VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

RECYKLACE PLASTŮ
RECYCLATION OF PLASTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Ondřej Lasota**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Eva Molliková, Ph.D.,Paed IGIP**
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	**Ondřej Lasota**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Eva Molliková, Ph.D.,Paed IGIP**
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Recyklace plastů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student se bude rešeršní formou zabývat problematikou recyklace polymerního materiálu a zaměří se na využití získaných druhotných surovin.

Cíle bakalářské práce:

Student se ve své práci:
- seznámí s problematikou odpadového hospodářství obecně
- blíže se zaměří na hospodářství s polymerním odpadem
- popíše možnosti recyklace a využití získaných druhotných surovin
- uvede názorné příklady z praxe

Seznam literatury:

Kuraš, M.: Odpady, jejich využití a zneškodňování. Praha, 1994

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
ředitel ústavu	děkan fakulty

Abstrakt

Plasty se díky svým vlastnostem jako je pevnost, trvanlivost, univerzálnost a relativně nízká cena těší velké oblibě. Neustále se zvyšujícím množstvím přispívají ke vzniku odpadů. Nejčastějším způsobem likvidace odpadů je skládkování, což je vzhledem k dlouhé životnosti plastů nežádoucí a velmi závažným problémem pro životní prostředí. Bakalářská práce se zabývá využitím druhotných surovin získaných z polymerního odpadu. Velké množství vznikajícího polymerního odpadu může být vhodně navrženou metodou zpracováno k výrobě paliva, úpravě asfaltových směsí a k vyztužení betonu. Jednotlivé metody jsou rozebrány a uvedeny jejich výhody a nevýhody.

Klíčová slova

Polymery, odpadní plasty, opětovné použití odpadu, recyklace, pyrolýza, pryžový granulát

Abstract

Plastic materials thanks to their properties like strength, durability, versatility and relatively low cost has gained this much popularity. With their constantly increasing amounts contribute to the waste. Most frequent method of waste disposal is landfill, which is due to plastic's durability undesirable and causes serious problem for the environment. This bachelor thesis focuses on the use of secondary raw materials obtained from polymer waste. Large amounts of generated polymer waste can be appropriately designed methods processed to produce fuel, to modify asphalt mix and to reinforce concrete. Different methods are analyzed and their advantages and disadvantages are shown.

Key words

Polymers, waste plastics, reuse of waste, recycling, pyrolysis, rubber granulate

Bibliografická citace

LASOTA, O. *Recyklace plastů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Molliková, Ph.D.,Paed IGIP.

Prohlášení

Já, Ondřej Lasota, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně dne 26.5.2016

.....

Obsah

Cíl práce 7
Úvod 7
1. Vývoj a charakteristika plastů 8
1.1. Historie plastů 8
1.2. Charakteristika plastů 9
1.3. Rozdělení plastů 10
1.4. Zhodnocení současného stavu plastů 11
2. Legislativa odpadového hospodářství ČR 15
2.1. Právní předpisy 15
2.2. Základní pojmy odpadového hospodářství 15
2.3. Plán odpadového hospodářství 17
3. Odpadové hospodářství 18
3.1. Regenerace a recyklace odpadů 20
4. Energetické využívaní odpadu 22
4.1. Technologický proces brněnské spalovny 24
5. Výroba tekutého paliva 27
5.1. Metody přeměny plastu na palivo 27
5.2. Druhy pyrolýzy 30
6. Polymery modifikované asfaltové směsi 31
6.1. Asfaltový koberec mastixový 32
6.2. Asfaltové směsi modifikované pryžovým granulátem 33
6.3. Rozdělení polymerů v asfaltových směsích 34
7. Úprava betonu odpadními polymery 36
7.1. Vlákny vyztužený beton 36
7.2. Beton s odřezky gumových pneumatik 40
7.3. Příklad z praxe – firma Mosev plast s.r.o. 40
Závěr 42
Seznam použitých zdrojů 43
Seznam zkratek 46
Seznam obrázků 47

Cíl práce

Bakalářská práce „Recyklace plastů“ si klade za cíl seznámit se s odpadovým hospodářstvím a blíže se zaměřit na hospodářství s polymerním odpadem a přiblížit možnosti zpracováním odpadů, které se dají využívat jako zdroje druhotných surovin. Seznamuje také s využitím získaných druhotných surovin v dnešní době. Snahou bylo popsat jednotlivé výhody a nevýhody používaných metod v praxi.

Úvod

Růst populace, hospodářský rozvoj, industrializace a modernizace přinesly obrovské zvýšení produkce všech druhů zboží, včetně plastů. Plasty, dnes využívané ve velké míře, přispívají ke stále se zvyšujícímu množství pevného odpadu. Kvůli vysokým nákladům a špatné biologické rozložitelnosti je nežádoucí likvidace skládkováním. Vlastnost dlouhé životnosti činí likvidaci plastového odpadu velmi závažným problémem pro životní prostředí a rovnováhu ekosystému. Odpad je jedním z hlavních problémů, kterým dnes moderní svět čelí. Každoročně vznikají miliardy tun odpadu a toto množství se neustále zvyšuje.

Kromě omezování vzniku těchto odpadů se stává prioritou zejména jejich využívání jako zdroje druhotných surovin. Je snahou vyvíjet nové technologie, najít nový způsob využití použitého polymerního materiálu. Větší materiálové využití nejenom plastového odpadu by znamenalo velký přínos. Došlo by ke snížení objemu odpadů, které se tak ukládají na skládky.

1. Vývoj a charakteristika plastů

1.1. Historie plastů [1, 2]

Od nejstarších dob lidstvo tvrdě pracovalo na vývoji materiálů, které by nabídly výhody, které se nenacházejí v přírodních produktech. Vývoj plastů začal s využitím přírodních látek s plastickými vlastnostmi, jako příklad lze uvést kaučuk. Poté se vyvíjel s rozvojem chemicky modifikovaných přírodních materiálů (nitrocelulosa, kolagen). Počátek moderních plastů, které zahrnují široký sortiment plně syntetického materiálu, se začal rozvíjet přibližně před sto lety. Pravděpodobně nejstarší uměle vyrobený plast byl připraven Alexandrem Parkesem v roce 1855, dnes je jeho vynález znám pod názvem celuloid.

V roce 1907 připravil chemik Leo Baekeland první čistě syntetický plast zvaný bakelit. Bakelit byl nejen dobrým izolátorem, ale byl také chemicky a tepelně odolný na rozdíl od vysoce hořlavého celuloidu. V desátých a dvacátých letech 20. století se mezi objevy řadí celofán, polyvinylchlorid (PVC) a další.

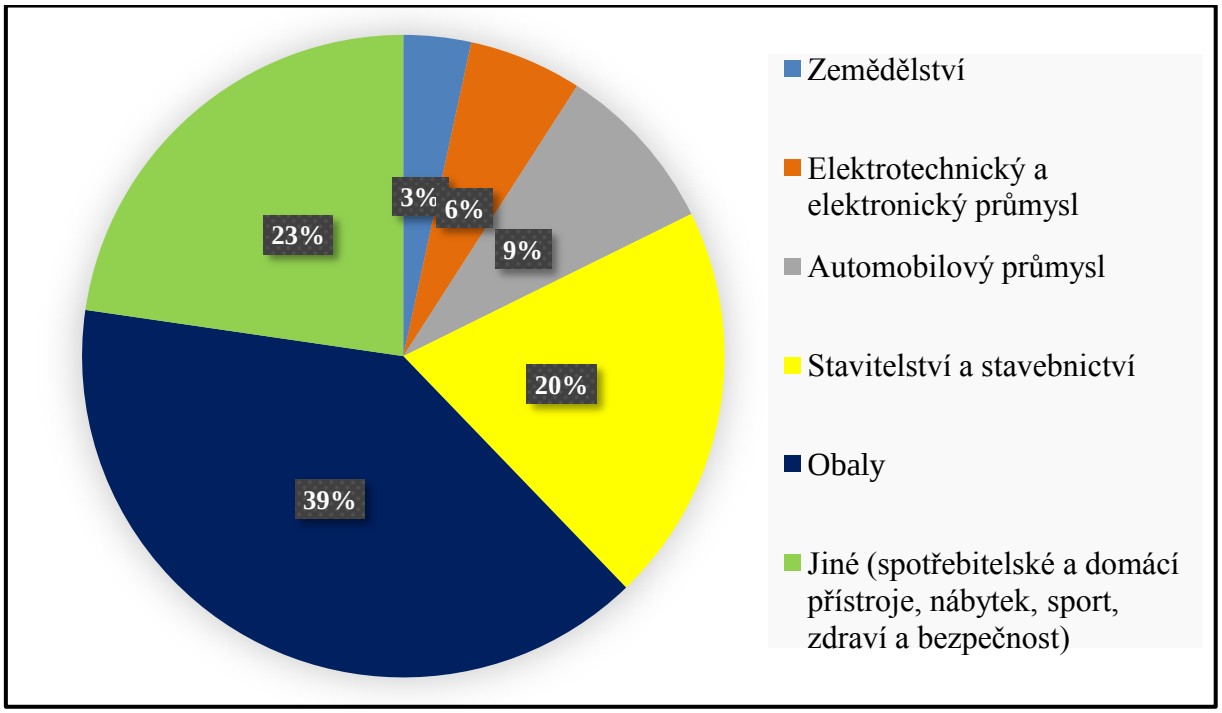
Po první světové válce došlo k rozvoji velkovýroby plastů používáním ropy, která se snadněji zpracovává na suroviny než uhlí. Po druhé světové válce se do skupiny světově rozšířených materiálů, PVC a polystyrenu (PS), přidružily novější plasty jako polyuretan (PU), polyester, silikony, polypropylen (PP) a polykarbonát (PC). Mnoho dalších následovalo a v šedesátých letech byly plasty kvůli své levné ceně dostupné všem a začaly být proto považovány za běžné.

Ve 20. století umožnily plasty lidstvu žít v nejnáročnějším prostředí – vesmíru. Během vzniku Mezinárodní kosmické stanice bylo možno vidět všude přítomné plasty. Nezbytné byly plasty při navrhování mnoha klíčových složek: konstrukčních prvků, izolací, zařízení pro podporu životních funkcí, tkanin skafandru, potravinářských obalů, vedení a komunikačních systémů. Přívod elektrické energie pro stanici pochází ze solárních panelů vyrobených z velké části také z plastů.

1.2. Charakteristika plastů [1, 3]

Plast je obecný pojem společný pro celou řadu syntetických nebo semi-syntetických materiálů používaných v široké a stále rostoucí škále uplatnění. Vzhledem k poměrně nízkým nákladům a snadné výrobě, univerzálnosti i voděodolnosti jsou plasty používány v obrovském a rozšiřujícím se sortimentu výrobků, od kancelářských sponek po kosmické lodě.

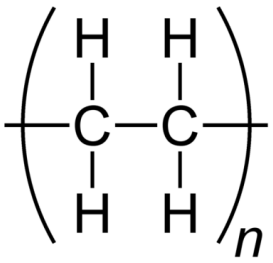
Během zpracování plastů se využívá vlastnosti tvarovatelnosti. Ta umožňuje odlévaní, lisování nebo extrudování plastů do různých tvarů – jako jsou filmy, vlákna, desky, trubky, láhve, krabice a mnoho dalších. Zlepšení v technické výkonnosti plastů nepřetržitě podporuje náhradu materiálů jako je papír, kovy, dřevo a sklo. Téměř každá stránka každodenního života zahrnuje plasty nebo kaučuk v určité podobě (**Graf 1 [4]**). Patří sem oděvy a obuv společně s výrobky pro potravinářství a oblast veřejného zdraví. V menších ale neméně důležitých objemech jsou plasty používány v automobilovém průmyslu, výrobě hraček a nábytku.



Graf 1: Podíl distribuce evropské poptávky plastů v roce 2014 [4]

1.3. Rozdělení plastů [1, 2]

Plasty jsou materiály, jejichž podstatnou část tvoří organické makromolekulární látky – polymery. Dlouhým řetězcem merů uhlovodíku na **obr. 1 [5]** je tvořeno mnoho běžných plastů, mezi něž se řadí např. polyethylen (PE), polypropylen (PP) a polystyren (PS).



