



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE OCHRANY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION

IDENTIFIKACE ZDROJŮ KONTAMINACE PŘI RECYKLACI PET

IDENTIFICATION OF CONTAMINATION SOURCES IN THE PET RECYCLING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martina Snopková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jiří Kučerík, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1578/2020 Akademický rok: 2020/21
Ústav: Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí
Studentka: **Martina Snopková**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: Chemie a technologie ochrany životního prostředí
Vedoucí práce: **prof. Ing. Jiří Kučerík, Ph.D.**

Název bakalářské práce:

Identifikace zdrojů kontaminace při recyklaci PET

Zadání bakalářské práce:

1. literární rešerše na téma recyklace PET, využívané přístupy; zdroje kontaminace a řešení problému s nežádoucími příměsemi; zařízení S+S, jeho účinnost a citlivost.
2. Testování využitelnosti metody FTIR pro analýzu PET kontaminantů na drti z firmy Petka CZ a.s.
3. Vyhodnocení dat a diskuze.

Termín odevzdání bakalářské práce: 30.7.2021:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Martina Snopková
student(ka)

prof. Ing. Jiří Kučerík, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Jiří Kučerík, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2021

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Práce se zabývá identifikací plastových kontaminantů v polyethylentereftalátových (PET) vločkách získaných fyzikální recyklací PET lahví. Přítomnost kontaminantů je v recyklátu nežádoucí a je nutné zavést a optimalizovat technologie pro jejich separaci. Pro optimalizaci technologií je důležité znát materiál kontaminantu. Analýzou kontaminantů v PET vločkách se zabývají práce ojediněle. V praxi je tím pádem nedostatek podkladů pro zvýšení efektivity separace na základě materiálu kontaminantu. Tato práce má za cíl poskytnout chybějící informace o polymerním složení plastových nečistot. Získaná zjištění přispějí k zefektivnění separace kontaminantů a výrobě kvalitnějšího recyklátu. Pro analýzu kontaminantů byla použita metoda infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací technikou zeslabeného úplného odrazu (FTIR-ATR). Nečistoty byly analyzovány pomocí přístroje ALPHA II s modulem ALPHA-P s diamantovým krystalem. Bylo zjištěno, že nejčastějšími kontaminanty jsou polymery polystyren (PS) a jeho modifikace, polyethylentereftalát glykol (PETG), PET ve směsi s jinými polymery či aditivy, polypropylen (PP), polyamid (PA), styren-akrylonitril (SAN) a polyvinylchlorid (PVC). Na základě těchto zjištění byla vypracována doporučení pro zefektivnění separace. Některé výsledky poukázaly na aktuální problémy, které komplikují recyklaci PET lahví.

ABSTRACT

This paper deals with the identification of plastic contaminants in polyethylene terephthalate (PET) flakes obtained by mechanical recycling of PET bottles. The presence of contaminants in recycled material is undesirable and it is necessary to implement and optimize technologies to separate them. For improving the effectiveness of separation, it is crucial to determine the material of the contaminant. Papers that are focusing on the contaminant analysis in PET flakes are sporadic. In practice, there are not enough sources for enhancing the effectiveness of separation based on the material of the contaminant. The goal of this thesis is to provide missing information about the materials of plastic impurities. Obtained findings will contribute to efficiency improvement of contaminant separation and production of better-quality recycled material. For contaminant analysis, Fourier-transform infrared spectroscopy with attenuated total reflection technique (FTIR-ATR) was used. The samples were analyzed using an ALPHA II device with an ALPHA-P module with the diamond crystal. It was found out that the most frequented contaminants are polymers polystyrene (PS) and its modifications, polyethylene terephthalate glycol (PETG), PET mixed with other polymers or additives, polypropylene (PP), polyamide (PA), styrene acrylonitrile (SAN) and polyvinylchloride (PVC). Based on these results, the recommendations for enhancing the efficiency of separation were developed. Some of the results pointed out the actual problems that complicate PET bottle recycling.

KLÍČOVÁ SLOVA

PET, recyklace, kontaminace, separace kontaminantů, FTIR-ATR

KEY WORDS

PET, recycling, contamination, separation of contaminants, FTIR-ATR

SNOPKOVÁ, Martina. *Identifikace zdrojů kontaminace při recyklaci PET*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131501>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí. Vedoucí práce Jiří Kučerík.

Citace elektronického zdroje:

SNOPKOVÁ, Martina. *Identifikace zdrojů kontaminace při recyklaci PET* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-01-29]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131501>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí. Vedoucí práce Jiří Kučerík

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová/bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové/bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří vedoucímu práce prof. Ing. Jiřímu Kučeríkovi, PhD., dále konzultantce práce Ing. Lucii Šudomové za poskytnutí řady odborných informací, materiálů, konzultací a revizí a shromáždění vzorků kontaminantů. V neposlední řadě děkuji firmě PETKA CZ, a. s. za poskytnutí vzorků kontaminantů a za možnost exkurze do prostor společnosti.

OBSAH

1. Úvod.....	7
2. Teoretická část.....	8
2.1. Vlastnosti polyethylentereftalátu.....	8
2.2. Recyklace PET	10
2.2.1. Sběr PET lahví v České republice.....	11
2.2.2. Druhy recyklace PET	11
2.2.2.1. Mechanická recyklace.....	11
2.2.2.2. Chemická recyklace	12
2.2.2.3. Surovinová recyklace.....	12
2.2.2.4. Energetické využití	12
2.2.2.5. Skládkování.....	13
2.3. Výrobky z recyklátu	14
2.3.1. Vlákna	14
2.3.2. Obalové materiály	14
2.4. Proces fyzikální recyklace v PETKA CZ, a. s.....	15
2.4.1. Příjem odpadu a jeho dotřídování.....	15
2.4.2. Drcení, preflotace, praní a sušení	16
2.4.3. Zařízení Polymer Separation System Purifier CN 1024	17
2.4.4. Plnění do big bagů, analýza, skladování a export	18
2.5. Kontaminace PET drtě.....	20
2.5.1. Hliník a jiné kovy	21
2.5.2. Guma	21
2.5.3. Papír	22
2.5.4. Ostatní plasty.....	22
2.5.4.1. Plasty oddělitelné preflotací.....	23
2.5.4.2. Plasty neoddělitelné preflotací	24
2.6. FTIR-ATR	29
3. Experimentální část.....	30
3.1. Vzorky	30
3.1.1. Příprava vzorků před měřením.....	30
3.2. Měření.....	31
3.3. Analýza spekter	32

3.4. Výsledky a diskuze.....	33
3.4.1. Skupina 1.....	35
3.4.2. Skupina 2.....	37
3.4.3. Skupina 3.....	39
3.4.4. Skupina 4.....	41
3.4.5. Skupina 5.....	42
3.4.6. Skupina 6.....	45
3.4.7. Skupina 7.....	47
3.4.8. Skupina 8.....	49
3.4.9. Skupina 9.....	51
3.4.10. Skupina 10.....	52
3.4.11. Skupina 11.....	53
3.4.12. Skupina 12.....	54
3.4.13. Skupina 13.....	55
4. Závěr.....	56
Bibliografie.....	59
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	68

1. ÚVOD

Plasty se staly jedním z nejpoužívanějších materiálů současnosti. Pro různá odvětví průmyslu představují nenahraditelnou surovinu s širokou škálou možností využití, a to zvláště díky jejich vlastnostem a možnosti modifikace na základě požadavku. Jedná se o suroviny často ekonomicky výhodnější než jejich alternativy (papír, sklo, kov) a (nejen) proto objem vyrobeného plastového materiálu neustále roste.

Přes všechny kladné aspekty však plasty představují také určitá rizika. Ve chvíli, kdy plastový výrobek splní svou funkci, se stává odpadem a je třeba jej zlikvidovat. Při špatném způsobu nakládání s odpady končí na skládkách nebo kontaminuje životní prostředí. Vzniká tak nutnost hledat a praktikovat optimální, bezpečné a ekologické kroky při jeho likvidaci. Problém také představuje spotřeba fosilních surovin pro výrobu „panenských“ plastů vzhledem k jejich vyčerpatelnosti a neobnovitelnosti.

Jako vhodné řešení obou problémů se jeví intenzivní recyklace plastového odpadu. Tato práce se proto zaměřuje na problematiku recyklace jednoho z nejvíce produkovaných plastů – polyethylentereftalátu (PET), a to ve formě PET lahví.

PET je termoplast s rozsáhlým spektrem aplikací. Jedny z nejvýznamnějších produktů jsou obaly používané v potravinářském průmyslu – PET lahve. Jelikož se jedná o jednorázový typ plastového výrobku (tj. produkt s určením pro jednu primární aplikaci s krátkou dobou užívání), je kladen velký důraz na ekologické zacházení s generovaným odpadem.

Přestože je PET velmi dobře recyklovatelný (a to i ve více cyklech), v praxi může být recyklace komplikována některými faktory. Jedním z problémů je kontaminace PET recyklátu jinými materiály, než je samotný PET, které mohou mít vliv na fyzikálně-chemické vlastnosti výsledného recyklátu. Jejich obsah je proto nutné v PET recyklátu minimalizovat. Zavedení účinných technologií pro odstranění kontaminace při recyklaci PET je podmíněno identifikací kontaminantů. Analýza a určení charakteru nečistot mohou vést k lepší úpravě separačních postupů a technologií při recyklaci, tím pádem k oddělení většího množství nečistot od PET recyklátu.

Teoretická část této práce se proto bude nejdříve zabývat popisem a vlastnostmi PET. Dále bude pojednáno o recyklaci PET, druzích recyklace a o výrobcích z PET recyklátu. Následující část bude zaměřena na proces fyzikální recyklace ve společnosti PETKA CZ, a. s. a stručný popis jednotlivých technologií a separačních zařízení. Dále budou popsány nejběžnější typy plastů, které se mohou v PET recyklátu vyskytovat jako kontaminanty. Nakonec bude popsán princip metody infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací technikou zeslabeného úplného odrazu (*attenuated total reflection*) (dále jen FTIR-ATR) a důvod výběru metody pro analýzu plastových kontaminantů.

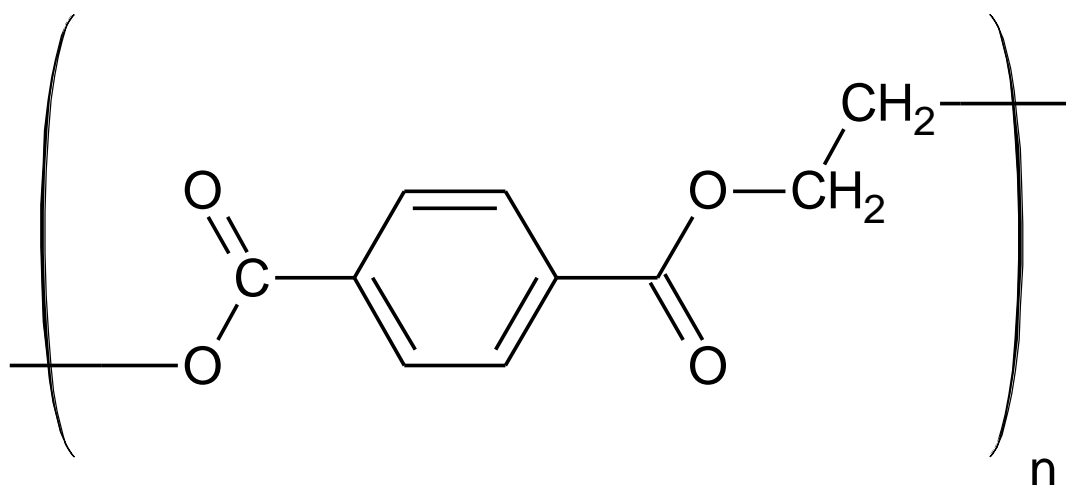
V experimentální části budou analyzovány a identifikovány vzorky plastových kontaminantů. Analýza neznámých vzorků kontaminantů bude prováděna metodou FTIR-ATR. Ze získaných dat vznikne knihovna kontaminantů, která se bude využívat pro zvýšení efektivity separace při recyklaci PET. Budou také diskutovány možné zdroje kontaminace. Tato zjištění povedou k výrobě čistějšího, kvalitnějšího a ekonomicky hodnotnějšího recyklátu.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Vlastnosti polyethylentereftalátu

PET (polyethylentereftalát) je polyester, tedy polymer obsahující esterovou vazbu (struktura viz Obrázek 1). Může být jak semikrystalický, tak i amorfní [1]. PET je termoplastický polymer, který lze po zahřátí libovolně tvarovat, přičemž daný tvar si tento materiál po zchladnutí zachovává. Pro jeho recyklaci je důležité, že se dá proces tvarování provádět opakovaně [2; 3].

Syntéza PET probíhá polykondenzací kyseliny tereftalové a ethylenglykolu [3; 4]. Polymerizace probíhá za přítomnosti katalyzátoru, velmi často využívaným katalyzátorem je oxid antimonitý [4].



Obrázek 1: Chemický vzorec PET [1].

PET je materiál s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi (základní vlastnosti viz Tabulka 1). Amorfní forma velmi dobře propouští světlo. Při působení vyšších teplot může docházet k hydrolyze esterické vazby. Uplatnění nachází např. v textilních produktech a jako polymerní výztuže [1]. PET vlákna v porovnání s vlákny z polyamidů rychleji schnou a jsou málo mačkové oproti vlně. Další aplikací jsou folie, které jsou mimořádně mechanicky pevné, pružné a tepelně odolné, čiré. Důležitou surovinu představuje PET pro výrobu lahví [3]. Obecně je používán v mnoha dalších aplikacích a odvětvích průmyslu (např. v automobilovém průmyslu, v biomedicínských produktech, membránách i kompozitech) [5].

Tabulka 1: Vlastnosti PET [1].¹

Teplota zesklennění [°C]	Teplota tání [°C]	Hustota [g·cm ⁻³]
75	250–260	1,27–1,37

Spotřebitelsky nejvíce známá aplikace PET jsou tzv. PET lahve, které se vyrábí vyfukováním tzv. preforem – polotovárů ve tvaru zkumavky (viz Obrázek 2) [6]. Hotové výrobky se používají pro skladování nápojů a jiných kapalin potravinářského i nepotravinářského charakteru [5]. PET je díky svým vlastnostem velmi vhodným materiálem pro výrobu lahví [7] – jen v roce 2017 jich bylo uvedeno na evropský trh přes 3,3 milionů tun [8]. Materiál snese díky mechanické odolnosti vysoký tlak sycených nápojů [6]. Nepropouští plyny ani vlhkost, a navíc

¹Přesná hodnota některých fyzikálních vlastností se odvíjí od stupně krystalinity polymeru [1].

láhev odolává rozbití a je velmi lehká (oproti skleněným lahvím) [5; 7]. Neobarvený PET je čirý, což umožňuje výrobcům široké možnosti designu láhve [6; 7]. Navíc je PET plně recyklovatelný [6].

Pro úpravu či vylepšení některých vlastností PET lahví jsou do polymeru přidávány aditiva [9]. Přestože výrobci často uvádějí, že řada aditiv se v PET příliš nepoužívá, některá se v PET lahvích přece jen vyskytují [9; 10]. Jedná se např. o absorbenty UV záření [11] či aditiva snižující koncentraci acetaldehydu v PET [4]. Lahve neobsahují plastifikátory (jako např. kyselinu ftalovou). Významnou chemickou látkou, která se v lahvích nachází a je předmětem regulací, je antimon. Ten se do materiálu dostává již při procesu polymerizace. Oxid antimonitý představuje nejšíře využívaný katalyzátor pro syntézu PET [4].

Výhodou z hlediska uchování obsahu láhve je i odolnost PET vůči degradaci. Tato vlastnost je příčinou problému tehdy, naplní-li obal svou původní funkci a stává se z něj odpad. Uvádí se, že v přírodě je PET lahev plně rozložena v časovém horizontu padesáti až osmdesáti let [12]. Reálná a jednoznačná data o době degradace však k dispozici nejsou. Vzhledem k velkému objemu produkce PET lahví není možné téma pomalé degradability ignorovat. Ověřenou variantou redukce a znovuvyužití plastového odpadu je jeho recyklace [13].



Obrázek 2: Preformy na výrobu PET lahví [10].

2.2. Recyklace PET

Jak již bylo zmíněno, nesnadná degradabilita PET odpadu společně s jeho velkoobjemovou produkcí vedou ke snahám odpad znovu využít. Negativním efektem, který může vznikat např. při neregulovaném odhazování odpadu v přírodě (tzv. *littering*), je rozklad velkých plastových objektů na menší fragmenty. Při tomto procesu vznikají tzv. mikroplasty (částice plastů menší než 5 mm). Tyto mikroskopické fragmenty představují velký ekologický i environmentální problém [14].

Motivací k efektivnímu zpracování PET odpadu je také úspora fosilních zdrojů, které jsou využívány na produkci panenského PET. Obecně se udává, že na výrobu plastů v Evropě připadá 4 až 6 % celkového využití fosilních surovin [15]. Recyklací dochází k vytváření nových materiálů (popř. surovin či energie v závislosti na typu recyklace). Dochází tak k omezení negativních efektů produkce a spotřeby PET obalů [16]. Vhodné technologické postupy při recyklaci navíc dokážou zajistit recyklát o podobné kvalitě jako panenský PET [7]. V současné době je proto panenský PET nahrazován i v potravinářském sektoru [17]. Podle směrnice EU by měl představovat v roce 2025 podíl recyklátu v každé PET lahvi 25 % [18].

Vzhledem k tomu, že se dá PET recyklovat opakovaně a dá se z něj i po recyklaci vyrábět široká škála výrobků, je PET vysoce ceněným plastovým odpadem. Praktickou a cennou komoditou pro recyklaci jsou zejména PET lahve, a to z následujících důvodů:

- použité PET lahve jsou celosvětově snadno dostupným a oproti ostatním plastům často vyřídovaným odpadem;
- ze směsi svezeneho plastového odpadu se pak dají na linkách snadno manuálně i automaticky vytrídít;
- ostatní komponenty tvořící láhev (polyolefiny ve formě vršků a etiket) neomezují možnost recyklace a dají se od PET snadno oddělit [7]; v poslední době je však významná kontaminace etiketami z polyvinylchloridu (PVC) a gumou z vršků [17];
- transparentní PET vložky z transparentních lahví poskytují zpracovatelům široké možnosti v designu nově zpracovaného výrobku [7] (barevné a netransparentní vložky však tuto výhodu ztrácí) [17];
- do PET není nutné přidávat aditiva (jako např. plastifikátory, antioxidanty apod.), které by mohly představovat kontaminaci recyklátu [7] (v realitě však některá aditiva výrobci používají [10] viz kap. 2.1);
- je eliminována i kontaminace inkoustem, protože tisk se u naprosté většiny lahví provádí na nepolyesterovou etiketu;
- panenský PET je vždy ve *food-grade* kvalitě (vhodný pro styk s potravinami), nehledě na to, zda z něj bude vyrobena potravinářská či nepotravinářská aplikace – malý podíl kontaminace z jiného, než potravinářského průmyslu je tak přijatelný [7].

2.2.1. Sběr PET lahví v České republice

V České republice má sběr a třídění odpadů mnohaletou tradici [19]. Prvotní třídění odpadu je prováděno na úrovni obcí a měst, kde obyvatelé třídí domácí odpad do příslušných barevně rozlišených odpadních kontejnerů (např. modrý na papír, žlutý na plast) umístěných na veřejných prostranstvích [20; 21]. Podle údajů z konce roku 2019 se na území České republiky nacházelo 206 tisíc nádob na plastový odpad [22]. Třídění směsného odpadu v místě vzniku (tedy již v samotných domácnostech) je nejsnadnějším způsobem separace odpadu dle druhu [20]. V některých obcích se plasty vytrídíují společně s nápojovými kartony nebo kovy [21; 23]. Systém sběru se liší v závislosti na dané obci [21].

Plasty se poté ze sběrných nádob sváží svozovými vozidly na dotříd'ovací linky. Svozová vozidla jsou speciálně upravena pro svoz odpadů. Disponují např. lineárním stlačováním, které zaručí zmenšení objemu sváženého odpadu. Po svozu dochází na dotříd'ovacích linkách k roztříděná plastů a separaci příměsí, které do odpadové nádoby nepatří. Třídění je obvykle prováděno manuálně zaměstnanci linek. Kromě odstranění nežádoucích objektů probíhá třídění plastového odpadu do několika kategorií, a to na PET, duté obaly, fólie, polystyren, směsný plast a další [22]. U PET lahví, které jsou pro zpracovatele atraktivní komoditou [7], probíhá zároveň třídění na základě barvy. Takto vytríděný odpad je poté určen k zpracování a jinému využití [22].

2.2.2. Druhy recyklace PET

2.2.2.1. Mechanická recyklace

Pro tento způsob recyklace lze použít i termín fyzikální recyklace, popř. sekundární recyklace. Jedná se o způsob zpracování odpadu mechanickým způsobem [16]. Většinou vzniká druhově jednotný recyklát [24]. Mezi jednotlivé kroky se obvykle řadí dotřídění odpadu, separace kontaminantů, drcení a praní [16; 25]. Jako finální produkt vzniká plastová drť (tzv. *flakes* nebo vločky), které mohou vstupovat do procesu regranulace [25].

