



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ**

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**VYUŽITÍ POLYPROPYLENOVÝCH ODPADNÍCH  
ČÁSTIC PRO STAVEBNÍ TEPELNÉ IZOLACE**

USE OF POLYPROPYLENE WASTE PARTICLES FOR BUILDING THERMAL INSULATION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Šimon Baránek

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK, CSc.,  
Ph.D.

BRNO 2019



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Šimon Baránek
<b>Název</b>	Využití polypropylenových odpadních částic pro stavební tepelné izolace
<b>Vedoucí práce</b>	prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc., Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2018
<b>Datum odevzdání</b>	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

- 1) Halahyja, M., Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie, Alfa Bratislava 1985
- 2) Kmínová, H., Studium tepelně technických materiálových vlastností staviv z hlediska jejich projevu na vnitřní mikroklima v budovách, disertační práce FAST VUT Brno 2006
- 3) Davies, M. G., Building Heat Transfer, John Wiley & Sons Ltd 2004
- 4) Kuplík, V., Závady a životnost staveb, GRADA Publishing 1999

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V současné době tvoří objem odpadních plastových materiálů významný podíl mezi odpady, jejich další využití je žádoucí nejen z ekologického a ekonomického hlediska, nýbrž také z hlediska udržitelnosti rozvoje ve stavebnictví.

Při vypracování bakalářské práce dbejte následujících bodů:

- i) Sestavte rozdělení využitelnosti způsobů recyklace odpadních materiálů na bázi plastů,
- ii) Uveďte přehled aktuálního stavu odpadového hospodářství v oblasti využitelnosti plastů v podmínkách ČR a ve světě,
- iii) Popište známé postupy znovuvyužití polypropylenu s ohledem na jejich fyzikální a užitné vlastnosti produktů,
- iv) Ověřte možnost zpracování dostupného vzorku částicových polypropylenových plastů pro přípravu tepelné izolace využitelné ve stavebnictví.

Při vypracování bakalářské práce dbejte zásad platných na FAST VUT Brno; praktická část do 20 % rozsahu; celkový rozsah 40 - 50 stran včetně tabulek a grafů.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

## ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce problematika odpadové ekonomiky, nakládání s odpady a znovuvyužití v oblasti odpadních plastů. V práci jsou shrnuty informace o tepelně izolačních materiálech, plastech, recyklaci a odpadovém hospodářství s plasty. V experimentální části byly ověřeny možnosti zpracování dostupného plastového odpadu pro výrobu tepelně izolačního materiálu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Tepelná izolace, plasty, recyklace, znovuvyužití, odpadové hospodářství, polypropylen.

## ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is the issue of waste economy, waste management and reuse in the field of waste plastics. The thesis summarizes information about thermal insulation materials, plastics, recycling and plastics waste management. In the experimental part, were verified the possibilities of processing of available plastic waste for produce of thermal insulation material.

## KEYWORDS

Thermal insulation, plastics, recycling, reuse, waste management, polypropylene.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Šimon Baránek *Využití polypropylenových odpadních částic pro stavební tepelné izolace*. Brno, 2019. 65s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc., Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Využití polypropylenových odpadních částic pro stavební tepelné izolace* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 24. 5. 2019

---

Šimon Baránek  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Využití polypropylenových odpadních částic pro stavební tepelné izolace* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2019

---

Šimon Baránek  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto způsobem bych chtěl v první řadě poděkovat hlavně svým rodičům, kteří mě po dobu celého studia podporovali jak psychicky, tak finančně a byli mi vždy oporou, dále mé díky patří mé přítelkyni a kamarádům za podporu, díky těmto všem mohla vzniknout tato bakalářská práce.

Dále bych rád poděkoval vedoucímu práce panu prof. RNDr. Ing. Stanislavu Šťastníkovi, CSc., Ph.D. za provedená měření, cenné rady a odborný dohled nad prací. Mé díky patří rovněž panu Ing. Janu Čermákovi, Ph.D. za poskytnuté informace a zaslání podkladů a panu Ing. Jakubovi Hodulovi, Ph.D. za pomoc při přípravě vzorků pro experimentální část.

# Obsah

1. Úvod.....	10
2. Teoretická část.....	11
2.1 Tepelně izolační materiály.....	11
2.2 Druhy šíření tepla: .....	11
2.2.1 Princip izolačních materiálů .....	11
2.2.2 Součinitel tepelné vodivosti .....	11
2.2.3 Metody stanovení součinitele tepelné vodivosti $\lambda$ .....	12
2.2.4 Objemová hmotnost .....	13
2.3 Vybrané tepelně izolační materiály a jejich základní parametry .....	14
2.3.1 Pěnový polystyren (EPS).....	14
2.3.2 Extrudovaný polystyren (XPS) .....	15
2.3.3 Minerální vlny.....	16
2.3.4 PUR/PIR pěny .....	17
2.3.5 Pěnové sklo .....	18
3. Plasty.....	20
3.1 Druhy plastů nejčastějších využívaných ve stavebnictví .....	21
3.1.1 Polyetylén (PE) .....	21
3.1.2 Polypropylén (PP) .....	21
3.1.3 Polyvinylchlorid (PVC) .....	23
3.1.4 Polystyren (PS).....	25
3.1.5 Polyuretany (PUR) .....	27
3.1.6 Polyethylentereftalát (PET) .....	29
4. Recyklace plastů .....	30
4.1 Způsoby recyklace a znovuvyužití dle druhu odpadu a recyklace.....	31
4.1.1 Rozdělení odpadních plastových hmot dle čistoty.....	32
4.2 Rozdělení recyklace dle druhu: .....	32
4.2.1 Materiálová recyklace .....	32
4.2.2 Chemická recyklace .....	33
4.2.3 Surovinová recyklace.....	33
4.2.4 Energetická recyklace.....	33
4.2.5 Recyklace dle druhu plastu .....	33
4.3 Zařízení určené pro recyklaci odpadních plastů:.....	34
4.3.1 Regranulační linka .....	34
4.3.2 Aglomerační linka.....	36



4.3.3 Pulverizéry.....	36
4.3.4 Extrudér.....	36
4.4 Zařízení na likvidaci odpadu na bázi plastu:.....	37
4.4.1 Termická depolymerizace .....	37
4.4.2 Spalovny .....	37
5. Nakládání s odpadními materiály na bázi plastů v ČR.....	39
5.1 Odpadová bilance v České republice .....	39
5.2 Třídění odpadních surovin na bázi plastů a jejich způsob využití .....	39
5.3 Uhlíková stopa.....	40
6. Nakládání s odpadními materiály na bázi plastu ve světě .....	41
6.1 UNEP.....	41
6.2 USA .....	42
6.3 ASIE.....	42
6.4 EVROPA .....	43
7. Znovuvyužití odpadního polypropylenu .....	44
7.1 Výroba meziproduktů z recyklovaného PP.....	44
7.1.1 Recyklát ve formě granulí.....	44
7.1.2 Drtě.....	44
7.2 Výroba kompozitních materiálů .....	45
7.3 Energetické zhodnocení polypropylenu.....	46
7.3.1 Výroba paliv.....	46
7.3.2 Použití polypropylenu jako paliva .....	46
8. Experimentální část .....	47
8.1 Ověření využití odpadních částic expandovaného polypropylenu .....	47
8.2 Charakterizace použitých materiálů:.....	47
8.3 Použité přístroje: .....	49
8.4 Příprava vzorků:.....	50
8.5 Naměřené hodnoty .....	51
8.6 Přehled poznatků z provedených experimentů .....	54
9. Závěr .....	57
10. Seznam použitých zdrojů a literatury .....	59
11. Seznam použitých symbolů a zkratk.....	63
12. Seznam tabulek .....	64
13. Seznam obrázků.....	65

## 1. Úvod

V současné době je z celospolečenského hlediska poukazováno na změny klimatu a ochranu životního prostředí. Z důvodů nepřetržitého nárůstu počtu obyvatel na planetě a neustále se zvyšující životní úroveň se také zvyšují spotřeby energií a nerostných surovin. Díky tomu vzniká ekologický trend, který směřuje k šetrnému nakládání s energiemi a maximálně efektivnímu využití dostupných surovinových zdrojů, to je také hlavním klíčem k redukci emisí CO<sub>2</sub>.

Podle schválené novely zákona z roku 2014 by měla míra recyklace v ČR pro rok 2030 být až 65 %, s touto novelou také přichází zákaz skládkování, a proto také budou muset přijít nová řešení v oblasti recyklace a znovuvyužití odpadů.

Znečišťování plastovými odpady, uznané jako hlavní environmentální problém globálního zájmu, dosáhlo kolosálních rozměrů s odhadem 100 milionů tun plastů, které se nyní nacházejí v oceánech a neustálou výrobou přes 350 milionů tun za rok, přičemž je pouze 9 % recyklováno, vznikají velké objemy případných surovin.

V dnešní době materiály na bázi plastů tvoří značnou část odpadu a jejich recyklace či znovuvyužití je potřebné nejen z ekologického, ale také z ekonomického hlediska. Z pohledu udržitelnosti rozvoje průmyslu je nezbytné zabývat se znovuvyužitím materiálů, využití druhotných surovin a nakládání s potenciálně využitelnými odpady. Vhodnou recyklací odpadů lze snížit nejen spotřebu primárních nerostných surovin, ale také spotřebu energií a účinně tak eliminovat nežádoucí zatížení životního prostředí.

Spotřeba energií v budovách představuje více než 30 % z celkové celosvětové spotřeby energie, proto je jedním z důležitých faktorů snížení energetické náročnosti budov. Nízkoenergetické nebo pasivní domy, které postupem času nastanou jedinou možností, se neobejdou bez tepelně izolačních materiálů. Tepelné izolace budov se významně podílí na úspoře vynaložených energií.

Odhaduje se, že s postupem času bude spotřeba energie stále stoupat a odpadů stále přibývat a je jenom na nás, abychom našli řešení pro udržitelný rozvoj.

## 2. Teoretická část

### 2.1 Tepelně izolační materiály

V dnešní době jsou kladeny stále přísnější požadavky na omezení energetické náročnosti staveb a redukci tepelných ztrát. Ke splnění těchto požadavků se budovy neobejdou bez tepelných izolací. Tepelně izolační materiály se liší od konstrukčních materiálů především schopností omezit šíření tepla. [1][2][3]

### 2.2 Druhy šíření tepla:

**Proudění** (konvekce) se uplatňuje pouze v plynných a kapalných látkách, teplo se přenáší pohybem částic s rozdílnou teplotou.

**Sálání** (radiace), jde o emitovanou energii elektromagnetického záření. Jako jediný způsob přenosu tepla je možný i ve vakuu. Závisí na jeho emisivitě, teplotě a vlastnostech povrchu.

**Vedení** (kondukcce) spočívá v předávání kinetické energie mezi částicemi při vzájemných srážkách, který se uplatňuje v pevných látkách. [4]

#### 2.2.1 Princip izolačních materiálů

Tepelné izolace využívají nízké tepelné vodivosti vzduchu či jiného plynu, kterým jsou vyplněny póry materiálu. Pórovitost materiálu je tak klíčovým parametrem pro úroveň tepelně izolační schopnosti. Přitom se uplatní i další způsoby šíření tepla v materiálech, sálání i proudění tepla.

Tepelně izolační materiály vykazují nižší objemovou hmotnost než ostatní stavební materiály a ve většině případů nižší mechanickou pevnost. Rozhodujícím kritériem je hodnota součinitele tepelné vodivosti izolačního materiálu  $\lambda = 0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Tepelně izolační vlastnosti materiálů závisí především na tloušťce a součiniteli tepelné vodivosti  $\lambda$ , ale také na jejich stavu, vlhkosti, okolní teplotě, sorpčních vlastnostech a způsobu zabudování do stavby. [1][2]

#### 2.2.2 Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  neboli měrná tepelná vodivost je jedním z nejdůležitějších faktorů pro stavební tepelně izolační materiály. Hodnota součinitele vypovídá, kolik tepla vedením projde za jednotku času určenou plochou za definovaného teplotního spádu.

Hodnota součinitele tepelné vodivosti závisí na různých vlivech a stavu materiálu. Mezi klíčové parametry patří zejména:

- objemová hmotnost,
- vlhkost materiálu, sorpční vlhkost,
- směr tepelného toku (v anizotropních látkách jako je minerální vlna),
- chemické složení,
- teplota.

### 2.2.3 Metody stanovení součinitele tepelné vodivosti $\lambda$

Metody se od sebe liší především v teplotním stavu zkušební vzorku v průběhu měření a dopočtem hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Metody lze rozdělit na:

**Stacionární metody** Výchozí ustálený teplotní stav ve vzorku; tento stav se nastaví v měřicím přístroji, v průběhu měření se kontroluje maximální povolená teplotní změna za určitý čas. U této metody je důležité zjistit ustálený tepelný tok procházející vzorkem. Následně lze z rozdílů teplot, rozměrů vzorku dopočítat hodnotu součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$ . Mezi tyto metody patří deskové metody, metoda chráněné tepelné desky nebo metoda měřidla tepelného toku, metoda válce, metoda koule aj. [4]

**Nestacionární metody** Tato metoda je založena na sledování dynamického vývoje teploty na vzorku, většinou odezvy teplotní změny procházející zkoušeným vzorkem. Metody lze rozdělit na: Metoda nestacionárního tepelného toku, Metoda tepelného impulzu (metoda horkého drátu, záblesková metoda, ostatní metody s tepelnými impulsy).[4]

Základní výpočetní vztah pro stanovení součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  za stacionárního stavu,

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{(\theta_1 - \theta_0) \cdot S \cdot \tau}$$

kde:  $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  
 $Q$  množství prošlého tepla [J],  
 $\theta_0, \theta_1$  teplota mezi dvěma body, mezi kterými dochází k šíření tepla [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $d$  vzdálenost [m],  
 $S$  plocha [ $\text{m}^2$ ],  
 $\tau$  čas [s].

## 2.2.4 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost se vypočítá z poměru hmotnosti materiálu k objemu látky (včetně pórů, mezer a dutin), závisí na měrné hustotě materiálu a objemu pórů. Objemová hmotnost úzce souvisí s tepelně izolačními vlastnostmi izolantů. Čím je objemová hmotnost nižší, tím klesá hodnota součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$ . Tento předpoklad platí omezeně, neboť když je pórovitost materiálu značně vysoká, nastane šíření tepla prouděním. Objemová hmotnost je dána vztahem:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

kde:  $\rho$  objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  
 $m$  hmotnost [kg],  
 $V$  objem [ $\text{m}^3$ ].

## 2.3 Vybrané tepelně izolační materiály a jejich základní parametry

### 2.3.1 Pěnový polystyren (EPS)

Pěnový polystyren je v České republice jedním z nejvíce užívaných tepelně izolačních materiálů, hlavně díky poměru ceny vzhledem k jeho užitným vlastnostem. Vyrábí se buď vypěňováním do forem nebo řezáním z velkých vypěněných bloků odporovým drátem obvykle ve formátu 1000 x 500 mm a tloušťkách 10 až 300 mm. Pro označení druhu pěnového polystyrénu se používá formátu EPS N P, kde N označuje pevnost v tlaku při 10 % deformaci (50, 70, 100, 150, 200) kPa a písmeno P označuje způsob použití:

- Z Základní, vhodný pro podlahy,
- S Střešní, vhodný pro střechy a šikmé plochy,
- F Fasádní, rozměrově přesný s tolerancí rozměrů do 2 mm vhodný pro ETICS.

Výhody pěnového polystyrenu spočívají především v jeho příznivé ceně, nízké objemové hmotnosti, snadné opracovatelnosti, jednoduché manipulaci na stavbě, poměrné tuhosti, nenasákavosti, životnosti při správném zabudování, nehořlavosti a je zdravotně nezávadný.

Nevýhodou pěnového polystyrenu je především hořlavost, citlivost na teploty nad 70 °C, teplotní roztažnost, stárnutí materiálu aj. Při hoření odkapává, při montáži do stavby kontaktním zateplovacím systémem ETICS je nutno provést bezpečnostní pásy z nehořlavého materiálu. [1][5][6][7]

Tabulka 1: Přehled vybraných vlastností a specifikace EPS. [1][5]

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$	0,032-0,044 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Objemová hmotnost $\rho$	8-40 kg·m <sup>-3</sup>
Faktor difuzního odporu $\mu$	20-100
Třída reakce na oheň	E
Nasákavost	≤ 3 % (dlouhodobá)
Cena za m <sup>2</sup> při tloušťce 100 mm	asi 140 Kč

### 2.3.2 Extrudovaný polystyren (XPS)

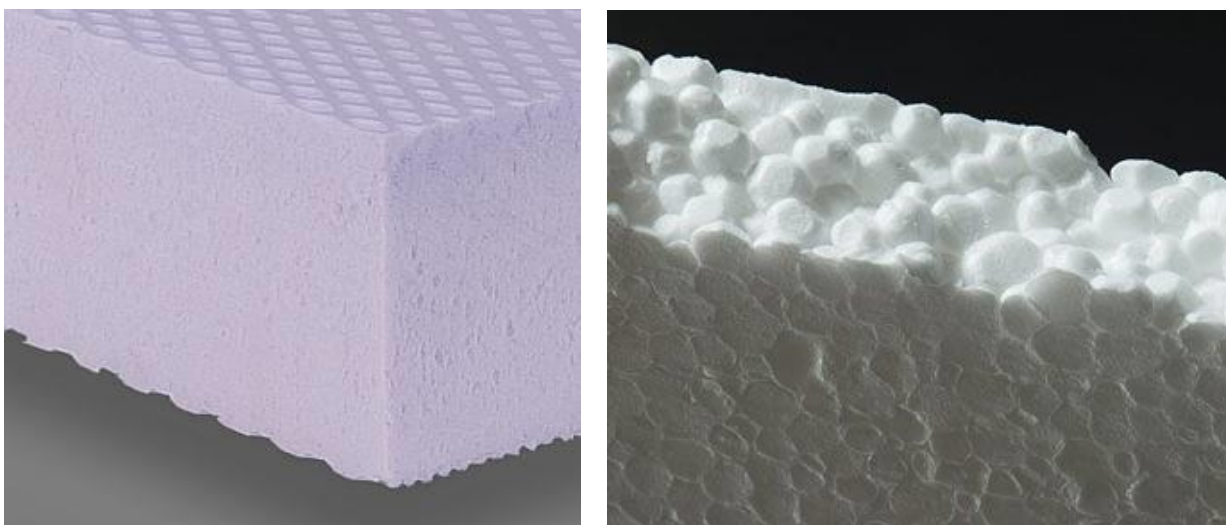
Extrudovaný polystyren je velmi podobný pěnovému polystyrenu typu EPS, ale je mnohem houževnatější i tvrdší, a liší se způsobem výroby. Vyrábí se především vytlačováním do forem. Na stavbě lze lehce rozeznat, protože při narušení se z XPS nedrolí kuličky. Opracovává se stejně jako EPS za použití pilky nebo odporového drátu přímo na stavbě. Základním formátem je 1250 x 600 mm a tloušťkách 6 až 200 mm. Značení například: XPS N, číslo značí pevnost v tlaku při 10 % deformaci (200,300) v kPa.