Obr. 1: Mer uhlovodíku - základní stavební jednotka polyethylenu [5]

Přestože základ plastů tvoří uhlík a vodík, obsahují také další prvky – kyslík, chlor, fluor a dusík. Polyvinylchlorid (PVC) obsahuje chlor, polyamid (PA) dusík, polytetrafluoretylen (PTFE) fluor. Polyester a polykarbonáty obsahují kyslík. Kromě látek polymerní povahy obsahují plasty také aditiva, která mění nebo zlepšují jejich mechanické, fyzikální nebo chemické vlastnosti. Aditiva jsou použita nejen k ochraně plastů před degradačními účinky světla, tepla nebo bakterií, ale také ke změně takových vlastností jako je tok taveniny, poskytnutí barvy, vytvoření pěnové struktury, snížení hořlavosti a jiné.

Přestože mají plasty velmi odlišné vlastnosti, vykazují určité společné znaky:

- Jsou odolné vůči chemikáliím v závislosti na daném druhu plastu
- jsou výbornými tepelnými a elektrickými izolátory
- jsou velmi lehké, s různým stupněm pevnosti
- poskytují téměř neomezený rozsah vlastností a barev
- obvykle jsou vyrobeny z ropy.

Plasty mohou být kromě jiných hledisek děleny podle zpracovatelnosti po ohřátí, druhu typu výstavbového meru a dopadu na životní prostředí.

Podle zpracovatelnosti po ohřátí dělíme plasty na dvě odlišné skupiny: termoplasty a reaktoplasty. Termoplasty jsou látky, které lze po ohřátí na vysokou teplotu znovu zpracovat či tvarovat, do této skupiny plastů se řadí PE, PP, PS, polyester a další. Na rozdíl od termoplastů reaktoplasty nelze již po ohřátí znovu zpracovat (bakelit).

Podle použitého výstavbového meru dělíme plasty na: vinylové plasty (PE, PP, PVC, PS); polyamidy (nylon, silon); polyestery (polyethylentereftalát PET); polyuretany; fenoplasty; aminoplasty; polysiloxany (silikony) a fluoroplasty (teflon).

Podle dopadu na životní prostředí dělíme na: plně syntetické; bioplasty (nitrocelulosa, viskóza) a na speciální skupiny (woodplastic a na plasty se zkrácenou životností).

1.4. Zhodnocení současného stavu plastů [6, 7]

Růst v používání plastových výrobků byl způsoben náhlým rozvojem životní úrovně a má značný vliv na životní prostředí. Plasty se staly nezbytným materiálem a poptávka se neustále zvyšuje kvůli rozmanitým a zajímavým aplikacím v domácnosti i v průmyslu. Výrobky z polymerů jsou dnes velmi využívány v běžném i specializovaném životě, a tudíž přispívají ke stále se zvyšujícímu komunálnímu, či speciálnímu až nebezpečnému odpadu (odpady ze zdravotnictví). Především polymery termoplastů tvoří vysoký podíl odpadu a toto množství se neustále zvyšuje po celém světě. Plastový odpad představuje velmi vážný problém pro životní prostředí z důvodu obrovského množství tohoto typu odpadu a problémů týkajících se jeho řízené likvidace, protože přírodní rozklad polymerních materiálů trvá velmi dlouho kvůli vysoké odolnosti této skupiny materiálů vůči účinkům životního prostředí.

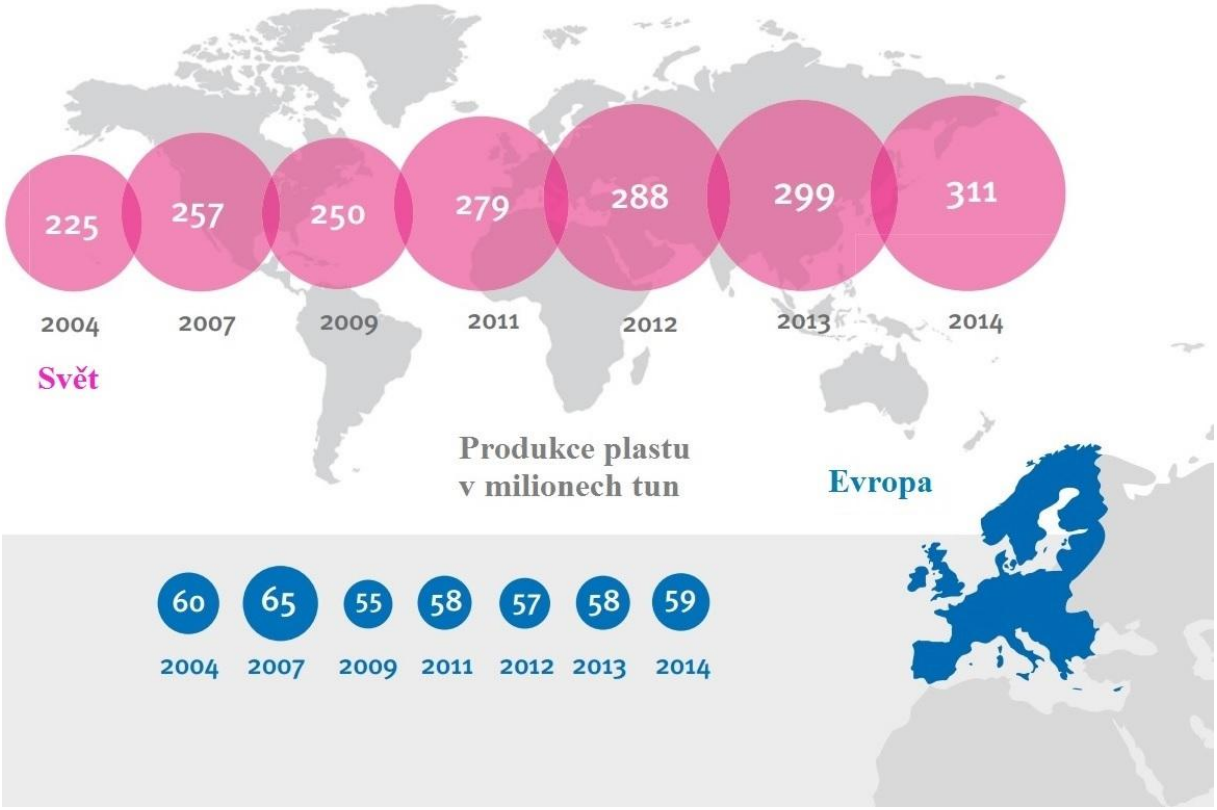
Produkce plastového materiálu je rozsáhlá a nepřetržitě roste s ohledem na výhody plynoucí z univerzálnosti, relativně nízké ceny, trvanlivosti dané jejich vysokou chemickou stabilitou a nízkou odbouratelností. Jedny z nejpoužívanějších plastů jsou polyolefíny jako polyethylen (PE) a polypropylen (PP), které se masivně vyrábějí a spotřebovávají v mnoha aplikacích jako je obalová technika, stavebnictví, elektrotechnika a zdravotnictví **[6]**. Dalšími polymery

vyráběnými ve velkých objemech jsou polystyren (PS), polyethylenterefltalát (PET), polyvinylalkohol (PVA) a polyvinylchlorid (PVC).

V roce 2014 dosáhla globální produkce plastového materiálu kapacity 311 miliónu tun **[4]**, přičemž v roce 1990 kapacita globální produkce byla odhadována na 80 miliónu tun **[6]**.

Odhaduje se, že výroba plastu roste celosvětově rychlostí kolem 5% ročně **[6]**.

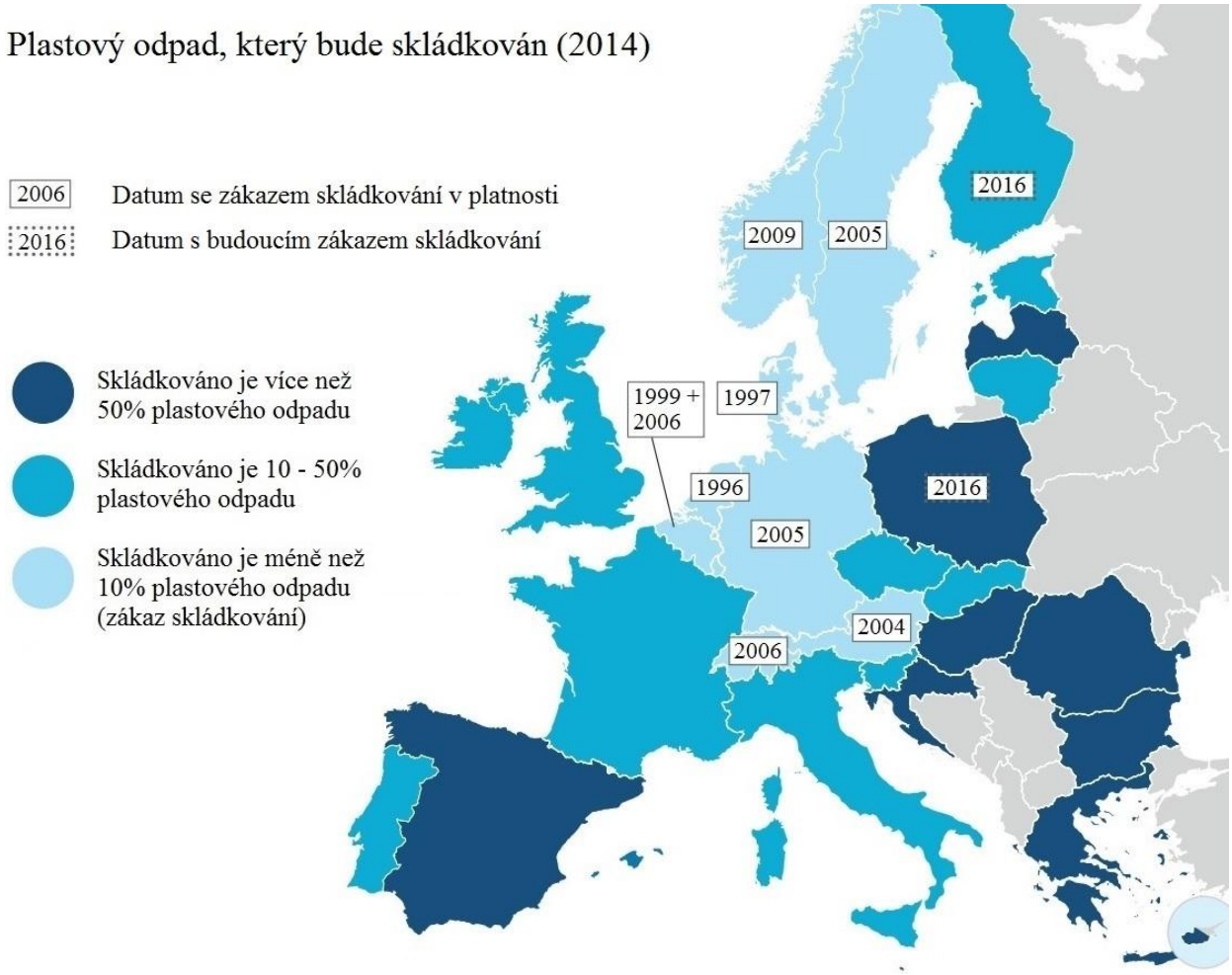
Plastová produkce globálně roste, zatímco Evropě je stabilní. Světová a Evropská produkce plastů v letech 2004-2014 je znázorněna na **obr. 2 [4]**, který zahrnuje plastové materiály různého druhu - termoplasty, polyuretany i jiné plasty - reaktoplasty, lepidla, nátěrové hmoty, tmely, neuvažuje však vlákna z PET, PA, PP, a polyakrylu.



Obr. 2: Růst světové a evropské produkce plastů [4]

Nejlepším možným řešením pro problémy životního prostředí, kterým se čelí v průmyslu polymerních materiálů je recyklace.

