-XC	max.50	min.115	240-280	12,56 €
Penta Carbon	P-105	Max.150	360	135	3,63 €
Unipetrol	Chezacarb AC 60	max. 80	min. 112	min. 800	8,10 €
Cabot	Vulcan XC 72	-	200-680	-	11,80 €
Cabot	Vulcan XC605	-	200-680	-	9,30 €
Imerys	ENSACO 250G	max. 10	180	65	5,93 €
Imerys	ENSACO 260G	max. 10	170	70	7,10 €
Imerys	ENSACO 350G	-	135	770	19,39 €

### 5.2 Příprava směsí

Zásadní pro zjištění ideální koncentrace (hmotnostní koncentrace sazí, při které materiál vykazoval rezistivitu přibližně  $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ ) daného typu sazí bylo určení perkolačního prahu. Jak již bylo zmíněno výše, na měřicím hnětiči značky Brabender, byly připraveny směsi ABS o různých koncentracích každého typu sazí. Rezistivita připravených směsí byla následně měřena na digitálním elektrometru značky Keithley. Koncentrace sazí v ABS kompaundech dále nejsou uváděny s ohledem na vytvořené výrobní tajemství společnosti Maloun s.r.o.

Pro zachování mechanických vlastností materiálu bylo stěžejní zajistit co nejnižší koncentraci sazí v matici. Materiály, které vykazovaly perkolaci až při vyšších koncentracích, byly vyřazovány z výběru a nebylo na nich prováděno další testování. Důvodem je, že vysoké

koncentrace sazí v již plněném recyklovaném materiálu, výrazně snižovaly mechanické vlastnosti konečného produktu.



Obrázek 12 Závislost elektrického odporu směsi na hmotnostní koncentraci sazí

Z naměřených hodnot rezistivity byly vyhodnoceny jednotlivé perkolační křivky (Obrázek 12). Saze typu Ensaco 350G, Chezacarb AC-60 a Penta Carbon P-XP vykazovaly práh perkolace při nejnižších hodnotách koncentrace. Pro výslednou aplikaci se staly tyto materiály nejvhodnější z důvodu potřeby zachování mechanických vlastností výsledného kompaundu. Naopak saze typu Penta Carbon P-XC, Ensaco 250G, Ensaco 260G, Cabot VXC72 nebyly vybrány pro další zkoušky, jelikož dosahovaly prahu perkolace až při vyšších hmotnostních koncentracích. Příliš vysoké hmotnostní koncentrace sazí obecně výrazně snižují mechanické vlastnosti.

### 5.3 Kompaundace

Vybrané typy sazí Ensaco 350G, Chezacarb AC60 a Penta Carbon P-XP byly míchány společně s ABS recyklovaným materiálem v dvoušnekové kompaundační lince Labtech (Obrázek 13). Výsledné směsi byly vytlačovány ve formě strun, které byly chlazeny vodní lázní a sekány na granule malých rozměrů. Na kompaundační lince byl nastaven odpovídající teplotní profil vhodný pro plněné ABS materiály (Tabulka 4):

Tabulka 4 Nastavený teplotní profil vytlačovacího stroje

Zóna	1.	2.	3.	4.	5.	6. (Vytlačovací hlava)
Teplota [°C]	230	225	220	220	220	230



Obrázek 13 Kombinovaný dvoušnekový extrudér (26 mm) <sup>[61]</sup>

## 6. Výsledky

Připravené kompaundy byly převedeny do podoby normovaných tělísek (Obrázek 14), s délkou 7,9 cm, šířkou 0,9 cm a tloušťkou 0,4 cm, technologií vstřikování. Pro porovnání jednotlivých materiálů byly následně zjišťovány mechanické, tepelné a elektrické vlastnosti zkoumaných materiálů. Na základě těchto zkoušek bylo možné vybrat materiál vhodný pro průmyslovou výrobu, který zároveň splňoval nároky zákazníka.



Obrázek 14 Příklad vstřikovaných zkušebních tělísek

### 6.1 Rezistivita

Pro využití připraveného kompaundu v elektrotechnických aplikacích bylo nutné, aby materiál dosahoval určitého elektrického odporu. Pro danou aplikaci zákazníka je nutné, aby materiál disponoval rezistivitou přibližně  $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ . Pro výrazné snížení odporu použitého izolantu (ABS polymer) je nutné vytvořit směs nevodivého materiálu s vodivým materiálem. Pro potřeby této diplomové práce byly použity různé druhy vodivých sazí.

Objemová rezistivita se měří aplikací napěťového potenciálu na protilehlých stranách vzorku a změřením intenzity procházejícího proudu (Norma ASTM D257). Jednotlivé kompaundy byly nejdříve vylisovány do tenkých desek. Následně bylo z desek vyseknuto zkušební tělísko pro změření rezistivity. Jak již bylo zmíněno výše, pro změření rezistivity byl využit digitální elektrometr Keithley 6517B. <sup>[51]</sup>

Jak je patrné z Tabulky 5, pro další analýzu byly vybrány kompaundy obsahující koncentraci sazí zaručující splnění požadavku na rezistivitu tj.  $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ . Nejblíže byl materiál ABS + Ensaco 350G s rezistivitou  $1,5 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ .

Tabulka 5 Srovnání výsledků rezistivity jednotlivých kompaundů obsahujících vybrané saze a neplněného ABS

Typ materiálu	Rezistivita [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]
ABS drť	2,07E+12
ABS + Ensaco 350G	1,51E+4
ABS + P-XP	2,55E+4
ABS + AC-60	1,82E+4

## 6.2 Mechanické vlastnosti

Pro vytvoření kvalitního vodivého kompaundu bylo stěžejní zachovat mechanické vlastnosti plastového ABS materiálu. Saze mají prokazatelně pozitivní vliv na velké množství materiálových vlastností jako jsou např. elektrické vlastnosti, tepelné vlastnosti, stabilizační vlastnosti, avšak mohou mít negativní vliv na houževnatost materiálu, a to především v závislosti na koncentraci sazí, distribuci, velikosti částic nebo jejich povrchu. Při vysoké koncentraci sazí se materiál stává tvrdý, ale velmi křehký. Pro zjištění míry zachování mechanických vlastností při použití daných sazí byly materiály podrobeny rázové zkoušce vrubové houževnatosti, ohybové zkoušce a zkoušce tvrdosti.

### 6.2.1 Rázová zkouška

Zkouška vrubové houževnatosti byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 179-1 Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška na Charpyho kyvadlovém kladivu (15 J).<sup>[52]</sup> Zkušební těleso ve formě normovaného trámce (Obrázek 13) bylo na vrubovacím zařízení opatřeno vrubem typu A a bylo umístěno ve spodní části zařízení naplocho a s podepřením na obou koncích. Nárazová práce vyjadřuje měřítko odolnosti daného materiálu vůči rázovému namáhání. Pomocí rázové zkoušky je tedy zjišťována náchylnost materiálu ke křehkému lomu.<sup>[52]</sup>

Spotřebovaná nárazová práce  $KC$  [J] se vypočítá podle vztahu

$$KC = G(h_1 - h_2) \quad (4)$$

, kde  $G$  [N] je délka tělesa, na které působí napětí,  $h$  [m] udává výškový rozdíl počáteční ( $h_1$ ) a konečné ( $h_2$ ) polohy kladiva<sup>[52]</sup>

Z výsledků rázové zkoušky (Tabulka 6) bylo patrné, že saze poměrně výrazně snižují vrubovou houževnatost. U kompaundu ABS + Chezacarb AC-60, který dosáhl nejnižšího výsledku, byla vrubová houževnatost až o 62,6% nižší než u výchozího ABS recyklátu. Rozdílné vlastnosti a distribuce sazí v jednotlivých kompaundech měla za následek výrazně rozdíly mezi

jednotlivými materiály. Vrubovou houževnatost Charpy původního ABS recyklovaného materiálu nejvíce zachoval kompond ABS + Penta P-XP s výsledkem 6,35 kJ/m<sup>2</sup>.

