

# Opakovaná recyklace výrobků s obsahem cupaniny

Bc. Tomáš Petříček

---

Diplomová práce  
2024

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Petříček**  
Osobní číslo: **T22348**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **Kombinovaná**  
Téma práce: **Opakovaná recyklace výrobků s obsahem cupaniny**

## Zásady pro vypracování

1. Vypracujte rešerši na dané téme
2. Shrňte získané poznatky a zvolte postup pro způsoby přepracování odpadu
3. Připravte základní sadu vzorku a proměřte zvolené charakteristiky (pevnost, tažnost, hustotu, tvrdost), vliv zrychleného stárnutí, FTIR, nasákavost, extrakce změkčovadel, ohyb za nízkých teplot)
4. Sumarizujte výsledky a informace z teoretické i experimentální části
5. Navrhněte možné uplatnění přepracovaného odpadu

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

**Seznam doporučené literatury:**

Scheirs, John, Polymer recycling : science, technology and applications, Chichester : John Wiley, 1998, ISBN 0471970549  
Kumar Thakur, Vijay., Recycled Polymers : Properties and Applications, Smithers Rapra 2015, ISBN 9781910242308  
Kumar Thakur, Vijay., Recycled polymers. chemistry and processing Volume 1 :, Shropshire, England : Smithers Rapra, 2015, ISBN 9781909030961

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Dagmar Měřínská, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**  
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

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

L.S.

**doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. března 2024

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

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

### **Prohlašuji,**

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Předložená diplomová práce je zaměřená na opakovanou recyklaci výrobků s obsahem PES cupaniny. V rámci rešerše byla navržena recyklační metoda pro opakované recyklování výrobků obsahujících PES cupaninu tak, aby bylo možné tento materiál opakovaně využívat. Pro ověření funkčnosti opakované recyklace, a především jejího vlivu na vlastnosti produktů, do níž bude opakovaně recyklovaná cupanina přidávána, bylo připraveno několik sad vzorků se simulovanou opakovanou recyklací. Připravené vzorky byly podrobeny laboratornímu vyhodnocení a výsledky byly mezi sebou porovnány a vyhodnoceny.

Klíčová slova:

PVC, PES, hydroizolační fólie, cupanina, recyklace

## **ABSTRACT**

The presented thesis is focused on the repeated recycling of product containing PES lint waste. As part of the research was proposed a recycling method for repeated recycling of product containing PES lint waste, so that this material could be used repeatedly. Several sets of samples with simulated repeated recycling were prepared to verify the functionality of repeated recycling, and especially its effect on the properties of the products to which the repeatedly recycled PES lint waste will be added. The prepared samples were subjected to laboratory evaluation and the results were compared and evaluated.

Keywords:

PVC, PES, waterproofing foils, PES lint waste, recycling

Na tomto místě bych rád poděkoval paní prof. Ing. Dagmarě Měřínské, Ph.D. za odborné vedení a pomoc při zpracování diplomové práce. Dále kolegům za odborné rady a pomoc při měření. Společnosti Fatra, a.s. děkuji za možnost využití laboratorního zařízení a poskytnutí materiálů pro praktickou část.

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

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 PLASTY A JEJICH RECYKLACE</b> .....	<b>11</b>
1.1 RECYKLACE PLASTŮ.....	12
1.1.2 Vícenásobná recyklace.....	14
<b>2 VÍCEVRSTVÉ HYDROIZOLAČNÍ PVC FÓLIE</b> .....	<b>15</b>
2.1 KONSTRUKCE PVC HYDROIZOLAČNÍCH FÓLÍÍ .....	15
2.2 VÝROBA PVC HYDROIZOLAČNÍCH FÓLÍÍ .....	18
2.2.1 Příprava PVC směsi .....	18
2.2.2 Vytlačování .....	20
2.2.3 Válcování a laminování.....	21
<b>3 ZDROJE A ZPRACOVÁNÍ CUPANINY</b> .....	<b>24</b>
3.1 TŘÍDĚNÍ.....	25
3.2 DRCENÍ – ZMENŠENÍ FRAKCE.....	25
3.3 MLETÍ A SEPARACE VLÁKEN.....	27
3.4 GRANULACE CUPANINY.....	30
<b>4 UPLATNĚNÍ CUPANINY</b> .....	<b>33</b>
4.1 VSTRÍKOVANÉ VÝROBKY Z CUPANINY .....	33
4.2 VÁLCOVANÉ VÝROBKY Z CUPANINY .....	35
4.3 LISOVANÉ VÝROBKY Z CUPANINY .....	36
4.4 VYTLAČOVANÉ VÝROBKY Z CUPANINY .....	37
<b>5 OPAKOVANÁ RECYKLACE VÝROBKŮ S CUPANINOU</b> .....	<b>38</b>
<b>6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....	<b>39</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>40</b>
<b>7 MATERIÁL A PŘÍPRAVA VZORKŮ</b> .....	<b>41</b>
7.1 MATERIÁL PRO ZKOUŠKY .....	41
7.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	42
<b>8 STANOVENÍ FYZIKÁLNĚ MECHANICKÝCH VLASTNOSTI</b> .....	<b>44</b>
8.1 STANOVENÍ TVRDOSTI.....	44
8.2 STANOVENÍ HUSTOTY .....	46
8.3 STANOVENÍ PEVNOSTI V TAHU A PROTAŽENÍ.....	49
<b>9 NASÁKAVOST A EXTRAKCE ZMĚKČOVADEL</b> .....	<b>52</b>
9.1 NASÁKAVOST.....	52
9.2 EXTRAKCE ZMĚKČOVADEL.....	54

<b>10</b>	<b>OHYB ZA NÍZKÝCH TEPLŮT .....</b>	<b>58</b>
<b>11</b>	<b>INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE S FOURIEROVOU TRANSFORMACÍ (FTIR).....</b>	<b>61</b>
11.1	FTIR ANALÝZA VZORKŮ .....	62
<b>12</b>	<b>ZRYCHLENÉ STÁRNUTÍ.....</b>	<b>65</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>81</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>82</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>84</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>85</b>



## ÚVOD

Vlivem vysokého tlaku na recyklaci dochází v mnohých případech již k opakované recyklaci některých materiálů. Opakovaná recyklace bude mít jistě vliv na výsledné vlastnosti produktů, do kterých je tento recyklát používán. Naproti tomu stojí stále vyšší nároky zákazníků a požadavky na garanci kvality výsledných produktů. Abychom mohli garantovat kvalitu produktů, do nichž používáme opakovaně recyklovaný materiál, je třeba tento materiál a změny v jeho vlastnostech podrobně zkoumat.

Jedním z materiálů, u něhož byl navržen postup recyklace, a tudíž je možné jej opakovaně použít v podobě recyklátu, je PES cupanina. Tento materiál vzniká při mechanické recyklaci PVC hydroizolačních fólií a je možné jej znovu v určitém množstevním procentu použít do středních a spodních vrstev této vícevrstvé HIF. Využitím recyklátu PES cupaniny do produktu, ze kterého pochází, dochází k uzavření recyklační smyčky a je tedy patrné, že může a bude docházet k recyklaci opakované.

V této diplomové práci je popsána teoretická možnost recyklace PVC hydroizolačních fólií s PES mřížkou za vzniku granulátu PES cupaniny. V praktické části jsou pak zkoumány a vyhodnocovány vlivy na mechanické vlastnosti tohoto materiálu při opakovaném zpracování materiálu a jeho recyklaci.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

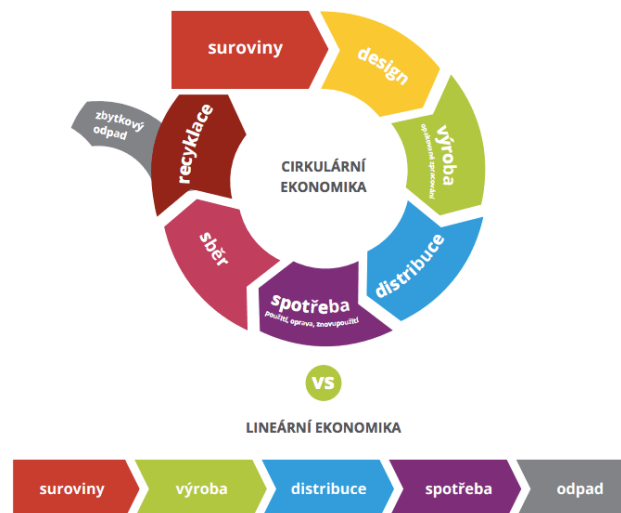
## 1 PLASTY A JEJICH RECYKLACE

Průmyslová výroba plastů začala ve druhé polovině 19. století a vykazovala dynamický růst co do typů plastů, ale také co do objemu. Postupně docházelo i k vylepšování vlastností zpracování a výsledných vlastností plastů, jako jsou reologické, mechanické, tepelné, strukturální a optické vlastnosti. Tohoto zlepšení bylo dosaženo pomocí různých přísad jako jsou stabilizátory, barviva, změkčovadla, výztužná vlákna a jiné pomocné látky. Souběžně s pokrokem v chemii plastů se také vyvíjely zpracovatelské technologie například vytlačování, válcování, vstřikování a jiné. Současný vývoj chemie plastů a zpracovatelského průmyslu přispěl k technickému rozvoji v oblastech, jako je medicína, doprava, elektronika a stavebnictví. Tento vývoj navíc umožnil snížit náklady na výrobky a služby nabízené v těchto oborech a zpřístupnit je širšímu spektru společnosti.

Výroba plastů obecně stále roste. S vyrobeným množstvím úzce souvisí také nárůst znečištění plastovým odpadem. Do roku 2015 se nashromáždilo přibližně 6 300 Mt plastového odpadu a přibližně 12 000 Mt bude uloženo na skládku do roku 2050.

Plastikářský průmysl představoval až do posledních desetiletí tzv. „model lineární ekonomiky“ zaměřený na životnost plastových výrobků. Tento model je založen především na dvou předpokladech: za prvé, dostupnost fosilních zdrojů je nekonečná a za druhé, obnova a regenerace plastových výrobků po jejich užité fázi není vyžadována. Tedy nakládání s odpady nebylo součástí tohoto modelu a důsledkem bylo velké množství plastového odpadu, který nebyl řádně zlikvidován. V posledních letech rostoucí povědomí o životním prostředí na sociální a legislativní úrovni podpořilo zavedení globálního modelu oběhového hospodářství (CEM) v plastikářském průmyslu. Tento model navrhuje účinnou a efektivní recyklaci plastového odpadu. Pro příklad v roce 2021 bylo v rámci VinylPlus recyklováno 810 775 t odpadu z PVC, z čehož 63,6 % tvořil předspotřebitelský odpad a 36,4 % spotřebitelský.

Kromě recyklace již vzniklého plastového odpadu existuje řada obchodních modelů podporujících menší používání plastových obalů. Jedním z příkladů, mezi takovými modely, je zálohový systém na běžné plastové obaly. Dalším modelem je například použití vlastních obalů a jejich opakované doplňování. [1][2][3][4]



Obrázek 1: Princip oběhového hospodářství a materiálových toků [5]

## 1.1 Recyklace plastů

Existují dva základní přístupy k recyklaci: „recyklace v uzavřené smyčce“ a „recyklace v otevřené smyčce“. V případě prvního uvedeného přístupu se vlastnosti recyklovaného plastu výrazně nemění a recyklát lze použít ve stejné aplikaci jako primární materiál, například recyklát z lahví využijeme opět na výrobu lahví. Alternativně „recyklace v otevřené smyčce“ znamená, že se vlastnosti recyklovaného plastu změní a nelze recyklát znovu použít pro stejnou aplikaci. Zároveň ale může být tento recyklát použit pro výrobu plastového výrobku pro jinou aplikaci, například přeměnou láhve na vlákno. Hlavní recyklační technologie pro zpracování plastového materiálu, chemických surovin, biomasy a plynů nebo energie z plastového odpadu lze shrnout následovně [3][8][7][8]:

- Mechanická recyklace – zpracování plastového odpadu na druhotnou surovinu bez výrazné změny chemické struktury daného polymeru.
- Chemická nebo surovinová recyklace – depolymerizace daného polymeru a recyklace výsledných chemických složek.
- Fyzikální recyklace – recyklace na bázi rozpouštědel umožňující obnovu plastového materiálu bez změny chemické struktury daného polymeru.
- Biologická nebo organická recyklace – aerobní nebo anaerobní zpracování biologicky rozložitelného plastového odpadu za kontrolovaných podmínek s použitím mikroorganismů, jehož výsledkem jsou stabilizované organické zbytky a různé plyny.

- Energetické využití – výroba užitečné energie přímým a řízeným spalováním plastového odpadu.

### 1.1.1 Mechanická recyklace

Mechanická recyklace představuje kombinaci hlavních zpracovatelských kroků, jako je sběr, identifikace, třídění, mletí, praní, drcení, regranulování apod. Hlavní výhodou tohoto typu recyklace je její vhodnost pro decentralizovanou implementaci. Zařízení na mechanickou recyklaci jsou jednoduchá a nenákladná, mají relativně nízkou spotřebu energie a zdrojů ve srovnání se zařízeními potřebnými pro chemickou nebo fyzikální recyklaci. Současný vývoj a optimalizace výše uvedených kroků umožňuje částečné úpravy vlastností, například eliminace zápachů, zlepšení čistoty, barvy atd. Obecně je však kvalita plastových recyklátů silně závislá na kvalitě a čistotě vstupních surovin (plastového odpadu).

Termín „plastový recyklát“ se používá pro popis různých forem recyklovaných plastových materiálů. V závislosti na zdrojích je definován různě. Nejčastěji používané formy recyklovaného plastu jsou:

- „drť“ (nebo vločky) vznikající drcením nebo mletím,
- „regranulát“ představující plastový recyklát vyrobený extruzí beze změny chemického složení,
- „rekompaund nebo regenerát“ představuje plastový odpad s upraveným chemickým složením.

Recykláty v podobě drti můžeme využít například ve stavebnictví jako plnivo a částečně jako náhradu kameniva, kdy tento přístup ukazuje slibný potenciál pro lehké konstrukce. Dále může sloužit drť jako polotovar pro další zpracování, například pro extruzi, kde dojde k odfiltrování nečistot, odplynění a převedení do homogennější zpracovatelské podoby. Recykláty v podobě granulí se nejčastěji zpracovávají pomocí vytlačování a vstřikování.

Samotnou kapitolou je pak mechanická recyklace polymerního kompozitu. Mechanický výkon kompozitu závisí hlavně na použité výztuži. Kombinace polymerní matrice a výztuhy vede k dosažení požadovaných mechanických vlastností produktu, ale zároveň způsobuje značné komplikace při recyklaci takového materiálu. Mechanickou recyklací jednoho takového kompozitu se bude práce zabývat podrobněji dále v textu (odstavec 3: zdroje a zpracování cupaniny). [3][10][11]

### 1.1.2 Vícenásobná recyklace

V ideálním případě recyklace v uzavřené smyčce znamená, že plastový materiál nemění své vlastnosti nejen po první recyklační smyčce, ale ani po několika recyklačních smyčkách. V případě mechanické recyklace je realizace vícenásobných recyklačních smyček možná pouze několikrát. Toto omezení je způsobeno zhoršením molekulární struktury polymerů způsobeným smykovými silami během extruzního zpracování při vysoké teplotě a za vysokého tlaku. Zastřešující termín pro snížení kvality materiálu po recyklaci je známý jako „downcycling“.

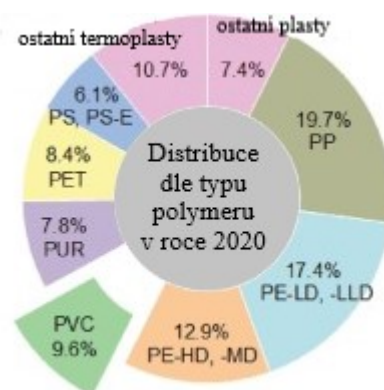
Vícenásobná recyklace plastů a plastových kompozitů obecně ukazuje, že existuje určitý materiálově specifický počet recyklačních smyček, ve kterých lze zachovat vybrané mechanické vlastnosti materiálu. Kromě toho, změna stupně krystalinity spojená s vícenásobnou recyklací, ovlivňuje mechanické vlastnosti, jako je tvrdost, odolnost proti únavě v ohybu, teplotu měknutí, prodloužení při přetržení a někdy rázovou pevnost. Například kontinuální degradace během zpracování polypropylenu (PP) v roztaveném stavu vede ke snížení molekulové hmotnosti a současně zúžení distribuce molekulových hmotností. Rozštěpení řetězce vede ke snížení viskozity a značné ztrátě mechanických vlastností, díky čemuž je materiál křehčí a nažloutlý. Vícenásobná recyklace PP a zvýšení zpracovatelské teploty vede také ke zvýšení krystalinity, což se projeví především v destruktivních mechanických vlastnostech, jako je snížení lomového napětí.

Během mechanické recyklace PVC může dojít k tepelné degradaci, protože se polymer znovu zahřeje a podléhá cyklickému namáhání. Amorfní fáze je opět vystavena vysokým teplotám, což zhoršuje stabilitu C-Cl a vede ke tvorbě C=C dvojných vazeb. Recyklace, a to především ta vícenásobná, tedy způsobuje změny mechanických a reologických vlastností PVC.

Shrneme-li to, je zřejmé, že různé typy plastů a vlákny vyztužené polymerní kompozity vykazují odlišné chování, pokud jde o potenciální vícenásobnou recyklaci. Stále však chybí systematické informace o vlivu distribuce molekulové hmotnosti a změny krystalinity různých typů plastů, zkrácení vláken a morfologických změnách v případě různých kompozitů, jako je celulóza, termoplast a vysoce výkonná syntetická vlákna. V důsledku toho je nemožné odvodit přesné obecné tvrzení o vlivu vícenásobné recyklace na materiálově specifické vlastnosti recyklátů a praktickou použitelnost vícenásobné recyklace v kontextu cirkulární ekonomiky. Maximální počet recyklačních smyček je individuální pro každý typ plastu a kompozitu. [3][12][12]

## 2 VÍCEVRSTVÉ HYDROIZOLAČNÍ PVC FÓLIE

Polyvinylchlorid (PVC) byl objeven v roce 1912. Jedná se o bílý prášek a jeho komerční výroba začala na konci 20. let 20. století. Vzhledem ke své nízké ceně, trvanlivosti, chemické odolnosti a dobré zpracovatelnosti je PVC široce používáno pro mnoho komodit. Polyvinylchlorid tvořil v roce 2020 9,6 % všech plastů a umístil se na třetím místě.



Obrázek 2: Distribuce dle typu polymeru v roce 2020 [2]**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

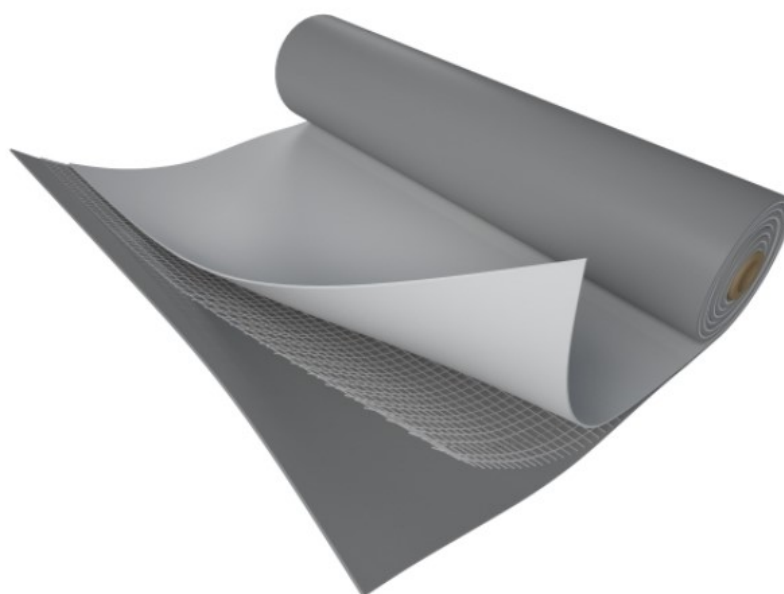
Celosvětová produkce PVC nadále roste, což je patrné i ve stavebnictví, které je významnou oblastí ve zpracování tohoto materiálu a jedním ze zástupců výrobků z PVC jsou hydroizolační fólie. Hydroizolační materiály na bázi PVC velmi úspěšně konkurují hydroizolačním materiálům na bázi bitumenu v konstrukci plochých střech. Důvodem exponenciálního růstu použití střešních krytin z PVC ve stavebnictví je především to, že se pokládají v jedné vrstvě jako finální hydroizolace plochých střech. U hydroizolací na bitumenové bázi platí pravidlo, že by se jako finální vrstva měla instalovat minimálně ve dvou vrstvách. Výhoda tedy nespočívá jen v celkové úspoře materiálu, ale také v úspoře práce. [13][13][14]

### 2.1 Konstrukce PVC hydroizolačních fólií

Střešní hydroizolační fólie (HIF) z PVC jsou konstruovány z více vrstev tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností finálního produktu. Vrchní vrstva je vysoce UV stabilní, aby zajišťovala dlouhou životnost. Ve střední vrstvě se nachází výztuha zajišťující rozměrovou stabilitu výrobku, ale také celkovou pevnost v případě mechanického kotvení. V neposlední řadě je tu spodní vrstva, která dodává fólii celkovou tloušťku a musí zajistit dobrou svařitelnost s vedlejším pásem izolace. V případě aplikace na rekonstruovanou

střechu se můžeme setkat s netkanou polyesterovou textilií ve spodní vrstvě, která slouží jako separační vrstva.

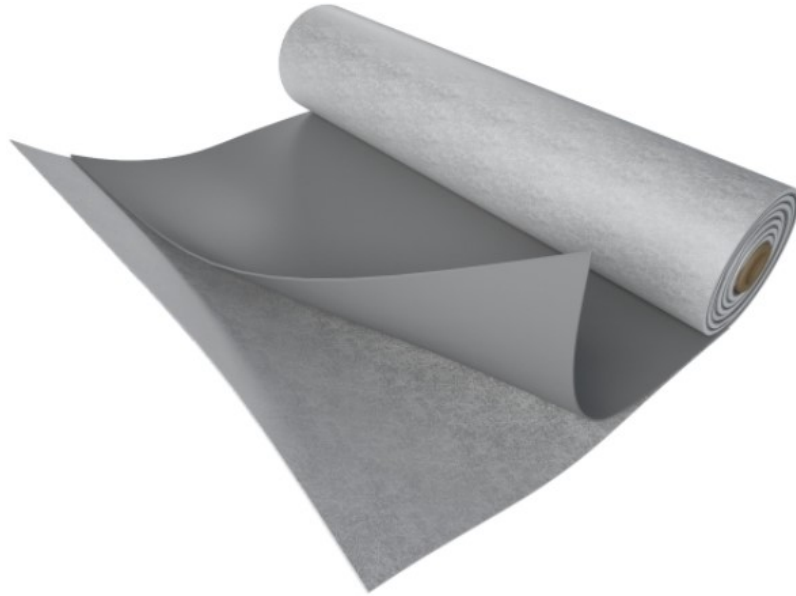
Nejběžnější je mechanické kotvení hydroizolačních povlaků. Tento systém kotvení je význačný pro lehké střešní konstrukce s nosnou vrstvou z trapézového plechu, uplatnění ale nachází také při aplikaci na běžné podklady typu beton a dřevo. Kotvení se provádí do nosné vrstvy střešního pláště, tzv. kotevní vrstvy. Pro funkčnost kotvicího systému je potřeba, aby tato hydroizolační fólie měla ve střední vrstvě PES mřížku, případně PES mřížku v kombinaci se skelným rounem. Polyesterová mřížka zajistí pevnost fólie jako celku a zabrání vtržení kotvy sáním větru.



Obrázek 3: Střešní hydroizolační fólie s PES mřížkou [15]

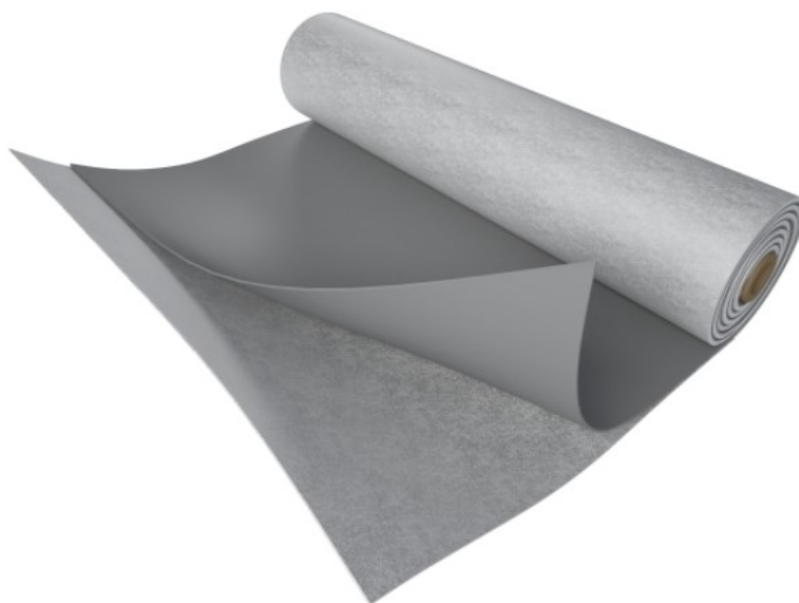
S rostoucím zájmem o životní prostředí nabývají na popularitě také zelené střechy. Zelené střechy vytváří na hydroizolační fólii celoplošné zatížení, což také vyžaduje speciální požadavky na výztuž. Naopak oproti mechanicky kotveným hydroizolacím zde odpadá vliv sání větru. Z výše uvedeného vyplývá, že u hydroizolačních fólií pro zelené střechy je použita jiná forma výztuhy, a to v podobě skelného rouna. Tato fólie není využívána pouze na zelené střechy, ale i na jinak přitížené střechy, například praným říčním kamenivem.





Obrázek 4: Střešní hydroizolační fólie vyztužená skelným rounem [15]

Posledním významným způsobem aplikace střešní hydroizolační fólie je lepení k podkladu. Jedná se o alternativu k mechanickému kotvení a přitížení, která má své opodstatnění především v případech, kdy do podkladu nelze z různých důvodů kotvit. Důvody mohou být funkční s ohledem na provoz uvnitř budovy nebo z hlediska druhu či kvality podkladu, ale také estetické např. kvůli eliminaci viditelných kotev na spodním líci kotevní vrstvy. K lepení se používají pouze hydroizolační PVC fólie opatřené polyesterovou netkanou textilií na spodní straně. [15]



Obrázek 5: Střešní hydroizolační fólie s netkanou PES textilií [15]

## 2.2 Výroba PVC hydroizolačních fólií

Vícevrstvé hydroizolační PVC fólie jsou v praxi vyráběny dvěma základními způsoby, a to extruzí a následnou laminací jednotlivých vrstev nebo válcováním polotovarů a následným spojováním těchto polotovarů na laminační lince. První z uvedených způsobů je obecně ekonomičtější, nicméně neumožňuje velkou variabilitu sortimentu. Při obou způsobech výroby však mohou vznikat všechny výše uvedené druhy vícevrstevných HIF.

