



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**PROBLEMATIKA TEPELNĚ ZPRACOVANÝCH ODPADNÍCH
RECYKLÁTŮ A OPTIMALIZACE VLASTNOSTÍ PRO JEJICH
VYUŽITÍ VE STAVEBNICTVÍ**

THE ISSUE OF HEAT TREATED WASTE AND OPTIMIZATION OF PROPERTIES FOR THEIR USE
IN CONSTRUCTION

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jan Čermák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK, CSc.

BRNO 2017

ABSTRAKT

Vzhledem ke stále se zvyšující spotřebě plastových materiálů se jejich znovuvyužití stává velmi aktuální otázkou. Recyklace vyčištěného jednodruhového plastového odpadu je jednoduchá, takové produkty lze použít jako surovinu nebo příměs při výrobě nových produktů. Problémem zůstává energetická, ekonomická i environmentální náročnost pro třídění, čištění a případnou regranulaci odpadů na vhodnou vstupní surovinu. Tento problém je možné vyřešit pomocí technologie, která bude schopna zpracovávat nevytříděné a vícedruhové odpadní termoplasty v dále využitelné produkty

KLÍČOVÁ SLOVA

recyklace, odpad, plastbeton, polymerbeton, termoplasty

ABSTRACT

Given the increasing consumption of plastic materials their reuse becomes a very topical issue. Recycling the single-cleaned plastic waste is simple, these products can be used as raw material or additive in the manufacture of new products. The problem remains the energy, economic and environmental demands in sorting, cleaning and eventual regranulation of waste to a suitable feedstock. This problem can be solved using technology that is able to handle multiple-type waste thermoplastics in further useful products.

KEYWORDS

recycling, waste, polymer concrete, thermoplastics

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 31. 8. 2017

Ing. Jan Čermák
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané disertační práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 31. 8. 2017

Ing. Jan Čermák
autor práce

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Ing. Jan Čermák *Problematika tepelně zpracovaných odpadních recyklátů a optimalizace vlastností pro jejich využití ve stavebnictví*. Brno, 2017. 134 s., 1 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému školiteli Stanislavu Šťastníkovvi za nesčetné hodiny konzultací a poskytnuté cenné rady, bez kterých by tato práce nemohla být vypracována.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině, manželce Marcelce a synovi Honzíkovvi za trpělivost a podporu při tvorbě této práce.

V neposlední řadě bych rád poděkoval zaměstnancům firmy VIA ALTA a.s. za poskytnuté rady a informace při vypracovávání této práce.

„Rozdíl mezi málo a mnoho je třeba v tom, že jedna cihla je na stavbu málo, ale když někomu spadne na hlavu, je to mnoho.“

Jean Paul (1763 – 1825)

Obsah

TEORETICKÁ ČÁST	7
1 ÚVOD	7
1.1 Vznik odpadů	7
1.2 Odpadové hospodářství	8
1.3 Nakládání s odpady	9
1.4 Nebezpečné odpady	11
1.5 Stavební odpady	12
1.6 Toxicita odpadů	12
2 METODY ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ	14
2.1 Recyklace	14
2.2 Fyzikální a fyzikálně-chemické metody	14
2.2.1 Solidifikace odpadů	14
2.3 Chemické metody	15
3 SKLÁDKOVÁNÍ ODPADŮ	16
4 TRVALE UDRŽITELNÝ ROZVOJ VE STAVEBNICTVÍ	17
4.1 Principy udržitelné výstavby	17
4.2 Hlavní úkoly udržitelné výstavby budov	18
4.2.1 Environmentální aspekty	19
4.2.2 Ekonomické aspekty	20
4.2.3 Sociokulturní aspekty	20
5 POLYMERY	22
5.1 Příprava syntetických polymerů	23
5.2 Rozdělení polymerů	24
5.3 Elastomery	24
5.4 Termoplasty	24
5.5 Reaktoplasty	25

5.6	Termoplastické elastomery	25
5.7	Přísady.....	26
5.8	Plniva.....	27
5.9	Termodynamické vlastnosti a přechodové teploty polymerů	27
6	TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ	31
6.1	Vstřikování.....	32
6.2	Vytlačování	34
6.2.1	Vytlačovací hlavy	36
6.3	Válcování	36
6.4	Lisování.....	37
6.4.1	Lisování reaktoplastů	38
6.4.2	Lisování termoplastů.....	38
6.5	Vyfukování dutých těles	39
6.6	Další metody zpracování.....	39
6.7	Recyklační metody zpracování	40
6.7.1	Recyklační linka pro zpracování odpadního PET.....	40
7	ODPADY NA BÁZI POLYMERŮ.....	41
7.1	Hierarchie nakládání s polymerními odpady	42
7.2	Třídění plastových odpadů.....	44
7.3	Metody recyklace odpadních plastů.....	44
7.3.1	Fyzikální recyklace	44
7.3.2	Chemická recyklace	45
7.3.3	Recyklace směsného plastového odpadu.....	46
7.3.4	Termické využití odpadů	46
7.3.5	Skládkování odpadních plastů	46
8	SHRNUTÍ REŠERŠNÍ ČÁSTI.....	48
	PRAKTICKÁ ČÁST	49

9	MOŽNOSTI VYUŽITÍ ODPADNÍCH TERMOPLASTŮ VE STAVEBNICTVÍ	49
9.1	Popis technologie pro výrobu stavebních dílců z odpadních termoplastů	50
9.1.1	Drcení odpadních termoplastů	50
9.1.2	Plynový hořák	51
9.1.3	Systém recirkulace spalin	52
9.1.4	Míchací reaktor	54
9.1.5	Zavážecí stůl	56
9.1.6	Lis pro finální úpravu výrobků	56
9.2	Proces výroby stavebních dílců	57
10	METODIKA PRÁCE	58
10.1	Etapa I	58
10.2	Etapa II	58
10.3	Etapa III	59
10.4	Etapa IV	59
11	ETAPA I a II	61
11.1	Počáteční poloprovozní zkouška výroby	62
11.1.1	Pojivo	62
11.1.2	Polyethylentereftalát	62
11.1.3	Plnivo	63
11.1.4	Receptury	63
11.1.5	Požadované výrobky	63
11.1.6	Výsledky počáteční poloprovozní zkoušky	63
11.1.7	Vyhodnocení první poloprovozní zkoušky	65
11.1.8	Odstranění zjištěných nedostatků z počáteční poloprovozní zkoušky	65
11.2	Druhá poloprovozní zkouška výroby	70
11.2.1	Receptura	70
11.2.2	Požadované výrobky	71

11.2.3	Výsledky druhé poloprovozní zkoušky	71
11.2.4	Vyhodnocení druhé poloprovozní zkoušky	72
11.2.5	Odstranění zjištěných nedostatků z druhé poloprovozní zkoušky.....	73
11.3	Třetí poloprovozní zkouška výroby.....	74
11.3.1	Požadované výrobky.....	75
11.3.2	Výsledky třetí poloprovozní zkoušky	75
11.3.3	Vyhodnocení třetí poloprovozní zkoušky	77
12	Problematika chladnutí vzorků	78
13	ETAPA III – STANOVENÍ UŽITNÝCH VLASTNOSTÍ VÝROBKŮ.....	82
13.1	Výroba přesných zkušebních těles pro stanovení užitných vlastností.....	82
13.2	Stanovení pevnosti za ohybu, objemové hmotnosti a nasákavosti dle [15] a [16]	82
13.2.1	Stanovení pevnosti za ohybu	82
13.3	Stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti dle [16]	85
13.3.1	Objemová hmotnost.....	85
13.3.2	Nasákavost	85
13.3.3	Zkušební zařízení	85
13.3.4	Kondicionování zkušebních těles	86
13.3.5	Postup zkoušky	86
13.3.6	Vyhodnocení zkoušek.....	87
13.4	Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou	87
13.4.1	Podstata zkoušky.....	87
13.4.2	Zkušební zařízení	87
13.4.3	Zkušební postup	88
13.4.4	Výsledek zkoušky	88
13.5	Stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek dle [17].....	89
13.5.1	Metoda automatického cyklování.....	89

13.5.2	Zkušební tělesa	89
13.5.3	Zkušební postup	89
13.5.4	Vyhodnocení zkoušky.....	90
13.6	Stanovení UV stability dle [18].....	90
13.6.1	Podstata zkoušky.....	90
13.6.2	Zkušební zařízení	90
13.6.3	Zkušební tělesa	91
13.6.4	Zkušební postup	91
13.6.5	Vyhodnocení zkoušky.....	91
13.7	Mrazuvzdornost dle [19]	92
13.7.1	Podstata zkoušky.....	92
13.7.2	Postup zkoušky	92
13.7.3	Vyhodnocení zkoušky.....	93
13.8	Obsah radionuklidů	93
13.9	Stanovení součinitele tepelné vodivosti λ	93
13.10	Stanovení obrusnosti metodou podle Böhma dle [20]	94
13.10.1	Podstata zkoušky.....	94
13.10.2	Příprava vzorku	94
13.10.3	Postup zkoušky.....	94
13.10.4	Výpočet výsledků.....	95
13.10.5	Vyhodnocení	96
13.11	Stanovení hodnoty odolnosti proti skluzu na nevyleštěném vzorku (USRV) dle [21]	96
13.11.1	Podstata zkoušky.....	96
13.11.2	Přístroj	96
13.11.3	Postup zkoušky.....	97
13.11.4	Výsledky zkoušky	97

14	OPTIMALIZACE ZAVÁŽECÍHO MECHANISMU LISU	98
14.1	Rešerše k problematice kontinuálního dávkování vysoce plněných materiálů s vysokou mírou abraze se zaměřením na zpracování odpadního PET a písku	98
14.1.1	Míchání	99
14.1.2	Míchací stroje pro sypké materiály.....	100
14.1.3	Opotřebení funkčních částí míchacího zařízení.....	104
14.2	Řešení	104
15	NÁVRH JEDNOŠNEKOVÉHO VYTLAČOVACÍHO STROJE Z MATERIÁLOVÉ HLEDISKA	104
15.1	Výsledky simulace.....	106
16	Návrh lisovacího zařízení	114
17	Návrh zavážecího mechanismu lisovacího zařízení	115
18	Popis výroby po optimalizaci výrobního zařízení	117
19	Etapa IV - Experimentální ověření použitelnosti dalších termoplastických pojiv a rozptýlené výztuže	118
19.1	Využití odpadního skla jako plniva.....	119
19.2	Možnosti využití odpadních minerálních vláken jako rozptýlené výztuže	119
20	PŘÍNOSY PRÁCE V ROVINĚ VĚDECKO-VÝZKUMNÉ, ENVIRONMENTÁLNÍ A EKONOMICKÉ.....	122
21	ZÁVĚR	123
	Citovaná literatura.....	129
22	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	131
24	SEZNAM POUŽITÝCH JEDNOTEK A VELIČIN	132
26	SEZNAM PŘÍLOH.....	133

TEORETICKÁ ČÁST

1 ÚVOD

Odpady provázejí lidstvo od pradávna. Jsou produktem prakticky veškeré lidské činnosti. Vznikají při průmyslové činnosti, stavební činnosti, zemědělství, dopravě a při běžném životě člověka v konzumní společnosti. Zejména komunální odpady a kaly z čistíren odpadních vod jsou produktem prakticky všech obyvatel.

Pro disertační práci na téma "**Problematika tepelně zpracovaných odpadních recyklátů a optimalizace vlastností pro jejich využití ve stavebnictví**" byly vytýčeny následující cíle:

- 1) optimalizace složení receptur z hlediska výrobního i ekonomického; formulace parametrů pro řídicí program automatizované výrobní linky,
- 2) návrh uspořádání lisovacího stroje, aby byly splněny geometrické požadavky na dílce,
- 3) návrh uspořádání zavážecího mechanismu lisu tak, aby nedocházelo k ochlazení plastbetonové směsi po jejím vysypání z míchačky do formy,
- 4) experimentální ověření směsi pro vytváření dalších možných produktů, například plastbetonové bloky, skruže, obrubníky, žlaby a další,
- 5) experimentální ověření použitelnosti dalších pojiv na bázi termoplastů a inertních plniv,
- 6) ověření účinku rozptýlené výztuže při výrobě dílců z polymerbetonu,
- 7) optimalizace procesu finální úpravy produktů s experimentálním ověřením možnosti využití extruze, případně vibrolisování, vibrotažení, vakuování a lisování.

1.1 Vznik odpadů

S rostoucím ekonomickým rozvojem v druhé polovině 20. století rostlo i využívání přírodních surovinových zdrojů a spotřeba energie. V této době nebylo striktně vyžadováno zavádění surovinově a energeticky šetrných technologií a až do 90. let převládal názor ekonomů, že důraz na ekologii bude kladen tehdy, až budou

vytvořeny příslušné finanční zdroje. Neexistovala žádná příslušná legislativa, která by řešila využívání surovinových zdrojů, vznik odpadů a nakládání s nimi.

Po změně politického a společenského systému v roce 1989 se pozornost odborné i laické veřejnosti obrátila ke sledování objemů a druhů odpadů (tuhých, kapalných a plyných) při všech lidských činnostech. V této době byly schváleny zákony zajišťující snižování vzniku odpadů, vývoj nových bezodpadových nebo málo odpadových technologií i nakládání s nimi.

Dle zákona o odpadech č. 185/2001 Sb. je odpad definován jako 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 č. 1 k tomuto zákonu. Odpady vznikají nejen při výrobních technologiích, ale i při uspokojování nezbytných potřeb člověku (stravování, hygiena, metabolismus, aj.).

S rozvojem technologií stoupá produkce výrobků pro jedno použití. Patří mezi ně nejen obalové techniky, ale i produkty denní spotřeby. Balení některých produktů denní potřeby, zejména potravin, se děje v souvislosti se současnými přísnými hygienickými požadavky. Vratné obaly byly ve velké míře nahrazeny obaly nevratnými, a to někdy ze shodných materiálů, například skla. Je však nezbytné a také zákony to vyžadují, aby nevratné obaly byly recyklovatelné (papír, plasty, sklo), aby se nehromadily na skládkách.

1.2 Odpadové hospodářství

Odpadové hospodářství je relativně mladou, avšak dynamicky se rozvíjející oblastí národního hospodářství. Průmyslově a ekonomicky vyspělé země se začaly odpadovým hospodářstvím intenzivně zabývat teprve v posledních 20 – 30 letech, v České republice vznikl první zákon o odpadech až v roce 1991. Před rokem 1991 nebylo nakládání s odpady v ČR na legislativní úrovni nijak kontrolováno ani řízeno a s výjimkou tzv. druhotných surovin nebylo ošetřeno žádným předpisem.

S legislativou stanovenými právy a povinnostmi je úzce spjata i odpovídající správní činnost. Platný zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech klade důraz na předcházení vzniku odpadů, stanoví hierarchii nakládání s nimi a prosazuje základní principy ochrany životního prostředí a zdraví obyvatel při nakládání s odpady.

1.3 Nakládání s odpady

Kvůli specifickým vlastnostem a různému riziku ohrožení životního prostředí vyžaduje každý tok odpadů specifické nakládání. Základní pravidla pro nakládání s odpady jsou stanovena zákonem č. 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů a prováděcími právními předpisy. Cíle pro nakládání s odpady a opatření pro jejich dosažení jsou stanoveny Plánem odpadového hospodářství České republiky, který byl v souladu se zákonem o odpadech vydán formou nařízení vlády. Jeho plnění je každoročně vyhodnocováno prostřednictvím Hodnotící zprávy, která je zveřejňována na stránkách ministerstva. S Plánem odpadového hospodářství ČR musí být v souladu také plány odpadového hospodářství krajů a plány odpadového hospodářství původců odpadů v ČR. (1)

Za účelem pravidelného vyhodnocení odpadového hospodářství a pro získání podkladů pro správní a kontrolní činnost je v odpadovém hospodářství vedena evidence, umožňující v souladu s evropskými předpisy získat podrobné informace o produkci a nakládání s odpady. Získané informace jsou důležitým podkladem pro další plánování v oblasti odpadového hospodářství, legislativní činnost i pro poradní orgány ministra, mezi které patří například Rada pro odpadové hospodářství ČR, složená z předních odborníků všech resortů i nestátní sféry. Oblast nakládání s odpady zahrnuje také přeshraniční přepravu odpadů z ČR a do ČR či přes její hranice. Přeshraniční přeprava je upravena právními předpisy EU a je povolována v rámci správního řízení tak, aby byly minimalizovány její rizika a dopady na životní prostředí (2).

Produkce a nakládání s odpady v ČR v roce 2012

Rok 2012	PRODUKCE	VYUŽITO	RECYKLACE	ENERGETICKY VYUŽITO	ODSTRANĚNO	SKLÁDKOVÁNÍ	JINÉ NAKLÁDÁNÍ
Celkově všechny odpady	30 mil. tun	79 %	76 %	3,5 %	13 %	13 %	8 %

Zdroj: MŽP

Pozn. Data jsou zpracována dle dokumentu - Zpracování matematického vyjádření výpočtu „Soustavy indikátorů OH“ v souladu s vyhláškou č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, v platném znění, aktualizace k 10. 9. 2013.

Produkce a nakládání s komunálními odpady v ČR v roce 2012

Rok 2012	PRODUKCE	VYUŽITO	RECYKLACE	ENERGETICKY VYUŽITO	ODSTRANĚNO	SKLÁDKOVÁNÍ	JINÉ NAKLÁDÁNÍ
Komunální odpady	5,2 mil. tun	42 %	30 %	12 %	54 %	54 %	4 %

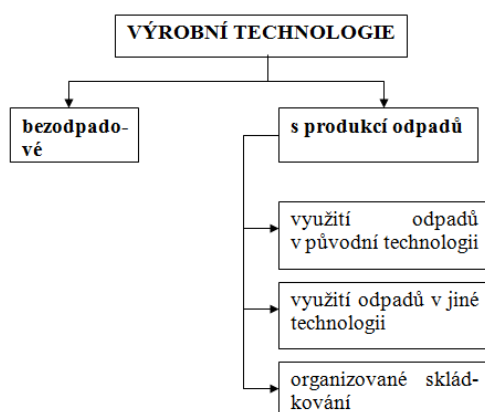
Zdroj: MŽP

Pozn. Data jsou zpracována dle dokumentu - Zpracování matematického vyjádření výpočtu „Soustavy indikátorů OH“ v souladu s vyhláškou č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, v platném znění, aktualizace k 10. 9. 2013.

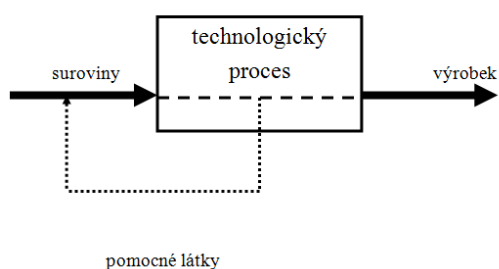
Obr. 1.1: Přehled o nakládání s odpady v ČR v roce 2012 podle (2).

Technologie výroby lze rozdělit z pohledu vzniku odpadů a následného nakládání s nimi do čtyř základních skupin, jak je uvedeno na obrázku 1.2:

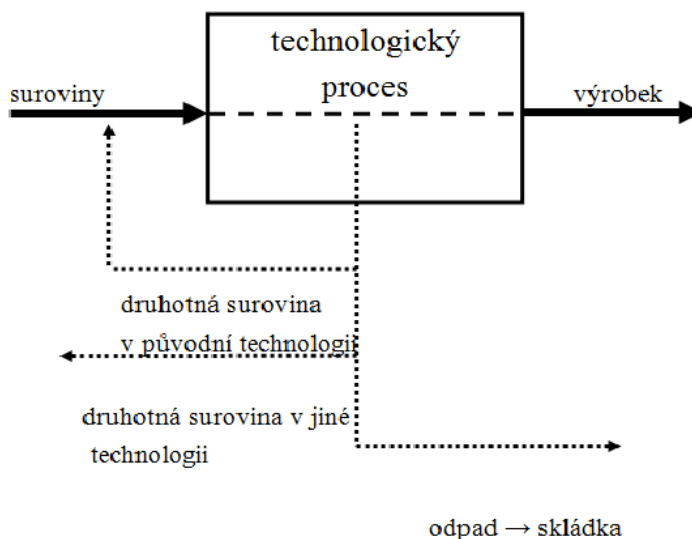
- technologie bezodpadové,
- využívání odpadů v technologii, která tento odpad produkuje,
- využívání odpadů v jiných technologiích,
- ukládání odpadů na skládky organizovaným skládkováním.