Regranulace je krok, který může po recyklaci následovat, není však nutný [25]. Proces je používán zejména v případě PET vloček, které jsou určeny pro využití v potravinářském průmyslu [17]. Obecně se však používá v případě vyšších požadavků na čistotu recyklátu [10]. Produkt je roztaven za současného odfiltrování nečistot. Filtrací jsou separovány takové kontaminanty, které za daných podmínek nejsou roztaveny (např. dřevo, papír) [25]. Některé nečistoty mohou být odstraněny i odpařováním [17]. Výsledkem regranulace jsou pelety, malé útvary kulovitého nebo válcovitého tvaru (viz Obrázek 3, kde je regranulát ve srovnání s panenským PET) [17; 25].

V EU je mechanická recyklace PET lahví nejšířejí využívaným způsobem recyklace [4]. Navíc momentálně představuje menší ekologickou zátěž než chemická recyklace [26]. Významnou komplikací je však míra čistoty a homogenita odpadu. Heterogenita vstupního materiálu a jeho kontaminace zvyšují náročnost procesu. Pro mechanickou recyklaci je tedy vhodný pouze jednodruhový plastový odpad o velmi nízké úrovni kontaminace. Další nevýhodou je degradace recyklátu s každým podstoupeným recyklačním cyklem např. vlivem mechanického stresu [16].



Obrázek 3: Srovnání pelet panenského PET (vlevo) a regranulátu PET (vpravo) [10].

2.2.2.2. *Chemická recyklace*

Princip chemické recyklace spočívá v rozkladu vysokomolekulárních látek na monomery, které mohou být opět použity pro syntézu daného plastu. Byť je chemická recyklace teoreticky ideálním procesem pro dosažení cirkulární ekonomiky a udržitelného rozvoje [16], tyto technologie jsou zatím finančně náročné na efektivní realizaci i provozování [27].

PET jako polymer s esterovou funkční skupinou lze depolymerizovat např. působením vody, alkoholu apod. Polykondenzace, kdy vzniká z monomerů polymer, je reverzibilní. Je tak možné také tuto reakci obrátit a získat požadované nízkomolekulární látky. Momentálně nejvhodnějším chemickým procesem pro recyklaci PET je glykolýza. Metoda však není široce využívaná, kvůli již zmíněné náročnosti na energii. Dalšími problémy jsou nutnost použití ekologicky závadných katalyzátorů, nízké výtěžky a celkově obtížnost daného procesu. Negativní aspekty recyklace metodou glykolýzy sice byly individuálně vyřešeny, ale nedaří se je eliminovat všechny najednou. Předpokládá se však, že s rozvojem a hledáním nových technologií bude možné brzy realizovat efektivní a environmentálně příznivou chemickou recyklaci PET [16].

2.2.2.3. *Surovinová recyklace*

Při surovinové recyklaci podstupuje polymer rozklad na směs uhlovodíků. Ty jsou dále využívány ve formě energeticky využitelného plynu, topných olejů nebo druhotných surovin pro petrochemický průmysl. Významnou výhodou surovinové recyklace je fakt, že do procesu může vstupovat silně znečištěný heterogenní materiál, který by byl jinak nerecyklovatelný. Získané frakce uhlovodíků mají navíc široké využití [28].

2.2.2.4. *Energetické využití*

Energetické využití je voleno v případě, že je plastový odpad těžko separovatelný nebo jsou jeho sběr a třídění neefektivní z hlediska nákladů. Je alternativou i pro zdraví škodlivý odpad a nebezpečný odpad [29]. Jedná se o řízený proces spalování. Vzniká popel, kouř a teplo. Teplo

může být dále využito k produkci energie [30]. Oproti skládkování lze spalováním redukovat objem odpadu až o 90 %; z hlediska hmotnosti dochází k redukci až o 75 % původní váhy odpadu [31]. Pokud není možné odpad recyklovat, preferuje se energetické využití před skládkováním [29].

Přestože jsou požadavky na předběžné zpracování odpadu nízké [29], existují materiály, jejichž spalování může být problematické. Jedná se zejména o materiály s obsahem chloru [32]. V případě PET lahví jsou to zvláště etikety z PVC [10]. Dále ve spojitosti s energetickým využitím existují obavy týkající se znečištění vzduchu. Při spalování totiž mohou vznikat emise těžkých kovů, dioxinů, polychlorovaných bifenyků a jiných perzistentních organických polutantů [33]. Z tohoto důvodu existují pro spalovny nařízení týkající se maximálních limitů generovaného znečištění [34].

Přestože je spalné teplo některých plastových materiálů srovnatelné s konvenčními palivy (benzín, uhlí atd.) [35], problémem je různorodost přijímaného odpadu a v důsledku toho fluktuační v množství získané energie [36]. Navíc investice a náklady na provoz spaloven bývají vysoké [30].

2.2.2.5. Skládkování

Skládkování je považováno za problematické, jelikož je spojené s řadou environmentálních, ale i dalších rizik. Je náročné na prostor a pro danou lokalitu představuje skládka ekologická rizika. Při dekompozici odpadu dochází ke znečištění životního prostředí vlivem vzniku skládkových plynů a průsakové vody. Kontaminace složek životního prostředí může znamenat negativní dopady na lidské zdraví, a tak je přítomnost skládky obyvateli přijímána obvykle spíše negativně [37].

Přesto je tato varianta velmi hojně využívaná, protože je v současné době nejlevnější [37; 38]. Podle údajů zpracovaných Conversio Market & Strategy GmbH bylo v České republice v roce 2018 vyvezeno na skládky 40 % plastového odpadu (recyklováno bylo necelých 40 %) [39].

2.3. Výrobky z recyklátu

Zpracovaný recyklát lze v závislosti na kvalitě požadované zpracovatelem použít ve:

- stavebním průmyslu (jako izolační materiály, součást střešních krytin, plastbetony apod.);
- automobilovém průmyslu (výbava vnitřního prostoru vozidla atd.);
- zdravotnickém průmyslu (hygienické dámské potřeby, pleny, ochranné zdravotnické pomůcky) [40];
- potravinářském průmyslu (PET lahve; je však potřeba zajistit velmi nízké limity kontaminace recyklátu, čehož lze dosáhnout mj. regranulací, viz 2.2.2.1 [10]);
- obalovém průmyslu (vázací PET pásy [40] (viz Obrázek 4), obaly na ovoce, zeleninu, drogerii [10]);
- textilním průmyslu (PET stříž [10], výstelky oděvů či spacích pytlů, flís [40]).



Obrázek 4: Vzorky vázacích PET pásek [10].

2.3.1. Vlákna

Finální použití vláken z PET recyklátu určují jejich vlastnosti, jako je velikost a průměr vlákna. Vlákna o větším průměru jsou používána mj. jako vycpávka spacích pytlů či hraček. Z tenčích vláken se vyrábí kupříkladu flísová tkanina, která je materiálem na výrobu flísových svršků (mikiny apod.). Takové syntetické látky mohou obsahovat až 100 % recyklátu. Jedna flísová mikina může být vytvořena z 25 PET lahví [41]. Vlákna se dále používají např. na koberečky do aut a hygienické potřeby [10].

2.3.2. Obalové materiály

PET recyklát je používán v obalovém průmyslu, a to na výrobu např. kartonů na vejce, obalů na drogistické zboží či znova na PET lahve [41]. Zajímavou metodou je recyklace *bottle-to-bottle*, kdy se z vytríděných PET lahví z potravinářského průmyslu vyrábí recyklované PET lahve využívané opět pro potravinářské účely [7]. Tento druh recyklace lze označit pojmem *closed loop* recyklace [41; 42]: recyklát je zpracován na obdobnou aplikaci, kterou měl v původní fázi svého životního cyklu [42] a současně zůstává nadále recyklovatelný [41]. Jsou tak navíc eliminovány nežádoucí jevy, jako např. nutnost nalezení využití pro recyklát či používání velkého množství panenského plastu na výrobek [42].

2.4. Proces fyzikální recyklace v PETKA CZ, a. s.

Firma PETKA CZ, a. s. zpracovává PET lahve fyzikální recyklační technologií horkého praní. PET lahve jsou během tohoto procesu nadrceny a zbaveny nečistot. Produktem jsou tzv. PET vločky, tedy vyprané podrcené fragmenty PET lahví. PET vločky jsou surovinou v potravinářských i v ostatních odvětvích průmyslu [17].

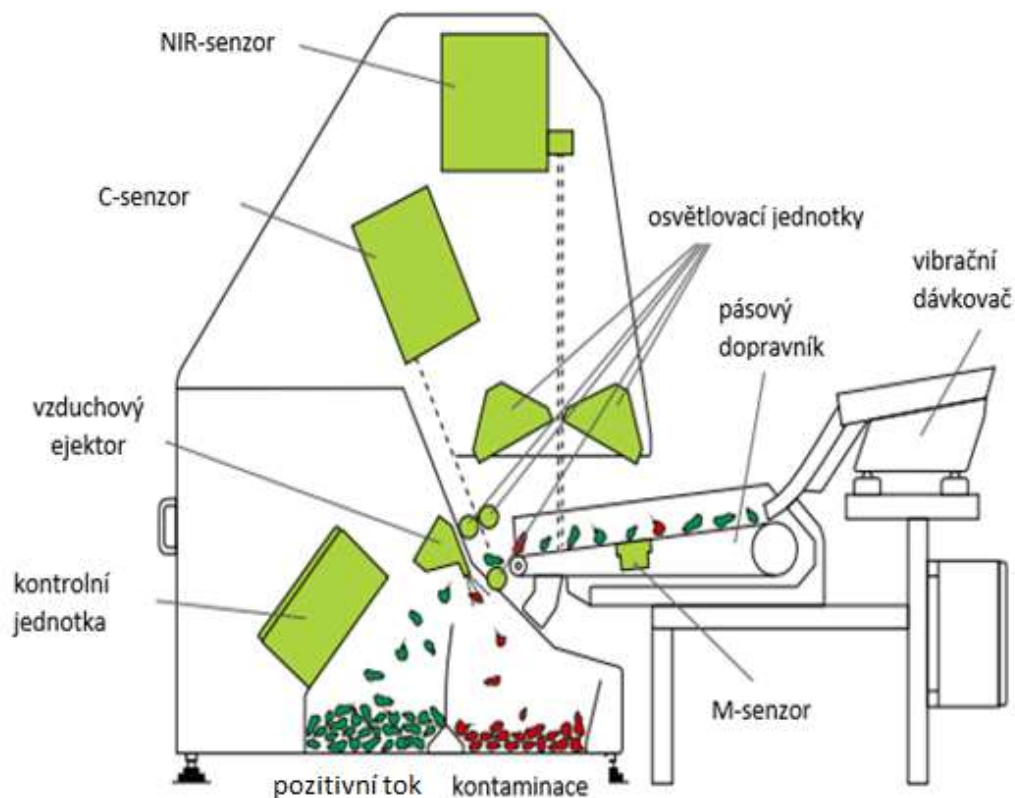
2.4.1. Příjem odpadu a jeho dotřídování

Odpad je dodáván z třídících linek již vytríděný a má obsahovat pouze PET lahve. Ty jsou dodávány ve formě balíků, které vznikají slisováním lahví a jsou svázané kovovými lany [17]; případně jsou plochy balíků opatřeny kartonem (viz Obrázek 5) [10]. Lahve jsou rozděleny podle barev. Balíky jsou rozdruženy a poté jsou jednotlivé lahve přepravovány pásovým dopravníkem k fázi dotřídění. V této fázi je nutné rozdružený odpad dotřídít, jelikož dodávané balíky mohou obsahovat kromě PET lahví i jiné materiály (jiné plasty, kovy apod.) [17].



Obrázek 5: Slisované balíky PET lahví [10].

Dotřídování je prováděno ručně a strojně. Nejprve je provedeno strojní dotřídování pomocí zařízení VARISORT (viz Obrázek 6). Toto zařízení pracuje na principu multispektrální analýzy odrazu světla, prostřednictvím které je definována chemická povaha lahve. Pomocí senzorů a nastavených parametrů separuje materiály považované za kontaminanty od pozitivního toku – tedy PET, polypropylenu (PP) a polyethylen (PE), které mohou vstoupit do procesu recyklace. Další výstup tvoří PVC a kovy. Poslední výstup sestává z ostatních plastů [17].



Obrázek 6: Schéma zařízení VARISORT [43].

Po strojním třídění je pozitivní tok dotřídován manuálně. Ruční dotřídování spočívá ve vizuální kontrole pracovníky výroby [17]. Vytrídí se PVC, hliník, papír, guma atd. Kontroluje se i znečištění lahví. Oproti strojní separaci je manuální dotřídování ekonomicky náročnější, jelikož je nutné zaměstnat několik pracovníků namísto instalace jednoho stroje. Pracovníci však mohou být eventuálně poučeni o typech lahví, které obsahují kontaminaci (např. gumička ve vršku), která je přístrojem VARISORT nedetekovatelná [10].

Do dalšího procesu je přípustný pouze vstup výrobků, které se skládají z PET, PP a PE. Pro zajištění separace kovů jsou na několika místech při následném zpracování v lince umístěny permanentní magnety [17]. Právě dotřídování je nekritičtější fáze pro odstranění kontaminace [44].

2.4.2. Drcení, preflotace, praní a sušení

Drcení materiálu probíhá v drtičích – mokřých mlýnech. Linka je vybavena dvěma drtiči. Vzniká frakce nadrcených PET vloček o velikosti 10 až 14 mm. Velikost však může být větší nebo menší podle požadavků spotřebitele [17].

Podrcené PET lahve jsou transportovány do flotačního tanku [17]. Zde dochází k separaci PE a PP (tedy etiket a víček, v souhrnu nazývaných jako polyolefiny) od PET [45]. Preflotace funguje na jednoduchém principu rozdílných hustot [17]. Polyolefiny o nižší hustotě, než je hustota vody, vyplavou na hladinu, zatímco PET o vyšší hustotě klesá ke dnu. Polyolefiny jsou pak určeny k dalšímu využití. Metoda je velmi účinná pro separaci materiálů lehčích než voda. Avšak nelze ji využít v případě materiálů, které mají podobnou hustotu jako PET a klesají s ním ke dnu tanku. Z tohoto důvodu je nutné např. PVC vytrdit již před vstupem do třídící linky.

Poté je obtížné jej od PET v procesu recyklace oddělit stejně jako ostatní materiály o vyšší hustotě než voda [46].

Následuje proces horkého praní ve frikční pračce. Za použití chemikálií je frakce mechanickým čištěním zbavena lepidel a jiných nečistot. Mokrý vložky jsou v odstředivce zbaveny vody a poté se dosušují v sušičce [17]. PET vložky musí být důkladně vysušeny, jelikož voda zapříčiňuje při zpracování hydrolyzu tohoto polymeru [44].

2.4.3. Zařízení Polymer Separation System Purifier CN 1024

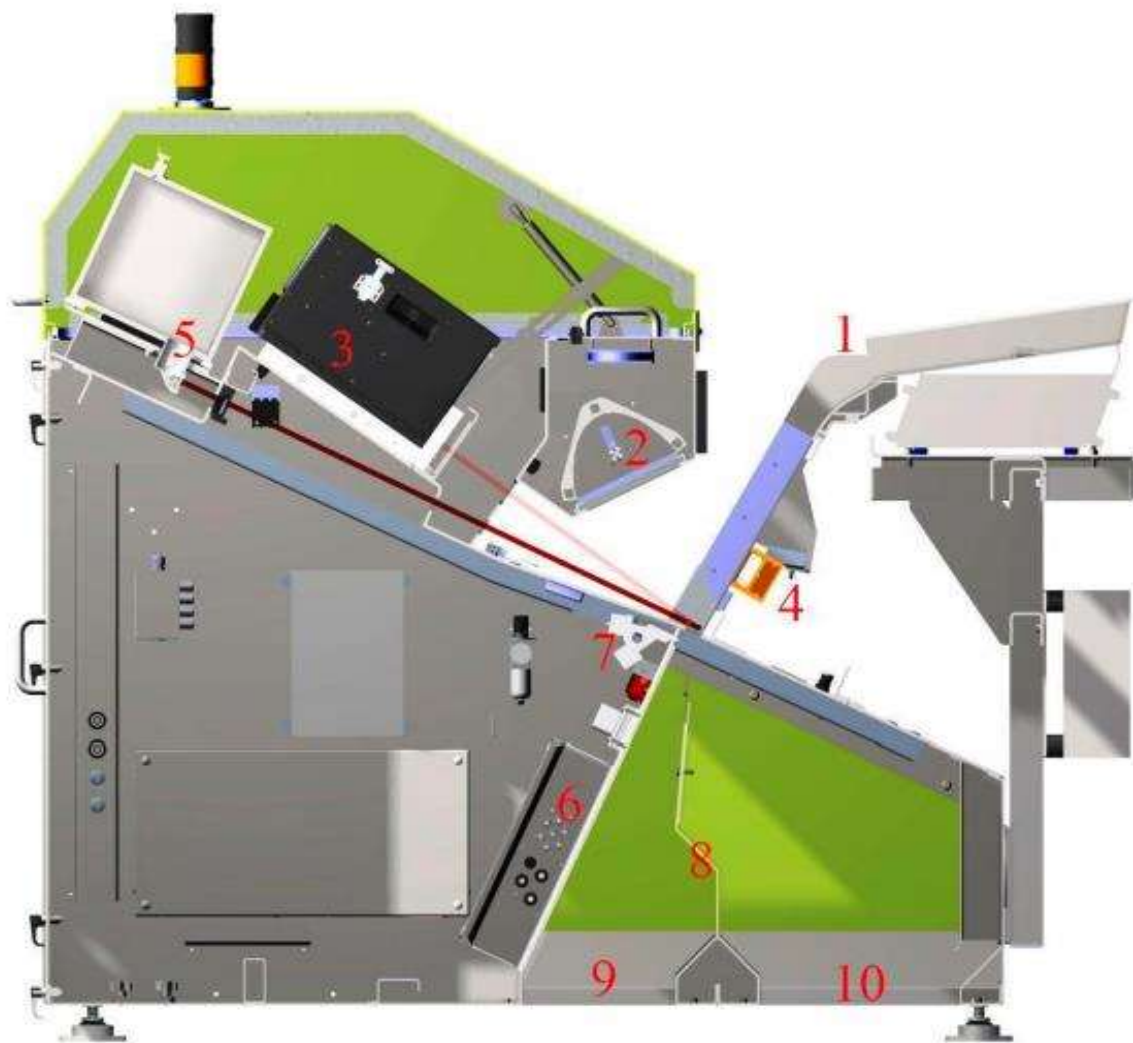
Vzhledem k vysokým nárokům na dekontaminaci výrobku jsou vysušené PET vložky strojně vytríděny v zařízení Polymer Separation System Purifier CN 1024 (S+S) (schéma zařízení viz Obrázek 7). Technologie se využívá zejména při výrobě PET vložek pro potravinářské aplikace a pro recyklaci *bottle-to-bottle* pro účinné přečištění z důvodu přísných požadavků na kontaminaci recyklátu [17]. Systém se však používá i při výrobě recyklátu určeného pro technické aplikace, kde musí být čistota PET vložek také vysoká [10].

Přístroj může být vybaven až třemi snímači v závislosti na aplikaci. Jsou jimi N multispektrální senzor pro detekci cizích částic a plastových příměsí, C optický senzor na detekci barev a M indukční senzor pro detekci kovů [17].

Materiál je přiváděn potrubím na vibrační žlab. První je prováděna detekce kovů. Jejimi součástmi jsou senzor kovů a digitální signální procesor. Senzor kovů sestává z vysokofrekvenčních generátorů a elektromagnetických detektorů o vysoké citlivosti, kterými snímá proudící částice, tedy PET vložky spolu s kontaminací. Zpracované informace putují na digitální signální procesor. Jedná-li se o kovovou nečistotu, je nečistota vyřazena vzduchovou tryskou [45].

Dále putuje materiál přes paprsek bílého světla. Po interakci s částicí záření putuje ke kamerovému boxu, kde dochází k rozkladu paprsku na základní barvy (modrou, červenou a zelenou). Obraz zpracovává program, který vyhodnocuje, zda se jedná o barevnou nečistotu. Je-li tomu tak, je nečistota odstraněna z pozitivního toku [45].

Částice jsou poté ozařovány osvětlovací jednotkou PURIFIER-N. Jednotka je tvořena halogenovými tyčovými žárovkami, které generují záření s velkým podílem infračerveného spektra. Tímto způsobem je zajištěno vhodné osvětlení pro multispektrální analýzu. Multispektrální kamera získává kompletní blízké infračervené spektrum (NIR). Data jsou vyhodnocena spektrální jednotkou, která dané spektrum přiřazuje druhu plastu. Zjištěné informace posléze zpracovává kamerový box, který vyhodnocuje vhodnost materiálu. V případě, že je materiál určen jako kontaminant, je pomocí vzduchové lišty vyřazen [45].