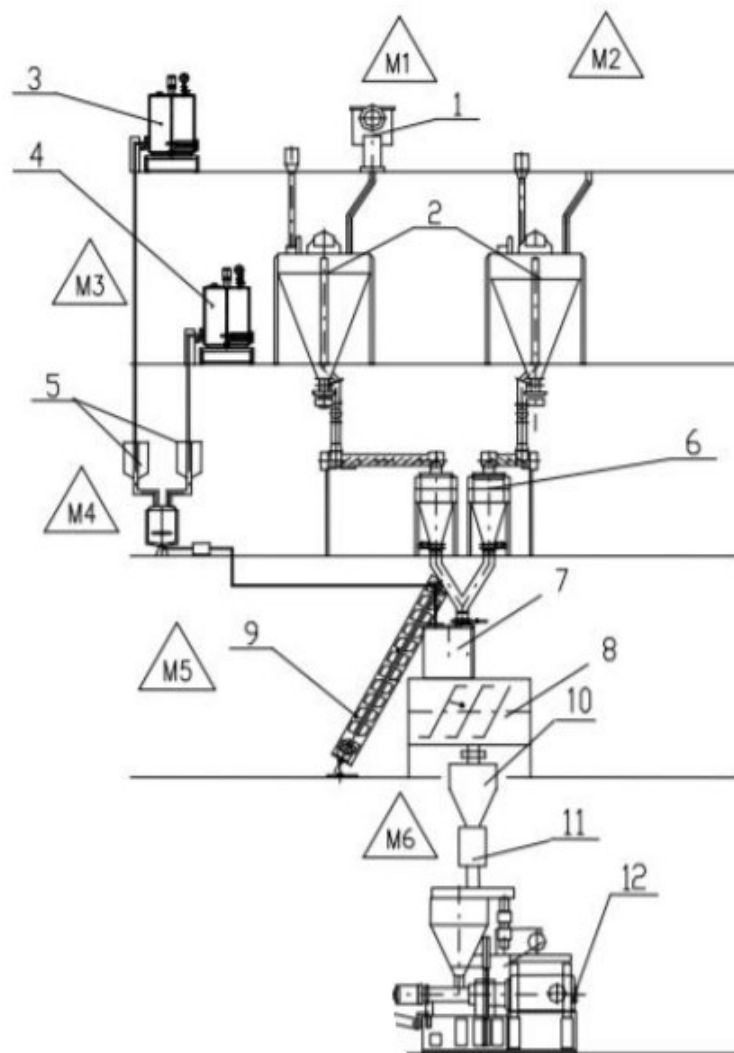
### 2.2.1 Příprava PVC směsi

Příprava PVC směsi probíhá postupným směřováním jednotlivých komponent v míchacím uzlu a následně v horkém stupni fluidní míchačky. Běžná PVC směs obsahuje několik surovin jak v kapalné, tak sypké formě.

Mezi základní komponenty PVC směsi patří: PVC, změkčovadlo, plnivo, stabilizátory, barviva a maziva.

Míchací uzel se skládá z bunkrových vah pro navažování komponent, kuželových míchaček, zásobníků kapalných komponent, vah jednotlivých kapalin a jednotlivých sypkých surovin, směšovacími zásobníky, horkého a studeného stupně fluidní míchačky a předzásobníku pro KO hnětič nebo extrudér.

Příprava směsi probíhá vždy na základě receptury. Jednotlivé komponenty jsou připraveny do vážených zásobníků, odkud jsou gravimetricky dávkovány do směšovacích zásobníků. Po dobu navažování a směšování jsou udržovány zvlášť sypké a zvlášť kapalné komponenty. Po navážení a smíchání ve směšovacích zásobnících dochází k míchání nejprve sypké směsi v horkém stupni fluidní míchačky. Jakmile je dosažena požadovaná teplota sypké směsi, jsou do fluidní míchačky (FM) vpuštěny smíchané kapalné komponenty. Souběžně s kapalnými komponenty jsou do horkého stupně přidávány sáčky s barevnou polosměsí (batchem). V horkém stupni dochází k homogenizaci materiálu a rovnoměrnému rozptýlení změkčovadel ve směsi. Po dosažení požadované teploty dochází k vypuštění horkého stupně FM do studeného stupně FM, kde dochází k postupnému ochlazení homogenní směsi. V této fázi může být ke směsi také přimíchávána drť či recyklát. Po chlazení na nastavenou teplotu dojde k vypuštění studené směsi do zásobníku, odkud je materiál odebírán do KO-hnětiče nebo extruderu.



Obrázek 6: Schéma míchacího uzlu [16]

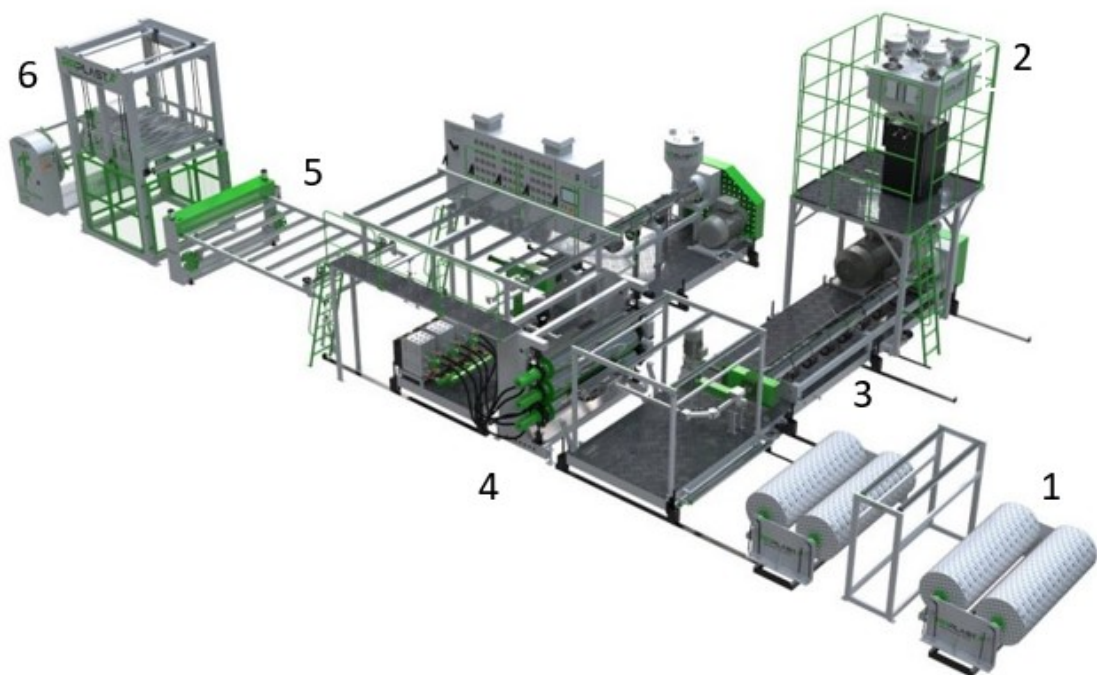
Tabulka 1: Popis k obrázku 6 [16]

1. Bunkrová váha	7. Horký stupeň FM
2. Kuželové míchačky	8. Studený stupeň FM
3. Zásobník kapalných komponent	9. Korečkový dopravník batche
4. Zásobník změkčovadel	10. Předzásobník
5. Váhy kapalných komponent a směšovací zásobník	11. Detektor kovu
6. Váhy sypkých komponent	12. KO-hnětič/extruder

### 2.2.2 Vytlačování

Vytlačování neboli extruze je jednou ze dvou v praxi používaných variant výroby hydroizolačních fólií z PVC. Můžeme se pak setkat s výrobou na jeden průchod linkou, případně na dva průchody. První zmíněná možnost je strojně náročnější, nicméně výsledný produkt lze vyrobit s podstatně vyšší efektivitou a s lepší ekonomikou.

Výrobní proces extruze hydroizolačních fólií z PVC spočívá v přípravě nastavené a ověřené receptury v míchacím uzlu, který je blíže popsán v předchozí kapitole. Ze zásobníku připravené směsi vstupuje materiál do extruderu, kterým je obvykle temperovaný dvoušnek s poměrem 32–36 L/D. Součástí extruderu je také vývěva sloužící k odtahu plynů a vlhkosti z taveniny a obvykle se přidává také zubové čerpadlo pro srovnání tlaků na výstupu ze šneku. Další nedílnou součástí takové linky je plochá vytlačovací hlava, která zajišťuje rovnoměrné zásobování materiálu na žehlicí tříválec. V případě varianty výroby na jeden průchod obsahuje linka minimálně dva extrudery a většinou ke každému z nich samotný žehlicí tříválec. Lze se setkat i s variantou dvou extruderů na jeden žehlicí tříválec, zde je však velmi náročné řídit tloušťku jednotlivých vrstev, proto se častěji v praxi setkáme s variantou dvou extruderu a pro každý z nich samotný tříválec.



Obrázek 7: Zjednodušené schéma extruzní linky na PVC fólie [18]

Popis obrázku 7: 1 – odvíječ výztuhy, 2 – zásobník, 3 – extrudér, 4 – vytlačovací hlava a žehlicí tříválec, 5 – ořez okrajů, 6 – kompenzátor a navíječka

Hydroizolační PVC fólie, jak je popsáno v kapitole 2.1, nejsou jen homogenní vrstvy, ale obsahují v mnohých případech nějakou výztuhu. Tato výztuha je odvíjena většinou z dvou poziční odvíjecí stolice a přes převáděcí válečky naváděna na žehlící tříválec, kde je částečně zatlačena, zalaminována, do taveniny. V případě výroby na dva průchody linkou tvoří takto vyrobená fólie s výztuhou polotovar pro druhý průchod, při kterém je doplněna druhá vrstva PVC. Naopak v jednorůchodové výrobě je tento polotovar rovnou naváděn ke druhému tříválcí, kde je z druhého extruderu doplněna druhá vrstva PVC. V průběhu výroby je bezkontaktním měřičem kontrolována tloušťka jednotlivých vrstev, ale také celková tloušťka výrobku. Informace o tloušťkovém profilu slouží ke správnému nastavení stroje pro požadovanou tloušťku.

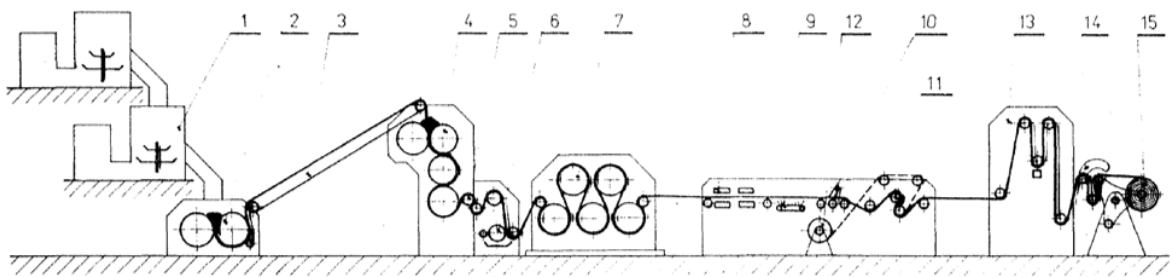
Produkt je dále pomocí válečkové dráhy naváděn na ořez okrajů, kde je ořezán na požadovanou šíři. Okraje jsou buďto drceny, nebo odtahovány pomocí nekonečného pásu a následně odváženy od linky k recyklaci. Na téměř hotový produkt je na závěr nanášen potisk s požadovanými informacemi a je navíjen do rolí. Navíjení může být do velkonábalů, určených k převinutí na externí převíječe nebo přímo na zákaznické role, které jsou následně baleny a skládány na paletu. [17][17][18]

### 2.2.3 Válcování a laminování

Univerzálnější technologií pro výrobu hydroizolačních PVC fólií je využití válcovací a laminační linky. Velkou výhodou tohoto způsobu výroby je především již zmíněná univerzálnost, kdy je možné linky využít pro širší portfolio výroby a laminovat větší počet jednotlivých vrstev. V prvním kroku je třeba připravit směs podle receptury, která se připravuje v míchacím uzlu. Ze zásobníku připravené směsi míchacího uzlu je materiál gravimetricky dávkován do KO-hnětiče. Hnětič může mít více vstupů, a tudíž je možné přidávat k připravené směsi například drť nebo recyklát. KO-hnětič je jednošnekový vytlačovací stroj, který otáčením šneku vytváří oscilační pohyb a díky hnětadlům ve stěnách stroje dochází k plastifikaci a homogenizaci materiálu. Šnek hnětiče je poskládán z jednotlivých segmentů a dle požadavků výroby je možné měnit jeho sestavu. Souběžně se změnou sestavy šneku je nutné také upravit pozice hnětadel ve vnitřní straně komory šneku. PVC směs, která je rozpracovaná na požadovanou homogenitu a teplotu (obvykle 150–170 °C), je pomocí pásového dopravního pásu dopravována na dvouválec (kalandr), kde dochází k dalšímu rozpracování materiálu a také jeho homogenizaci. V současnosti se od využití dvouválce za kalandrem ustupuje, je však třeba pak správně dimenzovat KO-hnětič a pro každou danou recepturu výroby zvolit vhodnou sestavu šneku.

Rozpracovaný a homogenní materiál je v podobě pásku širokého 10-20 cm odtahován pásovým dopravníkem opatřeným detektorem kovu na taktovací pásový dopravník, který pásek nanáší rovnoměrně po celé šířce první štěrbině válcovacího stroje. U výroby PVC fólií se obvykle jedná o čtyř válec typu „F“. Nastavením mezery (štěrbiny) mezi jednotlivými válci a vhodnou fricí získáme požadovanou tloušťku fólie. Seřizováním prohnutí válců pak získáme rovnoměrný tloušťkový profil. V každé štěrbině se pak udržuje drobná, rotující zásoba materiálu zvaná rolna.

Dezénovací jednotka navazuje na odtahovou válečkovou dráhu, která odtahuje fólii ze čtyřválece a opatří povrch fólie dezénem. Dezén může sloužit pro technologické účely (odstranění vzduchů při laminaci, určení směru pokládky apod.) nebo čistě k estetickým účelům, kdy sjednotí vzhled povrchu. Za dezénováním následuje chladicí válečková dráha, která chladí fólii na teplotu okolí. Dále se, stejně jako u extruze, kontroluje tloušťkový profil, kdy zařízení pro jeho kontrolu může sloužit zároveň jako řízení pro nastavení mezery mezi jednotlivými válci na čtyřváleci. Po kontrole tloušťky dojde k ořezu okrajů, měření délky a nakonec navinutí, převážně na velkonáviny, které slouží jako polotovary pro laminaci.

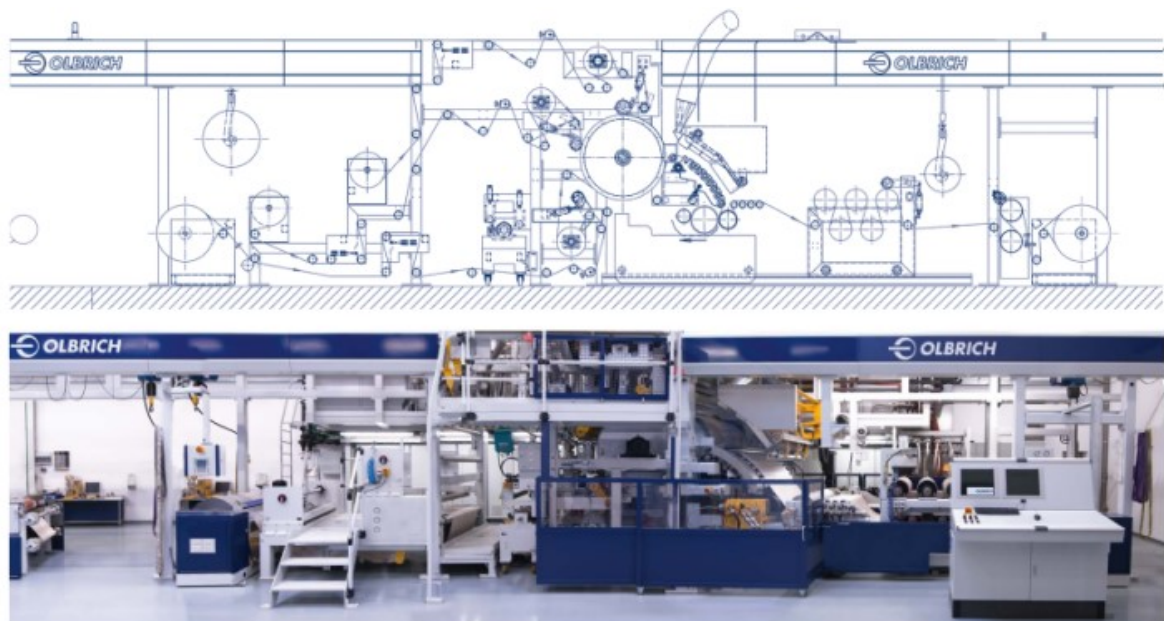


Obrázek 8: Schéma válcovací linky [17]

1 – fluidní míchačka, 2 – dvouválec, 3 – dopravník, 4 – čtyřválec, 5 – odtah, 6 – dezénování, 7 – chladicí válce, 8 – měřič tloušťky, 9 – prosvěcovací stůl, 10 – ořez okrajů, 11 – tažné válce, 12 – navíjení okrajů, 13 – zásobník, 14 – příčné řezání, 15 – navíjecí zařízení

Polotovary připravené válcováním na válcovací lince jsou zpracovány na lince laminační. Během procesu laminace dochází za využití teploty a tlaku ke spojování jednotlivých vrstev, polotovarů ve vícevrstvou fólii. Laminovány mohou být jednak PVC polotovary, ale také výztuhy a jiné pomocné vrstvy. Podle počtu vrstev je laminační linka opatřena potřebným počtem odvíjecích míst pro polotovary, případně je navržen technologický postup s více průchody linkou. Výše zmiňované hydroizolační střešní fólie jsou vyráběné minimálně ze tří vrstev, spodní a vrchní vrstva PVC a výztuha nebo separační netkaná textilie. Od odvíječů jsou jednotlivé vrstvy naváděny pomocí válečků na

předehřívací válce, kde dochází k předehřátí polotovaru na požadovanou teplotu. Předehřev je důležitý především ke sjednocení teplotního parametru daného polotovaru před laminací. Z předehřívacího válce je již materiál naváděn pomocí válečků na rozhrnovací váleček a následně na laminační válec. Laminační válec je zpravidla vyhříván, dříve párou, v současnosti častěji termo olejem. Jednotlivé vrstvy jsou těsně před laminací ještě povrchově nahřívány IR zářiči a spojovány na laminačním místě, které je tvořeno štěrbinou mezi laminačním válcem a přítlačným, gumovým válcem. Přítlačná síla je obvykle generována hydromotory na stranách válce. Po laminaci je povrch vícevrstvé fólie opatřen patričným dezénem, který jednak sjednotí vzhled, ale také může mít protiskluzovou funkci. Na dezénování navazuje chlazení produktu na okolní teplotu, ořez okrajů, potisk značící daný výrobek a linii pro svary a nakonec navíjení buďto do velkonábalu, jakožto polotovaru pro převíjení nebo již na hotové role v délce návinu, které zákazník požaduje. [17][19][20]



Obrázek 9: Schéma laminační linky na PVC fólie [19]

### 3 ZDROJE A ZPRACOVÁNÍ CUPANINY

Cupanina, respektive PES cupanina, je jednou ze složek odpadu, který vzniká při produkci výše popsaných hydroizolačních fólií. Je to směs polyesterových vláken a PVC drti. Vzniká postupným drcením, mletím a pneumatickou separací heterogenních PVC hydroizolačních fólií s PES výztuhou. Při tomto technologickém zpracování odpadů z hydroizolačních fólií vzniká jednak téměř čistá PVC drť označována jako K1, ale také právě směs polyesterových vláken s vysokým obsahem PVC drti (přibližně 70 hm.%)



Obrázek 10: PES cupanina

V současnosti se jako zdroj cupaniny používá pouze průmyslový odpad z hydroizolačních fólií. Jedná se o odpad, který pochází z více technologických operací a obsahuje jeden, nebo i více polymerních materiálů. Výhodou tohoto odpadu je, že známe jeho složení, nicméně oproti technologickému odpadu je hůře zpracovatelný z důvodu obsahu dalšího polymeru, v našem případě to jsou polyesterové výztuhy v PVC fólii. Recyklace těchto materiálů je samozřejmě technologicky složitější, mnohdy až hraničící s ekonomickou smysluplností.

Důvodem, proč se zabývat recyklací těchto materiálů, u kterých je zpracování technologicky složitější, nejsou jen ekonomické ukazatele, ale jsou to i různé environmentální aspekty. Pokud bychom tyto materiály skládkovali a nezabývali se možným zpracováním, recyklací, přicházeli bychom o zdroj materiálu, kterým můžeme nahradit primární surovinu. Nahrazení primární suroviny přináší finanční úsporu, ale také úsporu neobnovitelných zdrojů. Současně zpracováním takového typu materiálu výrazně



snižujeme množství skládkovaného odpadu a tím snižujeme ekologickou zátěž, kterou toto skládkování představuje. [21]

### 3.1 Třídění

Samotné zpracování průmyslového odpadu by nebylo možné bez řádného vytrídění. Proces třídění průmyslového odpadu je nevyhnutelným krokem, je však mnohem jednodušší než při manipulaci s materiály po konci životního cyklu, kde je mnohdy obtížně zjistitelný původ daného výrobku, natož jeho složení. Klíčovým aspektem úspěšné recyklace průmyslového odpadu je zavedení třídění již od okamžiku vzniku tohoto odpadu. V této fázi je třeba materiál nejen pečlivě třídít, ale také řádně a vhodně označit, aby se předešlo možným záměnám s jinými druhy odpadu.

Každá firma má vlastní, interní systém evidence odpadů, který by měla striktně dodržovat napříč všemi odděleními. Třídění materiálu vyžaduje také přípravu vhodných skladovacích prostor, které zabezpečí ochranu materiálu před vnějšími vlivy, jako je prach, vzdušná vlhkost apod., ale také zajistí, že zde zůstane materiál patřičně roztríděný, dokud nedojde k jeho zpracování. U hydroizolačních fólií je třeba odlišit nejen homogenní fólie od heterogenních, je třeba i odlišovat jednotlivé skladby výrobku. V následných zpracovatelských krocích bude mít jiné technologické parametry HIF s mřížkou, HIF s netkanou textilií i HIF se skelným rounem, proto je třeba i tyto materiály od sebe odlišit.

### 3.2 Drcení – zmenšení frakce

Prvním krokem zpracování popisovaného odpadu je drcení neboli také před-mletí, jedná se o technologický krok, jehož cílem je dosáhnout zmenšení velikosti částic, což vede k usnadnění manipulace a následnému zpracování. Tento procesní krok může být propojen online s procesem mletí a separace, čehož se využívá zejména při zpracování materiálů obsahujících PES vlákna. Naproti tomu u odpadu obsahující skelné rouno, které neprochází separací vláken, se pouze upravuje velikost částic a materiál dále neprochází mletím a separací.

Vytríděný materiál je před vstupem do drtící linky dávkován na dopravní pás. Tento pás je v nastavených taktech posouván pod hydraulickou gilotinu, kde dochází ke zmenšení plošných útvarů. Po zmenšení frakce do podoby umožňující další zpracování, je materiál transportován pomocí dalšího dopravního pásu, vybaveným detektorem kovu, dopravován k prvnímu drtiči. Detektor kovu upozorní, v případě detekce kovové částice, obsluhu na její

přítomnost. Obsluha pak zajistí odstranění této částice tak, aby nedošlo k poškození drtiče. V drtiči bývá standardně instalované síto s oky o velikosti 5–10 mm, které zajišťuje relativně rovnoměrnou velikost částic drceného materiálu.

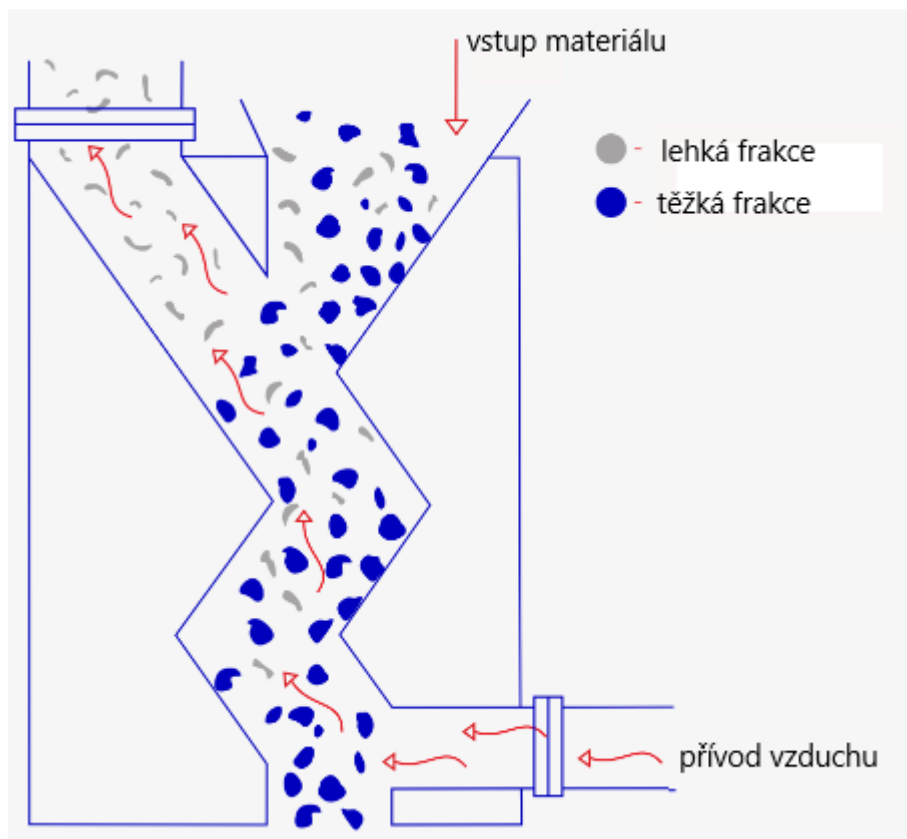
Nožové mlýny určené pro zpracování plastového odpadu jsou vybaveny rotační hřídelí a rotorem, nesoucím několik nožů. V komoře drtiče jsou pak umístěny satorové nože a síto s odpovídajícím děrováním. Odkrajovaný materiál je v komoře zdržován, dokud jeho částice nejsou schopny propadnout otvory v použitém sítu. Takto pomletý materiál je následně připraven k průchodu dalšími technologickými kroky. Tento typ mlýnů se v případě tohoto materiálu osvědčuje za předpokladu pravidelné údržby, díky svému výhodnému poměru cena/výkon a nízkým provozním nákladům. Výběr vhodné velikosti stroje je klíčový pro celý proces zpracování, je třeba tedy tomuto parametru věnovat zvláštní pozornost již při přípravě projektu recyklace. Při výběru kapacity stroje je třeba brát v úvahu i možné budoucí rozšíření výroby a navýšení vzniku průmyslového odpadu. Nevýhodou nožových drticích strojů je jejich vyšší hladina hluku a vznik prachu. Moderní technologie však umožňují efektivní řešení těchto nevýhod pomocí odhlučňovacích komor a odlučovačů prachu.