Obr. 1.2: Rozdělení výrobních technologií podle [1].



Obr. 1.3: Schéma bezodpadového technologického procesu [1].



Obr. 1.3.4: Schéma technologického procesu s produkcí odpadů podle [1].

Bezodpadové technologie, znázorněné na obrázku 1.3, mají bezodpadový výrobní systém, při kterém nevznikají žádné odpady, doprovodné a pomocné látky se vracejí zpět do výrobního procesu.

Technologie s produkcí odpadů se dělí na technologie s malou a velkou produkcí odpadů. Odpady mohou být pevné, kapalné i plynné, a pokud nenachází v dané nebo jiné technologii další využití, dochází k jejich skládkování. Pro recyklaci se rozlišují odpady, které jsou surovinou vhodného složení pro původní nebo jinou technologii a odpady, které se využívají k získávání tepelné energie podle obrázku 1.4.

1.4 Nebezpečné odpady

Mezi nebezpečné odpady řadíme odpady, které vykazují alespoň jednu nebezpečnou vlastnost uvedenou v příloze 2 zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech a změně některých dalších zákonů. Mezi nebezpečné vlastnosti odpadu patří například toxicita, karcinogennost, mutagenita, infekčnost, ekotoxická atd. Jako příklad nebezpečných odpadů lze uvést odpady polychlorovaných bifenylů (PCB), perzistentních organických polutantů (POPs), infekční zdravotnické odpady nebo odpady obsahující rtuť či odpady z výroby převážně používající nebezpečné chemikálie ve výrobním procesu.

Nebezpečné odpady mohou poškozovat lidské zdraví či životní prostředí, a proto jim je potřeba věnovat zvýšenou pozornost. K negativnímu působení nebezpečných odpadů může docházet na místě jejich vzniku, při transportu a v blízkosti místa jejich odstranění.

Zařazování odpadů do kategorie nebezpečných odpadů se děje na základě §6 zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech. Odpad je považován za nebezpečný, pokud je podle (2):

- uveden v Seznamu nebezpečných odpadů Vyhlášky č.381/2001 Sb., Katalog odpadů,
- smíšen nebo znečištěn některým z odpadů uvedených v Seznamu nebezpečných odpadů,
- smíšen nebo znečištěn některou ze složek uvedenou v Seznamu složek, které činí odpad nebezpečným podle přílohy č. 5 zákona o odpadech,
- má-li jednu nebo více nebezpečných vlastností podle přílohy č. 2 zákona o odpadech.

1.5 Stavební odpady

Stavební odpady vznikají při zřizování, údržbě, změnách a odstraňování staveb. V České republice a zemích EU tvoří stavební odpady a demoliční odpady asi 25 % celkové produkce všech druhů odpadů.

Dříve byl stavební odpad v drtivé většině případů odvážen na skládky, tlak na zpracování stavebních odpadů začal narůstat až v 80. letech 20. století, rozvoj recyklace stavebních odpadů nastal až o desetiletí později. Vzhledem k tomu, že přírodní zdroje surovin jsou vyčerpateľné, je nutné s maximální efektivností rozvíjet používání druhotných materiálů. Jedním z cílů Plánu odpadového hospodářství ČR je využívat 75 % hmotnosti vznikajících stavebních a demoličních odpadů.

1.6 Toxicita odpadů

Toxicita odpadů je vážným rizikem pro zdraví obyvatelstva. Mezi toxické látky mohou patřit látky projevující se dráždivostí, toxicitou, karcinogenitou, žíravostí, teragenitou, mutagenitou a infekčností. Tyto nebezpečné vlastnosti mohou při vdechnutí, požití nebo proniknutí do kůže způsobit vážné poškození zdraví, případně i smrt. Zneškodňování toxických odpadů tedy patří k důležitým procesům, hlavně ze zdravotního hlediska. Toto riziko může být způsobeno přímým stykem s toxickými látkami v odpadu nebo nepřímé, zprostředkované půdou, vodou, případně vzduchem.

K přímému styku s nebezpečným odpadem může dojít při manipulaci s odpadem a při procesu jeho zneškodňování. K nepřímému styku s nebezpečnými látkami v odpadech by při dodržování podmínek nakládání s odpady, uvedenými v platných zákonech nemělo docházet, tj. prostřednictvím vody, půdy a následně potravinového řetězce. Přesto nepřímý vliv některých druhů odpadů s nebezpečnými vlastnostmi na populaci nelze zcela vyloučit, například přenosem infekcí létavým hmyzem.

Vzhledem k nebezpečí, které může nastat při styku s nebezpečnými odpady, je nutné zjišťovat u všech odpadů nebezpečné vlastnosti. Hodnocením vlivu chemických látek na živé organizmy se zabývá toxikologie a ekotoxikologie.

Tab. 1.1: Stupnice toxicity látek podle [1].

Přibližná smrtelná dávka			
kategorie toxicity	mg/kg	celkové množství pro člověka (~70 kg)	příklad
netoxické	> 15 000	>1 000 g	BaSO ₄
málo toxické	5000 – 10000	500 až 1000 g	etanol
mírně toxické	500 – 5000	35 – 350 g	NaCl, FeSO ₄
silně toxické	50 – 5000	3,5 – 35 g	Cd ²⁺ , Pb ²⁺ , metanol
extrémně toxické	5 – 50	0,35 – 3,5 g	BaCO ₃ , KClO ₃
super toxické	< 5	<0,35 g	nikotin, dioxiny, botulotoxin

2 METODY ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ

2.1 Recyklace

Recyklace neboli znovuvyužití odpadů či surovin v nich obsažených. Cílem recyklace je opětovné využití odpadu, který je přetvářen z dále nepoužitelného odpadu na druhotnou surovinu, která je použitelná při další výrobě. Dle směrnice EU č. 98/2008 je pojem recyklace definován jako jakýkoliv způsob využití, jímž je odpad znovu zpracován na výrobky, materiály nebo látky, ať původní nebo pro jiné účely. Zahrnuje přepracování organických materiálů, ale nezahrnuje energetické využití a přepracování na materiály, které mají být použity jako palivo nebo zásypový materiál.

2.2 Fyzikální a fyzikálně-chemické metody

Technologie využívající k dělení směsí látek lze zařadit mezi fyzikální metody. Směsi látek lze rozdělit dle počtu jejich fází na heterogenní (obsahují více než jednu fázi) a homogenní (obsahují pouze jednu fázi). Fáze je část soustavy, která je ohraničená od ostatních fází fázovým rozhraním (například plyn - kapalina). Směsi tuhých látek je možné rozdělit membránovou separací, flotací, stripováním nebo účinkem silového pole. Směsi kapalných látek je možné dělit destilací, adsorpcí, rektifikací, extrakcí, membránovou separací a vymrazováním. Směsi plynů se dělí specifickou adsorpcí, absorpcí v kapalině a membránovou separací. Suspenze (směs pevných a kapalných látek) lze rozdělit zejména filtrací, extrakcí, loužením, sušením, vlivem silového pole a flotací. Směsi plynů a kapalin se dělí adsorpcí, absorpcí, membránovou separací, destilací a extrakcí. Mezi fyzikální metody lze rovněž zařadit úpravy granulometrie a třídění podle velikosti částic.[1]

2.2.1 Solidifikace odpadů

Solidifikace je změna sypkého nebo kapalného materiálu na produkt zpevněný. Solidifikací je zapříčiněno snížení pohyblivosti částic odpadu, přičemž použitím solidifikačních činidel dochází k vzniku bariéry mezi částicemi odpadu a vnějším prostředím. Při solidifikaci může dojít také ke stabilizaci odpadu, kdy se toxické složky odpadu zabudují přímo do struktury solidifikačního činidla. Pro solidifikaci anorganických odpadů jsou vhodná anorganická pojiva jako portlandský cement, struska, popílek, vápno, energosádrovec. Při solidifikaci organických odpadů se

používají většinou organická pojiva, protože organické odpady by mohly negativně ovlivnit hydratační reakce cementu a také jeho konečné pevnosti. Jako organická pojiva se používají zejména asfalty, dehty, odpadní termoplasty [3]

2.3 Chemické metody

Stabilizace je založena na změně fyzikálních anebo chemických vlastností odpadů v důsledku jejich smíchání s vhodnými přísadami. V závislosti na charakteru odpadů a druhu použitých stabilizačních přísad dochází ve zpracovávaných materiálech ke vzniku různých typů fyzikálně-chemických vazeb (sorpce, pucolánové a cementační reakce, mikroenkapsulace). Stabilizovaný odpad může být uložen na skládku, popřípadě vhodným způsobem využít, například k rekultivaci, bez rizika sekundární kontaminace životního prostředí. Ke stabilizaci se obvykle používají vhodné kombinace několika přísad, jejichž volba se odvíjí od charakteru zpracovávaných odpadů (složení, druh kontaminace, pH, zrnitost, stupeň zvodnění) a požadovaných vlastností produktu. Nejčastěji používanými přísadami jsou: hydraulická pojiva na bázi cementu a vápna, popílky a bentonity [1].

3 SKLÁDKOVÁNÍ ODPADŮ

Odpady, které není možno dále využít energeticky, ani materiálově se ukládají na skládky. Dle vyhlášek o podrobnostech pro nakládání s odpady č. 383/2001 Sb., č. 294/2005 Sb. a č. 351/2008 Sb. musí být odpad zatříděn podle jeho povahy. Na skládky nesmí být ukládány odpady s vlastnostmi:

- vznikají z výrobků podléhajících povinnosti zpětného odběru,
- jsou kapalné nebo sedimentací kapalinu uvolňují,
- odpady prudce reagující ve styku s vodou,
- léčiva a návykové látky,
- výbušné, vysoce hořlavé, s oxidační schopností, schopností uvolňovat ve styku s vodou, vzduchem nebo kyselinami vysoce toxické látky, infekční odpady,
- biocidy,
- odpady silně zapáchající,
- tlakové nádoby se stlačenými plyny,
- radioaktivní odpady,
- kyselé a hydrolýze podléhající odpady z výroby TiO_2 .

Odpady, které lze skládkovat pouze za určitých podmínek:

- využitelné odpady včetně vytríděných složek komunálního odpadu pouze v souladu s Plánem odpadového hospodářství,
- neupravené inertní odpady, pro které je úprava neproveditelná,
- odpady u nichž úpravou nelze snížit objem nebo snížit nebo odstranit nebezpečné vlastnosti,
- pneumatiky pouze v případě, jsou-li používány jako technologický materiál pro technické zabezpečení skládky,
- kompostovatelné odpady pouze z komunálního odpadu (postupné omezování podle vyhlášky).

Nejběžnější úpravy odpadů před uložením na skládku jsou:

- biologická úprava – řízené působení biologicky aktivní složky na odpad za účelem snížení objemu, hmotnosti, infekčnosti; využívají se přirozené i vybrané mikrobiální kultury,
- fyzikálně-chemická úprava – sušení, kalcinace, neutralizace, filtrace, solidifikace, stabilizace, vitifikace, enkapsulace, bitumenace, kombinace uvedených úprav,
- úprava složení – oddělení jednotlivých složek odpadu – třídění,
- jiné způsoby – balení, lisování.

Odpady upravené fyzikálně-chemickými způsoby se před uložením na skládku hodnotí pouze na základě vyluhovatelnosti. Výluh se připravuje z drceného odpadu nebo tělesa o průměru 40 mm a hmotnosti 100 g podle charakteru upraveného odpadu.

Na skládky lze přijímat stavební odpad od nepodnikající fyzické osoby a to stavební keramiku, beton, skleněná vlákna, sklo, zeminu a kamení. Při ukládání na skládku musí být odpady uloženy podle druhů a kategorií tak, aby nemohlo dojít k nežádoucí vzájemné reakci za vzniku škodlivých látek nebo k narušení stability, těsnosti a konstrukce skládky.

4 TRVALE UDRŽITELNÝ ROZVOJ VE STAVEBNICTVÍ

Výstavba a provozování budov patří mezi hlavní spotřebitele materiálových a energetických zdrojů a současně přispívají ke znečišťování životního prostředí. Udržitelný rozvoj ve stavebnictví představuje nový přístup k navrhování, realizaci a provozování budov, aby bylo dosaženo širokého spektra požadavků funkčních, ekonomických, environmentálních, sociálních a kulturních.[4]

4.1 Principy udržitelné výstavby

Stavebnictví a vystavěné prostředí zahrnují existenci a provoz všech produktů stavební činnosti, jako jsou budovy, mosty, silnice, sila, přehrady a další, představují nejenom hlavního spotřebitele materiálových a energetických přírodních zdrojů a významného znečišťovatele životního prostředí, ale i rozhodujícího uživatele půdy, která je zastavěná stavebními objekty. Stavebnictví v rámci Evropské unie je největším průmyslovým odvětvím s tvorbou přibližně 11 % HDP a zaměstnávajícím

asi 7,5 % ekonomicky aktivního obyvatelstva. Stavebnictví a jeho produkty spotřebují 40 % veškeré vyrobené energie a jsou zodpovědné přibližně za 40 % emisí skleníkových plynů (zejména CO₂) a produkce pevných odpadů. Stavební průmysl tak velmi ovlivňuje socioekonomický vývoj v Evropské unii. V porovnání s jinými sektory průmyslu tedy stavebnictví podstatně více ovlivňuje stav životního prostředí. Současně tak má i velký potenciál k pozitivnímu ovlivnění udržitelného rozvoje společnosti při uplatnění optimalizačních přístupů v technologii, návrhu a managementu v rámci životního cyklu staveb. Využívání nových materiálů (vysokohodnotných i recyklovaných) a konstrukčních řešení, vedoucích ke zkvalitňování výstavby budov, tak představuje značný potenciál z hlediska zajišťování požadavků udržitelného rozvoje společnosti. Požadovaného pozitivního efektu lze dosáhnout pouze synergií různých optimalizačních přístupů, týkajících se nejenom energetické náročnosti budov, ale i spotřeby neobnovitelných materiálů, co nejefektivnějšího využití energií vložených do materiálů při výrobě a dalších aspektů ekonomických, environmentálních a sociokulturních.

Tradiční přístup při navrhování staveb vychází ze tří základních požadavků - kvality konstrukčního řešení, nákladů a času potřebného na realizaci stavby. Tento přístup však nezahrnuje aspekty z pohledu vlivů na životní prostředí a na sociální a kulturní kvalitu funkce realizovaných staveb. Nové pojetí musí být komplexnější a musí zahrnovat soubory kritérií, které lze rozdělit do tří oblastí - kvalita životního prostředí, ekonomická efektivita a omezení, sociální a kulturní souvislosti.

Tyto oblasti představují tři základní stavební kameny trvale udržitelného rozvoje, ze kterých vyplývají další základní kritéria udržitelné výstavby. Tradiční přístup vychází z principu maximálního ekonomického efektu bez většího ohledu na dopady na životní prostředí, nové pojetí udržitelné výstavby zdůrazňuje význam omezování negativních environmentálních vlivů staveb, při současné vyváženosti dalších kritérií ekonomických, environmentálních, sociálních a kulturních (4).

4.2 Hlavní úkoly udržitelné výstavby budov

Nejdůležitější úkoly, které je nutné dodržet pro trvale udržitelný rozvoj ve stavebnictví, jsou popsány v následujících podkapitolách podle [4]:

4.2.1 Environmentální aspekty

V této kapitole jsou popsány environmentální aspekty udržitelné výstavby.

- Energie
 - Cílem je zvýšit energetickou účinnost výstavby a provozování budov
 - Postupy:
 - opatření na úsporu energie - výrobní i provozní,
 - využívání obnovitelných zdrojů energie,
 - inteligentní řízení energetických systémů budov.
- Materiály
 - Cílem je efektivněji využívat materiálové zdroje
 - Postupy:
 - šetření neobnovitelných přírodních zdrojů,
 - regulované využívání obnovitelných zdrojů,
 - orientace na konstrukce s dlouhou životností, rekonstrukce,
 - opětovné použití prvků a konstrukcí,
 - recyklace stavebních materiálů,
 - využívání recyklátů a odpadů i z oblastí mimo stavebnictví.
- Emise / odpady
 - Cílem je snížit množství emisí a odpadů
 - Postupy:
 - snižování emisí (CO₂, SO₂, NO_x a dalších) spojených s výstavbou a provozem budov,
 - snížení množství nerecyklovatelných odpadů.
- Voda
 - Cílem je snížit spotřebu kvalitní vody
 - Postupy:
 - snižování spotřeby pitné vody,
 - využívání dešťové vody pro provoz budov.
- Půda
 - Cílem je přispívat k trvale udržitelnému rozvoji sídel
 - Postupy:
 - efektivní využívání půdy,
 - rekonstrukce budov a revitalizace sídel,

- dekontaminace a využití brownfields.

4.2.2 Ekonomické aspekty

V této kapitole jsou popsány ekonomické aspekty udržitelné výstavby.

- Náklady na realizaci
 - o Cílem je optimalizovat náklady při zajištění maximální kvality a minimálních environmentálních dopadů v rámci životního cyklu budovy
 - o Postupy:
 - optimalizovat pořizovací náklady tak, aby kvalitní výstavba byla dostupná všem potenciálním uživatelům
- Provozní náklady
 - o Cílem je optimalizovat provozní náklady v průběhu celého životního cyklu
 - o Postupy:
 - optimalizovat provozní náklady, včetně nákladů na údržbu, opravy, modernizace a rekonstrukce.
- Životnost
 - o Cílem je zajistit dlouhodobou životnost stavby
 - o Postupy:
 - při návrhu zvolit trvanlivé a dlouhodobě spolehlivé materiály a konstrukce s cílem snížit náklady na údržbu, rekonstrukce a modernizace budovy,
 - zvýšenou životností konstrukcí prodloužit kvalitní funkci objektu a tím omezit potřebu demolice a výstavby nového objektu.
- Místní ekonomika
 - o Cílem je podpořit rozvoj místní ekonomiky a zaměstnanosti
 - o Postupy:
 - Vytvářet pracovní příležitosti pro obyvatele v místě bydliště, a tím omezit míru denního dojíždění za prací.

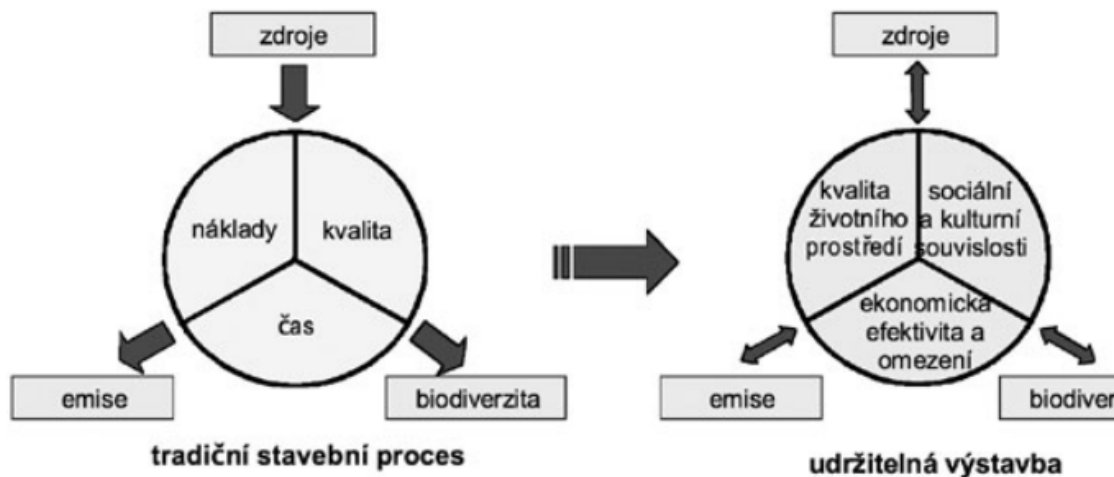
4.2.3 Sociokulturní aspekty

V této kapitole jsou popsány sociokulturní aspekty udržitelné výstavby.