Tabulka 6 Srovnání výsledků rázové zkoušky jednotlivých materiálů a neplněného ABS

Materiál	ABS drť	ABS + Ensaco 350 G	ABS + P-XP	ABS + Chezacarb AC-60
Měření	Vrubová houževnatost [kJ/m <sup>2</sup> ] – Vrub A			
1	10,04	4,67	6,41	3,85
2	9,49	4,05	6,25	3,68
3	10,21	4,27	6,37	3,83
4	10,63	3,96	6,31	3,8
5	9,44	4,11	6,32	3,53
6	9,89	4,05	5,97	3,88
7	10,26	4,03	7,14	3,98
8	10,85	4,41	6,29	3,85
9	10,77	4,17	6,21	3,81
10	10,2	3,95	6,24	3,81
Průměr	10,1	4,1	6,35	3,8

### 6.2.2 Ohybová zkouška

Ohybová zkouška byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 178 Plasty – Stanovení ohybových vlastností.<sup>[53]</sup> Zkouška slouží k získání informací o chování polymerních materiálů nejčastěji v tříbodovém ohybu. Tento způsob namáhání je pro polymerní materiály velmi častý (nosníky, střešní konstrukce, obkladové materiály a další). Při namáhání v ohybu je napětí maximální v krajních vrstvách a nulové uprostřed. K ohybovým zkouškám se používají zkušební tělesa tvaru trámce, která se umístí na dvě podpěry v předepsané vzdálenosti.<sup>[53]</sup>

Rozpětí podpěr se určí dle následujícího vztahu:

$$L = (16 \pm 1) \cdot \bar{h} \quad (5)$$

, kde  $L$  [mm] je délka rozpětí podpěr,  $h$  [mm] udává nejmenší tloušťku zkušební tělesa v daném průřezu.

Deformace ohybem je poté poměrná změna délky elementu vnějšího povrchu zkušební tělesa uprostřed rozpětí podpěr.

Deformace ohybem je definovaná dle vztahu:

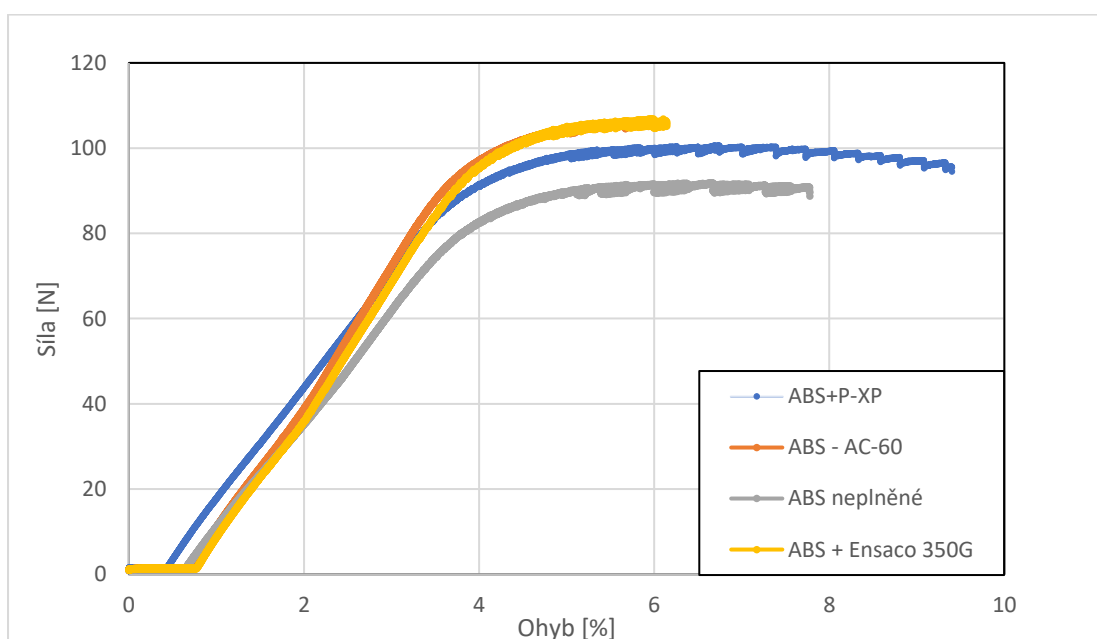
$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \quad (6)$$

, kde  $\varepsilon_f$  je příslušná deformace ohybem, vyjádřená jako bezrozměrné číslo,  $s$  [mm] je průhyb zkušebního tělesa,  $h$  [mm] je tloušťka zkušebního tělesa,  $L$  [mm] je délka rozpětí podpěr.

Modul pružnosti je definován jako poměr napětí a jím vyvolané deformace a pro ohyb jej lze vypočítat dle následujícího vztahu:

$$E_f = \frac{\sigma_{f1} - \sigma_{f2}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (7)$$

, kde  $\sigma_{f1}$  [MPa] je napětí v ohybu, měřené při průhybu  $s_1$ ,  $\sigma_{f2}$  [MPa] je napětí v ohybu, měřené při průhybu  $s_2$ ,  $\varepsilon_{f1}$  [MPa] je deformace v ohybu měřená při průhybu  $s_1$ ,  $\varepsilon_{f2}$  [MPa] deformace v ohybu měřená při průhybu  $s_2$ .<sup>[53]</sup>



Obrázek 15 Graf závislosti síly [N] na průhybu [%]

Tabulka 7 zobrazuje hodnoty síly (z průřezu zkušebních trámů lze přepočítat na napětí) nutné k průhybu zkušebních tělísek o 3,5 %.

Tabulka 7 Síla potřebná k průhybu 3,5 % pro jednotlivé kompaundy a neplněný ABS recyklát

Materiál	Síla při ohybu 3,5 % [N]
ABS drť	77
ABS + Ensaco 350 G	89
ABS + Penta P-XP	85
ABS + Chezacarb AC-60	91

Na rozdíl od vrubové houževnatosti, byly ohybové vlastnosti ABS recyklátu přidáním vodivých sazí zvýšeny. Nejvyšší sílu při průhybu 3,5% vykazoval kompond ABS + Chezacarb AC-60 s výsledkem 91 N (Tabulka 7). Ohybová křivka kompondu ABS + Ensaco 350 G téměř opisovala křivku kompondu ABS + Chezacarb AC-60 (Obrázek 15) a síla při daném průhybu byla také velmi podobná, v tomto případě 77 N. Tabulka 8 prezentuje hodnoty modulu v ohybu pro zkoumané varianty vzorků.

Tabulka 8 Srovnání výsledků ohybového modulu jednotlivých materiálů a neplněného ABS

Materiál	ABS drť	ABS + Ensaco 350 G	ABS + P-XP	ABS + Chezacarb AC-60
Měření	ohybový modul [MPa]			
1	1532	1780	1615	1801
2	1482	1822	1653	1869
3	1509	1842	1510	1869
4	1536	1878	1483	1835
5	1474	1800	1591	1837
<b>Průměr</b>	1507	1824	1570	1842

Nejvyšší hodnoty ohybového modulu (Tabulka 8) vykazoval opět kompaund Chezacarb AC-60, který v ohybových vlastnostech předčil všechny ostatní materiály, ačkoliv vrubovou houževnatost měl z materiálů nejnižší. Naopak ohybové vlastnosti materiálu ABS + Penta P-XP byly nejhorší, ačkoliv předčil veškeré ostatní připravené vodivé kompaundy v rázových vlastnostech.