Výhodou XPS je především jeho vyšší pevnost v tlaku a zvýšená objemová stálost, snadná opracovatelnost, nenasákavost, široké možnosti využití, nízká hmotnost, dlouhá životnost při správném zabudování, nehnije, neplesniví a je zdravotně nezávadný.

Nevýhody u XPS je analogické jako u pěnového polystyrenu, zejména hořlavost, citlivost na teploty nad 75 °C, stárnutí materiálu, i cena, která je asi dvakrát vyšší než u EPS. [1][5][8]

Tabulka 2: Přehled vybraných vlastností a specifikace XPS. [1][5]

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$	0,030-0,038 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Objemová hmotnost	30-45 kg/m <sup>3</sup>
Faktor difuzního odporu ( $\mu$ )	180
Třída reakce na oheň	E
Nasákavost	0 %
Cena za m <sup>2</sup> při tloušťce 100 mm	330 Kč



Obrázek 1: Pěnový polystyren typu XPS vlevo, na straně pravé polystyren typu EPS. [5][52]

### 2.3.3 Minerální vlny

Minerální vlny jsou jedním z nejrozšířenějších tepelně izolačních materiálů. Tyto izolace se vyrábí z taveniny s různými aditivami a taví se při teplotách přibližně 1400 až 1700 °C. Tavenina se nalévá na rozvláknovací stroje, které taveninu rozdělí na velmi jemná, tenká vlákna, která jsou pojena fenolformaldehydovou pryskyřicí nebo jiným organickým pojivem. Vlákna jsou při výrobě ukládána kyvným podavačem na pás, jehož rychlost udává tloušťku materiálu. Po vytvrnutí pojiva se nekonečný koberec vlny nařeže na potřebné formáty. Minerální vlny se využívají zejména pro tepelné izolace stěn ve výšce nad 22,5 m a nad stavební otvory ve výšce nad 12 m kvůli nehořlavým vlastnostem. Také se používají jako akustické izolace. Některé typy minerálních vln mohou být opatřeny kaširováním hliníkovou folií, netkanou textilií či asfaltovou vrstvou nebo mohou být upraveny na drátěném pletivu. Vyrábí se ve více variantách tuhosti dle určení zabudování, prodávají se buď to jako desky, které jsou většinou rozměrů 1200x600 mm nebo jako balíky v rolích šířky 1200 mm a délce až 15 m. Mezi nejvýznamnější výrobce patří Rockwool, ISOVER, NOBASIL. Minerální vlny můžeme dle primární suroviny rozdělit na:

- Čedičová vlna,
- Strusková vlna,
- Skelná vlna.

Výhody minerální vlny jsou především nehořlavost, odolnost vůči teplotám až 350 °C, kombinace zvukové a tepelné izolace, nízký difuzní odpor, velmi dobrá propustnost vodních par, velmi dobrá tvarovatelnost, lze ji velmi dobře využít při izolaci potrubí a kotlů, odolnost vůči škůdcům, je odolná vůči bakteriím, plísním a houbám, lze ji vyrábět i z recyklovaného materiálu (především skelná vlna), je objemově stálá a má všeobecně široké možnosti použití. [9]

Mezi nevýhody patří vysoká nasákavost a ztráta tepelně izolačních vlastností v přítomnosti vlhka nebo vody. Minerální vlny vykazují horší přídržnost než ostatní tepelné izolace, při manipulaci s nimi se z nich uvolňují respirabilní částice. Projevují nízkou pevnost v tlaku a nízkou pevnost v smyku. Materiál je anizotropní a vykazuje jiné vlastnosti dle uložení vláken. [1][5]



Tabulka 3: Přehled vybraných vlastností a specifikace minerálních vln. [1][5][9]

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$	0,033-0,041 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Objemová hmotnost	140–165 kg/m <sup>3</sup>
Faktor difuzního odporu $\mu$	1,1 – 3,0
Třída reakce na oheň	A1
Nasákavost	až 300 %
Cena za m <sup>2</sup> při tloušťce 100 mm	Asi 350 Kč (fasádní), 140 Kč (deska), 60 Kč (role)



Obrázek 2: Vzhled různých druhů minerálních vln [53]

### 2.3.4 PUR/PIR pěny

PUR/ PIR vznikají napěněním pomocí napěnovacích činidel, nadouvadel. PUR pěny (polyuretany) a PIR pěny (polyisokyanurátové) se používají také k sekundární izolaci ve formě montážních pěn, na izolaci konstrukčních spár aj. Tyto pěny mohou být vyrobeny „in situ“. Používají se tepelně izolační desky případně s povrchovou úpravou pohledovým sádkartonem, mohou být opatřeny také perem a drážkou. Dle složení můžeme pěny rozdělit na pěny:

- Jednokomponentní pěna,
- Dvoukomponentní měkká pěna,
- Dvoukomponentní tvrdá pěna.

Jednokomponentní pěny mají 50-95 % otevřených buněk, dvoj oponentní měkké pěny mají 85-90 % otevřených pórů a tvrdé 5–10 %, dle struktury se také odvíjí jejich vlastnosti, ty se liší také s objemovou hmotností.

Lze je nanášet stříkáním a mohou vyplnit i těžko dostupná místa jakéhokoliv tvaru. Pěna je téměř samonosná, má hydroizolační a elektroizolační schopnosti, dobrou tuhost, pevnost v tlaku. PUR pěny mají velmi dobrou přilnavost k povrchu, jsou odolné vůči biodegradaci a jsou zdravotně nezávadné. Teplotní odolnost je asi do 140°C.

Nevýhody spočívají v citlivosti pěn na UV záření, hořlavosti, na vzduchu rychle degradují. Jedná se o špatně recyklovatelný materiál. [1][5][9][10]

Tabulka 4: Přehled vybraných vlastností a specifikace PUR/PIR pěn. [1][5][10]

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$	0,020-0,050 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Objemová hmotnost	10–70 kg/m <sup>3</sup>
Faktor difuzního odporu $\mu$	20-100
Třída reakce na oheň	E
Nasákavost	0 %
Cena za m <sup>2</sup> při tloušťce 100 mm	asi 700 Kč (desky), 250-300 Kč stříkané



Obrázek 3: Desková PIR pěna [5]



Obrázek 4: Aplikace stříkané PUR pěny [5]

### 2.3.5 Pěnové sklo

Pěnové sklo patří mezi izolační materiály s velmi příznivými vlastnostmi i přes jeho vyšší cenu. Pěnové sklo se nabízí buď to v deskách, které mají většinou rozměry 450 x 600 a tloušťky 40 až 180 mm. Nabízí se jako šterkové pěnové sklo v různých frakcích nejčastěji však 0-63 mm nebo 0-32 mm.

Pěnové sklo se vyrábí dvěma způsoby, první spočívá v ohřátí uhelného prachu s nadrceným aluminosilikátovým sklem, které zvětší svůj objem asi 20násobně a následně se pomalu

chladí. Druhá možnost je ve zpracovávání odpadního skla, sklářského písku a aditiv, které se taví spolu s chemikáliemi, které způsobí napěnění materiálu a následně se také pomalu ochladí.

Mezi výhody pěnového skla patří nehořlavost, vysoká životnost, nulová nasákavost, mrazuvzdornost, díky těmto vlastnostem má pěnové sklo široké využití v mrazírenské technice. Má vysokou pevnost v tlaku (až 2000 kPa), nízkou objemovou hmotnost a je 100% recyklovatelné. Pěnové sklo lze vyrábět z recyklovaného materiálu. Chemicky jsou velmi odolné, ekologicky nezávadné, parotěsné. Při požáru neprodukují žádné toxické látky ani kouř.

Nevýhodou u štěrkového pěnového skla je možná prašnost při manipulaci. Desky pěnového skla se hůře opracovávají kvůli křehkosti. [1][5][9]

Tabulka 5: Přehled vybraných vlastností a specifikace pěnového skla. [1][5][9]

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$	0,04-0,08 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Objemová hmotnost	115–165 kg/m <sup>3</sup>
Třída reakce na oheň	A1
Nasákavost	≤ 0 %
Cena za m <sup>2</sup> při tloušťce 100 mm	150 Kč (štěrk), 1100 Kč (deska)



Obrázek 5: Vzhled pěnového skla [9]

### 3. Plasty

Plastické hmoty jsou uměle vyrobeny z makromolekulárních látek. Makromolekulární látky či polymery se také nachází v přírodě (biopolymery) jako například celulóza. Polymery jsou řetězovité látky především na bázi uhlíku.

Plastové hmoty mají v dnešní době široké využití a nahrazují většinu používaných materiálů především díky jejich vlastnostem a možnostem tyto vlastnosti upravovat. Mezi dobré vlastnosti plastů patří nízká objemová hmotnost, životnost, možnosti probarvení, jsou velmi dobře tvarovatelné, lze je spojovat, svařovat, lepit, brousit, obrábět, tavit, jsou téměř nenasákavé, většinou odolné vůči působení chemikáliím, většina plastů je elektricky nevodivá, lze u nich dosáhnout velmi malé tepelné vodivosti, snadno se čistí a lze je zpětně recyklovat. Mezi nevýhody umělých hmot patří především jejich nestálost vlastností při změnách teploty, špatná odolnost vůči povětrnostním vlivům především záření UV, hořlavost, stárnutí, pevnost v tlaku, velký součinitel teplotní roztažnosti, při nižších teplotách se stává křehkým. Konkrétní materiálové vlastnosti jsou rozhodující pro jejich efektivní využití. [11][12]

#### Základní rozdělení plastických látek

**Termoplasty** Plastické materiály, které se při zvýšených teplotách stávají tvárné, tato vlastnost je opakovatelná. K nim náleží polypropylen, polyethylen, polystyren, polyvinylchlorid. Jejich struktura je tvořena lineárními makromolekulami s dlouhými řetězci.

**Reaktoplasty** Jejich struktura vytváří trojrozměrnou síť, která vzniká při zvýšené teplotě a tlaku vytvrzováním, popřípadě účinku katalyzátoru nebo záření. Po zesíťování nelze reaktoplasty znovu tvářit nebo roztavit. Mezi reaktoplasty patří například epoxidové pryskyřice, polyuretan, vulkanizovaný kaučuk (pryž).

**Elastomery** Strukturu tvoří dlouhé lineárními řetězce, které jsou propojeny křížovými mezimolekulárními vazbami. Lze je deformovat pouze v omezené míře a vrací se do původního tvaru, jakmile se napětí uvolní. Patří k nim například přírodní kaučuk a polybutadien, který se používá při výrobě automobilových pneumatik. [11][12][13][18]

## **3.1 Druhy plastů nejčastějších využívaných ve stavebnictví**

### **3.1.1 Polyetylén (PE)**

Polyetylén se vyrábí polymerací z etylénu, který se získává z tepelného štěpení vyšších uhlovodíků na nižší z ropy, nebo tepelným rozkladem zemních plynů. Má vysoký součinitel tepelné roztažnosti okolo  $20 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . PE má velkou tažnost i ohebnost, tyto vlastnosti však závisí na objemové hmotnosti, která se pohybuje většinou o kolo 0,915 (LDPE nízkohustotní polyethylen) až 0,970  $\text{g/cm}^3$  (HDPE vysokohustotní polyetylén). Křehne při nízkých teplotách, a naopak při vysokých teplotách hoří modrým plamenem s bílou špičkou. PE propouští UV záření a pohlcuje IR záření, tyto vlastnosti závisí podle druhu zpracování. Polyetylén je velmi dobrý elektrický izolant, je houževnatý a pružný. Pevnost v tahu PE závisí na teplotě a hustotě a činí 10 až 40 MPa. PE má velmi malou propustnost vodních par, velmi dobrou odolnost vůči kyselinám, louhům a roztokům solí. Pouze silně oxidační látky typu  $\text{HNO}_3$  je porušují. Polyetylén je naprosto zdravotně nezávadný a odolává všem mikroorganismům. Vlastnosti PE se mohou s časem měnit a podléhá stárnutí. [11]

#### **Použití polyetylénu:**

PE se používá na výrobu folií, které jsou levné, pevné, pružné, zdravotně nezávadné, průsvitné, ne navlhavé, chemicky odolné a propouští IR záření. Největší využití PE nachází v potravinářském průmyslu jako obaly, náhrada odbedňovacích přípravků, parozábrany a vložky do asfaltových izolací.

Další oblastí využití PE je výroba troub, tvarovek, zabraňují vzniku usazenin, mají dlouhou životnost, pevnosti, parotěsnosti, odolnosti vůči plísním a dalším mikroorganismům. PE trouby jsou vhodné také pro tlakové potrubí s maximální provozní teplotou do 60 °C pro rozvody pitné vody či podlahové vytápění do 40°C.

Ve stavebnictví se využívá jako těsnění spár u tepelných izolací. V dnešní době nachází uplatnění při výrobě kompozitního materiálu na bázi dřeva tzv. Woodplastic. [11][12][15]

### **3.1.2 Polypropylén (PP)**

PP v dnešní době patří mezi nejžádanější plastickou hmotu. Výroba polypropylenu je podobná výrobě polyethylenu. Pravidelnost struktury určuje, stejně jako u PE, stupeň krystalinity, vlastnosti, jako jsou pevnost v tahu za ohybu, objemová hmotnost, teplota tavení a dále. Dle souměrnosti uspořádání polymeru rozlišujeme strukturu izotaktickou

(téměř zcela souměrnou), polymer s takovou strukturou má pevnosti v rozmezí 30-50 MPa a ataktickou (zcela neuspořádanou), vlastnosti PP s ataktickou strukturou budou velmi rozdílné, například pevnost nabývá pouze 1-3 MPa. Polypropylen je jedním z nejdůležitějších termoplastů, a má stejně jako PE má široké možnosti využití.

Součinitel teplotní roztažnosti je u polypropylenu menší než u PE a pohybuje se v rozmezí  $12-18 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Polypropylen je odolnější vůči teplotám, lze jej použít i při 140 °C. Nad touto teplotou se razantně zvětšuje protažení materiálů. Pro dlouhodobou zátěž se doporučuje do 110 °C. Křehne při teplotách okolo -150 °C, ale projevuje se již při teplotě pod 0 °C, a proto se při výrobě do polypropylenu přidává kaučuk, buď to přírodní nebo syntetický butylkaučuk. Objemová hmotnost bývá kolem  $0,94 \text{ g/cm}^3$ .

Polypropylenové výrobky mohou být čiré, průsvitné, netransparentní nebo různě probarvené. Stejně jako u PE je polypropylen skvělým elektro izolantem a stejně jako většina plastů je nenavlhavý a nenasákavý, odolný vůči sorpci vlhkosti. Paropropustnost je téměř srovnatelná s polyetylenem, avšak závisí na uspořádání a způsobu orientace molekul. V chemické odolnosti je polypropylen téměř stejný jako polyetylen; anorganické kyseliny, soli a louhy narušují PP pouze za zvýšených teplot okolo 60 °C a ve vyšších koncentracích.

Polypropylen je látkou zcela zdraví neškodnou, a stejně jako PE odolává plísním a řasám. Mezi nevýhody PP patří stárnutí, při kterém materiál zhnědne, pevnosti v tahu za ohybu klesá, kvůli tomu musíme do polypropylenu přidávat stabilizátory.

Napěněný polypropylen se vyrábí dvoufázově, v první fázi se vyrábí malé perličky, podobně jako u polystyrenu z granulátu, roztavením v extrudéru, z kterého vystupují tenká vlákna, ty se následně ochladí, osuší a sekají na malé elementy. Takto upravený PP vstupuje do autoklávu, kde při tlaku přibližně 20 barů a teplotě 150 °C a přítomnosti oxidu uhličitého, jakož to nadouvadla, se připraví k expanzi, která probíhá hned po opuštění autoklávu. Díky technologickému řízení nebo dvojitým autoklávování můžeme docílit velmi nízkých objemových hmotností. Výroba pak spočívá ve stlačení perliček do formy a zahřátí vodní párou na cca 130 °C, čímž se jednotlivé napěněné perly navzájem svaří, následně schladí a odformují. Celý výrobní proces trvá přibližně 5 minut. [11][12][16][18]

### **Použití polypropylenu:**

Polypropylen má v dnešním průmyslu velice široké využití, z propylenu se vyrábí například výrobky pro domácnost, které jsou mnohem odolnější než polyethylenové, zdravotní pomůcky, jako je například laboratorní vybavení, v automobilovém průmyslu, veškeré druhy obalů na potraviny. Vlákna, která jsou pevná, drží svůj tvar a odolávají plísním, hmyzu. Proto jsou PP vlákna vhodná například pro výrobu sítí pro rybolov nebo pro zemědělství. PP fólie a desky mají podobné využití ve stavebnictví jako folie z polyethylenu, ale musíme dbát na prostředí, do kterého se umísťují, protože křehne již kolem 0 °C a má menší odolnost vůči ultrafialovému záření.