Obrázek 11: Nožový mlýn ROTOPLEX RO [22]

V případě hydroizolačních fólií s polyesterovou výztuhou je materiál převeden pomocí vzduchotechniky do druhého nožového mlýna. Tento proces zahrnuje průchod turniketovým podavačem a následný průchod tzv. cik-cak separátorem. Zde dochází k prvnímu důležitému oddělení PVC drtě, od shluků PES vláken. Cik-cak separátory

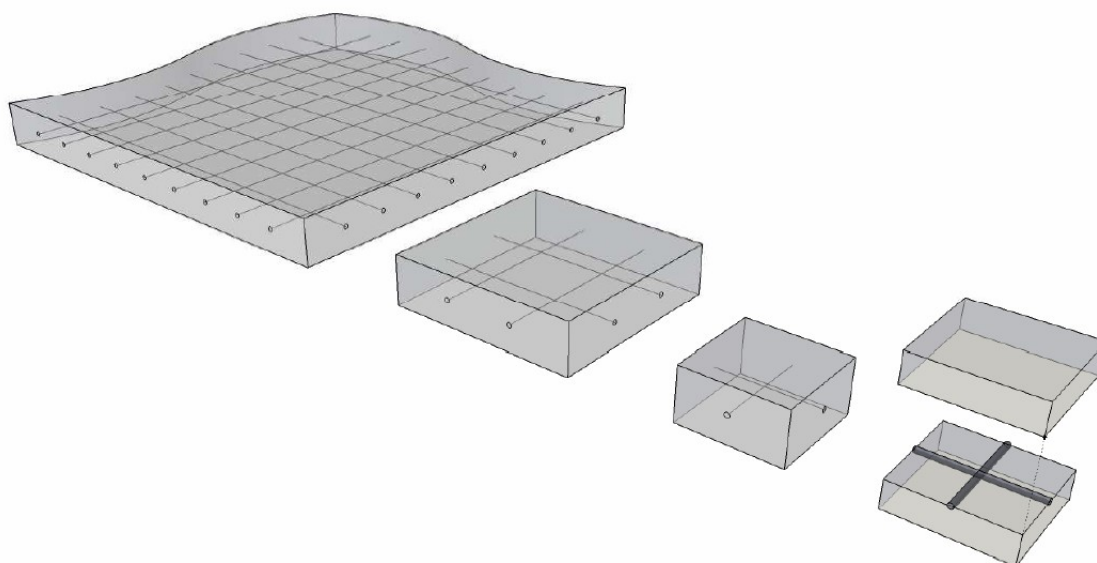
využívají princip rozdílného odporu částic vůči proudícímu vzduchu. Polyesterová vlákna jsou unášena nad separátor k odlučovacímu filtru, zatímco těžší PVC drť padá do spodní části separátoru. Zařízení cik-cak separátoru pracuje v režimu recirkulace vzduchu, kde vyfiltrovaný vzduch je znovu zaveden dmychadlem zpět do separátoru. Průtok a tlak vzduchu jsou pečlivě regulovány na ventilátoru. [22][23][24][25]



Obrázek 12: Schéma funkce cik-cak separátoru [25]

### 3.3 Mletí a separace vláken

Proces separace vláken je klíčovým krokem vedoucím k vytvoření drtě, kterou je následně možné vracet zpět do středních a spodních vrstev produktu, z něhož pochází. Tato PVC drť obsahuje méně než 1 % polyesterových vláken, a tudíž zásadně neovlivňuje fyzikálně mechanické vlastnosti (FMV) produktu. Pro dosažení separace vláken je nutné nejdříve otevřít strukturu drti z hydroizolační fólie a odhalit tak PES vlákna zapouzdřená uvnitř. Zjednodušené schéma zmenšení velikosti části z plošných útvarů HIF (drcením) a otevření struktury a odhalení vláken (mletím) je znázorněno na obrázku níže (Obrázek 13: Schéma zmenšení plošných útvarů HIF a otevření struktury drtě [21])



Obrázek 13: Schéma zmenšení plošných útvarů HIF a otevření struktury drtě [21]

Otevírání struktury se provádí pomocí talířového mlýnu, známého též jako pulverizátor. Toto zařízení využívá rotace jednoho ze dvou proti sobě orientovaných mlecích kotoučů (talířů) s jemným ozubením na povrchu. Materiál je přiváděn na střed stacionárního kotouče a odstředivou silou je tlačěn k okraji, kde je nastavená minimální štěrbina. Tímto procesem dochází k účinnému zmenšení částic a otevření struktury drtě.

Současně s otevřením struktury fólie dochází pod vlivem smykových sil k uvolnění PES vláken. V této fázi vzniká již zmiňovaná téměř čistá PVC drť a shluky PES vláken, nazývané též „cupanina“. Tato drť je opět oddělována od cupaniny pomocí cik-cak separátoru. Dávkování materiálu do separátoru je řízeno turniketem, který slouží nejen jako dávkovač, ale současně také odděluje separátor od předchozí pneumatische dopravy.

Proudění vzduchu v separátoru je nastavitelné v závislosti na velikosti částic a množství polyesterových vláken. Pro vyšší efektivitu separace a zajištění tak vyššího výtěžku relativně čisté PVC drtě lze sériově zapojit další separátory a opakovat krok separace, kdy do navazujícího cik-cak separátoru vstupuje již jednou odseparovaná cupanina, ze které získáváme další částice PVC.

Cupanina je po odseparování drtě transportována pomocí pneumatische dopravy do PE pytlů nebo jiných obalů, nebo je transportována přímo do navazující technologie určené k jejímu zpracování. PVC drť propadáva cik-cak separátorem na vibrační síto, odkud je potrubím s pneumatickou dopravou přepravována na rotační síto. Zbytky vláken zachycené

ve vibračním a rotačním sítu jsou znovu odtahovány jako cupanina. Drť propadává přes detektor kovu do předem připravených obalů.

Postupným drcením, mletím a separací získáme prakticky čistou PVC drť s obsahem polyesterových vláken do 1 hm.% a PES cupaniny obsahující přibližně 30 hm.% polyesterových vláken a 70 hm.% PVC drtě.

Výsledná délka PES vláken v cupanině se pohybuje v rozmezí od 0,5 mm po 6 mm. Dlouhá vlákna obsažená v této směsi značně ovlivňují požadované fyzikálně mechanické vlastnosti a je tedy potřeba cupaninu dále upravit. Dalším velmi negativním vlivem velké délky vláken a obecně PES shluků je obtížná manipulace s materiálem a nestabilní dávkování. S ohledem na výše uvedené je tedy nezbytné dále zkrátit délku těchto vláken. Pro dosažení tohoto zkrácení je potřeba integrovat polyesterová vlákna do PVC drti, matrice, která je obsažena v PES cupanině. Dalším technologickým krokem tedy bude dosažení optimální délky vláken, která zajistí jednak vylepšení FMV, ale také dávkování do zpracovatelské technologie. [21][23][24][27]



Obrázek 14: PVC drť získaná po separaci PES vláken



Obrázek 15: Získaná směs PES vláken a PVC drti

### 3.4 Granulace cupaniny

Integrace PES vláken z cupaniny do PVC matrice představuje klíčový krok celého procesu recyklace PVC materiálu s obsahem PES vláken. Pro dosažení optimálních výsledků, jako je výkon, stabilita a eliminace dalších předúprav, je vhodné použít kompletní extruzní linku s využitím ko-rotacího dvoušneku a podvodní granulací. Pro dosažení konzistentního tlaku na vytlačovací hlavě a zkrácení délky vláken již při extruzi je vhodné použít kónický ko-rotací dvoušnekový extrudér.

Vstupní materiál, cupaninu, je před samotným zpracováním nutné dopravit do násypky extruzní linky. S ohledem na vysokou prašnost a nezbytnost udržet v čistotě materiál i pracovní prostředí je pro přepravu materiálu využíván uzavřený systém pneumatické dopravy. Přímé napojení na předchozí technologicky, zpracovatelský systém eliminuje problémy spojené s usazováním materiálu v obalu a následnému mostování při vysypávání cupaniny do zásobníku extruzního stroje.

Cupanina, dopravená pomocí pneumatické dopravy do zásobníku, je pečlivě promíchávána pomocí míchadla na dně tohoto zásobníku, aby se zabránilo slehnutí

materiálu. Vytváří se tak předzásoba materiálu, což zajišťuje kontinuální dávkování do komory šneků. Zásobník je vybaven čidlem snímajícím výšku hladiny materiálu, tento senzor informuje obsluhu o množství materiálu v zásobníku a umožňuje mu tak řídit otáčky šneku čili rychlost zpracování. Ze zásobníku je cupanina gravimetricky dávkována přes separátor kovu do pēchovacího zásobníku, který materiál plynule dávkuje do vyhřáté komory vytlačovacího stroje.

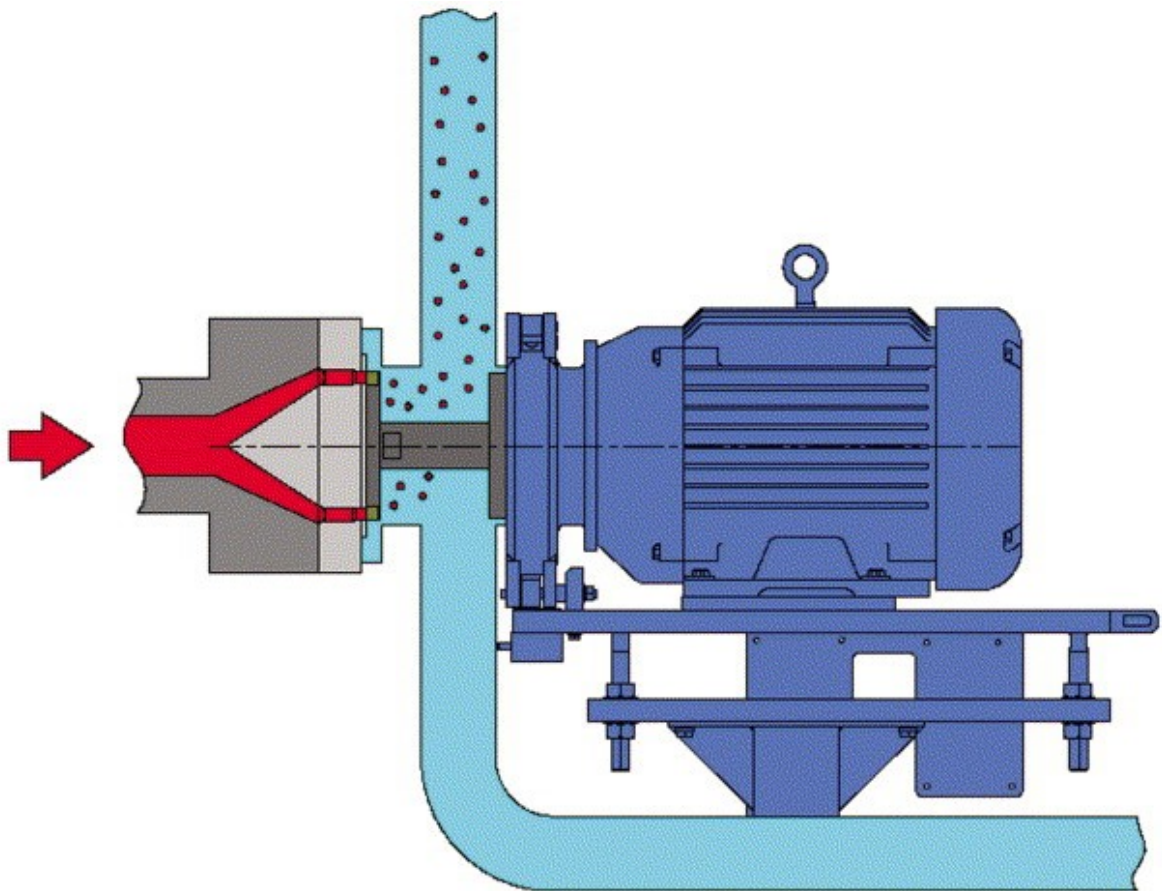
Optimálních výsledků při vytlačování a následné granulaci lze dosáhnout pomocí již zmíněného kónického ko-rotačního dvoušneku s instalovanou podvodní granulací. Podvodní granulace nám umožňuje mimo jiné poměrně přesně řídit velikost výsledných granulí. Systém kónického ko-rotačního dvoušneku byl představen trhu po roce 2007 a byl speciálně navržen pro recyklaci a plně se projevuje i v oblasti upcyklace. Tento systém nabízí mnoho výhod, zejména co se týče plastifikace, homogenizace a snížení energetické spotřeby. Zároveň byl testováním dokázán vliv extruderu na zkrácení vláken v průběhu zpracování. Všechny tyto výhody lze efektivně využít při zpracování cupaniny. Materiál lze bez větších problémů plnit do extruderu, přes jeho nízkou sypnou hmotnost, díky velkému vstupnímu otvoru, který zajišťují právě kónické šneky. Výsledkem pak je konstantní tlak na vytlačovacím stroji a možná plynulá granulace.



Obrázek 16: Extrudér s kónickým ko-rotačním dvoušnekem [26]

Posledním, neméně důležitým, krokem v získání a přepracování cupaniny je podvodní granulace. Zde probíhá přeměna taveniny na tepelně izolované vytlačovací hlavě s otvory o průměru přibližně 2 mm. Materiál je přes tyto díry vytlačován do vody a odřezáván pomocí rotující nožové hlavy. Jednotlivé granule jsou tak hned po vytlačení

chlazený a proudící vodou odplavovány do centrifugy. Voda je podrobena filtraci a následně je znovu využívána v cirkulačním systému linky. Výsledné granule, které mají díky kónickému dvoušneku a podvodní granulaci zkrácená vlákna na vhodnou délku, jsou odváděny a následně dosušovány pomocí vzduchotechnického systému. Po dosušení je granulát pneumatickou dopravou přefukován do přepravních obalů, kterých je přepravován k uskladnění, případně rovnou k dalšímu zpracování na zpracovatelských strojích. [26]Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.



Obrázek 17: Zjednodušené schéma podvodní granulace Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.



## 4 UPLATNĚNÍ CUPANINY

Cupanina, zpracovaná výše uvedeným způsobem a převedená do podoby granulátu, obsahuje do 40 hmotnostních % polyesterových vláken s délkou redukovanou na maximálně 1,5 mm. Takto upravený materiál lze již bez zásadních komplikací dávkovat do výrobního zařízení, ať už šnekovým, turniketovým, pásovým, či jiným běžně používaným dopravníkem. Možnost dávkovat materiál nám umožňuje tento granulát zpracovávat na širokém spektru zařízení od válcovacích linek, vytlačovacích linek, přes vstřikovací stroje až po běžné hydraulické lisy.

Cupanina je směs PES vláken a PVC pocházejícího ze střešní hydroizolační fólie, což nám zajišťuje poměrně stabilní parametry. Materiál je díky své původní aplikaci velmi dobře stabilizovaný proti povětrnostním vlivům, a tudíž i po recyklaci můžeme zvažovat uplatnění výrobků z cupaniny jak v interiéru, tak v exteriéru. Limitem tohoto materiálu je obsah polyesterových vláken, které spíše zhoršují finální vlastnosti, a je třeba řešit výrobky s tloušťkou stěny minimálně 2 mm.

### 4.1 Vstřikované výrobky z cupaniny

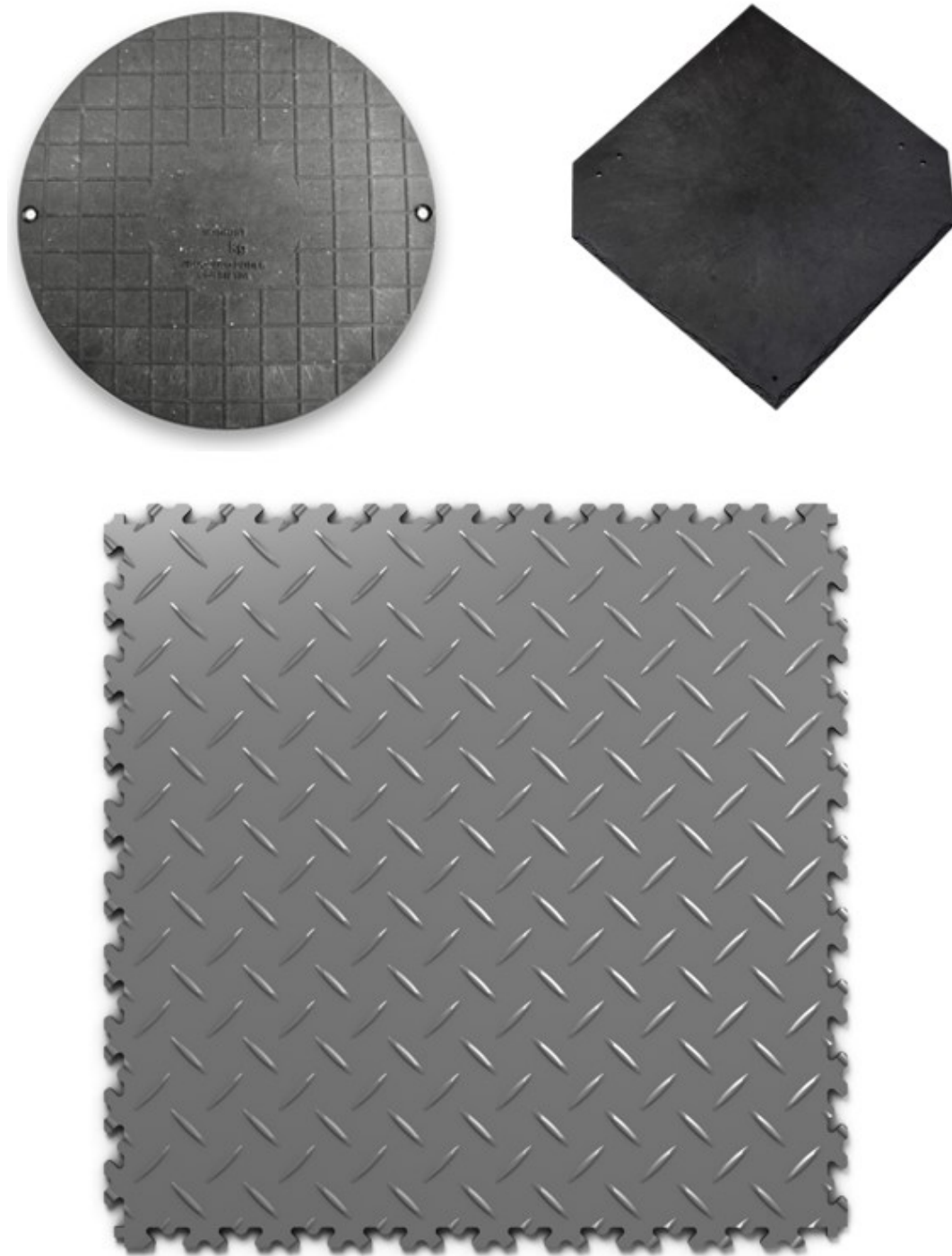
Vstřikování je jedním z důležitých výrobních procesů široce používaných pro výrobu plastových předmětů. Tento proces si získal velkou popularitu v průmyslu tváření plastů díky své rychlosti sériové výroby, ekonomickým výhodám, vysoké přesnosti atd.

Použití PVC ve vstřikovaných aplikacích se dříve setkávalo s velmi neúspěšnými výsledky z důvodu vyšší viskozity taveniny během fáze plnění při vstřikování dílce. Odlišnou charakteristikou PVC oproti běžně vstřikovaným plastům je, že tavenina PVC je citlivá na teplotu a termoviskoelastický efekt poskytuje další zvýšení teploty v důsledku vyšší smykové rychlosti při vstřikování. Při vysoké teplotě se tavenina PVC během procesu vstřikování často rozkládá a hoří. Rozsahy teplot taveniny a rychlost plnění při vstřikování PVC jsou tedy v důsledku možné degradace velmi omezené. V současnosti lze již poměrně dobře implementovat simulace pomocí softwaru pro vstřikování. Stále však platí, zvláště pro vstřikování PVC, že je třeba mít správně dimenzované vtokové kanály, a především vtokové ústí, mít materiál dobře tepelně stabilizovaný a citlivě pracovat s parametry vstřikování, především s teplotou a rychlostí vstřiku.

Granulát z cupaniny obsahuje mimo PVC i množství PES vláken. Teplotní degradace PVC nám neumožňuje pracovat za vysokých teplot čili vlákna zůstávají ve své původní,

neroztavené podobě. Tento fakt nadále prohlubuje citlivost na parametry vstřikovacího procesu a je tedy potřeba navrhovat výrobky se silnější stěnou tak, aby mohlo být větší i vtokové ústí.

Vstřikováním cupaniny lze efektivně vyrábět silnostěnné výrobky v podobě různých pochozích dlaždic, střešních krytin, krytů kanalizačních šachet apod. [28][29][30]

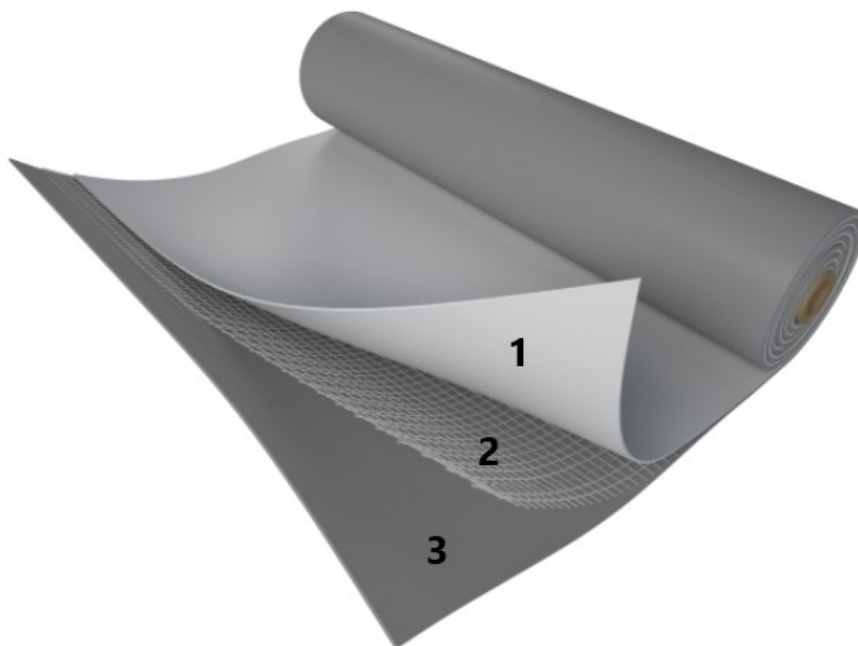


Obrázek 18: Možné výrobky z cupaniny vyrobené vstřikováním [31][32][33]

## 4.2 Válcované výrobky z cupaniny

Válcování plastů neboli také kalandrování je průmyslový proces, při kterém termoplasty procházejí systémem vyhřívaných válců, které tvoří souvislou a rovnoměrnou vrstvu daného polymeru, fólii. PVC tvoří většinu kalandrovaných polymerů. Kalandry jsou schopny vysokých výrobních rychlostí, což může vytvářet nákladové výhody při výrobě velkých objemů fólií a jsou také schopny vyrábět jednotné produkty s nízkou tolerancí vůči odchylkám tloušťky. Při válcování PVC však může vzniknout několik běžných vad, jako jsou vzduchové záchyty, šipky, matnost, ale i povrchové nerovnosti apod. I když jsou vady vnímány hlavně jako vizuální, mohou mít i negativní účinky na kvalitu fólie, jako je zvýšená propustnost v obalech či hydroizolacích a zhoršené mechanické vlastnosti.

Válcování samotného granulátu z cupaniny je sice možné, avšak výrazný pokles FMV oproti čisté směsi a povrchové nerovnosti na fólii způsobují praktickou nepoužitelnost takového produktu. Z tohoto důvodu je odzkoušeno a doporučeno používat granulát z cupaniny jako přídavek do čisté směsi, a to v rozmezí 3–10 hmotnostních procent. Výslednou fólii vyrobenou z čisté směsi s příměsí 5 % granulátu z cupaniny lze použít jako střední nebo spodní vrstvu vícevrstevných laminovaných hydroizolačních PVC fólií. [34][35][36]



Obrázek 19: Střešní hydroizolační fólie [15]

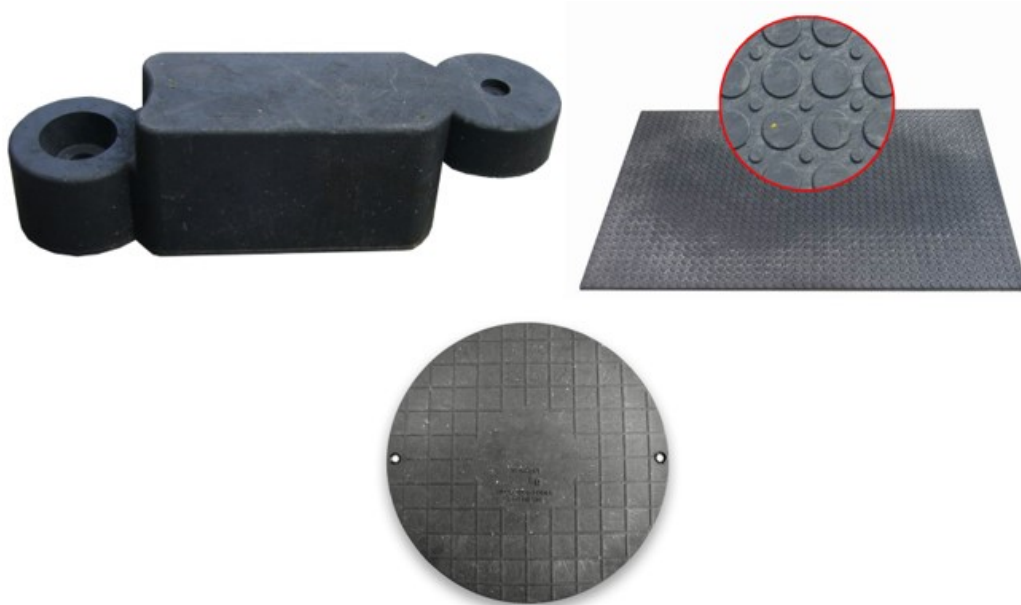
1 – vrstva z čisté PVC směsi; 2 – PES mřížka (výztuha); 3 – spodní vrstva s možností uplatnění 5 % granulátu cupaniny v čisté směsi

### 4.3 Lisované výrobky z cupaniny

Lisování je jeden z nejstarších a základních technologických způsobů používaný ke zpracování plastů. V současnosti jsou tyto technologie nahrazovány vstřikováním, u kterého je výrazně kratší výrobní cyklus, odpadají dodatečné operace, snižuje se prašnost apod. Při zpracování PVC si tato technologie stále udržuje své místo, především pro svou jednoduchost a nízké strojní náklady.