- Kvalita
 - o Cílem je zvyšovat kvalitu a funkčnost vnitřního i vnějšího prostředí budov
 - o Postupy:
 - zajištění kvalitního vnitřního prostředí po stránce tepelně vlhkostního komfortu, osvětlení, akustického komfortu, větrání, hygieny a estetiky,
 - zajištění kvalitního vnějšího prostředí - okolí budovy.
- Bezpečnost
 - o Cílem je zajistit bezpečnost vnitřního prostředí i okolí budovy
 - o Postupy:
 - zajištění požární bezpečnosti,
 - zajištění provozní bezpečnosti v budově,
 - zajištění přístupu a pohybu handicapovaných lidí,
 - zajištění bezpečnosti v případě mimořádných situací,
 - zajištění bezpečnosti před kriminalitou a terorismem.
- Společnost
 - o Cílem je pozitivně ovlivňovat místní společenské klima a zaměstnanost
 - o Postupy:
 - napomáhat k zajištění vyvážené místní sociální struktury,
 - vytvářet podmínky pro podporu zaměstnanosti v místě bydliště,
 - vytvářet prostředí pro kulturní, sportovní a další společenské aktivity v místě bydliště.
- Kultura
 - o Cílem je chránit a udržovat kulturní dědictví
 - o Postupy:
 - ochrana a rekonstrukce historických památek,
 - využití stávajících objektů pro nové funkce,
 - podpora zachování a využití hodnotné industriální architektury.

Pro udržitelný rozvoj ve stavebnictví je nutné uplatňování nových principů návrhu, nových materiálů a technologií jejich zpracování, nových technologií výstavby, nových metod posuzování a hodnocení staveb apod., při současném zachování architektonické a konstrukční pestrosti a variability v navrhování staveb. Tento

přístup však vyžaduje akceptovat určité změny v pojetí návrhu, ale i v pojetí konstrukčního řešení.



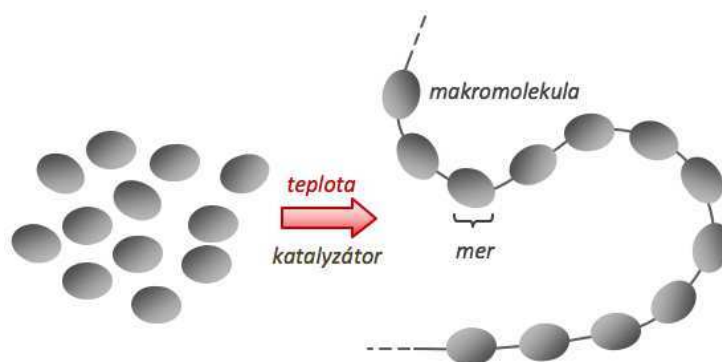
Obr. 4.1: Transformační proces z tradičního pojetí stavební výroby do nového pojetí udržitelné výstavby podle [4].

5 POLYMERY

Z chemického hlediska se jedná především o organické látky, přírodního (např. kaučuk) nebo syntetického původu (mohou být i anorganického charakteru – např. silikony). Typickými příklady organických látek jsou dřevo, rostliny, ropa, zemní plyn apod. To, co však odlišuje polymery, je, že mají velké molekuly, tzv. makromolekuly.

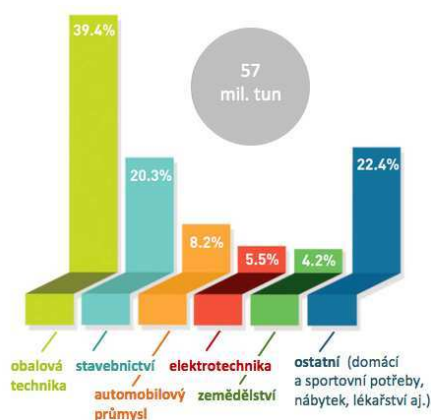
Pozn.: články v řetězu mnohokrát se opakující základní konstituční jednotky „mer“ (mer = díl). Řecká předpona poly- znamená mnoho nebo více.

Délku makromolekul můžeme vyjádřit molární (relativní molekulovou) hmotností. Za makromolekulární látku se považuje sloučenina s vyšší molární hmotností než 10^3 g/mol, v případě polymerů přesahuje hmotnost hodnotu 10^4 g/mol, zatímco molární hmotnost nízkomolekulárních látek může být méně než 100 g/mol (např. voda má molární hmotnost ~ 18 g/mol). Polymery představují tedy jistou „chemickou stavebnici“, která umožňuje neobyčejnou proměnlivost struktur i vlastností polymerů, k nimž postupně na následujících stránkách předložím bližší specifikaci.

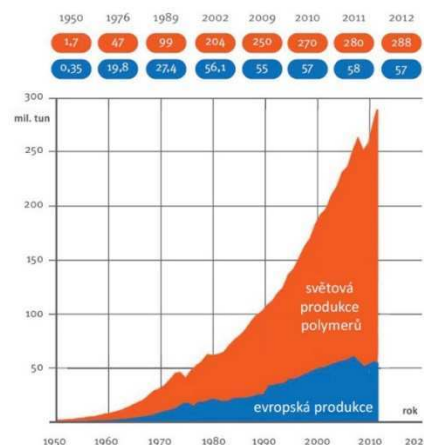


Obr. 5.1: Schéma makromolekuly [5].

S vývojem lidské společnosti je úzce spjat i vývoj požadavků na technické výrobky a strojní zařízení, které společnost pro svůj život nezbytně potřebuje. Jedná se např. o požadavky na nízkou hmotnost, odolnost proti korozi, vysokou životnost a spolehlivost, ekonomicky a ekologicky přijatelnou technologii výroby, ale také o povrchové a estetické vlastnosti. V souladu s uvedenými požadavky se polymery stále více prosazují jako konstrukční materiály, které nachází uplatnění v širokém měřítku průmyslových odvětví, viz obr. 5.2. Vývoj celosvětové produkce polymerů neustále vzrůstá a v roce 2012 dosahovala 288 mil. tun ročně (57 mil. tun v Evropě), zatímco v roce 1950 činila v celosvětovém měřítku produkce polymerů pouze 1,7 mil. tun za rok. [5]



Obr. 5.2: Evropská spotřeba polymerů [5]



Obr. 5.3: Vývoj produkce polymerů od r. 1950 [5]

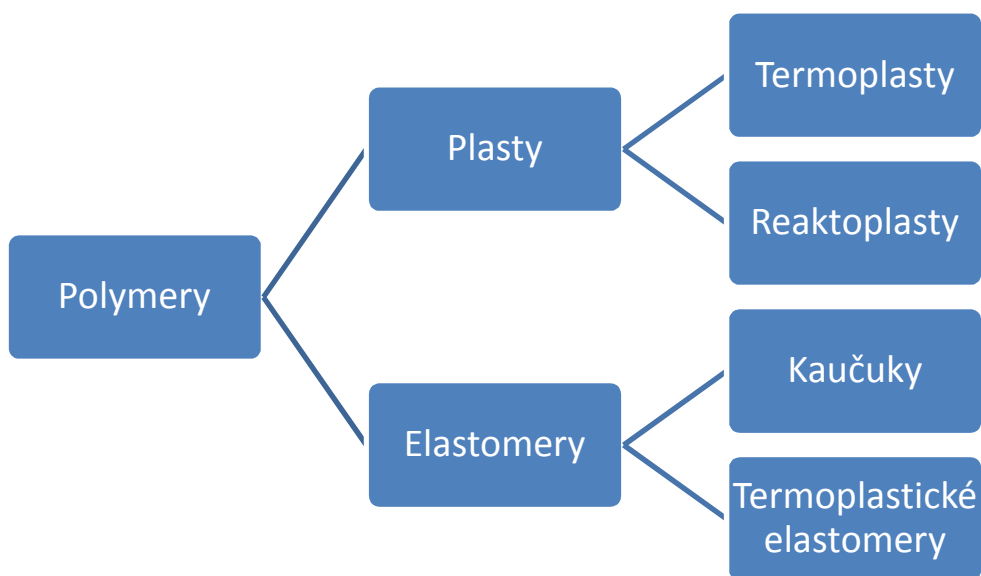
5.1 Příprava syntetických polymerů

Syntetické polymery se v zásadě připravují řetězením z nízkomolekulárních látek (monomerů) třemi různými chemickými postupy, tzv. polyreakcemi: polymerací, polykondenzací nebo polyadicí. Jedná se o chemické reakce, které se mnohokrát opakují, takže původně nízkomolekulární organická (případně anorganická)

sloučenina monomer přechází ve vysokomolekulární látku polymer. K polyreakci může dojít tehdy, obsahuje-li monomer v molekule alespoň dvě funkční skupiny schopné reakce. Více funkčnost monomeru může být způsobena přítomností násobných vazeb. Díky těmto vazbám jsou monomery reaktivní a schopné vytvářet řetězovité makromolekuly. [5]

5.2 Rozdělení polymerů

Polymery lze rozdělit dle několika kritérií. Základními skupinami jsou elastomery a plasty.



Obr. 5.4: Základní rozdělení polymerů [5].

5.3 Elastomery

Jedná se o vysoce pružný (elastický) materiál s nízkou tuhostí, který můžeme za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení. Tato deformace je převážně vratná. Typickým představitelem jsou kaučuky, z nichž se vulkanizací (řídkým zesítním, nejčastěji sírou) vyrábí pryž – vysoce pružný materiál, odolný trvalé deformaci. Pryž je vulkanizovaný elastomer a je charakterizována chemickými (příčnými) vazbami mezi makromolekulami, které tvoří uzly prostorové sítě. V důsledku zesítnění je amorfním polymerem. [5]

5.4 Termoplasty

Jsou to materiály, které při zahřívání měknou (přechází do plastického stavu) a lze je tvářet. Do oblasti taveniny přechází zahřátím nad teplotu tání. Zpětným ochlazením pod tuto teplotu přechází opět do tuhého stavu. Při zahřívání neprobíhá chemická reakce a během zpracování se nemění jejich chemická struktura. Změny, kterými

materiál prochází, mají pouze fyzikální charakter a proces měknutí a tuhnutí je vratný (lze jej teoreticky opakovat do nekonečna). Termoplasty mohou být amorfní i semikrystalické. Mezi nejznámější termoplasty patří polyethylen (PE), polyethylentereftalát (PET), polyvinylchlorid (PVC), polyoxymethylen (POM), polyamid (PA), polypropylen (PP). [5]

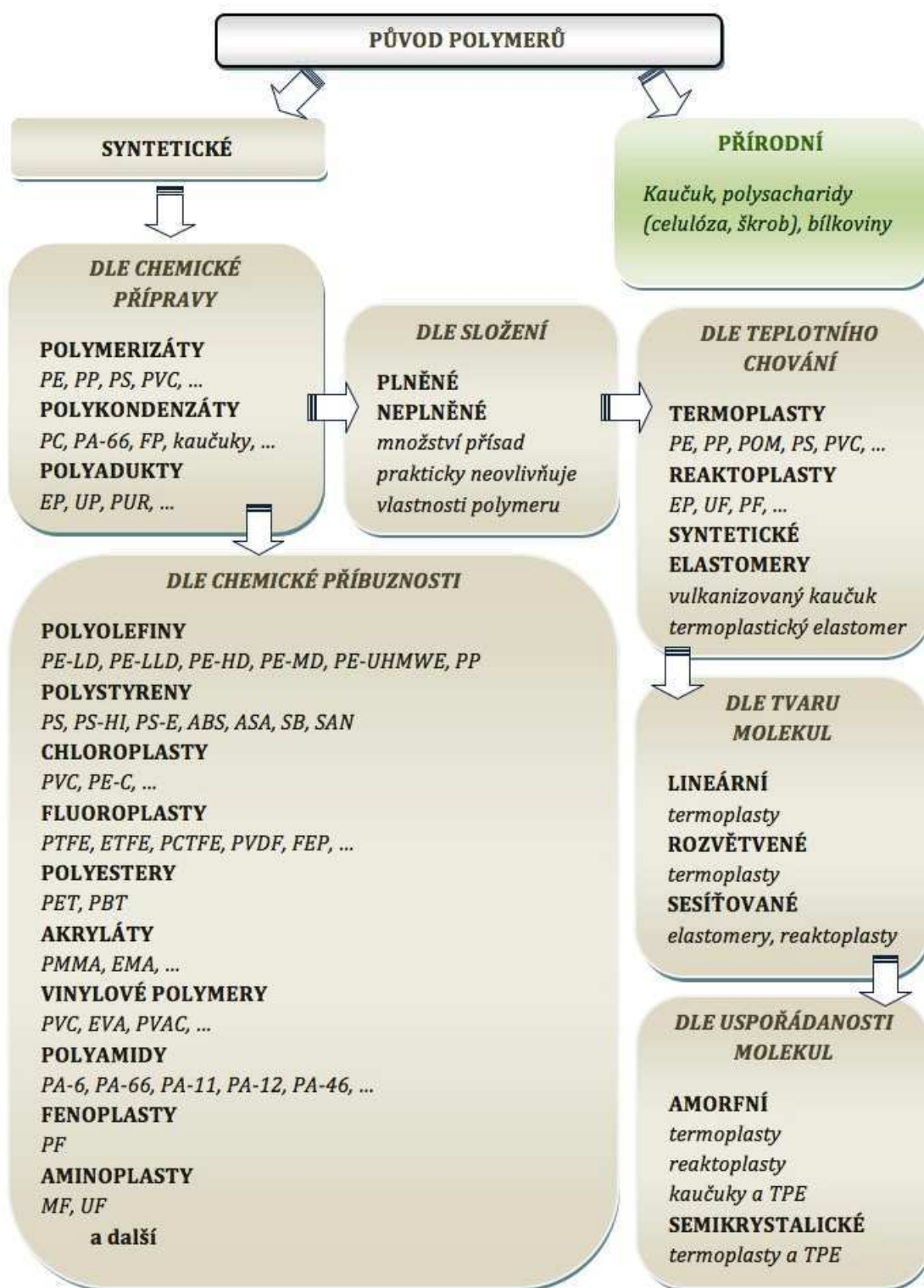
5.5 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou materiály, které jsou tavitelné a tvarovatelné jen určitou dobu po zahřátí. Během dalšího zahřívání (nebo pomocí katalyzátorů) dochází k chemické změně, při které původní molekuly zesítují a od tohoto okamžiku se stávají netavitelné a nerozpustné. Chemická reakce způsobující vznik zesíťované struktury se nazývá vytvrzování. Je to nevratný proces a vytvrzený materiál nelze znovu tvarovat, svařovat ani převést do taveniny. Reaktoplast je amorfním polymerem. Výrobky z reaktoplastů se vyznačují vysokou chemickou a tepelnou odolností, tvrdostí a tuhostí. U reaktoplastů se produkt v nevytvrzeném stavu obvykle nazývá pryskyřice, např. fenol-formaldehydová pryskyřice (PF), epoxidová pryskyřice (EP), polyesterová pryskyřice (UP).[5]

5.6 Termoplastické elastomery

Termoplastické elastomery (TPE) jsou vlastnostmi velmi podobné pryžím. Jejich struktura je tvořena tvrdými a měkkými segmenty. Měkké segmenty jsou tvořeny elastomery, tvrdé segmenty termoplasty, které vytváří uzly sítě. Termoplastické elastomery mají zesíťovanou strukturu. Zvyšováním teploty přechází na rozdíl od pryží do tekutého stavu a mohou se zpracovávat obdobně jako termoplasty. Hlavní rozdíl mezi TPE a pryžemi je dán rozdílem ve vlastnostech uzlů sítě, které jsou u pryží (po vulkanizaci kaučuku) chemické povahy, zatímco u TPE jsou povahy fyzikální a vytváří je obvykle určité množství nemísitelných termoplastických segmentů rozptýlených ve spojitě elastomerní fázi. Termoplastické elastomery nedosahují sice takových elastických vlastností jako pryže, jejich výhodou je ale možnost vstřikování na běžných strojích určených pro termoplasty a také možnost jejich opětovného zpracování (recyklace). [5]

Polymery lze dělit i dle dalších kritérií, viz obr. 5.5.



Obr. 5.5: Schéma rozdělení polymerů.[5]

5.7 Přísady

Vzhledem k odstranění některých nepříznivých vlastností polymerů jsou k nim přidávány přísady, které je zlepšují.

Jako přísady jsou nejčastěji používány:

- světelné stabilizátory – zpomalují degradaci způsobenou UV zářením ze slunce,
- tepelné stabilizátory – zvyšují teplotní odolnost polymerů,
- pigmenty – barevné prášky – organické nebo anorganické
- opticky zjasňující látky – pohlcují část UV záření o vlnových délkách 340 – 400 nm a pohlcenou energii vyzařují během osvětlování ve formě fluorescence (záření o vlnových délkách 430 – 460 nm) a tím vyvolávají dojem, že sledovaná barva je jasnější,
- maziva, plastifikační činidla – zlepšují zpracovatelnost polymerů,
- změkčovadla – zlepšují ohebnost, rázovou houževnatost a tekutost taveniny,
- antistatické prostředky, které zvyšují elektrickou vodivost,
- nadouvadla – vylehčují polymer,
- retardéry hoření – zpomalují hoření polymerů, jsou to látky, které se rozkládají při vyšších teplotách a uvolněné plyny způsobují tvorbu pěnového izolujícího polštáře nebo přímo zhasí plamen,
- tvrdidla, iniciátory a urychlovače reakcí a další.[5]

5.8 Plniva

Plniva jsou přísady, které ovlivňují další fyzikální a mechanické vlastnosti polymerů jako je pevnost, tuhost, odolnosti vůči oděru, tepelná roztažnost, rázová houževnatost. Jsou většinou využívána ve formě prášků nebo krátkých a dlouhých vláken, jsou anorganického nebo organického původu a mají vyztužující nebo nevyztužující charakter. Vyztužující plniva jsou používána především za účelem zvýšení rázové houževnatosti polymerů, které je provázeno zvýšením i dalších mechanických charakteristik jako je mez pevnosti a modul pružnosti. K nejdůležitějším vyztužujícím plnivům patří kratší (cca 3 mm) nebo delší (10 až 16 mm) skleněná, uhlíková, kovová, aramidová, minerální, přírodní nebo jiná vlákna. Mezi nejvíce používaná přírodní vlákna patří např. vlákna konopí, kokosu, lnu nebo sisalu.[5]

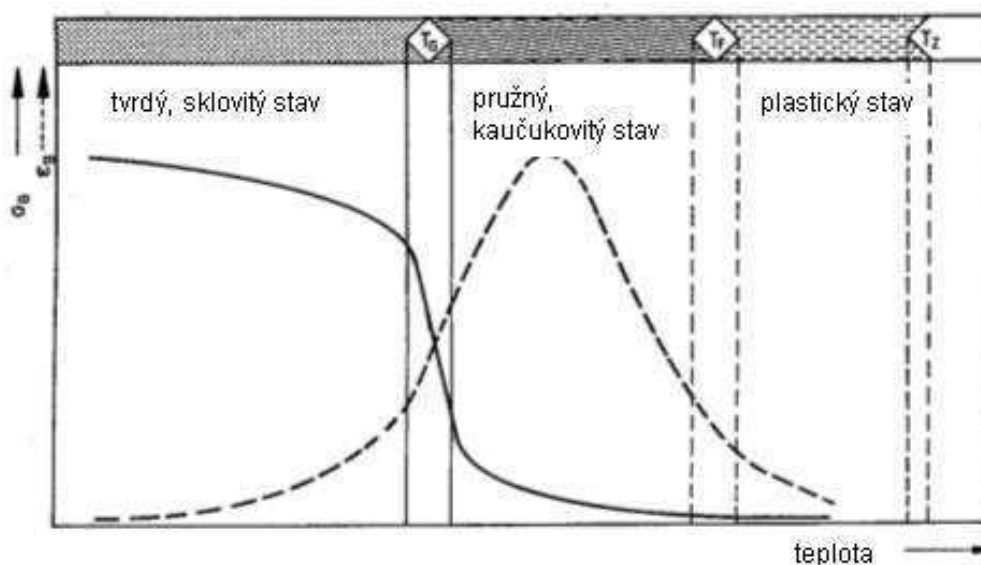
5.9 Termodynamické vlastnosti a přechodové teploty polymerů

Obdobně jako u jiných materiálů jsou vlastnosti polymerů závislé především na teplotě. V určité oblasti teplot probíhají tyto změny rychleji anebo se mění skokově. Takové oblasti jsou nazývány přechodové a v těchto oblastech existují přechodové teploty: T_g - teplota zesklenní nebo teplota skelného přechodu, T_f

teplota viskózního toku (pro amorfní plasty), T_m - teplota tání (pro semikrystalické plasty).