Obrázek 7: Zařízení Polymer Separation System Purifier včetně popisu. 1: vstup materiálu, 2: prosvětlovací duté zrcadlo, 3: kamerový box, 4: senzor kovů, 5: NIR senzor, 6: skříňka řízení ventilů, 7: vzduchová lišta, 8: oddělovací štít, 9: pozitivní tok, 10: vyřazený materiál (kontaminanty) [45].

Separace kontaminantů je zprostředkována vzduchovou lištou, a to odkloněním částice z letové dráhy pomocí tlaku vzduchu. Ten může dosáhnout vysoké síly za účelem odstranění těžších částic (např. sklo). Dráhu průchodu požadovaného vyčištěného materiálu a nečistot separuje nastavitelný oddělovací štít. Jeho nastavitelnost umožňuje pracovníkům přizpůsobit dráhy kontaminantů i pozitivního toku podle konkrétních podmínek. Do S+S mohou vstupovat pro zaručení kvality třídění pouze suché částice bez vnějšího znečištění (např. prach). Průběžně musí být ze systému odstraňovány usazeniny, které mohou negativně ovlivňovat účinnost separace [45].

2.4.4. Plnění do big bagů, analýza, skladování a export

Přečištěné PET vločky (viz Obrázek 8) jsou sesypávány do tzv. Big Bagů – vaků o hmotnosti maximálně 1000 kilogramů. Při plnění Big Bagu je obsah vloček z důvodu kapacity vaku setřásáním průběžně sesypáván. Analýza kvality výroby je vyhodnocována ze vzorků, které jsou odebírány z Big Bagu prostřednictvím automaticky řízeného odběrného zařízení. Dochází k odběru tří vzorků z různých částí Big Bagu. V případě nutnosti pozdějších analýz se odběr vzorku provádí napichovací jehlou. Výsledky analýzy určí jakostní třídu PET vloček [17].



Obrázek 8: Barevné PET vločky (tzv. tmavý mix) [10].

Při stanovení kvality výsledné suroviny jsou analyzovány různé vlastnosti recyklátu, jako je vlhkost, podíl jinobarevných částic a opaků, prachové podíly, a především podíl kontaminantů. Pro analýzu obsahu nečistot (PVC, polyolefinů a jiných plastů) je odváženo po 100 gramech PET drtě do tří misek. Misky se vzorky jsou poté přemístěny do sušárny, kde jsou sušeny 30 až 40 minut při teplotě 200 °C. Po uplynutí stanovené doby sušení jsou misky ze sušárny vyjmuty a nechají se vychladnout. Ze vzorků PET drtě jsou vybrány nečistoty (např. papír a hliník) [46]. Nečistoty jsou rozpoznávány vizuální kontrolou laborantem [10]. PVC částice jsou odlišitelné od ostatních plastů díky charakteristickému tmavnutí po zahřátí [45]. Podíl nečistot (PVC, ostatní plasty, ostatní nečistoty) v PET drti se udává v ppm [46].

Označené Big Bagy jsou skladovány ve skladech a následně exportovány klientům [10; 17]. Kapacita firmy PETKA CZ, a. s. umožňuje zpracování až 550 tun PET lahví měsíčně [47].

2.5. Kontaminace PET drtě

Za kontaminaci PET drtě je považován kterýkoliv materiál kromě PET. Kontaminanty vstupují do recyklátu v různých fázích existence materiálu a jsou různého původu. Zdroje nečistot jsou:

- proces sběru;
- nevhodné sekundární využití PET lahve;
- zbytky potravin nebo chemikálií;
- plastové (jiné než PET) komponenty PET lahve aj. plastové obaly;
- přípravky a látky použité v procesu recyklace;
- fyzikální a chemické změny materiálu vyústující v jeho degradaci [17].

Dokonalé vytřídění PET lahví je v současné situaci obtížné, což pramení již ze systému sběru plastového odpadu. Plasty jsou obyvateli vytřídovány do veřejně přístupných žlutých kontejnerů na plastový odpad (viz kapitola 2.2.1). Nádoby jsou určeny pro všechny druhy plastových materiálů, a tak vzniká heterogenní směs odpadu, kterou je nutné vytřídít. Mimo plasty se však v odpadu z kontejnerů mohou vyskytovat i neplastové příměsi. Ty mohou být buď součástí plastového výrobku (hliníkový plíšek na hrdle PET lahve), nebo mohou být do kontejneru na plasty vyhozeny z důvodu nevědomosti, neopatrnosti nebo úmyslu obyvatele [17].

Při procesu sběru se kontaminanty dostávají do recyklátu nedostatečným dotříděním na třídících linkách [17]. Ať už z nevědomosti, nebo úmyslným navyšováním hmotnosti balíků jinými materiály [10]. Kontaminace může také nastat při transportu vstupního materiálu k lince. V některých případech se může kontaminant vyskytnout přímo uvnitř lahve (např. brčka, zbytky cigaret, ale i drobné materiály, které se dostaly do neuzavřené lahve během procesu třídění). Tento druh znečištění nelze detekovat strojním třídícím zařízením, jeho separace probíhá při ručním třídění [17].

Nečistoty dále mohou pocházet z nevhodně designovaných lahví, ze kterých jsou cizorodé materiály obtížně odstranitelné. Lahve mohou obsahovat zbytky potravin nebo chemikálií, které také představují kontaminaci PET materiálu [17]. V tomto ohledu je znepokojující nevhodné sekundární využití lahve uživatelem. V takových případech spotřebitel po konzumaci původního obsahu lahev naplní chemikáliemi, např. zahradní chemií, čisticími prostředky pro domácnost apod. [7].

Mezi nejčastější kontaminanty, které se vyskytují v procesu recyklace, patří:

- hliník aj. kovy;
- guma;
- papír;
- a ostatní plasty [10; 17].

2.5.1. Hliník a jiné kovy

Kontaminace hliníkem (příklady viz Obrázek 9) vzniká v důsledku nevhodného designu etiket a vršků PET lahví. Stopové množství hliníku lze nalézt např. v etiketách pivních lahví, ve formě potahů hrdel se potom používá mj. u lahví na víno [17]. Hliník se však může ve vstupním materiálu vyskytovat i důsledkem nedostatečného vyřídění odpadu. Jeho separace může být provedena ručně pracovníkem dotřídňovací linky nebo strojně systémem S+S [10]. Oproti ostatním kovům hliník není magnetický. Pro jeho separaci nelze využít zařízení na bázi permanentních magnetů [45].

Kontaminace ostatními kovy vzniká z drátů, kterými jsou vázány slisované balíky PET lahví, ale také z kovových součástí (vršky pivních lahví, šroubky atd.) [10]. Separace je obdobná jako u hliníku. V případě magnetických kovů jsou používány separační zařízení na bázi permanentních magnetů [45].



Obrázek 9: Příklady původu kontaminace hliníkem [10].

2.5.2. Guma

Guma se vyskytuje ve vstupním materiálu poměrně často [10]. V některých případech se může do procesu dostat guma z dopravních pásů z důvodu stárnutí materiálu [45]. V posledních letech představují problém tzv. „pitíčka“ určená pro děti. Guma zabírající vylití obsahu lahve (viz Obrázek 10) se odstraňuje velmi komplikovaně. Po oddělení od vršku přechází buď do frakce polyolefinu, kde opět představuje kontaminaci, nebo zůstává ve frakci PET. Nejúčinnějším řešením je tak tyto lahve vyřadit jako nevhodné k recyklaci, byť jde o zřetelné materiálové ztráty [17]. K vyřídění dochází na dotřídňovací lince a případné gumové nečistoty ve vločkách lze odstranit systémem S+S, ale ne vždy systém zachytí všechny [45].



Obrázek 10: Guma ve vršcích od "pitiček" [10].

2.5.3. Papír

Papírová kontaminace pochází ze vstupního materiálu [46] nebo z balíků slisovaných PET lahví, které jsou lisovány s kartony na bocích (viz Obrázek 5). Kartony plní funkci bariéry při lisování a jsou odstraňovány před vstupem do linky [10]. Významný zdroj papírové kontaminace jsou papírové etikety. Na lahvi je etiketa přilepena lepidlem. K oddělení tak dochází ve frikční pračce, kde se za vhodných podmínek (hydroxid sodný, saponát, teplota) a současného tření vložek o sebe papír odstraní [46]. Některé kontaminanty, které se nepodaří separovat a stanou se součástí samotného recyklátu, lze následně odstranit při tvorbě pelet v procesu regranulace [25].

2.5.4. Ostatní plasty

Ostatní plasty (příklady viz Obrázek 11) se do procesu recyklace dostávají dvěma způsoby. První možnost je kontaminace vstupního materiálu, která se nedá vyloučit z důvodu způsobu sběru plastového odpadu. Často však nečistoty mají původ v samotném designu výrobku, tedy jsou přímo součástí plastové lahve. Mimo obvyklých materiálů, jako jsou etikety a vršky z polyolefinů, výrobci používají pro výrobu lahve polymery, jejichž separace je v procesu recyklace podstatně obtížnější [17]. Vzhledem k problematickému určování chemického složení lahve a jejích komponent a dynamickému vývoji designu PET lahví by bylo vhodné zkontrolovat složení každé nové lahve, která má podstoupit recyklaci. Toto opatření by mohlo minimalizovat potenciální kontaminaci PET drtě. Jeho důsledné provedení je však v praxi velmi komplikované až nereálné [10].



Obrázek 11: Příklady původu kontaminace jinými plasty [10].

2.5.4.1. Plasty oddělitelné preflotací

Tyto plasty lze snadno oddělit v procesu preflotace (viz kap. 2.4.2), jelikož jejich hustota je nižší než hustota vody. Jejich vstup do zařízení tak nepředstavuje z hlediska kontaminace PET drtě tak významný problém jako plasty, které se preflotací separovat nedají. Preflotací lze oddělit polyethylen (nízkohustotní i vysokohustotní) a polypropylen, které dohromady tvoří frakci polyolefinů [46].

Polyethylen (PE)

Polyethylen (PE) je semikrystalický termoplast [1], který vzniká polymerací ethylenu [3]. V závislosti na molekulové struktuře mají jednotlivé typy polyethylenu odlišné vlastnosti (viz Tabulka 2) [1]. Na základě hustoty se rozlišují dva základní typy polymeru: vysokohustotní (HDPE – *high density polyethylene*) a nízkohustotní (LDPE – *low density polyethylene*) PE. Vhodnější je však rozdělovat druhy polyethylenu na základě rozvětvení makromolekul. Platí, že HDPE je lineární, LDPE rozvětvený. Existují i další druhy, LDPE a HDPE jsou však nejvýznamnější [3].

Jedná se o materiál, který je za běžných teplot odolný vůči působení mnoha chemických látek [1]; problematický je kontakt s nepolárním rozpouštědlem. Je stabilní v širokém rozpětí teplot, v tenkých vrstvách je transparentní [3]. Jeho pevnostní charakteristiky jsou nízké, bez stabilizace je citlivý na UV záření a je vysoce hořlavý [1].

Tabulka 2: Vlastnosti HDPE a LDPE [1].

Polymer	Teplota tání [°C]	Hustota [g·cm ⁻³]
HDPE	130–135	0,940–0,960
LDPE	105–115	0,914–0,928

Vyrábí se z něj fólie, kanystry a jiné nádoby včetně nádrží [1], obalové materiály, hračky, domácí potřeby [3]. Dalšími aplikacemi jsou vodní a plynová potrubí. Používá se k povrstvování jiných materiálů, např. při výrobě nápojových kartonů tetrapak [1]. Z hlediska PET lahví se používá pro výrobu víček a etiket [10].

Polypropylen (PP)

Obecně jsou vlastnosti PP podobné vlastnostem HDPE. Na rozdíl od HDPE je PP méně odolný vůči mrazu a má velmi nízkou hustotu (viz Tabulka 3). Je chemicky odolný, pevný, tuhý a tvrdý a tvarovou stálost si zachovává i za vyšších teplot [1].

Tabulka 3: Vlastnosti PP [1].

Polymer	Teplota tání [°C]	Hustota [g·cm⁻³]
PP	160–176	0,905–0,920

Používá se na výrobky v automobilovém, strojírenském a spotřebním průmyslu. Dále na trubky a vodní armatury. Ve zdravotnickém průmyslu se z něj vyrábí součásti injekčních stříkaček aj. zdravotnická technika, a to díky jeho stálosti při sterilizačních teplotách. Další aplikací jsou polypropylenová vlákna a obalové materiály [1]. U PET lahví jsou běžné polypropylenové etikety [10].

2.5.4.2. Plasty neoddělitelné preflotací

Tyto druhy plastů nelze oddělit procesem preflotace (viz kap. 2.4.2). Důvodem je jejich hustota, která nabývá vyšších hodnot než hustota vody. Jejich vstup do procesu recyklace je tak problematický [46]. Kontaminaci je možné redukovat zařízením VARISORT nebo ručním přetříděním před vstupem do procesu recyklace. Poslední variantou je přetřídění PET vloček v zařízení S+S (viz kap. 2.4.3) na konci výrobního procesu. Přes veškerou snahu je však odstranění těchto plastových nečistot komplikované, proto je ideální kontaminaci odstranit ještě před vstupem na recyklační linku [10].

Polystyren (PS)

Polystyren, amorfni lineární termoplast [1], byl syntetizován již v roce 1839. Jedná se tak o jeden z nejstarších připravených syntetických polymerů. Dnes je (stejně jako PVC a polyolefiny) jedním z nejpoužívanějších polymerů [3]. Je pevný, křehký a světlo propustný (základní vlastnosti viz Tabulka 4). Je odolný vůči oxidaci, fotooxidaci však degraduje [1].

Tabulka 4: Vlastnosti PS [1].

Polymer	Teplota zesklenní [°C]	Hustota [g·cm⁻³]
PS	95	1,05

Aplikačně je vhodný pro výrobu nenáročného spotřebního zboží, např. misek, kelímků, hraček, aj. Široce využívaným je expandovaný (pěnový) polystyren, který se používá pro zvukovou a tepelnou izolaci ve stavebnictví, ale i jako ochrana v obalové technice. Existují i fólie z měkčeného PS [3]. PS se může vyskytovat i v etiketách PET lahví [17]. Je problematický, protože se jako kontaminace vyskytuje ve větší míře [45].

Polyvinylchlorid (PVC)

Jeho fyzikální i chemické vlastnosti (viz Tabulka 5) se liší v závislosti na výrobě a zpracování. Obecně je jeho významnou mechanickou vlastností pevnost v tahu, kterou vyniká. Chemická odolnost klesá s použitím změkčovadel [3]. Nutností je přídavek UV stabilizátorů [1]. Problémy při zpracování způsobuje jeho nevysoká tepelná stabilita [3]. Vliv světelného záření či vyšší teploty se projevují změnou barvy polymeru od žluté přes hnědou až po černou [48]. Jedná se o jeden z nejvíce produkováných plastů, protože náklady na jeho výrobu jsou poměrně nízké a dá se zpracovat prakticky všemi základními technologiemi. Je špatně hořlavý, což je velká výhoda z hlediska bezpečnosti [3]. Neměkčené PVC je aplikováno ve formě rour, okenních rámu, okapových žlabů apod. Měkčené PVC se používá na výrobu folií, izolací, těsnění, podlahovin, ubrusů a jiných výrobků [1].

Tabulka 5: Vlastnosti PVC [1].

Polymer	Teplota zesklenní [°C]	Hustota [g·cm ⁻³]
PVC neměkčený	85	1,38–1,55
PVC měkčený	50–65	1,16–1,35

Dále se používá v potravinářských aplikacích. Obavy však mohou vzbuzovat některá aditiva obsažená v PVC [49]. Jedná se zejména o ftaláty, které mají vliv např. na rozmnožovací ústrojí nebo játra. Evropský úřad pro bezpečnost potravin (EFSA) se problematikou ftalátů zabývá a existují hodnoty tolerovaného denního příjmu pro některé z nich [50].

V případě PET lahví je z PVC vyráběna tzv. celopotahovaná etiketa neboli rukávek. Výhodou PVC etikety je fakt, že se smršťuje a kopíruje tak tvar lahve (klasické polyolefinové etikety tuto vlastnost postrádají). Lahve s rukávky jsou pro spotřebitele designově zajímavější než lahve klasické. Proto je používání PVC etiket značně rozšířené a kontaminace tímto polymerem je významným problémem [45]. Lahve s celopotahovanou etiketou se preventivně vytřídí před vstupem na linku [10].

Přítomnost PVC v PET recyklátu představuje problém hlavně z důvodu vzniku chlorovodíku při degradaci PVC. Chlorovodík se chová jako katalyzátor, který způsobuje štěpení řetězců PET. Dále se kontaminace projevuje změnou zabarvení recyklátu [51].

Akrylonitril-butadien-styren (ABS)

Amorfní polymer, který vzniká kopolymerací akrylonitrilu, butadienu a styrenu, vyniká zvýšenou chemickou odolností a houževnatostí. Vlastnosti (viz Tabulka 6) se liší v závislosti na poměru tří složek kopolymeru. Je neprůhledný a odolává elektrostatickému výboji [1]. Materiál je možné galvanicky pokovit [3].

Tabulka 6: Vlastnosti ABS [1].

Polymer	Teplota zesklenní [°C]	Hustota [g·cm ⁻³]
ABS	105	1,05

ABS má velmi široké využití, např. v automobilovém, stavebním i spotřebním průmyslu. Bývá aplikován i ve formě kompozitního materiálu, který má vylepšené mechanické vlastnosti [3]. ABS je součástí hraček pro děti [52], vyrábí se z něj např. stavebnice LEGO® [53]. V domácnostech je aplikován jako materiál pro výrobu řady kuchyňského náčiní [52].

Polymethylmethakrylát (PMMA)

PMMA je také nazýván jako organické sklo nebo plexisklo. Je amorfní, čirý a velmi dobře propouští světlo, přičemž tuto vlastnost si zachovává i ve velmi silných vrstvách [3]. Charakteristické jsou vynikající mechanické vlastnosti polymeru (díky přítomnosti kyslíku; základní vlastnosti viz Tabulka 7). Není odolný vůči silným kyselinám a rozpouštědlům. Dobře však odolává povětrnostním podmínkám i UV záření [1].

Tabulka 7: Vlastnosti PMMA [1].

Polymer	Teplota zesklnění [°C]	Hustota [g·cm ⁻³]
PMMA	110	1,17–1,20

Aplikací PMMA je mnoho, a to v různých odvětvích. Vzhledem k charakteristickým vlastnostem se široce využívá v optických aplikacích – tedy kryty světel, zasklívání a výroba oken. Konstruuje se z něj střechy hal nebo průhledné protihlukové stěny. Ve zdravotnictví je aplikován ve formě zubních protéz a umělých zubů [1]. Obecně se z něj vyrábí desky, trubky, profily apod. [3].

Polybutylentereftalát (PBT)

PBT je semikrystalický polymer vlastnostmi (viz Tabulka 8) velmi podobný PET. Liší se např. lepší zpracovatelností. Na druhou stranu je však teplota, kdy je PBT tvarově stálý, nižší než u PET. Vlastnosti materiálu je možné vylepšit přidáním aditiv, jako jsou skleněná vlákna nebo retardéry hoření. Používá se např. na výrobu klávesnic [1].

Tabulka 8: Vlastnosti PBT [1].

Polymer	Teplota tání [°C]	Hustota [g·cm ⁻³]
PBT	225–230	1,31

Polykarbonát (PC)

Polykarbonáty (základní vlastnosti viz Tabulka 9) obecně jsou výjimečné tím, že splňují řadu podmínek, kterých u jiných termoplastů nelze souhrnně dosáhnout. Zejména se jedná o velmi dobré mechanické a dielektrické vlastnosti, které jsou konstantní v širokém rozsahu teplot [3]. Jsou odolné vůči lomu [1], působení chemikálií a povětrnostním podmínkám [3]. Navíc disponují transparentností. Dají se snadno zpracovat. Nepředstavují zdravotní riziko [3] a jsou samozhášivé [1]. PC se používá k výrobě skel a čoček (brýlových, do fotoaparátů). V automobilovém průmyslu se z něj vyrábí automobilová okna, nárazníky, zadní světla a skla reflektorů [1].

Tabulka 9: Vlastnosti PC [1].

Polymer	Teplota zesklnění [°C]	Hustota [g·cm ⁻³]
PC	150	1,2

Polyoxymethylen (POM)

Lze se setkat i s označeními polyformaldehyd nebo polyacetát. Je tepelně, mechanicky i chemicky odolný (vlastnosti viz Tabulka 10). Jeho kluzné vlastnosti jsou velmi dobré. Jedná se o vysoce krystalický polymer. Při vyšších teplotách (220 °C) se rozkládá na toxický formaldehyd, k rozkladu dochází i působením silných kyselin a zásad. POM lze stabilizovat za účelem nižší náchylnosti vůči UV záření, hořlavost polymeru však není možné ovlivnit ani stabilizací. Obecně se aplikuje pro výrobu ozubených kol, krytů strojů, ložisek apod. Další využití jsou např. zipy, aerosolové nádobky nebo balení kosmetických přípravků [1].