### 6.2.3 Zkouška tvrdosti Shore D

Zkouška tvrdosti Shore D byla provedena v souladu s normou ČSN ISO 7619-1 Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer – Stanovení tvrdosti vtláčováním – Část 1: Stanovení tvrdoměrem (tvrdost Shore).<sup>[54]</sup> Zkušební vzorky byly připraveny technologií lisování a byly na sebe skládány v počtu 3 tělísek, aby byla dosažena výsledná tloušťka. Metoda je založena na měření hloubky průniku definovaného hrotu vtláčeného do vzorku materiálu za stanovených podmínek. Hloubka vtláčeného hrotu je nepřímo úměrná hodnotě tvrdosti. Tvrdost je měřena za použití tvrdoměru typu A nebo typu D. Zkouška tvrdosti Shore umožňuje měření tvrdosti na začátku vtláčování hrotu anebo po uplynutí stanovené doby.<sup>[54]</sup>

V rámci této práce byla s ohledem na podstatu vzorků a v souladu s uvedenou normou stanovována tvrdost Shore D.

Na zkušební hrot tvrdoměru působí kalibrované pružiny dle vztahu:

$$F = 445H_D \quad (8)$$



, kde  $F$  [mN] je síla vtlačování,  $H_A$  hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem Shore D [54]

Společně s ohybovými vlastnostmi, vodivé saze zvyšovaly také tvrdost Shore D pro jejich kompaundy s recyklovaným ABS. Ze zkoušky tvrdosti vyšel stejně jako v případě ohybových vlastností nejlépe, kompaund ABS + Chezacarb AC-60. Stejným výsledkem se prezentovat také materiál ABS + Ensaco 350G. Ačkoliv měl materiál ABS + P-XP z připravených kompaundů nejnižší tvrdost Shore D, byl nejkonzistentnějším materiálem, jelikož nejvíce zachoval vrubovou houževnatost výchozího ABS recyklátu.

Tabulka 9 Srovnání výsledků tvrdosti Shore D jednotlivých materiálů a neplněného ABS

Materiál	ABS drť	ABS + Ensaco 350 G	ABS + P-XP	ABS + Chezacarb AC-60
Měření	Tvrdost [Shore D]			
1	72	75	74	76
2	73	75,5	75	76
3	72	76	75	77,5
4	72	76	73,5	76
5	71,5	76,5	74	78
Medián	72	76	74	76

### 6.3 Tepelné vlastnosti

Vzhledem k povaze budoucího využití připravených vodivých plastových kompaundů bylo zapotřebí porovnat tepelné vlastnosti materiálů, a především jejich odolnost za vysokých teplot. Pro stanovení odolnosti proti zvýšeným teplotám plastů bylo použito dvou normovaných metod:

- stanovení teploty měknutí podle Vicata,
- stanovení teploty průhybu při zatížení (metoda HDT – Head Deflection Temperature).

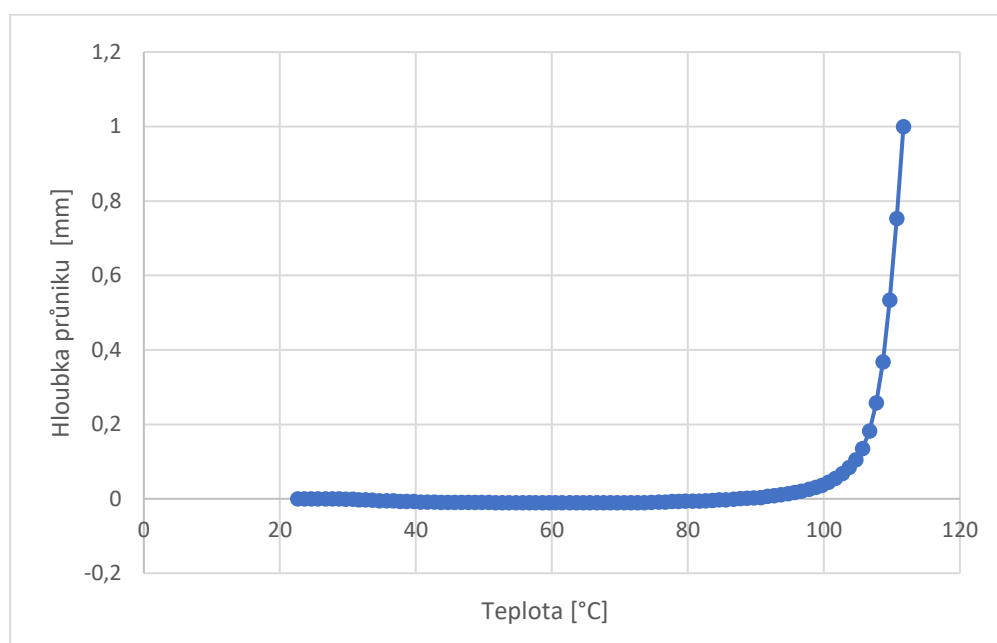
#### 6.3.1 Stanovení teploty měknutí podle Vicata

Zkouška stanovení teploty měknutí byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 306 Plasty – Termoplasty – Stanovení teploty měknutí podle Vicata (VST). [55] Metoda je založena na stanovení teploty, při které jehla kruhového průřezu pronikne pod povrch zkušební tělesa do hloubky 1 mm (ČSN EN ISO 306). Tato teplota se označuje jako VST (Vicat Softening Temperature). Jehla je vtlačována do zkušební vzorku pod definovaným zatížením (10 N nebo 50 N) kolmo na zkušební těleso (o tloušťce 3 mm až 6,5 mm), které je současně zahříváno předepsanou rychlostí (50 °C/h nebo 120 °C/h). Metoda je vhodná výhradně pro termoplasty. Při zkoušce byla použita metoda zkoušení A120. [56]

Tepelné vlastnosti ABS recyklátu byly zvýšeny přidáním vodivých sazí (Tabulka 10). Nejvyšší výsledky teploty měknutí podle Vicata vykazoval opět kompond ABS + AC-60 s výsledkem 114,45 °C. Nad teplotou 100 °C docházelo k exponenciálnímu nárůstu průniku hrotu do materiálu (Obrázek 16).

Tabulka 10 Srovnání výsledků zkoušky teploty měknutí podle Vicata jednotlivých materiálů a neplněného ABS

Typ materiálu	VICAT [°]
ABS n	111,9
ABS + Ensaco 350G	113,0
ABS + P-XP	112,4
ABS + AC-60	114,5



Obrázek 16 Závislost hloubky průniku hrotu na teplotě zkušební vzorku kompond ABS + P-XP za použití podmínek metody A120

### 6.3.2 Stanovení teploty průhybu při zatížení

Zkouška stanovení teploty průhybu při zatížení byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 75-1 Plasty – Stanovení teploty průhybu při zatížení – Část 1: Obecná metoda zkoušení. [57] Metoda je založena na namáhání zkušební tělesa obdélníkového průřezu ohybovým zatížením tak, aby bylo dosaženo jedné z předepsaných hodnot ohybového napětí (1,8 MPa - standardní; 0,45 MPa nebo 8,0 MPa). Při zkoušce je zkušební těleso zahříváno v olejové lázni a teplota se zvyšuje stálou rychlostí (120 °C/h). Měří se teplota, při níž zkušební

těleso dosáhne smluvního průhybu, který odpovídá přírůstku deformace v ohybu 0,2 %. Trn, který působí na těleso je zatížen. [56]

Hmotnost zatížení trnu působícího na zkušební vzorek se spočítá dle následujícího vzorce:

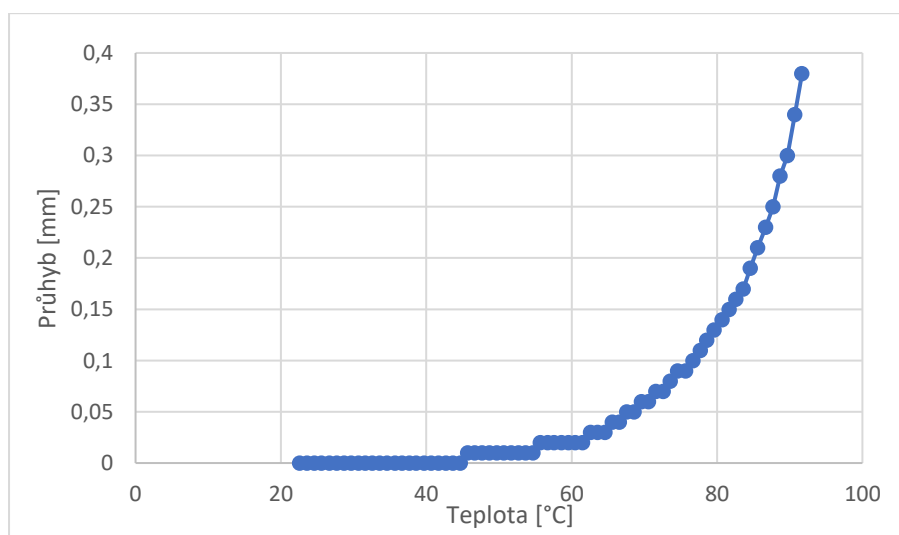
$$F = \frac{2\sigma_f \cdot b \cdot h^2}{3L} \quad (10)$$

, kde  $F$  [N] je síla zatížení zkušební vzorku,  $\sigma_f$  [MPa] je napětí v ohybu na povrchu zkušební tělesa (v této práci použito napětí 1,8 MPa),  $b$  [mm] je šířka zkušební tělesa,  $h$  [mm] je tloušťka zkušební tělesa,  $L$  [mm] je vzdálenost mezi dotykovými přímkami zkušební tělesa s podpěrami. [57]

Ačkoliv vodivé saze také zvyšovali teplotu průhybu kompaundů s recyklovaným ABS materiálem, výsledky jednotlivých kompaundů se poměrně lišily od výsledků stanovení teploty měknutí podle Vicata (Tabulka 11). Kompaund ABS + AC-60 vykazoval nejnižší výsledek s teplotou průhybu 90,3 °C. Naopak nejlepším výsledkem se prezentoval kompaund ABS + Ensaco 350G s teplotou průhybu 91,5 °C. Obrázek 17 zobrazuje exponenciální charakter nárůstu průhybu s teplotou i v rámci zkoušky HDT.

Tabulka 11 Srovnání výsledků zkoušky HDT jednotlivých materiálů a neplněného ABS

Typ materiálu	HDT [°]
ABS drť	88,55
ABS + Ensaco 350G	91,5
ABS + P-XP	90,4
ABS + AC-60	90,25



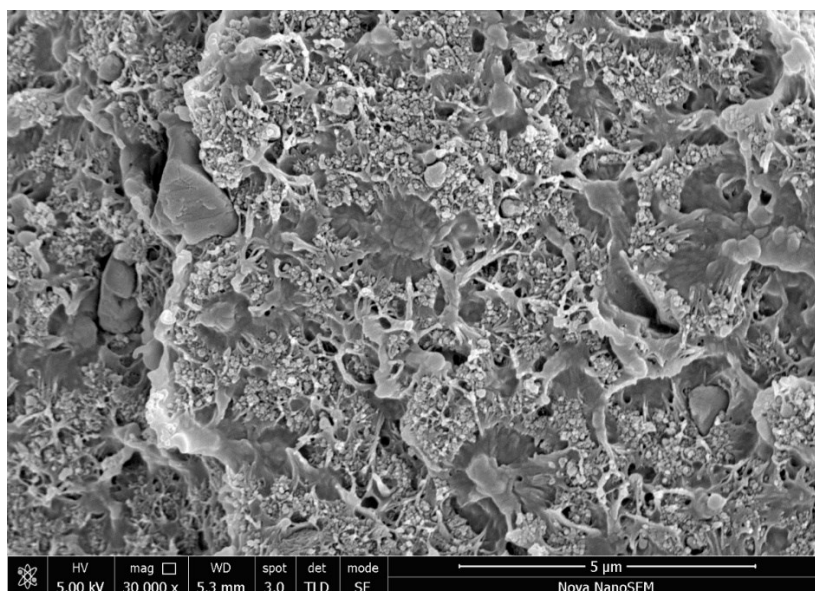
Obrázek 17 Závislost hloubky průhybu zkušební vzorku kompaundu ABS + P-XP na teplotě

## 6.4 Distribuce

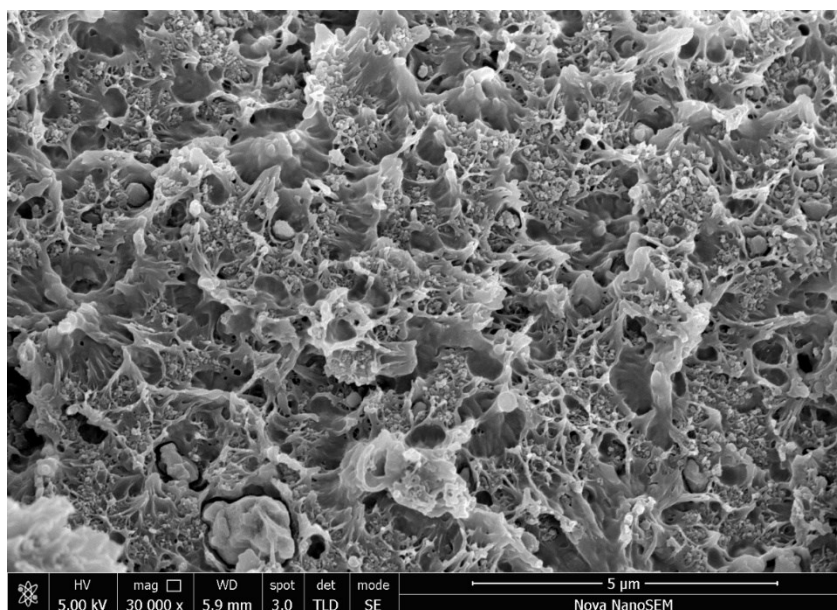
Distribuci částic plniva v polymerní matrici je výrazně ovlivněna technologickým postupem přípravy dané polymerní směsi. Výslednou distribuci materiálu ovlivňuje způsob toku polymerní taveniny a tvar formy, ale také velikost a plocha částic plniva. Pro zlepšení distribuce je v případě elektricky vodivého plniva teoreticky možné začlenit elektromagnetického pole během výroby, vše je však spojeno s vyššími náklady na celkovou technologii. Nerovnoměrná distribuce částic způsobuje anizotropní vlastnosti výsledného kompozitu. Distribuce částic sazí jednotlivých připravených kompaundů byla zkoumána pomocí skenovacího elektronového mikroskopu.<sup>[58]</sup>

Skenovací elektronový mikroskop (SEM) vytváří obraz pomocí zaostřeného elektronového paprsku vyzářeného na povrch objektu. Elektrony v paprsku interagují se vzorkem a produkují různé signály, které lze použít k získání informací o povrchové topografii a složení. Předností SEM v porovnání se světelným mikroskopem je jeho velká hloubka ostrosti. Pomocí skenovacího elektronového mikroskopu byly nafoceny snímky jednotlivých kompaundů a analyzována distribuce a dispergace částic vodivých sazí ve směsi.<sup>[57]</sup>