Vlastnost dlouhé životnosti činí likvidaci plastového odpadu velmi závažným problémem pro životní prostředí a rovnováhu ekosystému. Kvůli vysokým nákladům a špatné biologické rozložitelnosti je likvidace skládkováním nežádoucí, i když v mnoha státech Evropské unie je skládkování stále nejčastější způsob likvidace (**obr. 3 [4]**).



Obr. 3: Skládkování plastového odpadu ve státech Evropské unie [4]

Odhaduje se, že po celém světě je téměř 60 % plastového pevného odpadu vyhozeno na veřejném prostranství nebo skládkách **[6]**.

Indie byla oblíbeným odkladištěm plastového odpadu pro převážně průmyslové země, jako je Kanada, Dánsko, Německo, Velká Británie, Nizozemsko, Japonsko, Francie a Spojené Státy Americké. Podle údajů o dovozu Indické vlády si v letech 1999 a 2000 do Indie našlo cestu více než 59 000 tun, respektive 61 000 tun plastového odpadu **[6]**.

Efektivní opětovné využití odpadu je jedna z mnoha cest k vyřešení problému nadměrného pevného polymerního odpadu. Znovupoužití odpadního materiálu může výrazně přispět ke zlepšení životního prostředí a ekonomiky různými cestami a to **[7]**:

- omezením nadměrné spotřeby přírodních zdrojů a jejich ochranou před vyčerpáním
- snížením hladiny znečištění životního prostředí v důsledku vzniklých odpadních materiálů v městských a průmyslových oblastech
- úsporou energie a finančních zdrojů.

Opětovné použití odpadu je obzvláště zásadní, když máme do činění s vyřazeným plastovým materiálem. Pro snížení jeho negativního vlivu na životní prostředí a přírodu je zásadní tyto odpadní materiály znovu použít ve strojírenství a průmyslové výstavbě a výrobě.

2. Legislativa odpadového hospodářství ČR

2.1. Právní předpisy

V následujícím textu jsou uvedeny základní právní normy, kterými je v ČR řízeno nakládání s odpadem.

- **Zákon č. 185/2001 Sb.,** o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších zákonů.

- **Zákon č. 477/2001 Sb.,** o obalech a o změně některých zákonů (zákon o obalech), ve znění pozdějších zákonů.

- **Vyhláška č. 376/2001 Sb.,** Ministerstva životního prostředí a Ministerstva zdravotnictví o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů.

- **Vyhláška č. 381/2001 Sb.,** Ministerstva životního prostředí, kterou se stanoví Katalog odpadů, Seznam nebezpečných odpadů a seznamy odpadů a států pro účely vývozu, dovozu a tranzitu odpadů a postup při udělování souhlasu k vývozu, dovozu a tranzitu odpadů (Katalog odpadů).

- **Vyhláška č. 383/2001 Sb.,** Ministerstva životního prostředí o podrobnostech nakládání s odpady.

2.2. Základní pojmy odpadového hospodářství

Dle Zákona o odpadech č. 185/2001Sb., ze dne 15. května 2001 **[8],** je definováno:

- **Odpad** dle § 3 odst. 1 je každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit a přísluší do některé ze skupin odpadů uvedených v příloze tohoto zákona.

- **Komunální odpad** dle § 4 písm. b, je veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti fyzických osob, s výjimkou odpadů vznikajících u právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání.

- **Odpadové hospodářství** dle § 4 písm. c, je činnost zaměřená na předcházení vzniku odpadů, na nakládání s odpady a na následnou péči o místo, kde jsou odpady trvale uloženy, a kontrola těchto činností.

- **Nakládání s odpady** dle § 4 písm. d, jejich shromažďování, soustřeďování, sběr, výkup, třídění, přeprava a doprava, skladování, úprava, využívání a odstraňování.

- **Zařízení** dle § 4 písm. e, je technické zařízení, místo, stavba nebo část stavby.

- **Skládka odpadů** dle § 4 písm. h, je technické zařízení určené k odstraňování odpadů jejich trvalým a řízeným uložením na zemi nebo do země.

- **Úpravou odpadů** dle § 4 písm. k, se rozumí každá činnost, která vede ke změně chemických, biologických nebo fyzikálních vlastností odpadů (včetně jejich třídění) za účelem umožnění nebo usnadnění jejich dopravy, využití, odstraňování nebo za účelem snížení jejich objemu, případně snížení jejich nebezpečných vlastností.

- **Materiálové využití odpadů** dle § 4 písm. m, je náhrada prvotních surovin látkami získanými z odpadu, které lze považovat za druhotné suroviny, nebo využití látkových vlastností odpadů k původnímu účelu nebo k jiným účelům, s výjimkou bezprostředního získání energie.

- **Energetické využití odpadů** dle § 4 písm. n, je použití odpadů hlavně způsobem obdobným jako paliva za účelem získání jejich energetického obsahu nebo jiným způsobem k výrobě energie.

- **Původcem odpadů** dle § 4 písm. p, je právnická osoba nebo fyzická osoba oprávněná k podnikání, při jejíž činnosti vznikají odpady. Pro komunální odpady vznikající na území obce, které mají původ v činnosti fyzických osob, na něž se nevztahují povinnosti původce, se za původce odpadů považuje obec. Obec se stává původcem

komunálních odpadů v okamžiku, kdy fyzická osoba odpady odloží na místě k tomu určeném, obec se současně stane vlastníkem těchto odpadů.

- **Druhotná surovina -** pojem druhotná surovina není v legislativě odpadového hospodářství vymezen. Druhotnou surovinou se rozumí materiál získaný z odpadu, který je dále využíván ve výrobním procesu. Bez jakékoli úpravy či zpracování je určen buď k materiálovému využití, nebo recyklaci. **[9]**

2.3. Plán odpadového hospodářství

Zákon č. 352/2014 Sbírky ze dne 22. prosince 2014 o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015-2024 **[10]** stanovuje následující termíny a cíle:

- **Do roku 2015 zavést tříděný sběr minimálně pro odpady z papíru, plastů, skla a kovů.**

- **Do roku 2020 zvýšit nejméně na 50% hmotnosti celkovou úroveň přípravy k opětovnému použití a recyklaci alespoň u odpadů z materiálů jako je papír, plast, kov, sklo, pocházejících z domácností, a případně odpady jiného původu, pokud jsou tyto toky odpadů podobné odpadům z domácností.**

V návaznosti na směrnici Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES o odpadech a za účelem splnění cílů směrnice Rady 1999/31/ES o skládkách odpadů omezit množství biologicky rozložitelných komunálních odpadů ukládaných na skládky a dosáhnout snížení maximálního množství biologicky rozložitelných komunálních odpadů ukládaných na skládky tak, aby podíl této složky činil v roce 2020 nejvíce 35% hmotnostních z celkového množství biologicky rozložitelných komunálních odpadů vyprodukovaných v roce 1995.

Dle Zákona 229, § 21 odst. 7, ze dne 23. září 2014, kterým se mění zákon č. 185/2001 Sb., je stanoveno: **Na skládky je od roku 2024 zakázáno ukládat směsný komunální odpad a recyklovatelné a využitelné odpady stanovené prováděcím právním předpisem.**

3. Odpadové hospodářství [11]

Hlavní cíle odpadového hospodářství:

- předcházet vzniku a omezovat produkci odpadů
- při vzniku, nakládat s odpady tak, aby minimálně narušovaly životní prostředí
- maximální využívání odpadů jako druhotné suroviny v původní nebo upravené formě

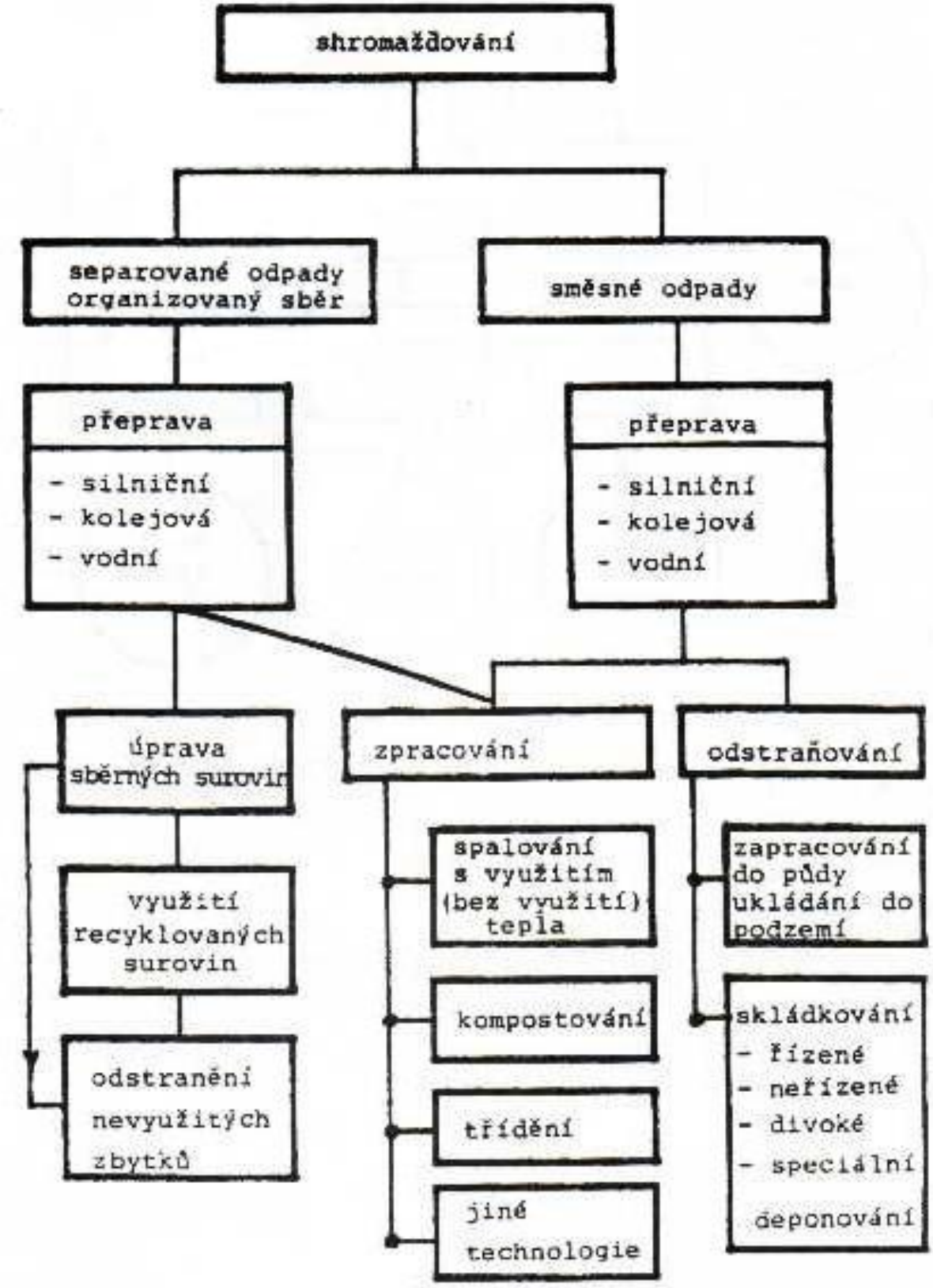
Nakládání s odpady (**obr. 4 [11]**) je spojeno s celou řadou činností, jako je shromažďování, přeprava, skladování, úprava, třídění, využití (recyklace) a zneškodňování odpadu.

Směsné odpady lze třídit jen vícestupňovými a velmi nákladnými technologiemi. Náklady, které přitom vznikají, mnohdy nejsou pokryty výnosy z prodeje druhotných surovin, které jsou získávány vytřízením z komunálního odpadu.

Mezi možnosti využití odpadů patří:

- materiálové využití - recyklace, kompostování, přepracování
- energetické využití – spalování

Komunální a objemný odpad je vytříděn na humusové látky, starý papír, sklenice, plasty, dřevo, Al-šrot, Fe-šrot. Vytříděný odpad slouží pro výrobu druhotných surovin, mezi které lze uvést plastový granulát, duté sklo, papír, palivo, humus, ocel. Tyto druhotné suroviny se používají dále ve výrobě pro výrobky z plastů, skleněné láhve, stavební ocel, palivo, kompost, lepenku.