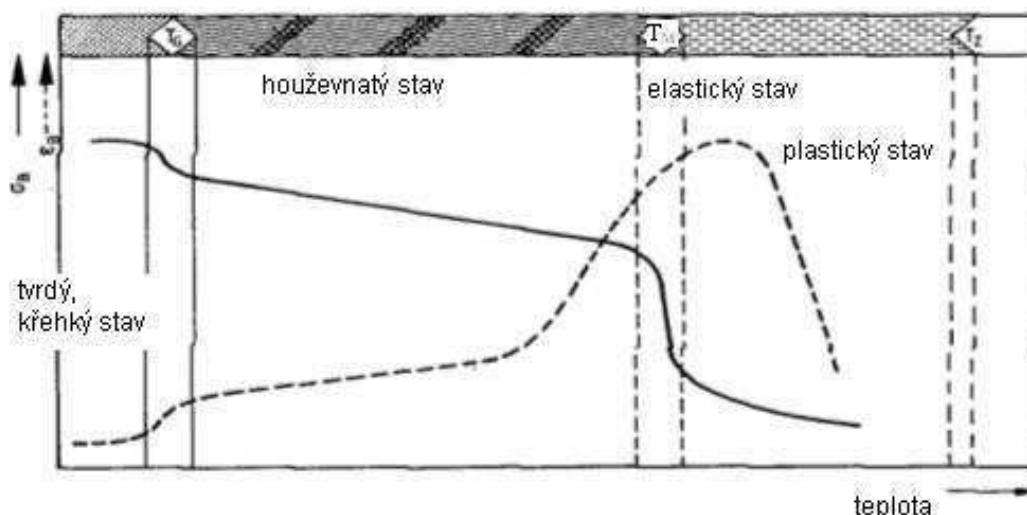
U amorfních plastů se hodnota meze pevnosti v tahu (a také modulu pružnosti) v přechodové oblasti v okolí teploty zesklenní T_g mění skokově, modul pružnosti o tři řády, koeficient teplotní roztažnosti o 100 %. Konkrétní hodnota je závislá na velikosti mezimolekulárních sil (čím budou tyto síly větší, tím bude vyšší i teplota zesklenní) a ohebnosti řetězců (čím bude ohebnost větší a mezimolekulární síly menší, tím bude nižší teplota zesklenní). Teplotu zesklenní je možno ovlivnit např. přidavkem změkčovadel, která sníží mezimolekulární soudržnost a tím i T_g . Je tedy patrné, že nejnižší hodnotu teploty zesklenní vykazují kaučuky, neboť mají malé mezimolekulární síly a značně ohebné řetězce a semikrystalické plasty. Amorfní termoplasty mají hodnotu teploty zesklenní výrazně nad teplotou okolí.

Při teplotě viskózního toku T_f narůstá intenzita změn vlastností polymeru. Při této teplotě ztrácí hmota své kaučukovité vlastnosti a mění se ve vysoce viskózní kapalinu. Nad touto teplotou leží oblast zpracovatelnosti materiálu. Zvýšením teploty klesají mezimolekulární síly a tím se snižuje i viskozita taveniny. Při dalším zvyšování teploty začne probíhat tepelná degradace polymeru (teplota T_z). Zesíťované amorfní polymery se ve srovnání s lineárními chovají odlišně. Tuhá síť chemických vazeb vylučuje přesuny makromolekul jako celku a proto lze u těchto materiálů nalézt při vysokých teplotách jen určitou kaučukovitou oblast s relativně vysokým modulem pružnosti, jehož hodnota pak zůstává konstantní až do teploty rozkladu.[5] [6]



Obr. 5.6: Průběh deformačních vlastností u amorfního plastu. [6]

U semikrystalických polymerů dochází k nejrychlejším změnám vlastností v oblasti teplot, kterou charakterizuje teplota tání T_m . Při teplotě tání dochází k rozpadu a tání krystalitů, což je provázeno změnou fáze hmoty, která přechází ze stavu tuhého do stavu kapalného. Je zřejmé, že tání se děje v určitém teplotním intervalu a teplota T_m představuje pouze střední hodnotu této oblasti, podobně jako teplota T_g . Konkrétní hodnota závisí na velikosti mezimolekulárních sil a na velikosti makromolekul. Zvětšení obou veličin má za následek zvýšení teploty tání. Semikrystalické polymery obsahují určitý podíl amorfních složek, lze u nich stanovit teplotu zesklenní, která charakterizuje výrazné změny vlastností polymeru. Změny se však dotýkají pouze amorfní složky polymeru, proto s vyšším stupněm krystalinity jsou změny T_g méně patrné. (6) (5)



Obr. 5.7: Průběh deformačních vlastností u semikrystalického plastu.[6]

Tab. 5.1: Hodnoty přechodových teplot zesklenní (T_g) a tání (T_m) u vybraných polymerů. (5)

Polymer	Struktura	Název	Zkratka	T _g [°C]	T _m [°C]
TERMOPLAST	semikrystalické	Polyethylen nízkohustotní	PE-LD	-120	105 + 115
		Polyethylen vysokohustotní	PE-HD	-120	130 + 135
		Polypropylen	PP	-15	160 + 170
		Polyoxymethylen	POM	-50	165 + 185
		Polyamid 6	PA-6	50	215 + 225
		Polyamid 66	PA -66	50	250 + 260
		Polyethylentereftalát	PET	75	250 + 260
		Polybutylentereftalát	PBT	75	225 + 230
		Polytetrafluorethylen	PTFE	125	340 + 345
		Polyetheretherketon	PEEK	145	335 + 345
	amorfní	Neměkčený polyvinylchlorid	PVC-U	85	-
		Standardní polystyren	PS-GP	95	-
		Akrylonitril-butadien-styren	ABS	105	-
		Styren-akrylonitril-akrylát	SAN	105	-
		Akrylonitril-styren-akrylát	ASA	100	-
		Polymethylmetakrylát	PMMA	110	-
		Polykarbonát	PC	150	-
		Polysulfon	PSU	190	-
		Polyimid	PI	>400	-
VULKANIZOVANÝ ELASTOMER	amorfní	Přírodní kaučuk	NR	-70	-
		Butadien-styrenový kaučuk	SBR	-50	-
		Isoprenový kaučuk	IIR	-55	-
		Butylkaučuk	IIR	-75	-
		Chloroprenový kaučuk	CR	-40	-
		Ethylen-propylen-dién-terpolymer	EPDM	-60	-
		Silikonový kaučuk	Q	-85	-
REAKTOPLAST	amorfní	Epoxidová pryskyřice	EP	>75	-
		Fenol-formaldehydová pryskyřice	PF	>150	-
		Novolaková epoxidová pryskyřice		>125	-
		Polyesterová pryskyřice	UP	>60	-

6 TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ

Ke zpracování plastů se používá řada technologií. Použitelnost způsobu zpracování plastů je závislá jednak na technologických vlastnostech zpracovávaného plastu, jednak na tvaru a funkci výrobku, kterou má během své životnosti plnit. Podle vztahu mezi plastem vstupujícím do procesu a výsledkem tohoto procesu lze technologie rozdělit do následujících skupin:

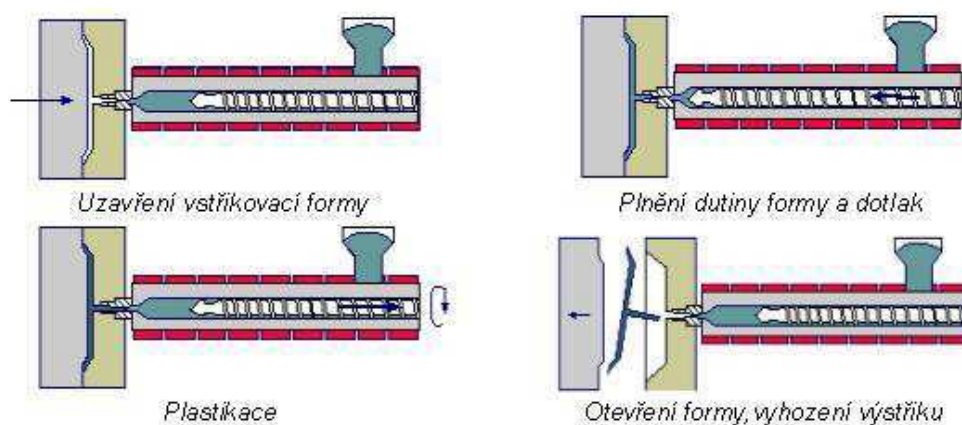
- tvářecí technologie – technologie, při které se tvar výchozího materiálu mění zásadním způsobem a dochází ke značnému přemísťování částic materiálu. Probíhá za působení tlaku nebo teploty nebo obou vlivů současně. Mezi tvářecí technologie patří vstřikování, vytlačování, lisování, válcování, odlévání, laminování, vypěňování. Výsledkem může být výroba konečných dílů nebo výroba polotovaru.
- tvarovací technologie – technologie, při které se vychází z polotovaru a hmota mění tvar bez velkého přemísťování částic. Je možné uplatnit vliv zvýšené teploty a tlaku. Mezi tvarovací technologie patří tvarování desek, výroba dutých těles, ohýbání trubek, obrábění plastů, spojování a spékání plastů.
- doplňkové technologie – slouží k úpravě hmoty před zpracováním (míchání a hnětení, sušení, granulace, přehřev) nebo k úpravě finálních dílů (potiskování, natírání a další). Mezi doplňkové technologie patří i recyklace.

Plasty se zpracovávají při takových termodynamických podmínkách, které umožňují dodat jim požadovaný tvar, aniž by byly nepříznivě ovlivněny jejich fyzikální nebo mechanické vlastnosti. Pro tváření, které je provázeno menšími či většími přesuny hmoty je nutné převést plast buď do kaučukovitě elastického stavu, nebo do viskózně tekutého stavu. Čím větší přesuny hmot se požadují, tím musí být teplota vyšší, ale pouze tak, aby se nepřekročila teplota rozkladu.

Proces zpracování je kritickou částí celého procesu výroby konečného výrobku, neboť výrazně ovlivňuje cenu výrobku a produktivitu. Faktory, které se podílí na volbě technologie jsou: tvar výrobku, velikost výrobku, tolerance na výrobku, materiál (plast), nástroj, stroj. [6]

6.1 Vstřikování

Vstřikování je nejpoužívanější technologie pro zpracování plastů. Vstřikováním se vyrábí díly, které mají charakter konečného výrobku, polotovaru nebo díly pro další kompletaci samostatného výrobního celku. Vstřikované díly mohou mít hmotnost od desetin gramů po několik kilogramů. Velkou výhodou této technologie je vysoká rozměrová i tvarová přesnost výrobků pro sériovou výrobu. Na jeden výrobní cyklus lze získat i velmi tvarově složitý výrobek s vysokou kvalitou povrchu. Nevýhodami technologie vstřikování jsou velké pořizovací náklady na stroje a formy a velikost strojního vybavení vzhledem k velikosti vyráběného dílu. Technologie vstřikování je vhodná pro velkosériovou výrobu.



Obr.6.1: Proces vstřikování [6].

Postup vstřikování je patrný z obrázku 6.1. Nejprve je plastový granulát nasypán do násypky, ze které je odebírán pomocí šneku nebo pístu, který plast dopravuje do tavicí komory, kde za účinku tření a zvýšené teploty dochází k tavení a homogenizaci plastu. Tavenina je následně vstřikována do formy, kterou zcela zaplní a zaujme její tvar. K tuhnutí plastu dochází jeho chladnutím v temperované formě. Po ztuhnutí dochází k otevření formy a vyhození výrobku.

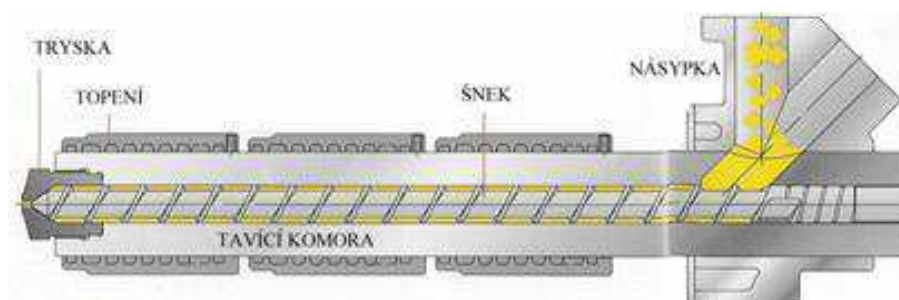
Na počátku vstřikovacího cyklu je dutina formy prázdná a forma je otevřená. V nulovém čase dostane stroj impuls k zahájení vstřikovacího cyklu, pohyblivá část formy se přisune k pevné, forma se zavře a uzamkne – strojní časy. Musí být zaručeno, že se forma vlivem tlaku taveniny při vstřikování neotevře. Následuje pohyb šneku v tavicí komoře a začíná vlastní vstřikování roztavené hmoty do dutiny vstřikovací formy. V této fázi šnek vykonává pouze axiální pohyb, neotáčí se a vlastně plní funkci pístu. Po naplnění formy je tavenina v dutině ještě stlačena a tlak dosáhne maximální hodnoty.

Jakmile tavenina vstoupí do dutiny formy, ihned začne předávat teplo vstřikovací formě a chladne. Chlazení trvá až do otevření formy a vyjmutí výstřiku. V praxi se dělí na dobu chlazení při plném vstřikovacím tlaku a na dobu chlazení při klesajícím tlaku. Doba chlazení je závislá na teplotě formy a tloušťce stěny výrobku. Během chladnutí se hmota smršťuje a zmenšuje svůj objem, a aby se na výstřiku netvořily propadliny a staženiny, je nutno zmenšování objemu kompenzovat dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy – dotlak. Dotlak může být po celou dobu stejně vysoký jako maximální tlak nebo se může po několika sekundách snížit a další chladnutí probíhá při sníženém tlaku. Dotlak se proto rozděluje na izobarický a izochorický. Abychom mohli dotlačovat, musí před čelem šneku zůstat určitý objem plastu - polštář, na který bude šnek působit svým čelem. Tento objem nesmí být moc velký (obvykle kolem 10 až 15 %, méně než jednonásobek průměru šneku), aby nedocházelo k tepelné degradaci hmoty.

Po dotlaku začíná plastikace nové dávky plastu. Šnek se začne otáčet, pod násypkou nabírá granulovanou hmotu, plastifikuje ji a vtlačuje do prostoru před čelem šneku. Současně ustupuje dozadu, přičemž musí překonávat tzv. protitlak neboli zpětný tlak. Výška protitlaku ovlivňuje dobu plastikace a tím i kvalitu prohnětení roztaveného plastu. Příliš vysoký protitlak by však mohl způsobit až degradaci plastu. Ohřev plastu během plastikace se děje jednak převodem tepla ze stěn válce, jednak frikčním teplem, které vzniká třením plastu o stěny komory a o povrch šneku a dále přeměnou hnětací práce šneku v teplo. Jestliže je tavicí komora opatřena samo uzavíratelnou tryskou, může plastikace probíhat i při otevřené formě. Dále může následovat odsunutí tavicí komory od formy. Během pokračujícího chlazení tlak ve formě dále klesá až hodnotu zbytkového tlaku, což je tlak, pod nímž se hmota nachází ve formě těsně před jejím otevřením. Příliš vysoký zbytkový tlak je příčinou vysokých vnitřních pnutí ve výstřicích, které u křehkých hmot mohou způsobovat až samovolné praskání výstřiku. Zbytkový tlak lze snížit buď zkrácením doby dotlaku anebo programovaným průběhem tlaku během dotlaku. Po dokonalém zchladnutí výstřiku se forma otevře a výstřik se vyhodí z formy.

Vstřikovací jednotka s plastifikačním šnekem je charakterizována průměrem D [mm], délkou šneku L [mm], vstřikovací kapacitou Q_v [cm³], plastifikační kapacitou [kg.h⁻¹], maximální vstřikovacím tlakem $p_{vstř}$ [MPa] a objemovou vstřikovací rychlostí v [cm³.s⁻¹]. Vstřikovací kapacita představuje maximální objem taveniny, kterou lze

vystříknout z tavicí komory do volného prostoru při jednom pracovním zdvihu šneku nebo pístu. Plastifikační kapacita stroje udává kolik taveniny je stroj schopen za jednu hodinu provozu uvést do plastického stavu.



Obr. 6.2: Řez konstrukcí šnekového extrudéru. [6]

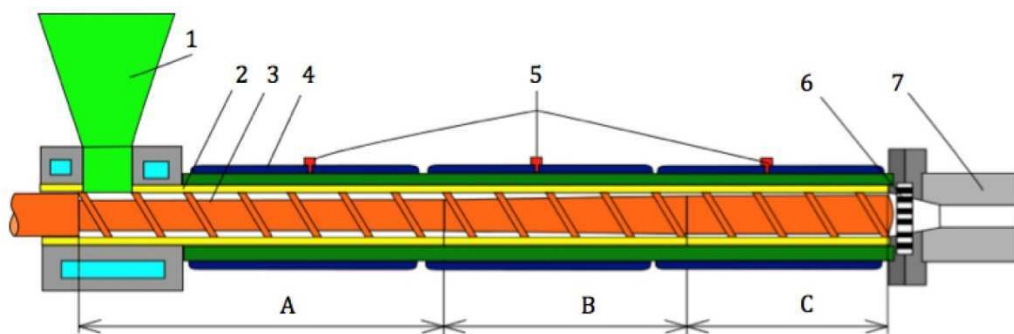
6.2 Vytlačování

Vytlačování je technologická operace, kdy je tavenina kontinuálně vytlačována přes formovací ústí do volného prostoru. Slouží k výrobě polotovarů i konečných dílů. Vytlačování se dělí do třech základních kategorií:

- výroba trubek a profilů,
- výroba fólií a desek,
- výroba vláken, oplášťování a další.

Vlastní technologie se provádí na vytlačovacích strojích neboli extrudérech. Vytlačovací stroj se skládá z mechanicky velice pevného rámu (frémy), ve kterém je uložen pohonný elektromotor s plynule říditelným počtem otáček a převodovka.

Šnek se otáčí v ocelovém válci (plastifikační komora) zahřívaném v několika regulovaných zónách elektrickými topnými pásy. Na začátku komory je násypka na zpracovávaný granulát a na opačném konci příruba pro nasazení vytlačovací hlavy. Délka šneku, udávaná jako násobek jeho průměru, bývá 20 – 40 D . Šnek surovinu dopravuje od násypky do ohřívaných pásem a dále k vytlačovací hlavě. Válec, v němž se šnek pohybuje, má minimálně tři pásma, vstupní, přechodové a výstupní, každé se samostatným topením a teplotní regulací. Při průchodu válcem se materiál promíchává, homogenizuje, převádí do plastického stavu, zhutňuje (zbavuje strženého vzduchu), temperuje na potřebnou teplotu a pod tlakem vytlačuje přes tzv. lamače, který provádí další homogenizaci, do hubice. Lamač obvykle podpírá síto zachycující případně neroztavený granulát a náhodné pevné nečistoty. Sestavě, ve které probíhají tyto pochody, se říká plastifikační jednotka. [5][6]



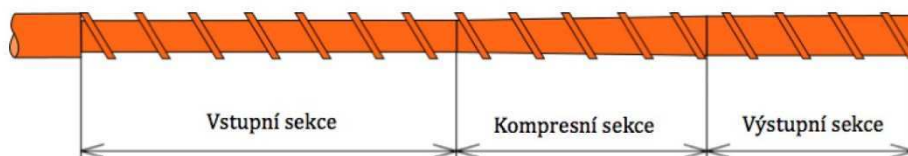
Obr. 6.3: Vytlačovací stroj (extrudér) v řezu (schematicky): A – plnicí (vstupní) část (zóna), B – plastikační (kompresní, přechodová) zóna, C – vytlačovací (kompresní, výstupní) zóna. 1 – násypka, 2 – válec, 3 – šnek, 4 – elektrické odporové topení 5 – termočlánky k měření teploty v zónách A, B, C, 6 – lamač, 7 – vytlačovací hlava. [5]

Vzhledem ke zvýšení míchacího účinku dochází k rozvoji dvoušnekových extrudérů, ve kterých pracují dva šneky se souhlasným nebo protiběžným směrem. Určitou nevýhodou této konstrukce je menší pravidelnost dopravy a výtoku taveniny. Používají se i dvoušnekové stroje, jejichž šneky mají kuželový tvar zužující se směrem k vytlačovací trubici.