Z polypropylenu se vyrábí trouby, které jsou pevnější a snáší vyšší teploty než trouby z polyethylenu, těchto vlastností pro rozvody nízkotlaké teplé vody do 80 °C, avšak krátkodobě odolají i teplotám do 140°C. Dále se používá jako alternativa na izolaci elektrických kabelů z PVC v méně větraných prostorech, protože neprodukuje tolik kouře a žádné toxické halogenderiváty. [11] [17]

Napěněný polypropylen se v dnešní době používá hlavně v automobilovém průmyslu jako materiál vhodný pro konstrukce nárazníků, výplně bočních dveří, opěrek díky izotropním vlastnostem a možnosti opakovaně deformace splňují přísná kritéria testů Euro NCAP, pro elektromobily, výplně ochranných přileb aj. [20]

Zpracování: PP se zpracovává podobně jako PE, vstřikováním za teplot 205 °C až 280 °C, vytlačováním při teplotách 180 °C až 250 °C, vyfukováním nebo lisováním. [12][16][17]

### **3.1.3 Polyvinylchlorid (PVC)**

Polyvinylchlorid patří k jedním z nejstarších plastických hmot. Byl objeven v roce 1835 a v roce 1878 objeveny možnosti jeho polymerace. Průmyslově se však začal vyrábět až okolo roku 1925 v Německu pod komerčním označením Igelit. Dodnes patří mezi jednu z nejvyužívanějších a nejvíce vyráběnou makromolekulární látku. Polyvinylchlorid se vyrábí polymerací vinylchloridu, strukturu PVC ovlivňuje především způsob výroby. Polyvinylchlorid jakožto surovina pro další zpracování se dodává jako bílý prášek, fyziologicky neškodný s měrnou hmotností 1370-1400 kg/m<sup>3</sup>, u měkčeného PVC dle obsahu změkčovadla i okolo 1150 kg/m<sup>3</sup>. Polyvinylchlorid lze při teplotách 145 až 170 °C snadno tvarovat. Při teplotě 212 °C dosáhne polyvinylchlorid teploty varu. Při vyšších teplotách

podléhá rozkladu, kdy hnědne nebo zčerná. Při hoření PVC unikají vysoce toxické polychlorované dibenzofurany a dibenzodioxiny, kyselina chlorovodíková, chlorovodík. Chlorovodík se také uvolňuje při delším vystavení PVC kyslíku nebo slunečnímu záření.

Pevnost v tahu a modul pružnosti u PVC závisí především na teplotě a na době zatížení, za běžných teplot je pevnost v tahu okolo 50-60 MPa a modul pružnosti 2,5 až 2.8 GPa, mez pevnosti 35 MPa. Na teplotě závisí také délkové protažení, které je při obvyklých podmínkách až 35 %. U výrobků za nižších teplot PVC vykazuje mnohem větší tvrdost i křehkost. Polyvinylchlorid má také sklony tzv. tvarové paměti, které se projevují při opakovaném zahřátí, kdy se výrobek zčásti vrací do původního tvaru. Změny závisí na teplotě ohřátí a na teplotě vytvarování.

Součinitel teplotní roztažnosti u neměkčeného PVC je závislý na teplotě. Pro teploty od 20° do přibližně 75 °C je součinitel  $8-9 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , pro teploty nad 75 °C činí  $20-22 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Paropropustnost závisí jak na teplotě a na způsobu výroby, rovněž na druhu příměsí. Součinitel tepelné vodivosti PVC činí  $0,16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Průhlednost závisí na čistotě a na hladkosti povrchu výrobků. Neměkčené PVC má relativně dobrou chemickou odolnost pouze do 40 °C, poté se odolnost snižuje. Nepříznivé účinky mají oxidační roztoky, které reagují s přidanými změkčovadly nebo stabilizátory do bílého zákalu. Látky, které mají solvatující účinky (obalení částic rozpuštěné látky molekulami rozpouštědla), působí na PVC bobtnajícím účinkem. Vlivem bobtnání PVC mění vlastnosti, stává se gumovitě měkkým a mohou se objevit trhliny. Kyseliny se silným oxidačním účinkem PVC degradují (kyselina dusičná  $\text{HNO}_3$  a sírová  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Odolnost PVC vůči suchým plynům je většinou příznivá.

Při výrobě se do PVC prášku přidávají různé stabilizátory, změkčovadla, barviva a jiné výplně. PVC lze tak vylehčovat až na objemovou hmotnost okolo  $60 \text{ kg/m}^3$  a zároveň zachovat nízkou nasákavost (po 24 h činí asi 0,02 % hmot.) [11]

Tabulka 6: Přehled vlastností lehčeného PVC vztažené k objemové hmotnosti [11] [19]

Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
60	0,3	0,9	0,03
70	0,9	1,2	0,03
100	1,3	1,3	0,03



### **Použití polyvinylchloridu:**

Neměkčené folie jsou průsvitné nebo neprůsvitné, zabarvené a používají se jako vlnovkové krytiny, dekorační desky, vnější obklady, nádoby. Dále se využívá PVC folií jako izolací proti vodě, zemní vlhkosti i tlakové vodě. Využití PVC nachází ve spojení s textiliemi nebo papírem jako tapety. Vylehčené PVC se používá pro tepelné izolace nebo při výrobě vrstevnatých podlahovin. Z PVC se také vyrábějí trouby, izolační trouby, schodišťová madla, okenní rámy, žaluzie, trubky pro kabely, střešní krytiny. Ve zdravotnictví se používá pro výrobu sterilních obalů apod. V automobilovém průmyslu zase nachází využití jako jeden z hlavních materiálů pro výplně dveří, palubních desek, podlahy, sluneční clony, lišty, ochranné prvky u blatníků a jiné výrobky. [11][12][13]

### **3.1.4 Polystyren (PS)**

Polystyren se začal poprvé průmyslově vyrábět v roce 1925 v Německu. Vyrábí se polymerací styrenu buď to v emulzi, suspenzi nebo v bloku případně v roztoku dle použité metody se zásadně liší jeho vlastnosti. Vlastnosti polystyrenu závisí také na molární hmotnosti a přidaných látkách. [11]

Polystyren odolává teplotám 65-90 °C krátkodobě i 100 °C, závisí na postupu výroby při vyšších teplotách dochází k trvalé deformaci materiálu. Nad 140 °C se PS začíná tavit a spojovat, nad 300 °C dochází již k rozkladu. Polystyren hoří pomalým jasným plamenem doprovázeným odkapáváním taveniny a vzniku sazí. Nevýhodou PS je malá tvrdost a náchylnost na mechanické poškození. PS stejně jako ostatní termoplasty je velmi dobrým elektro-izolantem ale špatnou vlastností je jeho snadné elektrostatické nabíjení. PS má měrnou hmotnost 1050-1100 Kg/m<sup>3</sup>. Nasákavost PS je 0,05 -0,1 % hm. Hlavní nevýhodou polystyrenu je jeho nízká rázová pevnost. [19]

Chemicky odolává většině kyselin kromě kyselin s oxidačním účinkem. Rozpouští se v acetonu, toluenu, benzenu a v ostatních rozpouštědlech. Pokud PS je čistý a téměř neobsahuje volný styren je toxicky nezávadný a smí se používat i v potravinářském průmyslu. Mezi další nevýhody PS patří jeho náchylnost na stárnutí vlivem oxidace kyslíku a slunečního záření křehne a žloutne. Naopak mezi jeho největší přednosti patří cena.

Polystyren lze probarvovat a díky jeho transparentnímu základu lze docílit velké škály odstínů. Dá se zpracovávat vstřikováním, vytlačováním na fólie, desky, trubky, nejrůznější profily, vlákna. Lze ho svařovat buď ultrazvukem nebo tepelně, lepit.

V současnosti se nejvíce používá vylehčený polystyren, který obsahuje asi 2 % polystyrenu a zbytek zaujímají plynné součásti. Vyrábí se dvou fázově z vypěňovatelného polystyrenu, v první fázi se horkou párou nechají expandovat kuličky PS s nadouvadlem (nejčastěji 4-7 % pentanu). Tímto procesem perly zvětší svůj objem 20 až 50krát. Ty se poté skladují v provzdušňovaných silech, aby se v „nafouknutých“ kuličkách vyrovnal tlak a zlepšily se jejich mechanické vlastnosti i další zpracovatelnost. Poté se tepelně lepí nebo lisují, válcují, přidávají se také retardéry hoření, koloidní grafit a jiné příměsi pro zlepšení vlastností. Tímto způsobem se vyrábí polystyren pěnový (EPS) a polystyren extrudovaný (XPS). [11]

**EPS** se vyrábí klasicky bílý nebo černý s přidavkem grafitu, díky tomu získává lepší vlastnosti. Objemová hmotnost se pohybuje od 10 do 30 kg/m<sup>3</sup>. Většinou se vyrábí v blocích, které se zcela vyplní napěněnými perlami, a pomocí syté vodní páry a zvýšené teploty perly ještě dále expandují a spojí se. Dále se řeže odporovým drátem na potřebné tvary. Další možností je vyexpandování přímo do forem, touto možností se vyrábí složité tvarovky nebo desky s pero drážkou či drážkou pro podlahové vytápění. Díky této metodě je polystyren mrazuvzdorný a méně nasákavý.

**XPS** se vyrábí extruzí za zvýšené teploty a tlaku neboli vytlačováním za současného napěňování. Díky tomu zaujímá XPS vyšší objemovou hmotnost. Oproti EPS má uzavřenou pórovitou strukturu a díky ní má i nižší nasákavost. Výroba probíhá většinou kontinuálně v pásech, které se následně řežou na požadované rozměry.

*Tabulka 7: Přehled vlastností lehčeného polystyrenu podle objemové hmotnosti. [10]*

Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	30	60
Pevnost v tlaku [MPa]	0,2 - 0,25	0,7
Pevnost v tahu [MPa]	-	1,25
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	0,032	0,035
Souč. délkové tep. roztažnosti [K <sup>-1</sup> ]	7 · 10 <sup>-5</sup>	7 · 10 <sup>-5</sup>
Max. použitelnost [°C]	75	75

Dle ČSN 73 0862 samozhášivý pěnový polystyren lze zařadit do stupně hořlavosti C1 – těžce hořlavé. Ostatní polystyreny jsou lehce hořlavé (stupeň hořlavosti C3) a spadají do třídy reakce na oheň E. [11][14]

### **Využití polystyrenu:**

Ve stavebním průmyslu se využívá převážně jako kontaktní tepelná izolace obvodových plášťů (ETICS), kde se desky lepí a kotví přímo na stavební konstrukci. Na ně se pak nanáší tenkovrstvá omítkovina. Dále se využívá jako ztracené bednění, tepelná izolace střech, podlah, podklad pro betonové potěry, PS drť nebo pouze kuličky se využívají jako výplně do příček.

Dále se polystyren využívá při výrobě nejrůznějších obalů, krytů elektroniky, koncové osvětlení aut, hračky, trubky, kontejnery, jako ochranná výplň pro balení výrobků. [11][12]

### **3.1.5 Polyuretany (PUR)**

Polyuretany se vyrábí polyadici diizokyanátů s vícemocnými alkoholy. U polyuretanu lze docílit velkého spektra vlastností. Spolu s reakčními látkami se přidávají různé katalyzátory, zpomalovače, stabilizátory, změkčovadla, retardéry hoření, emulgátory, barviva, nadouvadla, mazadla, a plniva. U pěnového PUR je hlavní uvolňování CO<sub>2</sub>, které působí jako expanzní plyn, tento účinek se dá podpořit přidávkou lehce těkavých látek. Polyuretany mají velmi široké využití právě díky možnostem úpravy jeho vlastností.

Lepidla na bázi PUR mají výbornou adhezi, kohezi a velmi dobrou mechanickou odolnost. Z polyuretanu lze vyrábět lepidla která jsou tavná rozpouštědlová nebo vodní disperze. Dle druhu lepidla lze vytvořit tuhé, měkké i trvale pružné spoje. Polyuretanová lepidla se používají pro lepení většiny materiálů jako jsou například dřevo, kovy, kůže, ocel.

Laky z polyuretanu mají stejně jako lepidla velmi dobrou adhezi. Dobře se probarvují, lze docílit velkého lesku. PUR laky jsou odolné vůči vodě a jsou méně hořlavé. Lehčené polyuretany se dělí na tvrdý a měkký. Jako nadouvací plyn zde působí již zmiňovaný CO<sub>2</sub> díky reakci izokyanátové skupiny s vodou, která je obsažena v alkoholech, fenolech, aminech apod.)

Měkký lehčený PUR se vyrábí většinou jednostupňově, kde se polymeruje při současném nadouvání oxidem uhličitým. Při dvoustupňové výrobě se směs nechá prvně před

polymerovat a poté se nechá expandovat a vytvrdit, nebo lze tyto způsoby kombinovat. Vzniklé výrobky mohou mít dle složení různé vlastnosti mezi ty stálé patří otevřená pórovitost a objemová hmotnost se nejčastěji pohybuje okolo 20 až 50 Kg/m<sup>3</sup>. Výrobky jsou náchylné na UV záření, vlivem tohoto záření žloutnou nebo hnědnou a ztrácí elasticitu. Měkčený lehčený PUR lze řezat stejně jako polystyren elektrickými dráty, lze jej stříhat, svařovat teplem a ultrazvukem, a to i k jiným materiálům jako jsou například dřevo, textil, nebo jiné plastické hmoty. Měkký lehčený polyuretan není odolný vůči trvalé vlhkosti, proto se většinou napouští hydrofobními bitumeny.

Tvrký lehčený PUR obsahuje větší množství izokyanátů a vyrábí stejně jako lehčené buď jednostupňově nebo dvoustupňově. Zpracovávají se buď litím nebo stříkáním, stříkáním se docílí menší objemové hmotnosti. Díky možnosti stříkání se tyto pěny dají použít přímo na stavbě. Vlastnosti tvrdých lehčených PUR závisí na jejich objemové hmotnosti. [10][11][17]

*Tabulka 8: Vlastnosti tvrdých lehčených PUR vztažené k objemové hmotnosti [10][11]*

Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
10	0,03 - 0,05	-	-
30	0,18 - 0,24	0,2 - 0,25	0,022
50	0,3 - 0,5	0,4 - 0,6	-
100	0,8 - 1,2	1,1 - 1,5	0,031

PUR pěny lze používat při teplotách od -50 do 120 °C případně i do 200 °C, nad tuto teplotu se již začínají rozkládat a při teplotách nad 300 °C hrozí samovznícení. Lehčí pěny hoří rychleji než pěny těžší. Nasákavost po 24 h. činí 1-3 % obj. Chemicky jsou odolné vůči vodě, zředěným louhům a kyselinám, tukům a olejům, avšak organická rozpouštědla PUR narušují.

PUR elastomery se podobají kaučuku a mají také podobné vlastnosti, ale mají například větší pevnost. Elastomery se také zpracovávají podobně jako kaučuky válcováním, nebo litím případně vstřikováním. Takto vyrobené polyuretany snášejí teploty i 160 °C dobře odolávají stárnutí a využívají se především jako nátěry, nástřiky a tmely. [11]

### **Využití polyuretanu:**

Lehčený měkčený PUR se využívá jako výplň sedadel, polštářů, matrací, na oděvy, obuv. Ve stavebnictví se používá jako těsnící hmota, popřípadě jako dilatační tmel pro spáry oken, dveří. Používají se také jako izolace jak tepelné, tak akustické i proti kročejovému hluku, ochranné výplně, filtrační materiál pro masky, klimatizace, jako čistící a lešticí předměty.

Tvrký lehčený polyuretan se využívá jako tepelná izolace střech, obvodových pláštěů, sendvičových panelů, příček, potrubí, mrazáků, jako stříkaná izolace pro těžko přístupné nebo tvarově náročné konstrukce.

Dále se polyuretan využívá jako fixační nástřiky, ozubená kola, potrubí, sedačky, protézy, součástky pro pračky, mycí stroje, ve strojírenství jako mazivo ložisek, dopravní válce, kladky, tlumící prvky, povlaky proti opotřebením a chemické odolnosti, pružné pěny, koženky, kolečka na skateboard, kolečkové brusle, horské dráhy, rámování autoskel a jiné.  
[10] [11]

### **3.1.6 Polyethyltereftalát (PET)**

Jedná se o polyester kyseliny tereftalové a etylenglykolu. Vyrábí se dvěma způsoby, první je dimethyltereftalátový, ve které spolu reagují v tavenině dimethyltereftalát s etylenglykolem při teplotě 150 až 200 °C, následně se z taveniny odstraní methanol a nadbytek etylenglykolu. Druhým způsobem je za zvýšeného tlaku a teploty esterifikován etylenglykol v kyselině tereftalátové, ze které se následně odstraňuje voda. PET může být průhledný, mléčně zakalený. Je dobře odolný vůči zředěným kyselinám a hydroxidům.