Obr. 4: Postup nakládání s odpady [11]

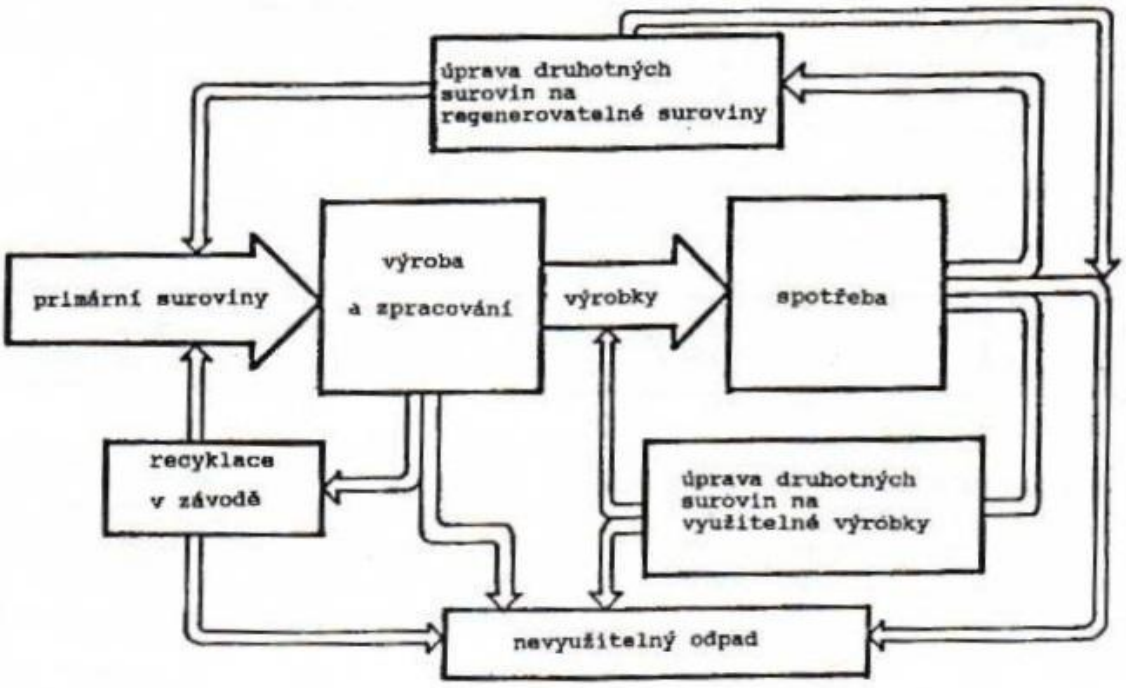
3.1. Regenerace a recyklace odpadů [11]

Regenerace a recyklace (**obr. 5 [11]**) jsou jedny z nejvýhodnějších způsobů řešení problému odpadu vznikajícího nejenom v chemickém průmyslu.

Regenerace má za účel navrátit původní užitné vlastností látkám nebo předmětům tak, aby mohly znovu sloužit svým původním účelům a nestaly se odpadem.

Recyklací rozumíme opětovné využití materiálu odpadu v původním výrobním procesu, bez podstatných změn materiálu, z něhož byly vyrobeny. Recyklace rovněž slouží k přepracování znehodnocených výrobků. Je potřeba velmi drahé technologie a výsledkem je jen sekundární materiál s horšími vlastnostmi, než byl původní.

Pokud nelze výrobek recyklovat ani regenerovat, může se využít pro získání energie.



Obr. 5: Schéma zhodnocení odpadů a recyklace surovin [11]

Recyklaci lze uskutečnit následujícími způsoby:

- recyklace průmyslového odpadu, zajišťuje zpětný tok do původního výrobního procesu - voda, rozpouštědlo, zpracovatelský odpad

- recyklace spotřebitelského odpadu, zajišťuje zpětný tok sběrového odpadu do původního průmyslového odvětví (odpadový papír, plasty), nebo získávání druhotných surovin na nové produkty - kompostováním, pyrolýzou, chemickými postupy apod.

- získávání energie buď přímým spalováním odpadu, nebo výrobou paliva pyrolýzou.

Polymerní odpady se dělí na:

- odpady ze zpracování plastů
- odpady ze zpracování pryže a kaučuku.

Podíl polymerů v komunálních odpadech činí několik procent. Při skládkování jsou však polymery, podobně jako sklo a porcelán, mnohem odolnější vůči chemickým a biochemickým změnám než jiné materiály. Je nezbytné omezit na minimum množství polymerních odpadů v komunálních odpadech.

Základní formy zneškodňování odpadu:

- skládkování
- kompostování
- tepelné zpracování.

V ČR se v roce 2014 spálilo 642 809 tun odpadu **[12]**, v roce 2015 jen 631 906 tun **[12].** Komunální a plastový odpad, který se v ČR nezpracuje tepelně, skončí na skládkách.

4. Energetické využívaní odpadu [13]

V současné době jsou v ČR pouze tři zařízení pro tepelné zpracování komunálního odpadu, jejímiž provozovateli jsou Pražské služby, a.s., TERMIZO a.s. v Liberci, a SAKO Brno, a.s. na **obr. 6 [13]**.

Obr. 6: Zařízení na energetické využívání odpadu společnosti SAKO Brno, a.s. [13]

Následující text je věnován společnosti SAKO Brno, a.s., která poskytuje komplexní služby v odpadovém hospodářství (**obr. 7 [14]**), zejména **[15]**:

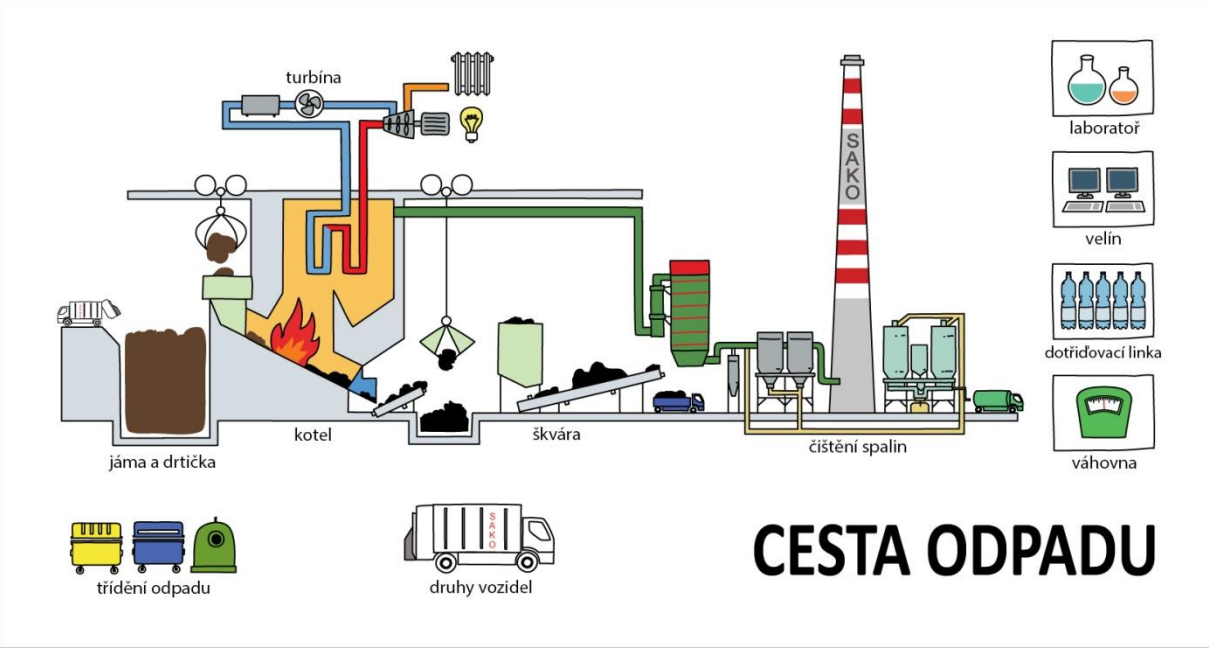
- zajišťuje pro město Brno veškeré činnosti spojené s provozem systému sběru a svozu směsného komunálního a separovaného odpadu a obsluhuje rozsáhlou síť sběrných středisek odpadů

- zpracovává odpad k následnému využití; disponuje moderním zařízením na třídění a další zpracování separovaného odpadu

- v jedné z nejmodernějších spaloven v Evropě přeměňuje směsný komunální odpad na tepelnou a elektrickou energii

- zabezpečuje pronájem velkokapacitních kontejnerů, svoz objemného odpadu a ekologickou likvidaci černých skládek ve městě Brně

- otevřeně komunikuje s veřejností, rozšiřuje povědomí o tom, jak zacházet s odpady a jak je důležité odpady třídit., prostřednictvím výchovně vzdělávacího environmentálního centra šíří ekologickou osvětu ve spolupráci se školami i firmami



Obr. 7: Cesta opadu brněnskou spalovnou [14]

Součástí technologického zařízení SAKO je dotřiďovací linka na separovaný odpad, k níž speciální vozidla přivážejí separované sbíraný odpad (separovaný papír, tříděný odpad z kontejnerů určených pro sběr plastů, nápojových kartonů apod.); dochází k ručnímu dotřídění odpadu od nežádoucích příměsí, přičemž kovové příměsi jsou odloučeny pomocí

elektromagnetických separátorů. Výstupem jsou obchodovatelné druhotné suroviny použitelné pro další materiálové využití.

V roce 2002 vstoupil v platnost nový zákon č. 185/2001 o odpadech, který již byl v souladu se strategií a předpisy Evropské unie v oblasti nakládání s odpady. Současně začal platit i nový zákon o ovzduší č. 86/2002 a jeho prováděcí předpisy a požadavky na provoz zařízení pro energetické využívání odpadů. Tyto skutečnosti vedly k tomu, že společnost SAKO provedla zásadní přestavbu a modernizaci stávajícího zařízení spalovny v rámci projektu Odpadové hospodářství Brno, který se zařadil mezi nejvýznamnější projekty nejen v ČR, ale i v zemích Evropské unie.

Zařízení na energetické využívání odpadu, které bylo vybudováno s cílem energeticky využívat komunální odpad jako palivo a následně získanou tepelnou energii využít na výrobu páry a elektřiny. Brněnská spalovna vyrábí teplo a elektřinu.