Tabulka 10: Vlastnosti POM [1].

Polymer	Teplota tání [°C]	Hustota [g·cm ⁻³]
POM	165–185	1,41–1,42

Polyamidy (PA)

PA jsou semikrystalické polymery [1] o lineární struktuře, které jsou tvořeny řetězcem se střídajícími se amidovými a methylenovými skupinami. Mezi nejznámější zástupce skupiny polyamidů patří polyamid 6, polyamid 66, polyamid 610 (známé taky pod názvem nylon 6, nylon 66 a nylon 610) [3]. Jejich vlastnosti jsou uvedené níže (viz Tabulka 11) [1]. Čísla v názvu polymeru popisují strukturu jeho molekul [3]. Jsou silně polární, mají tendenci snadno přijímat vodu a rozpouštět se v silných kyselinách. Vodíkové můstky (plynouce z přítomnosti amidové skupiny) zapříčiňují vysokou pevnost a teplotu tání [1].

Tabulka 11: Vlastnosti PA [1].

Polymer	Teplota tání [°C]	Hustota [g·cm ⁻³]
PA-6	215–225	1,10–1,14
PA-66	250–260	1,12–1,14
PA-610	215	1,06–1,08

Z PA se vyrábí ozubená kola, kladky, ložiska, filtry, vzduchová vedení, vlákna, fólie a další produkty. Některé lze aplikovat ve vlhkém prostředí. Polymery lze vyztužit. Takto upravený materiál se poté používá na výrobu pedálů nebo krytů motorů a náradí [1]. V PET lahvích mohou být přítomny polyamidy, které se míchají s PET pro zlepšení funkce materiálu jako plynné bariéry [54].

Polyethyltereftalát glykol (PETG)

Chemickým složením se jedná o kopolymer kyseliny tereftalové, ethylenglykolu a cyklohexan dimethanolu v různých poměrech. Právě přítomnost cyklohexan dimethanolu odlišuje PETG od klasického PET [55]. Rozdílné jsou především teploty tání těchto polymerů. Zatímco hodnota teploty tání PET je konstantní, u PETG je proměnlivá. K označení PETG je tak chybně používaný stejný recyklační symbol jako pro PET, i když se chování výsledného produktu může lišit [56].

Polymer se uplatňuje v 3D tisku [57]. Další aplikací jsou smršťovací etikety PET lahví [58] i PET lahve samotné [59]. Cílem je nahradit PVC etikety materiálem, který by bylo možné recyklovat spolu s PET [58]. Bohužel se však nejvíce PETG jako vhodná alternativa, a to z důvodu teploty tání materiálu, kdy v procesu recyklace může dojít k roztavení PETG

a následnému znehodnocení recyklátu. V případě, že je PETG přítomen v procesu recyklace PET, vzniká lepkavá hmota, kterou není možné nadále zpracovávat [59]. Z tohoto důvodu je namísto tento polymer považovat za kontaminant při recyklaci PET [56]. Významný problém představuje podobná hustota obou polymerů, nelze je tedy separovat v procesu preflotace. Komplikace představuje také chemická podobnost PET a PETG, ze které plyne nemožnost rozlišení těchto dvou polymerů pomocí NIR detektorů. Ve výsledku nelze polymery rozeznat ani vizuálně, ani strojně [10].

2.6. FTIR-ATR

IR (tedy infračervená spektroskopie) je spektroskopická metoda, kde je využíváno infračervené záření v rozmezí vlnových délek o hodnotách 780 nm až 1000 μm . Při spektrometrii dochází k výměně energie mezi hmotou a zářením. Tento obecný rozsah vlnových se zužuje při specifikování spektrálních oblastí:

- blízká infračervená (780–2500 nm);
- střední infračervená (2,5–50 μm);
- vzdálená červená (50–1000 μm) [60].

Infračervenou spektroskopií jsou získávány charakteristická absorpční spektra molekul. Jakmile je záření molekulou vzorku absorbováno, dochází ke změnám jejích vibračních a rotačních stavů. Charakteristiky sledované na výsledných molekulových spektrech jsou:

- poloha a tvar absorpčních pásů;
- počet pásů;
- intenzita pásů [61].

FTIR spektrometry obsahují Michelsonův interferometr, prostřednictvím kterého jsou měřeny všechny vlnové délky. Signál je zaznamenán v podobě tzv. interferogramu. Převod interferogramu na výsledné spektrum spočívá ve zpracování signálu pomocí matematické operace – Fourierovy transformace [62]. Aplikace Fourierovy transformace vede k rychlejšímu získání spektra, zvýšení poměru signál k šumu, umožnění měření při širokém rozsahu vlnových délek a zlepšení rozlišovací schopnosti oproti klasické infračervené spektroskopii [61].

Klasické transmisní metody, u kterých se spektra vytvářejí na základě míry průchodu záření skrze vzorek, představují mnohdy komplikaci v podobě zdlouhavé přípravy analytu. Značné zjednodušení umožňuje měření na principu reflektance – tedy spekulárního odrazu. Na měření reflektance je založena metoda ATR (zeslabený úplný odraz). Vzorek se umístí do těsného kontaktu s krystalickou podložkou o vyšším indexu lomu. Tímto způsobem je vytvořeno mezifáze. Za vhodných podmínek dochází k úplnému odrazu paprsku na rozhraní vzorku a krystalu a zároveň k jeho penetraci do tenké vrstvy vzorku (v řádech mikrometrů). Při průniku do analytu dochází k absorpci charakteristických vlnových délek dle chemické povahy látky. Odražený paprsek v sobě nese informaci o chemickém složení analytu, která je vyhodnocena a jsou z ní vytvářena typická infračervená spektra. Je možné odraz provést vícenásobně, aby byl efekt zeslabení zintenzivněn [61].

Metoda FTIR-ATR umožňuje rychlou analýzu bez komplikované úpravy vzorku [61]. Je však nutné zajistit těsný kontakt vzorku s podložkou [63]. Další výhodou je možnost měření spekter pevných analytů, dokonce i těch, které silně absorbují záření (tzv. opaky tmavé barvy), jelikož se celý proces odehrává jen na velmi tenké vrstvě zkoumaného materiálu [64]. Technika ATR poskytuje velmi kvalitní spektra [63] a dává možnost analyzovat látky, u kterých by za použití jiné instrumentace analýza nebyla možná nebo by přinejmenším byla obtížná [64].

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1. Vzorky

V experimentální části byly měřeny vzorky kontaminantů, které pocházely z procesu mechanické recyklace PET ve společnosti PETKA CZ, a. s. Vzorky byly získány analýzou kontaminantů (viz kap. 2.4.4). Došlo u nich tedy k přetavení při teplotě 200 °C.

Materiál některých kontaminantů byl znám již předem na základě dřívějších analýz, tvoří tedy určité skupiny. U těchto kontaminantů se jedná o potvrzení identifikace. Pro nově se vyskytující a zcela neznámé vzorky byl použit systém primárního dělení do skupin podle jejich vizuálních vlastností po přípravě vzorků před měřením. Třídění bylo uskutečněno podle následujících kritérií:

- barva (včetně rozdělení na matné a lesklé vzorky);
- průhlednost;
- struktura (specifické tvary jako např. etikety, vázací pásy, vzorky ve tvaru pelet atd.).

Po roztřídění vzniklo 54 primárních skupin kontaminantů, které byly analyzovány. U dvou skupin však nemohla být analýza provedena. Některé ze skupin byly navíc rozděleny na podskupiny (A, B, popř. C) v případě viditelných odlišností po přípravě vzorků před měřením. Počet měřených vzorků z jednotlivých skupin byl určen v závislosti na velikosti skupiny.

3.1.1. Příprava vzorků před měřením

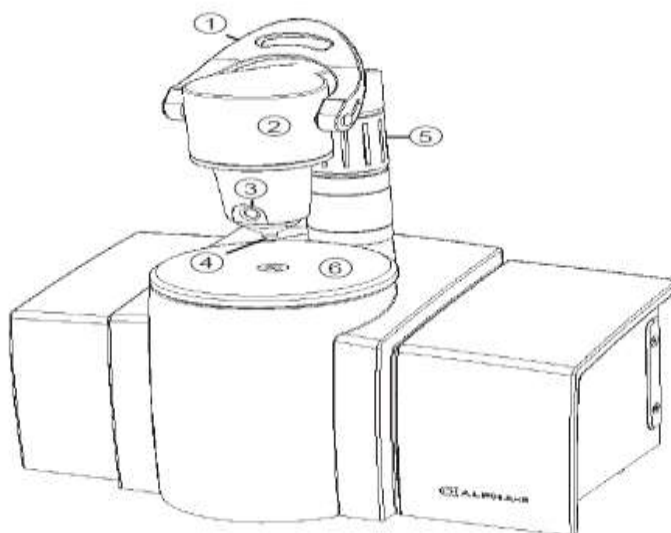
Před samotným měřením musely být některé vzorky upraveny tak, aby byla jejich analýza co nejpřesnější a nejspolehlivější. U metody ATR je důležitý těsný kontakt vzorku s ATR krystalem. Proto je výhodné, aby alespoň část povrchu vzorku byla pravidelná, respektive plochá. Kulaté nebo nepravidelné vzorky byly z toho důvodu znovu přetaveny (viz Obrázek 12), aby u nich došlo ke zploštění a vzniku rovny plochy pro měření.



Obrázek 12: Vzorky před (vlevo) a po (vpravo) opětovném roztavení [10].

3.2. Měření

Měření bylo provedeno na FTIR spektrometru ALPHA II. K základnímu modulu byl připojen ATR modul ALPHA-P (viz Obrázek 13) s diamantovým krystalem ATR platinum Diamond 1 Refl #24E68AB82D. Počet skenů byl nastaven na 32, a to v rozmezí vlnových délek 400 až 4 000 cm^{-1} .



Obrázek 13: ALPHA-P vzorkovací modul. 1: páka pro pohyb kovadliny ve směru nahoru a dolů; 2: stlačovací rameno; 3: červená tečka pro kontrolu tlaku; 4: kovadlina; 5: otočný regulátor pro nastavení výšky stlačovací hlavice; 6: krystalová deska s ATR krystalem [65].

Vzorek byl vložen na krystalovou desku tak, aby byl střed jeho spodní plochy ve styku s ATR krystalem. Následně byla lehce stlačena páka, aby došlo k posunu kovadliny dolů. Stlačení vzorku kovadlinou bylo optimalizováno otočným regulátorem. Při otáčení regulátorem se měnila poloha červené tečky pro kontrolu vyvíjeného tlaku. Jakmile byla červená tečka situována ve středu pro ni určené plochy, vzorek byl přitlačen na ATR krystal úplným stlačením páky. Po provedení analýzy byla páka zvednuta do původní polohy a vzorek byl nahrazen dalším. Měření probíhalo v softwaru OPUS. Několikrát v průběhu měření byla provedena kompenzace na atmosférické vlivy, díky které byl potlačen vliv molekul oxidu uhličitého a vody ve spektrech [66]. Z krystalu byla buničinou pravidelně odstraňována případná vlhkost a úlomky vzorků. Díky zvolené metodě probíhalo měření vzorků přímo a bez dalších úprav včetně tmavých vzorků (viz kap. 2.6).

3.3. Analýza spekter

Analýza naměřených spekter probíhala v programu OPUS pomocí funkce Spectrum search. Tato funkce umožňuje porovnání požadovaného spektra se spektry z knihoven. Vyhodnocování probíhalo na základě algoritmu nebo korelace [67]. Po vyhodnocení tak byly obdrženy návrhy látek, které se nejvíce shodovaly s dotazovaným spektrem, seřazené podle míry shody. Při vyhodnocování byly používány knihovny zakoupené, jedna z knihoven byla vytvořená z námi experimentálně získaných spekter různých forem PET (např. panenský PET, standart PET, PETG). Spektra, u kterých nebyla shoda dostatečná, byla následně porovnávána ručně, a to podle shody charakteristických píků.

U některých vzorků nebylo možno docílit rovnoměrné plochy pro měření, což se nepříznivě projevilo na kvalitě spektra. Další komplikace představovaly výdutě a vzduchové bubliny v měřené ploše. U některých kontaminantů bylo měření ATR metodou nemožné z důvodu křehkosti vzorků. V takovém případě se vzorek rozdrolil ihned po stlačení kovadlinou. Nebylo proto možné zajistit požadovaný kontakt s krystalem bez rozdrčení vzorku. Takové skupiny byly z analýzy vyloučeny.

Výsledky shody byly zaznamenávány do tabulky v Excelu, kde pro každý analyzovaný vzorek byla určena nejvyšší shoda. V některých skupinách se proto vyskytuje shoda s více polymery, a to v případech, kdy rozdělení do primárních skupin neodpovídá pouze jednomu očekávanému polymeru.

Na základě získaných poznatků byly primární skupiny rozděleny do nových, které již odpovídají i stejnému složení polymerů. Vzniklo tak 13 skupin. Pro rozlišení dále v textu je o původních 52 skupinách psáno jako o „primárních skupinách“. 13 skupin, které vznikly spojením primárních skupin na základě analýzy, budou uváděny pouze jako „skupiny“.

Některé skupiny obsahují pouze jeden shodný polymer. Např. vzorky z primární skupiny 41 až 44 se sice vizuálně liší, ale byly všechny identifikovány jako PET. Proto jsou souhrnně pod skupinou 10. U jiných se ale složení vzorků velmi lišilo. Takové skupiny jsou směsí různorodých polymerů. Spojeny do skupin byly na základě vizuální podobnosti, která byla upřednostněna před polymerním složením. Např. skupina 1 (složena z primárních skupin 1–7) a skupina 2 (vznikla spojením primárních skupin 8–13) se výskytem druhů polymerů neliší, mají ovšem rozdílnou barevnost.

3.4. Výsledky a diskuze

Původní primární skupiny byly nahrazeny 13 skupinami podle výsledků analýzy složení (viz Tabulka 12):

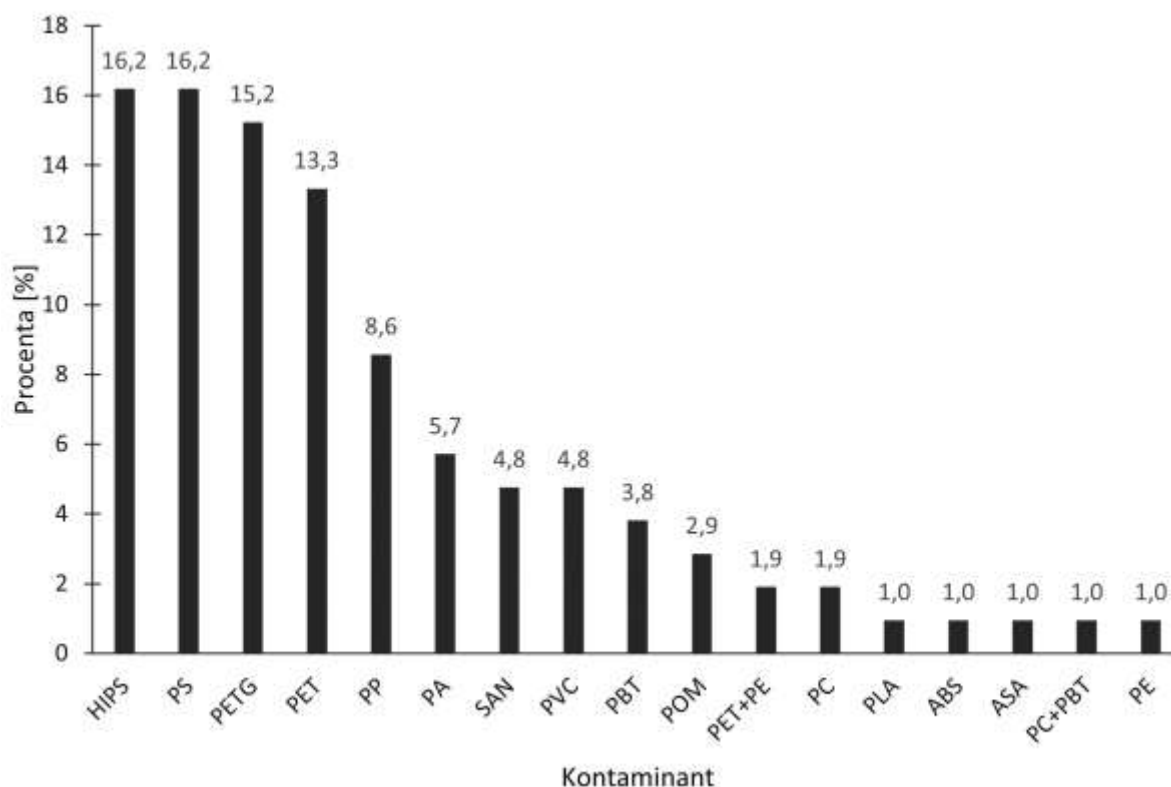
- ve skupinách 1–4 se vyskytovaly PS a jeho alternativy (tj. ABS, styren-akrylonitril – SAN, akrylonitril-styren-akrylát – ASA a houževnatý polystyren – HIPS), dále POM, PP a překvapivě i kyselina polyléčná – PLA;
- ve skupinách 5 a 6 byly identifikovány PETG, PBT, PC, PS a jeho alternativy, PVC a PET;
- skupina 7 sestávala z PVC a jeho modifikací, PET+PE a PET;
- skupiny 8–10 obsahovaly PET, PET+PE, PA a PETG;
- 11. skupina byla složena z PE, PP a PET;
- ve skupinách 12–13 se vyskytovaly PA, PVC a PET.

Tabulka 12: Rozdělení primárních skupin do skupin a identifikované druhy kontaminantů.

Skupina	Primární skupina	Polymer(y)
1	1–7	PS, HIPS, SAN, POM, PP
2	8–13	PS, HIPS, SAN, POM, PLA, PP
3	14–15	PS, HIPS, ABS, POM, PP, ASA
4	16	PS
5	17–29	PETG, PBT, PC, PS, HIPS, SAN, PVC, PET
6	30–31	PETG, PS, HIPS
7	32–35	PVC a jeho modifikace, PET, PET+PE
8	36–38	PET, PA, PETG
9	39–40	PET, PETG, PET+PE
10	41–44	PET
11	45–48	PE, PP, PET, PA
12	49–50	PA, PVC, PET
13	53–54	PA

Po identifikaci všech skupin bylo vyhodnoceno celkové procentuální zastoupení kontaminantů, respektive polymerů (viz Graf 1).

- Nejvíce zastoupené bylo HIPS a PS, a to z 16,2 %;
- PETG bylo analyzováno v 15,2 %, PET v 13,3 %;
- PP v 8,6 % a PA v 5,7 %;
- 4,8% obsah byl zjištěn u SAN a PVC;
- PBT bylo zastoupeno z 3,8 %, POM z 2,9 %;
- PET+PE a PC z 1,9 %;
- PLA, ABS, ASA, PE a PC+PBT byly identifikovány v 1 % případů.



Graf 1: Celkové procentuální zastoupení kontaminantů podle polymerního složení.

Pomocí analýzy byly identifikovány očekávané plastové kontaminanty (např. PS, PP), ale také některé polymery neočekávané (např. PLA). K výsledkům je proto potřeba rozvést diskuzi, aby byl popsán význam problematiky pro kontaminaci, resp. pro efektivnost mechanické recyklace PET a jiné důležité informace.

Následující text se proto bude zabývat jednotlivými skupinami z hlediska vzhledu vzorků a jejich polymerního složení. Budou diskutovány možné zdroje kontaminace s ohledem na typ polymeru a vizuální charakteristiku a dále problémy, které kontaminanty z dané skupiny představují pro mechanickou recyklaci PET.

3.4.1. Skupina 1

Skupina 1 obsahovala po vizuální stránce polymery, které jsou tmavé, matné a neprůhledné (viz Tabulka 13 a Obrázek 14).

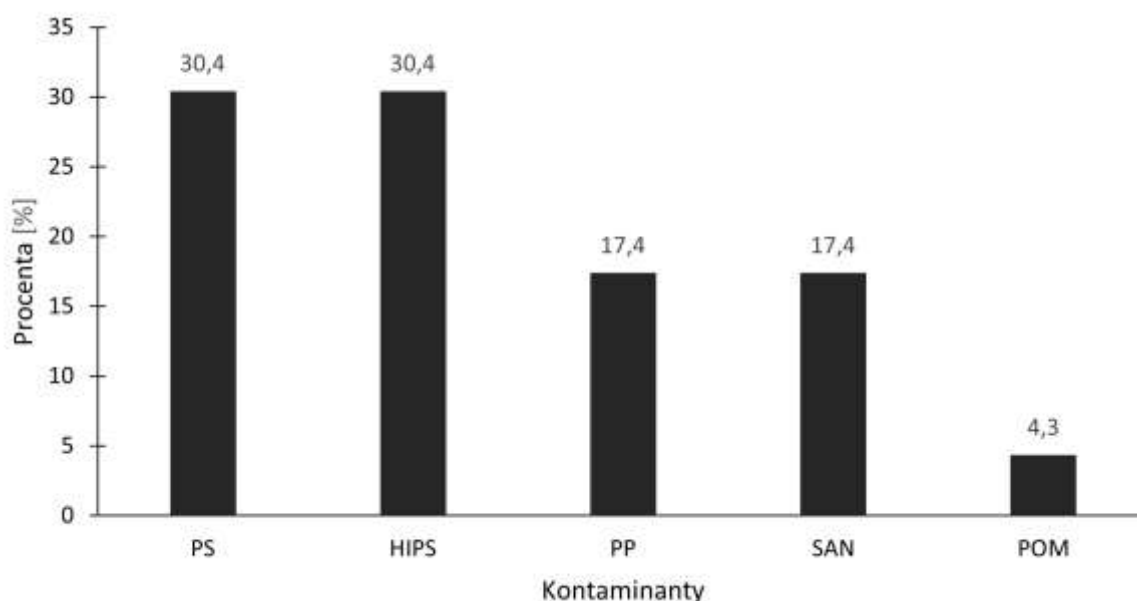
Tabulka 13: Informace o skupině 1.