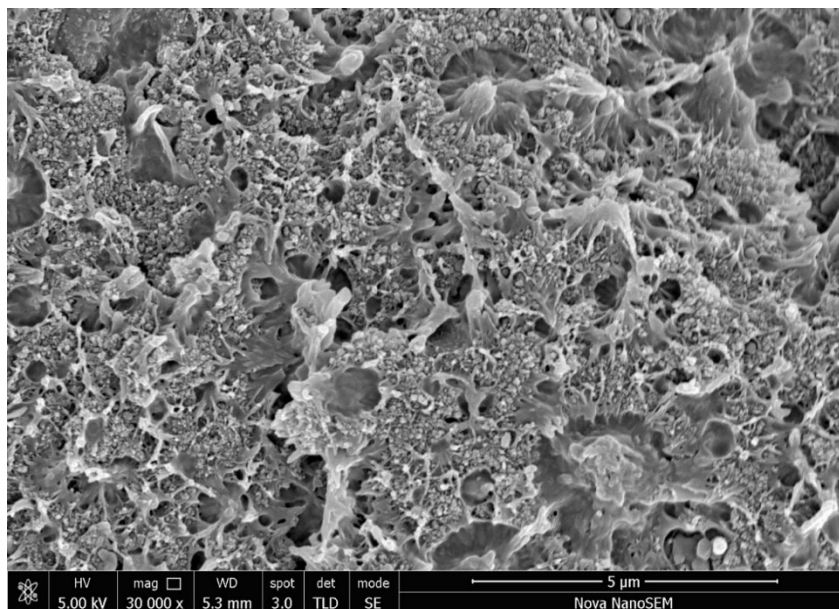
Na základě pořízených SEM snímků bylo možné určit poměrně dobrou distribuci a dispergaci sazí v matrici ABS polymeru. Obzvláště pak kompaundy ABS + P-XP (Obrázek 20) a ABS + Chezacarb AC-60 (Obrázek 18) se prezentovaly homogenní distribucí částic sazí s malým počtem aglomerátů. Materiál ABS + Ensaco 350G (Obrázek 19) měl poměrně dobrou distribuci částic sazí ve směsi, ale zhoršenou dispergaci, kdy na SEM snímku bylo pozorováno větší množství aglomerátů. Pro zlepšení vlastností materiálů ABS + Ensaco 350G je nutné zdokonalit proces míchání při průmyslové výrobě.



Obrázek 18 SEM snímek kompaundu ABS + AC-60



Obrázek 19 SEM snímek kompaundu ABS + Ensaco 350G

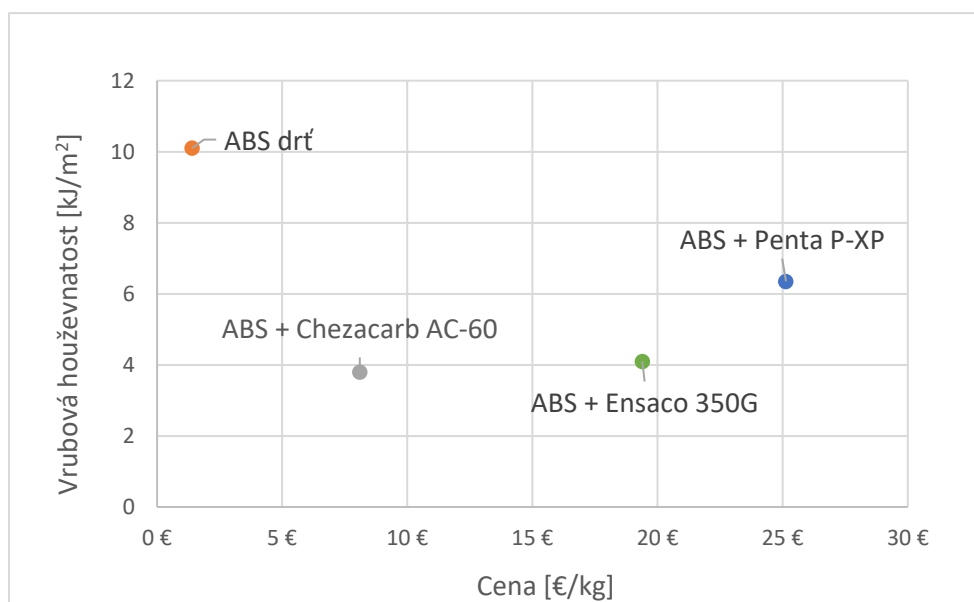


Obrázek 20 SEM snímek kompaundu ABS + P-XP

## 7. Diskuze

Pro vybrání nejvhodnějšího materiálu pro průmyslovou výrobu bylo vyhodnoceno srovnání nejdůležitějších vlastností materiálů v závislosti na ceně použitých sazí. Materiál ABS + Chezacarb AC-60 byl schopen dosáhnout požadovaných elektrických vlastností při stejných koncentracích jako ostatní vybrané druhy sazí, ačkoliv jeho cena byla výrazně nižší. Vzhledem k vysoké prioritě nízké ceny materiálu se tak stal nejvíce pravděpodobným typem pro budoucí aplikaci.

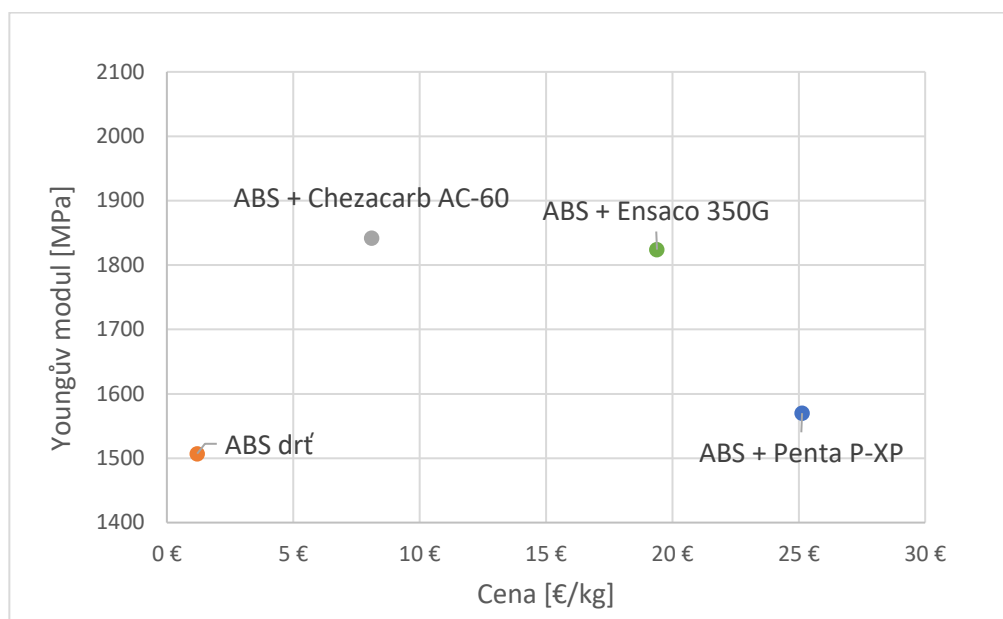
Materiál ABS + Chezacarb AC-60 měl nejnižší vrubovou houževnatost  $3,802 \text{ kJ/m}^2$  (Obrázek 21) a jedná se o výraznou nevýhodu tohoto materiálu, který je ze všech připravených materiálů nejlevnější. Naopak ABS + Penta Carbon P-XP dokázal vrubovou houževnatost zachovat nejlépe. Obecně kompaund plněný sazími Penta Carbon P-XP se materiálovými vlastnostmi nejvíce přibližoval původnímu recyklovanému ABS materiálu. Zásadním problémem tohoto materiálu je vysoká cena. Jak již bylo zmíněno, připravené kompaundy mají vždy výrazně nižší vrubovou houževnatost oproti neplněné ABS drti a je potřeba s tímto faktorem počítat před jejich přípravou.