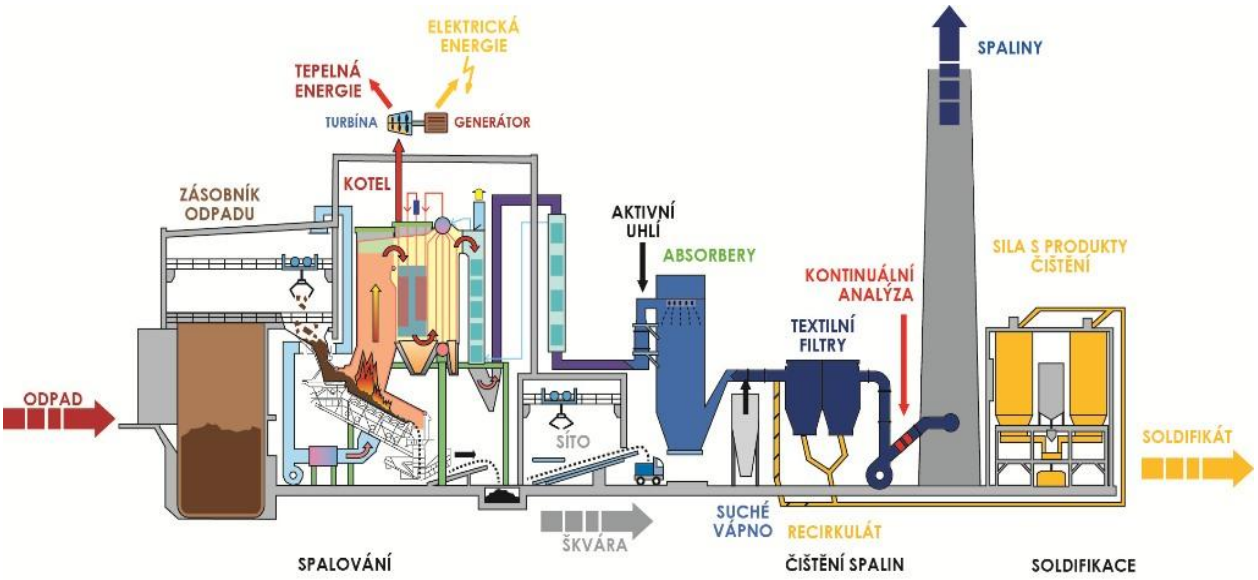
Výhody zařízení na energetické využívání odpadu společnosti SAKO Brno a.s.:

- jednoduché a účinné řízení spalovacího procesu
- úspora primárních neobnovitelných zdrojů surovin a energie
- uvolněná tepelná energie ze spalovacího procesu se využije na výrobu tepelné a elektrické energie
- redukce hmotnosti odpadu na 28 % původních hodnot
- redukce objemu o 90 % původních hodnot
- dokonalé vyhoření odpadu až na anorganický inertní materiál – škváru
- odseparování feromagnetických a neferomagnetických kovů ze škváry

4.1. Technologický proces brněnské spalovny [13]

Níže popsaný technologický proces spalovny a cesta odpadu je na **obr. 8 [13].** Do areálu SAKO dopravují vozidla odpad určený k přímému energetickému využití i odděleně sbíraný odpad, který projde dotříděním na dotřiďovací lince. Hned na vjezdu do areálu jsou instalována čidla radiační kontroly, která detekují zdroje i velmi slabého radiačního záření. V

případě pozitivní detekce musí být zdroj záření nalezen a předán k likvidaci do specializovaného zařízení pro likvidaci nebezpečného odpadu. Vozidlo se spalitelným obsahem vysype odpad do zásobníku, kde probíhá homogenizace odpadů a plnění násypky dvou kotlů. Odpad přikládaný do kotle hoří sám bez přídavného paliva, pouze při zapalování jsou použity plynové hořáky. Po spálení jsou ze zbytků separovány železné a neželezné kovy, které jsou dále využívány jako druhotná surovina. Ve spalovací komoře kotle je teplota vyšší než 1000 °C. Odpad prochází fází zahřívání, vysoušení, zplyňování, hoření a dohoření. Škvára, která je výsledným produktem po spálení padá do mokrého vynašeče a pásovým dopravníkem prochází přes vibrační třídič do zásobníku škváry.



Obr. 8 Technologický proces brněnské spalovny [13]

Přehřátá pára prochází parní odběrovou kondenzační turbínou, která má nízkotlaký a vysokotlaký díl s odběrem páry ve vysokotlaké části. V turbíně dochází k expanzi vysokotlaké přehřáté páry, při které se tepelná a tlaková energie přeměňuje na energii mechanickou. Mechanická práce se koná pohonem lopatkového rotoru. Rotor, který je spojen s převodovkou a generátorem elektrické energie, mechanickou práci transformuje na elektrickou energii. S výrobou elektrické energie se současně zajišťuje dodávka páry do centrálních rozvodů města Brna.

Chemická úpravna vody zajišťuje dostatečné zásoby napájecí vody o stanovených parametrech pro celý varný systém kotle.

Čištění spalin se provádí pěti-stupňovým systémem, kde se chemickými reakcemi zajistí snížení množství oxidů dusíku ve spalinách a kde také dochází k adsorpci těžkých kovů. Nezbytnou součástí celého systému jsou textilní filtry, které odloučí veškeré mechanické nečistoty a pevné reakční produkty. Celý proces čištění spalin je automaticky ovládán řídicím systémem, monitorován a vyhodnocován tak, aby na výstupu byl zbytkový obsah sledovaných škodlivin nižší, než jsou přípustné emisní limity uvedené v **tab. 1 [13]**.

Směrnice 2010/75/EC a vyhláška MŽP č. 415/2012 Sb.				
Specifické emisní limity	**Směrnice o spalování odpadů**	**Emisní limity dle platného Integrovaného povolení pro SAKO Brno, a.s.**	**Průměrné hodnoty hmotnostních koncentrací SAKO Brno, a.s. za rok 2015**	
Vztaženo na	**11% O_2**	**11% O_2**	**11% O_2**	
	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3
			Kotel K2	**Kotel K3**
Tuhé emise	10	8	0,0	0,0
Organický uhlík	10	8	0,1	0,2
SO_x jako SO_2	50	50	19,7	21,4
NO jako NO_2	200	200	156,7	158,1
NH_3	50	50	0,2	0,2
CO	50	50	5,4	2,7
HC1	10	10	3,2	3,8
HF	1	0,8	0,0	0,0
PCDD/PCDF$_{(ng/m3)}$	0,1	0,08	0,0186	0,0095
Hg	0,05	0,05	0,0077	0,0006
Cd, T1	0,05	0,04	0,0001	0,0003
Ostatní těžké kovy	0,5	0,4	0,0065	0,0125

Tab. 1: Porovnání emisních limitů [13]

5. Výroba tekutého paliva [17, 18, 19]

Pro likvidaci vyřazených a dále nepoužitelných plastů bylo tradičním řešením skládkování a spalování. Z důvodu omezené rozlohy půdy a dlouhé životnosti plastů je však skládkování vyhozených plastů potenciálním problémem, při jejich neúplném spalování mohou vznikat jedovaté látky vyvolávající vážné zdravotní problémy.

Dalším možným zpracováním vyřazených plastů je jejich přeměna na ropu procesem pyrolýzy nebo termální depolymerizací (katalytickým rozkladem). Vstupní odpad může být velmi rozmanitý, tyto procesy jsou schopné přijmout téměř jakýkoliv polymer nebo mix polymerů, včetně gumových pneumatik **[17]**, dalšími vhodnými surovinami pro výrobu kapalných uhlovodíků jsou polyethylen, polypropylen a polystyren **[19].**

Rozsah teplot u pyrolýzy je 450 – 500 °C, zatímco u katalytického rozkladu je teplota nižší, přibližně 400 °C **[18]**. Výhodou katalytického rozkladu je nižší spotřeba energie pro rozklad polymerů. Nevýhodou jsou ekonomické náklady na pořízení, obnovu nebo likvidaci katalyzátoru. Jestliže je olej vzniklý katalytickým rozkladem používán bez destilace, není vhodný pro použití v dieselových motorech nebo topných olejových hořácích **[18].**

Pyrolýza odpadních plastů je jedním z ekonomických způsobů, jak řešit problém s plastovým odpadem. Vede k výrobě kvalitního paliva, které může mít podobné vlastnosti jako běžně používaná ropná paliva. V průběhu pyrolýzy plastů dochází vlivem tepla a tlaku k rozpadu dlouhých řetězců molekul polymerů na kratší řetězce; tento proces je v podstatě imitací přírodního procesu rozpadu uhlíku a přeměny na ropu, která trvá v přírodě miliony let.

5.1. Metody přeměny plastu na palivo [16, 17, 18, 19]

Pyrolýza

Výrobní postup pro přeměnu plastů na kapalné palivo vychází z pyrolýzy plastů a kondenzace následně vzniklých uhlovodíků. Slovo pyrolýza se skládá z řeckých slov pyro „oheň“ a lysys „rozklad“. Proces pyrolýzy je tepelný rozklad materiálu na plynnou a pevnou fázi za nepřístupu kyslíku. Plasty vhodné pro přeměnu se přivádí do reaktoru ve tvaru válce (**obr. 9 [18]**), kde se rozkládají při 450 – 550 °C **[18].**

Bylo zjištěno, že ve většině případů je vstupní surovinou směs různých odpadních plastů z komunálních pevných odpadů nebo průmyslových zbytků. V důsledku rozdílných krakovacích teplot a různých produktů se v pyrolýze smíšených plastů mohou vyskytnout interaktivní reakce mezi různými druhy plastů; nicméně nebyl nalezen případ, kde by pyrolýzní technologie byla navržena pouze pro konkrétní typ plastového odpadu.

V závislosti na druhu použitého plastu a podmínkách při rozkladu se na vnitřní straně reaktoru postupně vytváří a usazuje zuhelnatělá hmota. Tato zuhelnatělá vrstva působí jako tepelná izolace, což vede ke snížení přesunu tepla do plastu. Po destilaci kapalného produktu pyrolýzy se proto z reaktoru odstraňuje, aby se zachovávala účinnost vedení tepla. Zuhelnatělá hmota se vyjme buď vysavačem, popřípadě některé reaktory jsou vybaveny šnekovým dopravníkem, který je umístěn v dolní části a slouží k odstranění této vrstvy. V některých tankových reaktorech se rovněž používá k odstranění uhličité hmoty míchadlo.

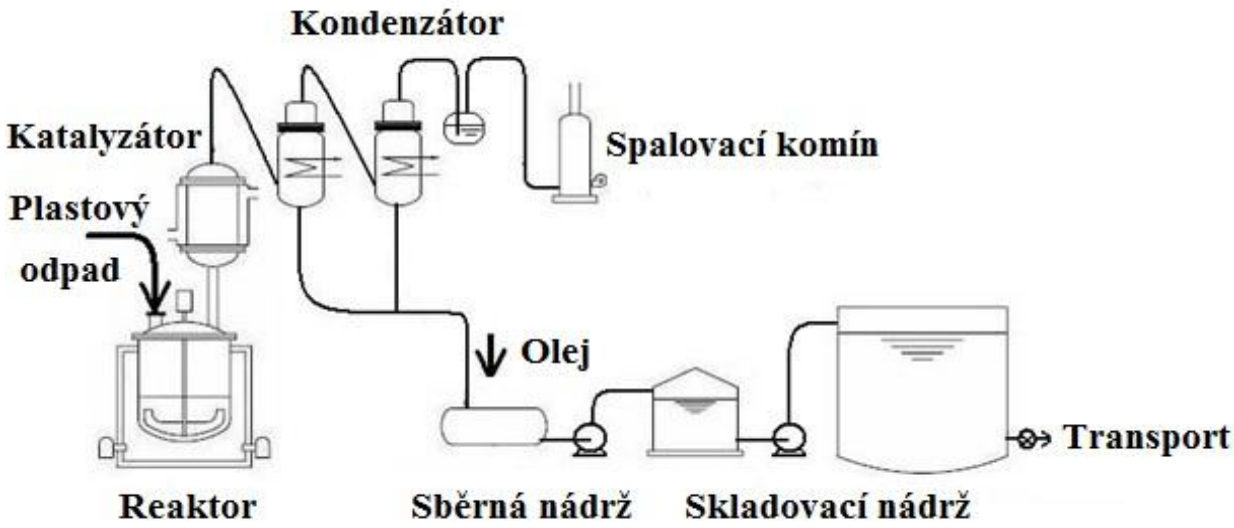
Po dostatečném rozložení odpadních plastů uvnitř reaktoru a dosažení reakční teploty nastává odpařování pyrolytických plynů a následuje nepřetržitá destilace. Zpracování pyrolýzních plynů je komplikovanou záležitostí. Vzniklý odpařený olej je uhlovodíkový destilát, který obsahuje přímý nebo větvený alifatický řetězec, dále cyklické alifatické a aromatické uhlovodíky. Tato směs kapalných uhlovodíků je krakována katalyzátorem. Bod varu vyrobeného oleje závisí na provozních podmínkách reaktoru, na krakování a kondenzátoru.

Některé uhlovodíky s vysokým bodem varu, jako je nafta, petrolej a benzín, jsou po destilaci z reaktoru kondenzovány ve speciálně navrženém systému kondenzátoru chlazeném vodou. Na konec prochází kapalina přes sběrnou nádrž a shromažďuje se ve skladovací nádrži.