Tváření plastů metodou lisování se provádí převážně ve vyhřáté formě, nejčastěji ocelové (v případě PVC se jedná o nerezovou ocel), kdy působením tlaku na materiál dosáhneme požadovaného tvaru. Základními parametry lisování je lisovací teplota, lisovací tlak a doba chlazení (obvykle pod tlakem). Teplota lisování záleží především na použitém materiálu, ale také na složitosti formy, u PVC používáme teploty obvykle v rozmezí 160–170 °C. Lisování může probíhat v jednoduchém jednokomorovém lisu, případně v etážovém lisu, kdy na jeden závěr lisu vyrobíme více výrobků (v závislosti na počet etáží). Vstupní materiál pro lisování může být v podobě prášku, granulí nebo i drti.

Lisování cupaniny je jednodušší proces než vstřikování. Eliminací vysoké smykové rychlosti při vstřikování je výrobní cyklus méně náchylný na možnou degradaci materiálu. Cupanina pro lisování se používá stejně jako u jiných zpracovatelských metod v podobě granulátu, který je dávkován do formy. Forma je následně v lisu zahřívána a tlakem je materiál převáděn do tvaru formy. Metodou lisování lze vyrobit jednoduché tlustostěnné výrobky, jako jsou různé druhy zátěžových dlaždic, obrubníky, poklopy apod. [37][38]

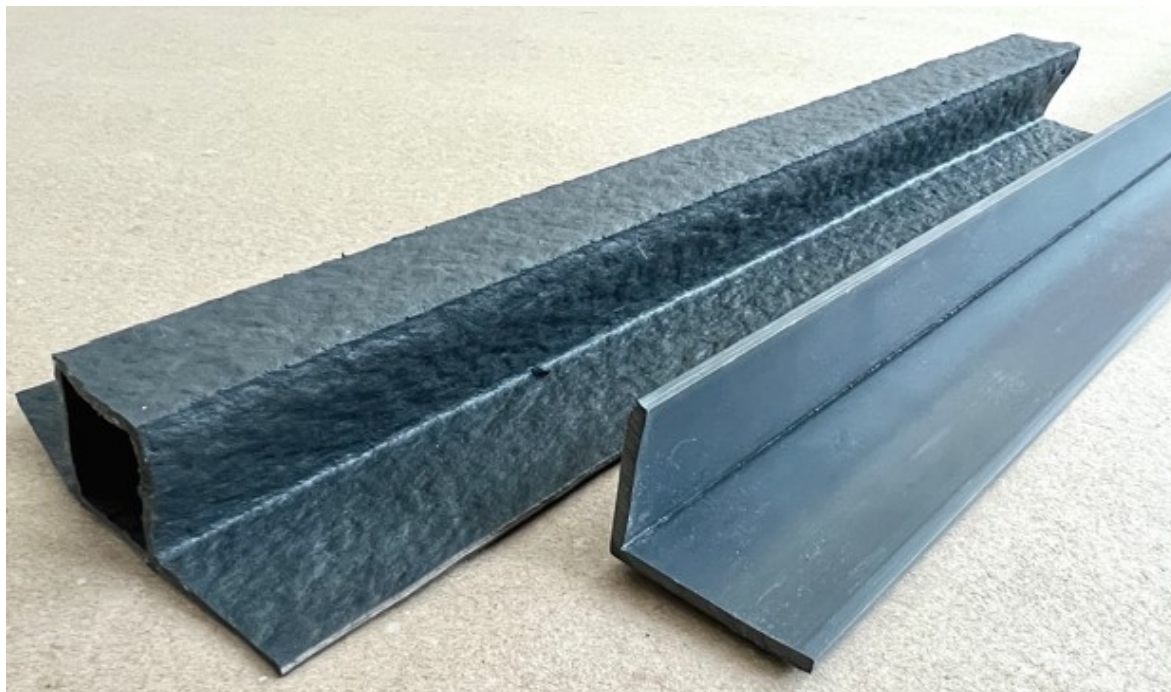


Obrázek 20: Možné výrobky z cupaniny vyráběné technologií lisování [31]

#### 4.4 Vytlačované výrobky z cupaniny

Extrudéry jsou populární zařízení v odvětvích zpracování plastů, kovů a potravin. Vytlačování je zvláště časté při vytváření produktů, které jako surovinu používají polymery. Tento proces začíná vložení plastového materiálu, v našem případě granulátu z cupaniny, do násypky vytláčovacího stroje. Z násypky materiál putuje do komory extrudéru, kde je krok za krokem taven mechanickou energií tvořenou šnekem a topnými tělesy na komoře šneku. Roztavený polymer je pak protlačován přes tvarovou hubici, součást vytláčovací hlavy, která tvaruje daný materiál do tvaru, který se zafixuje během chlazení. Každý krok tohoto procesu je rozhodující pro definování výsledné charakteristiky produktu.

Trubky, hadice, izolované dráty, kabely, desky, fólie a dlaždice jsou jen několika příklady zboží vyrobeného z extrudovaných polymerů. V případě aplikace materiálu granulátu z cupaniny je třeba volit výrobky, které budou méně kvalitativně náročné. Jedná se především o zhoršenou výrobní přesnost, ale také zhoršené FMV výsledného produktu ve srovnání s využitím čisté PVC směsi. Vytlačováním cupaniny lze tedy vyrobit produkty, jako jsou paletové hrany, profily pod FV panely, nebo jiné jednoduché duté i plné profily pro méně náročné aplikace. [39][40][41]



Obrázek 21: Možné vytlačované profily z cupaniny

## 5 OPAKOVANÁ RECYKLACE VÝROBKŮ S CUPANINOU

Recyklace polyesterové cupaniny je proces sekundární mechanické recyklace. Tento proces vyžaduje vytrídění odpadu PVC, zmenšování částic, a nakonec extruzi tohoto materiálu. Tento způsob recyklace je vhodný pro PES cupaninu, ale výsledný produkt má nižší hodnotu než původní. Další možností zpracování polyesterové cupaniny je proces tzv. terciální recyklace, jmenovitě pak chemické nebo surovinové. Tímto procesem dojde k přeměně PVC odpadu na nízko molekulární chemikálie, paliva a suroviny. S ohledem na velkou energetickou náročnost druhého z uvedených procesů a nemožnost využít materiál opakovaně do stejné aplikace, bude dále uvažována pouze opakovaná mechanická sekundární recyklace.

Procesem mechanické recyklace bude docházet k postupnému zhoršování FMV materiálu. Opakovaným zpracováním materiálu dojde k mechanickým i tepelným přeměnám ve struktuře daného polymeru. Změny ve struktuře budou mít zásadní vliv na změnu fyzikálně mechanických vlastností finálního produktu a bude tedy nutné stanovit bezpečnou koncentraci recyklátu v primárním materiálu, případně maximální přípustný počet recyklačních cyklů.

Ekonomicky nejvýhodnější je aplikace granulátu z cupaniny do středních, nebo spodních vrstev hydroizolačních fólií v maximálním množství 5 hm. %. V praxi je takové množství považováno za bezpečné a nemělo by ani při opakované recyklaci mít zásadní vliv na výsledné vlastnosti produktu. Vliv opakované mechanické recyklace cupaniny při zmíněné koncentraci nebyl doposud podrobně zkoumán. V experimentální části této diplomové práce je tedy laboratorně ověřen vliv opakované mechanické recyklace cupaniny obsažené ve středních vrstvách hydroizolační střešní fólie na výsledné FMV vlastnosti. Laboratorně bylo simulováno mechanické i tepelné zatížení, kterému materiál v praxi podléhá při opakované recyklaci. Připravené vzorky byly podrobeny analýze fyzikálně mechanických vlastností, ale i strukturních změn v materiálu. [4][42][43]

## 6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomová práce je rozdělená do dvou hlavních částí, tou první je vypracování literární rešerše k tématu: Opakovaná recyklace výrobků s obsahem cupaniny. Součástí této části je shrnutí poznatků a zvolení postupu pro způsoby přepracování odpadu.

Ve druhé části, praktické, bylo připraveno několik základních sad vzorků simulujících opakovanou mechanickou recyklaci materiálu. Proměřeny byly zvolené charakteristiky:

- FMV – pevnost, tažnost, hustota, tvrdost.
- Vliv zrychleného stárnutí.
- FTIR analýza.
- Nasákavost a extrakce změkčovadel.
- Ohyb za nízkých teplot.

Závěrem byly sumarizovány výsledky z teoretické i experimentální části a bylo navrženo uplatnění přepracovaného materiálu.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



## 7 MATERIÁL A PŘÍPRAVA VZORKŮ

Opakovaná recyklace PVC materiálu s obsahem vláken má vliv na finální vlastnosti tohoto materiálu. Pro stanovení tohoto vlivu byla připravena série laboratorních vzorků, vyválnovaných fólií složených ze 45 % čisté směsi (Tabulka 2: Receptura PVC směsi), 50 % drtě K1 se simulovanou opakovanou recyklací a obdobně připraveným granulátem z cupaniny přidávaný v 5 %.

Vzorek číslo jedna byl složen z čisté směsi PVC a přidávala se drť K1. K této směsi byl přidán granulát cupaniny získaný pomocí zpracování na extruzní lince s podvodní granulací. Ve vzorku č. 2 byla použita čistá směs obdobně jako ve vzorku 1. Drť K1 pak byla připravena laboratorně ze vzorku č. 1 a u granulátu z cupaniny bylo simulované další smykové a tepelné zatížení pomocí zpracování na laboratorním dvouválci. Obdobně pak byly připravovány další vzorky, kdy drť byla použita vždy z předchozího vzorku a cupanina byla opakovaně tepelně zatěžována. Laboratorně připravené vzorky byly zatěžovány tepelně i smykově po delší dobu, než je tomu při běžném zpracování, a byla využívána jen střední vrstva z celé konstrukce hydroizolační fólie. Připravené vzorky tedy simulují 2x, 4x, 6x, 8x a 10x recyklovaný materiál.

### 7.1 Materiál pro zkoušky

Pro přípravu laboratorních vzorků simulujících opakovanou recyklaci PVC s obsahem PES vláken byla připravena čistá PVC směs dle receptury uvedené v tabulce níže.

Tabulka 2: Receptura PVC směsi

Materiál	Množství	Navážka pro 200 g dávku
	[%]	[g]
Suspenzní PVC K70	55	110,00
Stabilizátor Ca/Zn	1,5	3,00
Plnivo CaCO <sub>3</sub>	5,5	11,00
TiO <sub>2</sub>	1,75	3,50
Změkčovadlo	36	72,00
Barevná směs	0,25	0,50

K navážené a řádně zamíchané směsi byla přidávána PVC drť označována jako K1. Získávání této drti procesem recyklace hydroizolačních fólií je podrobně popsána v kapitole 3.2 a 3.3. Pro vzorky 2 až 5 byla tato drť připravována laboratorně na laboratorním nožovém

drtiči. Tento proces přípravy byl možný z toho důvodu, že byla připravována jen střední vrstva hydroizolační fólie bez zalisované mřížky, tedy nebyl potřeba proces separace vláken, který je prakticky laboratorně neproveditelný.

Posledním materiálem, který byl do finální směsi střední vrstvy HIF přidáván byl granulát z PES cupaniny. Do prvního vzorku byl přidán čistý granulát bez dalšího zpracování, do dalších vzorků v pořadí pak prošel materiál další tepelnou a smykovou zátěží simulovanou na laboratorním dvouválci.

## 7.2 Příprava vzorků

Pro přípravu vzorků bylo nutné materiál nejdříve navážít a zamíchat. Nejprve byla připravena čistá směs dle receptury uvedené výše (Tabulka 2: Receptura PVC směsi). Jednotlivé komponenty směsi byly naváženy na laboratorních vahách KERN EG 2200 – 2NM a řádně promíchány. Do připravené směsi PVC byla následně přidána drť K1 v 50 hm.% a 5 hm.% granulátu z cupaniny. Veškeré komponenty byly zamíchány dohromady a následně zpracovány na laboratorním dvouválci Rodolfo Comerio. Zpracování probíhalo při teplotě 170 °C, rychlosti otáčení 20 m/min a frikci – 30 %. Čas zpracování byl 10 min a během celého procesu byl materiál prořezáván a zapracováván. Výsledkem byla homogenní PVC fólie o tloušťce přibližně 0,4 mm. Výsledná tloušťka fólie byla kontrolována pomocí kalibrovaného laboratorního tloušťkoměru Käffer 4 N.



Obrázek 22: Laboratorní dvouválec Rodolfo Comerio

Z připravených fólií byly pomocí ramenového hydraulického vysekávacího stroje vyseknuty vzorky pro jednotlivé laboratorní zkoušky. Zbytky fólií po vyseknutí pak byly použity pro přípravu drti K1 pro další vzorky. Složení jednotlivých vzorků je uvedeno v tabulce níže (Tabulka 3: Složení jednotlivých vzorků)

Tabulka 3: Složení jednotlivých vzorků

	1. složka	2. složka	3. složka
VZ. 1	50 % K1 (po 1. recyklaci)	45 % PVC směs	5 % cupanina (po 2. recyklaci)
VZ. 2	50 % K1 (ze vzorku č.1)	45 % PVC směs	5 % cupanina (po 4. recyklaci)
VZ. 3	50 % K1 (ze vzorku č.2)	45 % PVC směs	5 % cupanina (po 6. recyklaci)
VZ. 4	50 % K1 (ze vzorku č.3)	45 % PVC směs	5 % cupanina (po 8. recyklaci)
VZ. 5	50 % K1 (ze vzorku č.4)	45 % PVC směs	5 % cupanina (po 10. recyklaci)

## 8 STANOVENÍ FYZIKÁLNĚ MECHANICKÝCH VLASTNOSTI

Stanovení FMV, jako jsou tvrdost, hustota, tažnost a pevnost, nám představují základní ukazatele chování daného materiálu a v případě opakované recyklace ukazují směr a velikost změny dané veličiny. Porovnáním vzorků mezi sebou pak získáme reálnou představu o míře degradace materiálu.

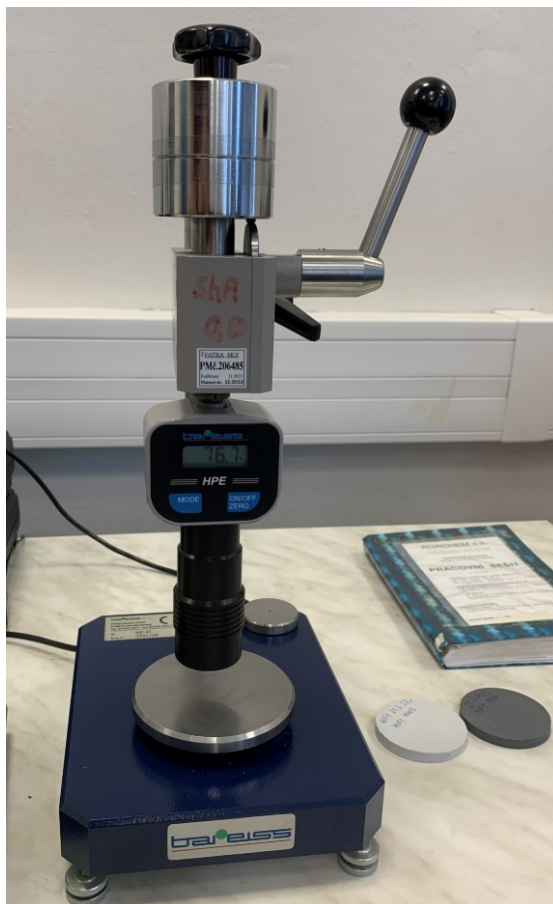
### 8.1 Stanovení tvrdosti

Tvrdost materiálu je jednou ze základních vlastností daného materiálu. Hodnota tvrdosti je nepřímo úměrná hloubce vtažení hrotu a závisí na modulu pružnosti a na viskoelastických vlastnostech hodnoceného materiálu. Měření je závislé na tvaru hrotu, na velikosti vlačovací síly a na době jejího působení. Jedná se tedy o empirickou metodu vhodnou ke kontrole jakosti daného materiálu. Pro stanovení tvrdosti plastů používáme metodu vlačování hrotu tvrdoměru, tvrdost Shore. U této metody rozeznáváme dvě tvrdosti:

Shore A (pro měkčí materiály, jako jsou TPE, PVC apod.), kde se do materiálu o minimální tloušťce 6 mm vlačuje hrot ve tvaru komolého kužele silou 10 N.

Shore D (pro tvrdé termoplasty), kde se vlačuje kužel silou 50 N.

Pro stanovení tvrdosti je třeba připravit vzorky, ty byly vylisovány z předpřipravených fólií na hydraulickém laboratorním lisu Dr. Collin 400P. Vzorky byly vylisovány na kruhové formě o průměru 60 mm a výsledné tloušťce 6 mm. Měření tvrdosti probíhalo za stabilních laboratorních podmínek při teplotě 23,0 °C dle normy ČSN EN ISO 868 na digitálním tvrdoměru Nareiss BS 61 – Shore A. Z displeje měřícího zařízení byla odečtena okamžitá hodnota tvrdosti. Měření probíhalo vždy na 5 místech z obou stran daného vzorku. Celkem tedy bylo pro každý vzorek zaznamenáno 10 hodnot tvrdosti z různých míst vzorku, vždy minimálně 12 mm od kraje a s mezerou 5 mm mezi každým měřením.



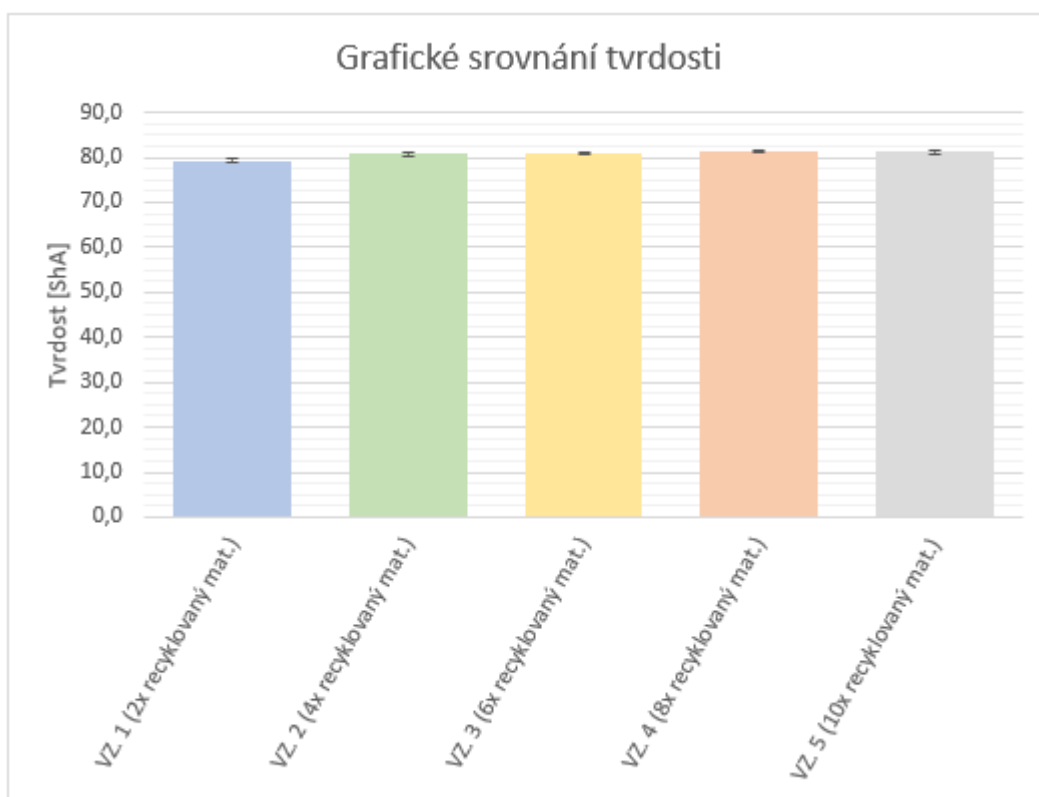
Obrázek 23: Digitální tvrdoměr Nareiss BS 61 Sha

Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulky a z jednotlivých měření byly stanovené průměrné hodnoty tvrdosti daného vzorku. Průměrné hodnoty pro jednotlivé vzorky jsou uvedené v tabulce níže (Tabulka 4: Průměrné hodnoty tvrdostí), stejně jako názorné grafické zobrazení průměrných hodnot (Obrázek 24: Grafické znázornění průměrných hodnot tvrdostí). Kompletní výsledky měření jsou pak součástí přílohy (Příloha P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY TVRDOSTÍ).

Naměřené hodnoty detekují postupné zvyšování tvrdosti materiálu při opakované recyklaci. Postupný růst je pravděpodobně způsoben zvyšujícím se obsahem PES vláken, ale současně také úbytkem změkčovadla. Změny v tvrdosti nejsou velké, proto tato změna nebude mít významný vliv na další zpracování recyklátu. [44][45][48]

Tabulka 4: Průměrné hodnoty tvrdostí

Průměrné hodnoty tvrdosti		
Materiál	Tvrdost [ShA]	Směr. odchylka
VZ. 1 (2x recyklovaný mat.)	79,2	0,39
VZ. 2 (4x recyklovaný mat.)	80,8	0,45
VZ. 3 (6x recyklovaný mat.)	81,1	0,21
VZ. 4 (8x recyklovaný mat.)	81,2	0,20
VZ. 5 (10x recyklovaný mat.)	81,3	0,39



Obrázek 24: Grafické znázornění průměrných hodnot tvrdostí

## 8.2 Stanovení hustoty

Z vylisovaných koleček byly pomocí mechanického vysekávacího stroje vyseknuty vzorky pro stanovení hustoty. Stanovení hustoty probíhalo za ustálených laboratorních podmínek a bylo provedené dle normy ČSN EN ISO 1183-1 metoda A. Před měřením byla změřena teplota imerzní kapaliny, destilované vody, která měla v době měření 22,5 °C. Z tabulek hustoty destilované vody byla odečtena hodnota pro tuto teplotu a to 0,99768

$\text{g}/\text{cm}^3$ . Pro stanovení hmotnosti vzorků ve vzduchu i v imerzní kapalině byly využity laboratorní váhy Sartorius BP 210 S. [46]



Obrázek 25: Váhy použité pro stanovení hustoty vzorků

Připraveny byly vždy 3 zkušební tělíska od každého ze vzorků. Jednotlivá tělíska byla získána mechanickým odseknutím z vylišovaného kolečka o tloušťce 6 mm. U každého tělíska, každého vzorku byla stanovena dle normy zdánlivá hmotnost na vzduchu a zdánlivá hmotnost v imerzní kapalině, destilované vodě. Z navážených zdánlivých hmotností a tabulkové hodnoty hustoty imerzní kapaliny při laboratorní teplotě v době měření byla pomocí níže uvedené rovnice stanovena hustota jednotlivých tělísek (Rovnice 1). Průměrné hodnoty hustoty pro každý vzorek jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 5: Průměrné hodnoty hustoty vzorků). Pro větší přehled jsou průměrné hodnoty zaneseny také do grafu (Obrázek 26: Grafické znázornění průměrných hodnot hustoty). Kompletní data z měření jsou součástí přílohy (Příloha P II: NAMĚŘENÉ HODNOTY HUSTOT)

$$\rho_s = \frac{m_{S,A} * \rho_{IL}}{m_{S,A} - m_{S,L}} \quad (1)$$

kde:

$m_{S,A}$  – zdánlivá hmotnost zkušební vzorku na vzduchu, v g

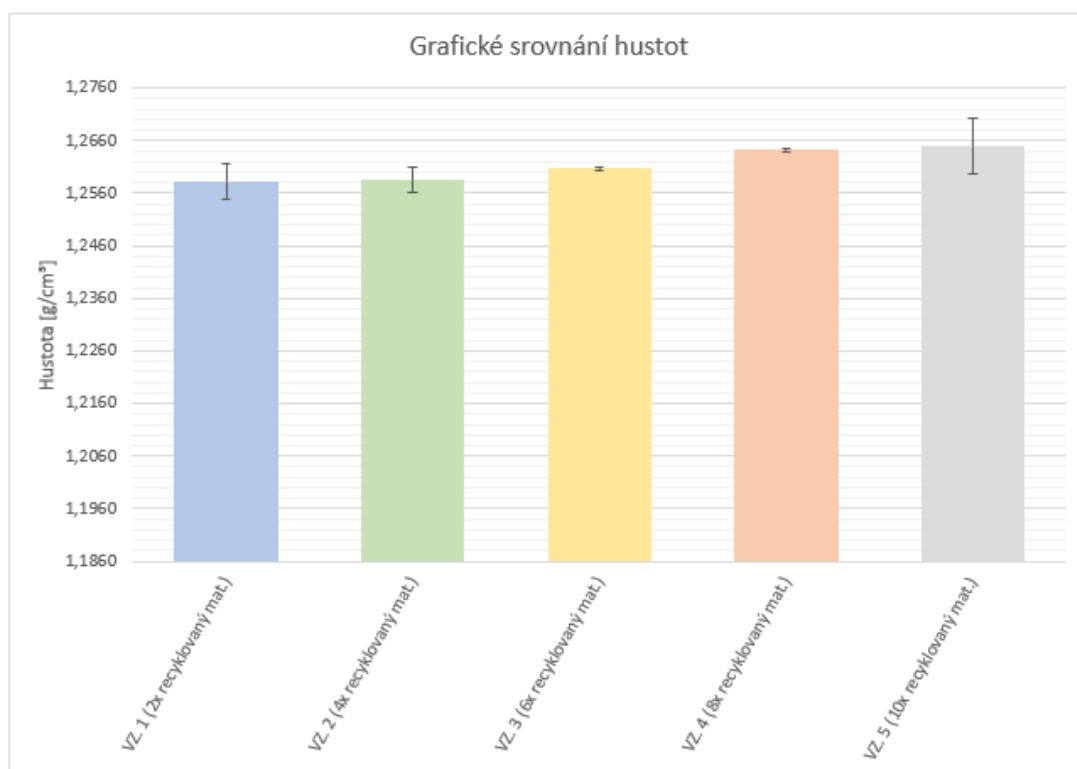
$m_{S,IL}$  – zdánlivá hmotnost zkušební vzorku v imerzní kapalině, v g

$\rho_{IL}$  – hustota imerzní kapaliny, v  $g/cm^3$

Obdobně jako u výsledků tvrdostí lze i u hustoty sledovat postupný nárůst hodnot při opakované recyklaci. Vliv na zvýšení hustoty bude mít především zvyšující se obsah PES vláken, nicméně změny v hustotě nejsou nikterak významné a nemajíc žádný vliv na další zpracování. [46]

Tabulka 5: Průměrné hodnoty hustoty vzorků

Průměrná hustota směsi		
Materiál	[ $g/cm^3$ ]	směr.odchylka
VZ. 1 (2x recyklovaný mat.)	1,2582	0,0035
VZ. 2 (4x recyklovaný mat.)	1,2586	0,0023
VZ. 3 (6x recyklovaný mat.)	1,2607	0,0003
VZ. 4 (8x recyklovaný mat.)	1,2642	0,0003
VZ. 5 (10x recyklovaný mat.)	1,2649	0,0054

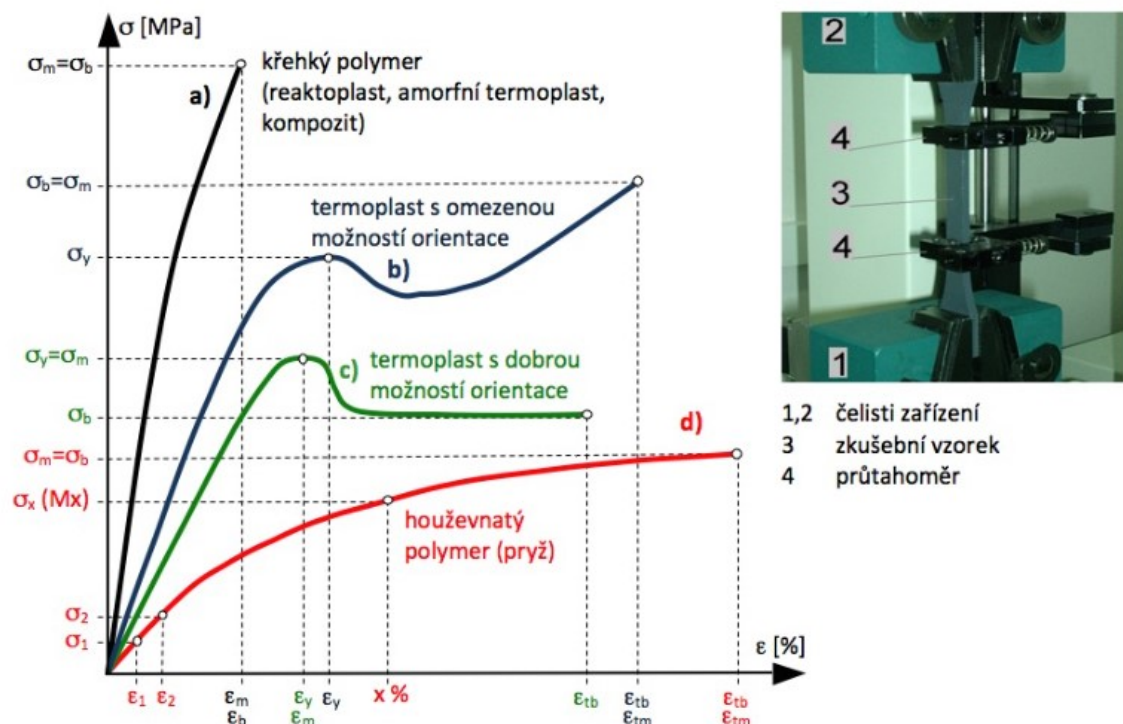


Obrázek 26: Grafické znázornění průměrných hodnot hustoty



### 8.3 Stanovení pevnosti v tahu a protažení

Tahové charakteristiky materiálů jsou jeho nejzákladnějšími mechanickými charakteristikami. Při stanovení pevnosti v tahu a protažení je těleso uchyceno do čelistí zkušebního stroje a na těleso je nasazen průtahoměr. Zkušební tělesa mají tvar oboustranných lopatek, takzvaných osmiček, které umožňují dostatečně pevné uchycení vzorku v čelistech, a napětí je přitom koncentrováno do zúžené části vzorku. Přesný tvar vzorku je přesně definován normou pro konkrétní typ materiálu. Rozměry a postup měření pro vzorky PVC jsou definovány v ČSN EN ISO 527-3. Výsledkem tahových zkoušek je deformační křivka, ze které určujeme pevnostní charakteristiky, jako je i mez pevnosti. Mez pevnosti je maximální napětí v tahu, které odpovídá největší síle naměřené v průběhu zkoušky. U PVC se při standardní teplotě okolí pohybuje kolem 15 MPa. Další mechanickou charakteristikou, kterou lze z deformační křivky stanovit, je poměrné prodloužení (protážení).