Skupina	Popis vzorků	Polymer(y)	Možné zdroje kontaminace
1	Matné, černé, šedé a tmavé neprůhledné vzorky	PS, HIPS, SAN, POM, PP	obalový materiál, značení, hračky, 3D tisk, nádobí a kuchyňské náčiní, kancelářské zboží, PP geotextilie a netkané textilie, součástky strojů, PS pěny, jiné spotřební zboží



Obrázek 14: Skupina 1 a možné zdroje kontaminace. Vlevo nahoře: vzorky PP a SAN z primární skupiny 7 [10]; vpravo nahoře: geotextilie z PP [68]; vlevo dole: PS víčko na kelímky [69]; vpravo dole: jednorázové boxy na potraviny z PS [70].

Po stránce druhů polymerů byl zastoupen z 30,4 % PS. Procentuálně stejně zastoupen byl HIPS. SAN představoval 17,4 % stejně jako PP. Kontaminace POM představovala 4,3 %. (viz Graf 2).



Graf 2: Procentuální poměr polymerů analyzovaných ve skupině 1.

HIPS ani SAN nebyly zahrnuty mezi nejčastější plastové kontaminanty (viz kap. 2.5.4), protože nebyl předem očekáván jejich početnější výskyt mezi vzorky kontaminantů. HIPS i SAN jsou styrenovými plasty, přičemž HIPS vzniká přidavkem butadienového nebo butadienstyrenového kaučuku k PS. SAN je kopolymerem styrenu a akrylonitrilu [3]. HIPS se všeobecně aplikuje ve výrobě hraček, domácích potřeb, obalů [71], ale i v 3D tisku [72] apod. SAN se využívá např. na obaly a kuchyňské náčiní [73].

Překvapivý byl také poměrně vysoký výskyt PP. Mimo jiná určení možného původu kontaminace jsou zajímavou možností tmavé geotextilie. Dá se předpokládat, že do recyklační linky vnikají ve formě útržků a není tak snadná jejich manuální separace. Produkty z PP včetně geotextilií by měly být odděleny ve fázi flotace (viz kap. 2.5.4.1). Dojde-li však k zahlcení flotačního tanku, separace neproběhne dokonale. Tento zdroj je uvažován zvláště s ohledem na rozsáhlé využívání geotextilií v zemědělském průmyslu, ale i z důvodu stále častější oblíbenosti v rámci zahradnických činností obyvatelstva.

U všech tmavých kontaminantů (nehledě na materiál či původ) je problémem jejich separace pomocí NIR. Tyto separační systémy nejsou schopny detekovat tmavé vzorky, které silně absorbují záření. Tmavé kontaminanty proto mají vysoký potenciál průniku separačními systémy VARISORT i NIR detektorem S+S. Tento problém je příčinou častého výskytu tmavých kontaminantů ve finálních PET vložkách. Řešení představuje použití C optického senzoru do systému S+S (viz kap. 2.4.3), který vyřazuje nečistoty na základě barvy.

3.4.2. Skupina 2

Skupina 2 se od skupiny 1 liší pouze vizuálně. Obsahuje barevné, lesklé a neprůhledné tmavé vzorky (viz Tabulka 14 a Obrázek 15).

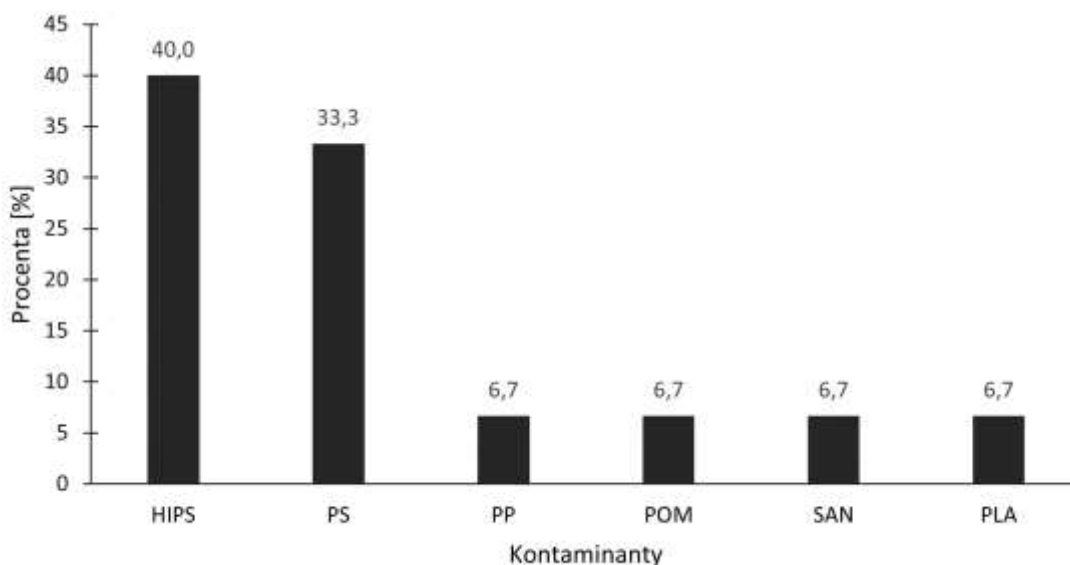
Tabulka 14: Informace o skupině 2.

Skupina	Popis vzorků	Polymer(y)	Možné zdroje kontaminace
2	Barevné, lesklé, neprůhledné	PS, HIPS, SAN, POM, PLA, PP	obalový materiál, 3D tisk, hračky, kuchyňské nádobí a náčiní, kancelářské zboží a boxy na nářadí a do dílen, netkané textilie, pytle, koberce, nábytek, bytové doplňky a jiné spotřební zboží, PS pěny



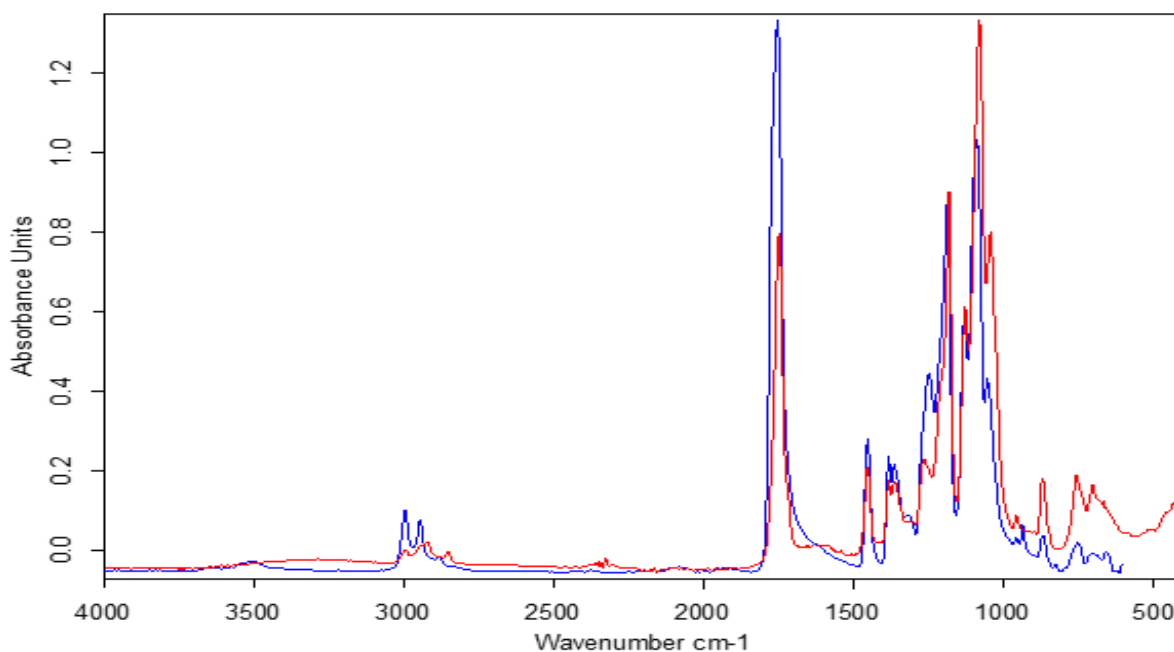
Obrázek 15: Skupina 2 a možný zdroj kontaminace. Vlevo: příklad vzorků spadajících pod skupinu 2 [10]; vpravo: struna pro 3D tisk z PLA [74].

Po stránce druhů polymerů se ve skupině 2 vyskytoval HIPS z 40 %, dále tvořilo skupinu z 33,3 % PS a po 6,7 % jednotlivě PP, POM, SAN a PLA (viz Graf 3).



Graf 3: Procentuální poměr polymerů analyzovaných ve skupině 2.

Ve skupině 2 byl analyzován PLA kontaminant (spektrum viz Obrázek 16). Polylaktid nebo polymléčná kyselina je polymer, který je vyráběn z obnovitelných zdrojů. Navíc se uvádí jeho kompostovatelnost [75]. PLA se používá zejména pro 3D tisk a vzhledem k barevnosti analyzovaného kontaminantu (oranžová) se dá očekávat právě tento zdroj kontaminace. PLA materiál je však nabízen i jako ekologická alternativa klasických plastových kelímků aj. obalů. Produkty z PLA by se neměly vyhazovat do plastového odpadu [76]. Nejen protože tak pozbyde smyslu jejich kompostovatelnost, ale v plastovém odpadu také PLA představuje potenciální kontaminaci pro ostatní plasty [77]. Lze ovšem předpokládat, že část spotřebitelů neví, kam vyhodit kompostovatelný produkt z PLA, nebo neznají materiál výrobku, a považují jej za fosilní plast. Vyhazují proto produkty z PLA do plastového odpadu.



Obrázek 16: Srovnání naměřeného spektra vzorku (červeně) se spektrem PLA z knihovny (modře).

PLA je zajímavým nálezem z důvodu důkazu kontaminace PET recyklátu bioplasty. Někteří výrobci (ve snaze snížit uhlíkovou stopu spojenou s jejich činností) mají tendenci nahrazovat „špatné“ fosilní plasty „dobrymi“ plasty z obnovitelných zdrojů. Za předpokladu, že bude používání PLA narůstat, lze očekávat zvýšení výskytu PLA mezi kontaminanty v PET vločkách. Vznik takového problému by ovšem byl v rozporu s ideou zamýšlené ekologické šetrnosti PLA. Řešení v recyklačním procesu představuje import PLA spektra do separačních systémů, respektive zvýšení citlivosti systémů na tento materiál. V zásadě by však bylo vhodné i pečlivější poučení veřejnosti o způsobu likvidace kompostovatelných plastů a jasné značení výrobků z nich.

3.4.3. Skupina 3

Skupina 3 sestávala z bílých lesklých vzorků, u kterých bylo častým jevem různorodé zbarvení (viz Tabulka 15 a Obrázek 17).

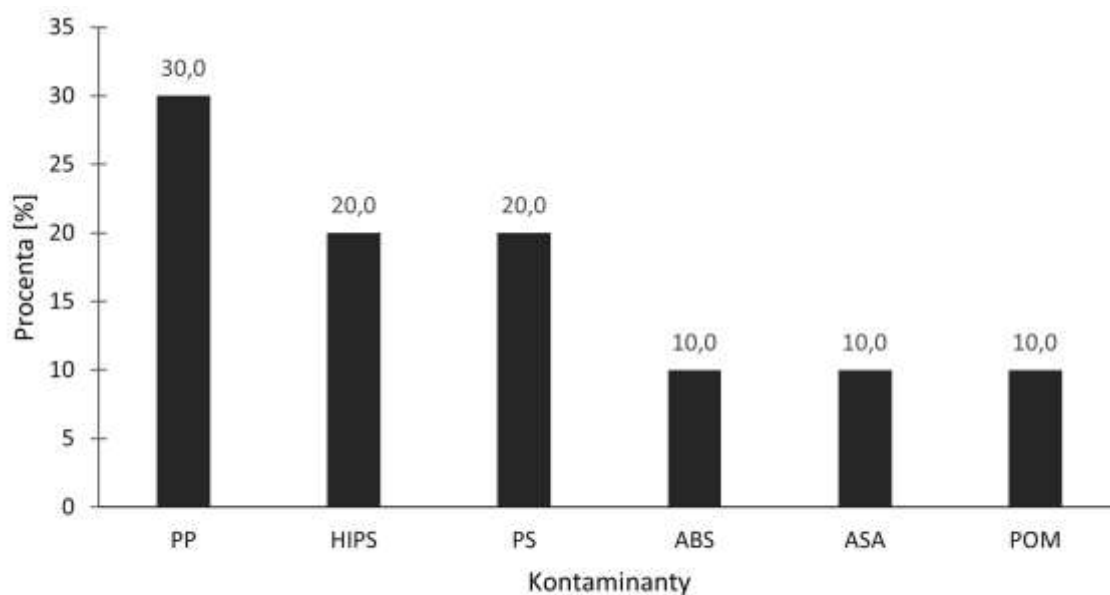
Tabulka 15: Informace o skupině 3.

Skupina	Popis vzorků	Polymer(y)	Možné zdroje kontaminace
3	Bílé lesklé s barevnými příměsemi	PS, HIPS, ABS, POM, PP, ASA	3D tisk, značení, kancelářské zboží, kuchyňské nádobí a náčiní, bytové doplňky a jiné spotřební zboží, pytle, kryty, geotextilie, kufry, přilby, části automobilů, ochranné části přístrojů



Obrázek 17: Skupina 3 a možné zdroje kontaminace. Vlevo: vzorky PP, POM, ABS, ASA, PS a HIPS z primární skupiny 15 [10]; uprostřed: dětská láhev z PP [78]; vpravo: součástky z POM [79].

Skupina 3 obsahovala 30 % PP, dále 20 % PS a 20 % HIPS a po 10 % jednotlivě POM, ASA a ABS (viz Graf 4). Jedná se o kontaminanty, které se vyskytují poměrně často.



Graf 4: Procentuální poměr polymerů analyzovaných ve skupině 3.

ASA nebyl zahrnut mezi plastové kontaminanty v kap. 2.5.4, jelikož přítomnost mezi kontaminanty nebyla původně předpokládána. Jedná se úpravu SAN, která je obohacena o akrylátový kaučuk. Využívá se např. v automobilovém průmyslu, konstrukcích [80] a v 3D tisku [81].

Lze si povšimnout, že ačkoliv jsou obecně vzorky popsány jako bílé, je u nich časté zežloutnutí či jiné zbarvení. Zežloutnutí lze připisovat degradaci polymerů vlivem oxidace a stárnutí materiálu. Dalším důvodem zbarvení jsou pigmenty. Vzhledem k tomu, že nejčastějšími kontaminanty jsou PP a PS (respektive HIPS), je potenciální zdroj kontaminace velmi široký a předpokladem je původ ze spotřebního zboží. PP i přes nižší hustotu, než má voda, prochází flotačním tankem z důvodu překročení kapacity tanku.

3.4.4. Skupina 4

Skupina 4 obsahovala vzorky z jedné strany bílé až krémově hnědé a z druhé strany tmavé (viz Tabulka 16 a Obrázek 18).

Tabulka 16: Informace o skupině 4.

Skupina	Popis vzorků	Polymer(y)	Možné zdroje kontaminace
4	Dvoubarevné, neprůhledné a lesklé	PS	kelímky na kávu



Obrázek 18: Skupina 4 a možný zdroj kontaminace. Vlevo: vzorky ze skupiny 4 (respektive primární skupina 16) [10]; vpravo: PS kelímek.

Skupina 4 představovala relativně malý počet vzorků, jejich vzhled byl však naprosto charakteristický (viz Obrázek 18). Obě rozdílně zbarvené vrstvy byly tvořeny PS. Můžeme předpokládat, že se jedná o úlomky polystyrenových kelímků. Tyto charakteristické dvouplášťové kelímky s vnitřní světlou a vnější tmavou stranou jsou často určeny jako nádoby na nápoje z automatů (zejm. na kávu). Používají se i v pohostinství a občerstveních na nápoje „s sebou“. Charakteristické je jejich jednorázové použití – tedy vysoký výskyt vzhledem k oblibě. Různá zbarvení původní světlé vrstvy lze přisuzovat změně barvy materiálu vlivem oxidace způsobené tavením. Tyto kontaminanty se v recyklátu nacházejí v nezanedbatelném počtu a demonstrují tak přítomnost velkého objemu těchto kelímků v plastovém odpadu a potažmo problematiku velké spotřeby jednorázových plastů.

3.4.5. Skupina 5

Skupina 5 obsahovala průhledné barevné vzorky s lesklým povrchem (viz Tabulka 17 a Obrázek 19).

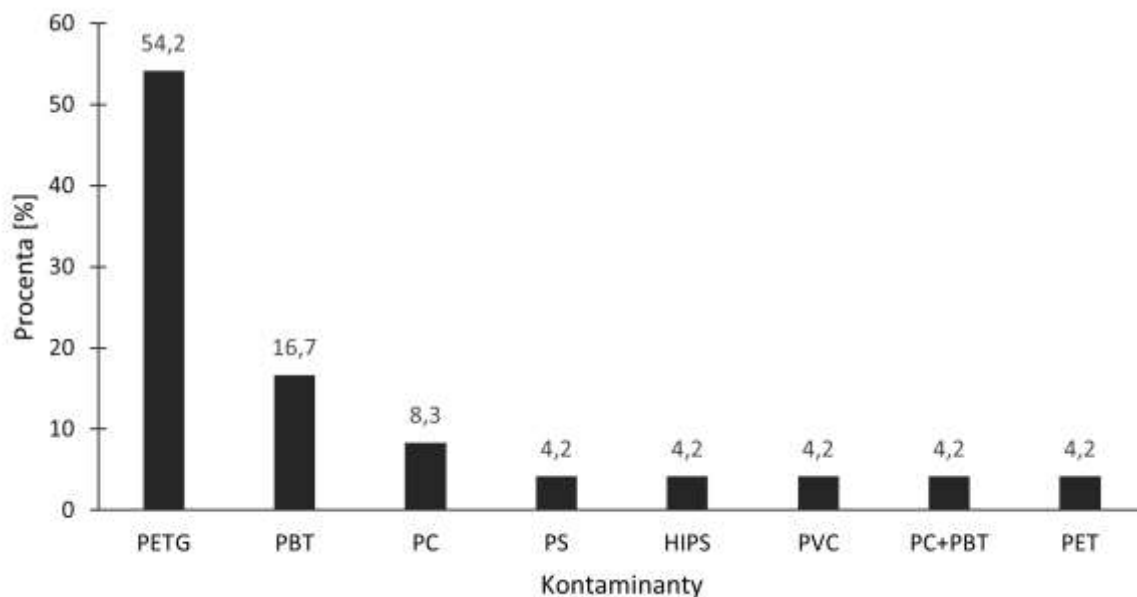
Tabulka 17: Informace o Skupině 5.