Plynné uhlovodíky, jako je methan, ethan, propylen či butan nemohou být stlačeny a uskladněny. Předpokládá-li se přebytek plynných uhlovodíků, který není možné uskladnit, dochází k jejich spalování. Spalování je rovněž požadováno, pokud se očekává velký objem spalin vypuštěných z reaktoru. Vzhledem k výrobě vysoce hořlavého kapalného paliva je nezbytně důležitá provozní odbornost a vysoký standard bezpečnosti.

Produktem pyrolýzy plastů je tedy kapalný pyrolýzní olej, který je možné snadno uskladnit a transportovat. Tento olej může být použit přímo jako palivo, má však vyšší obsah nenasycených uhlovodíků a nižší stabilitu než komerční paliva **[16].** Pyrolýzní olej může být

dále rafinován na naftu, popřípadě tryskové palivo. Může být rovněž použit pro výrobu chemických látek **[20]**.



Obr. 9: Proces pyrolýzy na výrobu tekutého paliva z odpadních plastů [18]

Výhody procesu pyrolýzy jsou **[7]**:

- množství odpadu je výrazně sníženo (o 50 – 90 %)
- z odpadu může být vyrobeno palivo pevné, kapalné a plynné
- je dosaženo skladovatelného/přepravitelného paliva nebo chemické suroviny
- je zmenšen ekologický problém
- jedná se o vhodný proces, jelikož energie se získává z obnovitelných zdrojů, jako je pevný komunální odpad nebo odpadní kal

Bylo zjištěno, že produkty pyrolýzy z PE, PP, PS, jsou převážně uhlovodíky s molekulovou hmotností podobnou benzínu a naftě. V produktech bylo také nalezeno jisté množství nekondenzovatelných plynů spolu se zanedbatelným množstvím těžkého vosku. Těžký uhlovodíkový vosk je možné zpracovat na plyn nebo lehkou kapalinu další úpravou při vysoké teplotě nebo katalytickým krakováním **[16]**.

5.2. Druhy pyrolýzy [7, 20]

Existují různé typy pyrolytických procesů. Konvenční pyrolýza (pomalá pyrolýza) probíhá za nízké rychlosti ohřevu. Vznikají pevné, kapalné a plynné produkty o značném množství. Jedná se o starobylý proces používaný hlavně pro výrobu dřevěného uhlí. Tvořící se výpary lze nepřetržitě odvádět.

V současné době je upřednostňována technologie rychlé pyrolýzy (přesněji definováno jako termolýza), která je při nízké teplotě (577- 977 °C) spojována s dehtem a při vysoké teplotě (777-1027 °C) s plynem **[7].** Jedná se o proces, kde se materiál v nepřítomnosti kyslíku rychle zahřeje na vysokou teplotu.

Rychlá pyrolýza nyní dosáhla komerčního úspěchu ve výrobě chemikálií a aktivně se zkoumá pro výrobu kapalných pohonných hmot. Pyrolýzní olej byl úspěšně testován v motorech, turbínách, kotlích a patří mezi vysoce kvalitní uhlovodíková paliva, i navzdory téměř nepřijatelným energetickým a finančním nákladům na jeho získání **[20].**

6. Polymery modifikované asfaltové směsi [8, 21]

Doprava patří mezi každodenní součást našeho života. Nejrozšířenějším druhem dopravy je doprava silniční, ve které dochází k neustálému nárůstu stupně automobilizace. V dnešní době jsou kladeny stále vyšší nároky na životnost a provozní způsobilost vozovek. Snahou mnoha výzkumníků, vědců a rovněž lidí v úředních orgánech je navržení co nejtrvanlivější směsi na povrch vozovek. Zkoumá se recyklace odpadních materiálů pro možnost opětovného využití při stavbě silnic.

Silniční asfalty jsou modifikovány přísadami, které zlepšují jejich fyzikálně mechanické vlastnosti. Modifikovaný asfalt byl poprvé použit v pozdních 70. letech v Evropě, první větší využití začalo na počátku 90. let.

Polymery přidané do asfaltové směsi upravují stupeň tuhosti v živici. Výsledkem je zlepšená teplotní citlivost. Při vysokých teplotách má směs vyšší odolnost vůči tvoření trvalých deformací; při nízkých teplotách aplikované polymery umožňují použití měkčí základny živice, která snižuje křehkost a tím vykazuje lepší výkon proti tvoření mrazových trhlin. Jednou z významných vlastností polymerem modifikovaných pojiv je jejich zdokonalená adheze (přilnavost) ke kamenivu a stupeň koheze (soudružnost). **[8, 21]**

V porovnání s běžnými asfaltovými pojivy dosahují asfaltové směsi připravené s modifikovanými pojivy výrazného zlepšení únavových vlastností a tím i trvanlivosti vozovek. Důvodem je vyšší odolnost proti únavě a stárnutí. Znatelné je také snížení dopravního hluku.

V současné době jsou asfaltové směsi modifikované pomocí polymerů (např. styren-butadienového elastomeru) poměrně nákladné **[8]** a proto je před komerčním využitím tohoto druhu směsí nezbytné mít analýzu nákladů a přínosů, aby se projekty staly lépe proveditelné i úspornější. Jedením ze způsobů, jak snížit náklady na tyto stavby a učinit je výhodnějšími, je použití odpadních polymerů.

6.1. Asfaltový koberec mastixový [8, 21]

Jednou z velmi dobře známých asfaltových směsí je asfaltový koberec mastixový (SMA) na **obr. 10 [22]**. Tato směs s přerušenou zrnitostí byla vyvinuta v Německu v 60. letech **[8].** Má dobré únavové a nízkoteplotní vlastnosti a vyznačuje se vysokou odolností proti trvalým deformacím a trhlinám **[21]**. Celou řadou studií bylo zjištěno, že použití SMA na povrchy vozovek, v porovnání se směsi s plynulou zrnitostí, výrazně zvyšuje trvanlivost a odolnost směsi proti vyjíždění kolejí.

Základem SMA je hrubé kamenivo, kde dochází ke vzájemnému dotyku velkých zrn. Ve směsi je vyšší obsah plniva a asfaltu. Běžná je mezerovitost a vysoký obsah pojiv. Aby nedocházelo ke stékání pojiv, používají se stabilizační přísady, které zabraňují například stékání pojiv polymeru nebo vláken obsažených ve směsi. I díky dalším vlastnostem je SMA upřednostňován před ostatními druhy konvenční horké asfaltové směsi. Použití je pro vozovky s vysokým dopravním zatížením, jako jsou dálnice a silnice pro motorová vozidla či městské křižovatky.

Obr. 10: Asfaltový koberec mastixový s přerušenou zrnitostí [22]

6.2. Asfaltové směsi modifikované pryžovým granulátem [21, 23, 24]

Modifikované asfalty jsou asfaltová pojiva, jejichž fyzikální a mechanické vlastnosti byly upraveny přísadou polymeru. Jeví se, že mají největší potenciál pro úspěšné uplatnění v oblasti návrhu pružné vozovky se zvýšenou délkou životnosti a sníženou tloušťkou základny oproti běžným vrstvám asfaltového koberce. Asfaltové směsi modifikované polymery mají v současné době široký rozsah použití.

Jako přísady se používají termoplastické polymerní látky nebo pryžový granulát (**obr. 11 [25]**). Ten je možné získávat na příklad z odpadních pneumatik, které se v ČR v současné době nejčastěji spotřebovávají energeticky jako palivo. Pryžový granulát lze nejenom použít jako modifikační přísadu do silničního asfaltu, ale rovněž jako náhradu za část kameniva v asfaltové směsi.

Obr. 11: Pryžový granulát z recyklovaných pneumatik [25]

Asfaltové koberce modifikované pryžovým granulátem prokazují hluk tlumící vlastnosti, zlepšené fyzikálně mechanické vlastnosti asfaltového pojiva, snížení šíření trhlin v horké asfaltové směsi, hladký jízdní povrch s dobrou odolností proti smyku. Uspěly rovněž na sněhu a ledu, kde poskytují hrubý povrch, který dobře odolává sněhovým pluhům. Technologie

aplikace pryžového granulátu pochází z USA. Pryžový granulát se za tepla smíchá s asfaltovým pojivem ve vysoce výkonném mísícím zařízení uvedeném na **obr. 12 [23]**. Mezi nevýhody patří energetická náročnost a vyšší pracnost. Tyto směsi jsou lepivé a obtížněji zpracovatelné. Další nevýhodou jsou náklady konstrukční úpravy strojů na pokládku asfaltu. Náklady na tuto směs jsou 1,5 krát až 2,0 krát větší, než u konvenční směsi. **[23, 24]** Kompenzace za vyšší náklady je delší životnost vozovky se zmenšenou tloušťkou asfaltové směsi.

Obr. 12: Míchací souprava ECOPATH [23]

6.3. Rozdělení polymerů v asfaltových směsích [8]

Polymery využívané pro modifikaci asfaltu lze rozdělit na:

- termoplastické elastomery
- plastomery

Přidání termoplastických elastomerů k pojivům sebou přináší vyšší elastické vlastnosti ve výsledném produktu, zatímco přidání plastomerů k pojivům pomáhá zvýšit tuhost a pevnost

při vysokém zatížení, které obvykle způsobuje deformace v povrchovém filmu. Navíc v mírném podnebí za běžné teploty plastomery zvyšují viskozitu a stupeň tuhosti živice. Nicméně zvýšení pružnosti živice při náhlých teplotních výkyvech, není vyhovující. Některé z běžně používaných plastomerických polymerů k modifikaci asfaltových směsí jsou např. ethylen-butylakrylát (EBA), statistické kopolymery a polyethylen (PE).

Množství studií týkajících se modifikace asfaltové směsi použitím polyethylenu však není dostatečné nebo uspokojivě vyhovující; pouze malá část publikovaných zdrojů se zabývá polyethylenem vyztuženými pojivy, což vyžaduje další výzkum na toto téma.

Dalším zkoumaným polymerem byl polyethylentereftalát, který je používán v nápojových lahvích, syntetických vláknech apod. Polyethylentereftalát (dále již PET) byl použit jako přísada do asfaltového mastixového koberce. Hlavním cílem bylo zjistit vliv přidaných odřezků odpadního PET (**obr. 13 [26]**) na technické vlastnosti směsi SMA.

Obr. 13: Odřezky plastových láhví [26]

Výsledky výzkumu ukazují, že přidání PET má významný pozitivní vliv na vlastnosti SMA a to může podpořit opětovné využití odpadu v průmyslu šetrným způsobem k životnímu prostředí. Existuje jen ale málo údajů o používání PET v horké asfaltové směsi.

7. Úprava betonu odpadními polymery [27]

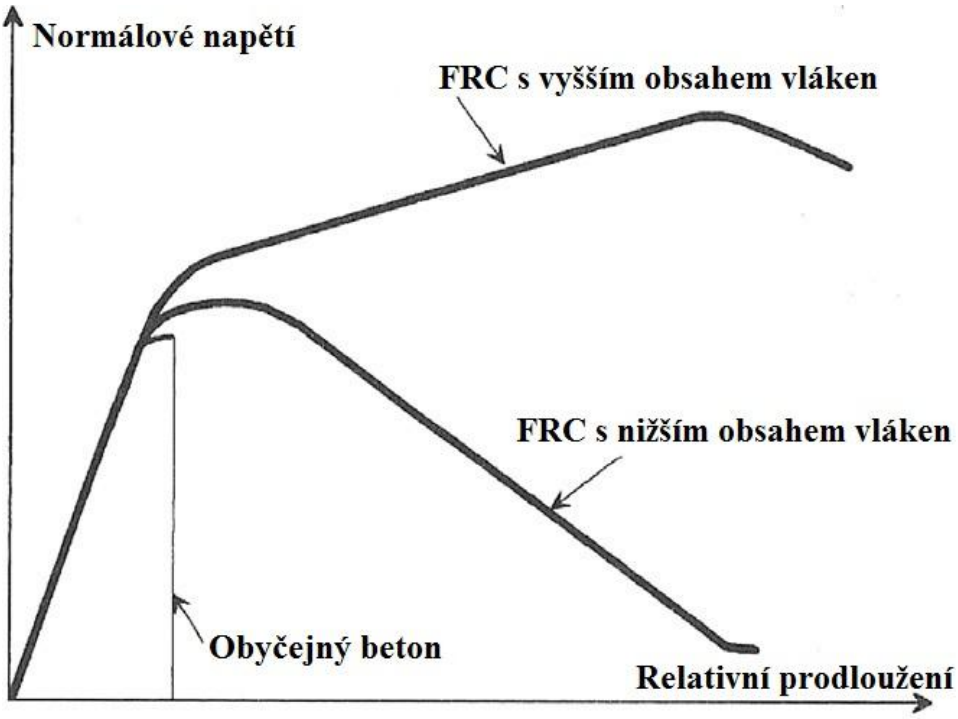
Beton je materiál s dobrou pevností v tlaku, ale s nízkou pevností v tahu. Nízká úroveň pevnosti v tahu je způsobena plastickým nebo hydraulickým smršťováním za vzniku nežádoucích mikro a makro trhlin. Kromě obvyklého přidávání speciálních přísad k omezení smršťovacích trhlin, byly rozpracovány studie o použití výztužných vláken z odpadního materiálu, k omezení a popřípadě až zastavení šíření prasklin, které nepříznivě ovlivňují vlastnosti a chování stavebních prvků a konstrukcí.