Obrázek 27: Typy deformační křivky polymerů v tahu a detail uchycení tělesa v čelisti [44]

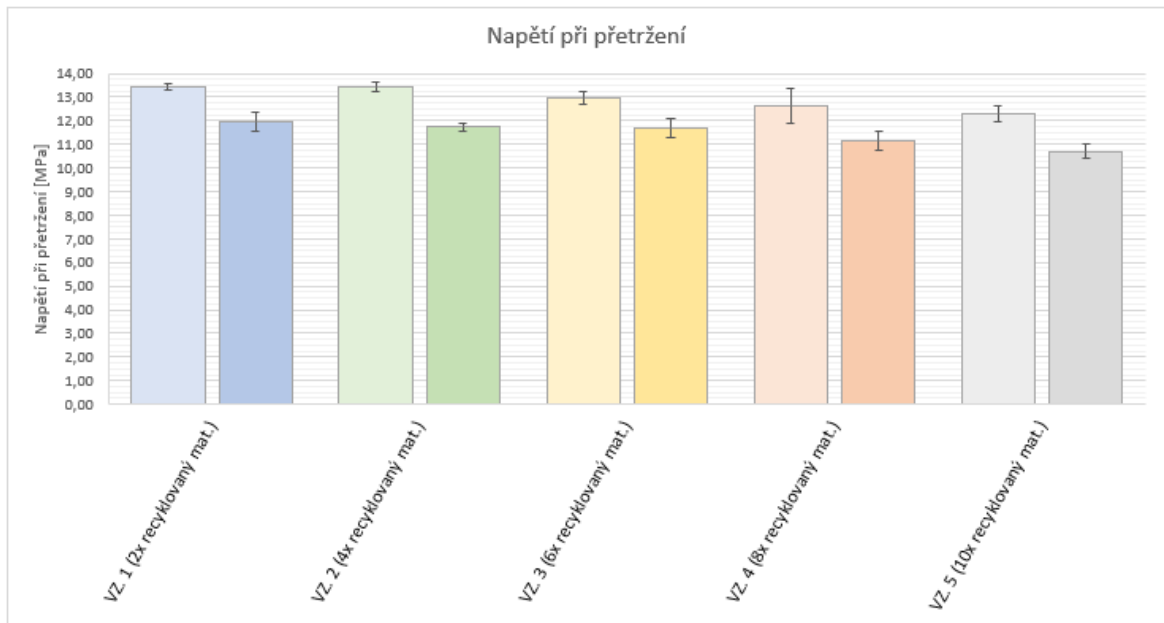
Vzorky pro tahové zkoušky byly připraveny na ramenovém hydraulickém vysekávacím stroji s použitím vysekávacího nože dle ČSN EN ISO 527-3. Z každého připraveného vzorku bylo vyseknuto 6 oboustranných lopatek. Měření probíhalo na

laboratorním trhacím stroji Instron 4301 a veškerá data byla vyhodnocena pomocí příslušného programu. Počáteční vzdálenost čelistí činila 80 mm a rychlost posunu při trhání 500 mm/min. Měření probíhalo do přetržení vzorku. Ze softwaru byla naměřená data zanesena do tabulky a byly z nich stanoveny průměrné hodnoty napětí při přetržení a protažení jak v podélném, tak příčném směru. Průměrné hodnoty jsou uvedené v tabulce níže (Tabulka 6: Průměrné hodnoty napětí a protažení při přetržení). Pro přehlednost byly průměrné hodnoty zanesené také do grafů (Obrázek 29: Grafické znázornění průměrných hodnot protažení při přetržení (světlé hodnoty jsou v podélném směru, tmavé v příčném)). Kompletní data z měření jsou uvedeny v tabulce v příloze (Příloha P III: NAMĚŘENÉ HODNOTY TAŽNOSTÍ A PEVNOSTÍ).

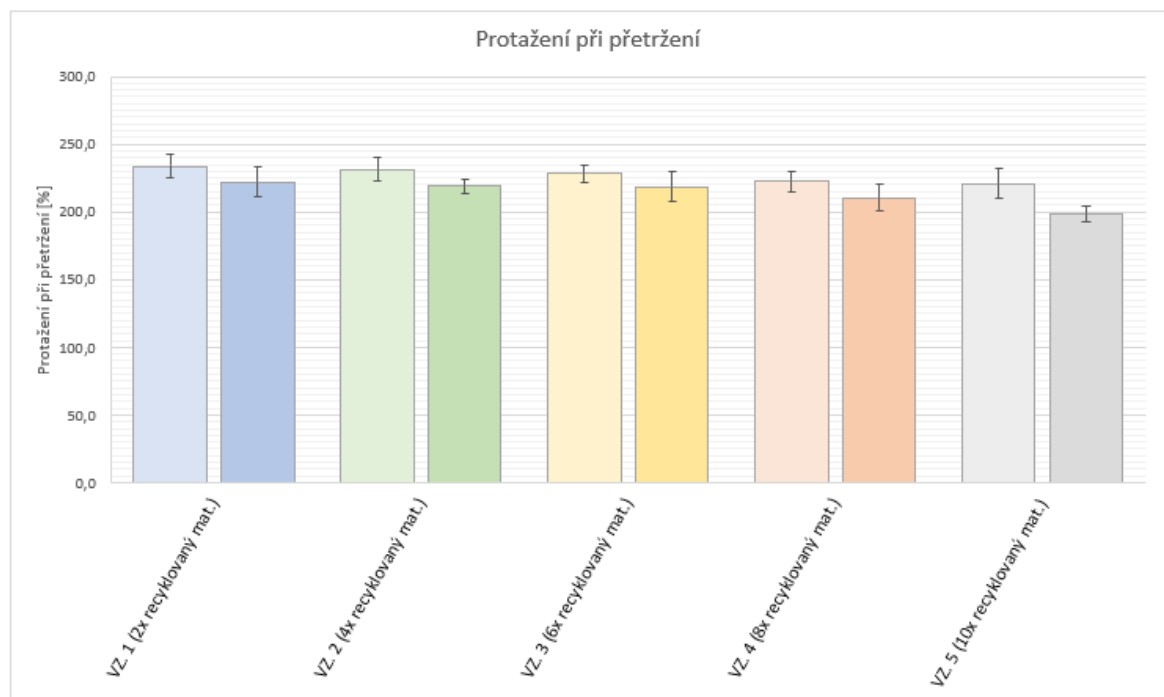
Opakovaná recyklace má dle výsledků vliv na hodnoty napětí při přetržení i na protažení při přetržení. S každou další uzavřenou recyklační smyčkou dochází k mírnému poklesu hodnot. S ohledem na to, že je materiál uvažován pouze do středních nebo spodních vrstev finální vícevrstvé hydroizolační fólie, nemá tento pokles hodnot zásadní vliv na vlastnosti konečného produktu, a lze jej tedy bez problémů do těchto vrstev vícevrstvé fólie využívat. [47]

Tabulka 6: Průměrné hodnoty napětí a protažení při přetržení

	Napětí při přetržení (podél) [MPa]	Směr. odchylka	Protažení při přetržení (podél) [%]	Směr. odchylka
VZ. 1 (2x recyklovaný mat.)	13,42	0,16	233,9	9,2
VZ. 2 (4x recyklovaný mat.)	13,42	0,21	231,5	8,3
VZ. 3 (6x recyklovaný mat.)	12,93	0,27	228,2	6,7
VZ. 4 (8x recyklovaný mat.)	12,64	0,72	222,4	7,5
VZ. 5 (10x recyklovaný mat.)	12,28	0,35	221,1	11,2
	Napětí při přetržení (napříč) [MPa]	Směr. odchylka	Protažení při přetržení (napříč) [%]	Směr. odchylka
VZ. 1 (2x recyklovaný mat.)	11,96	0,40	222,0	11,1
VZ. 2 (4x recyklovaný mat.)	11,73	0,15	219,0	5,3
VZ. 3 (6x recyklovaný mat.)	11,68	0,40	218,6	10,7
VZ. 4 (8x recyklovaný mat.)	11,16	0,39	210,5	10,0
VZ. 5 (10x recyklovaný mat.)	10,71	0,32	198,3	5,9



Obrázek 28: Grafické znázornění průměrných hodnot napětí při přetržení (světlé hodnoty jsou v podélném směru, tmavé v příčném)



Obrázek 29: Grafické znázornění průměrných hodnot protažení při přetržení (světlé hodnoty jsou v podélném směru, tmavé v příčném)

## 9 NASÁKAVOST A EXTRAKCE ZMĚKČOVADEL

### 9.1 Nasákavost

Nasákavost je měřítkem odolnosti polymeru proti vodě jako fyzikálně aktivnímu prostředí. Sorpce vody probíhá do určitého rovnovážného stavu a jedná se o vratný děj. Přijímáním vody se rozměry plastového dílce zvětšují zhruba o objem absorbované vody, ubýváním se rozměry naopak zmenšují. Obsah vody ovlivňuje nejen rozměry, ale také mechanické vlastnosti daného materiálu. Sorpcí vody se snižuje pevnost, modul pružnosti, tvrdost a elektroizolační vlastnosti. Zvyšuje se tažnost a houževnatost. V případě měkčeného PVC může dojít také k vyplavování změkčovadla, pak ovšem dochází k nevratným změnám.

Stanovení nasákavosti probíhalo dle ČSN EN ISO 62 na vzorcích vyseknutých na ramenovém laboratorním vysekávacím stroji s využitím vysekávacího nože o rozměru 50 x 50 mm. Z každého vzorku byly připraveny 3 zkušební tělesa. Všechna zkušební tělesa byla na začátku vysušena v sušárně při teplotě 50 °C po dobu 24 hodin a následně ochlazená při teplotě 23 °C v exikátoru a zvážena. Následně byly jednotlivé vzorky ponořeny do nádoby s destilovanou vodou o teplotě 23 °C po dobu 192 hodin. Po vyjmutí vzorků byla odstraněna, pomocí filtračního papíru, povrchová voda a vzorky byly znovu zváženy. Zvážení probíhalo vždy do 1 minuty od vyjmutí a vysušení. Procento hmotnosti absorbované vody pak bylo stanoveno pomocí rovnice 2.

$$c = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100 \quad (2)$$

Kde:

$m_1$  je hmotnost zkušební tělesa po počátečním vysušení a před ponořením v g

$m_2$  je hmotnost zkušební tělesa po ponoření a osušení filtračním papírem v g

Výsledkem je pak aritmetický průměr 3 měřených těles od každého vzorku. Tyto výsledky jsou uvedeny v tabulce níže (Tabulka 7: Průměrné hodnoty nasákavosti) a jsou znázorněny také graficky (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) Kompletní hodnoty z vážení jednotlivých vzorků jsou součástí přílohy (Příloha P IV: NAMĚŘENÉ HODNOTY NASÁKAVOSTÍ).

Výsledky stanovení nasákavosti opakovaně recyklovaného materiálu vykazují pozvolný nárůst hodnot. Stejně jako v případě tvrdosti a hustoty je tento postupný růst hodnot způsoben zvyšujícím se obsahem polyesterových vláken v materiálu. Nárůst hodnot je velmi malý a jak již bylo zmíněno, fólie vyrobené z tohoto recyklátu budou sloužit jako střední, případně spodní vrstvy finálního produktu, a tudíž změna nasákavosti nebude mít prakticky žádný vliv na konečné vlastnosti. [48][49]

**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Tabulka 7: Průměrné hodnoty nasákavosti

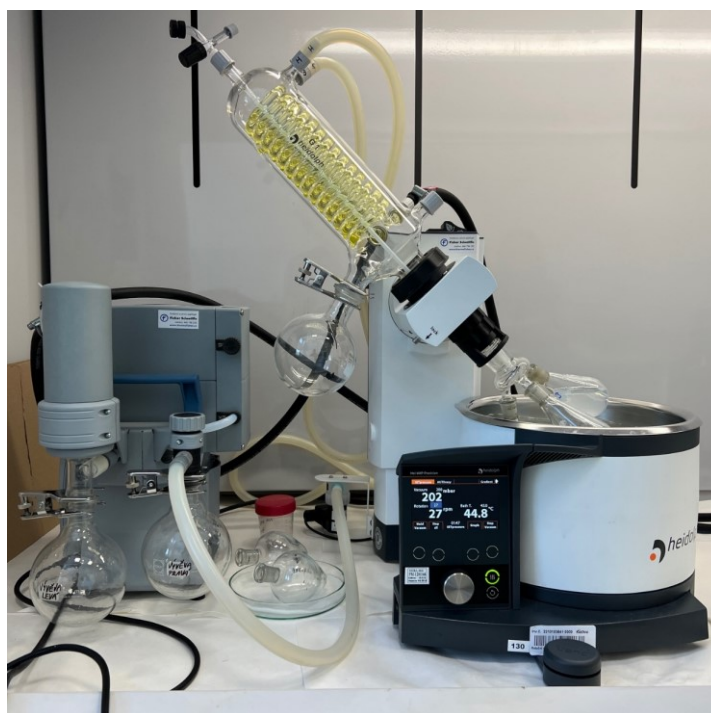
Průměrná hodnota nasákavosti		
Materiál	[%]	směr. odchylka
VZ. 1 (2x recyklovaný mat.)	0,3902	0,0201
VZ. 2 (4x recyklovaný mat.)	0,3928	0,0122
VZ. 3 (6x recyklovaný mat.)	0,3959	0,0010
VZ. 4 (8x recyklovaný mat.)	0,3966	0,0038
VZ. 5 (10x recyklovaný mat.)	0,4001	0,0032

## 9.2 Extrakce změkčovadel

Extrakce změkčovadel je analytická metoda sloužící ke stanovení množství změkčovadla v PVC vzorku, popřípadě ke zjištění typu změkčovadla. Pro přípravu vzorku a následnému stanovení množství změkčovadla v něm využíváme metody odvozené od Soxhletovy extrakce. Extrakce pevných vzorků rozpouštědlem je jednou z nejstarších technik přípravy pevných vzorků a slouží k separaci zájmových sloučenin.

Pro stanovení množství extrahovatelných látek metodou extrakce, dle ČSN EN ISO 6427 byl připraven přibližně 1 g laboratorně připravené fólie od každého vzorku. Jednotlivé vzorky byly naváženy do Erlenmayerovy baňky o objemu 100 ml se zábrusem. V digestoři se spuštěným odsáváním bylo ke každému zváženému vzorku v Erlenmayerově baňce přidáno 10 ml tetrahydrofuranu a magnetické míchadlo a následně byla baňka uzavřena. Takto připravené vzorky byly umístěny na magnetickou míchačku a spuštěno míchání na střední rozsah otáček. Vzorky byly míchány a rozpouštěny po dobu 80 minut do úplného rozpuštění. Po úplném rozpuštění vzorku bylo, v digestoři se spuštěným odvětráváním, přidáno 20 ml metanolu, který zajistí vysrážení polymeru. Po uzavření byly Erlenmayerovy baňky umístěny do ultrazvukové lázně se studenou destilovanou vodou, kde byly uloženy

po dobu 10 minut. V průběhu působení ultrazvuku dochází ke kavitaci, tedy vymývání zbytku extrahovaných látek, jako jsou změkčovadla, z vysráženého polymeru. V digestoři se spuštěným odvětráváním byly vzorky zfiltrány přes filtrační papír MUNKTEIL Grade 388, 84 g/m<sup>2</sup> o průměru 110 mm. Každý filtr s polymerem byl ještě 1x promyt 10 ml metanolu. Jednotlivé filtráty byly jímány do vysušené a předem zvážené srdcovky (baňka s kulatým dnem o objemu 100 ml). Následně byla připravena vývěva, chladič a ohřivací lázeň



Obrázek 30: Vakuová rotační odparka se vzorky

Po dosažení 10 °C v chladiči, byly vzorky nasazeny na vakuovou rotační odparku a byla spuštěna vývěva. Po vytvoření dostatečného podtlaku byla spuštěna rotace odparky a vzorky byly ponořeny do lázně vyhřáté na 45 °C. Doba odpařování rozpouštědla ze vzorku je závislá na řadě podmínek, například podmínek vzniklého podtlaku, teploty vody kolující v chladiči, na atmosférickém tlaku apod. V našem případě byla doba odpařování přibližně 45 minut. Po odpaření veškerého množství rozpouštědla ze srdcovky, vznikl na dně analyt olejového charakteru. Následně byla zastavena odparka, vývěva a z odparky byly opatrně sundány srdcovky s analytem. Srdcovky byly následně uloženy na 24 hodin do exsikátoru s řádně vysušeným silikagelem. Po uplynutí doby v exsikátoru byly vzorky vyjmuty a zváženy na analytických vahách. Množství extrahovaných látek v hmotnostních procentech bylo stanoveno výpočtem dle rovnice 3.

$$c_{zm} = \frac{m_{svz} - m_{\check{s}}}{m_{vz}} * 100 \quad (3)$$

Kde:

$c_{zm}$  je hmotnostní podíl získaného analytu v %

$m_{svz}$  je hmotnost srdcovité baňky s analytem v g

$m_{\check{s}}$  je hmotnost čisté srdcovité baňky v g

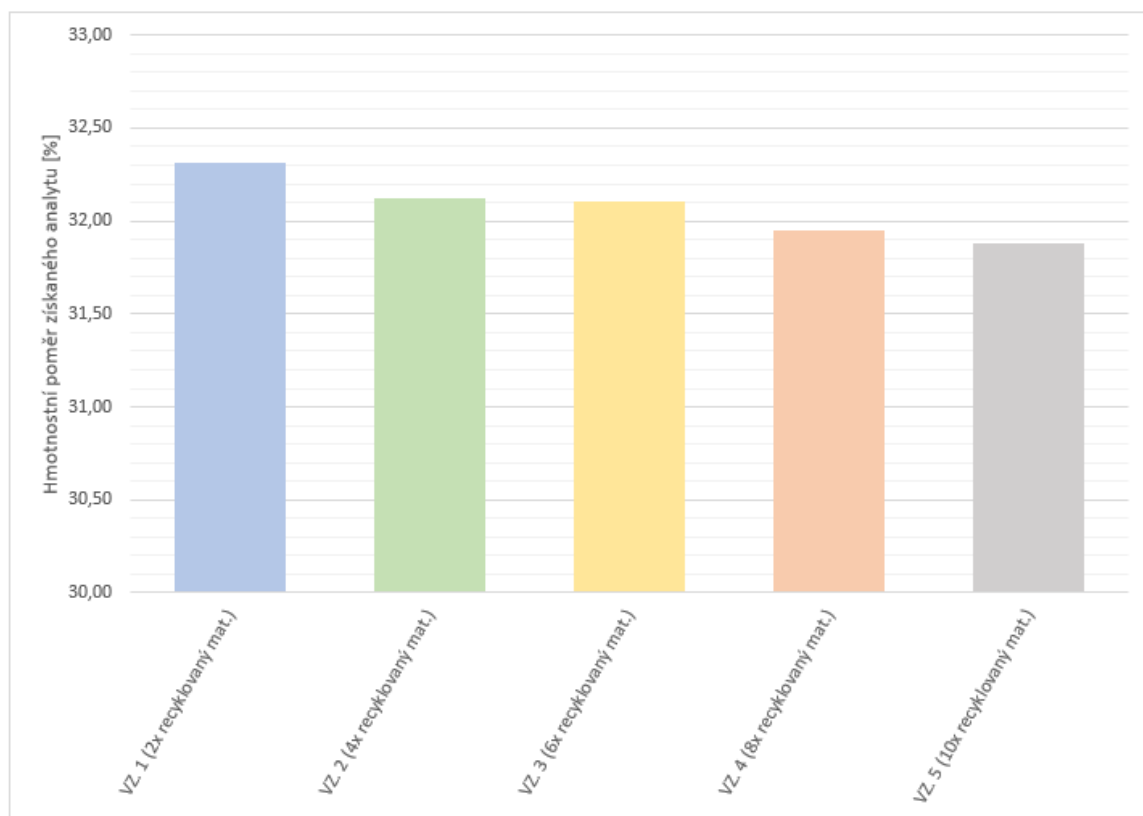
$m_{vz}$  je hmotnost vzorku v g

Naměřené a vypočítané hodnoty množství analytu (změkčovadla) v % jsou uvedeny níže v tabulce (Tabulka 8: Naměřené a vypočítané hodnoty množství změkčovadla ve vzorku) a pro přehlednost také vyneseny v grafu (Obrázek 31: Grafické srovnání množství změkčovadla ve vzorcích).

Porovnání mezi 2x recyklovaným a 10x recyklovaným materiálem vykazuje mírný pokles změkčovadla ve struktuře. Úbytek je způsoben opakovaným mechanickým i tepelným zatížením materiálu a potvrzuje drobný nárůst tvrdosti. Jak již bylo popsáno v kapitole 8.1 Stanovení tvrdosti, zvýšení tvrdosti není natolik velké, aby mělo vliv na výsledné vlastnosti vícevrstvých HIF, proto lze materiál využívat v opakované uzavřené recyklační smyčce. [58][59]

Tabulka 8: Naměřené a vypočítané hodnoty množství změkčovadla ve vzorku

	Hmotnost vzorku	Hmotnost čisté srdcovité baňky	Hmotnost srdcovité baňky s analytem	Hmotnostní podíl získaného analytu
	[g]	[g]	[g]	[%]
VZ. 1 (2x recyklovaný mat.)	1,0956	65,9709	66,3249	<b>32,31</b>
VZ. 2 (4x recyklovaný mat.)	1,0568	86,1856	86,5251	<b>32,13</b>
VZ. 3 (6x recyklovaný mat.)	1,0283	66,7847	67,1148	<b>32,10</b>
VZ. 4 (8x recyklovaný mat.)	1,0720	60,9412	61,2837	<b>31,95</b>
VZ. 5 (10x recyklovaný mat.)	1,0266	68,0131	68,3404	<b>31,88</b>



Obrázek 31: Grafické srovnání množství změkčovadla ve vzorcích



## 10 OHYB ZA NÍZKÝCH TEPLOT

Teplota má přímý vliv na mechanické vlastnosti hydroizolačních PVC fólií. Zvláště pak při opakované recyklaci materiálu, z něhož jsou tyto membrány vyrobeny, může dojít k destrukci molekulové struktury materiálu a k výraznému poklesu změkčovadel. To vede k obecnému poklesu vlastností hydroizolační fólie. V takovém případě je možné pozorovat snížení pružnosti při nízkých teplotách, nižší prodloužení při přetržení a vyšší tuhost. Ověření odolnosti ohybu za nízkých teplot může být tedy jeden z ukazatelů úbytku změkčovadla u opakovaně recyklovaného, měkčeného PVC materiálu.