Obrázek 21 Srovnání závislosti Vrubové houževnatosti [kJ/m<sup>2</sup>] na ceně [€/kg] sazí

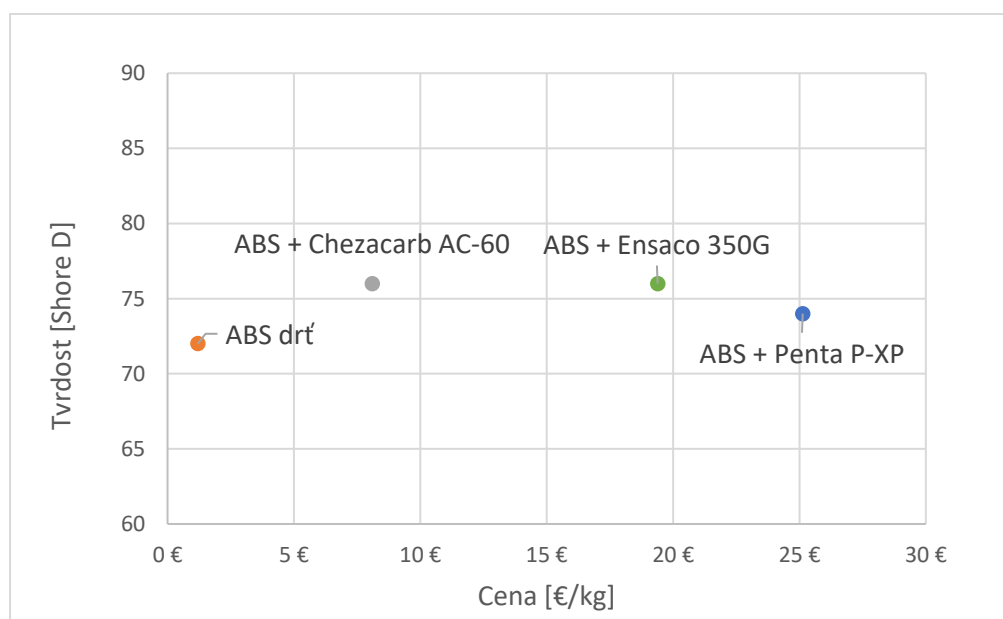
Ohybové vlastnosti, včetně ohybového modulu, byly přidáním vodivých sazí k ABS matici zvýšeny (Obrázek 22). Na rozdíl od vrubové houževnatosti, byl materiál ABS + Chezacarb AC-60 schopen podstatně zvýšit ohybový modul, kdy vykazoval nejvyšší hodnoty ohybového modulu (1842 MPa) ze všech připravených materiálů v závislosti na nejnižší ceně.

Podobné hodnoty ohybového modulu vykazoval materiál ABS + Ensaco 350G, ovšem při podstatně vyšší ceně materiálu.



Obrázek 22 Srovnání závislosti ohybového modulu [MPa] na ceně [€/kg] sazí

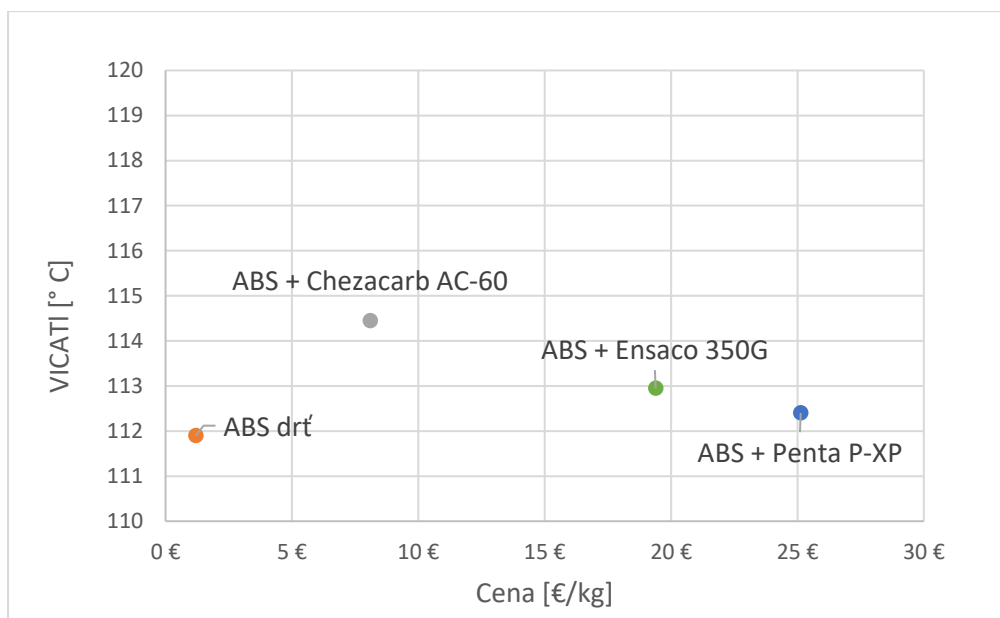
Tvrdoost Shore D byla přidáním vodivých sazí zvýšena podobně jako v případě ohybových vlastností. Materiály ABS + Chezacarb AC-60 a ABS + Ensaco 350G, totožně zvýšily tvrdost původního recyklovaného materiálu na 76 Shore D (Obrázek 23), ačkoliv kompaund ABS + Chezacarb AC-60 byl schopen daného hodnoty dosáhnout i přes svou výrazně nižší cenu. Kompaund ABS + Penta P-XP naopak disponoval tvrdostí nejbližší neplněnému ABS recyklátu.



Obrázek 23 Srovnání závislosti tvrdosti Shore D na ceně [€/kg] sazí



Kompaundu ABS + Chezacarb AC-60 byla naměřena nejvyšší hodnota teploty měknutí dle Vicata 114,5 °C (Obrázek 24). Tento materiál je schopný výrazně zvýšit danou charakteristiku, ačkoliv je ze všech materiálů nejlevnější. Naopak nejdražší materiál, ABS + Penta P-XP, i v tomto případě vykazoval hodnotu teploty měknutí (112,4 °C) nejbližší neplněnému ABS recyklátu.



Obrázek 24 Srovnání závislosti teploty měknutí dle Vicata [°C] na ceně [€/kg] sazí

Kompaund plněný sazími Chezacarb AC-60 měl i přes svou nízkou cenu nejvyšší Youngův modul 1842 MPa, tvrdost 76,7 Shore D i teplotu měknutí dle Vicata 114,45 °C. Tyto vlastnosti, a především nízká cenu předurčují materiál ABS + Chezacarb AC-60 k využití v průmyslové výrobě. V případě požadavků na vysokou houževnatost materiálu bude nutné použít saze Penta Carbon P-XP. SEM snímky materiálu ABS + Ensaco 350G odhalily mírně horší dispergaci sazí v ABS matici. Je pravděpodobné, že se zdokonalením distribuce a dispergace sazí (zdokonalení procesu míchání) v matici bude materiál disponovat lepšími materiálovými vlastnostmi.

## ZÁVĚR

Z vybraných druhů vodivých sazí byly vyselektovány nejvhodnější typy pro aplikaci v průmyslovém využití vzhledem k nízkému perkolačnímu prahu a zachování mechanických vlastností. Jednotlivé kompaundy byly úspěšně připraveny pomocí extruze v dvoušnekovém extruderu a byl zvolen vhodný teplotní profil. Pomocí zkoumání mechanických vlastností, tepelných vlastností a elektrických vlastností, bylo možné určit aplikovatelnost jednotlivých připravených kompaundů.