Mezi výhody patří cena a možnost až 100% recyklace, nízká hmotnost, pevnost, odolnost, jedná se hygienicky nezávadný materiál, nízká navlhavost (0,1 %), lze trvale vystavit teplotám až 100 °C a velkou propustnost pro světlo. Nevýhodou je vysoká teplota tání 260 °C, odolnost vůči koncentrovanějším kyselinám a silným hydroxidům, neodolává koncentrovanému amoniaku. [11][12][13]

PET našel největší využití v obalovém průmyslu, nejznámější je výroba PET láhví a fólií. Další využití má při výrobě vláken, která jsou velmi málo navlhavé, rychleschnoucí, nemačkávé a s velmi dobrou objemovou stálostí i za zvýšených teplot. Dále se používá pro výrobu nádob na potraviny, oblečení, v automobilovém průmyslu. [11] [12]

## 4. Recyklace plastů

Recyklace je proces, při kterém se využívá energie a materiálová hodnota produktu i po skončení životnosti výrobku. Recyklace má jak ekonomický význam, tak i ekologický, z výroby za použití recyklovaného materiálu, odpadá energie spotřebovaná na vyrobení primární suroviny, dále má znovuvyužití již existujícího materiálu menší dopad na životní prostředí a uhlíkovou stopu.

Materiály na bázi plastů, díky svým vlastnostem a možnosti všestranného využití, zahltily trh ve všech odvětví průmyslu. S jejich dlouhodobou životností materiálu, ale nižší použitelnou životností vytvořily problém, jak dlouhověký materiál zlikvidovat, nebo účinně znovu využít.

Odpad na bázi plastických hmot vzniká buď to již při výrobě jakož to odřezky, přetoky, obrysy nebo zmetkové výrobky, tedy odpad vratný, protože jej lze vrátit ve většině případů zpět do výroby bez jakýchkoliv úprav, aniž by nějak ovlivnil vlastnosti a kvalitu výrobku, nebo vzniká až po zužitkování výsledného produktu, jako jsou například obaly, plastové tašky a jiné výrobky, těmto odpadům říkáme odpad sběrový. [21][22]

V dřívější době se příliš nehledělo na možnost recyklace a znovuvyužití odpadních materiálů, což zapříčinilo, že odpad končil na skládkách, kde je jen těžko rozložitelný a je v nepřeberném množství. Na skládkách také vznikají další problémy díky spolu skládkování více druhů materiálů včetně nečistot. Díky tomu vznikl problém, jak tyto odpadní materiály znovuvyužít, tento problém s odpadními plastickými materiály nastává především kvůli:

- odpadní plasty bývají ve většině případů znečištěné různými druhy látek,
- na volné skládce jsou téměř nerozložitelné,
- velmi často jsou druhy plastů kombinovány mezi sebou, nebo s ostatními materiály,
- směsi plastů nemusejí být vždy kompatibilní a mohou být dále nezpracovatelné,
- plasty obsahují aditiva, zejména zpomalovače hoření, jakož je hexabromcyklododekan,
- při spalování plastických hmot dochází k uvolňování nebezpečných exhalátů jako je například HCl.

[21][23]

Odpadní materiály na bázi plastů lze rozdělit na materiály vhodné pro:

- Recyklaci (primární), materiál lze plně znova využít na výrobu produktů stejné kvality vhodné pro čisté jednodruhové plasty.
- Tzv. Downcycling (sekundární recyklace), produktem je druhořadý plast se sníženou kvalitou pro podřadné využití. Tyto výrobky mají horší vlastnosti než primární výrobky, výhodou je možnost zpracování více druhů plastu ve velkém objemu. Tento způsob druhotné recyklace se v ČR moc nevyužívá.
- Likvidaci, výmět neboli odpad, který nelze znova využít díky různorodosti materiálu, používá se jako tuhé alternativní palivo v teplárnách, cementárnách a spalovnách (odpad z recyklačních linek, různorodý plast, plasty s nezpracovatelnými aditivami), nebo se z něj také mohou vyrábět paliva, rozpouštědla za pomoci hydrolytické degradace. [22][23]

Vyvezení materiálu na skládku je dosud nejlevnější a nejjednodušší možností za cenu poklesu kvality životního prostředí. Spalování odpadních materiálů na bázi plastů je energeticky výhodnější díky využití energie ze spalování polymerů, které lze jednoduše spálit při teplotách okolo 900°C. Nevýhodou spalování plastických hmot je, že exhaláty, které se uvolňují při tepelném rozkladu, obsahují chlorovodík nebo fluorovodík. Odstranění je poměrně nákladné, chlorovodík vzniká zejména při spalování polyvinylchloridu a polychloroprenu, fluorovodík vzniká při spalování fluoroplastů, a určitých druhů kaučuku.

Nejnovější technologie jakož to alternativa spaloven je termická depolymerizace, která je mnohem účinnější a ekologičtější než spalovny, tato technologie však není rozšířená. Proto se recyklace jeví jako nejefektivnější znovuvyužití plastických materiálů, a zároveň také zmenšuje uhlíkovou stopu po výrobě plastu a díky znovuvyužití zlepšuje životní prostředí, zmenšuje objemy odpadu, které jsou vyvezeny na skládky. [21][22][23][24]

#### **4.1 Způsoby recyklace a znovuvyužití dle druhu odpadu a recyklace**

Nejsnadněji se recyklují termoplasty, elastomery a reaktoplasty (duroplasty) se recyklují obtížně nebo je recyklovat nelze vůbec. Recyklované výrobky vyrobené z recyklátu mohou být ve většině případů stejně kvalitní a mít stejné vlastnosti jako výrobky původní.

U určitých druhů plastů však dochází kvůli termickým, mechanickým, chemickým nebo biologickým procesům ke znehodnocení nebo degradaci materiálu. Kvůli těmto procesům nemají stejné vlastnosti to vede k omezení možnosti recyklace materiálu nebo se stanou nepoužitelnými kvůli znečištění. [22][23]

#### **4.1.1 Rozdělení odpadních plastových hmot dle čistoty**

- Čisté jednodruhové, jedná se o jeden typ plastické hmoty, která není nijak znečištěná (většinou odpady z výroby). Tento odpad je hodnotný, lze vrátit rovnou do výrobního procesu.
- Znečištěné jednodruhové, tyto odpady tvoří většinou obaly, folie, balící materiál nebo vytříděný odpad ze skládky, který je kontaminován například zeminou. Tento odpad se musí vyčistit v mycích linkách. Dále je jeho zpracování stejné jako u čistých jednodruhových materiálů.
- Čisté vícedruhové, ve většině případů čisté směsi různých druhů plastických hmot například PE/PP, více vrstvé folie, syntetické tkaniny.
- Znečištěné vícedruhové, jde o kontaminované vícedruhové materiály s obsahem plastických hmot, mohou obsahovat kovy, sklo aj.

## **4.2 Rozdělení recyklace dle druhu:**

### **4.2.1 Materiálová recyklace**

Jedná se o jednu z nejnáročnějších recyklačních metod, ale výsledné produkty mají stejné nebo velmi podobné vlastnosti jako primární výrobky. Materiálová recyklace je vhodná pro čisté termoplasty. Odpadní materiály se musí vyčistit, pokud nejsou zcela čisté, podrtit na požadovanou frakci a převede se na taveninu, do které lze přimíchat různá aditiva a barviva nebo nově vyrobené suroviny. Jestliže se jedná o jednodruhový plast, musí se dbát větší důraz na kontrolu kvality. V případě, že se jedná o odpad vícedruhový (směsný), je postup téměř stejný. Hmota se po vyčištění a drcení vkládá do extrudéru, kde se promísí, poté se tavenina vtláče do forem. Výsledné produkty mají zhoršené vlastnosti, ale odpadá nákladné třízení a lze vyrábět velkoobjemové výrobky. Tímto typem recyklace lze také



odpady zpracovávat na meziprodukty, jakož jsou například drtě, které lze dále využít jako vstupní suroviny. [23][22][26]

#### **4.2.2 Chemická recyklace**

K tomuto typu recyklace jsou vhodné odpady, které nelze využít materiálovou recyklací, lze využít i znečištěných odpadů. Chemickou recyklací se polymerní látky štěpí na monomery, které lze po vyčištění zpětně polymerizovat. Výsledný polymer má stejnou kvalitu jako recyklovaný. Mezi tyto metody patří tepelná depolymerizace, která spočívá v urychlené tepelné degradaci a solvolýzy, které fungují na principu opačné polykondenzace. Mezi solvolýzy patří alkoholýza, methanolýza, glykolýza aj. největší význam má pro recyklaci PET. [11][21][24]

#### **4.2.3 Surovinová recyklace**

Surovinová recyklace je chemický postup, při kterém je plast rozložen za zvýšených teplot bez přístupu kyslíku. Odpad se zde přemění na energeticky využitelný plyn, kapalné uhlovodíky, topné oleje, lehkou ropu, popřípadě uhlí nebo koks. Největší výhodou tohoto způsobu recyklace je, že nevznikají další odpady, mezi nevýhody patří vysoké náklady na pořízení recyklačních jednotek. [21][22][23][24]

#### **4.2.4 Energetická recyklace**

Energetická recyklace je vhodná pro materiály, které nelze z nějakých důvodů recyklovat výše uvedenými způsoby. Mezi výhody tohoto způsobu recyklace patří, že jsou eliminovány skládky, odpady nemusejí být nijak upravovány ani tříděny. Mezi produkty patří teplo, případně elektrická energie. Mezi nevýhody patří emise, které jsou velmi přísně regulovány, a exhaláty musí být vícenásobně filtrovány. Energetická recyklace je nejvíce rozšířená v severských zemích jako je Norsko, Finsko, Dánsko, ale také ve Švýcarsku nebo v Německu. [21][23][24][25]

#### **4.2.5 Recyklace dle druhu plastu**

##### **Termoplasty**

Termoplasty, díky jejich vlastnostem lze znovu přeměnit zpátky do plastického stavu, lze je tedy jednoduše roztavit a znovu využít. Problémy nastávají v tom, že materiál musí být

čistý, odmaštěný, a měl by obsahovat, pokud možno stejná aditiva. Mezi nejvýznamnější termoplasty patří polystyren, polypropylen a polyetylén. U polyvinylchloridu je složitější, protože obsahuje chlór, který je nebezpečný především při spalování, protože z něj mohou vznikat dioxiny. Materiál lze chemicky rozložit na uhlovodíky a chlorovodík, které lze dále využít. [21][22]

### **Reaktoplasty a termosety**

Tento typ plastických hmot je poněkud obtížné znovuzpracovat, díky jeho vlastnostem po vytvrzení již není tvarovatelný ani za vyšších teplot. Proto plasty tohoto typu končí životnost nejčastěji ve spalovnách, na skládkách nebo v linkách na chemickou recyklaci či energetické zhodnocení. [21][22]

## **4.3 Zařízení určené pro recyklaci odpadních plastů:**

### **4.3.1 Regranulační linka**

Regranulační linka je tvořena soustavou strojů určená pro kompletní přeměnu znečištěného plastického odpadu na primární surovinu (plastové granule), které následně slouží k výrobě nového výrobků. Používají se především pro recyklaci PP, PE, LDPE, HDPE, PS. Ve většině případů jsou linky přímo přizpůsobeny pro recyklaci folií, tuhých obalů, lehčených výrobků.

Před regranulační linkou se většinou provádí ještě dotřídění vstupních odpadních materiálů nejčastěji ručně na pásových dopravnících s cílem zbavit vsázku od hrubých nečistot a nežádaných materiálů. Provádí se také kontrola detektorem kovů s magnetem, který vyjme kovové součásti. [23][26]

Regranulační linky se skládají z podavače odpadu, kterým bývá nejčastěji pásový dopravník, ten dopravuje odpad do dvouhřídelového drtiče. Drtič rozdrtí termoplasty včetně nečistot na frakci přibližně do 20 mm, takto podrcený plast postupuje na třídící linku s rotačními nebo vibračními sítí s vodními tryskami, kde se odseparují hrubé nečistoty. Poté je materiál podroben vícenásobnému praní ve vlažné teplé i studené vodě za přidaných odmašťovacích prostředků pomocí centrifugy. Takto vyčištěný materiál dále pokračuje do sedimentačního (flotačního) zařízení, kde se vytřídí PVC, které se usazuje na dně a PP, HDPE, které vyplave, na základě různých objemových hmotností. Další zařízení v lince je centrifuga na odstředění

přebytečné vody, následuje sušička, která materiál vysuší na povrchovou vlhkost do 3 %. Dále se drť podrobí elektrostatické separaci, která funguje na principu statického náboje získaného z povrchu zrn drtě. Tady se rozdělí materiál na PP a HDPE. Dále materiál putuje do zásobních sil nebo může vést rovnou do granulačního stroje pro kontinuální výrobu.

Drť je zbavena veškerých nečistot, tudíž je vhodná pro vytlačování jakožto vstupní primární surovina, nebo může být dále vložena do optického separátoru, kde se rozdělí podle určité barvy či odstínu pro usnadnění výroby cílových výrobků.

Takto vyčištěný materiál v aglomerační lince dále pokračuje do extrudéru, kde je plastická drť za zvýšené teploty a tlaku za stálého míchání převedena do taveniny, která se pomocí vakua také odplyňuje a je čištěna pomocí filtru na taveniny. Následně je surovina tlačena do granulační frézy, kde je tavenina protlačována vstřikovací destičkou na provazce, které dále pokračují do granulační hlavy, kde jsou provazce taveniny zdrobněny na granule o velikosti 5-15 mm. Ty následně postupují do vodní lázně, kde se ochladí. Zchlazené granule se dále osuší v turbínové odstředivce a balí do velkoobjemových žoků nebo skladují v zásobnících. Granule jsou většinou černé, transparentní nebo šedé, neutrální barvy, ale vyrábí se i tříděné se specifickou barvou či odstínem. [23][26][27][28]



*Obrázek 6: Vzhled regranolátu z recyklační linky [45]*

### 4.3.2 Aglomerační linka

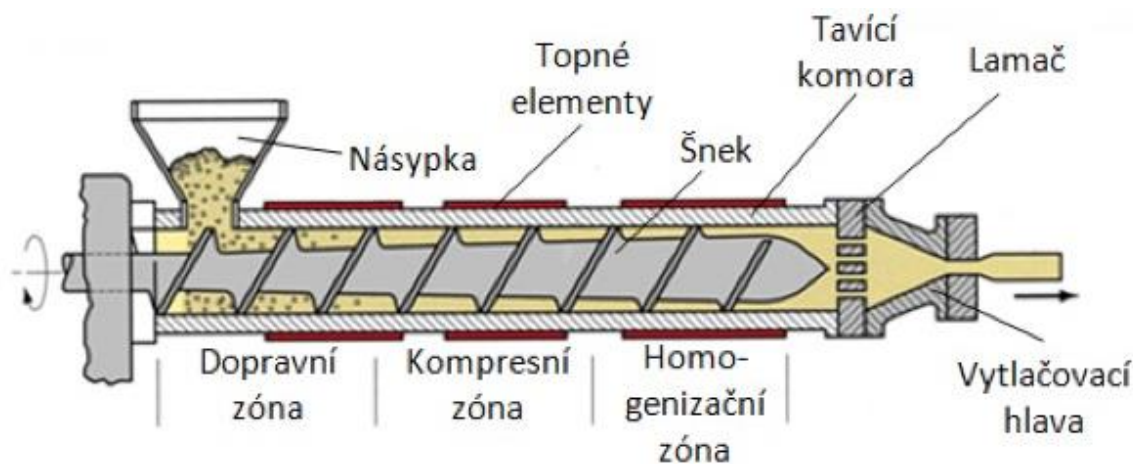
Slouží ke zpracování LDPE, HDPE a PP. Linka je určena na recyklaci čistého materiálu zejména folií a pěnového PE, který byl předem vytríděn ve sběrně odpadů a vyčištěn v mycí lince. Aglomerační linka je sestavena pouze z podavače, mísiče (extrudéru) a chladiče. Zde se vstřikuje voda, aby se přerušila plastifikace. Výslednou surovinou je aglomerát se zrny o velikosti 2-5 mm, který je vhodný pro tlakové vytlačování. [30]

### 4.3.3 Pulverizéry

Jsou mlýny určené pro mletí neznečištěné drtě, zejména PP, PE, PVC a PC o velikosti zrn 10 mm a méně, stroj používá pro mletí disky z nástrojové oceli. Výsledný produkt je prášek o velikosti 100–1000  $\mu\text{m}$ , který dále slouží jako primární surovina. [29]

### 4.3.4 Extrudér

Extrudéry nachází využití ve více odvětvích průmyslu. Extrudéry na plastické hmoty jsou určeny především pro termoplasty PP, PE, LDPE, HDPE, PVC, PA, TPV, TPE. Tyto stroje jsou určeny na kontinuální extruzi (vytlačování), při které dochází k plastikaci a homogenizaci materiálu, který přechází v taveninu a následně se protlačuje přes vytlačovací hlavu do požadovaného tvaru. Extrudéry se od sebe liší rychlostmi otáček, které mohou dosahovat rychlosti až 1500 otáček za minutu, průměrem od 20 mm do 250 mm, dále dle konstrukčního hlediska na extrudéry jednošnekové, dvoušnekové, vícešnekové, pístové či diskové. Nejčastěji jsou používány extrudéry dvoušnekové stejnoběžné. Tímto způsobem se vyrábí folie, trubky, trouby, tyče, parapety aj. [30]



Obrázek 7: Schéma jednošnekového extrudéru [30]

## **4.4 Zařízení na likvidaci odpadu na bázi plastu:**

### **4.4.1 Termická depolymerizace**

Termická depolymerizace je způsob přeměny plastických polymerních organických materiálu na kapalné uhlovodíky, ze kterých se pomocí destilace vyrobí 5-45 % procesního oleje, jako je například ELTO extrémně lehký topný olej a LTO lehký topný olej, 15-85 % provizních plynů a uhlík 5-35 %. Tento proces probíhá v reaktoru ve vysokém vakuu  $10^{-3}$  až  $10^{-4}$  Pa, a teploty kolem 450 až 900 °C bez přístupu kyslíku. Z organických materiálů se vyvine plyn, který je následně kondenzován.