Pro stanovení odolnosti za nízkých teplot je třeba fólie o větší tloušťce jak 1,0 mm. Zkušební tělesa pro tuto zkoušku byla tedy připravena vylisováním v laboratorním lisu Dr. Collin z laboratorně připravených válcovaných fólií. Ze všech vzorků byla připravena tělesa o celkové tloušťce 1,5 mm v dostatečném množství pro opakovanou zkoušku ohybu za nízkých teplot. Zkouška probíhala za ustálených laboratorních podmínek dle ČSN EN 495-5. Pro každý teplotní interval zkoušky bylo odebráno jedno zkušební těleso o rozměrech 100 x 50 mm. Vzhledem k tomu, že se jednalo o fólie připravené lisováním a všechny vrstvy byly ze stejného materiálu, nebylo potřeba rozlišovat podélný a příčný směr, jako je tomu u vzorků z běžné výroby, a také nebylo potřeba rozlišovat vrchní a spodní stranu fólie. Zkušební tělesa byla podélně ohnuta do smyčky a hrany zajištěny proti rozevření lepicí páskou. Zkouška ohybu za nízkých teplot byla provedena pomocí zkušebního přístroje (viz Obrázek 32: Zkušební přístroj pro testování ohybu za nízkých teplot) uloženého v chladicí komoře nastavené na stálou teplotu. Vzdálenost zkušebních desek byl dle normy trojnásobek celkové tloušťky zkušebního tělesa, v našem případě tedy 4,5 mm.

Vzorky ve tvaru smyčky byly umístěny do zkušebního přístroje tak, že páskou přelepené hrany byly rovnoběžné s osou otáčení. Po jedné hodině temperování byl zkušební přístroj během 1 sekundy uzavřen (otočením ze svislé polohy o 90° do vodorovné polohy) a v této poloze byl ponechán nejméně 1 sekundu. Uzavření probíhalo v chladicí komoře. Zkušební těleso bylo poté vyjmuto a temperováno na pokojovou teplotu (23 °C). Po vytemperování byla tělesa v místě ohybu zkontrolována lupou s šestinásobným zvětšením, zda neobsahují trhliny nebo praskliny. Zkouška byla opakována v teplotních krocích po 5 °C a pro každou teplotu byla použita nová zkušební tělesa. Výsledky zkoušky jsou uvedeny níže v tabulce.

Norma, pro odolnost za nízkých teplot pro střešní hydroizolační fólii, udává v našich zeměpisných šířkách hodnotu  $-25\text{ °C}$ . Při zkouškách ohybu za nízkých teplot vyhověly všechny vzorky této hodnotě a lze je tedy bez problémů uvažovat do středních a spodních vrstev střešních HIF. [50][51]



Obrázek 32: Zkušební přístroj pro testování ohybu za nízkých teplot [51]

Tabulka 9: Výsledky ohybu za nízké teploty

vzorek	teplota	výsledek
<b>VZ. 1 (2x recykl. materiál)</b>	- 40 °C	praskliny
	- 35 °C	praskliny
	- 30 °C	drobné praskliny
	-25 °C	bez prasklin

vzorek	teplota	výsledek
<b>VZ. 2 (4x recykl. materiál)</b>	- 40 °C	praskliny
	- 35 °C	praskliny
	- 30 °C	drobné praskliny
	-25 °C	bez prasklin

vzorek	teplota	výsledek
VZ. 3 (6x recykl. materiál)	- 40 °C	praskliny
	- 35 °C	praskliny
	- 30 °C	drobné praskliny
	-25 °C	bez prasklin

vzorek	teplota	výsledek
VZ. 4 (8x recykl. materiál)	- 40 °C	praskliny
	- 35 °C	praskliny
	- 30 °C	drobné praskliny
	-25 °C	bez prasklin

vzorek	teplota	výsledek
VZ. 5 (10x recykl. materiál)	- 40 °C	praskliny
	- 35 °C	praskliny
	- 30 °C	drobné praskliny
	-25 °C	bez prasklin



Obrázek 33: Příklady poškození při zkoušce ohybu za nízkých teplot

## 11 INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE S FOURIEROVOU TRANSFORMACÍ (FTIR)

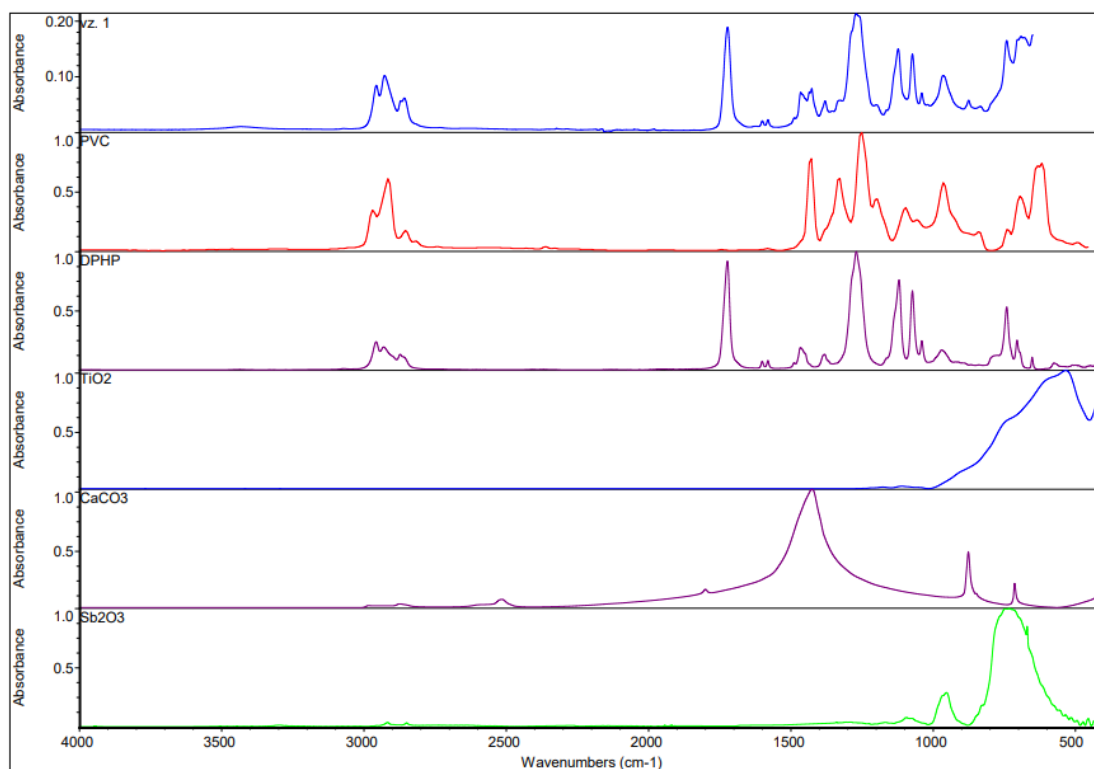
Použití infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR) je považováno za jednu z nejúčinnějších technik pro studium a pochopení chemického složení materiálů, případně produktů. Jedná se o analytickou techniku určenou především pro identifikaci a strukturní charakterizaci organických sloučenin a také pro stanovení anorganických látek. Technika FTIR měří pohlcení infračerveného záření o různých vlnových délkách v rozsahu délek 0,78 – 1000  $\mu\text{m}$ , což odpovídá rozsahu vlnočtů 12800–10  $\text{cm}^{-1}$ . Celá oblast bývá rozdělena na blízkou, střední a vzdálenou infračervenou oblast, přičemž nejpoužívanější je oblast střední. Principem metody je absorpce IR záření při průchodu vzorkem, což lze vysvětlit jako spotřebování energie na rozpořádání atomů v molekule. Výstupem je infračervené spektrum, které je grafickým zobrazením funkční závislosti energie, většinou vyjádřené v procentech transmitance (T), nebo jednotkách absorbance (A) na vlnočtu dopadajícího záření. FTIR spektrometry vykazují celou řadu výhod. Pro rychlou a účinnou analýzu vzorků lze využít metodu ATR-FTIR. Jedná se o metodiku zeslabené totální reflexe (ATR – Attenuated Total Reflectance), která umožňuje přímé zkoumání pevných nebo kapalných vzorků bez další přípravy a dráha měření není závislá na tloušťce vzorku. ATR – FTIR spektroskopie se používá pro úkoly, jako je identifikace chemických sloučenin, studium molekulárních struktur, zkoumání povrchových vlastností, analýza polymerů a další.



Obrázek 34: FTIR spektrometr [55]

## 11.1 FTIR analýza vzorků

Zkušební tělesa pro FTIR byla vyseknuta na hydraulickém vysekávacím stroji za použití vysekávacího nože o rozměrech 50 x 50 mm z laboratorně vyválcovaných fólií o tloušťce přibližně 0,4 mm. Jednotlivá zkušební tělesa byla podrobena analýze a pomocí příslušného softwaru vyhodnoceny a pozorovány změny. Změny detekující určitou míru degradace by byly zřetelné v pásu 1600–1670  $\text{cm}^{-1}$ , kde je možné detekovat případný vznik C=C vazeb a v pásu 1570-1610  $\text{cm}^{-1}$ , kde je možné detekovat případné změny v koncentraci změkčovadel. Na níže uvedeném obrázku (Obrázek 35: FTIR analýza složení vzorku č. 1) byla provedena materiálová analýza pomocí metody ATR-FTIR s určením hlavních složek vzorku pomocí knihovny spekter.



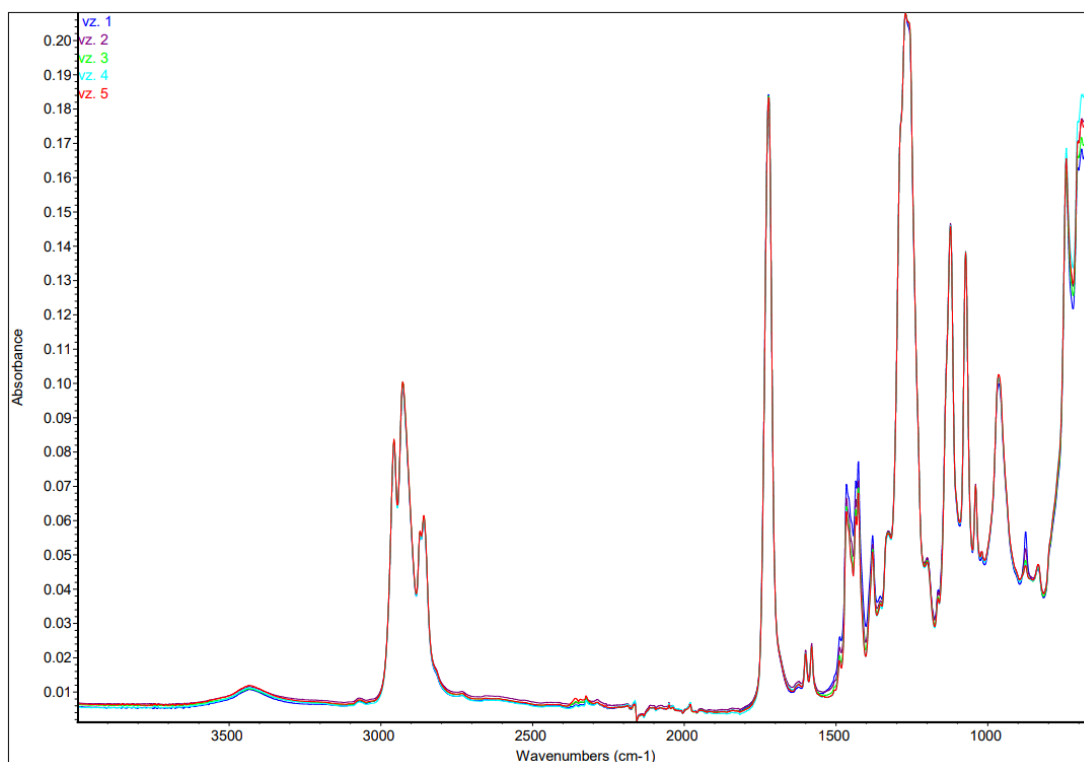
Obrázek 35: FTIR analýza složení vzorku č. 1

Na dalším snímku z FTIR analýzy (Obrázek 36: Porovnání FTIR analýzy jednotlivých vzorků) je porovnání jednotlivých vzorků mezi sebou, se zaměřením na charakteristické absorpční pásy pro dané funkční skupiny. Ze snímku je patrné, že mezi jednotlivými vzorky nedochází s opakovanou recyklací k žádným zásadním změnám ve struktuře materiálu. Jednotlivé vzorky jsou pro větší přehlednost barevně rozlišené, vzorek č.1 (2x recyklovaný materiál) značen modře, vzorek č. 2 (4x recyklovaný materiál) značen

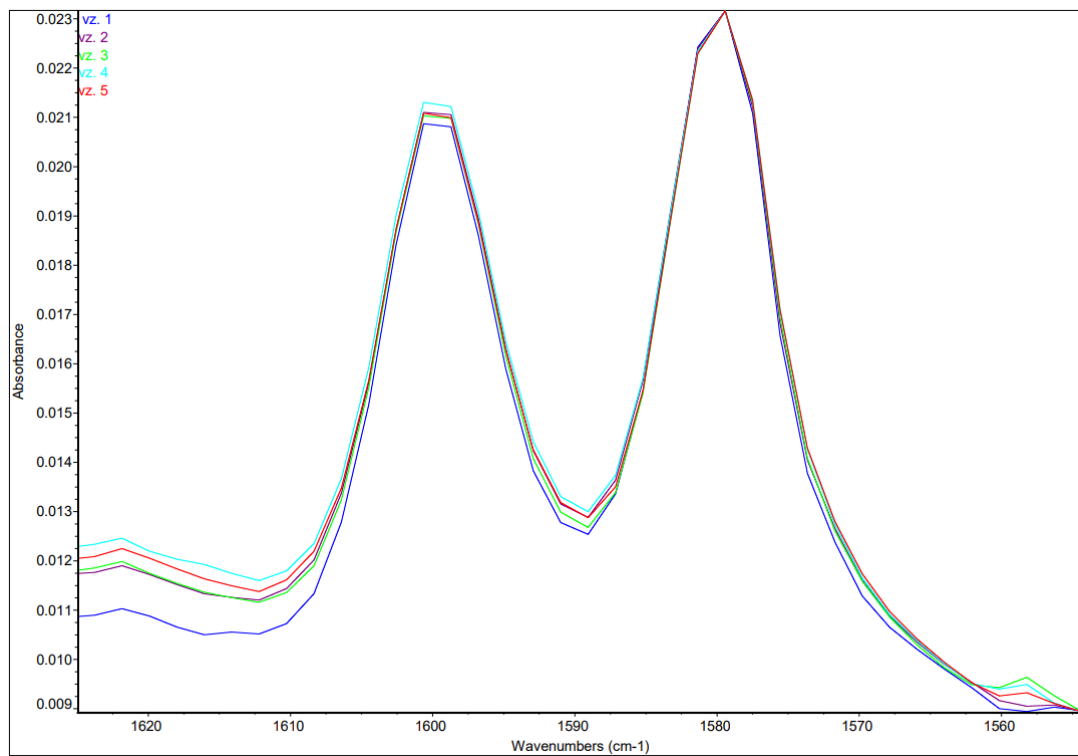
fialově, vzorek č. 3 (6x recyklovaný materiál) zeleně, vzorek č. 4 (8x recyklovaný materiál) tyrkysově a vzorek č. 5 (10x recyklovaný materiál) označen červeně.

Následující snímek (Obrázek 37: Detail FTIR v typické oblasti absorpce pro ftalátová změkčovadla) pak zobrazuje detail absorpčního pásu náležícímu ftalátovým změkčovadlům. Detailní snímek pásu náležícímu ftalátovým změkčovadlům prokázal jen drobné změny v obsahu změkčovadla ve struktuře vzorku a potvrdil tedy výsledky z měření obsahu změkčovadla.

Výsledky FTIR analýzy potvrdily minimální vliv opakované recyklace na strukturu materiálu u připravených vzorků. Neprokáaly se ani žádné známky degradace a lze tedy uvažovat o využití materiálu do středních vrstev HIF. [52][53][54][55][56][57]



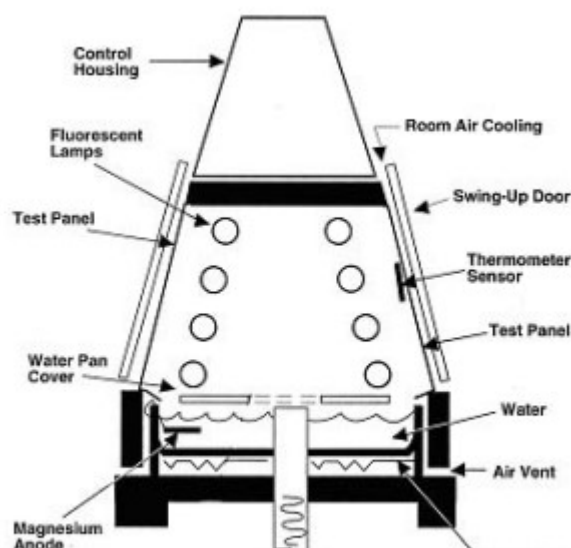
Obrázek 36: Porovnání FTIR analýzy jednotlivých vzorků



Obrázek 37: Detail FTIR v typické oblasti absorpce pro ftalátová změkčovadla

## 12 ZRYCHLENÉ STÁRNUTÍ

Zkouška zrychleného stárnutí slouží k předpovídání relativní odolnosti materiálů vystavených venkovnímu prostředí. Pro stanovení se využívá přístroj QUV sloužící k laboratorní simulaci škodlivého působení povětrnostních podmínek. Déšť a rosa se simulují pomocí kondenzačního systému nebo vodním rozprašovacím systémem. Škodlivé působení slunečního svitu se simuluje fluorescenčními UV lampami. V QUV přístroji se automaticky řídí ozařovací teplota a také denní posloupnost UV period a vlhkých period. Během několika dnů nebo týdnu může v QUV dojít k poškození vzorku, které by se za vnějších povětrnostních podmínek projevilo za několik měsíců nebo let. Mezi pozorovaná poškození patří blednutí barvy, vznik skvrn, vznik trhlin, závojeování (nátěru), tvoření puchýřků, ztráta pevnosti a křehnutí.



Obrázek 38: Zjednodušený průřez přístrojem QUV [60]

Popis průřezu přístroje QUV: Control Housing – regulovaná skříň; Fluorescent Lamps – fluorescenční lampy; Test Panel – testovací panel; Water Pan Cover – kryt vodní pánve; Magnesium Anode – Hořčíková anoda; Room Air Cooling – chlazení vzduchem místnosti; Swing-up Door – odklápací dveře; Water – voda; Air Vent – vzduchový otvor

K reprodukování škodlivého vlivu slunečního svitu se v QUV používají fluorescenční UV lampy. Lampy se liší celkovým množstvím emitované energie a vlnovými délkami spektra. Rozdíly ve vydávané energii a vlnových délkách spektra mohou způsobit významné rozdíly ve výsledcích testů. Zkoušky zrychleného stárnutí plastových výrobků probíhají především za použití lamp UVA a UVB.



**Lampy UVA** jsou velice užitečné při porovnání různých typů polymerů, protože tyto lampy nemají žádný UV výstup pod normální mezní vlnovou délkou slunečního světla 295 nm. Materiály většinou degradují pomaleji než UVB lampy, ale obvykle mají lepší korelaci se skutečnými vnějšími povětrnostními podmínkami.

**Lampy UVB** emitují zvláštní UV o krátké vlnové délce pod mezní sluneční vlnovou délkou 295 nm, a proto degradují materiály rychleji než UVA. Díky tomu jsou tyto lampy oblíbenější pro rychlé testy a pro testování velmi odolných materiálů. Protože však emitují nepřírozeň krátké vlnové délky, mohou v porovnání s reálnými vnějšími povětrnostními podmínkami přinést anomální výsledky.

Pro stanovení zrychleného stárnutí byly vyseknuty vždy dvě zkušební tělesa o velikosti 160 x 75 mm z fólie o tloušťce přibližně 0,40 mm připravené z každého vzorku. Takto připravená zkušební tělesa byla podrobena zrychlenému stárnutí ve dvou QUV přístrojích, a to QUV testeru SPRAY osazeným UVA lampami a QUV testeru BASIC osazeným UVB lampami. V obou případech byla zkouška provedena dle ČSN EN ISO 4892-3. U všech vzorků byla provedena porovnávací zkouška objektivního měření barevnosti dle ČSN 01 1718/ ČSN EN 20 105 – AO 2 na laboratorním přístroji UltraScan PRO (Hunter Lab) a vizuální kontrola vzniku trhlin, skvrn, puchýřků či jiných defektů značících degradaci materiálu. Výsledky barevné odchylky  $\Delta E^*$  a šedé stupnice jsou uvedeny v tabulce níže (Tabulka 10: Hodnoty barevné odchylky  $\Delta E^*$  a odchylky šedé stupnice). Pro větší přehlednost byly tyto hodnoty z jednotlivých UV testů zaneseny do grafu (Obrázek 39: Graf povětrnostní odolnosti QUV test, UVA lampy a Obrázek 40: Graf povětrnostní odolnosti QUV test, UVB lampy). Kompletní výsledky měření jsou součástí přílohy (Příloha P V: NAMĚŘENÉ HODNOTY QUV-A TESTU a Příloha P VI: NAMĚŘENÉ HODNOTY QUV-B TESTU).

Na QUV testeru bylo provedené testování UV stability s využitím UVA i UVB lamp. V obou případech byla průběžně, v daných časových intervalech, měřena barevná odchylka  $\Delta E^*$  oproti měření v čase 0. Po celou dobu měření vykazovaly všechny vzorky dobrou odolnost vůči povětrnostním vlivům. Barevná odchylka, zvláště pak při použití UVA lamp, které simulují reálné povětrnostní podmínky, je zanedbatelná. U žádného ze vzorků nebylo pozorováno křehnutí nebo jakékoliv povrchové defekty. Výsledky QUV potvrzují veškeré výše uvedené měření a nedetekuje žádné významné změny v materiálu ani po 10x opakované recyklaci. [60][61][62][63]

Tabulka 10: Hodnoty barevné odchylky DeltaE\* a odchylky šedé stupnice

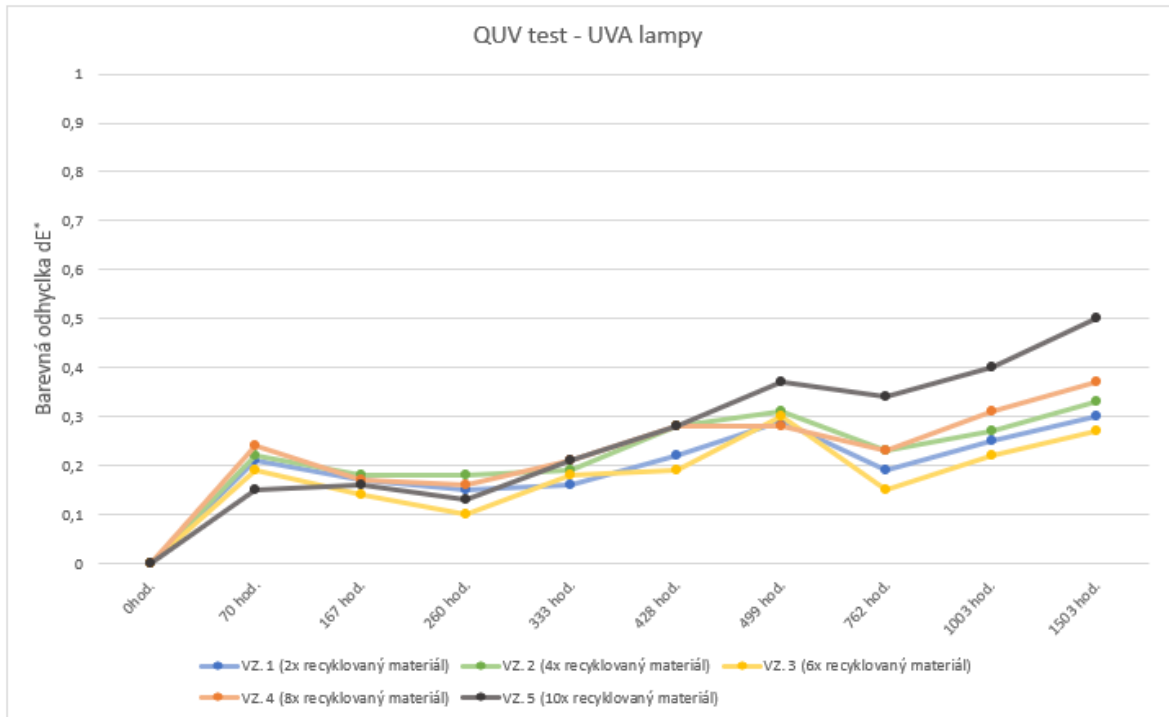
	<b>VZ. 1 (2x recyklovaný materiál)</b>			
	DeltaE*	šedá stup.	DeltaE*	šedá stup.
	UVA lampy		UVB lampy	
0hod.	0	0	0	0
70 hod.	0,21	5	0,19	5
167 hod.	0,17	5	0,29	5
260 hod.	0,15	5	0,46	4,5
333 hod.	0,16	5	0,73	4,5
428 hod.	0,22	5	0,78	4,5
499 hod.	0,29	5	0,97	4,5
762 hod.	0,19	5	1,33	4
1003 hod.	0,25	5	1,67	4
1503 hod.	0,3	5	1,45	4

	<b>VZ. 2 (4x recyklovaný materiál)</b>			
	DeltaE*	šedá stup.	DeltaE*	šedá stup.
	UVA lampy		UVB lampy	
0	0	0	0	0
0,22	5	0,24	5	
0,18	5	0,27	5	
0,18	5	0,43	4,5	
0,19	5	0,44	4,5	
0,28	5	0,61	4,5	
0,31	5	0,74	4,5	
0,23	5	1,03	4,5	
0,27	5	1,49	4	
0,33	5	1,53	4	

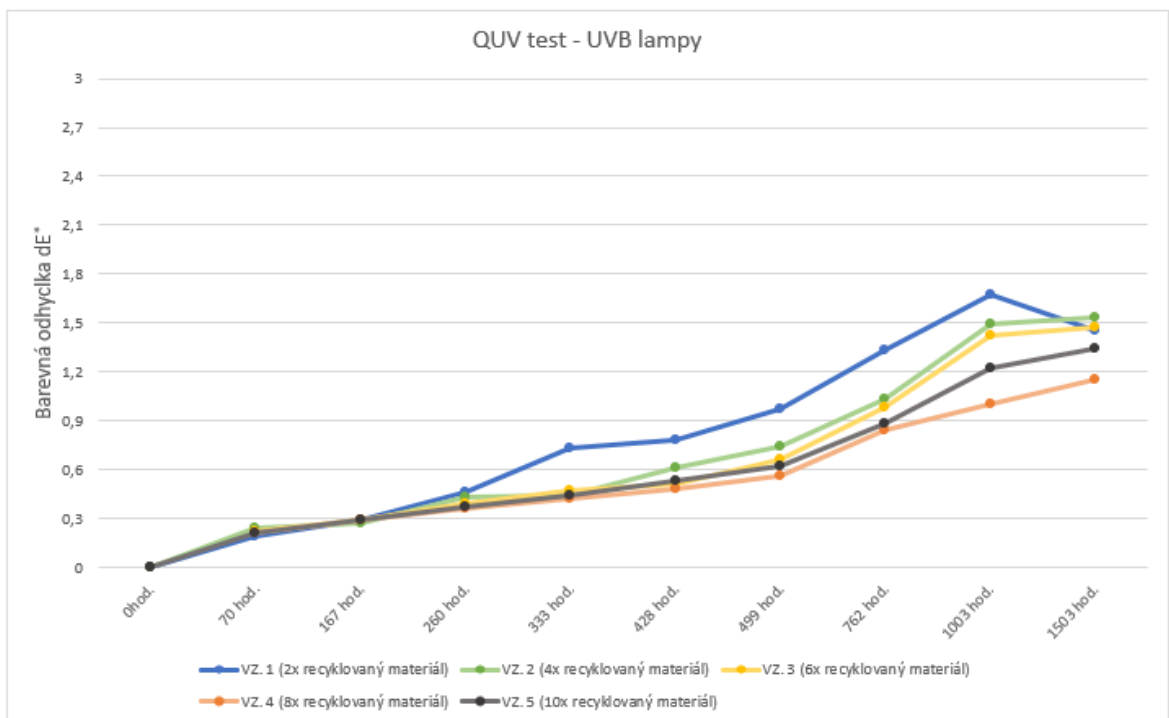
	<b>VZ. 3 (6x recyklovaný materiál)</b>			
	DeltaE*	šedá stup.	DeltaE*	šedá stup.
	UVA lampy		UVB lampy	
0hod.	0	0		0
70 hod.	0,19	5	0,22	5
167 hod.	0,14	5	0,29	5
260 hod.	0,1	5	0,39	5
333 hod.	0,18	5	0,47	4,5
428 hod.	0,19	5	0,51	4,5
499 hod.	0,3	5	0,66	4,5
762 hod.	0,15	5	0,98	4,5
1003 hod.	0,22	5	1,42	4,5
1503 hod.	0,27	5	1,47	4,5

	<b>VZ. 4 (8x recyklovaný materiál)</b>			
	DeltaE*	šedá stup.	DeltaE*	šedá stup.
	UVA lampy		UVB lampy	
0	0		0	
0,24	5	0,21	5	
0,17	5	0,29	5	
0,16	5	0,36	4,5	
0,21	5	0,42	4,5	
0,28	5	0,48	4,5	
0,28	5	0,56	4,5	
0,23	5	0,84	4,5	
0,31	5	1	4	
0,37	5	1,15	4	

	<b>VZ. 5 (10x recyklovaný materiál)</b>			
	DeltaE*	šedá stup.	DeltaE*	šedá stup.
	UVA lampy		UVB lampy	
0hod.	0	0	0	0
70 hod.	0,15	5	0,21	5
167 hod.	0,16	5	0,29	5
260 hod.	0,13	5	0,37	5
333 hod.	0,21	5	0,44	4,5
428 hod.	0,28	5	0,53	4,5
499 hod.	0,37	5	0,62	4,5
762 hod.	0,34	5	0,88	4,5
1003 hod.	0,4	4,5	1,22	4,5
1503 hod.	0,5	4,5	1,34	4



Obrázek 39: Graf povětrnostní odolnosti QUV test, UVA lampy



Obrázek 40: Graf povětrnostní odolnosti QUV test, UVB lampy

## ZÁVĚR

Diplomová práce byla zpracována do dvou hlavních částí, teoretické a praktické. V teoretické části byly formou rešerše představeny obecné možnosti recyklace, především té mechanické a vícenásobné. Další samostatnou kapitolou teoretické části je obecný popis vícevrstvých hydroizolačních PVC fólií, jejich konstrukce a výroba, ať už procesem válcování a následné laminace, nebo technologií extruze. Při výrobě těchto hydroizolačních fólií vzniká vratný materiál, který je následně třeba zpracovat, zrecyklovat.