Skupina	Popis vzorků	Polymer(y)	Možné zdroje kontaminace
5	Barevné, průhledné, lesklé	PETG, PBT, PC, PS, PC+PBT, HIPS, PVC, PET	3D tisk, lahve a nádoby (na kosmetiku nebo nápoje), trubky, části automobilů, nádobí, PC desky, trapézové desky, ochranné brýle, laboratorní příslušenství, spotřební zboží

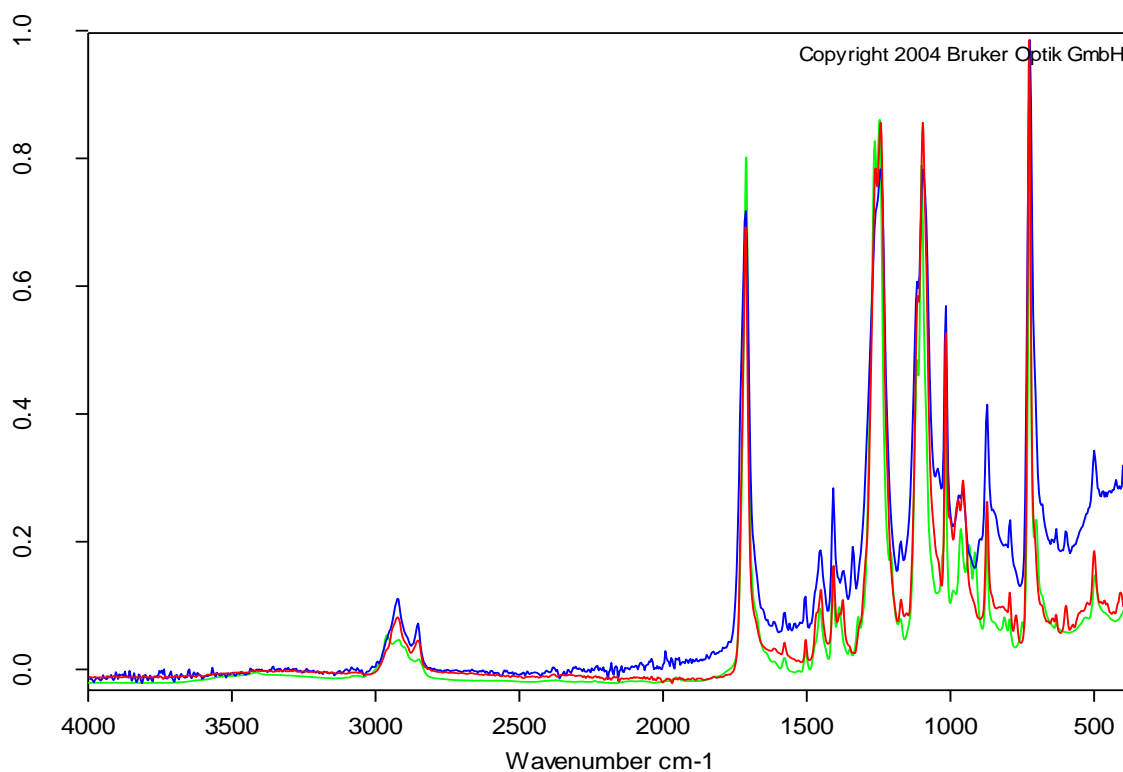


Obrázek 19: Skupina 5 a možné zdroje kontaminace. Nahoře vlevo: vzorky z primární skupiny 20 identifikovány jako PETG [10]; nahoře vpravo: deska z PC [82]; dole vlevo: PETG „fitness“ láhev [83]; dole vpravo: PETG vlákno pro 3D tisk [84].

V 5. skupině dominovalo z 54,2 % PETG. Opakovaný výskyt nastával i u PBT, který tvořil 16,7 %, a u PC, které představovalo 8,3 %. Po 4,2 % jednotlivě se ve skupině dále vyskytovaly PS, HIPS, PVC, PC+PBT a PET (viz Graf 5). Spektra PETG a PBT jsou si velmi podobná (viz Obrázek 20). Je tak možné, že došlo u některých výsledků k záměně (tzn. PETG byl chybně určen jako PBT).



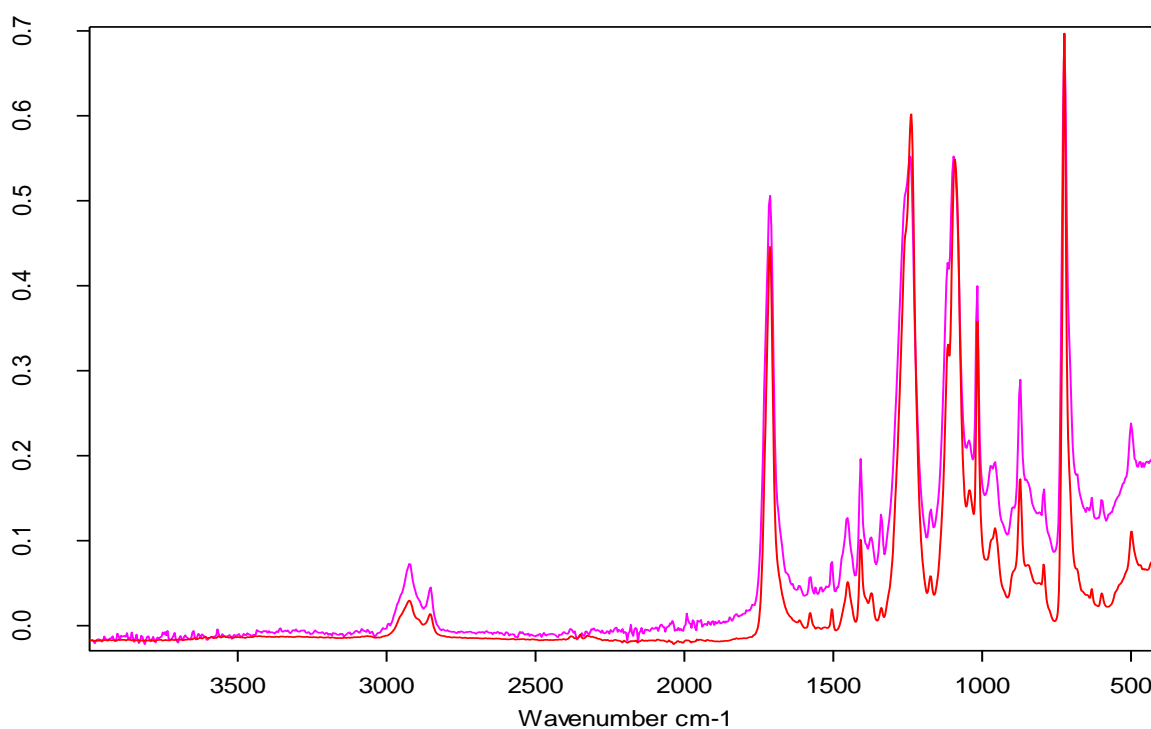
Graf 5: Procentuální poměr polymerů analyzovaných ve skupině 5.



Obrázek 20: Srovnání spektra vzorku z primární skupiny 22 (červeně) se spektry PETG (modře) a PBT (zeleně) z knihoven.

Mezi možnými zdroji kontaminace ve skupině 5 byly zahrnuty i různé typy desek z PC (viz Obrázek 19). Je vysoce pravděpodobné, že spotřebitelé vyhazují PC desky do kontejnerů na plastový odpad. Správně by však měl být likvidován stavební materiál jako stavební odpad; tzn. v nádobách na plasty by se neměl vyskytovat. Lze se tak domnívat, že veřejnost buď není dobře poučena o nakládání s odpady, nebo používá žlutý kontejner jako pohodlnější a mnohdy rychlejší řešení. V případě nakládání se stavebním materiálem o větším objemu nelze vyloučit ani záměr spotřebitele vyhnout se poplatku za jeho likvidaci.

Pro identifikaci PETG byla využita námi již dříve naměřená knihovna druhů PET a jeho forem (porovnání spektra PETG z knihovny a spektra vzorku viz Obrázek 21). Problematika kontaminace polymerem PETG byla již probírána v kap. 2.5.4.2. Analýzou bylo potvrzeno, že PETG částice jsou velmi rozšířeným kontaminantem PET vložek. PETG má značně podobná spektra až na některé charakteristické píky. Není tedy rozlišitelný při strojové separaci (na bázi NIR) a představuje tak významný problém. Kromě 3D tisku může pocházet kontaminace z lahví (např. pevnějších „fitness“ lahví; viz Obrázek 19) a popř. jiných objemnějších výrobků.



Obrázek 21: Srovnání naměřeného spektra PETG (červeně) se spektrem PETG z knihovny (růžově).

Ve skupině 5 tedy představuje problém zejména častá přítomnost PETG. Vzhledem k tomu, že byla kontaminace PETG tolik rozšířena, je potřeba uvažovat nad tím, jak nejlépe kontaminaci předcházet. Z důvodu obtížné strojní separace těchto kontaminantů vyplývající z podobnosti PET a PETG spekter by bylo nevhodnější PETG vytřídit manuálně. Problematické je však rozeznat PETG etiketu i výrobky pouhým okem. V případě ostatních výrobků z PETG mohou být navíc malé úlomky materiálu (zejména čiré) těžko manuálně separovatelné kvůli špatné viditelnosti. Četnost výskytu PETG každopádně dokazuje závažnost kontaminace tímto polymerem v praxi a měla by být impulsem k řešení dané problematiky.

3.4.6. Skupina 6

Vzorky tvořící skupinu 6 byly průhledné a čiré, byla u nich však častá barevná příměs nebo zežloutnutí (viz Tabulka 18 a Obrázek 22).

Tabulka 18: Informace o skupině 6.

Skupina	Popis vzorků	Polymer(y)	Možné zdroje kontaminace
6	Čiré s případnou barevnou příměsí, lesklé	PETG, PS, HIPS	Obaly CD apod., laboratorní náčiní, kuchyňské nádobí a náčiní, kancelářské zboží, obaly, lahve, 3D tisk, pláty a desky na širokou škálu aplikací (viz níže v textu)



Obrázek 22: Skupina 6 a možné zdroje kontaminace. Horní řada vlevo: PS a HIPS kontaminanty (primární skupina 30) [10]; horní řada uprostřed: PETG vzorky kontaminantů (primární skupina 31) [10]; horní řada vpravo: stojan na jídelní lístek z PETG vylisku [85]; spodní řada: obalový materiál z PS (táček na lázeňské oplátky).

Skupina 6 byla tvořena dvěma primárními skupinami. Výskyt obou je v recyklátu častý. Jedna ze skupin byla tvořena pouze PS (respektive PS společně s jeho formou HIPS); ve druhé skupině se vyskytovalo výhradně PETG. Kontaminace ve skupině 6 je tedy způsobena pouze těmito polymery.

Je logické, že kontaminace pochází z transparentních výrobků. Případné zabarvení dožluta lze připisovat degradaci materiálu vlivem náročných podmínek v průběhu životního cyklu a při tavení. Jiné (možná i některé nažloutlé) zabarvení je způsobeno pigmenty.

Zdroj kontaminace transparentním PETG je velmi široký. Mimo zmiňované lahve a 3D tisk se z PETG vyrábějí výlisky (např. Marpetg-FS společnosti Brett Martin). Tyto pláty jsou díky dobrým vlastnostem a snadné zpracovatelnosti používány např. na ochranná skla, značení a obaly (respektive pouzdra) na plakáty, poutače aj. předměty (příklad viz Obrázek 22). Problémy spojeny s PETG byly podrobně pobírány v kap. 3.4.5 [85].

3.4.7. Skupina 7

Skupina 7 sestávala ze vzorků o velmi malé tloušťce. Byly průhledné i neprůhledné. Jejich barva se lišila od krémově bílé přes jantarovou až po tmavě hnědou (viz Tabulka 19 a Obrázek 23).

Tabulka 19: Informace o skupině 7.

Skupina	Popis vzorků	Polymer(y)	Možné zdroje kontaminace
7	Průhledné i neprůhledné, hnědé, jantarové až krémově bílé, tenké	PVC a jeho modifikace, PET, PET+PE	lahve a etikety, folie, obaly drátů a kabelů, pásky, rybářství, pláštěnky

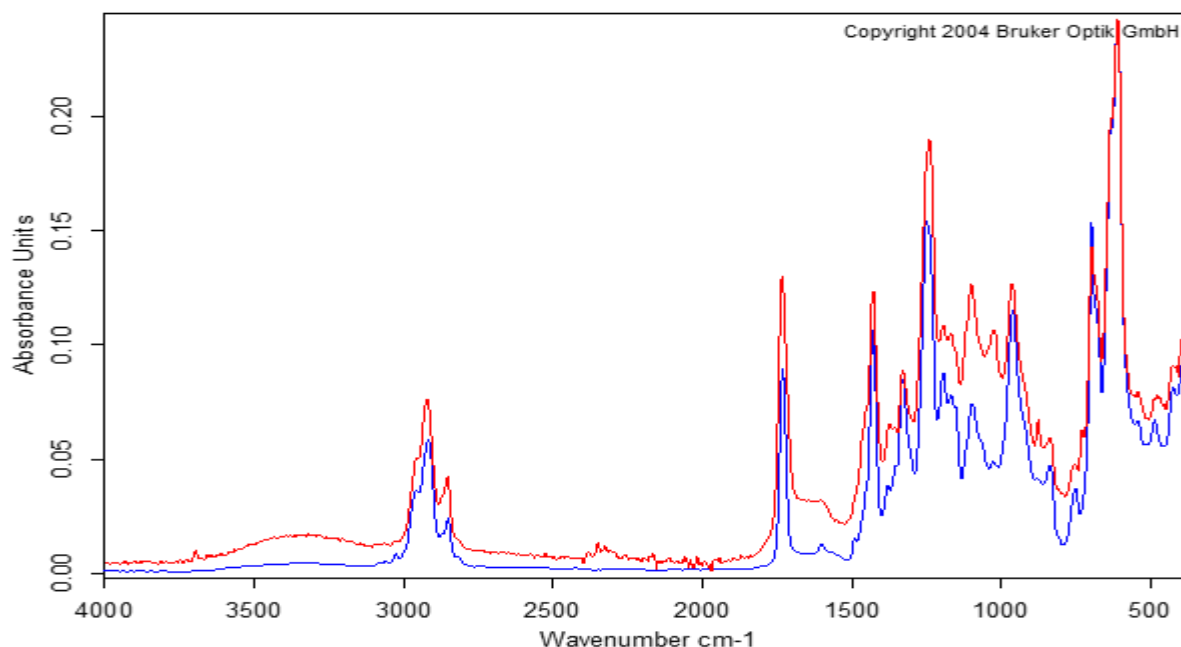


Obrázek 23: Skupina 7 a možný zdroj kontaminace. Vlevo a uprostřed: PVC vzorky kontaminantů (z primárních skupin 32 a 34) [10]; vpravo: rukávek na lahvi pravděpodobně vyrobený z PVC.

Ve skupině 7 byly ve významné většině analyzovány PVC kontaminanty (porovnání spekter jednoho ze vzorků a neměkčeného PVC (PVC-U) viz Obrázek 24). Menší podíl vzorků byl identifikován jako PET, popř. PET ve směsi s PE. Na vzhledu některých vzorků je dobře demonstrováno tmavnutí PVC vlivem termální degradace.

Původem kontaminace jsou pravděpodobně převážně PVC etikety z PET lahví. Problematika používání PVC etiket byla řešena již v kap. 2.5.4.2. PVC etikety jsou narozdíl od PETG etiket dobře rozlišitelné na základě NIR spektra. Separace tedy probíhá správně. Bohužel, 100% účinnost strojů není reálná, a proto prochází PVC etikety i do PET vložek. I kdyby byla separační účinnost strojových zařízení téměř 100%, při velkém objemu používaných PVC etiket nelze zaručit dokonalé vyřazení kontaminantu z pozitivního toku. Je nutné zajistit kvalitní manuální separaci lahví s PVC etiketami, aby do recyklační linky vstupovala kontaminace v nejmenší možné míře. Vhodnou cestou je poučení spotřebitelů, aby „rukávky“ z lahví odstranili a vyhazovali je odděleně. Ze strany výrobců lahví by bylo vhodné nejen spotřebitele, ale také třídící a recyklační linky informovat o složení etiket, popř. používat ekologicky vhodnější etikety.

Mimo etikety může kontaminace PVC pocházet např. z PVC folií, které mají využití např. ve stavebnictví, spotřebních výrobcích nebo rybářství. Nejen s rybářstvím jsou spojeny i PVC pláštěnky. Nelze vyloučit ani původ z obalů na dráty (respektive kabely) a z lepicích PVC pásek.



Obrázek 24: Spektrum PVC-U (modře) a naměřené spektrum vzorku kontaminantu (červeně).

Vzorky (viz Obrázek 25), které byly identifikovány jako PET, představují kontaminaci z důvodu obsahu aditiv. Stejně tak je nežádoucí nečistotou i materiál, který je směsí PET a PE. Zřejmě se tak jedná o etikety, který byly upraveny přidavkem aditiva nebo PE. Takové etikety je prakticky nemožné rozeznat okem. V ideálním případě by bylo třeba každou etiketu analyzovat, vytvořit dokumentaci a důsledně poučit pracovníky manuální separace o nepřipustných lahvích. Provést takové opatření dokonale s každou etiketou je však v realitě nemožné a není zaručena ani bezchybnost poučených pracovníků.



Obrázek 25: Vzorky PET+PE z primární skupiny 33 (vlevo) a kontaminantů z PET a PVC z primární skupiny 35 (vpravo) [10].

3.4.8. Skupina 8

Skupina 8 obsahovala tenké čiré vzorky, které v některých případech byly zažloutlé (viz Tabulka 20 a Obrázek 26).

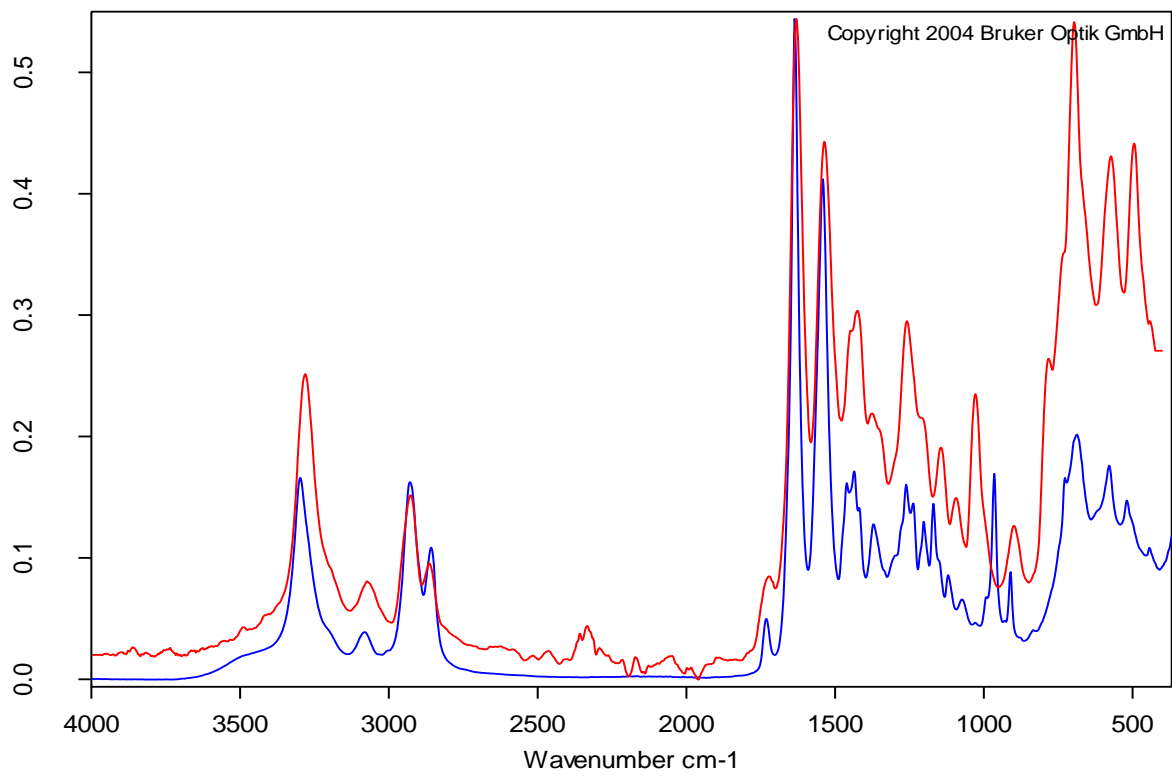
Tabulka 20: Informace o skupině 8.

Skupina	Popis vzorků	Polymer(y)	Možné zdroje kontaminace
8	Čiré až nažloutlé, tenké	PET, PA, PETG	Obaly, etikety



Obrázek 26: Příklad vzorků kontaminantů ze skupiny 8: vlevo směs PET a PA (primární skupina 37) [10]; vpravo pouze PA nečistoty (primární skupina 38) [10].

Ve skupině 8 se nacházely části etiket a obalů (s největší pravděpodobností lahví), které byly kombinací PET a PA, PETG nebo obsahovaly pouze PA (spektrum PA viz Obrázek 27). PA příměs v PET je používána u lahví na džusy a na pivo jako bariéra vůči průniku plynů. Tyto lahve jsou jedním z největších zdrojů kontaminace. V takovém případě není celá lahev vhodná k recyklaci. Bylo by vhodné takové lahve preventivně manuálně separovat. Strojní systémy mohou v případě směsi PET a PA vyhodnotit vložku jako PET a nevyřadit ji. Bohužel ne všechny potenciální lahve s obsahem PA jsou rozeznatelné (zejm. lahve od džusů), byla by tedy třeba analýza a následná dokumentace obalů. To je však velmi náročné na provedení a následnou realizaci příslušných opatření v provozu. Ten samý problém platí pro etikety. Problematika PETG etiket byla v práci již na více místech rozebírána.



Obrázek 27: Srovnání naměřeného spektra (červeně) s PA spektrem z knihovny (modře).

3.4.9. Skupina 9

Skupina 9 sestávala z tenkých průhledných i neprůhledných vzorků. Kontaminanty byly často barevné, respektive disponovaly zbytky potisku a pigmentů (viz Tabulka 21 a Obrázek 28).

Tabulka 21: Informace o skupině 9.