Nejdůležitější částí vytlačovacího stroje je šnek, který slouží k dopravě, stlačení, plastifikaci a homogenizaci vytlačovaného materiálu. Šnek musí také vyvodit dostatečný tlak v tavenině, který je potřebný k průchodu přes profilovací otvor. Základní rozdělení šneků lze provést do dvou skupin a to na šneky obyčejné (mající stejné stoupání závitu i stejnou hloubku drážky po celé délce šneku) a na diferenciální (s rozdílnou hloubku drážky při konstantním stoupání nebo s konstantní hloubkou drážky a změnou stoupání závitu). Charakteristika diferenciálního šneku je dána kompresním poměrem, který udává poměr objemu jednoho stoupání závitu šneku na vstupu k objemu závitu na výstupu. Často je kompresní poměr udáván také jako poměr hloubky drážky ve vstupní sekci vůči hloubce drážky na výstupu.

Běžné šneky používané k vytlačování mají tři sekce (viz obr. 5.10 [7]), které se od sebe odlišují různou hloubkou drážky. První část, do které vstupuje materiál v podobě granulí, se nazývá vstupní neboli dopravní sekce. V této sekci je hloubka drážky největší. Následuje kompresní neboli přechodová sekce, kde se mění hloubka drážky nebo stoupání šroubovice. Plast je zde stlačován, intenzivně zahříván a pevná látka přechází v taveninu. Poslední zónou konvenčního šneku je výstupní neboli

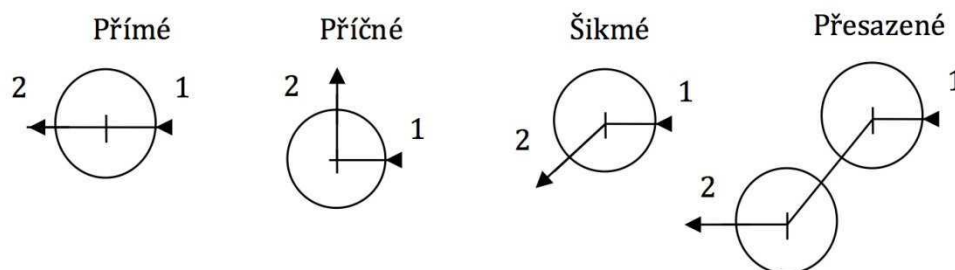
homogenizační sekce, ve které je hloubka drážky nejmenší. Zde se dokončuje plastikace a tavenina plastu se homogenizuje.[7]



Obr. 6.4 Třísekční vytlačovací šnek. [7]

6.2.1 Vytlačovací hlavy

Vytlačovací hlava dává tavenině požadovaný tvar. Stejně jako je velké množství výrobků rozličných tvarů, tak je i velké množství konstrukcí vytlačovacích hlav. Jedno z možných hledisek ukázané na obr. 6.5, je dělení podle polohy osy šneku a osy hubice.



Obr. 6.5: Rozdělení dle typu vytlačovacích hlav – 1 – vstup do vytlačovací hlavy (osa šneku), 2 – výstup z vytlačovací hlavy (osa hubice). [5]

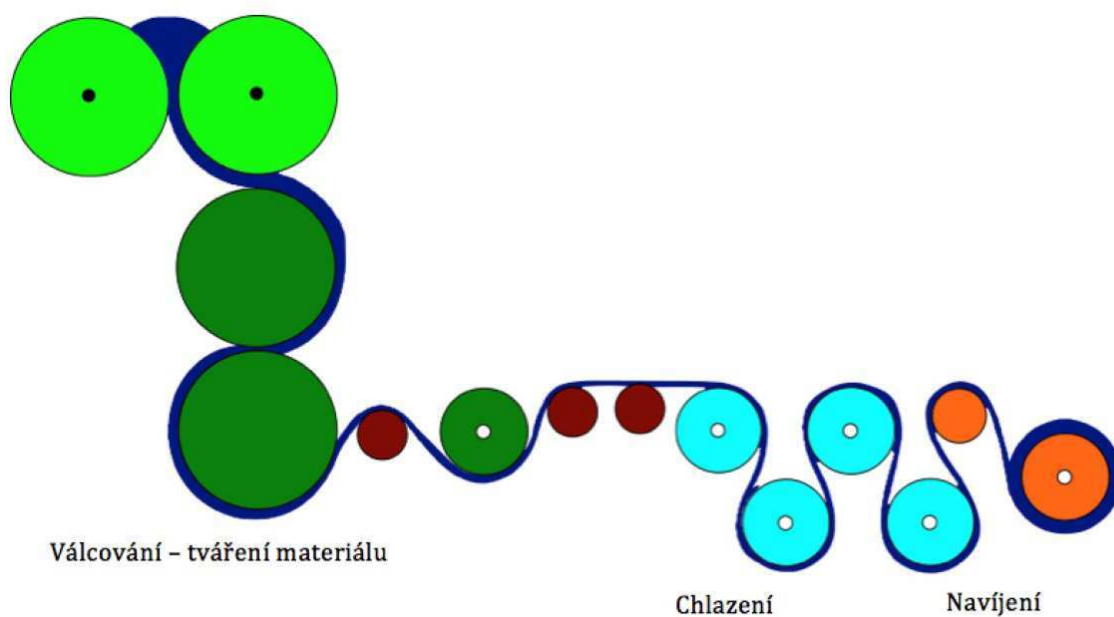
Nejčastější využití vytlačovacích hlav přímých je pro výrobu tyčí, trubek, profilů a fólií. Příčné vytlačovací hlavy jsou používány pro výrobu vyfukovaných fólií a k opláštění. Šikmé hlavy se využívají pro výrobu tenkých fólií a přesazené hlavy se uplatňují při výrobě trubek s vnitřní kalibrací.

6.3 Válcování

Válcování se využívá pro výrobu nekonečných pásů fólií v tloušťkách od 0,17 do několika mm (například u PVC do 0,6 mm). Válcování je technologický postup zpracování některých termoplastů, při kterém se mezi vyhřívanými válci kalandrů vyrábějí fólie nebo desky (viz obrázek 6.6). Používá se především pro PVC a kaučuky. Pracuje se na strojích (kalandrech) které mají nejčastěji 4 otáčející se válce. Do štěrbin mezi první dva z válců se dávkuje materiál z extrudéru. Válce

rotují proti sobě s nepatrným skluzem, na dalších válcích se docílí hladkého povrchu (případně se vlisuje vzorování) a předepsané rovnoměrné tloušťky. Z fólií vyrobených z PVC-U (neměkčený polyvinylchlorid) se pak slisováním získávají desky, z fólií z PVC-P (měkčený polyvinylchlorid) se mohou vyrábět podlahové krytiny a to slisováním nejméně tří fólií různých požadovaných vlastností na válcovém lisu.

Válcovací linky patří k největším a investičně nejnáročnějším zařízením zpracovatelského průmyslu. Ve srovnání s vytlačováním je zde menší tepelné namáhání zpracovávaného polymeru, proto je vhodné pro přípravu fólií z PVC, případně s menším obsahem stabilizátoru ve směsi. Nízké tepelné namáhání je rovněž vhodné pro zpracování kaučukových směsí na nevulkanizované polotovary. Válcovací linka má velkou výkonnost, je snadno přístupná a umožňuje rychlou změnu materiálu. Na válcovacích linkách, na rozdíl od podobného míchacího dvouválce, se provádějí přesné operace, které převážně vedou už k finálním výrobkům (fóliím, kožence apod.).[5]



Obr. 6.6: Válcovací linka. [5]

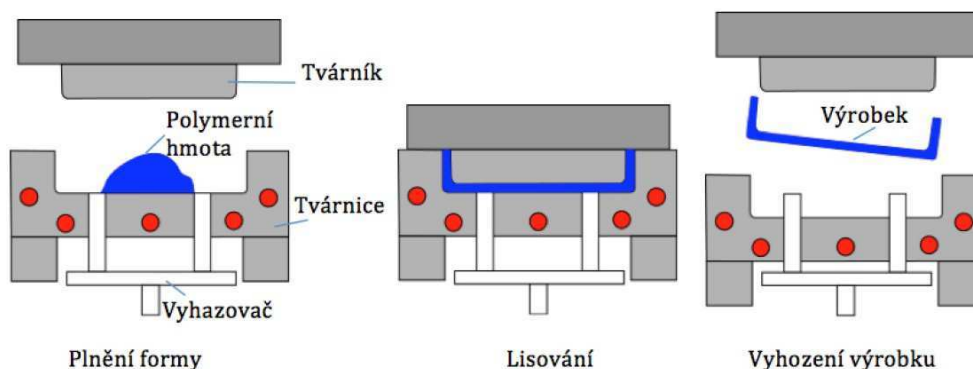
6.4 Lisování

Technologie lisování probíhá podle jednoduchého schématu. Materiál je vložen do lisovacího stroje, slisován a ohřát na teplotu tvrzení v případě reaktoplastů, nebo na teplotu blízkou oblasti měknutí u termoplastů. Podle toho, jaké je složení jednotlivých vrstev, vznikají charakteristické vlastnosti materiálu. Pro zpevnění

materiálu se často využívají různé zpevňující prvky (např. skelná nebo uhlíková vlákna). Pro zvýšení efektivnosti výroby se v praxi nejčastěji používá etážový lis, který mívá 10–15 etáží o plochách až 15 m². Šířka a délka desek jsou omezeny velikostí lisu. V případě lisování tlustých desek bývá v etáži po jedné, při lisování tenkých, bývá v etáži až 10 desek oddělených plechy, které mohou být pro docílení lesklého povrchu výrobků leštěné. V případě termoplastů se můžeme setkat s deskami z recyklovaných materiálů z PET lahví nebo s tetrapak obaly. Desky z čistého materiálu jsou méně rozšířené.

6.4.1 Lisování reaktoplastů

Pro lisování technických dílů z reaktoplastů (viz obrázek 6.6) se používají vyhřívané ocelové formy. Do dutiny, která má negativní tvar výrobku, se vloží polymerní hmota. Forma se uzavře a nastává ohřev, materiál se taví a současně probíhá vytvrzovací reakce. Ve správný okamžik, při dostatečné tekutosti a ještě nevytvrzené hmotě se zvýší přítlak na formu a provede se lisování. Lisování trvá do požadovaného stupně vytvrzení.



Obr. 6.6: Proces lisování reaktoplastů. [6]

6.4.2 Lisování termoplastů

Dutina tvárnice se naplní odměřeným množstvím lisovaného plastu ve formě prášku, granulátu nebo drti. Pro automatické dávkování sypkých lisovacích hmot se používá různých systémů jako například plastifikační agregáty se sekacím dávkovacím zařízením. Výhodou plastifikačních agregátů je jejich použitelnost pro většinu standardních lisů. Předplastifikace umožňuje zkrátit lisovací cyklus až třikrát. Pro poloautomatické dávkování sypkých hmot se používá objemového plnění pomocí dávkovací šablony. Tato dávkovací zařízení se mohou také predehřivat. Nadávkovaná hmota se ohřívá v důsledku styku materiálu se stěnami formy a tím přechází do plastického stavu. Tlakem vyvozeným tvárníkem horního dílu formy při jejím

uzavírání dochází kplastifikaci hmoty a tím k vyplnění celé tvarové dutiny. Po zalisování a následném chlazení do tuhého stavu, pod teplotu tání materiálu, se zafixuje tvar hmoty a forma se otevře, výlisek se vysune a vyjme z lisu. Forma se očistí stlačeným vzduchem, aby zde nezůstaly zbytky hmoty. Pak se do dutiny vloží nová dávka materiálu a celý cyklus se znovu opakuje.[8]

Výhody desek vyráběných lisováním:

- Lisování umožňuje při dodržení přesného dávkování a dobré konstrukci formy maximální využití lisované hmoty.
- Vnitřní pnutí ve výliscích je minimální, protože hmota je při lisování vystavena pouze krátkému a mnohasměrnému toku.
- Formy určené pro lisování jsou většinou levnější než formy pro vstřikování.
- Velikost výlisku je teoreticky omezena pouze lisovací silou stroje.

Nevýhody desek vyráběných lisováním:

- Dlouhá doba lisovacího cyklu.
- Malá produktivita práce.[8]

6.5 Vyfukování dutých těles

Vyfukování je technologie používaná pro výrobu lahví, nádrží, nádržek a podobných dutých dílů. Vyfukování je výrobní postup, kdy vhodný polotovar z termoplastu je tvarován ve vyfukovací formě pomocí tlaku vzduchu do tvaru otevřeného nebo uzavřeného tělesa. Plast musí být zahřátý do elastického stavu, ve kterém hmota vykazuje značnou tvarovatelnost, ale při tom si udržuje potřebnou soudržnost. Vyfukování se rozděluje podle technologie výroby polotovaru na vytlačovací vyfukování a vstřikovací vyfukování.[5]

6.6 Další metody zpracování

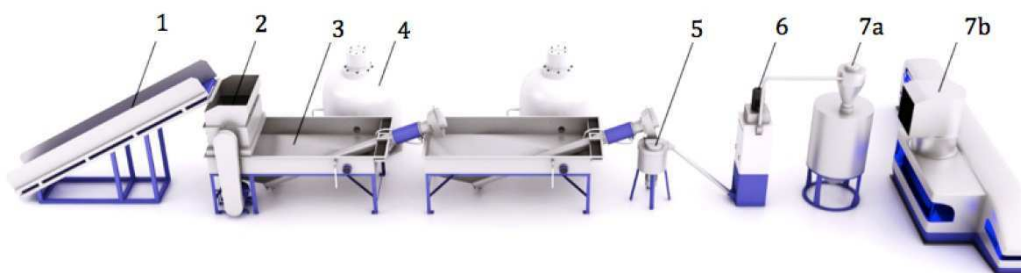
V dnešní době existuje mnoho dalších metod zpracování polymerů, které jsou však pro tuto práci irelevantní a nepoužitelné. Jako příklad lze uvést rotační natavování, tvarování (mechanické, přetlakové, podtlakové), tvarování za studena, kování za studena, ohýbání, odlévání, máčení, lepení, obrábění.

6.7 Recyklační metody zpracování

Recyklace polymerů je proces zpracování a renovace zbytkových nebo odpadních plastů, které mají různé vlastnosti a jsou zhotoveny různými technologiemi, proto se liší i uspořádání recyklačních linek.

6.7.1 Recyklační linka pro zpracování odpadního PET

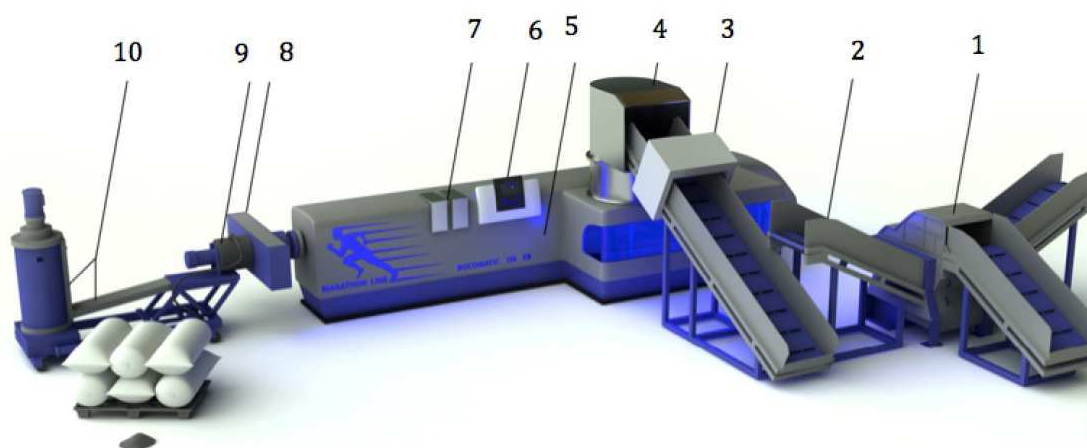
Na obrázku 6.7 je zobrazeno uspořádání recyklační linky pro zpracování odpadního PET.



Obr. 6.7: Linka na mletí, praní a sušení PET lahví. 1 – dopravníkový pás, 2 – nožový mlýn, 3 – Sedimentační vana se šnekovým vyprazdňováním PETu, 4 – čistička, filtrace na vody s chemickou úpravou, 5 – nízkootáčková bubnová odstředivka pro hrubé odstranění vody, 6 – dosoušecí odstředivka, 7a – silo, 7b – regranulační linka.[9]

Pro zpracování druhotné PET suroviny přímo na PET fólie, nebo PET vlákna se již řadu let úspěšně používá tzv. „in – line“ metoda, při níž jsou příslušná navazující zařízení připojena přímo za extruzní systém. Tak je možno přímo a bez regranulace vyrábět hluboko tažené fólie, textilní vlákna, obalové pásy a jiné výrobky. To snižuje náklady na logistiku a celkové výrobní náklady a tím zvyšuje tvorbu přidané hodnoty ve výrobním procesu.

Při zpracování čistého technologického odpadu je vhodné využít regranulační linku, která je zobrazena na obrázku 6.8. Regranulát se lépe, než pouhá drť, mísí s panenským materiálem a při výrobě je proces stabilnější.



Obr. 6.8: Regranulačnípeletizační linka. 1 – drtič, 2 – pásový dopravník, 3 – magnetický indikátor kovů, 4 – mixer, 5 – vytlačovací stroj, 6 – ovládací panel, 7 – evakuační zóna odplynění, 8 – filtr taveniny, 9 – vertikální vodokružní řezací peletizační systém, 10 – vodní žlab a systém odstředění vody.[9]

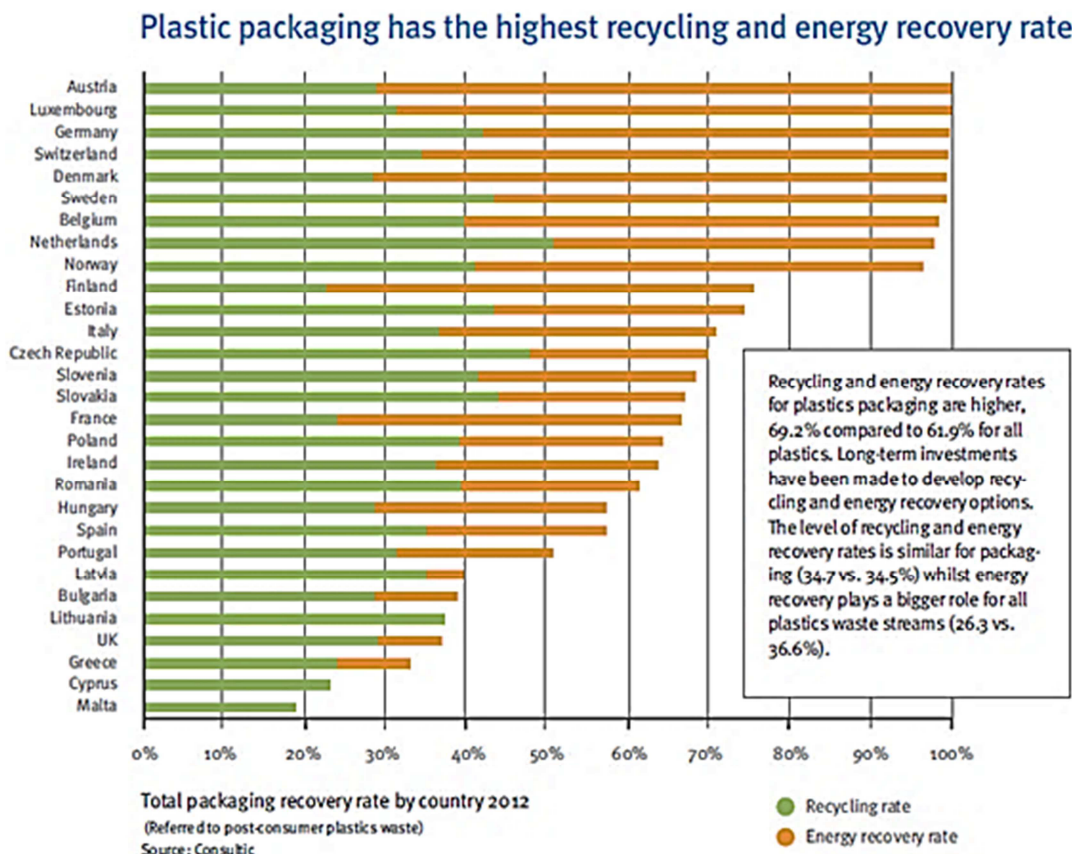
7 ODPADY NA BÁZI POLYMERŮ

Mnohostranné využití plastů vytváří jednak značný tlak na dostatečné surovinové zdroje a naopak po využití vzniklé odpady vytvářejí značný kvantitativní a kvalitativní problém jak dlouhověký materiál zneškodnit, popřípadě opětovně využít. Odpad z plastů lze označit jako problémový z několika důvodů:

- při volném skládkování jsou mnohé téměř nezničitelné,
- pod označením plasty se skrývá široký sortiment materiálů, které jsou navíc často vzájemně kombinovány,
- mohou být kombinovány s jinými neplastovými materiály,
- různé plasty jsou často vzájemně nekompatibilní, a tak ve směsi jen problémově, případně vůbec nezpracovatelné,
- při spalování se produkují exhaláty s vysokým obsahem a množstvím HCl.