Materiál ABS + Chezacarb AC-60 byl zvolen jako nejvhodnější materiál pro použití v elektrotechnických aplikacích nebo jako přísada pro snížení ceny primárního materiálu. Důvodem je především nízká cena materiálu v závislosti na dobrých elektrických vlastnostech, tepelných vlastnostech a poměrně dobrých mechanických vlastnostech. Kompaund ABS + Penta Carbon P-XP dokázal nejlépe zachovat houževnatost původního recyklovaného ABS materiálu. Zásadní nevýhodou je však poměrně vysoká cena materiálu, kdy u recyklovaných materiálů jsou obvykle kladeny vysoké nároky na nízké náklady.

Při zkušebních testech připravených materiálů bylo zjištěno, že vodivé saze v matrici ABS obecně výrazně snižují houževnatost materiálu a při vysokých koncentracích dochází k jeho výraznému zkřehnutí a velmi špatné aplikovatelnosti. Řešením tohoto problému je použití sazí s dostatečně vysokou elektrickou vodivostí, což umožní plnění při nízkých koncentracích. Naopak na ohybové vlastnosti, tvrdost, tepelné vlastnosti a samozřejmě elektrické vlastnosti mají vodivé saze pozitivní efekt.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Shrivastava, Anshuman. *Introduction to Plastics Engineering.* , 2018. Internet resource
- [2] Arthur H. Landrock, in *Handbook of Plastic Foams*, 1995
- [3] Salleh, Sitti Nur Ain Binti MD. The effect of recycled Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) mixing ration on the tensile strenght of Acrylonitrile-butadiende-styrene (ABS) pomyer. *University of Malaysia Pahang*,
- [4] Narinder Singh, Rupinder Singh, in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2017
- [5] Harold F. Giles Jr., ... Eldridge M. Mount III, in *Extrusion*, 2005
- [6] Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and its Features. <https://omnexus.specialchem.com/> [online]. [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-plastic>
- [7] Vinny R. Sastri, in *Plastics in Medical Devices (Second Edition)*, 2014
- [8] C.V. Pious, Sabu Thomas, in *Printing on Polymers*, 2016
- [9] Priya Mukherjee MSc, ... Pichiah Saravanan PhD, in *3D Printing Technology in Nanomedicine*, 2019
- [10] Increasing usage of conductive polymers in smartphones to drive demand [online]. In: [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <https://www.grandviewresearch.com/research-insights/increasing-usage-conductive-polymers-smartphones-drive-demand>
- [11] Conductive ABS Filament – 1.75 mm or 3 mm [online]. In: [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <http://www.3dprinterpro.com/pr/conductive-abs-filament/>
- [12] Drápala, J; Kurša, M. *Elektrotechnické materiály*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava 2012.
- [13] Stará, L. *Využití uhlíkových vláken v oděvním průmyslu*. Technická Univerzita v Liberci, Fakulta Textilní 2012.
- [14] Dvořák, L. *Měrný odpor vodičů a dalších materiálů*. Fyzika II (Elektrina a Magnetismus) 2016, 201.
- [15] Aneli, J., Zaikov, G. Physical principles of the conductivity of electrical conducting polymer composites (review), *Chemistry & Chemical Technology* 2011, DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht05.01.075>
- [16] Lucie Szabová. *Studium ohmického transportu v kompozitních vrstvách*, Katedra fyziky povrchů a plazmatu, Matematicko-fyzikální fakulta, Karlova Univerzita, 2007.
- [17] Huang, Y.; Kormakov, S.; He, X.; Gao, X.; Zheng, X.; Liu, Y.; Sun, J.; Wu, D. Conductive Polymer Composites from Renewable Resources: An Overview of Preparation, Properties, and Applications. *Polymers* 2019, 11, 187.
- [18] Spahr M.E., Gilardi R., Bonacchi D. Carbon Black for Electrically Conductive Polymer Applications. In: Rotheron R. (eds) *Fillers for Polymer Applications*. *Polymers and Polymeric Composites: A Reference Series*. Springer 2017, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9_32)
- [19] Mamunya, Y. P., Davydenko, V. V., Pissis, P., & Lebedev, E. V. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders, 38, 1887–1897. *European Polymer Journal* 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(02\)00064-2](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(02)00064-2)
- [20] The Editors of Encyclopaedia Britannica. Carbon black (2016) [online]. In: *Encyclopædia Britannica*, [cit.2020-08-15]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/carbon-black>
- [21] The Editors of Encyclopaedia Britannica. Carbon. [online]. In: *Encyclopædia Britannica* 2020, [cit. 2020-08-15]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/carbon-chemical-element>

- [22] Pantea, Dana & Darmstadt. Electrical conductivity of conductive carbon blacks: Influence of surface chemistry and topology. *Applied Surface Science* 2002. 217. 181-193, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00550-6](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00550-6).
- [23] Qiyan Z., Jingxia W. Improved electrical conductivity of polymer/carbon black composites by simultaneous dispersion and interaction-induced network assembly, *Composites Science and Technology* 2019, Volume 179, Pages 106-114, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.05.008>.
- [24] Psarras, G.C. Charge transport properties in carbon black/polymer composites. *Journal of Polymer Science* 2007, 45: 2535-2545. DOI: <https://doi:10.1002/polb.21278>
- [25] Bhatt, P., & Goel, A. Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use. *Material Science Research India* 2017, 14(1), 52–57, DOI: <http://dx.doi.org/10.13005/msri/140109>
- [26] Ren, G. Carbon nanotube. *Encyclopædia Britannica, Inc.* [online]. In: *Encyclopædia Britannica*, [cit.2020-08-15]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/carbon-nanotube>
- [27] Sankar, P. A. G. A Study on Single Walled Carbon Nanotubes. Department of Electrical and Electronics Engineering College of Engineering Guindy, Anna University Chennai, India 2020
- [28] Bara, A., Banciu, C., & Patroi, D. Electrical properties of carbon nanotubes based composites, National Institute for Research and Development in Electrical Engineering ICPE-CA, Splaiul Unirii 313, Bucharest 3 2009
- [29] Zuo, L. Graphene and single-walled carbon nanotube [online]. In: *YS Journal* 2018, [cit. 2020-10-04]. Dostupné z: <https://ysjournal.com/carbon-nanotubes-the-future-of-the-planets-freshwater/>
- [30] Jayatissa, A. A Review in Graphene / Polymer Composites. *Chemical Science International Journal* 2019, DOI: <https://doi.org/10.9734/CSJI/2018/41031>
- [31] Mokhena, T. C., Mokgaotsa J. Thermal Conductivity of Graphite-Based Polymer Composites. *IntechOpen* 2018, DOI: 10.5772/intechopen.75676
- [32] Nezakati T., Seifalian A Conductive Polymers: Opportunities and Challenges in Biomedical Applications, *Chemical Reviews* 2018 118 (14), 6766-6843, DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00275
- [33] Shrivastava, A. Additives for Plastics. *Introduction to Plastics Engineering*. Elsevier, 2018.
- [34] Additives, P. Modifying conductivity in plastics : meeting needs in, (February), 40–43, 2004.
- [35] Modern Dispersions, Inc. *Insights on Conductive Plastics* [online]. [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <http://www.moderndispersions.com/conductiveplastics.html>
- [36] The Editors of Encyclopaedia Britannica, ed. Recycling [online]. In: . April 23, 2020 [cit. 2020-10-11]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/recycling>
- [37] Erik Tempelman, B. N. van Eyben (2014). *Ecological Aspects of Recycling. Manufacturing and Design*.
- [38] Recycling and energy recovery [online]. EU: Plastics Europe [cit. 2020-10-17]. Dostupné z: <https://www.plasticseurope.org/en/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/recycling-and-energy-recovery>
- [39] Goodship, V. Plastic recycling, *Science Progress*, 2017.
- [40] Shehu, S. I. Separation of Plastic Waste from Mixed Waste : Existing and Emerging Sorting Technologies Performance and Possibilities of Increased Recycling Rate with Finland as Case Study. Lappeenranta University of Technology, 2017.
- [41] Drcení a mletí. <http://www.ksp.tul.cz> [online]. [cit. 2017-01-21]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/03.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/03.htm)
- [42] Pekař, M. Zařízení v technologii výroby a recyklace plastů. České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta Strojní, 2017