Tento proces zpracování polymerů se označuje pyrolýzou a probíhá v tzv. depolymerizačních (pyrolizních) linkách. Tyto linky jsou určeny pro zpracovávání plastů, pryže, kaučuku, a dokáže zpracovávat i nebezpečné a těžkozpracovatelné odpady. Linky mohou mít teoretickou účinnost až 600 %, tj. 15 jednotek energie se spotřebuje na výrobu 85 jednotek energie. Účinnost a výtěžnost těchto jednotek závisí především na vstupních surovinách a na podmínkách v procesech. Nejvyšší oleje vznikají z pryže, plastu a kaučuku, uhlí je nejlepší z kaučuku a pryže s obsahem uhlíku 75 až 95 %.

Mezi výhody této metody patří to, že je zcela bezodpadová. Nevzniká žádný další odpad, a emise jsou 10 až 50krát menší než ve spalovnách. Projevuje mnohem vyšší činnost i využití energetického potenciálu (až 600 %) oproti spalovnám, které mají účinnost okolo 80 %. Tímto způsobem lze využít i těžko zpracovatelné odpady typu kov-plast či kov-pryž. Nevýhody této metody spočívají v klasifikaci výstupních materiálů, protože jsou velmi závislé na vstupních surovinách, a vyrobené plyny jsou ve většině případů více znečištěné než zemní plyn. Při jejich spalování mohou vznikat znečišťující látky. [24][30][31][32]

### **4.4.2 Spalovny**

Spalovny odpadu jsou prozatím nejrozšířenějším způsobem konečné likvidace smíšeného komunálního odpadu, tak i plastických hmot, a především elastomerů, reaktoplastů nebo plastových materiálů, které obsahují nevhodná aditiva.

Spalovna sestává ze zásobníku odpadu, podavače, kterým je nejčastěji drapák, který přepravuje odpad do kotle. Odpad se nejprve předeheje, vysuší a následně shoří za vzniku škváry a exhalátů. Škvára se následně chladí, přesívá a postupuje do zásobovacích sil s využitím ve stavebnictví.

Teplo, které kotel vyprodukuje, se využívá k parnímu pohonu turbín při výrobě elektrické energie nebo putuje do tepláren. Exhaláty ze spalovny se musí vícekrát filtrovat a čistit, musí se adsorbovat těžké kovy, polutanty (látky, které mají škodlivý vliv na živé organismy), následuje adsorbér s rozstřikovačem vodní vápenné suspenze, která na sebe váže  $\text{SO}_2$ . V posledním stupni čistění exhalátů jsou textilní filtry a adsorbér se suchým hašeným vápnem. [21][24][33]

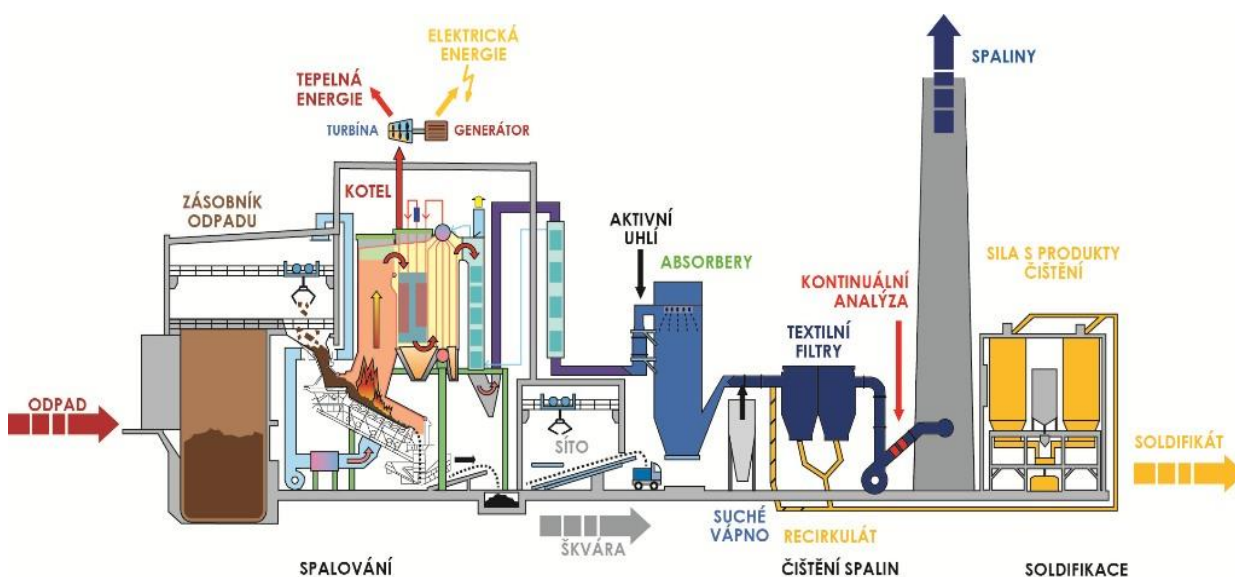
### Rozdělení spaloven:

- Nízkoteplotní jsou určeny pro spalování především tuhého odpadu za teplot okolo 800 až 1000 °C,
- Vysokoteplotní spalují tuhé i kapalné odpady a některé nebezpečné odpady, jako jsou různé chemikálie a halogenované látky, za teplot v rozmezí 1200 až 1500 °C.

Mezi výhody této metody patří, že zmenšuje objem odpadu téměř o 90 %, což představuje 10násobnou úsporu objemu na skládkách. Vyžadují jednoduché řízení přeměny odpadu, který by jinak ležel na skládce na využitelnou energii. Odpadní materiály pro spálení nemusí být nijak upravovány ani čistěny. Lze spalovat i některé nebezpečné odpady.

Hlavní nevýhody spaloven spočívají ve vypouštění exhalátů, i přes vícestupňové čistění vypouští značné množství  $\text{NO}_x$  a  $\text{SO}_x$ . Účinnost spaloven bývá pouze mezi 70 a 85 %.

[21][24][33]



Obrázek 8: Schéma uspořádání spalovny [33]

## **5. Nakládání s odpadními materiály na bázi plastů v ČR**

### **5.1 Odpadová bilance v České republice**

V České republice se ročně vyprodukuje přibližně 25 milionů tun odpadu ročně, z tohoto množství je téměř 21 milionů tun (85 %) odpad z podniků a necelé 4 miliony tun tvoří komunální odpad (15 %). Z podnikového odpadu největší objem zaujímá stavební průmysl s hodnotou přibližně 9 milionů tun odpadu ročně, ale je nutné zmínit, že největší míra spotřeby i výroby recyklovaných materiálů patří tomuto odvětví.

V ČR se nakládá až s 35 miliony tun odpadu, z tohoto množství odpadu se využije 85 %.

- 8,6 milionů tun se zrecykluje (24,6 %),
- 19 milionů tun se využije jako palivo (54,3 %),
- 1,2 milionu tun se spotřebuje na jiné energetické účely (3,4 %),
- na skládkách skončí přibližně 10 %.









V roce 2017 bylo z komunálního odpadu využito 50 % odpadu, z toho 38 % materiálově a 12 % energeticky. Na skládkách bylo uloženo 45 % a zbývajících 5 % skončilo na neřízených (černých) skládkách. [35][36][37]

### **5.2 Třídění odpadních surovin na bázi plastů a jejich způsob využití**

Třídění surovin je jedním hlavních atributů k úspěšnému a kvalitnímu znovuvyužití či recyklaci plastů. Na území ČR. systém třídění odpadu, jeho svoz a recyklaci a využití na evropské úrovni zajišťuje společnost EKO-KOM. Dle statistik této společnosti odpady v České republice třídí až 73% obyvatel.

V České republice, stejně jako v celé Evropě, jsou zavedeny pro všechny druhy materiálů včetně plastických hmot, které jsou uvedeny na trh, tzv. univerzální recyklační symboly. Tyto symboly slouží k identifikaci materiálů, což nadále pomáhá k usnadnění recyklace. V České republice se ročně vytřídí přibližně 140 tisíc tun plastu, který tvoří přibližně 21 % odpadu. [35][37]

Tabulka 9: Přehled univerzálních recyklačních symbolů pro plastické hmoty [25][38]

Znak	Materiál	Písmenný kód	Číselný kód	Kam s ním	Výsledný produkt recyklace
	Polyethylentereftalát	PET nebo PETE	1	kontejner na plasty nebo přímo na PET	Izolace do bund a spacáků, textilní vlákna
	Vysokohustotní (lineární) polyetylén	HDPE nebo PE-HD	2	kontejner na plasty	trubky
	Polyvinylchlorid	PVC nebo V	3	sběrný dvůr	okna, parapety, dveře, chlorovodík, uhlovodíky
	Nízkohustotní (rozvětvený) polyetylén	LDPE nebo PE-LD	4	kontejner na plasty	Trubky
	Polypropylén	PP	5	kontejner na plasty	sáčky a tašky
	Polystyren	PS	6	kontejner na plasty	stavební izolační materiál
	Ostatní	O nebo OTHER	7	kontejner na plasty	ostatní plasty
	ABS plasty – Akrylonitrilbutadienstyren	ABS	9	NEPATŘÍ do kontejneru na plasty	většinou nejde recyklovat

### 5.3 Uhlíková stopa

Uhlíková stopa udává, kolik skleníkových plynů se uvolní při určité aktivitě, výrobě či celé životnosti produktu nebo sídla (města). Tato hodnota se udává v hmotnostních ekvivalentech CO<sub>2</sub>, proto všechny skleníkové plyny, které se vyprodukují, se přepočítají na CO<sub>2</sub> a následně sčítají. Uhlíková stopa vypovídá, jaký vliv má výrobek, akce nebo například město dopad na životní prostředí, například u výrobků se uhlíková stopa počítá od natěžení surovin, zpracování, celou dobu životnosti až po následnou likvidaci. Uhlíkovou stopu produktů můžeme výrazně omezit znovuvyužitím a recyklací produktu. Průměrná emisní zátěž na jednoho člověka v České republice je přibližně 10 tun CO<sub>2</sub> za rok, Evropský průměr je 7,5 tun CO<sub>2</sub>. [34]



## 6. Nakládání s odpadními materiály na bázi plastu ve světě

V celosvětovém měřítku je většina odpadů v současné době ukládána na skládku. Zhruba 37 % odpadů je uloženo v nějaké formě skládky, z toho 8 % je uloženo v sanitárních skládkách se systémy pro shromažďování skládkového plynu. Ilegální skládky pojmají přibližně 31 % ze skládkovaného odpadu, 19 % projde recyklací a kompostováním, asi 11 % se spaluje pro konečnou likvidaci. Celosvětově se ročně vyrobí téměř 350 milionů tun plastů, z čehož se pouze 9 % je recyklováno. [39][40][41]



Obrázek 9: Celosvětové složení odpadu dle druhu materiálu složek [39]

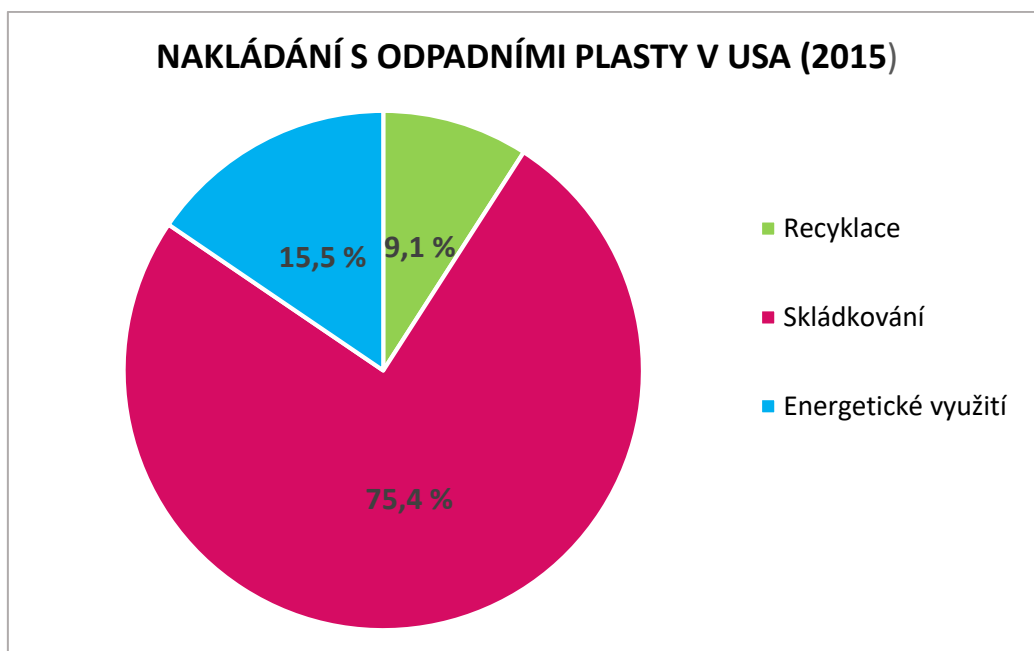
### 6.1 UNEP

UNEP je programem OSN pro životní prostředí (UN Environment). Tato organizace vznikla v roce 1972 jakož to vedoucím globálním orgánem pro ochranu životního prostředí. V neposlední řadě se zajímá o globální problémy, jakými jsou klimatické změny a nakládání s opady, tedy i o problémy spojené s recyklací plastů a jejich znovuvyužití. Cílem UNEP je minimalizovat veškeré negativní dopady na životní, podporu regulačních a právních předpisů v oblasti odpadních materiálů, a především zavedení oběhové ekonomiky, která je založené na programu „reuse, recycle, reduce“, tedy znovuvyužití, znovupoužití, snížení. [39]

## 6.2 USA

Ve Spojených státech amerických má odpadové hospodářství v péči EPA (Agentura Spojených států na ochranu životního prostředí, sídlo ve Washingtonu, DC.). Tato organizace dohlíží na regulaci nebezpečných odpadů, předpisy o skládkách a stanovení cílů recyklace.

V roce 2015 se na celém území USA shromáždilo přes 34,5 milionů tun plastů pouze z komunálního odpadu. Odpadní materiály na bázi plastů tvoří až 20 % celkového objemu skládek, a míra recyklace je zde v celosvětovém měřítku nejmenší pouze 9,1 %. Nejčastěji se odpad využít k energetickým účelům. Energetické využití se většinou provádí ve spalovnách s nízkou účinností. [39][40][41]



Obrázek 10: Přehled nakládání s odpadními plasty v USA [40][41]

## 6.3 ASIE

Státy Čína, Thajsko, Malajsie, Indonésie, Vietnam do nedávna patřily mezi celosvětově největší zpracovatele plastových odpadů. Například Čína, jakožto největší světový výrobce plastů, také přijímala až 56 % veškerého odpadu na bázi plastů, který byl vyprodukován ve světě. Ke zpracovávání odpadu zde ve většině případů bylo využíváno ilegálních rodinných, často velice špatně vybavených podniků, které fungují bez kontroly znečištění

ovzduší. Mezi hlavní produkty těchto společností patří plastové granuláty s velmi nízkou kvalitou.

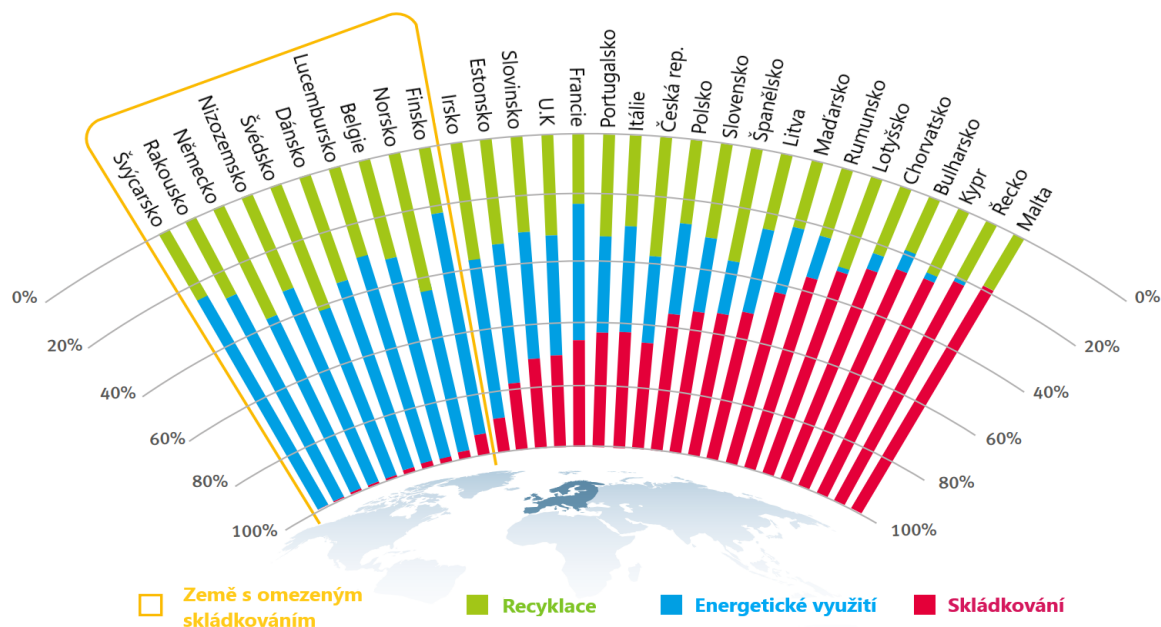
Od roku 2013 vzniká tzv. Green Fence Operation (Operace zelený plot), která vedla k výraznému omezení možnosti vyvážet plastický odpad a zavedla regulaci veškerého odpadu, který proudil především z USA, Japonska a Evropy. Dne 27. července 2017 čínská státní rada vydala zákaz příjmu zahraničních odpadů a reformu administrativního systému o dovozu pevných odpadů.