Plastový odpad se může dále zpracovávat nebo recyklovat v závislosti na složeníjak běžnými plastikářskými technologiemi, tak i speciálními recyklačními technologiemi. Použití základních výrobních plastikářských technologií se nejčastěji opírá o vytlačování, vstřikování, vyfukování a lisování, což vyžaduje čistý jednodruhový odpad známého složení v dostatečné kvalitě a požadované kvantitě. Obecně platí zásada, čím je požadovaná vyšší kvalita výrobku, tím by měl být odpad

lépe upraven. Čím více se má plastový odpad přibližovat charakteristice plnohodnotné druhotné suroviny, tím více se musí odpad upravovat. Před vlastním zpracováním, recyklací se musí plastový odpad převést do zpracovatelné podoby, tj. transformovat do využitelné formy drtě, aglomerátu, případně regranulátu. [10]



Obr. 7.1: Přehled o potenciálu využití odpadních obalových plastů v jednotlivých státech v roce 2012 podle [11].

7.1 Hierarchie nakládání s polymerními odpady

Evropský systém nakládání s odpady vychází ze zásad v hierarchii dle priorit: předcházení vzniku odpadů, opětovného použití výrobků, recyklaci a kompostování, energetické využití a skládkování. Odpad je proto stále častěji považován za výrobní prostředek a případný zdroj energie. Této filosofii se musí přizpůsobit i plastikářský průmysl, když se podílí na plnění evropských rozhodnutí k těmto problémům:

- WasteFrameworkDirective – 2008/98/EC s cíli pro rok 2020 – využití 50 % hmotnosti komunálních odpadů a 70 % odpadů ze stavebnictví a demolic – týká se všech odpadních plastů. Do roku se má recyklovat 70 % komunálních odpadů a 80 % obalů (60 % plastů).
- LandfillDirective – 99/31/EC – snižování biodegradabilních odpadů na skládkách – týká se i bioplastů.

- WasteShipmentRegulation – 1013/2006 – vývoz a dovoz nebezpečných odpadů v rámci EU.
- IncinerationDirective – 2000/76/EC – spalování odpadů
- End ofLifeVehicles (ELV) – 2000/53/EC – plasty z autovraků
- PackagingDirective – 94/62/EC – obalové plasty
- Waste of Electric and Electronic Equipments (WEEE) – 2002/96/EC – aplikované plasty.
- Nařízení EP a Rady č. 1907/2006 – REACH – chemický zákon.
- Kvalitativní standardy CEN pro plastové recykláty.
- Omezení skládkování (zákaz) využitelných odpadů do roku 2024.

Plné zavedení těchto předpisů v roce 2020 by přineslo roční úspory 72 miliard Eur, zvýšilo obrát odvětví nakládání s odpady o 42 miliard Eur a vytvořilo 400 tisíc nových pracovních míst. Současný obrát odpadového hospodářství je 145 miliard Eur, což je 1 % HDP a vytváří zaměstnání pro 2 miliony pracovníků. Odpady by se snížily o 119 milionů tun. V sousedním Rakousku je již aplikován zákaz skládkování a došlo tak v roce 2012 ke snížení exhalací CO₂ proti roku 1990 o 53,8 %.

Ze zprávy Evropské komise z 2. 7. 2012 vyplývá, že v hodnocení systémů řízení odpadového hospodaření v EU se ČR umístila na 16. pozici.

Odpadní plasty se mohou vyskytovat v průmyslových odpadech – v ČR byl v roce 2012 podíl průmyslových odpadů 59% podíl dle Českého statistického úřadu (ČSU). Jejich výskyt je možný i v komunálních odpadech (17 %), ze zařízení na zpracování odpadů (7 %) a v odpadních obalech (4 %).

Z hlediska ekonomických činností produkovala ČR dle ČSU v roce 2011 tyto odpady:

- stavebnictví 44 %,
- zpracovatelský průmysl 24 %,
- zemědělství 11 %.

Ve všech těchto segmentech se mohou vyskytovat odpadní plasty, které nebývají statisticky zachyceny. S přihlédnutím k aplikačním sektorům plastů se nejvíce odpadů vyskytuje z obalů, z nichž značná část končí v komunálních odpadech.[12]

7.2 Třídění plastových odpadů

V Evropě existuje několik způsobů pro předtřídění a třídění plastových odpadů, počínaje ručním dotříděním lehčího, objemného a většinou bílého pěnového polystyrenu, přes PET lahve, konče automatizací procesu. Ta spočívá v rozdrčení, rozdělení do frakcí, separaci kapalných látek, magnetickou separaci kovů a vysoce sofistikovaným systémem spektrometrického případně infračerveného nebo laserového třídění plastů dle typů nebo dle barev. Nejmodernější třídící linky jsou schopny vytřídit až 100 tisíc tun odpadních plastů za rok, přičemž recykláty mají čistotu z hlediska typů nebo barev více než 95 %. Samostatně vytříděné plasty z odpadů ze stavebnictví, aut, elektroniky, případně ze zemědělství lze s využitím výše uvedených linek dokonale vytřídit a následně zobchodovat, nebo využít jako drť nebo regranulát. [12]

7.3 Metody recyklace odpadních plastů

7.3.1 Fyzikální recyklace

Proces, při kterém se z plastového odpadu získává výrobek, během něhož neprobíhá chemická reakce recyklovaného materiálu. Tato technologie v současnosti téměř bezvýhradně převažuje. Odpad je během mechanické recyklace taven, tvarován a pak chlazen. Tento mechanický postup se může dělit podle zpracované suroviny a hodnoty výrobku na primární a sekundární.

7.3.1.1 Primární mechanická recyklace

Při primární mechanické recyklaci se z jednodruhového plastového odpadu získává výrobek stejné či podobné kvality, jako měl původní materiál či recyklovaný výrobek. Takovým způsobem je již dlouhodobě zpracovaných více než 95 % technologických odpadů přímo zpracovateli plastů.

Recyklovaný materiál stačí převážně nadrtit na přiměřeně jemnou frakci a následně ji míchat s čistým poprvé zpracovaným plastem vstupujícím do zpracování. Existuje jen málo zpracovatelských technologií, kde není možné odpady tímto postupem zpracovat. Příkladem může být výroba vícevrstvé fólie nebo jiných kompozitních výrobků, ve kterých je pro správnou funkci neoddělitelně spojeno více různých materiálů.

7.3.1.2 Sekundární mechanická recyklace

Pod sekundární mechanickou recyklací plastového odpadu rozumíme proces, ve kterém se získá materiál nebo výrobek, jehož vlastnosti jsou odlišné od původního materiálu nebo výrobku. Postup lze využít při zpracování některých typů směsných plastových odpadů, kompozitních výrobků a méně kvalitních průmyslových a technologických plastových odpadů.

Výrobky z PVC, které obsahují i jiné materiály a nelze je oddělit (kompozitní výrobky), lze recyklovat na takové produkty, kde směsné složení není problémem. V některých zemích EU byly zavedeny recyklační systémy např. pro kabelky, z nich se vyrábějí průmyslové podlahoviny, nebo koženku používanou k výrobě kobercových podkladů.

7.3.1.3 Fyzikální postupy

Fyzikální postupy založené například na rozpouštění se používají v případech, kdy je plastový odpad znečištěný cizorodými těžko odstranitelnými příměsemi, nebo jde o směsné plastové odpady s příměsemi plastů, které nelze odstranit běžnými jednoduchými postupy, např. oddělování PVC a PET od PE a PS tříděním podle hustoty ve vodném roztoku.

7.3.2 Chemická recyklace

Chemická recyklace využívá technologické postupy, při kterých probíhají chemické reakce. V průběhu procesu chemické recyklace jsou plastové odpady podrobovány působení zvýšené teploty, a to buď v přítomnosti, či nepřítomnosti kyslíku, případně za přídavku vodíku. Makromolekulární látky se štěpí na nízkomolekulární sloučeniny s jednoduššími řetězci často podobné ropným frakcím. Tepelné krakování plastového odpadu se provádí hydrogenací, pyrolýzou nebo zplyňováním. Získané uhlovodíky jsou nejčastěji využívány jako surovina v petrochemickém průmyslu. Z tohoto důvodu jsou směsné plastové odpady nejdříve upravovány. Tato úprava spočívá ve vytřídění a rozředění odpadů s vyšším obsahem chloru a odpady s nižším nebo nulovým obsahem chloru.

Další možnost je tepelné odstranění halogenů před vlastním zpracováním pyrolýzou v kapalně fázi. Vznikající chlorovodík bývá neutralizován nebo průmyslově využit. Chemická recyklace odpadů s dominující složkou PVC je určena především

k zpětnému získání chlorovodíku a uhlovodíku. Vznikající uhlovodíky jsou využity buď jako chemická surovina, nebo energetické palivo.

7.3.3 Recyklace směsného plastového odpadu

Pro účinné zpracování jsou vhodné technologie vtláčování neboli intruze do formy. Vyrábějí se takto například tlustostěnné výrobky jako tyče, desky a profily. Podmínkou takového zpracování je, aby měla vsázka požadované složení, zejména složku, která je schopna se roztavit a zajistit, aby se materiál spojil. Tavení zajišťuje PE, jehož musí být minimálně 65 %. V sazebně jsou přístupné pouze malá množství PVC a také PET (do 5 %), který má vysoký bod tání.

7.3.4 Termické využití odpadů

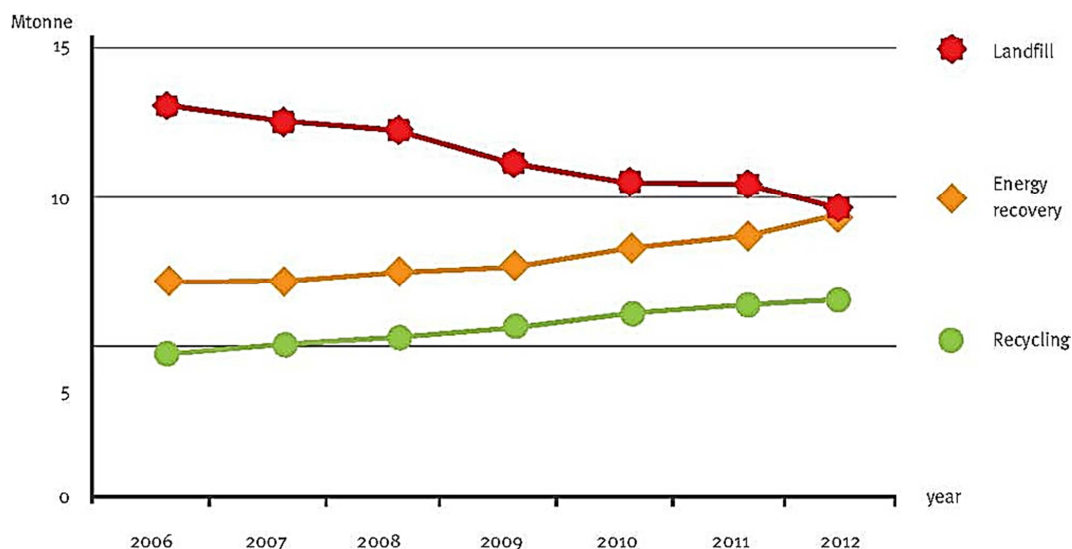
Odpadní plasty, které se nedají transformovat přes klasické recyklační postupy, je možné zhodnotit alespoň energeticky. Spalování odpadních plastů s cílem získat energii, která by jinak musela být získána z jiných neobnovitelných zdrojů, můžeme též tedy považovat za druh recyklačního procesu. Plasty jsou snadno spalitelné běžně při teplotách kolem 900° C a mají ve srovnání s ostatními palivy vysoký energetický obsah.

Díky poměrně vysokým hodnotám výhřevnosti polymerů (PE 43,3 MJ/kg; PP 44 MJ/kg; PVC 18-26 MJ/kg; PS 44 MJ/kg; PET 23MJ/kg; PA 30 MJ/kg) lze odpad z plastů využívat jako hodnotné zdroje energie

Energetické využití se uplatní hlavně v cementářských pecích, železárnách a ve speciálních spalovnách organického odpadu vybavených čističi spalin.[10]

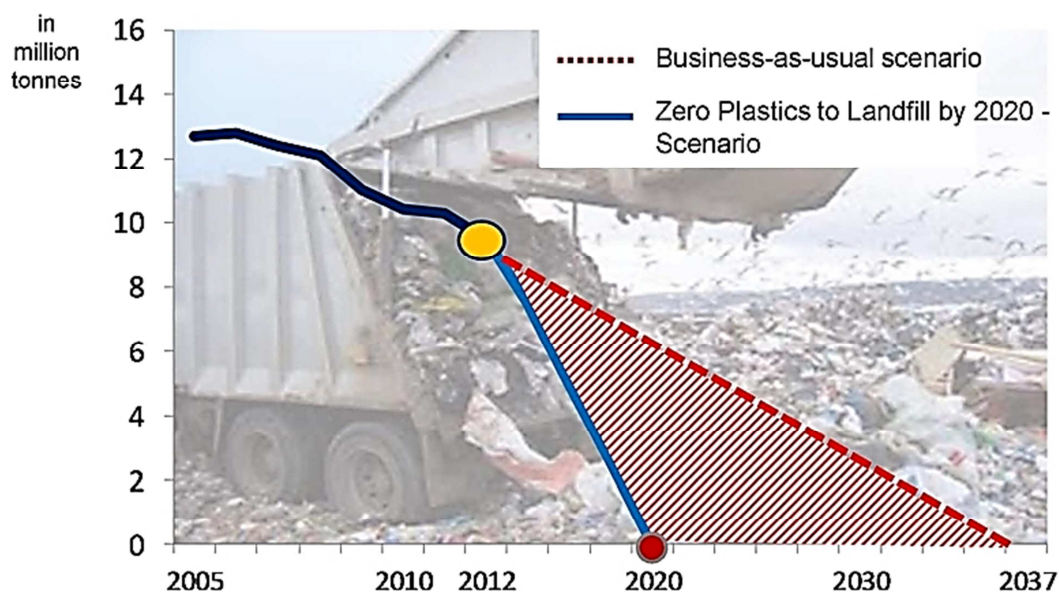
7.3.5 Skládkování odpadních plastů

Skládkování odpadních plastů je nejméně žádoucí formou pro využití odpadních plastů. I když se množství skládkovaných plastů v EU snižuje – viz obr. 7.2, přesto stále končí ročně na skládkách téměř 38,1 % odpadních plastů, tj. 10 mil. tun plastů o hodnotě 8 miliard Eur.[12]



Obr. 7.2: Využití odpadních plastů v EU v letech 2006-2012 – shora skládkování, energetické využití a recyklace. [12]

Pokud by pokračoval stávající trend pomalého poklesu skládkování odpadních plastů, pak by se k nulovému skládkování dospělo v roce 2037, viz obr. 7.3. Urychlením k roku 2020 by došlo k úspoře 80 milionů tun plastů, což představuje ekvivalent 1 milion barelů ropy v hodnotě 70 miliard euro.[12]



Obr. 7.2: Snižování skládkování odpadních plastů dosavadním tempem (červeně čárkovaně) a při zákazu skládkování k roku 2020.[12]

8 SHRNUTÍ REŠERŠNÍ ČÁSTI

Výroba a spotřeba plastů budou i nadále růst a jejich aplikace mají v drtivé míře pouze krátkodobý charakter. Procesy recyklace vyčištěných jednodruhových plastů jsou technicky zvládnuty a energetické využití by mělo hrát významnější roli až v případě nemožnosti recyklace. Dle platné evropské legislativy by skládkování odpadních plastů do roku 2024 skončit.

Z výše uvedeného vyplývá, že ekologická likvidace odpadů na bázi termoplastů je v České republice i ve světě velmi žádoucí. Pokud se jedná o vyčištěný jednodruhový odpad, je možné jej, například pomocí regranulace, použít znovu při výrobě nových produktů. Čištění a třídění plastových odpadů je náročná záležitost z hlediska energetického i ekonomického. Právě z těchto důvodů je vhodné vytvořit technologii, která bude zpracovávat i vícedruhový znečištěný plastový odpad.

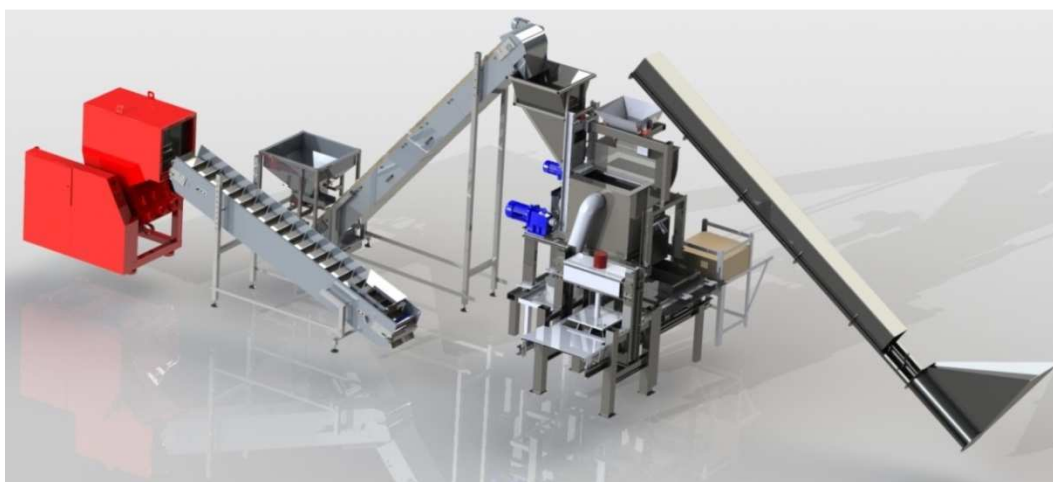
PRAKTICKÁ ČÁST

9 MOŽNOSTI VYUŽITÍ ODPADNÍCH TERMOPLASTŮ VE STAVEBNICTVÍ

Vzhledem k prozatímní nemožnosti účelně zpracovávat vícedruhový nevyčištěný odpad byla navržen a zkonstruován funkční prototyp technologické linky pro výrobu stavebních dílců z odpadních termoplastů a vhodných plniv. Cíle disertační práce souhrnně korespondují s optimalizací této výrobní linky v poloprovozním ověřování tak, aby bylo možné vyrábět bezvadné stavební dílce. Na obrázku 9.1 je zobrazeno schématické uspořádání technologické výrobní linky.

Výrobní linka sestává z následujících částí:

- nožový mlýn pro drcení odpadních termoplastů,
- pásový dopravník drcených termoplastů,
- šnekový dopravník plniv,
- plynový hořák s maximálním výkonem 135 kW,
- systém recirkulace spalín pro vyhřívání stěn míchačky,
- sušárna plniv,
- míchačka plniv a pojiv,
- zavážecí stůl,
- lis pro finální tvarovou úpravu výrobků.



Obr. 9.1: Schéma uspořádání technologické linky pro zpracování odpadních plastů při výrobě stavebních dílců z polymerbetonu [zdroj: autor]..

9.1 Popis technologie pro výrobu stavebních dílců z odpadních termoplastů

9.1.1 Drcení odpadních termoplastů

Drcení odpadních termoplastů je jednostupňové a probíhá v nožovém mlýně s velikostí drtícího prostoru 400 x 600 mm. Jedná se o rychloběžný stroj, kde drcení provádějí šikmo uložené nože na otáčejícím se rotoru oproti šikmo uloženým nožům statoru, čímž je zajištěn šikmý střih. Drt' je tak kvalitní a s minimálním možným množstvím prachu. Velikost drtě je dána výstupním sítím, které má oka o velikosti 10 mm. Nožový mlýn je zobrazen na obrázku 9.2. Po drcení je drt' je odsávána dopravním ventilátorem a plněna do bigbagu. Součástí dopravní cesty je i odlučovací cyklon, který je zobrazen na obrázku 9.3.



Obr. 9.2: Fotografie nožového mlýna pro drcení odpadních termoplastů [zdroj: autor]..



Obr. 9.3: Uspořádání plnění bigbagu plastovou drtí s cyklonovým odlučovacím [zdroj: autor]..