Jednou z možností jak zlepšit pevnost betonu v tahu je začít využívat jako výztuž PET vlákna. Pokud se ukáže, že přídavek těchto v podstatě odpadních materiálů ve formě vláken může být přínosem běžné betonové konstrukce, naskýtá se atraktivní způsob likvidace jinak nevyužitých odpadních materiálů. Počet recyklovaných PET láhví je totiž v současné době mnohem nižší než jejich výroba a tento rozdíl dramaticky roste **[27].**

7.1. Vlákny vyztužený beton [27, 28, 29]

Vlákny vyztužený beton (FRC) je kompozitní materiál, vznikající přidáním výztužných vláken do křehké matrice běžného betonu. Beton s přídavky vláken má ve skutečnosti lepší vlastnosti (**obr. 14 [28] a obr. 15 [29]**) než běžný beton a podává dobrý výkon. Experimentálně bylo zjištěno, že vlákna jsou účinnější v místech vzniku trhlin, čímž zabraňují jejich šíření. Poměr vláken závisí na typu použité matrice.

Pro nízké dávky (do 2% z celkové hmotnosti betonu) vlákna poskytují zvýšení houževnatosti, která se projevuje přítomností zbytkového odporu po vzniku trhliny, i v případě, že chování je degradující (měknutí). Při zvyšování podílu vláken, nad 2% se mění strukturní odezva a projevuje se deformace, tvrdnutí po zatížení.



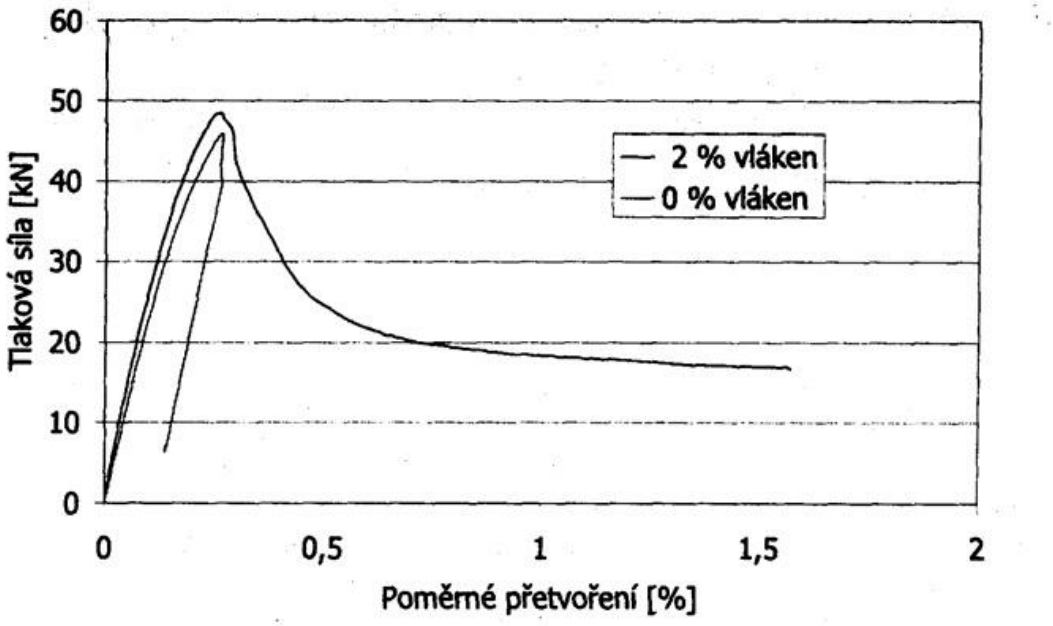
Obr. 14: Pracovní diagram vlákny vyztuženého betonu s různým množstvím vláken [28]

V praktických aplikacích vykazují syntetická vlákna největší úspěch, protože se ukazuje, že mají vlastnosti, které vlákna z jiných materiálů nemají, například:

- jsou chemicky inertní
- jsou lehčí než ocelová vlákna o stejném počtu
- umožňují lepší kontrolu nad praskáním vzniklým z plastického smrštění

Syntetická vlákna mají obecně nižší modul pružnosti než matrice. Jsou rozděleny na:

- vlákna s vysokým modulem (uhlíková vlákna, aramidová a akrylové); jsou nákladná
- vlákna s nízkým modulem (z polyethylenu, polypropylenu, polyesteru a nylonu); nepřispívají ke zvýšení pevnosti v tahu, ale jsou účinná v místech vzniku trhlin



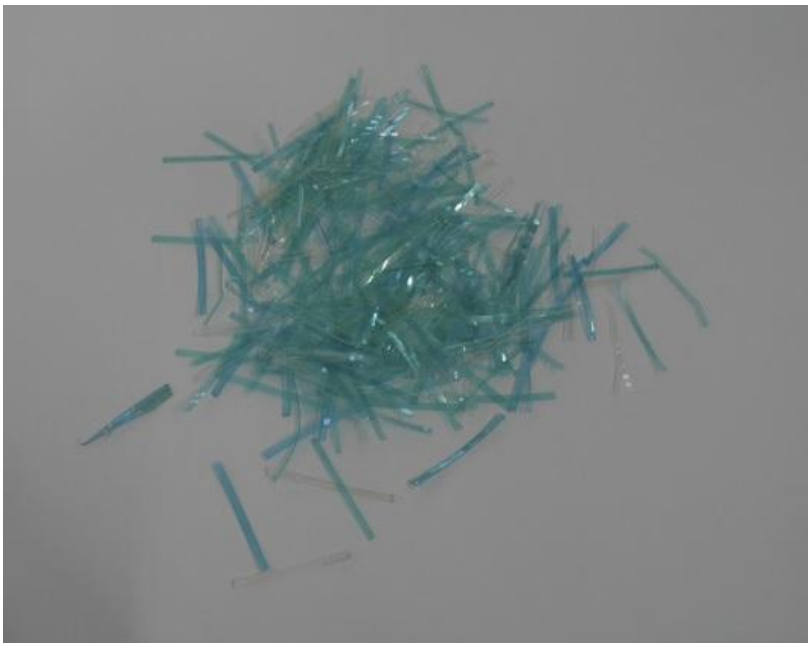
Obr. 15: Pracovní diagram zkoušky v tlaku kompozitu s vlákny a bez vláken [29]

Vlákny vyztužený beton, má ve ztvrdlém stavu typické vlastnosti běžného betonu, ale liší se zvýšenou tažností a snížením trhlin. Analýza výsledků dokazuje, že přidání i velmi malého množství vláken z recyklovaných nebo drcených PET láhví vede k vyšší pevnosti při prasknutí. Jedná se o inovativní materiál, ve kterém další výzkumy mají za cíl podpořit vůbec nejlepší výkon v oblasti stavebnictví. Beton vykazuje lepší tuhost a odolnost proti nárazu, protože praskliny se nemohou volně šířit skrz konstrukční prvek. Šíření je zabráněno vlákny, která tvoří tří-dimenzionální síťovinu, která zachycuje trhliny. Je zabráněno křehkému a náhlému porušení materiálu. Značná je také odolnost proti otěru a odštěpování, zlepšena je houževnatost i tažnost kompozitu. Výsledkem je více tvárné chování betonu spolu s vysokou přilnavostí.

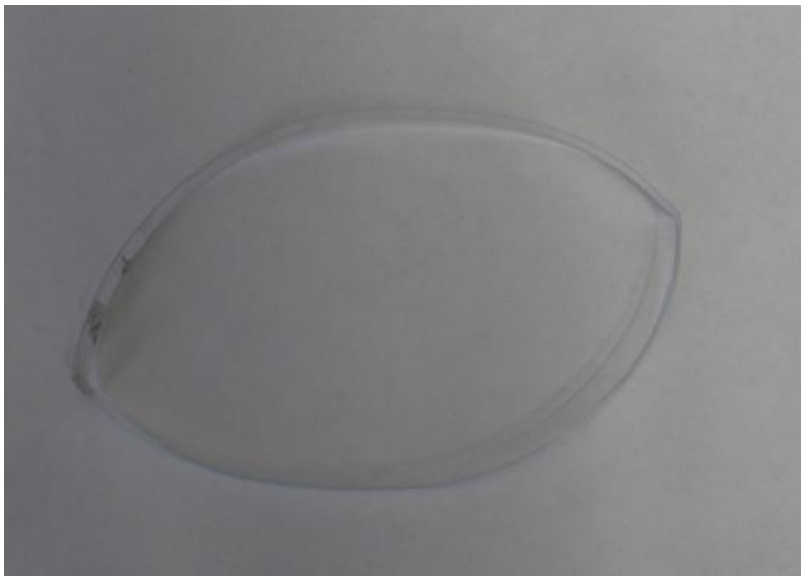
Dalším zajímavým aspektem je tepelná vodivost betonu vyztuženého PET vlákny. Přírůstku v tepelné izolaci betonu se dosáhne jak plastovými vlákny, tak přidáním kousků odpadních pneumatik, nebo kombinací obou způsobů.

Nevýhodou je snížená zpracovatelnost betonu po přidání vláken. Přidáno jich může být pouze omezené množství, maximálně do 1% hmotnosti betonu, aby materiál byl stále schopen zaplnit bednění.

Jsou využívány dva různé tvary PET vláken, buď proužky (**obr. 16 [28]**), nebo kruhová vlákna (**obr. 17 [28]**). Dají se získávat přímo z láhve jednoduchým stříháním, aniž by byly podrobovány jakýmkoliv speciálním a nákladným chemickým procesům.



Obr. 16 : Vzorek krátkých PET proužků [28]



Obr. 17 : Vzorek kruhových vláken [28]

Oba tvary vláken výrazně zlepšují houževnatost. Zlepšení tuhosti je zvláště patrné u kruhových vláken a zdá se, že jejich zvláštní tvar pomáhá vázat beton na každé straně popraskané části.

Jsou rozpracovány studie, které se zabývající mechanickými vlastnostmi betonu vyztuženého PET vlákny s cílem vzniklý kompozit využívat nejjednodušší a nejekonomičtější cestou. Je zapotřebí podrobnějšího výzkumu, nicméně výsledky získané doposud dávají velkou naději k výnosnému využití do budoucnosti.