V roce 2019 byly také v Malajsií vytvořeny nové předpisy o regulaci dováženého odpadu a bylo zavřeno více než 100 nelegálních podniků na jeho zpracování.

V současné době Asie recykluje přibližně 26 % světového plastového odpadu. Nejrozšířenějším způsobem recyklace je regranulace, plastový granulát je přitom také zároveň využit. [39][42]

## 6.4 EVROPA

Za posledních 10 let se míra recyklace v Evropě zvýšila téměř o 80 %. Celosvětově Evropa nyní patří k lídrům v recyklaci s hodnotou přes 30% recyklace veškerých odpadů. V celé Evropě v roce 2017 objem zabíraného plastového odpadu činil 27 mt. Z toho 31,1 % bylo recyklováno, 41,6 % energeticky zhodnoceno a 27,3 % uloženo na skládky. [40][43]



Obrázek 11: Porovnání zemí EU ve způsobu znovuvyužití odpadů na bázi plastů [43]

## **7. Znovuvyužití odpadního polypropylenu**

Polypropylen patří mezi termoplasty a pokud není znečištěn, lze jej ve většině případů jednoduše recyklovat a pomocí zvýšené teploty převést zpátky do stavu taveniny, z níž lze vyrobit granule. Další možností, pokud je PP čistý, je pouze podrtit a použít jako vstupní surovinu. Problémy však nastávají, pokud PP obsahují různé příměsí, které mohou negativně ovlivňovat jeho vlastnosti pro další využití. Další velmi častou využívanou formou je expandovaný polypropylen (EPP), který je podobný EPS. [17][23]

Recyklace polypropylenu lze rozdělit dle výsledného produktu na:

- Výrobu recyklovaného meziprojektu,
- Výroba kompozitních materiálů,
- Výroba energie.

### **7.1 Výroba meziprojektů z recyklovaného PP**

Zpracování polypropylenu na polotovary vhodné k následné výrobě produktů. Meziprojektů jsou většinou ve formě drti nebo granulí.

#### **7.1.1 Recyklát ve formě granulí**

Regranulace patří k neefektivnějšímu zpracování odpadního PP. Díky tomuto procesu se z odpadu stává primární surovina pro výrobu nových výrobků se stejnými vlastnostmi jako měla vstupní surovina pro výrobky původní. Nejčastěji se tímto způsobem zpracovávají fólie, role, zmetky z výroby, přetoky a odřezky. Odpadní polypropylen musí být čistý a pouze s vybranými druhy aditiv. V některých případech se může regranulovat spolu s polyetylénem, ze kterého pak vzniká směsný regranulát PE/PP. Granule z odpadních plastů poskytují levnější, velmi kvalitní a čistou vstupní surovinu pro využití v plastikářském průmyslu. Regranulát z PP je doporučen pro zpracování technologií vytlačování a vstřikování. [28][44][46]

#### **7.1.2 Drtě**

Drtě se vyrábí většinou z průmyslových čistých odpadů jakož jsou přetoky, nedolisky, zmetky, ořezky. Při výrobě drtí se využívá moderních pomaluběžných drtičů a nožových mlýnů. Drtě zpracovávají i externí specializované firmy, od kterých lze drť odebírat. Drtě lze upravit dle individuálních požadavků zákazníka s požadavkem na velikost zrna, barvu aj.

Dále se drtě z odpadního PP dají zpracovat pomocí technologie vytlačování, lití, vyfukování nebo vstřikování do forem. [44][45]

## 7.2 Výroba kompozitních materiálů

Mezi nejběžnějším způsoby zpracování odpadních plastických hmot je zakomponování do stavebních kompozitů. K tomuto účelu se plastový odpad nejčastěji využívá ve formě drtě nebo regenerátu a plní funkci plniva. [11][21]

Použitím polypropylenových částic se zabývali Ozbakkaloglu a spol., kteří odpadní částice polypropyleny použili jako náhradu kameniva do betonové směsi. Betonové směsi s přídavkem 10 % PP již vykazují zhoršené vlastnosti oproti referenčním vzorkům, to se projevuje zejména významným poklesem v pevnosti v tlaku, v pevnosti tahu za ohybu, odolnosti vůči zvýšeným teplotám (zejména teplotám tání PP). Výsledky ukazují, že mechanické vlastnosti betonů s příměsí odpadních částic jsou nižší než vlastnosti betonu vyrobeného z přírodního kameniva, pokud je obsah odpadních částic pod jistou hranicí, tento rozdíl není příliš vysoký. Tuto metodu lze nabídnout jako jednu z možných ekologicky udržitelných způsobů využití odpadů na bázi PP. [46]

Recyklovaný polypropylen lze dále využít do silničních asphaltů, tímto tématem se zabýval Sook F. Wong a spol. Studovány byly vlivy přidaných polymerů do bitumenových matric. Jako odpadní částice byly použity LDPE, PP, PS a HDPE. Cílový polymerem modifikovaný asfalt s recyklovanými polymery (10 % hmotn. LDPE, 10 % hmotn. PP, 25 % hmotn. PS a 2 % hmotn. HDPE) byly příznivějším pojivem než referenční bitumen, kvůli sníženým hodnotám u zkoušky penetrace a zvýšenému bodům měknutí. Tato směs také vykazovala lepší stabilitu a součinitel pevnosti při zkoušce Marshall Stability Test. Jde o zkoušku, kde se měří deformace a napětí v asfaltovém kompozitu při teplotě 60°C. Přidáním odpadních plastů se významně zlepšily užité vlastnosti, což naznačuje příznivou roli polymeru v modifikovaném asfaltu. [47][48]

Dále se používá recyklovaný polypropylen k výrobě nejrůznějších výrobků, např. kontejnery, přepravky, desky, kde se recyklovaný polypropylen ve formě drtě nebo granulí přimíchává k polypropylenu prvotnímu, nově vyrobenému a mísí se s jinými polymery jako je PE, případně jiný druh materiálu například (minerální plniva, textil, papír apod.) až do 30% hmotnosti. Tyto výrobky pak mají ve většině případů odlišné vlastnosti oproti

výrobkům bez přídavků recyklátu. Nejrozšířenější je výroba desek, trubek, přepravek. [11][17][22][23]

## 7.3 Energetické zhodnocení polypropylenu

### 7.3.1 Výroba paliv

Paliva vyrobená z polypropylenu jsou jedněmi z nejkvalitnějších v porovnání s ostatními plastickými odpady, hlavně díky vyššímu obsahu uhlíku. Největší výhodou těchto metod spočívá v nenáročných požadavcích na kvalitu a čistotu odpadní suroviny, tudíž lze zpracovávat vícevrstvé folie s různorodými materiály, jejichž separování a čištění by bylo velmi nákladné. Paliva lze z odpadního plastu vyrobit těmito postupy:

- **Pyrolýzou**, ta probíhá za nízkého tlaku a zvýšených teplotách bez přístupu kyslíku, tímto způsobem lze vyrobit plyny a koks (při společné pyrolýze plastu s uhlím).
- **Hydrogenace**, ta probíhá za vysokého tlaku a přítomnosti katalyzátorů, produktem jsou nasycené, většinou kapalné uhlovodíky, které lze zpracovávat pro výrobu benzínu, nafty, lehkých topných olejů a jiných pohonných látek.
- **Zkapalnění**, jde o jeden z nejdražších postupů. Společným zkapalněním plastů s uhlím vzniká lehká ropa, která je velmi cennou surovinou.
- **Termická depolymerizace** – probíhá za vysokých teplot (do 900 °C), bez přístupu kyslíku, výroba plynu, topných olejů, uhlí. [26][32][33]

### 7.3.2 Použití polypropylenu jako paliva

Tato možnost představuje krajní řešení, neboť lze polypropylen lehce recyklovat tzv. materiálovou recyklací. Spalování se jeví jako poslední možnost, pokud je odpad velmi znečištěný různými druhy materiálů. Polypropylen je poměrně vhodný i na energetickou recyklaci, výhřevnost čistého PP činí 42 až 44 MJ/kg (v porovnání metan (50 MJ/kg), koks (30 MJ/kg), hnědé uhlí (10-17 MJ/kg), dřevo (13 MJ/kg)). Při dokonalém spalování vzniká H<sub>2</sub>O a CO<sub>2</sub>, avšak při reálné situaci vznikají také saze, oxid uhelnatý a akrolein (silně dráždivá látka, která způsobuje štiplavost kouře). Nevýhodou je produkce většího objemu exhalátů s CO<sub>2</sub> a většinou menší účinnost využití. [19][33][49]

## 8. Experimentální část

### 8.1 Ověření využití odpadních částic expandovaného polypropylenu

V experimentální části bylo úkolem navrhnout a ověřit možnost zpracování dostupného vzorku odpadních částic expandovaného polypropylenu pro přípravu tepelně izolačního materiálu. Při přípravě vzorku bylo dbáno na ekonomické hledisko a využitelnost materiálu. Ověřovanými možnostmi zpracování tohoto odpadního materiálu bylo vytvoření kompozitu z odpadních částic a pojiva. Jako pojiva byla použita: epoxidová pryskyřice, univerzální lepidlo a dále bylo vyzkoušeno spékání pomocí teplotního zatížení vzorku. Na vzorcích byly sledovány hlavní parametry součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost a pevnost v tlaku při 10 % deformaci.

### 8.2 Charakterizace použitých materiálů:

#### Odpadní částice EPP

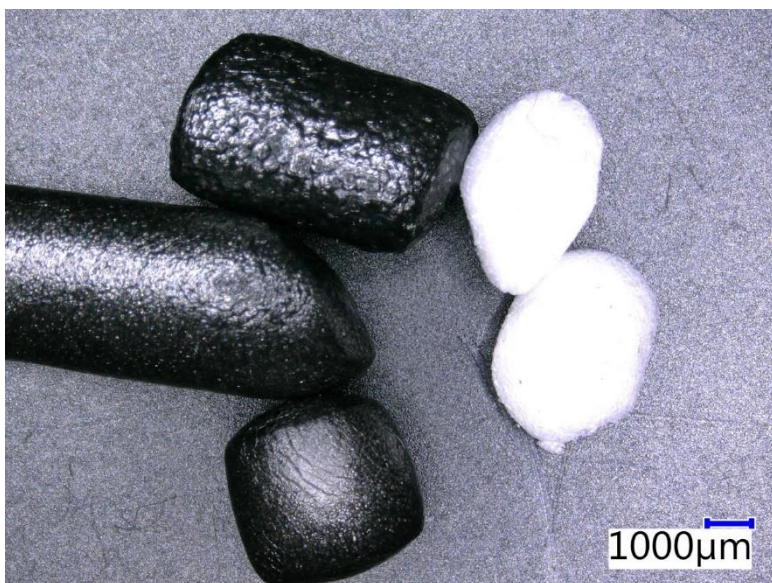
Odpadní expandované polypropylenové (EPP) částice vznikají jako odpad při výrobě Automotive (výroba součástí do automobilů; dveře, nárazníky, prvky palubní desky). Odpadní částice však nevyhovují požadavku na míru expandování a možnost vrácení částic do výroby není možné kvůli vysokým nárokům na kvalitu dílů při výrobě. Recyklace tohoto odpadu materiálovou recyklací by vyžadovala další extrudery pro recyklaci, což přináší další náklady, rozšíření personálu, místa, skladů a zajištění kontroly kvality. Z těchto důvodů se jeví pro výrobce příznivější zaplatit likvidaci odpadu. Částice jsou velmi podobné pěnovému polystyrenu a mají také obdobné vlastnosti. Objemová hmotnost vzorku činí asi 20 kg/m<sup>3</sup>.

Tabulka 10: Charakteristické složení vzorku odpadního EPP.

Složení vzorku EPP:	
Makroplus	1,8 %
Cromofix	7,0 %
Makroslip	5,0 %
Eltex nebo Mosten	86,2 %

Charakteristika složek vzorku odpadního expandovaného polypropylenu

- **Mosten a Eltex** jsou obchodní názvy pro surový polypropylen vhodný pro další zpracování lisováním, vstřikováním a vytlačáním.
- **Makroslip EA 2042** je koncentrát kluzného činidla určený pro povrchovou modifikaci výrobků z PP. Účinná složka koncentrátu snižuje povrchové tření výrobku.
- **Makroplus F4008/PPr** je koncentrát 40 % mastku a 8 % stearanu zinečnatého v PP polymerní matici.
- **Cromofix Black/Negro** je obarvující složka černé barvy.



Obrázek 12: Vzorek částic EPP (černé) na levé straně, na pravé straně částice EPS. (foto autor)

### **Epoxidová pryskyřice IN EPOX2050**

Čirá dvousložková epoxydová pryskyřice od společnosti IN Chemie Technology, je primárně určená na vyrovnávání a reprofilaci pod všechny podlahové hmoty, lze použít také pro opravné malty či penetraci. Mezi výhody patří výborná adheze ke všem druhům materiálů včetně vlhkých povrchů, nízká viskozita, dobrá penetrace, slabý zápach, rychlá polymerizace, snadná aplikace. Optimální míšící poměr složky A: B je 1,75:1.

### **Duvilax L58**

Univerzální speciální stavební lepidlo Duvilax L58 je lepidlo na bázi vodní disperze a kopolymeru vinylacetátu s esterem akrylové kyseliny (PVAC) a speciálních přísad. Toto



lepidlo je vhodné hlavně pro lepení textilních a PVC podlahovin, linolea, marmolea, mramorové a vinylazbestové dlažby, plastových parapetů, různých keramických nebo polystyrenových obkladů. Lepidlem Duvilax L58 lze lepit veškeré materiály, přičemž jediné kritérium je, aby jeden z materiálů byl savý nebo bylo umožněno vyschnutí lepidla. Lze jím lepit savé i nesavé povrchy, je netoxický, nehořlavý, zdravotně nezávadný, cenově dostupný, biologicky odbouratelný.

### 8.3 Použité přístroje:

#### Isomet 2114

Jedná se o přenosný přístroj pro měření parametrů prostupu tepla. Tento přístroj využívá nestacionární metody, která je rychlejší než metody stacionární. Přístroj slouží k měření součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  a dále k měření tepelné kapacity a teploty vzorku. Tento přístroj je vhodný pro měření parametrů na tepelně izolačních materiálech včetně plastů, skel aj., je vybaven dvěma druhy sond, povrchovou a jehlovitou. Zařízení je primárně napájeno z baterie, ale může být připojeno i do sítě. Přesnost tohoto přístroje je 5% naměřené hodnoty  $+0,001 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  do hodnot  $0,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , nad tuto hodnotu je odchylka do 10% měření. Pro naše měření byla použita povrchová sonda typu IPS 1100. [50]



Obrázek 13: Vzhled přístroje Isomet 2114 [50]

#### Zkušební lis M350-20CT

Jedná se o stolní počítačem řízený dvousloupový univerzální lis pro zkoušky v tahu, tlaku, ohybu, adheze aj. Tento stoj byl použit k naměření pevnosti v tlaku při 10 % deformaci. Poskytuje možnost grafického výstupu a velmi přesného měření deformace s rozlišením 0,01mm [51]

## 8.4 Příprava vzorků:

Byly připraveny tři druhy záměsí.

První směs byla navržena jako testovací směs EPP s epoxidovou pryskyřicí, kde bylo zjištěna vzájemná kompatibilita a zpracovatelnost směsi. U následujících záměsí byly upraveny poměry expandovaného odpadního polypropylenu a epoxidové pryskyřice, také množství univerzálního lepidla Duvilax. V poslední fázi experimentu bylo odzkoušeno spékání násypu dostupného vzorku odpadních EPP částic. Formy byly vždy vystříkány silikonovým separačním sprejem a vyloženy PE folií. Namíchané záměsi byly jednak volně ukládány a také lehce ztuhněny přitlakem závaží.

### Směs č.1

U směsi č. 1 byly použity formy 200x200x40mm, dávkování bylo u pojiva provedeno hmotnostně a následně převedeno na objem, dále byly odpadní EPP částice dávkovány objemově kvůli velmi nízké hmotnosti odpadních částic. Objemový míšící poměr mezi epoxidovou pryskyřicí a částicemi odpadního polypropylenu byl u směsi č. 1 zvolen přibližně na 85 % EPP + 15% epoxidové pryskyřice.

Tabulka 11: Složení směsi č.1 (pojivo epoxidová pryskyřice)

Složení směsi č.1		objem [l]
Odpadní částice EPP		2,76
Epoxidová pryskyřice	složka A=0,267 l složka B=0,153 l	0,42

### Směs č.2

U směsi č.2 bylo výrazně snížen podíl epoxidové pryskyřice. Pro formování zkušebních vzorků byly použity kovové trojformy pro vzorky 100x100x100 mm. Ve směsi č 2 byl objemový podíl snížen na 99 % EPP + 1% epoxidové pryskyřice.

Tabulka 12: Složení směsi č.2 (pojivo epoxidová pryskyřice)

Složení směsi č.2		objem [l]
Odpadní částice EPP		4,65
Epoxidová pryskyřice	složka A=0,030 l složka B=0,018 l	0,048

### Směs č.3

U směsi č.3 bylo použito univerzální lepidlo Duvilax L58, jako formy byly použity trojformy pro vzorky 100x100x100 mm. Ze zkušeností z předešlých směsí byl zvolen přibližný poměr objemového mísení na 99 % EPP + 1 % Duvilax L58.