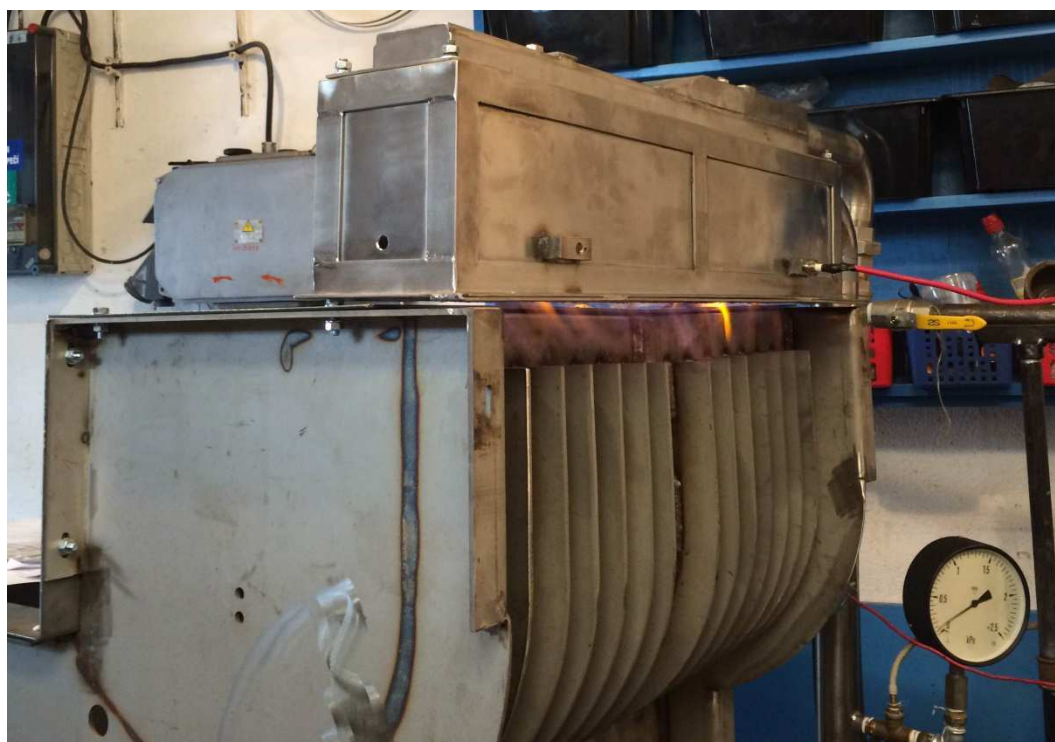
9.1.2 Plynový hořák

Ohřev používaných materiálů pro výrobu je zajištěn pomocí plynového hořáku. Topný systém sestává ze spotřebičového rozvodu topného plynu a ventilátorového spalovacího vzduchu, 2 kusů plynových hořáků, spalovacího prostoru, odtahu spalin a recirkulačního okruhu, ovládacího a zabezpečovacího zařízení. Používaná topná směs je propan-butan o jmenovitém přetlaku 5 kPa a výhřevnosti $48,14 \text{ kJ.m}^{-3}$. První hořák o maximálním výkonu 10 kW s elektrojiskrovým zapalováním a ionizační sondou slouží jako zapalovací hořák pro druhý hořák. Druhý hořák o minimálním výkonu 35 kW a maximálním výkonu 135 kW se zapalováním pomocí zapalovacího hořáku a ionizační sondou slouží k ohřevu používaných materiálů pro výrobu.

Bezpečnost provozu topného systému je zajištěna pomocí prodloužení doby provětrávání topného systému před startem, snímače plamene, manostatů tlaku vzduchu a plynu.

Spalovací prostor je tvořen spalovací komorou, která je součástí plynového hořáku a je vybavena pozorovacím otvorem, vstupem pro ionizační sondu a zapalovací hořák. Součástí spalovací komory je rozvodné těleso odpadního vzduchu přiváděného z vnitřního pracovního prostoru míchačky a atmosférického chladícího vzduchu přisávaného do spalovacího prostoru z okolní atmosféry.

Odtah spalin sestává z vnitřních spalinových cest s výměníky tepla uvnitř míchačky (bude popsáno další kapitole), externího spalinovodu se spalinovým ventilátorem a spalinovou klapkou.



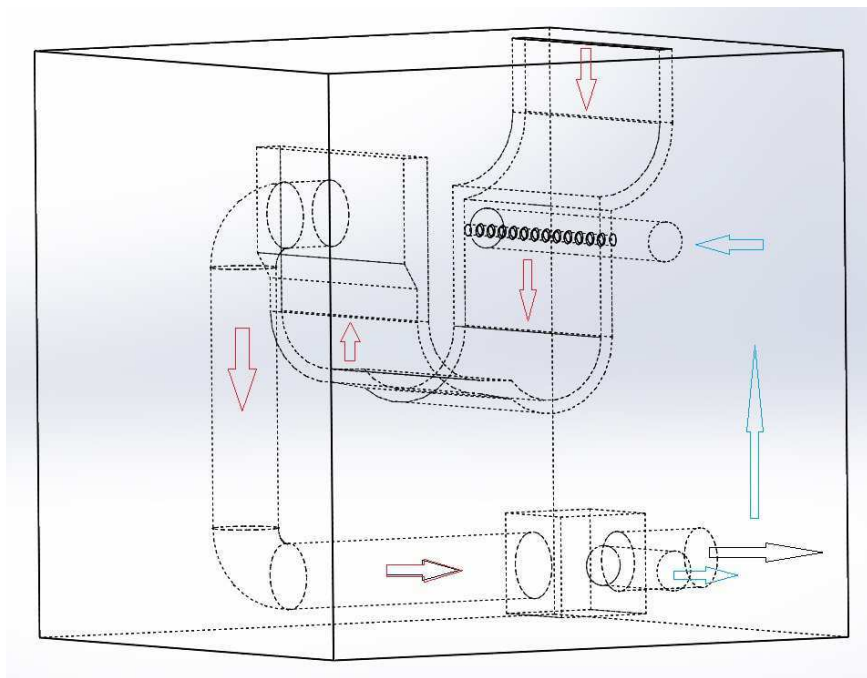
Obr. 9.4: Fotografie plynového hořáku [zdroj: autor]..

Na obrázku 9.4 je zobrazena funkce plynového hořáku, kdy hořák primárně slouží k ohřevu plniva, které je mícháno v sušárně, také viditelné na obrázku.

9.1.3 Systém recirkulace spalin

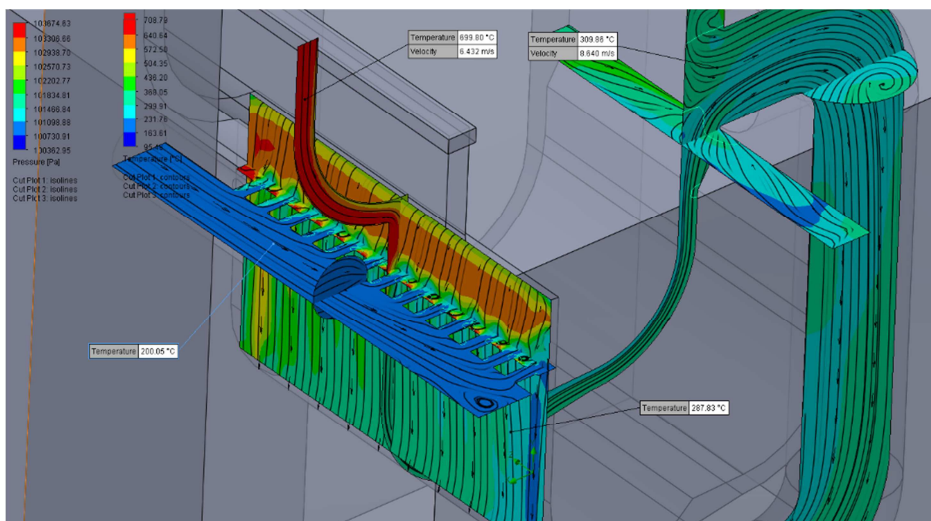
Technologická linka je vybavena systémem recirkulace spalin, který zajišťuje využití odpadního tepla a regulaci teploty ve stěnách míchačky, aby nedošlo k vychládání

výrobní směsi při homogenizaci plniv a pojiv. Systém recirkulace je zobrazen na obrázku 9.5.



Obr. 9.5: Schéma systému recirkulace spalin [zdroj: autor].

Červené šipky zobrazují tok spalin od hořáku (vpravo nahoře) přes míchačku, spojovací potrubí do spalinového boxu (vpravo dole), kde je umístěna spalinová klapka, která je nastavitelná tak, aby bylo možné spaliny vypouštět do komína nebo znovu recirkulovat. Při recirkulaci jsou již ochlazené spaliny vedeny (modré šipky) zpět do míchačky, kde dochází k jejich smíšení s horkými spalinami, které proudí od hořáku. Tento systém umožňuje regulovat teplotu spalin a tím regulovat optimální teplotu stěn míchačky. Na obrázku 9.6 je zobrazen tok spalin s rozložením teplot a proudnic.



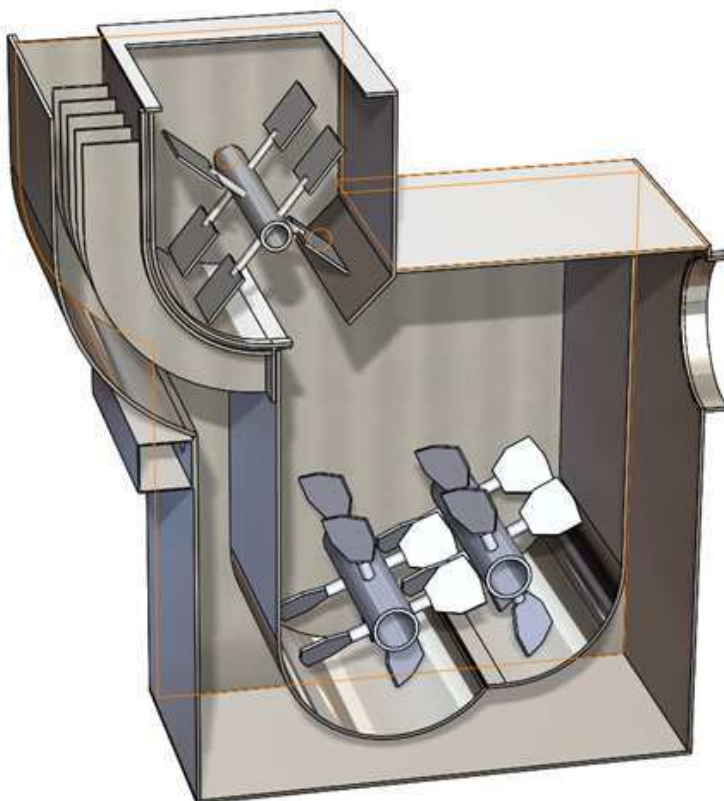
Obr. 9.6: Uspořádání proudnic toku a mísení recirkulačních spalín [zdroj: autor]..

9.1.4 Míchací reaktor

Míchací reaktor sestává ze dvou komponent – sušárny plniv a míchačky. Sušárna slouží k vysušení a ohřátí plniv na požadovanou teplotu, kdy je přes teplosměnnou plochu předáváno teplo od hořáku plnivu. Na obrázku 9.7 je zobrazen míchací reaktor, lze zde pozorovat teplosměnné plochy, žebrování, recirkulační cesty a otvory pro uložení hřídelí s míchacími lopatkami. Hřídele s míchacími lopatkami jsou zobrazeny na vizualizaci (obrázek 9.8), kde je možné pozorovat i recirkulační cesty. V sušárně dochází k sušení plniv, kdy lopatky nahrnují plnivo na teplosměnnou plochu, aby docházelo k lepšímu přenosu tepelné energie. V sušárně se také nachází termočlánek, který měří teplotu ohřívajícího plniva. Po ohřátí plniva na určenou teplotu dojde k jeho vysypání do míchačky. Po naplnění míchačky plnivem se vsype nadrcené pojivo a dochází k homogenizaci po určený čas, což bude detailně popsáno v následujících kapitolách. Jak lze pozorovat na obrázku 9.8, míchací lopatky jsou naklopeny, aby docházelo k dokonalé homogenizaci. Po homogenizaci směsi je nutné otočit směr otáčení míchacích hřídelí, aby došlo k vyprázdnění míchačky, vzhledem k jejich naklopení.



Obr. 9.7: Vzhled míchacího reaktoru - sušárna (nahore) a míchačka (dole) [zdroj: autor]..



Obr. 9.8: Schematické uspořádání na řezu míchacím reaktorem [zdroj: autor]..

9.1.5 Zavážecí stůl

Zavážecí stůl slouží k dopravení směsi do lisu pro finální úpravu. Toto zařízení funguje na principu zásuvky bez dna, kdy je směs vsypána do zavážecího vozíku a přepravena do lisu, kam se vsype díky bezedné úpravě zavážecího vozíku. Zavážecí stůl je zobrazen na obrázku 9.9.



Obr. 9.9: Zavážecí stůl sloužící k přepravě směsi do lisu k finální úpravě [zdroj: autor]..

9.1.6 Lis pro finální úpravu výrobků

V rámci výroby prototypu byl navržen a vyroben lis pro finální úpravu výrobků, který je zobrazen na obrázku 9.10. Pro první poloprovozní ověřování byla vyrobena forma s rozměry 600 x 600 x 100 mm pro výrobu plošných dlaždic o velikosti 600 x 600 x 75 mm.



Obr. 9.10: Vzhled lisuopatřené formou s rozměry 600 x 600 x 100 mm [zdroj: autor]..

9.2 Proces výroby stavebních dílců

Proces výroby lze popsat následujícími kroky:

- 1) drcení odpadních termoplastů na frakci 2 – 10 mm a jejich doprava do vážené násypky pojiv,
- 2) doprava plniv, pomocí šnekového dopravníku, do vážené násypky plniv,
- 3) otevření násypky plniv a jejich přesun do sušárny, kde dochází k jejich vysušení a ohřátí na požadovanou teplotu,
- 4) přesun ohřátého plniva ze sušárny do míchačky,
- 5) otevření násypky pojiv a jejich přesun do míchačky,
- 6) homogenizace pojiv a plniv, termoplastické plnivo je roztaveno předáním tepla od horkého plniva,
- 7) dávkování plastbetonové směsi na zavážecí stůl do zavážecího vozíku,
- 8) naplnění lisovací formy pomocí zavážecího vozíku,
- 9) lisování stavebního dílce,
- 10) dochlazování výrobku na válečkové dráze,
- 11) paletizace výrobků.

10 METODIKA PRÁCE

10.1 Etapa I

V rámci první etapy výzkumu bude provedena rešerše možných vstupních surovin a jejich vlastností, které jsou stěžejní právě pro tuto aplikaci. Dle výsledků vyplývajících ze vstupní rešerše bude zvoleno vhodné pojivo a plnivo pro počáteční poloprovozní zkoušky výroby s ohledem na jejich požadované specifické vlastnosti a dostupnost. V rámci etapy budou také navrženy teplotní podmínky pro vstupní suroviny během výroby. Receptury budou nejprve hodnoceny z hlediska konzistence směsi a soudržnosti finálně upravených výrobků. Vhodné receptury budou podrobeny sérií vstupních zkoušek jejich fyzikálně mechanických vlastností:

- pevnost za ohybu dle ČSN EN 14617-2,
- objemová hmotnost dle ČSN EN 14617-1,
- nasákavost dle ČSN EN 14617-1.

Na základě zjištěných poznatků a zkoušek fyzikálně-mechanických vlastností bude stanovena vhodná receptura stavební hmoty pro výrobu plošné dlažby, která bude využívána během dalších etap řešení.

10.2 Etapa II

Tato etapa logicky navazuje na etapu I, jelikož jsou předpokládány určité nedostatky strojního zařízení, které by mohly mít vliv na vlastnosti výrobků, a které vyvstanou během prvních výrobních zkoušek. V rámci druhé etapy budou zhodnoceny poznatky z etapy první, které se týkají strojního zařízení a vlivu jeho zjištěných nedostatků na užité vlastnosti plošných dlaždic. Proběhne kontrola jednotlivých komponent a bude zhodnocen jejich dílčí vliv na finální výrobek. Druhou etapu lze rozdělit do několika dílčích bodů:

- kontrola sušárny plniv a vyhodnocení nutnosti měření teploty ohřívaného materiálu,
- kontrola míchačky, zhodnocení usazování a tuhnutí plastbetonové směsi uvnitř a následného odpadávání ztvrdlých kusů do čerstvé směsi,
- kontrola zavážecího mechanismu lisu a zhodnocení jeho vlivu na vychládání roztavené plastbetonové směsi při transportu do lisu,

- kontrola geometrické přesnosti lisovaných výrobků a zhodnocení vlivu délky lisování na objemové změny výrobku při vychládání,
- zhodnocení použitého lisovacího tlaku a stlačitelnosti materiálu,
- zhodnocení nutnosti regulace teploty v míchačce pomocí ředění recirkulačních spalín čerstvým vzduchem.

Na základě zjištěných poznatků budou provedeny změny, které zajistí odstranění nedostatků a zlepšení užitečných vlastností vyráběných plošných dlaždic. Optimalizace strojního zařízení v této etapě je velmi důležitá ke správnému provedení a postupu třetí etapy, kde bude nutné vyrábět kvalitní bezvadné výrobky, jejichž vlastnosti budou ověřovány a budou podkladem pro zkoušky typu plošných dlaždic.

10.3 Etapa III

V rámci třetí etapy budou vyráběny plošné dlaždice z optimální receptury stanovené v etapě I, které budou podrobeny rozšířeným zkouškám jejich užitečných vlastností. Během této etapy bude nutné vyrábět bezvadné výrobky, jelikož výsledky provedených zkoušek budou podklady pro zkoušky typu těchto výrobků. Tato etapa se zabývá hloubkovou analýzou navržených receptur. Vzhledem k velmi nízkému počtu vědeckých prací s touto tematikou bude sloužit pro potvrzení vlastností receptur navržených v etapě I. V rámci výroby bude kladen velký důraz na geometrický tvar výrobku a homogenitu směsi.

V rámci etapy dojde také k ověření vlastností, které jsou dle technického návodu TN 09.15.08 potřebné k uvedení produktu na trh.

Zaměření této práce ukládá nutnost provedení také následujících zkoušek, aby výsledky tohoto výzkumu mohly být využity v praxi:

- stanovení odolnosti proti UV záření,
- stanovení obsahu radionuklidů.

10.4 Etapa IV

V rámci čtvrté etapy výzkumu budou ověřovány užitečné vlastnosti výrobků z plastbetonové směsi s použitím rozptýlené výztuže. Vzhledem k charakteru pojiva a plniva budou stanoveny vlastnosti výrobku s rozptýlenou výztuží z rozdržených minerálních vláken,

jejichž pozitivní vliv na některé užité vlastnosti prostého betonu byl autorem disertační práce prokázán v diplomové práci Studium využitelnosti odpadů z izolačních materiálů. Dále budou ověřovány užité vlastnosti s využitím rozptýlené výztuže na bázi skelných a uhlíkových vláken. Budou také zkoumány vlivy pigmentů na bázi oxidů železa na vlastnosti a zpracovatelnost plastbetonové směsi, kdy je předpokládáno, že příměs ve formě pigmentů bude mít pozitivní vliv převážně na UV stabilitu výrobků. Ve čtvrté etapě budou také ověřovány vlivy finální tvarové úpravy výrobků na jejich užité vlastnosti. Bude ověřeno použití extruze, případně i vibrolisování a vakuování.

11 ETAPA I a II

Po vyrobení a sestavení jednotlivých komponent byla technologická linka zprovozněna (viz obrázek 11.1) a uvedena do režimu poloprovozního ověřování.



Obr. 11.1: Technologická linka po sestavení [zdroj: autor].

11.1 Počáteční poloprovozní zkouška výroby

11.1.1 Pojivo

Při prvním poloprovozním ověřování byl zvolen, jako pojivo, odpadní termoplast PET vzhledem k jeho dostupnosti. Plastový odpad neprošel čistícím ani separovacím procesem, proto byly PET láhve včetně víček a etiket z PE. Při zkouškách byla zjištěna teplota tání PET, $t_{mPET} = 260\text{ °C}$, a teplota tání PE, $t_{mPE} = 130\text{ °C}$. Polyethylen má o polovinu nižší teplotu tání, ale jeho bod vzplanutí (dle (13)) nastává až při 350 °C , proto je možné jej tavit s PET při 260 °C . Objemová hmotnost drceného odpadu z PET a PE je 230 kg/m^3 . Vzhled pojiva je zobrazen na obrázku 11.2.