Skupina	Popis vzorků	Polymer(y)	Možné zdroje kontaminace
9	Bílé s případnou barevnou příměsí až nažloutlé, průhledné i neprůhledné	PET, PET+PE, PETG	Obaly na potraviny, folie



Obrázek 28: Skupina 9 a kontaminace. Vlevo: příklad vzorků PET a PET+PE z primární skupiny 40 [10]; vpravo: PET/PE folie určená jako obal pro solící směs.

Ve skupině 9 se vyskytovalo převážně PET, které se v některých případech vyskytovalo společně s PE. Jedná se o obaly od potravin obsahující aditiva, pigmenty, popř. vrstvu z PE. Takové výrobky jsou považovány za kontaminaci – kvůli barevnosti a jiné teplotě tání. Je nejvhodnější je odstranit již při manuální separaci. Fakt, že jsou tyto výrobky považovány za kontaminanty, upozorňuje na problematiku recyklace některých obalů, které spotřebitel může považovat za plně recyklovatelné. Ve skupině se také objevila kontaminace PETG.

3.4.10. Skupina 10

Skupina 10 obsahovala neprůhledné bílé etikety se zbytky potisku a pigmentů (viz Tabulka 22 a Obrázek 29).

Tabulka 22: Informace o skupině 10.

Skupina	Popis vzorků	Polymer(y)	Možné zdroje kontaminace
10	Bílé etikety, neprůhledné, někdy zbytek potisku	PET	Etikety



Obrázek 29: Příklady kontaminantů za skupiny 10 (identifikovány jako PET: vlevo primární skupina 43 [10]; vpravo: primární skupina 44) [10].

Ve skupině 10 se vyskytovaly výhradně PET etikety. Kvůli podobnosti PET a PETG spekter nelze vyloučit ani přítomnost PETG kontaminantů. PET vzorky byly vyhodnoceny jako kontaminace z důvodu přídavku aditiv a zbytku pigmentů. Tyto nečistoty jsou zdrojem barevné kontaminace a mají jinou teplotu tání stejně jako PET kontaminace ze skupiny 9.

3.4.11. Skupina 11

V 11. skupině byly zejména různorodé kusy etiket se zbytky potisku (viz Tabulka 23 a Obrázek 30).

Tabulka 23: Informace o skupině 11.

Skupina	Popis vzorků	Polymer(y)	Možné zdroje kontaminace
11	Etikety často se zbytky potisku	PE, PP, PET, PA	Etikety



Obrázek 30: Příklady PET kontaminantů ze skupiny 11 (vlevo primární skupina 47; vpravo primární skupina 48) [10].

Skupina 11 sestávala z PET etiket a z polyolefinových etiket. Ve skupině byl analyzován i PA. Důvod vyhodnocování PET etiket jako kontaminantů byl již vysvětlen ve skupině 9 (viz kap. 3.4.9). PP a PE etikety jsou samozřejmě nečistotami, měly by však být odděleny již v procesu preflotace. Princip preflotace je jednoduchý a za normálních podmínek velmi účinný. Poslední dobou však nastává problém se zvětšující se velikostí etiket. Tendencí výrobců (respektive marketingu) k tomuto kroku je zvýšení atraktivity vzhledu lahve, která se dá v případě větší etikety opatřit bohatším potiskem. Účelem je zvýšení konkurenceschopnosti. Bohužel na úkor následné recyklace, kdy se rostoucí hmotnostní podíl polyolefinových etiket projevuje na flotačních tancích. Dochází k jejich zahlcení, tím pádem do pozitivního toku putují i plasty dříve bez obtíží oddělitelné preflotací. Proto není výjimkou kontaminace polyolefiny (zejm. PP, jak bylo viditelné v předchozích skupinách), ale také PS pěny, etiketami aj. nečistotami. Nabízí se tak otázka, jestli je vhodné provozovat některé konkurenční praktiky na úkor recyklovatelnosti výrobku.

3.4.12. Skupina 12

Vzorky ve skupině 12 byly tenké, neprůhledné a různobarevné (viz Tabulka 24 a Obrázek 31).

Tabulka 24: Informace o skupině 12.

Skupina	Popis vzorků	Polymer(y)	Možné zdroje kontaminace
12	Černé a barevné, lesklé, neprůhledné	PA, PVC, PET	Pásky, obaly kabelů



Obrázek 31: Příklady kontaminantů ze skupiny 12, které byly identifikovány jako PA, PET i PVC (vlevo primární skupina 49; vpravo primární skupina 50) [10].

Ve skupině 12 byl analyzován PET, PVC a PA. Podle vzhledu kontaminantů a skupinového složení bylo usouzeno, že kontaminace pochází z obalů na kabely a dráty (tzv. bužírky) a z lepících pásek používaných na stavební práce. Jedná se tedy o stavební odpad, jehož problematika byla řešena v kap. 3.4.5. Ideálně by bylo odpad separovat manuálně již při vstupu do linky. V případě menších útržků pásek a kousků bužírek však nemusí pracovník linky tyto částice vůbec zaznamenat.

3.4.13. Skupina 13

Skupina 13 obsahovala zlomky vázacích pásek a různě barevné neprůhledné pelety (viz Tabulka 25 a Obrázek 32).

Tabulka 25: Informace o skupině 13.

Skupina	Popis vzorků	Polymer(y)	Možné zdroje kontaminace
13	Vázací pásky, pelety	PA	Vázací pásky, neznámý



Obrázek 32: Skupina 13 a možný zdroj kontaminace. Vlevo: příklad kontaminace z PA vázacích pásek (primární skupina 53) [10]; uprostřed: vázací pásky jako příklad možného zdroje kontaminace; vpravo: kontaminace v podobě pelet z PA s neznámým původem (primární skupina 54) [10].

Analyzované vzorky ze skupiny 13 byly výhradně z PA. První část představovaly PA vázací pásky, které se používají např. na svazování kabelů. V případě pelet není zdroj kontaminace známý. Vázací pásky jsou považovány za stavební odpad. Je však pravděpodobné, že spotřebitelé nepovažují jejich vyhazování do kontejnerů na plasty za nevhodné. Podobně jako pásky a kousky bužírky ze skupiny 12 se jedná o odpad, který bývá v mnoha případech likvidován ve velmi malém objemu (např. několik málo vázacích pásek). Není pravděpodobné, že by spotřebitel tak malé množství vyvážel separátně jako stavební odpad, popř. takový odpad skladoval do doby, než stavebního odpadu nashromáždí dost a bude mít tak důvod ho zlikvidovat vývozem do sběrného místa. Používání pásek je běžné i spotřebiteli v domácnostech např. pro organizaci kabelů. V tomto případě je potom likvidace pásek prostřednictvím plastového odpadu pochopitelná, i když ne správná. Proto lze kontaminanty ze skupin 12 a 13 (vyjma pelet o neznámém původu) v toku očekávat stále. Zamezit této kontaminaci bude možné při dokonalejším manuálním třídění (což u malých částic není zcela reálné) nebo zvýšením citlivosti strojové separace na problematické polymery.

4. ZÁVĚR

Byly analyzovány vzorky z 52 primárních skupin a proběhlo rozřazení do 13 větších skupin s ohledem na polymerní složení. Metoda FTIR-ATR byla shledána jako vhodná pro analýzu plastových kontaminantů. Byly stanoveny nejčastější kontaminanty. Jednalo se zejména o PS a jeho formu HIPS. Každý z těchto polymerů byl obsažen z 16,2 %. Dále se ve skupinách velmi často vyskytovalo PETG, a to z 15,2 %. Frekventovanou kontaminaci (obsaženou z 13,3 %) představoval PET. Je potřeba zmínit i PP, které bylo identifikováno v 8,6 % případů, PA v 5,7 %, SAN a PVC s 4,8% výskytem. Zbylé analyzované polymery se vyskytovaly v menší míře.

1. skupina obsahovala tmavé vzorky. Figurovalo v ní PS a HIPS, výrazně bylo zastoupeno i PP a SAN. Přítomnost SAN mezi kontaminanty nebyla původně předpokládána. Hlavním zdrojem kontaminace bylo s největší pravděpodobností spotřební zboží s krátkou dobou použití. Problémem tmavých kontaminantů je nemožnost jejich separace pomocí NIR detektorů. Zdrojem 2. skupiny barevných kontaminantů, která byla složena hlavně z PS a HIPS, byly opět spotřební výrobky. Nečekaný byl obsah PLA z důvodu kontaminace bioplasty. Ve skupině číslo 3 byl analyzován vedle HIPS a PS zejména PP. U této skupiny lze také předpokládat původ hlavně ze spotřebního zboží, které se stává odpadem po relativně krátké době. Byl zde analyzován i polymer ASA, který nebyl zahrnut v teoretické části. Skupina 4 byla složena výhradně z PS a z charakteristického vzhledu vzorků byly jako původ kontaminace určeny dvoubarevné kelímky na nápoje.

V 5. skupině převládá nad ostatními polymery obsah PETG. Za zdroj kontaminace byl určen 3D tisk a lahve. V 6. skupině dominovaly polymery PETG, PS a HIPS. Kontaminace má původ nejspíš ve spotřebním zboží, obalech, ale i jiných aplikacích (jako např. PETG výlisky). Obě tyto skupiny jsou důležité z hlediska problematiky kontaminace PETG, který je od PET nerozlišitelný při strojové i manuální separaci.

Skupina 7 byla zajímavá z důvodu obsahu PVC. Zdroj kontaminace byly převážně etikety (popř. folie). Byla tak dokázána problematika kontaminace recyklátu PVC etiketami v praxi. 8. skupina sestávala z PET, PA a PETG. PA se používá pro zlepšení vlastností lahví a v etiketách. Pokud obsahuje PET lahev i PA pro zajištění určité kvality obalu, je celá lahev kontaminantem nevhodným k mechanické recyklaci. Skupina 9 obsahovala mimo PET a PETG směs PET+PE. PET+PE se používá v obalech a foliích na potraviny. Tyto směsi jsou nerecyklovatelné společně s PET a obecně souvisí s problematikou recyklace směsných plastů.

Skupinu 10 tvořily PET kontaminanty. Byly vyhodnoceny jako kontaminanty kvůli obsahu aditiv nebo nesmytelných pigmentů. Nelze vyloučit ani přítomnost PETG vzhledem k podobnosti PET a PETG spekter. Jako zdroj kontaminace byly určeny etikety. Ve skupině 11 byly analyzovány polymery PET, PA, PE a PP. Jednalo se o kontaminanty pocházející z etiket. Etikety z polyolefinů by měly být odstraněny v procesu preflotace. Kapacita preflotačních tanků však bývá překročena z důvodu zvětšující se velikosti etiket. Poté dochází k průniku polyolefinových kontaminantů do dalších částí recyklační linky.

12. skupina obsahovala kontaminanty z PA, PVC a PET. Pravděpodobně se jedná o útržky pásek (např. izolačních) a kousky obalů kabelů a drátů. Jedná se o stavební odpad, který nepatří

do kontejneru na plasty. Bohužel se tak v praxi děje a možná kontaminace stavebními materiály byla přítomna ve více skupinách. Poslední 13. skupina sestávala z PA kontaminantů. Jednalo se o zlomky vázacích pásek, tedy opět o kontaminaci stavebním materiálem. Ve skupině se nacházely i pelety, jejichž původ nebyl identifikován.

Analýzou se potvrdily obavy z PETG kontaminace PET recyklátu. PETG obsahem dominovalo v řadě primárních skupin o velkém objemu a časté frekvenci výskytu. Je možné, že kontaminace byla širšího rozsahu, protože odlišení PET a PETG spekter není jednoduché a mohlo dojít v některých případech k záměně. Toto zjištění by mělo být přispěním k řadě výzev k řešení problémů spojených s PETG, protože přítomnost dotyčného polymeru v PET recyklátu vede k jeho závažnému znehodnocení.

Byly objeveny i kontaminanty neočekávané, např. PLA. PLA je kompostovatelný bioplast. Vzhledem k nevhodnému nakládání s PLA odpadem ale končí tento materiál v kontejnerech na plasty a potenciálně v PET recyklátu jako kontaminace.

Byl analyzován velký podíl PET kontaminace. Ačkoliv čistý PET nemůže být kontaminantem, pokud je v materiálu přítomen jiný polymer, různá aditiva nebo pigmenty, stává se předmět kontaminantem a musí být oddělen od PET vložek. Bohužel tak nastává nemožnost recyklovat určitý (a nezanedbatelný) objem PET lahví. Takové lahve jsou navíc v recyklační lince přímo nežádoucí a jsou odstraňovány celé. Dále byl analyzován podíl PVC vzorků. Část kontaminace PVC pocházela z lahví. Byla tak potvrzena závažnost problematiky PVC kontaminace v praxi.

Mnohdy byly určovány jako možné zdroje kontaminace stavební materiály, které by měly být správně likvidovány jako stavební odpad. V plastovém odpadu by se tak neměly vyskytnout. Toto zjištění poukazuje na nedokonalou praxi nakládání s odpadem, ať už nevědomou či záměrnou. Řada polymerů (HIPS, PETG, PLA, ASA, ABS) jsou využívány mj. v 3D tisku. Vzhledem k rostoucí popularitě 3D tisku je třeba s těmito kontaminanty ve vstupním materiálu počítat a přizpůsobit nastavení separačních systémů.

Na základě těchto dat vznikla knihovna kontaminantů, která bude dále použita pro optimalizaci separačních technologií. Bude upraveno nastavení systému S+S, čímž bude zvýšena citlivost pro separaci nejčastěji se vyskytujících kontaminantů. Proběhne aktualizace spekter, respektive budou přidána spektra nově se vyskytujících kontaminantů (např. PLA). Tato opatření však nepovedou k optimalizaci problémů například s PETG ani s nedostatečným tříděním vstupního materiálu.

V zásadě lze rozdělit kontaminanty, které se nachází v PET vložkách, na dva druhy dle původu: na ty, které jsou součástí lahve (PVC, PE, PP apod.) a na takové, které vstoupily do procesu z důvodu nedostatečného třídění vstupního materiálu (PLA, PS atd.). Z hlediska obtížnosti jejich separace je potom možné všechny vstupující kontaminanty opět rozdělit, a to na lehce separovatelné (např. PE preflotací) a obtížně separovatelné (PETG, PET s příměsemi apod.). Obtížně separovatelné plasty nejsou odděleny od PET v procesu preflotace anebo nebývají rozpoznatelné při manuální či strojní separaci.

Většina analyzovaných kontaminantů spadala mezi obtížně separovatelné kontaminanty. Také byly analyzovány takové materiály, které byly identifikovány jako nové a separační systémy nebyly upraveny na jejich přítomnost ve vstupním materiálu.

Na základě analýzy bude možné zefektivnit separaci pomocí úpravy nastavení senzitivity systému S+S a importu nových spekter. V případě tmavých vzorků je také nutné použití optického senzoru S+S z důvodu nevhodnosti aplikace NIR detekce pro silně absorbující vzorky. Úprava nastavení NIR separačního systému však příliš neovlivní výskyt polymerů, u kterých je strojní separace obtížná (např. PETG nebo PET ve směsi s jinými polymery). V těchto případech jsou nutná komplexnější řešení, která by zahrnovala více aspektů než pouhé technologie recyklačních linek. Ideální by byl zodpovědný přístup výrobců z hlediska použitých materiálů a komunikace s recyklačními linkami, dále legislativou stanovené jednoznačné značení plastových výrobků, ale i lepší informovanost a svědomitost občanů při nakládání s odpady. Potřebné by bylo také důslednější třídění směsi plastového odpadu na třídících linkách. Možností by mohly být i sběrné nádoby pouze na PET lahve; je však otázkou, zda by občané dodržovali odlišování PET lahví a ostatního plastu.

Práce přispěla určením chemické povahy, tedy polymerního složení, vzorků kontaminantů. Je potřeba zdůraznit, že provádění analýzy a identifikace kontaminantů v PET vložkách je velmi ojedinelé. Zjištění budou důležitá pro nastavení separačních zařízení. Bude také usnadněna budoucí orientační identifikace nečistot, které projdou až do konečných PET vložek, a to na základě vizuálních vlastností. Tak bude možné lépe reagovat na zvýšený obsah některého typu kontaminantu.

Tato práce je v rámci výzkumné činnosti bohužel ojedinelá až raritní. Téma kontaminace PET recyklátu a způsobu eliminace kontaminantů by mělo být rozsáhleji zkoumáno. Nejen v rámci zkvalitnění recyklace, ale zvláště na úrovni zákonodárné a společenské odpovědnosti.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Termoplasty – základní druhy. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2021-07-07]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [2] Rozdělení a charakteristika polymerů. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2021-07-07]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [3] Termoplasty. DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, s. 65-98. ISBN 80-7080-617-6.
- [4] WELLE, Frank. The facts about PET. In: *Petcore-europe.org* [online]. petcore-europe.org, 2020 [cit. 2020-10-14]. Dostupné z: https://www.petcore-europe.org/images/news/pdf/factsheet_the_facts_about_pet_dr_frank_welle_2018.pdf
- [5] NISTICÒ, Roberto. Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. *Polymer Testing* [online]. 2020, **90** [cit. 2020-10-14]. ISSN 01429418. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymertesting.2020.106707
- [6] What is PET?. *Petcore-europe.org* [online]. petcore-europe.org, 2020 [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.petcore-europe.org/what-is-pet.html>
- [7] WELLE, Frank. Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2011, **55**(11), 865-875 [cit. 2020-08-31]. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2011.04.009
- [8] 2017 Survey on European PET Recycle Industry - 58.2% of PET bottles collected. In: *Petcore-europe.org* [online]. petcore-europe.org, 2020 [cit. 2020-08-30]. Dostupné z: <https://www.petcore-europe.org/news-events/202-2017-survey-on-european-pet-recycle-industry-58-2-of-pet-bottles-collected.html>
- [9] DE CORT, Suzanne, Françoise GODTS a Annick MOREAU. Packaging Materials: 1. Polyethylene Terephthalate (PET) for Food Packaging Applications. *ILSI* [online]. International Life Sciences Institute, c2020, December 2017 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: https://ilsi.eu/wp-content/uploads/sites/3/2018/06/PET-ILSI-Europe-Report-Update-2017_interactif_FIN.pdf
- [10] *Vnitřní dokumenty PETKA CZ, a. s.* Brno, 2020.
- [11] COLTRO, Leda, Marisa PADULA, Elisabete SARON, Joyce BORGHETTI a Ana BURATIN. Evaluation of a UV absorber added to PET bottles for edible oil

- packaging. *Packaging Technology and Science* [online]. 2003, **16**(1), 15-20 [cit. 2020-11-29]. ISSN 0894-3214. Dostupné z: doi:10.1002/pts.607
- [12] PET lahev. *Výkup a zpracování PET lahví* | PETKA CZ, a.s. [online]. PETKA CZ, c2015 [cit. 2020-8-31]. Dostupné z: <http://www.petkacz.cz/petkacz.cz/co-delame/pet-lahev/index.html>
- [13] SANG, Tian, Christopher J. WALLIS, Gavin HILL a George J.P. BRITOVSEK. Polyethylene terephthalate degradation under natural and accelerated weathering conditions. *European Polymer Journal* [online]. 2020, **136** [cit. 2021-07-09]. ISSN 00143057. Dostupné z: doi:10.1016/j.eurpolymj.2020.109873
- [14] IOAKEIMIDIS, C., K. FOTOPOULOU, H. KARAPANAGIOTI, M. GERAGA, C. ZERI, E. PAPATHANASSIOU, F. GALGANI a G. PAPTAEODOROU. The degradation potential of PET bottles in the marine environment: An ATR-FTIR based approach. *Scientific Reports* [online]. 2016, **6**(1) [cit. 2020-08-31]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/srep23501
- [15] Oil Consumption. In: *The UK's Leading Plastic Trade Association* [online]. British Plastics Federation, 2020 [cit. 2020-08-30]. Dostupné z: https://www.bpf.co.uk/press/Oil_Consumption
- [16] BARTOLOME, Leian, Muhammad IMRAN, Bong GYOO, Waheed A. a Do HYUN. Recent Developments in the Chemical Recycling of PET. *Material Recycling - Trends and Perspectives* [online]. InTech, 2012 [cit. 2020-08-30]. ISBN 978-953-51-0327-1. Dostupné z: doi:10.5772/33800
- [17] KABELÍKOVÁ, L. *Posouzení vhodnosti PET drtě firmy PETKA CZ, a.s. pro výrobu granulátu k potravinářským účelům*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2017. 64 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Josef Čáslavský, CSc..
- [18] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/904 ze dne 5. června 2019 o omezení dopadu některých plastových výrobků na životní prostředí (Text s významem pro EHP)* In: Úřední věstník Evropské unie. L 155, 12. 6. 2019, s. 1-19 Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0904&from=CS>
- [19] Historie. In: *Systém sběru a třídění plastových odpadů* | EKO-KOM [online]. EKO-KOM, c2011-2021 [cit. 2021-01-13]. Dostupné z: <https://www.ekokom.cz/cz/ostatni/o-spolecnosti/system-eko-kom/historie>
- [20] Třídění v domácnosti | Jak třídit. *Jak třídit* [online]. Jak třídit.cz, c1992-2021 [cit. 2021-01-29]. Dostupné z: <https://www.jaktridit.cz/cz/trideni/trideni-v-domacnosti>