Na úvodní obecnou část navazuje kapitola popisující zdroje a zpracování cupaniny, což je směs polyesterových vláken a PVC matrice vznikající při mechanické recyklaci hydroizolačních PVC fólií vyztužených PES mřížkou. V případě uplatnění mechanické recyklace je třeba tento materiál nejprve dobře vytrít a poznačit. Vratný materiál z hydroizolačních fólií vstupující do mechanické recyklace má ve většině případů formu plošných velkoformátových útvarů, a proto je třeba nejprve zmenšit velikost částic. To lze provést pomocí hydraulické gilotiny a následně předdrcením pomocí série nožových mlýnů. Již při drcení dochází k částečnému uvolnění PES vláken ze struktury HIF. Směs PVC drti a PES vláken je tedy odváděna pomocí vzduchotechniky do cik-cak separátoru, kde dochází k oddělení lehkých PES vláken a těžké PVC drti. Drť dále putuje pseudopravou do talířového mlýna, kde dochází k otevření struktury HIF a vytržení PES vláken. Směs PVC a vláken je dále filtrována pomocí cik-cak separátorů a sérií vibračních sít. Na konci recyklačního cyklu vzniká poměrně čistá PVC drť s obsahem PES vláken do 1 hm.%, která je plně uplatnitelná do středních a spodních vrstev produktu z něhož pochází a PES cupanina obsahující přibližně 30 hm.% polyesterových vláken a 70 hm.% PVC drti. PES cupanina není ve formě, v jaké vznikne zpracovatelná, respektive dávkovatelná, na výrobním zařízení a je tedy nutné ji zpracovat do podoby granulátu. Zpracování cupaniny probíhá na korozačním kónickém dvoušneku s podvodní granulací. Na této extruzní lince dojde k efektivnímu zapracování PES vláken do PVC matrice a také k výraznému zkrácení délky polyesterových vláken. Hotový granulát je pak možné dávkovat a v určitém hmotnostním poměru i dobře zpracovat na výrobních zařízeních jako jsou válcovací nebo extruzní linky.

V závěru teoretické části diplomové práce byly popsány možné způsoby využití granulátu z cupaniny, kde se nabízí především možnost uplatnění tohoto materiálu do středních a spodních vrstev HIF. V praxi se takto uzavřená recyklační smyčka zavádí, a proto je nutné se zabývat vlivy opakované recyklace na výsledné vlastnosti produktu, což je podrobněji zpracováno v části praktické.

Praktická část diplomové práce byla zaměřena na ověření vlastností středních vrstev hydroizolačních fólií obsahující opakovaně recyklovanou cupaninu, recyklačním procesem, který byl popsán v teoretické části. Nejprve byly připraveny vzorky složené ze 45 % čisté směsi, 50 % drtě K1 se simulovanou opakovanou recyklací a obdobně připraveným granulátem z cupaniny přidávaný v 5 %. Jednotlivé vzorky byly připraveny tak, aby simulovaly 2x, 4x, 6x, 8x a 10x recyklovaný materiál. Pro každou zkoušku byla připravena zkušební tělesa dle patřičné normy. V rámci stanovení fyzikálně mechanických vlastností byla vyhodnocena tvrdost jednotlivých vzorků, kde je s opakovanou recyklací patrný mírný nárůst tvrdostí ze 79,2 ShA (u 2x recyklovaného materiálu) na 81,3 ShA (u 10x recyklovaného materiálu). Nárůst tvrdostí je způsoben nejen mírným úbytkem změkčovadla, ale také mírným zahuštěním PES vláken. Obdobně jako u tvrdosti došlo k mírnému nárůstu v hodnotách hustoty jednotlivých vzorků a to z 1,2582 g/cm<sup>3</sup> (u 2x recyklovaného materiálu) na 1,2649 g/cm<sup>3</sup> (u 10x recyklovaného materiálu). Klíčovým parametrem určujícím vlastnosti PVC hydroizolačních fólií je pevnost v tahu a protažení. Mezi 2x recyklovaným materiálem a 10x recyklovaným materiálem dochází k mírnému poklesu hodnot jak napětí při protažení, tak protažení při přetržení, a to ze 13,42 MPa na 12,28 MPa, respektive z 233,9 % na 221,1 % v podélném směru a z 11,96 MPa na 10,71 MPa, respektive 222,0 % na 198,3 % ve směru příčném.

Další sérií prováděných zkoušek byla zkouška nasákavosti a extrakce změkčovadel. V případě nasákavosti dochází vlivem opakované recyklace k velmi mírnému nárůstu nasákavosti způsobenému pravděpodobně nárůstem množství PES vláken v materiálu. Zkouška extrakce změkčovadel pak prokázala drobný úbytek změkčovadel, způsobený vlivem opakovaného tepelného a mechanického namáhání, který byl již patrný z hodnot tvrdostí jednotlivých vzorků. Nedílnou součástí hodnocení HIF je také odolnost ohybu za nízkých teplot, která však neprokázala žádné změny v materiálu a pro všechny připravené vzorky byla vyhovující hodnota – 25 °C.

Vzorky byly dále podrobeny infračervené spektroskopii s Fourierovou transformací. Změny detekující určitou míru degradace by byly zřetelné v pásu 1600–1670 cm<sup>-1</sup>, kde je možné detekovat případný vznik C=C vazeb a v pásu 1570-1610 cm<sup>-1</sup>, kde je možné detekovat případné změny v koncentraci změkčovadel. V případě analýzy připravených vzorků nebyly detekovány žádné výrazné změny ve výše uvedených pásích.

Poslední, neméně důležitou, zkouškou detekující míru degradace materiálu při opakované recyklaci je zkouška zrychleného stárnutí. Jednotlivé vzorky byly vystaveny

UVA i UVB záření v QUV zařízení s vodním rozprašovačem. Po 1 503 hodinách v QUV přístroji byly podrobeny analýze stálosti barvy a kontroly povrchu na defekty. Po celou dobu měření vykazovaly všechny vzorky velmi dobrou odolnost vůči povětrnostním vlivům. Barevná odchylka v případě QUV testu s UVA lampami je i po 1503 hodinách zanedbatelná a nedochází ani k viditelným známkám degradace v podobě trhlin, či křehnutí. V případě UVB lamp je barevná odchylka mírně vyšší, nejedná se však ani v tomto případě o dramatickou změnu a povrch není viditelně poškozený, ani nevykazuje známky křehnutí.

Výše uvedené výsledky vzorků detekují určité změny v materiálu. Jedná se však o velmi malé změny a prakticky nevýznamný pokles fyzikálně mechanických vlastností. Z výsledků tedy vyplývá, že materiál je možné opakovaně recyklovat a výsledný recyklát lze také v 5 hm.% uplatňovat ve středních vrstvách HIF, ze kterých pochází.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] TADMOR, Zehev a Costas G. GOGOS. *Principles of polymer processing*. 2nd ed., Rev. ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2006. ISBN 978-0-471-38770-1.
- [2] GHOSH, Sadhan Kumar, ed. *Circular Economy: Global Perspective* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2020 [cit. 2023-09-04]. ISBN 978-981-15-1051-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-15-1052-6
- [3] SHAMSUYEVA, Madina a Hans-Josef ENDRES. *Plastics in the context of the circular economy and sustainable plastics recycling: Comprehensive review on research development, standardization and market*. *Composites Part C: Open Access* [online]. 2021, 6 [cit. 2023-09-04]. ISSN 26666820. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcomc.2021.100168
- [4] LU, Lihui; LI, Weiming; CHENG, Ying a LIU, Meng. *Chemical recycling technologies for PVC waste and PVC-containing plastic waste: A review*. Online. *Waste Management*. 2023, roč. 166, s. 245-258. ISSN 0956053X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.012>. [cit. 2023-09-19].
- [5] *Cirkulární ekonomika*. Online. In: 2019. Dostupné z: [https://incien.org/wp-content/uploads/2021/06/Odpad-zdrojem\\_publicace.pdf](https://incien.org/wp-content/uploads/2021/06/Odpad-zdrojem_publicace.pdf). [cit. 2023-09-19].
- [6] HUYSMAN, Sofie, Sam DEBAVEYE, Thomas SCHAUBROECK, Steven De MEESTER, Fulvio ARDENTE, Fabrice MATHIEUX a Jo DEWULF. *The recyclability benefit rate of closed-loop and open-loop systems: A case study on plastic recycling in Flanders*. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2015, 101, 53-60 [cit. 2023-09-04]. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2015.05.014
- [7] VALERIO, Oscar, Rajendran MUTHURAJ a Amandine CODOU. *Strategies for polymer to polymer recycling from waste: Current trends and opportunities for improving the circular economy of polymers in South America*. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* [online]. 2020, 25 [cit. 2023-09-04]. ISSN 24522236. Dostupné z: doi:10.1016/j.cogsc.2020.100381

- [8] SINGH, Narinder, David HUI, Rupinder SINGH, I.P.S. AHUJA, Luciano FEO a Fernando FRATERNALI. Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2017, 115, 409-422 [cit. 2023-09-04]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2016.09.013
- [9] SINGH, Rupinder; SINGH, Narinder; FABBROCINO, Francesco; FRATERNALI, Fernando a AHUJA, I.P.S. Waste management by recycling of polymers with reinforcement of metal powder. Online. *Composites Part B: Engineering*. 2016, roč. 105, s. 23-29. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.08.029>. [cit. 2023-09-18].
- [10] FARAJ, Rabar H.; HAMA ALI, Hunar F.; SHERWANI, Aryan Far H.; HASSAN, Bedar R. a KARIM, Hogr. Use of recycled plastic in self-compacting concrete: A comprehensive review on fresh and mechanical properties. Online. *Journal of Building Engineering*. 2020, roč. 30. ISSN 23527102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101283>. [cit. 2023-09-18].
- [11] DA COSTA, Helson M.; RAMOS, Valéria D. a DE OLIVEIRA, Márcia G. Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: Thermal analysis, mechanical properties and analysis of variance. Online. *Polymer Testing*. 2007, roč. 26, č. 5, s. 676-684. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.04.003>. [cit. 2023-09-18].
- [12] MCDONOUGH, William a BRAUNGARD, Michael. *Cradle to Cradle*. New York: North Point Press, 2002. ISBN 0-86547-587-3.
- [13] GARRIDO, M.; ANTÓNIO, D.; LOPES, J.G. a CORREIA, J.R. Reparability of aged PVC waterproofing membranes: Effect of joining method. Online. *Journal of Building Engineering*. 2021, roč. 33. ISSN 23527102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101569>. [cit. 2023-09-19].
- [14] IVANIČ, Andrej a LUBEJ, Samo. Durability and Degradation of PVC-P Roofing Membrane—Example of Dynamic Fatigue Testing. Online. *Polymers*. 2022, roč. 14, č. 7. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14071312>. [cit. 2023-10-04].



- [15] *Hydroizolační fólie a doplňky: Katalog*. Online. In: Wwww.fatrafol.cz. 2022. Dostupné z: [https://www.fatrafol.cz/wp-content/uploads/2022/11/katalog\\_hif\\_2022.pdf](https://www.fatrafol.cz/wp-content/uploads/2022/11/katalog_hif_2022.pdf). [cit. 2023-11-02].
- [16] *Interní dokument: Technologický reglement válcovací linky*. Napajedla, 2022.
- [17] MAŇAS, Miroslav; STANĚK, Michal a MAŇAS, David. *Výrobní stroje a zařízení*. I., Stroje gumárenské a plastikářské I. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. ISBN 978-80-7318-596-1. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:8a8b6c80-c0ca-11e8-bc37-005056827e51>.
- [18] *PE, TPO, S-PVC GEOMEMBRANE, WATER PROOFING SHEET EXTRUSION LINE*. Online. In: RRPPLAST. 2023. Dostupné z: <https://rrplast.com/pe-tpo-s-pvc-geomembrane-water-proofing-sheet-extrusion-line/>. [cit. 2023-11-09].
- [19] *OLBRICH - Technical centres*. Online. In: OLBRICH, GMBH. Olbrich. 2023. Dostupné z: [https://www.olbrich.com/fileadmin/Downloads/Englisch\\_Broschueren/OLBRICH\\_PolytypeConverting\\_TECHNICAL-CENTERS.pdf](https://www.olbrich.com/fileadmin/Downloads/Englisch_Broschueren/OLBRICH_PolytypeConverting_TECHNICAL-CENTERS.pdf). [cit. 2024-01-15].
- [20] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [21] RECYCLATION OF PLASTIC WASTES FROM PRODUCTION OF PVC ROOFING SHEETS. In: Wwww.mnet.mendelu.cz [online]. Napajedla, 2009 [cit. 2023-09-04]. Dostupné z: [https://mnet.mendelu.cz/mendelnet09agro/files/articles/tech\\_spacek.pdf](https://mnet.mendelu.cz/mendelnet09agro/files/articles/tech_spacek.pdf)
- [22] HOSOKAWA ALPINE GROUP. *ROTOPLEX RO*. Online. ROTOPLEX RO. 2023. Dostupné z: <https://www.hosokawa-alpine.com/powder-particle-processing/machines/granulators-shredders/rotoplex-ro/>. [cit. 2024-01-15].
- [23] HOSOKAWA ALPINE GROUP. *MZM and MZF zigzag classifiers*. Online. MZM and MZF zigzag classifiers. 2023. Dostupné z: <https://www.hosokawa.co.uk/products/mzm-and-mzf-zigzag-classifiers/>. [cit. 2024-01-15].

- [24] HAGEMEIERS, Thomas; GLÖCKNER, Hannes; ROLOFF, Christoph; THÉVENIN, Dominique a TOMAS, Jürgen. Simulation of Multi-Stage Particle Classification in a Zigzag Apparatus. Online. *Chemical Engineering & Technology*. 2014, roč. 37, č. 5, s. 879-887. ISSN 0930-7516. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ceat.201300670>. [cit. 2024-01-15].
- [25] *Air separator (pneumatic separator) ERGA ZZFlow*. Online. In: Air separator (pneumatic separator) ERGA ZZFlow. 2023. Dostupné z: <https://ergaglobal.com/catalog/gravity-separators/zig-zag-air-separator/>. [cit. 2024-01-15].
- [26] MAS MASCHINEN- UND ANLAGENBAU SCHULZ GMBH. *MAS TWIN-SCREW EXTRUDER*. Online. MAS - upcycling to the next level. 2024. Dostupné z: <https://mas-austria.com/en/mas-twin-screw-extruder/>. [cit. 2024-01-16].
- [27] MARKARIAN, Jennifer. Pelletizing: choosing an appropriate method. Online. *Plastics, Additives and Compounding*. 2004, roč. 6, č. 4, s. 22-26. ISSN 1464-391X. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1464-391X\(04\)00235-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1464-391X(04)00235-1). [cit. 2024-04-26]. HOSOKAWA ALPINE AG. *CLASSIFIER MILLS*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.hosokawa-alpine.com/powder-particle-processing/machines/classifier-mills/>. [cit. 2024-01-16].
- [28] AHMED, Tazim; SHARMA, Parveen; KARMAKER, Chitra Lekha a NASIR, Sumaiya. Warpage prediction of Injection-molded PVC part using ensemble machine learning algorithm. Online. *Materials Today: Proceedings*. 2022, roč. 50, s. 565-569. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.463>. [cit. 2024-01-17].
- [29] TSAI, Hsi-Hsun; WU, Shao-Jung; LIU, Jia-Wei; CHEN, Sin-He a LIN, Jui-Jung. Filling-Balance-Oriented Parameters for Multi-Cavity Molds in Polyvinyl Chloride Injection Molding. Online. *Polymers*. 2022, roč. 14, č. 17. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14173483>. [cit. 2024-01-17].
- [30] KIANI, Mehdi; PARVANEH, Vali; ABBASI, Mohammad a DADRASI, Ali. Fabrication and investigation of the mechanical properties of PVC/carbon

- fiber/graphene nanocomposite pipes for oil and gas applications. Online. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2022, roč. 35, č. 9, s. 1263-1278. ISSN 0892-7057. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0892705720930792>. [cit. 2024-01-17].
- [31] *Produkty*. Online. In: REPLAST - Produkty. 2024. Dostupné z: <https://www.replast.cz/kategorie/podlahove-desky/>. [cit. 2024-01-17].
- [32] *Design střešní šablony*. Online. In: Capacco - Design střešní šablony. 2024. Dostupné z: [https://www.capacco.cz/?gclid=EAlaIqobChMIturYpOrjgwMVhpJoCR0yvqUPEAAAYASAAEgJWk\\_D\\_BwE](https://www.capacco.cz/?gclid=EAlaIqobChMIturYpOrjgwMVhpJoCR0yvqUPEAAAYASAAEgJWk_D_BwE). [cit. 2024-01-17].
- [33] *Fortelock - Dlaždice Industry*. Online. In: Fortelock - Dlaždice Industry. 2024. Dostupné z: <https://www.fortelock.cz/produkt/dlazdice-industry/?colorName=graphite&dezen=diamant>. [cit. 2024-01-17].
- [34] HAMMICHE, Dalila; BENSLIMANE, Abdelhakim a BOUKERROU, Amar. Mechanical Properties of PVC Composites and Nanocomposites. Online. In: H, Akhina a SABU, Thomas (ed.). *Poly(Vinyl Chloride) Based Composites and Nanocomposites*. 1. Engineering Materials. Cham: Springer International Publishing, 2024, s. 261-273. ISBN 978-3-031-45374-8. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-45375-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-45375-5_12). [cit. 2024-01-17].
- [35] RIDEOUT, Andrew; PANCHAL, Kushal; MARIC, Milan; LEASK, Richard a NICELL, Jim. Prevention of surface defects in calendered poly(vinyl chloride) sheets using a succinate-capped poly(caprolactone) additive. Online. *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 2024, č. 1. ISSN 1083-5601. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/vnl.22087>. [cit. 2024-01-17].
- [36] JAVED, Muhammad A; ASGHAR, Zeeshan; ATIF, Hafiz Muhammad a NISAR, Mehreen. A computational study of the calendaring processes using Oldroyd 8-constant fluid with slip effects. Online. *Polymers and Polymer Composites*. 2023, roč. 31. ISSN 0967-3911. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/09673911231202888>. [cit. 2024-01-17].
- [37] LENFELD Petr. *Technologie II: Tváření kovů a zpracování plastů*. Technická univerzita Liberec [online]. Liberec [cit. 2024-01-17].

Dostupné z:

[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/09.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/09.htm)

- [38] TATARA, Robert A. Compression Molding. Online. In: *Applied Plastics Engineering Handbook*. Elsevier, 2017, s. 291-320. ISBN 9780323390408. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00014-6>. [cit. 2024-01-17].
- [39] RANJAN, Nishant. Process capability analysis for fabrication of high elongated PVC polymer using extrusion process. Online. *Materials Today: Proceedings*. 2022, roč. 48, s. 1731-1734. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.040>. [cit. 2024-01-19].
- [40] ROT, D.; PATEL, A.V.; PATEL, V.P. a PATEL, C.K. A Review On Optimization of Process Parameters For PVC Pipe Using Extrusion Process. Online. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*. 2022, roč. XIV, č. 5, s. 285-289. ISSN 1006-7930. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Patel-Virabhai/publication/361137373\\_A\\_Review\\_On\\_Optimization\\_of\\_Process\\_Parameters\\_For\\_PVC\\_Pipe\\_Using\\_Extrusion\\_Process/links/629f151c55273755ebd976c3/A-Review-On-Optimization-of-Process-Parameters-For-PVC-Pipe-Using-Extrusion-Process.pdf?origin=journalDetail&tp=eyJwYWdlIjoiam91cm5hbERldGFpbCJ9](https://www.researchgate.net/profile/Patel-Virabhai/publication/361137373_A_Review_On_Optimization_of_Process_Parameters_For_PVC_Pipe_Using_Extrusion_Process/links/629f151c55273755ebd976c3/A-Review-On-Optimization-of-Process-Parameters-For-PVC-Pipe-Using-Extrusion-Process.pdf?origin=journalDetail&tp=eyJwYWdlIjoiam91cm5hbERldGFpbCJ9). [cit. 2024-01-19].
- [41] DJOMI, Rolland; FOKAM, Christian Mbopda; BIYEME, Florent; MVEH, Chantal Marguerite; OLEMBÉ, Roland et al. Industrial Elaboration by Extrusion of PVC Tubes Loaded with Micronized Dura Palm Kernel Shell Powder. Online. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2021, roč. 09, č. 10, s. 41-69. ISSN 2327-6045. Dostupné z: <https://doi.org/10.4236/msce.2021.910004>. [cit. 2024-01-19].
- [42] LUCIANI, Andrea; TODARO, Carmine; MARTINELLI, Daniele a PEILA, Daniele. Long-term durability assessment of PVC-P waterproofing geomembranes through laboratory tests. Online. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020, roč. 103. ISSN 08867798. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103499>. [cit. 2024-01-19].

- [43] SCHYNS, Zoé O. G. a SHAVER, Michael P. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. Online. *Macromolecular Rapid Communications*. 2021, roč. 42, č. 3. ISSN 1022-1336. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>. [cit. 2024-01-19].
- [44] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. 1. Svitavy: Code Creator, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [45] ČSN EN ISO 868, *Plasty a ebonit - Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [46] ČSN EN ISO 1183-1, *Plasty - Metody stanovení hustoty nelehčených plastů - Část 1: Imerzní metoda, metoda s kapalinovým pyknometrem a titrační metoda*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [47] ČSN EN ISO 527-3, *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 3: Zkušební podmínky pro fólie a desky*. 2019. Praha: Česká agentura pro standardizaci.
- [48] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. 1. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [49] ČSN EN ISO 62, *Plasty - Stanovení nasákavosti ve vodě*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [50] CAZZUFFI, D. a GIOFFRÈ, D. Lifetime assessment of exposed PVC-P geomembranes installed on Italian dams. Online. *Geotextiles and Geomembranes*. 2020, roč. 48, č. 2, s. 130-136. ISSN 02661144. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.11.015>. [cit. 2024-03-25].
- [51] ČSN EN 495-5, *Hydroizolační pásy a fólie - Stanovení ohebnosti za nízkých teplot - Část 5: Plastové a pryžové pásy a fólie pro hydroizolaci střech*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [52] MOHAMED, M.A.; JAAFAR, J.; ISMAIL, A.F.; OTHMAN, M.H.D. a RAHMAN, M.A. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. Online. In: *Membrane Characterization*. Elsevier, 2017, s. 3-29. ISBN 9780444637765. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63776-5.00001-2>. [cit. 2024-03-26].