Tabulka 13: Složení směsi č.3 (pojivo Duvilax L58)

Složení směsi č.3	objem [l]
Odpadní částice EPP	4,60
Univerzální lepidlo Duvilax L58	0,032

### Spékání vzorku

Spékání vzorku bylo odzkoušeno v kovových trojformách 100x100x100 mm. Všechny vzorky byly zatíženy závažím o hmotnosti 1 kg, které působilo na vzorek tlakem 1kPa. Vzorky byly podrobeny teplotnímu zatížení teplotou 110 °C po dobu 2,5 hodiny. Teplota 110 °C bylo odhadnuta jako teplota přibližně 80% teploty skelného přechodu  $T_g$ , která byla výrobcem uvedena 143,5 °C.

## 8.5 Naměřené hodnoty

### Stanovení objemové hmotnosti

Tabulka 14: Vlastnosti směsi č.1 (pojivo epoxidová pryskyřice)

Směs č.1 (Epoxid test)		rozměry [mm]			Objemová hmotnost $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
OZN.	hmotnost [g]	a	b	c	
T1	115,5	35	200	201	80
T2	111,4	34	201	199	80
T3	118,00	36	200	199	80

Tabulka 15: Vlastnosti směsi č.2 (pojivo epoxidová pryskyřice)

Směs č.2 (epoxid)		rozměry [mm]			Objemová hmotnost $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
OZN.	hmotnost [g]	a	b	c	
A1	20,19	69	98	100	30
A2	18,88	64	99	100	30
A3	20,91	74	99	99	30

Tabulka 16: Vlastnosti směsi č.3 (pojivo Duvilax L58)

Směs č.3 (Duvilax)		rozměry [mm]			Objemová hmotnost $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
OZN.	hmotnost [g]	a	b	c	
B1	23,45	85	99	101	30
B2	24,38	90	101	101	30
B3	23,60	85	100	100	30

### Stanovení součinitele $\lambda$

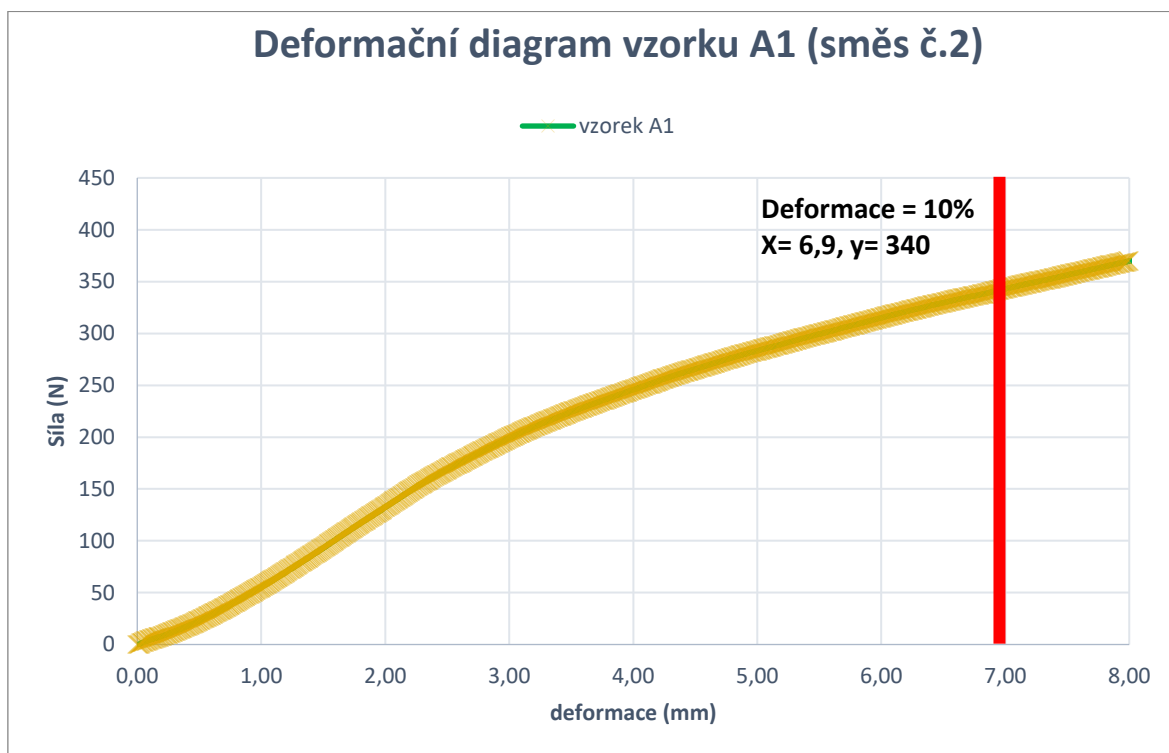
Tabulka 17: Naměřené fyzikální hodnoty vzorků přístrojem Isomet 2114

	označení	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\theta$ (°C)	c. $\rho$ (.10 <sup>6</sup> J/(m <sup>3</sup> .K))	c (J/(kg.K))
Epoxydová pryskyřice (test) směs č.1	T1	0,0432	27,8	0,0832	1074
	T2	0,0436	28,4	0,0868	
	T3	0,0436	28,6	0,0877	
Epoxidová pryskyřice směs č.2	A1	0,0402	27,7	0,0791	2619
	A2	0,0402	28,6	0,0805	
	A3	0,0398	27,8	0,0761	
Duvilax L58 směs č.3	B1	0,0400	28,9	0,0791	2674
	B2	0,0399	28,8	0,0840	
	B3	0,0396	28,2	0,0776	

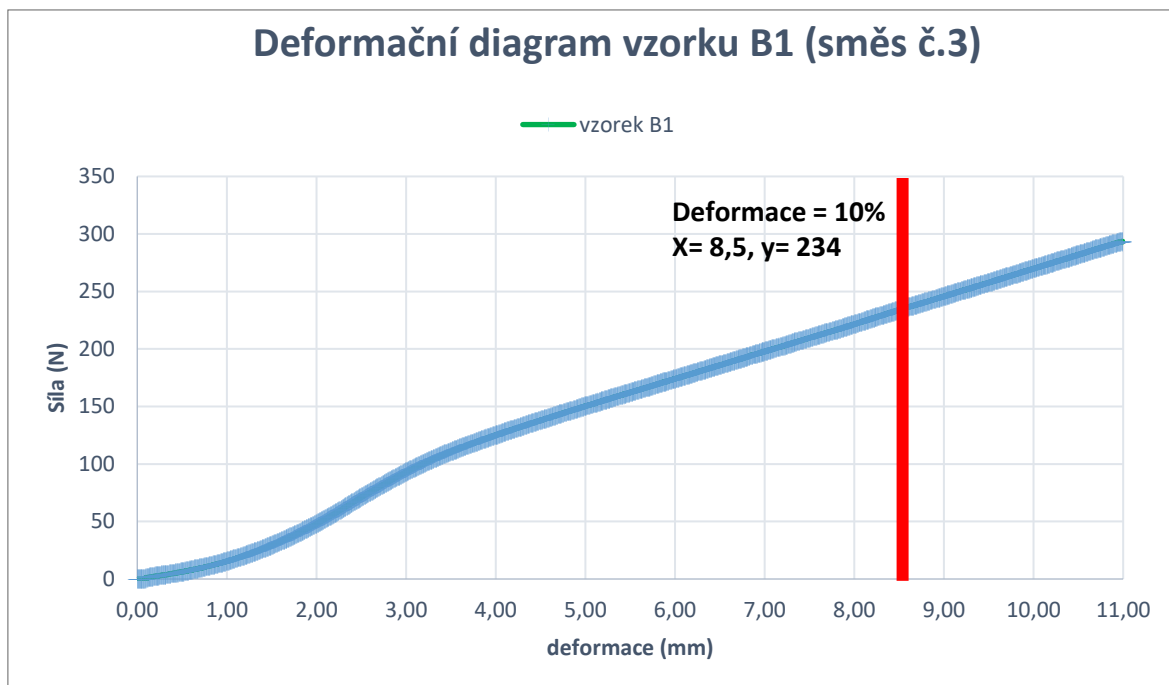


Obrázek 14: Měření součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  příložnou sondou ISOMET.

## Stanovení pevnosti v tlaku při 10% deformaci



Obrázek 15: Závislost průběhu deformace vzorku A1 na tlakové síle razníku zkušebního lisu M350-20CT. Svislá čára uvádí odečtení síly při 10% deformaci.



Obrázek 16: Grafický výsledek z lisu M350-20CT: Závislost deformace na tlakové síle, odečtení síly při 10% deformaci vzorku B1.

Pevnost v tlaku při 10 % deformaci byla ověřena pouze na reprezentativních vzorcích z každé směsi. Vzorky s testovací směsí byly vyřazeny.

## 8.6 Přehled poznatků z provedených experimentů

### Směs č.1

Připravená záměs měla medovitou konzistenci, do forem se dobře plnila, hutnění vzorku nebylo možné provést kvůli lepivosti směsi. Podle vzhledu vzorku je patrné, že přebytečná epoxidová pryskyřice vytvořila na dně formy kompaktní vrstvu, která tvořila přibližně 15% výšky vzorku. Tato nehomogenita nepříznivě ovlivňovala hmotnost vzorku a také hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Průměrná hodnota součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  u vzorků se směsí č.1 činila  $0,043 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a objemová hmotnost vzorků činila  $80 \text{ kg/m}^3$ .



Obrázek 17: Vzhled vzorku směsi č.1 s přebytkem pojiva (foto autor)

### Směs č.2

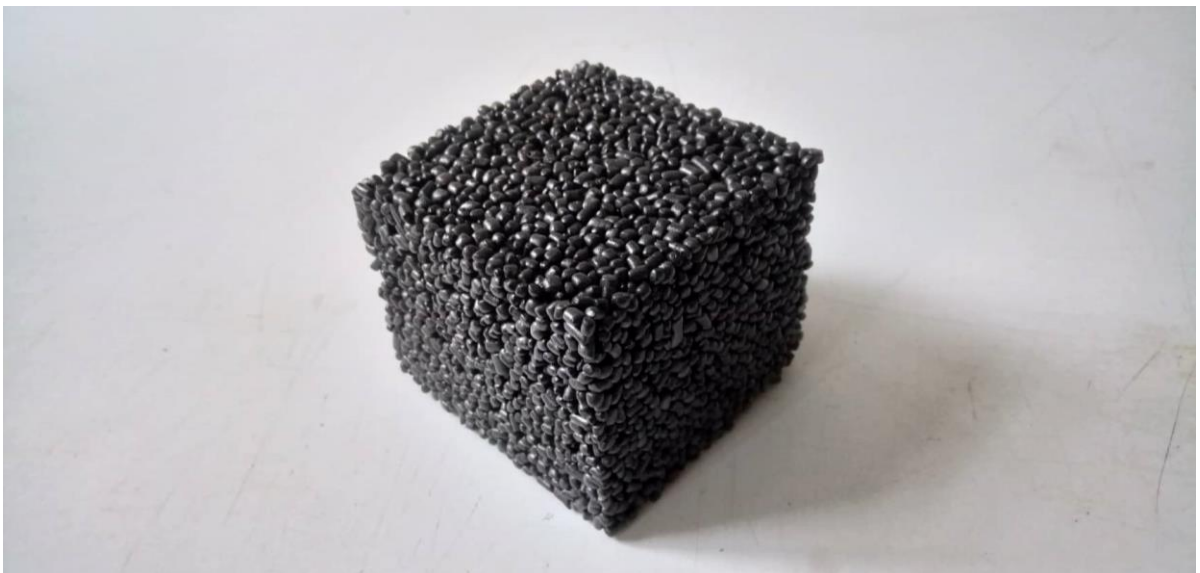
Byla připravena tak, aby obsahovala pouze nezbytné množství pojiva. Epoxidová pryskyřice velmi dobře smáčela povrch zrn a díky většímu objemu odpadních částic se směs lépe míchala a hutnila. U směsi č.2 s použitou epoxidovou pryskyřicí byla zjištěna průměrná hodnota součinitele tepelné vodivosti  $\lambda=0,040 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a objemová hmotnost  $30 \text{ kg/m}^3$ . Pevnost v tlaku při 10 % deformaci činila 34 kPa.



Obrázek 18: Vzhled vzorku směsi č.2 s epoxidovou pryskyřicí (foto autor)

### Směs č.3

Při použití lepidla Duvilax L58 byly vlastnosti velmi podobné jako u vzorků s epoxidovou pryskyřicí, patrný rozdíl nastal u pevnosti v tlaku při 10 % deformaci, který byl u vzorků s pojivem Duvilax přibližně o jednu třetinu nižší. Pokles tlakové pevnosti byla ovlivněna technickými vlastnostmi pojiva. Vzorky vykazovaly hodnotu součinitele tepelné vodivosti  $\lambda=0,040 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $\rho$  30  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Pevnost v tlaku při 10 % deformaci činila 23 kPa.



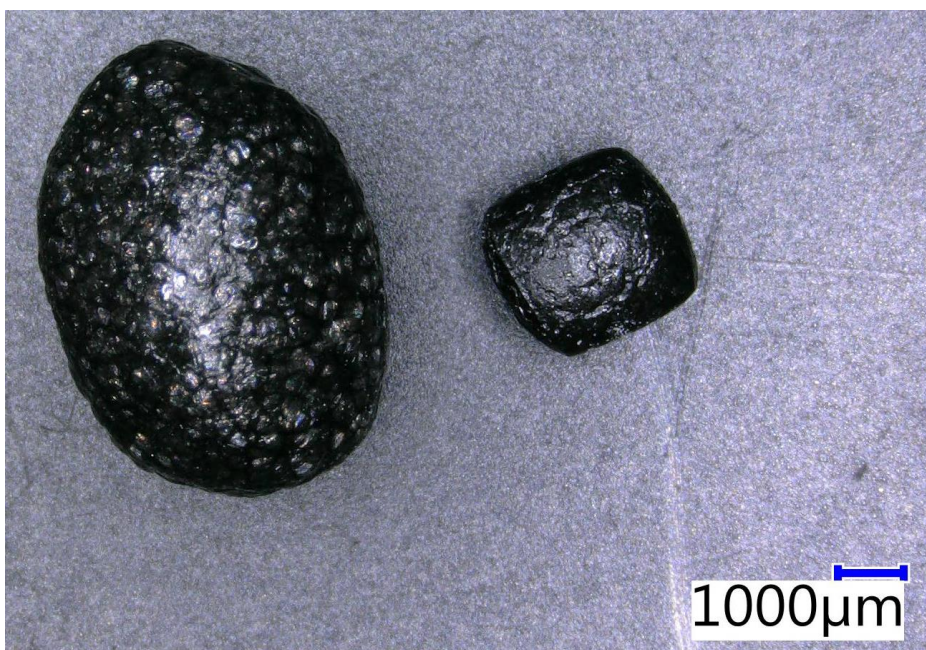
Obrázek 19: Vzhled vzorku směsi č.3 s lepidlem Duvilax L58 (foto autor)

## Spékání vzorku

U vzorků, které byly vystaveny teplotě 110 °C po dobu 2,5 hodiny, se zatížením 1kPa, nebylo dosaženo potřebné plastifikace pro povrchové spojení granulí EPP materiálu. Proces spékání způsobil změnu objemu částic odpadního expandovaného polypropylenu přibližně o 50 % a vytvořily se pouze shluky částic. Tyto shluky částic projevovaly velmi malou soudržnost.



Obrázek 20: Spékané vzorky EPP po odformování. (foto autor)



Obrázek 21: Na levé straně částice odpadního EPP, vpravo částice EPP po spékání. (foto autor)



## 9. Závěr

Bakalářská práce je věnována problematice nakládání s odpady, znovuvyužitím v oblasti odpadních plastů, odpadovým hospodářstvím v oblasti plastů na území České republiky a ve světě. V praktické části je navržena a ověřena možná využití odpadních polypropylenových částic pro tepelně izolační materiály.

Pro získání potřebných předpokladů jsou v první teoretické části práce shrnuty nejdůležitější poznatky o šíření tepla, tepelně izolačních materiálech a jejich specifických vlastnostech, dále jsem sestavil rešerši o výrobě, vlastnostech, zpracování a chování nejčastěji používaných plastových hmot ve stavebnictví.

V teoretické části práce je věnována pozornost v současnosti známým způsobům recyklace a znovuvyužití odpadních hmot na bázi plastů, postupům materiálového, surovinového a energetického zhodnocení odpadních plastových materiálů. Zde je také formulován pojem uhlíkové stopy a uvedeny způsoby vedoucí k její redukci.

V práci jsou také shrnuty informace aktuálního stavu odpadového hospodářství v oblasti využitelnosti plastových hmot v České republice, v Evropě, USA a v Asii, jsou také porovnány úrovně recyklace a znovuvyužití odpadů v globálním měřítku.

V závěrečné části teoretické části práce jsou sepsány dostupné poznatky o znovuvyužití, recyklaci a zhodnocení odpadního polypropylenu jakožto významné složky plastových odpadů.

V praktické části práce jsem odzkoušel a ověřil inovativní postupy pro zpracování odpadního expandovaného pěnového polypropylenu pro tepelně izolační desky použitelné ve stavebních izolacích. V současné době je požadovaným kritériem pro hodnocení účinnosti tepelně izolačních materiálů hodnota součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$ . Nově zkoušeným způsobem využití EPP částic bylo vytvoření kompozitu sestávající z částic odpadního polypropylenu spojených pomocí snadno dostupných pojiv. Jako pojivo bylo použito univerzální lepidlo Duvilax L58 a epoxidová pryskyřice EPOX IN 2050, tyto pojiva byly vybrány na základě jejich smáčivé vlastnosti i dostupnosti.

Na vzniklých kompozitech byla stanovena hodnota součinitele tepelné vodivosti, objemová hmotnost a pevnost v tlaku při 10 % deformaci. Všechny připravené směsi splnily požadovanou hodnotu součinitele  $\lambda$ , avšak bylo přihlédnuto také na ekonomické hledisko.