- [21] Plast | Jak třídit. *Jak třídit* [online]. Jak třídit.cz, c1992-2021 [cit. 2021-7-10]. Dostupné z: <https://www.jaktridit.cz/cz/trideni/jak-spravne-tridit---barevne-kontejnery/plast>
- [22] Jaká je cesta plastového odpadu? *Samosebou.cz* [online]. Samosebou.cz, c2020, 31. 3. 2020 [cit. 2020-10-15]. Dostupné z: <https://www.samosebou.cz/2020/03/31/jaka-je-cesta-plastoveho-odpadu/>
- [23] Právo: Do žlutých kontejnerů půjde i kov. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Ministerstvo životního prostředí, c2008-2020, 27.5.2020 [cit. 2021-1-13]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/articles__20200527_Pravo_zlute_kontejnery_kov
- [24] AL-SALEM, S.M., P. LETTIERI a J. BAEYENS. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management* [online]. 2009, **29**(10), 2625-2643 [cit. 2020-08-31]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2009.06.004
- [25] RAGAERT, Kim, Laurens DELVA a Kevin VAN GEEM. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management* [online]. 2017, **69**, 24-58 [cit. 2020-08-31]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2017.07.044
- [26] MAJUMDAR, Abhijit, Sandeep SHUKLA, Anshu SINGH a Sanchi ARORA. Circular fashion: Properties of fabrics made from mechanically recycled polyethylene terephthalate (PET) bottles. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2020, **161** [cit. 2020-08-31]. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2020.104915
- [27] KAMBER, Nahrain, Yasuhito TSUJII, Kate KEETS, Robert WAYMOUTH, Russell PRATT, Gregory NYCE a James HEDRICK. The Depolymerization of Poly(ethylene terephthalate) (PET) Using N-Heterocyclic Carbenes from Ionic Liquids. *Journal of Chemical Education* [online]. 2010, **87**(5), 519-521 [cit. 2021-01-14]. ISSN 0021-9584. Dostupné z: doi:10.1021/ed800152c
- [28] SOVA, Miloš. Surovinová recyklace termoplastů. *Techportál.cz* [online]. Verlag Dashöfer, nakladatelství, c1997-2021, 6.1.2015 [cit. 2021-7-10]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/surovinova-recyklace-termoplastu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1Gxtj1E7sEG0S8/>
- [29] RAHEEM, Ademola, Zainura NOOR, Azman HASSAN, Mohd ABD HAMID, Sani SAMSUDIN a Ali SABEEN. Current developments in chemical recycling of post-consumer polyethylene terephthalate wastes for new materials production: A review. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, **225**, 1052-1064 [cit. 2020-10-16]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.019
- [30] OFORI-BOATENG, Cynthia, Keat LEE a Moses MENSAH. The prospects of electricity generation from municipal solid waste (MSW) in Ghana: A better waste

- management option. *Fuel Processing Technology* [online]. 2013, **110**, 94-102 [cit. 2020-10-16]. ISSN 03783820. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuproc.2012.11.008
- [31] INTHARATHIRAT, Rotchana a P. ABDUL SALAM. Valorization of MSW-to-Energy in Thailand: Status, Challenges and Prospects. *Waste and Biomass Valorization* [online]. 2016, **7**(1), 31-57 [cit. 2020-10-16]. ISSN 1877-2641. Dostupné z: doi:10.1007/s12649-015-9422-z
- [32] SHIBAMOTO, Takayuki, Akio YASUHARA a Takeo KATAMI. Dioxin Formation from Waste Incineration. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* [online]. New York, NY: Springer New York, 2007, , 1-41 [cit. 2021-07-10]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. ISBN 978-0-387-36900-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-36903-7_1
- [33] JI, Longjie, Shengyong LU, Jie YANG, Cuicui DU, Zhiliang CHEN, Alfons BUEKENS a Jianhua YAN. Municipal solid waste incineration in China and the issue of acidification: A review. *Waste Management & Research* [online]. 2016, **34**(4), 280-297 [cit. 2020-10-16]. ISSN 0734-242X. Dostupné z: doi:10.1177/0734242X16633776
- [34] Vyhláška č. 415/2012 Sb. ze dne 21. listopadu 2012 o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší ve znění vyhlášky č. 155/2014 Sb., vyhlášky č. 155/2014 Sb. (část), vyhlášky č. 406/2015 Sb., vyhlášky č. 171/2016 Sb. a vyhlášky č. 452/2017 Sb. In: *Sbírka zákonů*. ISSN 1211-1244.
- [35] PANDA, Achyut, R.K. SINGH a D.K. MISHRA. Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products—A world prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2010, **14**(1), 233-248 [cit. 2020-09-01]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2009.07.005
- [36] AL-SALEM, S.M., A. ANTELAVA, A. CONSTANTINO, G. MANOS a A. DUTTA. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal of Environmental Management* [online]. 2017, **197**, 177-198 [cit. 2020-09-01]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2017.03.084
- [37] DANTHUREBANDARA, Maheshi, Steven VAN PASSEL, Dirk NELEN, Yves TIELEMANS a Karel VAN ACKER. Environmental and socio-economic impacts of landfills. In: *Linnaeus Eco-Tech 2012* [online]. Kalimar (Sweden), 2012, s. 40-52 [cit. 2021-06-14]. ISBN 978-91-86983-86-4. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Dirk-Nelen/publication/278738702_Environmental_and_socio-economic_impacts_of_landfills/links/58ff795345851565029f290a/Environmental-and-socio-economic-impacts-of-landfills.pdf

- [38] AZNAR, María, Miguel CABALLERO, Jesús SANCHO a E. FRANCÉS. Plastic waste elimination by co-gasification with coal and biomass in fluidized bed with air in pilot plant. *Fuel Processing Technology* [online]. 2006, **87**(5), 409-420 [cit. 2020-10-15]. ISSN 03783820. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuproc.2005.09.006
- [39] Plastics – the Facts 2019. In: *PlasticsEurope* [online]. PlasticsEurope, 2020 [cit. 2020-09-22]. Dostupné z: https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf
- [40] *Výkup a zpracování PET lahví | PETKA CZ, a.s.* [online]. PETKA CZ, c2015 [cit. 2020-9-3]. Dostupné z: <http://www.petkacz.cz/petkacz.cz/index.html>
- [41] Recycled products. In: *Petcore-europe.org* [online]. petcore-europe.org, 2020 [cit. 2020-09-03]. Dostupné z: <https://www.petcore-europe.org/recycled-products.html>
- [42] SADAT-SHOJAI, Mehdi a Gholam-Reza BAKHSHANDEH. Recycling of PVC wastes. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2011, **96**(4), 404-415 [cit. 2020-04-21]. ISSN 01413910. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymdegradstab.2010.12.001
- [43] Function description: VARISORT COMPACT multi-sensor sorting machine. *Sesotec - Physical contamination detection & sorting systems* [online]. Sesotec, c2008-2020 [cit. 2020-10-17]. Dostupné z: https://www.sesotec.com/sites/593fc2aac25e5b0640a20ff8/content_entry59e75c78ffe9ecdb05f0bdf9/5a97c525ffe9ec732a731495/files/varisort-compact-pr-en.pdf?1597989580
- [44] AWAJA, Firas a Dumitru PAVEL. Recycling of PET. *European Polymer Journal* [online]. 2005, **41**(7), 1453-1477 [cit. 2020-03-27]. ISSN 00143057. Dostupné z: doi:10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005
- [45] DULIKOVÁ, M. *Stanovení účinnosti zařízení Polymer Separation System Purifier N 1024*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2014. 90 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Čáslavský, CSc.
- [46] DULIKOVÁ, M. *Problematika recyklace PET lahví: současný stav a perspektivy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2011. 39 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Čáslavský, CSc.
- [47] Výkup a prodej PET | PETKA CZ, a.s. *Výkup a zpracování PET lahví | PETKA CZ, a.s.* [online]. PETKA CZ, c2015 [cit. 2021-7-20]. Dostupné z: <http://www.petkacz.cz/petkacz.cz/co-delame/vykup-a-prodej-pet/index.html>
- [48] YOUSIF, Emad a Ali HASAN. Photostabilization of poly(vinyl chloride) – Still on the run. *Journal of Taibah University for Science* [online]. 2015, **9**(4), 421-448 [cit. 2021-7-13]. ISSN 1658-3655. Dostupné z: doi:10.1016/j.jtusci.2014.09.007

- [49] LEADBITTER, Jason. PACKAGING MATERIALS 5. POLYVINYL CHLORIDE (PVC) FOR FOOD PACKAGING APPLICATIONS. *ILSI* [online]. International Life Sciences Institute, c2021, June 2003 [cit. 2021-1-3]. Dostupné z: https://ils.eu/wp-content/uploads/sites/3/2016/06/R2003Pac_Mat5.pdf
- [50] SILANO, Vittorio, José BARAT BAVIERA, Claudia BOLOGNESI et al. Update of the risk assessment of di-butylphthalate (DBP), butyl-benzyl-phthalate (BBP), bis(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP), di-isononylphthalate (DINP) and di-isodecylphthalate (DIDP) for use in food contact materials. *EFSA Journal* [online]. 2019, **17**(12) [cit. 2021-01-03]. ISSN 18314732. Dostupné z: doi:10.2903/j.efsa.2019.5838
- [51] PACI, M a F.P LA MANTIA. Influence of small amounts of polyvinylchloride on the recycling of polyethyleneterephthalate. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 1999, **63**(1), 11-14 [cit. 2021-01-02]. ISSN 01413910. Dostupné z: doi:10.1016/S0141-3910(98)00053-6
- [52] OHNO, Hiroyuki a Yoko KAWAMURA. Analysis of Acrylonitrile, 1,3-Butadiene, and Related Compounds in Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymers for Kitchen Utensils and Children's Toys by Headspace Gas Chromatography/Mass Spectrometry. *Journal of AOAC INTERNATIONAL* [online]. 2010, **93**(6), 1965-1971 [cit. 2021-01-03]. ISSN 1060-3271. Dostupné z: doi:10.1093/jaoac/93.6.1965
- [53] What LEGO® bricks are made of. In: *Official LEGO® Shop US* [online]. The LEGO Group, 2020 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.lego.com/en-us/service/help/bricks-building/brick-facts/what-lego-bricks-are-made-of-408100000007855>
- [54] HU, Y.S., V. PRATTIPATI, S. MEHTA, D.A. SCHIRALDI, A. HILTNER a E. BAER. Improving gas barrier of PET by blending with aromatic polyamides. *Polymer* [online]. 2005, **46**(8), 2685-2698 [cit. 2021-01-03]. ISSN 00323861. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymer.2005.01.056
- [55] CHEN, Tingting, Guodong JIANG, Guoyu LI, Zhipeng WU a Jun ZHANG. Poly(ethylene glycol-co-1,4-cyclohexanedimethanol terephthalate) random copolymers: effect of copolymer composition and microstructure on the thermal properties and crystallization behavior. *RSC Advances* [online]. 2015, **5**(74), 60570-60580 [cit. 2021-07-20]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C5RA09252C
- [56] JOHNSON, Jim. California rules: No more No. 1 resin code for PETG. *Plastics News* [online]. Crain Communications, c1996-2020, February 27, 2018 [cit. 2020-10-19]. Dostupné z: <https://www.plasticsnews.com/article/20180227/NEWS/180229911/california-rules-no-more-no-1-resin-code-for-petg>
- [57] LATKO-DURALEK, Paulina, Kamil DYDEK a Anna BOCZKOWSKA. Thermal, Rheological and Mechanical Properties of PETG/rPETG Blends. *Journal of*

- Polymers and the Environment* [online]. 2019, 27, 2600-2606 [cit. 2021-7-13]. ISSN 1566-2543. Dostupné z: doi:10.1007/s10924-019-01544-6
- [58] PETG Shrink Film For Shaped Bottles and PETG High Shrink Films in PETG Shrink Film For Label Factory. *10 Years' PETG/PVC/PLA Shrink Film & PLA Films Manufacturer* [online]. HUBEI HYF PACKAGING [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.hyfpack.com/petg-shrink-film/>
- [59] STAUB, Colin. PET resin code changes in California. *Resource Recycling, Inc.: Your trusted source for recycling news and analysis* [online]. Resource Recycling, c2020, October 24, 2017 [cit. 2020-10-20]. Dostupné z: <https://resource-recycling.com/recycling/2017/10/24/pet-resin-code-changes-california/>
- [60] Optické metody. KŘÍŽENECKÁ, Sylvie a Václav SYNEK. *Základy analytické chemie* [online]. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí n. Labem, Fakulta životního prostředí, 2014, s. 82-93 [cit. 2021-07-21]. ISBN 978-80-7414-873-6. Dostupné z: http://envimod.fzp.ujep.cz/sites/default/files/skripta/48e_final_tisk.pdf
- [61] Molekulová absorpční spektrometrie v infračervené oblasti. *Spektrometrické analytické metody I. 2. vyd.* Praha: Karolinum, 2004, s. 127-146. ISBN 80-246-0776-x.
- [62] Infračervená absorpční spektroskopie. *Analytická chemie*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2019, s. 681-687. ISBN 978-80-7592-043-0.
- [63] The use of Diamond as an ATR material. In: *Infrared and Raman Discussion Group (IRDG)* [online]. Infrared and Raman Discussion Group, Registered Charity No 1153832, 2020 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <http://www.irdg.org/the-infrared-and-raman-discussion-group/ijvs/ijvs-volume-2-edition-2/the-use-of-diamond-as-an-atr-material/>
- [64] BRADLEY, Mike. Is ATR an Effective Sampling Technique for Carbon Black Rubber Analysis?. In: *ThermoFisher Scientific: Accelerating Science Blog* [online]. Thermo Fisher Scientific, 2021 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/blog/materials/is-atr-an-effective-sampling-technique-for-carbon-black-analysis/>
- [65] ALPHA-P sampling module. *ALPHA: User Manual*. 6th version. BRUKER OPTIK, 2017, s. 49.
- [66] *ALPHA: User manual*. 6th version. BRUKER OPTIK, 2017.
- [67] Search & Identify. In: *Bruker* [online]. Bruker, 2021 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/infrared-and-raman/opus-spectroscopy-software/search-identify.html>

- [68] Tkaná textilie černá - Geomatex Hobby+. In: *GEOMall* [online]. GEOMAT, 2021 [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: https://www.geomall.cz/tkana-textilie-cerna-geomatex-hobby?gclid=CjwKCAjwg4-EBhBwEiwAzYAlsQC16dVr2CB189dnxW6dHFq0zFftt4Ak6LQ8rxnbtaCKAE9McU9DoRoCYWlQAvD_BwE
- [69] Víčko vypouklé pro papírové kelímky průměr 80 mm – černé (100 ks). In: *OBALY.CZ* [online]. OBALY.CZ, 2020 [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: https://www.obaly.cz/vicko-vypoukle-pro-papirove-kelimky-prumer-80-mm-cerne-100-ks/?gclid=CjwKCAjwg4-EBhBwEiwAzYAlsmdZOd4d3eeRfYnj2HRjQWVDEZ4q2GW2pTWdRpqXc3aaq6eteiXrrhoCVIMQAvD_BwE
- [70] Hinged 18 oz Black Polystyrene Sides Take Out Box - 6 1/4"L x 5 1/2"W x 2 1/8"H. In: *Hubert Canada* [online]. Hubert Company, LLC, c1998-2021 [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <https://www.hubert.ca/product/22207/Hinged-18-oz-Black-Polystyrene-Sides-Take-Out-Box---6-14L-x-5-12W-x-2-18H>
- [71] HÝLOVÁ, L, A MIZERA, M MIZERA, R GRUND a M OVŠÍK. Mechanical Properties Study of High Impact Polystyrene Under Impact and Static Tests. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, **448** [cit. 2021-04-21]. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/448/1/012044
- [72] HIPS. In: *Prusa Knowledge Base* [online]. Prusa Research a.s., 2021 [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/hips_167118/
- [73] Styrene Acrylonitrile (SAN) & Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA). In: *British Plastics Federation* [online]. British Plastics Federation, 2021 [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/SAN.aspx>
- [74] Oranžová PLA tisková struna (filament) 1kg. In: *Prusa Research: Official Josef Prusa Shop* [online]. Prusa Research, 2021 [cit. 2021-06-02]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/filamenty/44-oranzova-pla-tiskova-struna-filament-1kg.html>
- [75] NAGARAJAN, Vidhya, Amar K. MOHANTY a Manjusri MISRA. Perspective on Polylactic Acid (PLA) based Sustainable Materials for Durable Applications: Focus on Toughness and Heat Resistance. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* [online]. 2016, **4**(6), 2899-2916 [cit. 2021-04-05]. ISSN 2168-0485. Dostupné z: doi:10.1021/acssuschemeng.6b00321
- [76] BALNER, Petr. Biodegradabilní plasty v procesech nakládání s odpady. *ODPADOVÉ FÓRUM: Odborný měsíčník pro průmyslovou a komunální ekologii* [online]. 2017, **18**(5), 34-36 [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/upload/pageFiles/eof-05-2017-pdf.pdf>

- [77] ALAERTS, Luc, Michael AUGUSTINUS a Karel VAN ACKER. Impact of Bio-Based Plastics on Current Recycling of Plastics. *Sustainability* [online]. 2018, **10**(5) [cit. 2021-04-05]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su10051487
- [78] NUK FC LÁHEV PP SportsCup Snoopy 450ml Bílá. In: *BÍBÍK – kojenecké a dětské zboží* [online]. Bibik.cz, 2021 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://www.bibik.cz/detske-sportovni-lahve/nuk-fc-lahev-pp-sportscup-snoopy-450ml-bila>
- [79] POM. In: *Linatex* [online]. Linatex.dk, 2019 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://linatex.dk/pom-polyoxymethylen-acetal-en/>
- [80] Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) Plastic. In: *Ingredient Search & Raw Materials Search Engine | Prospector* [online]. UL LLC, 2021 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://plastics.ulprospector.com/generics/8/acrylonitrile-styrene-acrylate-asa>
- [81] STŘÍTESKÝ, Ondřej. Prusament ASA je tady. Jak a co tisknout s nástupcem ABS?. In: *Prusa Printers – Komunita 3D tiskáren Original Prusa* [online]. Prusa Research, 2021 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/prusament-asa-je-tady-jak-a-co-tisknout-s-nastupcem-abs_30636/
- [82] DESKA STŘEŠNÍ POLYKARBONÁTOVÁ KOMŮRKOVÁ, GUTTAGLISS EASY CLICK. In: *ObchodProDilnu.cz* [online]. ObchodProDilnu.cz, 2021 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://www.obchodprodilnu.cz/deska-stresni-polykarbonatova-komurkova-guttagliss-easy-click-6911.html>
- [83] Sportovní láhev Nutrend Galon 2019 2000 ml. In: *InSPORTline* [online]. SEVEN SPORT, 2021 [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://www.insportline.cz/36210/sportovni-lahev-nutrend-galon-2019-2000-ml#horizontalTab>
- [84] Prusament PETG Ultramarine Blue Transparent 1kg. In: *Prusa Research: Official Josef Prusa Shop* [online]. Prusa Research, 2021 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/prusament/957-prusament-petg-ultramarine-blue-transparent-1kg.html>
- [85] Marpet-gfs: FLAT PET-g SHEET. In: *Brett Martin* [online]. Brett Martin [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: https://www.brettmartin.com/~media/Files/Plastic-Sheets-Documents-English/Marketing-Documents-English/marpet_gfs_factsheet_eng.pdf

SEZNAM POŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

PET	polyethylentereftalát
IR	infračervená spektroskopie
FTIR	infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
ATR	zeslabený úplný odraz
FTIR-ATR	infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací s technikou zeslabeného úplného odrazu
°C	stupně Celsia
EU	Evropská Unie
PVC	polyvinylchlorid
a. s.	akciová společnost
GmbH	<i>Gesellschaft mit beschränkter Haftung</i>
PP	polypropylen
PE	polyethylen
NIR	blízká infračervená oblast
ppm	<i>parts per million</i> ; miliontina
nm	nanometr
µm	mikrometr
LDPE	nízkohustotní polyethylen
HDPE	vysokohustotní polyethylen
EFSA	Evropský úřad pro bezpečnost potravin
UV	ultrafialové (záření)
PS	polystyren
ABS	akrylonitril-butadien-styren
PMMA	polymethylmethakrylát
PBT	polybutylentereftalát
PC	polykarbonát
POM	polyoxymethylen
PA	polyamid
PA-6	polyamid 6
PA-66	polyamid 66
PA-610	polyamid 610
PETG	polyethylentereftalát glykol
cm⁻¹	reciproký centimetr
HIPS	houževnatý polystyren
SAN	styren-akrylonitril
PLA	kyselina polymléčná (polylaktid)
ASA	akrylonitril-styren-akrylát
PVC-U	neměkčený polyvinylchlorid