- [43] Škrobák, I. A. Vliv výrobního procesu na mechanické vlastnosti pryžových zkušebních těles The Influence of the Production Process on Mechanical Properties of Rubber Testing Samples. Univerzita Tomáš Bati, Fakulta Technologická, 2016.
- [44] Subrmanian, M. N. (n.d.). Introduction to Polymer Compounding : Machinery and Technology , Volume 2.
- [45] Chvojka, A. Návrh opatření pro zajištění možnosti vytlačování svařovacích drátů z polyamidu na univerzálním vytlačovacím stroji. Technická Univerzita v Liberci, Fakulta Strojní, 2008.
- [46] Arvai, T. Technologická optimalizace čtvrtprovozní výroby PP-G-IAH. Vysoké učení technické v Brně, 2011
- [47] Ebeid, S., & Fikry, I. Effect of Geometry and Rotational Speed on the Axial Pressure Profile of a Single Screw Extrusion. Faculty of Engineering, Ain Shams University, Cairo, Egypt, 2015
- [48] Chanda, M.; Roy, S. K. Plastics technology handbook. 4th ed. Boca Raton : CRC Press; Taylor & Francis, 2007. 1 s. ISBN 08-493-7039-6.
- [49] Berins, M. L. Plastics Engineering Handbook of the Society of the Plastics Industry, Inc.. 5th Ed. New York : Chapman and Hall, 1991. 869 s. ISBN 04-129-9181-0.
- [50] Magdalena, M., & Bazan, B. Mixing studies in a Co-Kneader. Université de Montreal.
- [51] ASTM D257. Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials. 2016.
- [52] ČSN EN ISO 179-1 Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška na Charpyho kyvadlovém kladivu (15 J). Český normalizační institut, 2011.
- [53] ČSN EN ISO 178. Plasty – Stanovení ohybových vlastností. 2019.
- [54] ČSN ISO 48-4. Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer – Stanovení tvrdosti – Část 4: Tvrdost metodou vtlačování hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore). Institut pro testování a certifikaci, 2018.
- [55] ČSN EN ISO 306. Plasty - Termoplasty – Stanovení teploty měknutí dle Vicata (VST). Český normalizační institut, 2005.
- [56] Běhálek, L. Polymery: Tepelné vlastnosti polymerů [online]. 2016 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/13.html>
- [57] ČSN EN ISO 75-1 Plasty – Stanovení teploty průhybu při zatížení – Část 1: Obecná metoda zkoušení. Český normalizační institut, 2005.
- [58] Běhálek, L. Polymery: Tepelné vlastnosti polymerů [online]. 2016 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/13.html>
- [59] Mechl O. Měření disperze plniv u reálných gumárenských směsí. Universita Tomáše Bati ve Zlíně. 2010.
- [60] Stokes, Debbie J. (2008). Principles and Practice of Variable Pressure Environmental Scanning Electron Microscopy (VP-ESEM). Chichester: John Wiley & Sons. ISBN 978-0470758748.
- [61] Kombinovaný 26 mm dvoušnekový extruder. Labtech Engineering [online]. [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: <https://www.labtechengineering.com/cs/product/combi-ltecc-26-40/>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PVC	Polyvinylchlorid
PLA	Kyselina polyléčná
SAN	Styren–akrylonitrilová pryskyřice
PP	Polypropylen
PET	Polyethylen
$T_g$	Teplota skelného přechodu
$T_m$	Teplota tání
UV	Ultrafialové záření
MABS	Methylmetakrylát akrylonitrilbutadienstyren
FDM	Fusion Deposition Modeling
SLS	Selective Laser Sintering
CF	Carbon Fiber – Uhlíkové vlákno
CNT	Carbon Nanotubes – Uhlíkové nanotrubičky
CB	Carbon Black – Saze
SWCNT	Single Wall Carbon Nanotubes – Jednostěnné uhlíkové nanotrubičky
MWCNT	Multi Wall Carbon Nanotubes – Vícestěnné uhlíkové nanotrubičky
CP	Conductive Polymer – Vodivý polymer
EMI	Electromagnetic Interference – Elektromagnetické rušení
ESD	Electrostatic Discharge – Elektrostatický výboj

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 Granulát primárního materiálu ABS .....	12
Obrázek 2 Chemický vzorec ABS .....	13
Obrázek 3 Potenciální energie vodivostních elektronů v kovu a na jeho povrchu.....	16
Obrázek 4 Grafické znázornění práhu perkolace .....	18
Obrázek 5 Grafen a jednoděnná uhlíková nanotrubiice.....	23
Obrázek 6 Nožový mlýn.....	32
Obrázek 7 Granulace za studena .....	33
Obrázek 8 Schématický obrázek KO hnětiče .....	35
Obrázek 9 Charakteristiky šneku.....	36
Obrázek 10 Šnek s vyznačenými zónami .....	37
Obrázek 11 Dělení dvoušnekových extrudérů podle vzdálenosti mezi šneky .....	38
Obrázek 12 Závislost elektrického odporu směsi na hmotnostní koncentraci sazí .....	42
Obrázek 13 Kombinovaný dvoušnekový extrudér (26 mm) .....	43
Obrázek 14 Příklad vstříkovaných zkušebních tělísek .....	44
Obrázek 15 Graf závislosti síly [N] na průhybu [%].....	47
Obrázek 16 Závislost hloubky průniku hrotu na teplotě zkušebního vzorku .....	50
Obrázek 17 Závislost hloubky průhybu zkušebního vzorku na teplotě.....	51
Obrázek 18 SEM snímek kompaundu ABS + AC-60 .....	53
Obrázek 19 SEM snímek kompaundu ABS + Ensaco 350G .....	53
Obrázek 20 SEM snímek kompaundu ABS + P-XP .....	54
Obrázek 21 Srovnání závislosti Vrubové houževnatosti [kJ/m <sup>2</sup> ] na ceně [€/kg] sazí.....	55
Obrázek 22 Srovnání závislosti ohybového modulu [MPa] na ceně [€/kg] sazí.....	56
Obrázek 23 Srovnání závislosti tvrdosti Shore D na ceně [€/kg] sazí.....	56
Obrázek 24 Srovnání závislosti teploty měknutí dle Vicata [°C] na ceně [€/kg] sazí .....	57

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Porovnání rezistivity ABS s různými materiály.....	17
Tabulka 2 Materiálové vlastnosti recyklovaného ABS materiálu.....	41
Tabulka 3 Vybrané saze a porovnání jejich základních vlastností.....	41
Tabulka 4 Nastavený teplotní profil vytlačovacího stroje.....	42
Tabulka 5 Srovnání výsledků rezistivity .....	45
Tabulka 6 Srovnání výsledků rázové zkoušky .....	46
Tabulka 7 Síla potřebná k průhybu 3,5 % .....	47
Tabulka 8 Srovnání výsledků ohybového modulu .....	48
Tabulka 9 Srovnání výsledků tvrdosti Shore D.....	49
Tabulka 10 Srovnání výsledků zkoušky teploty měknutí podle Vicata .....	50
Tabulka 11 Srovnání výsledků zkoušky HDT.....	51