7.2. Beton s odřezky gumových pneumatik [30]

Gumové pneumatiky jsou biologicky nerozložitelným materiálem, který může existovat po dlouhou dobu bez degradace. Jejich rostoucí množství vyvolává ekologický problém. Vzhledem k tomu, že i po dlouhé době skládkování pneumatiky nejsou biologicky odbourané, se jeví materiálová a energetická výtěžnost jako možná alternativa k likvidaci tohoto pevného odpadu. Byly prováděny výzkumy na použití odřezků pneumatik v betonu s portlandským cementem, jako náhrada za jemné, popřípadě hrubé kamenivo **[30]**. Beton je nejpoužívanějším stavebním materiálem, proto začlenění gumových částic do betonu je velmi dobrým a nadějným způsobem, jak využít velké množství odpadních pneumatik. Použitím těchto odřezků v betonu se zlepší některé jeho vlastnosti; ve srovnání s běžným betonem takový beton vykazuje vynikající pružnost, tažnost a energetickou absorbanci.

7.3. Příklad z praxe – firma Mosev plast s.r.o. [31]

Od roku 1993 působí v České republice ryze česká společnost Mosev plast s.r.o. Specializuje se na výrobu stavebních prvků z lisovaného směsného plastu získaného recyklací z komunálního plastového odpadu. Hlavními výstupy produkce jsou především protihlukové stěny a speciální výrobky pro železnice, dále řada drobných výrobků, které jsou využívány v zahradnictví a na dětských hřištích (latě, kůly, zatravňovací dlaždice, květináče, lavičky), kde svým způsobem nahrazují dřevo.

Hlavním přínosem výroby těchto výrobků jsou:

- enviromentální přínos pro celou společnost, kdy se nespotřebovávají neobnovitelné zdroje, ale zpracovává se odpadová surovina
- dlouhá životnost - 25 let
- snadná manipulace s výrobky, snadná doprava (lehčí než beton)

Hlavním výrobním programem společnosti jsou protihlukové stěny. Protihlukové panely DSH/plast jsou vyráběny z recyklovaného plastu, tzv. „REPLAST“. REPLAST se získává recyklací odpadních směsných plastů zejména z komunálního odpadu. Panel je opětovně recyklovatelný a vlastnostmi se blíží polyethylenu s vysokou hustotou HDPE.
Panely jsou svými vlastnostmi určeny pro využití tam, kde je požadována dlouhodobá životnost (více jak 25 let) bez nutnosti údržby. Jejich charakteristické výhody je činí ideálními pro dopravní infrastrukturu. Snadná manipulace při přepravě a montáži je dána poměrně malou hmotnosti pohltivých panelů DSH plast. Panely splňují požárně-technické parametry a jsou dostatečně odolné proti povětrnostním vlivům, jsou nenasákavé a jsou odolné vůči kyselinám a solím.

Obr. 18: DSH plast [32]

Závěr

Plasty jsou jednou z největších inovací tisíciletí. Plasty jsou lehké, nekorodují a nehnijí, mají nízkou cenu, v některých případech jsou opakovaně použitelné, čímž šetří přírodní zdroje. Po ukončení životnosti výrobků z plastů však vzniká nadměrné množství polymerního odpadu a byla proto zahájená činnost v oblasti výzkumu pyrolýzy plastů v různých podmínkách za použitím různých katalyzátorů. V rámci tohoto výzkumu byl navržen proces, který dokáže převést plastový odpad na uhlovodíkové palivo. Nicméně je ještě mnoho dalších problémů, které musí být v blízké budoucnosti vyřešeny. Většina ojetých pneumatik se v ČR využívá energeticky jako přídavné palivo v cementárnách, případně spalovnách. Pouze malá část těchto pneumatik se využívá jako materiál, který přináší nové a dlouhodobé využití. Jednou z možností využití odpadních pneumatik je modifikace silničních asfaltů. Takto upravené směsi vykazují vyšší životnost, trvanlivost a odolnost proti trhlinám. Další možností je úprava betonu výztužnými vlákny, popřípadě odřezky pneumatik, které zároveň slouží jako náhrada kameniva. Větší materiálové využití plastového odpadu by znamenalo velký přínos, neboť by došlo ke snížení objemu odpadů, které se ukládají na skládky.

Seznam použitých zdrojů

[1] *What is plastic?* [online]. PlasticsEurope. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic.aspx

[2] Lifecycle of a Plastic Product. In: *Education and Resources* [online]. American Chemistry Council. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: https://plastics.americanchemistry.com/Life-Cycle

[3] ANDRADY, Anthony L. a Mike A. NEAL. Applications and societal benefits of plastics. In: *Phil. Trans. R. Soc. B* [online]. Royal Society, 2009. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/364/1526/1977

[4] Plastics – the Facts 2015. In: *An analysis of European plastics production, demand and waste data* [online]. PlasticsEurope, 2015. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.plasticseurope.org/Document/plastics---the-facts-2015.aspx?Page=DOCUMENT&FolID=2

[5] Polyethylen. In: *Wikipedia: otevřená encyklopedie* [online]. Stránka naposledy edit. 23.4.2016 v 23:15. [cit. 2016-05-23]. Česká verze. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyethylen

[6] PATNI, Neha, Pallav SHAH, Shruti AGARWAL a Piyush SINGHAL. Alternate Strategies for Conversion of Waste Plastic to Fuels. [online]. Hindawi Publishing Corporation, 2013. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://dx.doi.org/10.1155/2013/902053

[7] AHMADINIA, Esmaeil, Majid ZARGAR, Mohamed Rehan KARIM, Mahrez ABDELAZIZ a Payam SHAFIGH. Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. In: *Science Direct* [online]. Elsevier, 2011. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911004225

[8] ČESKO. Zákon č. 185 ze dne 15. května 2001 o odpadech a o změně některých dalších zákonů. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2001, částka 71, s. 4074-4113. Dostupné také z: http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=185/2001&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy

[9] *Vymezení pojmů souvisejících s odpadovým hospodářstvím v obcích*. [online]. Komunální odpad. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.komunalniodpad.eu/?str=pojmy

[10] ČESKO. Nařízení vlády č. 352 ze dne 22. prosince 2014 o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015-2024. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2014, částka 141, s. 4650-4695. Dostupné také z: http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=352/2014&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy

[11] KURAŠ, M. *Odpady, jejich využití a zneškodňování*. Praha: český ekologický ústav, 1994. ISBN 80-85087-32-4.

[12] Zařízení pro tepelné zpracování komunálního odpadu. In: *Seznam spaloven odpadů v ČR* [online]. ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV, 2016. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/emise/spalovny

[13] *Technologie*. [online]. SAKO Brno a.s. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.sako.cz/stranka/cz/5/technologie/

[14] Cesta opadu brněnskou spalovnou. In: *ENVIcentrum* [online]. SAKO Brno a.s. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.sako.cz/stranka/cz/6/envicentrum-informace-pro-skoly-a-verejnost/

[15] *O společnosti* [online]. SAKO Brno a.s. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.sako.cz/stranka/cz/8/o-spolecnosti/

[16] GAO, Feng. *Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels*. University of Canterbury, 2010. Doktorská práce.

[17] SMITH, Melanie. PLASTIC WASTE STREAM. In: *Whole System Foundation* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.whole-systems.org/images/Recycling%20and%20pyrolysis5110.pdf

[18] KODERA, Yoichi. *Plastics Recycling – Technology and Busines in Japan* [online]. Tsukuba: 2012. ISBN 978-953-51-0795-8. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://dx.doi.org/10.5772/46085

[19] Converting Waste Plastics into a Resource. In: *Compendium of Technologies* [online]. United Nations Environmental Programme, 2009. [cit. 2016-05-23] Dostupné z http://www.unep.org/ietc/Portals/136/Publications/Waste%20Management/WastePlasticsEST_Compendium.pdf

[20] Pyrolysis and Other Thermal Processing. In: *Biomass Program* [online]. U.S. Department of Energy, 2005. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z http://web.archive.org/web/20070814144750/http://www1.eere.energy.gov/biomass/pyrolysis.html

[21] MUSÍLEK, Lukáš. *Návrh a posouzení asfaltového betonu pro ložní vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem.* Brno: Vysoké učení technické, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací.

[22] Asfaltový koberec mastixový s přerušenou zrnitostí In: *Thin Is In: Thin Asphalt Overlay Helps Stretch Budgets Further* [online]. Texas A&M Transportation Institute [cit. 2016-05-

23]. Dostupné z http://tti.tamu.edu/2012/09/01/thin-is-in-thin-asphalt-overlay-helps-stretch-budgets-further/

[23] KUDRNA, Jan a Ondřej DAŠEK. Využití gumoasfaltového pojiva do obrusných vrstev vozovek. *časopis stavebnictví* [online]. 2007, 06-7/07. ISSN 1802-2030. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/clanek.php?detail=277

[24] JUNG, Jong-Suk, Kamil E. KALOUSH a George B. WAY. Life Cycle Cost Analysis: Conventional Versus Asphalt-Rubber Pavements. [online]. Arizona State University, 2002. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.clemson.edu/ces/arts/LCCARPA2002.pdf

[25] Pryžový granulát z recyklovaných pneumatik. In: *Materiál z recyklovaných pneumatik jako povrch vozovek - silničáři ze Zlína připravují testování vybraných úseků* [online]. 2011 Mediální s.r.o. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.rojan.cz/material-z-recyklovanych-pneumatik-jako-povrch-vozovek--silnicari-ze-zlina-pripravuji-testovani-vybranych-useku

[26] Odřezky plastových láhví. In: *Business Units Plastic Chips* [online]. Al Tazar General Trading LLC [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.tazartrading.com/Plastic.html

[27] FOTI, Dora. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. In: *SienceDirect* [online]. Elsevier, 2012. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822312004588

[28] FOTI, Dora. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. In: *SienceDirect* [online]. Elsevier, 2010. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810005969

[29] FIALA, Ctislav. *Samozhutnitelný beton vyztužený vlákny.* Praha: ČVUT 2006. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb

[30] SAFIUDDIN, Md., Mohd Zamin JUMAAT, M. A. SALAM, M. S. ISLAM a R. Hashim. Utilization of solid wastes in construction materials. In: *International Journal of Physical Sciences* [online]. Academic Journals 2010. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.academicjournals.org/article/article1380817337_Safiuddin%20et%20al.pdf

[31] *Obecné vlastnosti protihlukových panelů* [online]. Mosev plast s.r.o. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.mosevplast.cz/index.php?a=cat.38

[32] MOSEV PLAST S.R.O. DSH plast [fotografie]. *Protihlukové panely* [online] Dostupné z: http://www.mosevplast.cz/index.php?Foto=155

Seznam zkratek

EBA - ethylen-butylakrylát

FRC - vlákny vyztužený beton

HDPE - polyethylen s vysokou hustotou

PA - polyamid

PC - polykarbonát

PE - polyethylen

PET - polyethyléntereftalát

PP - polypropylen

PS - polystyren

PTFE - polytetrafluoretylen

PU - polyuretan

PVA - polyvinylalkohole

PVC - polyvinylchlorid

SMA - asfaltový koberec mastixový

Seznam obrázků

Obr. 1: Mer uhlovodíku - základní stavební jednotka polyethylenu [5]
Obr. 2: Růst světové a evropské produkce plastů [4]
Obr. 3: Skládkování plastového odpadu ve státech Evropské unie [4]
Obr. 4: Postup nakládání s odpady [11]
Obr. 5: Schéma zhodnocení odpadů a recyklace surovin [11]
Obr. 6: Zařízení na energetické využívání odpadu společnosti SAKO Brno, a.s. [13]
Obr. 7: Cesta opadu brněnskou spalovnou
Obr. 8: Technologický proces brněnské spalovny [13]
Obr. 9: Proces pyrolýzy na výrobu tekutého paliva z odpadních plastů [18]
Obr. 10: Asfaltový koberec mastixový s přerušenou zrnitostí [22]
Obr. 11: Pryžový granulát z recyklovaných pneumatik [25]
Obr. 12: Míchací souprava ECOPATH [23]
Obr. 13: Odřezky plastových láhví [26]
Obr. 14: Pracovní diagram vlákny vyztuženého betonu s různým množstvím vláken [28]
Obr. 15: Pracovní diagram zkoušky v tlaku kompozitu s vlákny a bez vláken [29]
Obr. 16 : Vzorek krátkých PET proužků [28]
Obr. 17 : Vzorek kruhových vláken [28]
Obr. 18: DSH plast [32]