První směs č.1, kde jako pojivo byla využita epoxidová pryskyřice, jsem ověřil možnost zpracování odpadního EPP tímto způsobem. Složení směsi č.1 bylo 85 % obj. EPP + 15 % obj. epoxidové pryskyřice. Průměrná hodnota součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  u kompozitu se směsí č.1 byla  $0,043 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  o objemové hmotnosti vzorků asi  $80 \text{ kg/m}^3$ . U této směsi nastal problém s přebytkem epoxidové pryskyřice a tato receptura byla z ekonomického hlediska nevhodná.

U směsi č.2, skládající se z 99 % obj. EPP + 1 %obj. epoxidové pryskyřice, byl vyřešen problém s přebytkem pojiva. Průměrná hodnota součinitele tepelné vodivosti činí  $\lambda=0,040 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  o objemové hmotnosti  $30 \text{ kg/m}^3$ . Pevnost v tlaku při 10 % deformaci byla 34 kPa. Směs č.3, skládající se z 99 % obj. EPP +1 % obj. lepidla Duvilax, byly naměřeny průměrné hodnoty  $\lambda=0,040 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  při objemové hmotnosti  $30 \text{ kg/m}^3$ . Pevnost v tlaku při 10 % deformaci byla 23 kPa.

Dále bylo odzkoušeno spékání vzorku do mezerovité hmoty, které bylo neúspěšné. Spékání bylo provedeno při  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 2,5 hodiny, vzorek však vykazoval pouze malou soudržnost a nebylo dosaženo předpokládaného spojení částic.

Obecně lze konstatovat, že dostupný vzorek odpadního expandovaného polypropylenu je vhodný pro zpracování ve formě kompozitního deskového tepelně izolačního materiálu. Jako pojiva jsou vhodné epoxidové pryskyřice i lepidla na bázi PVAC či jiná lepidla se smáčivou schopností. Díky dalšímu využití tohoto odpadu lze redukovat jak jeho uhlíkovou stopu, tak i dopad na životní prostředí. Pro reálné využití v praxi by však bylo potřebné provést širší rozsah zkoušek, který přesahuje rámec bakalářské práce.

## 10. Seznam použitých zdrojů a literatury

- [1] Tepelné izolace: Polystyren, minerální vata a další. *Nazeleno: chytrá řešení pro každého* [online]. Brno: Narrative Media, ©2018-2019, 2.3.2010 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/stavba/izolace-2/tepelne-izolace-polystyren-mineralni-vata-a-dalsi.aspx>
- [2] HALAHYJA, Martin, Ivan CHMÚRNÝ a Zuzana STERNOVÁ. *Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov*. Bratislava: Jaga, 1998. ISBN 80-88905-04-4.
- [3] VAVERKA, Jiří a kol. *Stavební tepelná technika a energetika budov: Teoretické základy stavební tepelné techniky*. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-2910-0.
- [4] KAŇKA, Jan a Zbyněk SVOBODA. *Stavební fyzika 31*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 8001028615.
- [5] *Izolace info: katalog tepelných izolací* [online]. Praha: izolace info, ©2008-2018 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.isolace-info.cz/>
- [6] Tepelné izolace: vlastnosti expandovaného pěnového polystyrenu. *Vlastnosti expandovaného pěnového polystyrenu (EPS): Pěnový polystyren pro tepelnou a zvukovou izolaci* [online]. Praha: Sdružení EPS ČR, ©2001-2019, 13.4.2012 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/8482-vlastnosti-expandovaneho-penoveho-polystyrenu-eps>
- [7] VÖRÖS, František. Plasty ve stavebnictví 1: obecný přehled a trendy. *Materiály pro stavbu*. Praha: Springer Media: Business Media CZ, 2014, **20**[1], 34-35. ISSN 1213-0311.
- [8] VEJRAŽKOVÁ, Ivana. Plasty pro stavebnictví a architekturu 16: styrenové polymery. *Materiály pro stavbu*. Praha: Springer Media, 2007, **13**[7], 20-22. ISSN 1213-0311.
- [9] *Tzb info: Stavba- tepelné izolace* [online]. Praha: Topinfo, 2019 [cit. 2019-05-21]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace>
- [10] STREDA, Marián. Stříkaná polyuretanová pěna jako stavební izolační materiál. *Materiály pro stavbu*. Praha: Springer Media: Business Media CZ, 2016, **22**[5], 24-25. ISSN 1213-0311.
- [11] DROCHYTKA, Rostislav. *Plastické látky ve stavebnictví: Jednotlivé druhy plastických hmot*. 1998. Brno: CERM, 1998. ISBN 8021411481.
- [12] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles, 1993. ISBN 80-901570-4-1.
- [13] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Svitavy: Code Creator, 2016 [cit. 2019-05-20]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180>

- [14] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [15] VÖRÖS, František. Plasty ve stavebnictví 6: polyetyleny (PE). *Materiály pro stavbu*. Praha: Springer Media: Business Media CZ, 2014, **20**[6], 30-31. ISSN 1213-0311.
- [16] VÖRÖS, František. Plasty ve stavebnictví 7: polypropyleny (PP). *Materiály pro stavbu*. Praha: Springer Media: Business Media CZ, 2014, **20**[7], 32-35. ISSN 1213-0311.
- [17] Výrobky: Výroba polypropylenu. *Petroleum* [online]. Praha: petroleum, ©2007-2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyrobky/polypropylen-vyroba.aspx>
- [18] *Precizní vakuové tvarování: Plast a Thermoplast* [online]. Sušice: Plastic Systems, ©2019 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: [plasticsystems.cz](http://plasticsystems.cz)
- [19] Plasty- mechanické vlastnosti: Mechanické vlastnosti plastů. *E-konstruktor: Portál pro strojní konstruktéry* [online]. Praha: E-konstruktor, ©2013-2017, 16.8.2013 [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://e-konstruktor.cz/prakticka-informace/plasty-mechanicke-vlastnosti>
- [20] MAREK, Pavel. Odborné články: Výroba a aplikace expandovaného polypropylenu. *Plasticportal: články* [online]. Nitra: ICOSA, 5.4.2013 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/vyroba-a-aplikace-expandovaneho-polypropylenu/c/1492/>
- [21] KURAŠ, Mečislav. *Odpady, jejich využití a zneškodňování*. 2. Praha: Český ekologický ústav, 1994. ISBN isbn80-85087-32-4.
- [22] KIZLINK, Juraj. *Nakládání s odpady*. Vyd. 2., upr. Brno: Fakulta chemická VUT v Brně, 2012. ISBN isbn978-80-214-4413-3.
- [23] *Komunální technika: Recyklace jedno druhových plastových odpadů*. Praha: Profi Press, 2011, **2011**[2]. ISSN 1802-2391.
- [24] STRAKA, František. *Metody likvidace a energetického využití odpadů*. Praha: KONEKO, [1991]. ISBN 80-85122-07-3.
- [25] VÖRÖS, František. Plasty ve stavebnictví 4: využití plastových odpadů. *Materiály pro stavbu*. Praha: Springer Media: Business Media CZ, 2014, **20**[4], 31-33. ISSN 1213-0311.
- [26] *Ekologické zpracování plastů: Technologie* [online]. Ostrava: Plastic Union, ©2018 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <http://www.plasticunion.cz/>
- [27] *BOCOMATIC: recyklační a regranulační linky* [online]. Čepí: BOCO PARDUBICE machines, ©2019 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.boco.cz>
- [28] *Recyklace druhotných surovin: Regranulační linka* [online]. Praha: AHV ekologický servis, s.r.o, ©2019 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.ahv.cz>
- [29] *Datria: Mlýny, drtiče, prací linky* [online]. Chrudim: Datria, ©2019 [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.datria.cz>

- [30] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů: Další stroje pro zpracování plastů* [online]. Svitavy: publi.cz, 2016 [cit. 2019-05-18]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/Cover.html>
- [31] *Recyklační stroje: RECYKLACE PLASTŮ* [online]. Praha: Waste Tec, ©2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.recyklacni-stroje.eu/nase-nabidka/recyklace-plastu/>
- [32] *Team energo: Rozklad uhlíkatých látek* [online]. Brno: Team ENERGO s.r.o.®, ©2016 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <http://www.tenergoteam.cz/>
- [33] *SAKO: Energetické využití odpadu* [online]. Brno: SAKO Brno, ©2018 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.sako.cz>
- [34] NOVÁK, Josef a Viktor TŘEBICKÝ. *Uhlíková stopa. CI2* [online]. Rudná: CI2, ©2013 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://ci2.co.cz/cs/co-je-uhlikova-stopa>
- [35] *Ministerstvo životního prostředí: Odpadové hospodářství* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.mzp.cz>
- [36] *Cenia: Zpráva o životním prostředí České republiky* [online]. Praha: Cenia, ©2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.cenia.cz>
- [37] *Roční výkaz o odpadech a druhotných surovinách: Recyklace. Český statistický úřad: Statistiky* [online]. Praha: Český statistický úřad, 2018, 2018 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: statistika Českého statistického úřadu
- [38] SKAUT, Petr. *Značení tříděného odpadu: Plasty. Značení tříděného odpadu* [online]. [2017] [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: [https://eprehledy.cz/znaceni\\_trideneho\\_odpadu.php](https://eprehledy.cz/znaceni_trideneho_odpadu.php)
- [39] *United Nations Environment Programme* [online]. Kenya: United Nations Environment Programme, [2000] [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.unenvironment.org>
- [40] *Facts and Figures about Materials, Waste and Recycling: Plastics: Material-Specific Data* [online]. USA: epa.gov, 2018 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.epa.gov>
- [41] *Science: Plastic waste inputs from land into the ocean* [online]. Washington, DC: American Association for the Advancement of Science, ©2015, **2015**(347) [cit. 2019-05-16]. ISSN 1095-9203. Dostupné z: <https://science.sciencemag.org/content/347/6223/768>
- [42] ZHANG, Laney. *Global Legal Monitor: China: National Plan on Banning "Foreign Garbage" and Reducing Solid Waste Imports*. In: *Library of congress: Law library* [online]. Washington, DC, 2017, 2017 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.loc.gov/law/foreign-news/article/china-national-plan-on-banning-foreign-garbage-and-reducing-solid-waste-imports/>
- [43] *Plastics – the Facts: publications: Plastics - the Facts 2018* [online]. Belgie: PlasticsEurope, ©2018 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.plasticseurope.org>
- [44] *Regranulace: Zpracování plastových odpadů* [online]. Napajedla: Fatra, ©2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.fatra-regranulace.cz/>

- [45] *Puruplast: Recyklace plastů* [online]. Uherské Hradiště: Puruplast, ©2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.puruplast.cz/>
- [46] OZBAKKALOGLU, Togay. Short-Term Mechanical Properties of Concrete Containing Recycled Polypropylene Coarse Aggregates under Ambient and Elevated Temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*. American Society of Civil Engineers, 2017, 29[10], 04017191. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002046.
- [47] WONG, Sook.F. *Use of Recycled Polymers in Asphalt Concrete for Infrastructural Applications*. 2018. Cham: Springer, 2018. ISBN 978-3-319-78175-4.
- [48] WONG, Sook.F. *International congress on polymers in concrete (ICPIC 2018): Use of Recycled Polymers in Asphalt Concrete for Infrastructural Applications*. New York, NY: Springer Science+Business Media, 2018. ISBN 978-3-319-78174-7.
- [49] LINHART, Igor. Jaké látky se uvolňují při spalování plastů. *Ekolist* [online]. Praha: BEZK, [2000], 25. dubna 2002 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zelena-domacnost/dotazy-a-odpovedi/jake-latky-se-uvolnuji-pri-spalovani-plastu>
- [50] Handy Solution for On Site Meter Testing: ISOMET 2114. *Applied Precision: Measurement and Test Solution* [online]. Bratislava: Applied Precision, [2007] [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.appliedp.com/product/isomet/>
- [51] Univerzální zkušební stroje řady CT: M350-20CT - 20kN. *LABORMACHINE: Materials testing machines* [online]. Otice: LABOR machine, ©2016 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [http://www.labormachine.cz/m350-20ct-20kn\\_pd20](http://www.labormachine.cz/m350-20ct-20kn_pd20)
- [52] Isolering polystyren. In: *Bordben jern: Trappegitter, pallerammer* [online]. Bordben jern, ©2019, 05.05.2016 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://raduga-sveta.ru/isolering-polystyren/>
- [53] Skelná a minerální vata. In: *Noitami: Skelná a minerální vata* [online]. Praha: Noitami akustika, ©2010-2017 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.noitami.cz/zvukova-izolace/akusticka-izolace-skelna-mineralni/>

## 11. Seznam použitých symbolů a zkratek

$\lambda$ (lambda)	součinitel tepelné vodivosti	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\rho$	objemová hmotnost	$kg/m^3$
$\mu$	Faktor difuzního odporu	
Q	množství prošlého tepla	J
$\theta$	teplota	$^{\circ}C$
d	vzdálenost	m
S	plocha	$m^2$
$\tau$	čas	s
W	nasákavost	%
c	měrná tepelná kapacita	$J/(kg \cdot K)$
P	tlak	Pa/kPa/MPa
H	výhřevnost	J/kg
C	uhlík	
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý	
NO <sub>x</sub>	souhrnné označení pro oxidy dusíku	
SO <sub>x</sub>	souhrnné označení pro oxidy síry	
HCl	chlorovodík	
HF	fluorovodík	
PP	polypropylen	
EPP	expandovaný polypropylen	
PE	polyethylen	
PELD	nízko hustotní polyethylen	
PEHD	vysokohustotní polyethylen	
PS	polystyren	
EPS	expandovaný pěnový polystyren	
XPS	extrudovaný pěnový polystyren	
PVC	polyvinylchlorid	
PET	polyethylentereftalát	
PUR	polyuretan	
PIR	Polyisokyanurát	
PVAC	Polyvinylacetát	
USA	Spojené státy americké	
UNEP	United Nations Environment Programme	
OSN	Organizace spojených národů	
ELTO	extrémně lehký topný olej a	
LTO	lehký topný olej	

## 12. Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Přehled vybraných vlastností a specifikace EPS. [1][5]</i> .....	14
<i>Tabulka 2: Přehled vybraných vlastností a specifikace XPS. [1][5]</i> .....	15
<i>Tabulka 3: Přehled vybraných vlastností a specifikace minerálních vln. [1][5][9]</i> .....	17
<i>Tabulka 4: Přehled vybraných vlastností a specifikace PUR/PIR pěn. [1][5][10]</i> .....	18
<i>Tabulka 5: Přehled vybraných vlastností a specifikace pěnového skla. [1][5][9]</i> .....	19
<i>Tabulka 6: Přehled vlastností lehčeného PVC vztažené k objemové hmotnosti [11] [19]</i> .....	24
<i>Tabulka 7: Přehled vlastností lehčeného polystyrenu podle objemové hmotnosti. [10]</i> .....	26
<i>Tabulka 8: Vlastnosti tvrdých lehčených PUR vztažené k objemové hmotnosti [10][11]</i> .....	28
<i>Tabulka 9: Přehled univerzálních recyklačních symbolů pro plastické hmoty [25][38]</i> .....	40
<i>Tabulka 10: Charakteristické složení vzorku odpadního EPP. ....</i>	47
<i>Tabulka 11: Složení směsi č.1 (pojivo epoxidová pryskyřice)</i> .....	50
<i>Tabulka 12: Složení směsi č.2 (pojivo epoxidová pryskyřice)</i> .....	50
<i>Tabulka 13: Složení směsi č.3 (pojivo Duvilax L58)</i> .....	51
<i>Tabulka 14: Vlastnosti směsi č.1 (pojivo epoxidová pryskyřice)</i> .....	51
<i>Tabulka 15: Vlastnosti směsi č.2 (pojivo epoxidová pryskyřice)</i> .....	51
<i>Tabulka 16: Vlastnosti směsi č.3 (pojivo Duvilax L58)</i> .....	52
<i>Tabulka 17: Naměřené fyzikální hodnoty vzorků přístrojem Isomet 2114</i> .....	52



## 13. Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Pěnový polystyren typu XPS vlevo, na straně pravé polystyren typu EPS. [5][52] .....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2: Vzhled různých druhů minerálních vln [53].....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 3: Desková PIR pěna [5].....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 4: Aplikace stříkané PUR pěny [5] .....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 5: Vzhled pěnového skla [9] .....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 6: Vzhled regranulátu z recyklační linky [45] .....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 7: Schéma jednošnekového extrudéru [30].....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 8: Schéma uspořádání spalovny [33] .....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 9: Celosvětové složení odpadu dle druhu materiálu složek [39] .....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 10: Přehled nakládání s odpadními plasty v USA [40][41] .....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 11: Porovnání zemí EU ve způsobu znovuvyužití odpadů na bázi plastů [43].....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 12: Vzorek částic EPP (černé) na levé straně, na pravé straně částice EPS. (foto autor) ...</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 13: Vzhled přístroje Isomet 2114 [50].....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 14: Měření součinitele tepelné vodivosti <math>\lambda</math> příložnou sondou ISOMET. ....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 15: Závislost průběhu deformace vzorku A1 na tlakové síle razníku zkušebního lisu M350-20CT. Svislá čára uvádí odečtení síly při 10 % deformaci. ....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 16: Grafický výsledek z lisu M350-20CT: Závislost deformace na tlakové síle, odečtení síly při 10 % deformaci vzorku B1.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 17: Vzhled vzorku směsi č.1 s přebytkem pojiva (foto autor).....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 18: Vzhled vzorku směsi č.2 s epoxidovou pryskyřicí (foto autor).....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 19: Vzhled vzorku směsi č.3 s lepidlem Duvilax L58 (foto autor) .....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 20: Spékané vzorky EPP po odformování. (foto autor) .....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 21: Na levé straně částice odpadního EPP, vpravo částice EPP po spékání. (foto autor) .</i>	<i>56</i>