- [53] VŠCHT. *Infračervená spektroskopie*. Online. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/lms/Zverze/Infrared.htm>. [cit. 2024-03-26].
- [54] MATOUŠEK, D.; NEUMAN, J. a PECHOUT, M. VYUŽITÍ FTIR SPEKTROMETRIE PRO ONLINE ANALÝZU PLYNNÝCH SMĚSÍ. Online. *CHEMAGAZÍN*. 2018, roč. XXVIII, č. 3, s. 2-4. Dostupné z: <https://www.optikinstruments.eu/runtime/cache/matrix-mg-clanek-cd4e42325c66f20725f65fe10cfe6ec5.pdf>. [cit. 2024-03-26].
- [55] *Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy and Microscopy*. Online. ANALYSIS LABORATORY EQUIPMENT. 2022. Dostupné z: <https://analysisdoo.com/products/fourier-transform-infrared-ftir-spectroscopy-and-microscopy/>. [cit. 2024-03-26].
- [56] LI, Tian; ZHAO, Peitao; LEI, Meng a LI, Zhaozhi. Understanding Hydrothermal Dechlorination of PVC by Focusing on the Operating Conditions and Hydrochar Characteristics. Online. *Applied Sciences*. 2017, roč. 7, č. 3. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app7030256>. [cit. 2024-03-27].
- [57] METTLER TOLEDO. *ATR-FTIR Spectroscopy - Fundamentals of Attenuated Total Reflectance (ATR)*. Online. METTLER TOLEDO. 2024. Dostupné z: [https://www.mt.com/gb/en/home/applications/L1\\_AutoChem\\_Applications/ftir-spectroscopy/attenuated-total-reflectance-atr.html](https://www.mt.com/gb/en/home/applications/L1_AutoChem_Applications/ftir-spectroscopy/attenuated-total-reflectance-atr.html). [cit. 2024-03-28].
- [58] LUQUE DE CASTRO, M.D. a PRIEGO-CAPOTE, F. Soxhlet extraction: Past and present panacea. Online. *Journal of Chromatography A*. 2010, roč. 1217, č. 16, s. 2383-2389. ISSN 00219673. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.11.027>. [cit. 2024-04-11].
- [59] ČSN EN ISO 6427, *Plasty - Stanovení látek extrahovatelných organickými rozpouštědly (konvenční metody)*. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [60] *QUV/spray: Přístroj na urychlené povětrnostní testy*. 1. Labimex CZ, 2008.
- [61] ČSN EN ISO 4892-3, *Plasty - Metody vystavení laboratorním zdrojům světla - Část 3: Fluorescenční UV lampy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

- [62] ČSN 01 1718, *MĚŘENÍ BAREV*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1992.
- [63] ČSN EN 20105-A02, *Textilie. Zkoušky stálobarevnosti. Část A02: Šedá stupnice pro hodnocení změny odstínu (ISO 105-A02:1993)*. Praha: Český normalizační institut, 1995.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ATR	Attenuated Total Reflectance (zeslabená totální refleksce)
CEM	cirkulární ekonomika
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
FM	fluidní míchačka
FMV	fyzikálně mechanické vlastnosti
FTIR	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
FTIR	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
FV panely	fotovoltaické panely
HIF	hydroizolační fólie
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
PP	polypropylen
PVC	polyvinyl chlorid



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Princip oběhového hospodářství a materiálových toků [5].....	12
Obrázek 2: Distribuce dle typu polymeru v roce 2020 [4] .....	15
Obrázek 3: Střešní hydroizolační fólie s PES mřížkou [15].....	16
Obrázek 4: Střešní hydroizolační fólie vyztužená skelným rounem [15].....	17
Obrázek 5: Střešní hydroizolační fólie s netkanou PES textilií [15] .....	17
Obrázek 6: Schéma míchacího uzlu [16].....	19
Obrázek 7: Zjednodušené schéma extruzní linky na PVC fólie [18] .....	20
Obrázek 8: Schéma válcovací linky [17].....	22
Obrázek 9: Schéma laminační linky na PVC fólie [19].....	23
Obrázek 10: PES cupanina .....	24
Obrázek 11: Nožový mlýn ROTOPLEX RO [22].....	26
Obrázek 12: Schéma funkce cik-cak separátoru [25] .....	27
Obrázek 13: Schéma zmenšení plošných útvarů HIF a otevření struktury drtě [21].....	28
Obrázek 14: PVC drť získaná po separaci PES vláken .....	29
Obrázek 15: Získaná směs PES vláken a PVC drti .....	30
Obrázek 16: Extrudér s kónickým ko-rotáčným dvoušnekem [26].....	31
Obrázek 17: Zjednodušené schéma podvodní granulace [27] .....	32
Obrázek 18: Možné výroby z cupaniny vyrobené vstřikováním [32][33][34].....	34
Obrázek 19: Střešní hydroizolační fólie [15].....	35
Obrázek 20: Možné výrobky z cupaniny vyráběné technologií lisování [32].....	36
Obrázek 21: Možné vytlačované profily z cupaniny .....	37
Obrázek 22: Laboratorní dvouválec Rodolfo Comerio .....	42
Obrázek 23: Digitální tvrdoměr Nareiss BS 61 ShA .....	45
Obrázek 24: Grafické znázornění průměrných hodnot tvrdostí.....	46
Obrázek 25: Váhy použité pro stanovení hustoty vzorků.....	47
Obrázek 26: Grafické znázornění průměrných hodnot hustoty .....	48
Obrázek 27: Typy deformační křivky polymerů v tahu a detail uchycení tělesa v čelisti [45] .....	49
Obrázek 28: Grafické znázornění průměrných hodnot napětí při přetržení (světlé hodnoty jsou v podélném směru, tmavé v příčném) .....	51
Obrázek 29: Grafické znázornění průměrných hodnot protažení při přetržení (světlé hodnoty jsou v podélném směru, tmavé v příčném) .....	51
Obrázek 31: Vakuová rotační odparka se vzorky .....	55
Obrázek 32: Grafické srovnání množství změkčovadla ve vzorcích.....	57
Obrázek 33: Zkušební přístroj pro testování ohybu za nízkých teplot [52].....	59

---

Obrázek 34: Příklady poškození při zkoušce ohybu za nízkých teplot .....	60
Obrázek 35: FTIR spektrometr [56] .....	61
Obrázek 36: FTIR analýza složení vzorku č. 1 .....	62
Obrázek 37: Porovnání FTIR analýzy jednotlivých vzorků .....	63
Obrázek 38: Detail FTIR v typické oblasti absorpce pro ftalátová změkčovadla .....	64
Obrázek 39: Zjednodušený průřez přístrojem QUV [61] .....	65
Obrázek 40: Graf povětrnostní odolnosti QUV test, UVA lampy .....	68
Obrázek 41: Graf povětrnostní odolnosti QUV test, UVB lampy .....	68

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1: Popis k obrázku 6 [16].....	19
Tabulka 2: Receptura PVC směsi .....	41
Tabulka 3: Složení jednotlivých vzorků .....	43
Tabulka 4: Průměrné hodnoty tvrdostí .....	46
Tabulka 5: Průměrné hodnoty hustoty vzorků.....	48
Tabulka 6: Průměrné hodnoty napětí a protažení při přetržení .....	50
Tabulka 7: Průměrné hodnoty nasákavosti .....	53
Tabulka 8: Naměřené a vypočítané hodnoty množství změkčovadla ve vzorku.....	56
Tabulka 9: Výsledky ohybu za nízké teploty.....	59
Tabulka 10: Hodnoty barevné odchylky DeltaE* a odchylky šedé stupnice .....	67

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY TVRDOSTÍ

Příloha P II: NAMĚŘENÉ HODNOTY HUSTOT

Příloha P III: NAMĚŘENÉ HODNOTY TAŽNOSTÍ A PEVNOSTÍ

Příloha P IV: NAMĚŘENÉ HODNOTY NASÁKAVOSTÍ

Příloha P V: NAMĚŘENÉ HODNOTY QUV-A TESTU

Příloha P VI: NAMĚŘENÉ HODNOTY QUV-B TESTU

## PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY TVRDOSTÍ

Materiál	Měření [ShA]										Průměrná hodnota [ShA]	Směr. odchylky
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.		
VZ. 1 (2x recyklovaný mat.)	79,1	79,1	79,7	80,0	79,3	79,3	79,0	79,0	79,3	78,6	79,2	0,39
VZ. 2 (4x recyklovaný mat.)	81,3	80,1	81,0	81,5	80,5	81,0	80,5	80,8	80,4	81,2	80,8	0,45
VZ. 3 (6x recyklovaný mat.)	80,7	81,0	81,0	81,5	81,2	81,0	81,0	81,1	81,3	81,0	81,1	0,21
VZ. 4 (8x recyklovaný mat.)	80,9	81,0	81,3	81,2	81,1	80,9	81,4	81,2	81,3	81,5	81,2	0,20
VZ. 5 (10x recyklovaný mat.)	81,2	81,6	81,2	81,5	81,6	81,4	80,3	81,2	81,5	81,0	81,3	0,39

## PŘÍLOHA P II: NAMĚŘENÉ HODNOTY HUSTOT

	Zdánlivá hm. vz. na vzduchu	Zdánlivá hm. vz. v imerzní kap.	Hustota imerzní kapaliny (při	Hustota vzorku	Průměrná hustota směsi	Směrodatná odchylka
<b>Materiál</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	
<b>VZ. 1 (2x recyklovaný mat.)</b>	1,2465	0,2579	0,99768	1,2579	1,2582	0,0035
	1,8892	0,3954	0,99768	1,2618		
	1,7058	0,3496	0,99768	1,2549		
<b>VZ. 2 (4x recyklovaný mat.)</b>	1,6764	0,3447	0,99768	1,2559	1,2586	0,0023
	1,9548	0,4063	0,99768	1,2595		
	1,6547	0,3448	0,99768	1,2603		
<b>VZ. 3 (6x recyklovaný mat.)</b>	1,2653	0,2637	0,99768	1,2603	1,2607	0,0003
	2,0300	0,4239	0,99768	1,2610		
	1,9001	0,3965	0,99768	1,2608		
<b>VZ. 4 (8x recyklovaný mat.)</b>	1,4846	0,3127	0,99768	1,2639	1,2642	0,0003
	2,1845	0,4605	0,99768	1,2642		
	1,7306	0,3652	0,99768	1,2645		
<b>VZ. 5 (10x recyklovaný mat.)</b>	1,1183	0,2390	0,99768	1,2689	1,2649	0,0054
	1,7332	0,3595	0,99768	1,2588		
	1,8750	0,3988	0,99768	1,2672		

## PŘÍLOHA P III: NAMĚŘENÉ HODNOTY TAŽNOSTÍ A PEVNOSTÍ

Material	Směr tažení	Měření	1.	2.	3.	4.	5.	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Medián
VZ. 1 (2x recykl. materiál)	Podél	Pevnost [Mpa]	13,42	13,58	13,42	13,53	13,17	<b>13,42</b>	0,16	13,42
		Tažnost [%]	227,7	244,7	240,5	234,5	222,0	<b>233,9</b>	9,23	234,5
	Napříč	Pevnost [Mpa]	12,46	12,12	11,81	12,02	11,39	<b>11,96</b>	0,40	12,02
		Tažnost [%]	226,6	237,4	213,6	223,1	209,4	<b>222,0</b>	11,05	223,1
VZ. 2 (4x recykl. materiál)	Podél	Pevnost [Mpa]	13,63	13,28	13,15	13,61	13,42	<b>13,42</b>	0,21	13,42
		Tažnost [%]	221,8	231,7	235,0	243,2	225,7	<b>231,5</b>	8,32	231,7
	Napříč	Pevnost [Mpa]	11,54	11,67	11,91	11,67	11,86	<b>11,7</b>	0,15	11,7
		Tažnost [%]	210,3	224,2	221,2	221,1	218,2	<b>219,0</b>	5,31	221,1
VZ. 3 (6x recykl. materiál)	Podél	Pevnost [Mpa]	12,96	12,91	12,54	13,30	12,95	<b>12,9</b>	0,27	13,0
		Tažnost [%]	227,5	230,4	217,6	236,1	229,5	<b>228,2</b>	6,74	229,5
	Napříč	Pevnost [Mpa]	12,15	11,85	11,85	11,18	11,36	<b>11,7</b>	0,40	11,9
		Tažnost [%]	228,3	227,3	222,0	212,5	203,0	<b>218,6</b>	10,75	222,0
VZ. 4 (8x recykl. materiál)	Podél	Pevnost [Mpa]	11,95	12,39	13,13	13,65	12,10	<b>12,6</b>	0,72	12,4
		Tažnost [%]	219,2	220,2	224,7	233,9	213,8	<b>222,4</b>	7,53	220,2
	Napříč	Pevnost [Mpa]	10,84	10,68	11,61	11,42	11,24	<b>11,2</b>	0,39	11,2
		Tažnost [%]	214,6	201,9	225,5	208,7	201,7	<b>210,5</b>	9,96	208,7
VZ. 5 (10x recykl. materiál)	Podél	Pevnost [Mpa]	12,48	12,68	12,39	12,04	11,82	<b>12,3</b>	0,35	12,4
		Tažnost [%]	206,5	237,9	219,2	221,9	220,0	<b>221,1</b>	11,19	220,0
	Napříč	Pevnost [Mpa]	10,50	10,55	11,24	10,78	10,50	<b>10,7</b>	0,32	10,6
		Tažnost [%]	200,1	198,1	198,7	205,4	189,1	<b>198,3</b>	5,88	198,7

## PŘÍLOHA P IV: NAMĚŘENÉ HODNOTY NASÁKAVOSTÍ

NASÁKAVOST ( 168h - 23°C )				
ČSN EN ISO 62				
VZ. 1 (2x recyklovaný mat.)	Nasákavost			
	<i>před (g)</i>	<i>po (g)</i>	<i>rozdíl (g)</i>	<i>hodnota (%)</i>
1.	1,2922	1,2970	0,0048	0,3715
2.	1,2640	1,2689	0,0049	0,3877
3.	1,3127	1,3181	0,0054	0,4114
				<b>0,3902</b>
Směr. odchylka				0,0201

NASÁKAVOST ( 168h - 23°C )				
ČSN EN ISO 62				
VZ. 3 (6x recyklovaný mat.)	Nasákavost			
	<i>před (g)</i>	<i>po (g)</i>	<i>rozdíl (g)</i>	<i>hodnota (%)</i>
1.	1,0373	1,0414	0,0041	0,3953
2.	1,0828	1,0871	0,0043	0,3971
3.	1,0370	1,0411	0,0041	0,3954
				<b>0,3959</b>
Směr. odchylka				0,0010

NASÁKAVOST ( 168h - 23°C )				
ČSN EN ISO 62				
VZ. 5 (10x recyklovaný mat.)	Nasákavost			
	<i>před (g)</i>	<i>po (g)</i>	<i>rozdíl (g)</i>	<i>hodnota (%)</i>
1.	1,1702	1,1749	0,0047	0,4016
2.	1,1602	1,1648	0,0046	0,3965
3.	1,1188	1,1233	0,0045	0,4022
				<b>0,4001</b>
Směr. odchylka				0,0032

NASÁKAVOST ( 168h - 23°C )				
ČSN EN ISO 62				
VZ. 2 (4x recyklovaný mat.)	Nasákavost			
	<i>před (g)</i>	<i>po (g)</i>	<i>rozdíl (g)</i>	<i>hodnota (%)</i>
1.	1,0600	1,0643	0,0043	0,4057
2.	1,0227	1,0266	0,0039	0,3813
3.	1,0728	1,0770	0,0042	0,3915
				<b>0,3928</b>
Směr. odchylka				0,0122

NASÁKAVOST ( 168h - 23°C )				
ČSN EN ISO 62				
VZ. 4 (8x recyklovaný mat.)	Nasákavost			
	<i>před (g)</i>	<i>po (g)</i>	<i>rozdíl (g)</i>	<i>hodnota (%)</i>
1.	1,1122	1,1166	0,0044	0,3956
2.	1,0422	1,0463	0,0041	0,3934
3.	1,0976	1,1020	0,0044	0,4009
				<b>0,3966</b>
Směr. odchylka				0,0038



## PŘÍLOHA P V: NAMĚŘENÉ HODNOTY QUV-A TESTU

### Objektivní měření barevnosti

Norma	ČSN 01 1718/ ČSN EN 20 105-AO 2
Zařízení	UltraScan PRO (Hunter Lab)
Podložka	bílá
<b>UV stabilita</b>	<b>QUV-340A</b>
Norma	ISO 4892-3(cyklus 1)
Zařízení	QUV-340A

### VZ. 1 (2x recyklovaný materiál)

	L*	a*	b*	YI	DeltaE*	šedá stup.
<b>0hod.</b>	71,49	-0,59	-0,86	-2,73		
<b>69 hod.</b>	71,29	-0,58	-0,79	-2,55	<b>0,21</b>	5
<b>167 hod.</b>	71,37	-0,61	-0,73	-2,43	<b>0,17</b>	5
<b>260 hod.</b>	71,42	-0,62	-0,73	-2,43	<b>0,15</b>	5
<b>333 hod.</b>	71,39	-0,62	-0,74	-2,47	<b>0,16</b>	5
<b>428 hod.</b>	71,31	-0,62	-0,74	-2,46	<b>0,22</b>	5
<b>499 hod.</b>	71,24	-0,61	-0,71	-2,38	<b>0,29</b>	5
<b>762 hod.</b>	71,37	-0,6	-0,72	-2,38	<b>0,19</b>	5
<b>1001 hod.</b>	71,27	-0,62	-0,76	-2,52	<b>0,25</b>	5
<b>1503 hod.</b>	71,25	-0,6	-0,69	-2,33	<b>0,3</b>	5

### VZ. 2 (4x recyklovaný materiál)

	L*	a*	b*	YI	DeltaE*	šedá stup.
<b>0hod.</b>	74,72	-0,61	-0,8	-2,5		
<b>69 hod.</b>	74,51	-0,6	-0,75	-2,38	<b>0,22</b>	5
<b>167 hod.</b>	74,58	-0,63	-0,7	-2,28	<b>0,18</b>	5
<b>260 hod.</b>	74,56	-0,64	-0,66	-2,19	<b>0,18</b>	5
<b>333 hod.</b>	74,59	-0,66	-0,68	-2,26	<b>0,19</b>	5
<b>428 hod.</b>	74,48	-0,65	-0,67	-2,23	<b>0,28</b>	5
<b>499 hod.</b>	74,45	-0,63	-0,65	-2,17	<b>0,31</b>	5
<b>762 hod.</b>	74,54	-0,62	-0,66	-2,18	<b>0,23</b>	5
<b>1001 hod.</b>	74,48	-0,66	-0,69	-2,29	<b>0,27</b>	5
<b>1503 hod.</b>	74,44	-0,63	-0,62	-2,09	<b>0,33</b>	5

**VZ. 3 (6x recyklovaný materiál)**

	L*	a*	b*	YI	DeltaE*	šedá stup.
<b>0hod.</b>	76,15	-0,63	-0,78	-2,43		
<b>69 hod.</b>	75,96	-0,62	-0,77	-2,41	<b>0,19</b>	5
<b>167 hod.</b>	76,04	-0,64	-0,69	-2,24	<b>0,14</b>	5
<b>260 hod.</b>	76,17	-0,65	-0,68	-2,23	<b>0,1</b>	5
<b>333 hod.</b>	76,03	-0,68	-0,66	-2,21	<b>0,18</b>	5
<b>428 hod.</b>	76	-0,66	-0,68	-2,22	<b>0,19</b>	5
<b>499 hod.</b>	75,88	-0,64	-0,63	-2,11	<b>0,3</b>	5
<b>762 hod.</b>	76,06	-0,63	-0,66	-2,16	<b>0,15</b>	5
<b>1001 hod.</b>	75,95	-0,65	-0,7	-2,27	<b>0,22</b>	5
<b>1503 hod.</b>	75,93	-0,64	-0,62	-2,07	<b>0,27</b>	5

**VZ. 4 (8x recyklovaný materiál)**

	L*	a*	b*	YI	DeltaE*	šedá stup.
<b>0hod.</b>	77,18	-0,64	-0,78	-2,42		
<b>69 hod.</b>	76,94	-0,64	-0,24	-2,33	<b>0,24</b>	5
<b>167 hod.</b>	77,05	-0,66	-0,66	-2,16	<b>0,17</b>	5
<b>260 hod.</b>	77,09	-0,68	-0,65	-2,16	<b>0,16</b>	5
<b>333 hod.</b>	77,02	-0,7	-0,65	-2,18	<b>0,21</b>	5
<b>428 hod.</b>	77,16	-0,68	-0,57	-1,96	<b>0,28</b>	5
<b>499 hod.</b>	76,93	-0,66	-0,64	-2,12	<b>0,28</b>	5
<b>762 hod.</b>	77,02	-0,66	-0,61	-2,06	<b>0,23</b>	5
<b>1001 hod.</b>	76,9	-0,68	-0,64	-2,13	<b>0,31</b>	5
<b>1503 hod.</b>	76,86	-0,65	-0,58	-1,96	<b>0,37</b>	5

**VZ. 5 (10x recyklovaný materiál)**

	L*	a*	b*	YI	DeltaE*	šedá stup.
<b>0hod.</b>	77,4	-0,65	-0,7	-2,24		
<b>69 hod.</b>	77,26	-0,63	-0,67	-2,15	<b>0,15</b>	5
<b>167 hod.</b>	77,29	-0,66	-0,58	-1,97	<b>0,16</b>	5
<b>260 hod.</b>	77,34	-0,68	-0,59	-2	<b>0,13</b>	5
<b>333 hod.</b>	77,27	-0,7	-0,55	-1,93	<b>0,21</b>	5
<b>428 hod.</b>	77,16	-0,68	-0,57	-1,96	<b>0,28</b>	5
<b>499 hod.</b>	77,07	-0,66	-0,53	-1,86	<b>0,37</b>	5
<b>762 hod.</b>	77,11	-0,65	-0,53	-1,84	<b>0,34</b>	5
<b>1001 hod.</b>	77,02	-0,67	-0,57	-1,97	<b>0,4</b>	4,5
<b>1503 hod.</b>	76,95	-0,65	-0,49	-1,75	<b>0,5</b>	4,5

## PŘÍLOHA P VI: NAMĚŘENÉ HODNOTY QUV-B TESTU

### Objektivní měření barevnosti

Norma	ČSN 01 1718/ ČSN EN 20 105-AO 2
Zařízení	UltraScan PRO (Hunter Lab)
Podložka	bílá

### UV stabilita - QUV Tester

### UV 313 B

Norma	ISO 4892-3(cyklus 1)
Zařízení	QUV Weatering Tester

### VZ. 1 (2x recyklovaný materiál)

	L*	a*	b*	YI	DeltaE*	šedá stup.
<b>0hod.</b>	71,6	-0,61	-0,87	-2,77		
<b>70 hod.</b>	71,47	-0,62	-0,74	-2,44	<b>0,19</b>	5
<b>167 hod.</b>	71,53	-0,66	-0,6	-2,14	<b>0,29</b>	5
<b>260 hod.</b>	71,64	-0,72	-0,43	-1,77	<b>0,46</b>	4,5
<b>333 hod.</b>	71,95	-0,75	-0,26	-1,38	<b>0,73</b>	4,5
<b>428 hod.</b>	71,86	-0,75	-0,15	-1,12	<b>0,78</b>	4,5
<b>499 hod.</b>	71,94	-0,75	0,03	-0,69	<b>0,97</b>	4,5
<b>762 hod.</b>	72,04	-0,8	0,36	0,08	<b>1,33</b>	4
<b>1003 hod.</b>	72,17	-0,84	0,68	0,82	<b>1,67</b>	4
<b>1503 hod.</b>	71,31	-0,84	0,53	0,44	<b>1,45</b>	4

### VZ. 2 (4x recyklovaný materiál)

	L*	a*	b*	YI	DeltaE*	šedá stup.
<b>0hod.</b>	74,59	-0,62	-0,79	-2,48		
<b>70 hod.</b>	74,43	-0,64	-0,61	-2,08	<b>0,24</b>	5
<b>167 hod.</b>	74,52	-0,66	-0,53	-1,91	<b>0,27</b>	5
<b>260 hod.</b>	74,5	-0,7	-0,37	-1,57	<b>0,43</b>	4,5
<b>333 hod.</b>	74,56	-0,72	-0,36	-1,57	<b>0,44</b>	4,5
<b>428 hod.</b>	74,58	-0,74	-0,19	-1,17	<b>0,61</b>	4,5
<b>499 hod.</b>	74,61	-0,75	-0,06	-0,88	<b>0,74</b>	4,5
<b>762 hod.</b>	74,66	-0,79	0,22	-0,25	<b>1,03</b>	4,5
<b>1003 hod.</b>	74,38	-0,9	0,66	0,69	<b>1,49</b>	4
<b>1503 hod.</b>	74,24	-0,9	0,68	0,74	<b>1,53</b>	4

**VZ. 3 (6x recyklovaný materiál)**

	L*	a*	b*	YI	DeltaE*	šedá stup.
<b>0hod.</b>	76,12	-0,64	-0,76	-2,39		
<b>70 hod.</b>	75,94	-0,64	-0,63	-2,09	<b>0,22</b>	5
<b>167 hod.</b>	76,04	-0,68	-0,48	-1,78	<b>0,29</b>	5
<b>260 hod.</b>	76,05	-0,72	-0,39	-1,59	<b>0,39</b>	5
<b>333 hod.</b>	76,16	-0,76	-0,3	-1,43	<b>0,47</b>	4,5
<b>428 hod.</b>	76,03	-0,75	-0,26	-1,33	<b>0,51</b>	4,5
<b>499 hod.</b>	76,02	-0,77	-0,11	-1,01	<b>0,66</b>	4,5
<b>762 hod.</b>	76,16	-0,84	0,2	-0,33	<b>0,98</b>	4,5
<b>1003 hod.</b>	76,36	-0,94	0,61	0,52	<b>1,42</b>	4
<b>1503 hod.</b>	75,81	-0,94	0,65	0,6	<b>1,47</b>	4

**VZ. 4 (8x recyklovaný materiál)**

	L*	a*	b*	YI	DeltaE*	šedá stup.
<b>0hod.</b>	77,07	-0,63	-0,77	-2,38		
<b>70 hod.</b>	76,93	-0,66	-0,62	-2,08	<b>0,21</b>	5
<b>167 hod.</b>	76,95	-0,68	-0,5	-1,82	<b>0,29</b>	5
<b>260 hod.</b>	77,03	-0,72	-0,42	-1,65	<b>0,36</b>	5
<b>333 hod.</b>	77	-0,74	-0,37	-1,56	<b>0,42</b>	4,5
<b>428 hod.</b>	76,98	-0,75	-0,31	-1,43	<b>0,48</b>	4,5
<b>499 hod.</b>	76,89	-0,75	-0,25	-1,29	<b>0,56</b>	4,5
<b>762 hod.</b>	77,11	-0,81	0,06	-0,64	<b>0,84</b>	4,5
<b>1003 hod.</b>	77,13	-0,87	0,21	-0,35	<b>1</b>	4,5
<b>1503 hod.</b>	76,84	-0,88	0,33	-0,07	<b>1,15</b>	4,5

**VZ. 5 (10x recyklovaný materiál)**

	L*	a*	b*	YI	DeltaE*	šedá stup.
<b>0hod.</b>	77,47	-0,64	-0,74	-2,31		
<b>70 hod.</b>	77,35	-0,68	-0,58	-1,98	<b>0,21</b>	5
<b>167 hod.</b>	77,43	-0,7	-0,46	-1,71	<b>0,29</b>	5
<b>260 hod.</b>	77,41	-0,73	-0,39	-1,58	<b>0,37</b>	5
<b>333 hod.</b>	77,42	-0,77	-0,32	-1,47	<b>0,44</b>	4,5
<b>428 hod.</b>	77,37	-0,76	-0,23	-1,25	<b>0,53</b>	4,5
<b>499 hod.</b>	77,35	-0,77	-0,14	-1,05	<b>0,62</b>	4,5
<b>762 hod.</b>	77,45	-0,81	0,12	-0,48	<b>0,88</b>	4,5
<b>1003 hod.</b>	77,46	-0,87	0,47	0,25	<b>1,22</b>	4,5
<b>1503 hod.</b>	77,13	-0,9	0,53	0,38	<b>1,34</b>	4