Obr. 11.2: Vzhled drceného odpadního termoplastu PET [zdroj: autor].

11.1.2 Polyethylentereftalát

Jedná se o jeden z nejvýznamnějších termoplastických polyesterů, který je polykondenzát kyseliny tereftalové a ethylenglykolu. Výroba probíhá většinou dvoufázově. V první fázi se dimethyltereftalát transesterifikuje ethylenglykolem za uvolnění methylalkoholu, teplota při transesterifikaci je mezi 190 a 195 °C , protože pod 180 °C reakce probíhá moc pomalu a nad 197 °C ethylenglykol vře.

Polyethylentereftalát byl původně surovinou k výrobě vláken a fólií pro zpracování na spotřební textilie, technické tkaniny a lana nebo k oplétání vodičů elektrického

proudu. Fólie se využívají v elektrotechnice a jako podložky pro výrobu magnetofonových a video rekordérových pásek a filmů. Dnes se s polyethylentereftalátem setkáváme opticky nejčastěji ve formě lahví, vyráběných vstřikovacím vyfukováním sloužících k balení kapalného zboží. (14)

11.1.3 Plnivo

Jako plnivo bylo při prvních poloprovozních zkouškách zvoleno kamenivo kopané, frakce 0-4 mm z důvodu dostupnosti a známého složení.

11.1.4 Receptury

Pro počáteční zkoušky byla zvolena základní receptura, která je uvedena v tabulce 11.1.

Tab. 11.1: Receptura 1 [zdroj: autor]

Složka	$m[\text{kg}]$	$m'[\%]$
Drcený PET + PE	10	16,7
Kamenivo frakce 0 – 4 mm	50	83,3

11.1.5 Požadované výrobky

Při prvním poloprovozním ověřování výroby byly rozměry požadovaných výrobků dány rozměry formy lisu 600 x 600 x 100 mm (viz kapitola 9.1.6), předpoklad stlačení hmoty při lisování byl 25 %, proto rozměr požadovaných výrobků byl 600 x 600 x 75 mm.

11.1.6 Výsledky počáteční poloprovozní zkoušky

Na obrázku 11.3 je zobrazen první výrobek podle receptury v tabulce 11.1, z obrázku je patrné, že plnivo bylo zahřáté na nízkou teplotu, a proto nedošlo k roztavení termoplastického pojiva. Na obrázku 11.4 je zobrazen další výrobek, u kterého došlo k roztavení a rovnoměrné homogenizaci termoplastického pojiva, ale vzhledem k jeho nízkému množství nebylo dosaženo optimální konzistence plastbetonové směsi, proto byl výrobek nerovnoměrně vylišován.



Obr. 11.3: Vzhled prvního výrobku z první poloprovozní zkoušky [zdroj: autor]..



Obr. 11.4: Vzhled dalšího výrobku z první poloprovozní zkoušky [zdroj: autor]..

11.1.7 Vyhodnocení první poloprovozní zkoušky

V rámci prvních ověřovacích zkoušek byly zjištěny nedostatky, které je nutné napravit a optimalizovat tak, aby bylo možné vyrábět bezvadné stavební dílce.

Zjištěné nedostatky:

- 1) Únik vodní páry a prachu ze sušárny při sušení písku – nutné instalovat podtlakový odtah vodních par, aby pára neunikala samovolně do okolí.
- 2) Nedostatečné měření teploty – termočlánky jsou umístěny pouze na dvou místech a měří teplotu plamene hořáku a spalin jdoucích do komína. Je nutné měřit teplotu ohřívaného materiálu, aby bylo možné zjistit, kdy je vhodná doba pro homogenizaci plniva s pojivem. Dále je nutné měřit teplotu recirkulačních spalin, aby bylo možné regulovat teplotu stěn v míchačce.
- 3) Nízké množství pojiva ve směsi, pro další experimenty bude uvažován poměr plnivo:pojivo = 80 : 20.
- 4) Vhodná teplota plniva k homogenizaci – nutné určit vhodnou teplotu, na kterou je nutné ohřát plnivo, aby došlo k roztavení pojiva v míchačce.
- 5) Zjištěna nižší stlačitelnost materiálu než byla předpokládána - nutná úprava tloušťky formy, aby výrobky měly nižší tloušťku.
- 6) Nízký tlak lisu – na plochu 600 x 600 mm vyvíjí tlak pouze 3 MPa.

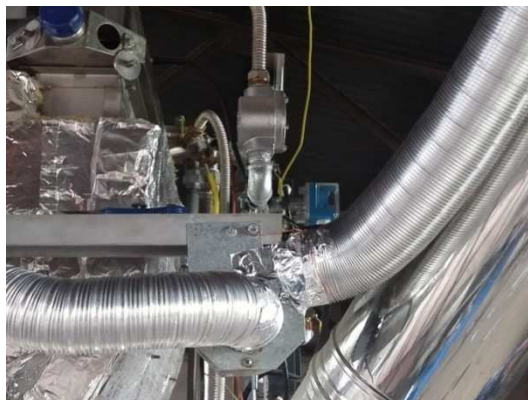
11.1.8 Odstranění zjištěných nedostatků z počáteční poloprovozní zkoušky

11.1.8.1 Únik vodní páry a prachu

Při první poloprovozní zkoušce byl zjištěn únik vodních par při sušení plniva netěsnostmi v konstrukci sušárny. Tento problém byl vyřešen instalací odtahu vodních par ze sušárny a míchačky, viz obrázek 11.5. Odtah vodních par je realizován pomocí podtlaku, který vyvíjí instalovaný spalinový ventilátor. Ten je zobrazen na obrázku 11.6.



Obr. 11.5: Instalovaný odtah vodních par ze sušárny a míchačky [zdroj: autor].



Obr. 11.6: Spalinový ventilátor zajišťující odtah vodních par [zdroj: autor].

11.1.8.2 Měření teploty

Bylo zjištěno, že nynější měření teploty v technologické lince je pro výrobu nedostatečné. Nyní se měří pouze teplota plamene pod hořákem a teplota spalin vycházejících do komína. Vzhledem k bezpečnosti bylo nutné nainstalovat termočlánek, který měří teplotu výparů odcházejících z míchačky (viz obrázek 11.7), aby nedošlo k přehřátí výparů a jejich vznícení. Z hlediska výroby bylo nutné nainstalovat termočlánek, který měří teplotu ohřívaného plniva, aby jednoduše mohla být zjištěna chvíle, kdy je možné plnivo smíchat s pojivem tak, aby došlo k roztavení termoplastu. Termočlánek byl instalován do sušárny z přední strany (viz obrázek 11.8) tak, aby při otáčení míchací hřídele sušárny bylo na jeho konec nahrnováno ohřívané plnivo a měřená teplota byla aktuální a přesná. Třetí termočlánek byl nainstalován ze spodu míchacího reaktoru přímo do recirkulační cesty spalin. Tímto je možné měřit teplotu recirkulujících spalin a zjistit teplotu stěn míchačky.

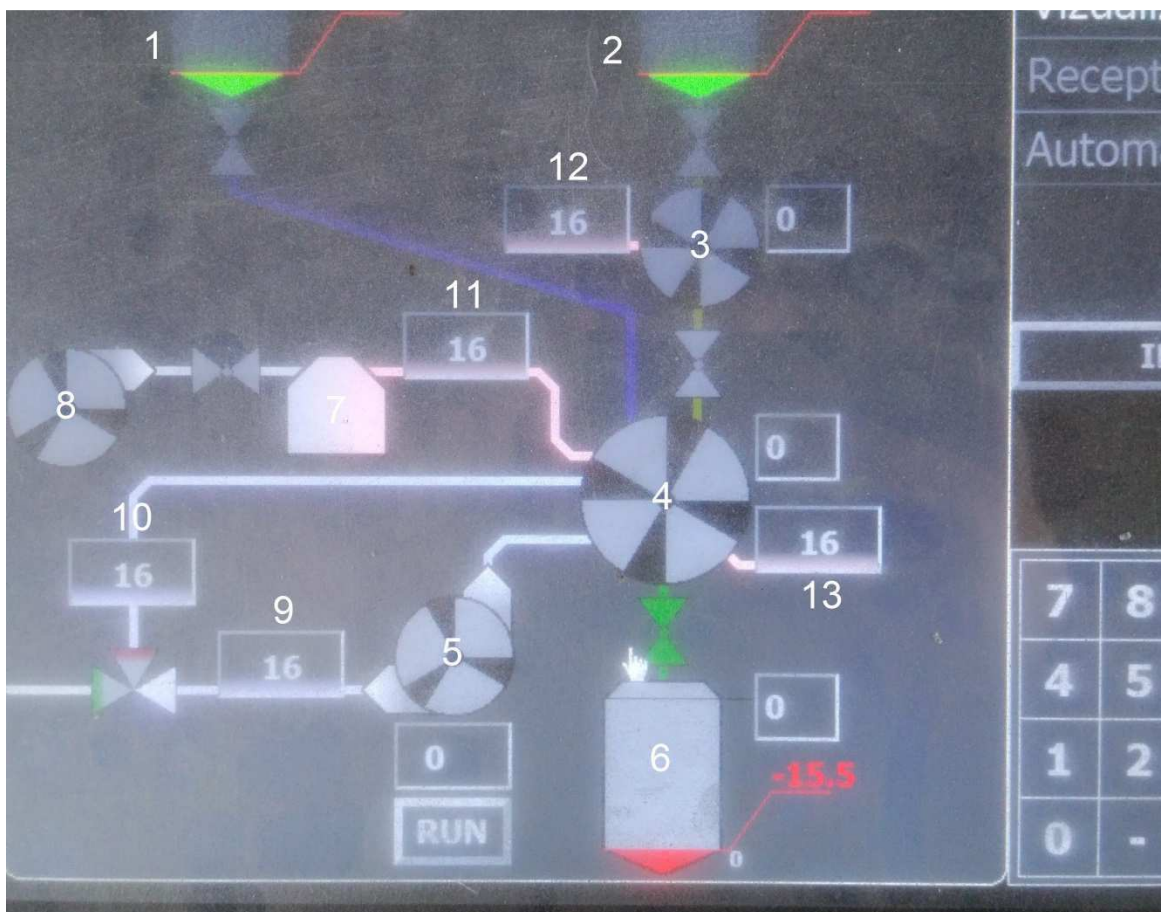


Obr. 11.7: Termočlánek měřící teplotu výparů z míchačky [zdroj: autor].



Obr. 11.8: Termočlánek měřící teplotu ohřívaného plniva [zdroj: autor].

Po instalaci byly teploty, které měří termočláanky promítnuty i do ovládacího softwaru technologické linky, jak je zobrazeno na obrázku 11.9.



Obr. 11.9: Ovládací software technologické výrobní linky.

1 – Násypka pojiv, 2 – násypka plniv, 3 – sušárna plniv, 4 – míchačka, 5 – recirkulační ventilátor, 6 – vážený zavážecí stůl, 7 – plynový hořák, 8 – ventilátor přivádějící spalovací vzduch pro plynový hořák, 9 – teplota spalin po recirkulaci, 10 – teplota recirkulačních spalin v prostoru míchačky, 11 – teplota plamene hořáku, 12 – teplota ohřívání plniv v sušárně, 13 – teplota výparů z míchačky [zdroj: autor].

11.1.8.3 Zjištění vhodné teploty plniva

Bylo zjištěno, že je nutné výpočtem odhadnout teplotu, na kterou je nutné zahřát plnivo, aby při homogenizaci s pojivem došlo k dokonalému roztavení pojiva teplem předaným od ohřátého plniva. Pro zjištění vhodné teploty byl proveden tepelný výpočet uvedený v tabulce 11.3. Při realizaci výpočtu bylo zjištěno, že je nutné experimentálně ověřit přesnou teplotu tání termoplastu PET.

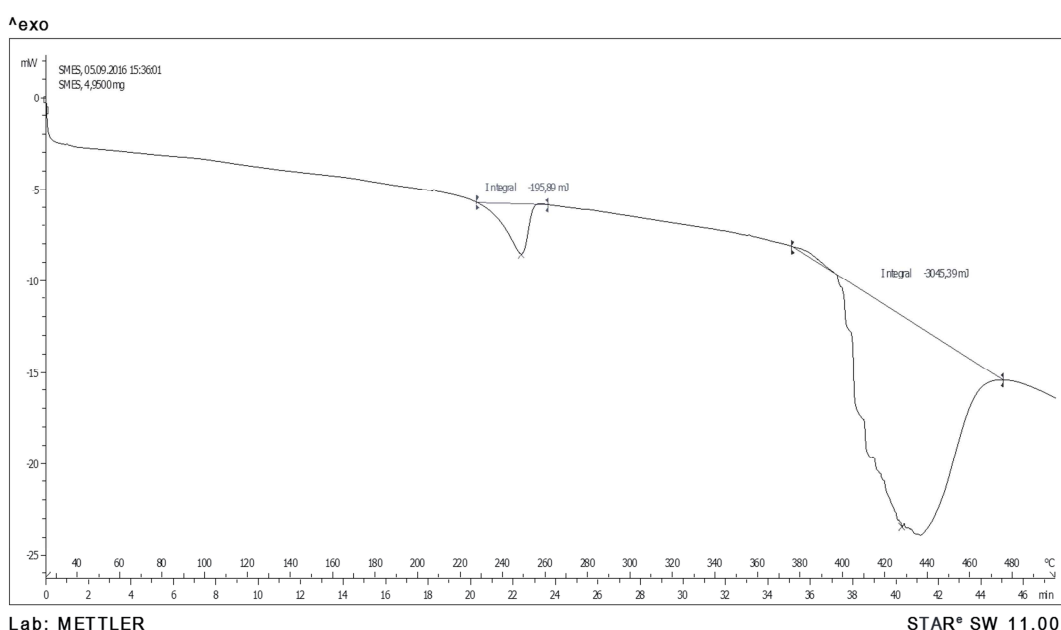
Experimentální ověření teploty tání PET proběhlo pomocí plechové nádoby, vzorku drceného PET, horkovzdušné pistole a měřicího přístroje AHLBORN ALMENO 2390-8 (viz obrázek 11.11), kterým byla termočlánkem Ni-CR měřena teplota. Průběh experimentálního měření je zobrazen na obrázku 11.10.



Obr. 11.10: Průběh experimentálního ověření teploty tání PET [zdroj: autor].



Obr. 11.11: Měřicí přístroj s termočlánkem Ni-CR [zdroj: autor].



Lab: METTLER

Obr. 11.12: Výsledek DSC analýzy vstupního termoplastu [zdroj: autor].

Na obrázku 11.12 je zobrazen výsledek z diferenční kompenzační kalorimetrické analýzy, které byl podroben vzorek termoplastu PET. Z grafu vyplývá teplota tání pojiva a teplota jeho degradace. Je zde také patrné, že proces tání termoplastu, respektive jeho degradace je doprovázen exotermickou reakcí.

Drcený PET v plechové nádobě byl zespodu ohříván pomocí horkovzdušné pistole a zároveň byla termočlánkem měřena teplota zahřívané směsi. Byla zjištěna teplota tání ve třech po sobě jdoucích měřeních. Výsledky měření jsou zaznamenány v tabulce 11.2.

Tab. 11.2: Výsledky měření teploty tání PET [zdroj: autor].

$t_t[^\circ\text{C}]$	$\Phi t_t[^\circ\text{C}]$
253,6	251,7
250,4	
251,2	

Tab. 11.3: Výpočet teploty plniva [zdroj: autor].

$C_{kam}=$	960,0	J/kg.K
$m_{kam}=$	4,0	kg
$C_{PET}=$	1300,0	J/kg.K
$m_{PET}=$	1,0	kg
$t_1=$	20,0	$^\circ\text{C}$
$t_{tPET}=$	251,7	$^\circ\text{C}$
$t_x=$	?	$^\circ\text{C}$
$Q = Q_{PET} + Q_{kam}$ $m_{kam} \cdot C_{kam} \cdot (t_x - t_1) = m_{PET} \cdot C_{PET} \cdot (t_{tPET} - t_1) + m_{kam} \cdot C_{kam} \cdot (t_{tPET} - t_1)$ $t_x = ((m_{PET} \cdot C_{PET} \cdot (t_{tPET} - t_1) + m_{kam} \cdot C_{kam} \cdot (t_{tPET} - t_1)) / (m_{kam} \cdot C_{kam})) + t_1$ $t_x = 330,1^\circ\text{C}$		

kde :

- C_{kam} ... měrná tepelná kapacita kameniva 0 - 4 mm
- m_{kam} ... hmotnost kameniva
- C_{PET} ... měrná tepelná kapacita PET
- m_{PET} ... hmotnost PET
- t_1 ... teplota materiálu
- t_{tPET} ... teplota tání PET
- t_x ... teplota kameniva potřebná pro roztavení PET

Výpočtem, uvedeným v tabulce 11.3, byla zjištěna teplota, na kterou je nutné ohřát plnivo, aby došlo k roztavení termoplastického pojiva při jejich homogenizaci. Zjištěná teplota je 330,1 $^\circ\text{C}$ při poměru plnivo : pojivo = 80 : 20 a při počáteční teplotě obou složek 20 $^\circ\text{C}$.

11.1.8.4 Lisovací tlak

Vzhledem k nízkému lisovacímu tlaku byla provedena úprava formy a lisovacího razníku. Došlo ke zmenšení formy na rozměr 300 x 300 x 75 mm, tím došlo ke zvýšení lisovacího tlaku z 3 MPa na 12 MPa. Úprava formy je zobrazena na

obrázku 11.12. Do formy byly vybroušeny distanční nálitky o poloměru 3 mm, které zajišťují dodržení spáry při pokládání plošné dlažby.



Obr. 11.12: Vzhled formy s rozměry 300 x 300 x 75 mm [zdroj: autor]..

11.2 Druhá poloprovozní zkouška výroby

Pojivo bylo zvoleno stejně jako u první poloprovozní zkoušky – drcený odpadní PET s příměsí PE. Jako plnivo bylo použito kamenivo kopané frakce 0 – 4 mm. Byla upravena i výrobní receptura, protože u první poloprovozní zkoušky bylo zjištěno, že ve směsi nebylo dostatečné množství pojiva. Hmotnost jedné záměsi byla snížena o polovinu vzhledem k rychlosti ohřevu plniva a spotřebě vstupních surovin při nevydařeném experimentu.

11.2.1 Receptura

Tab. 11.4: Receptura 2 [zdroj: autor]

Složka	$m[\text{kg}]$	$m[\%]$
Drcený PET + PE	6,3	20,1
Kamenivo frakce 0 – 4 mm	25	79,9

11.2.2 Požadované výrobky

U druhé poloprovozní zkoušky byly požadované výrobky s rozměry 300 x 300 x 67,5 mm při 10% stlačení s distančními nálitky o poloměru 3 mm, které byly vybroušeny do nové formy.

11.2.3 Výsledky druhé poloprovozní zkoušky

Na obrázku 11.13 je zobrazen první výrobek druhé poloprovozní zkoušky vyrobený podle receptury 2. Na vzorku je zřetelné opět nedostatečné množství použitého termoplastického pojiva v receptuře. Zvýšením lisovacího tlaku na 12 MPa bylo dosaženo lepšího povrchu dlaždice, který je ovšem vzhledem k nízkému množství pojiva popraskaný.

Při výrobě další záměsi bylo zvýšeno množství termoplastického pojiva o 0,7 kg. Výsledná směs tedy obsahovala 7 kg drceného PET + PE a 25 kg kameniva frakce 0 – 4 mm. Nová receptura je zobrazena v tabulce 11.5.

Na obrázku 11.14 je zobrazen další výrobek druhé poloprovozní zkoušky vyrobený podle receptury 3. Na vzorku je patrné zlepšení povrchu a celkového tvaru vlivem většího množství termoplastického pojiva. Tato receptura byla zvolena za vhodnou a výchozí recepturu pro další poloprovozní zkoušky výroby. Viditelné vady na povrchu dlaždice jsou zapříčiněné nerovnoměrným chladnutím výrobní směsi při jejím dávkování do formy pomocí zavážecího vozíku.



Obr. 11.13: Vzhled výrobku s rozměry 300 x 300 x 67,5 mm vyrobeného dle receptury 2 [zdroj: autor].

Tab. 11.5: Receptura 3 [zdroj: autor]

Složka	$m[\text{kg}]$	$m'[\%]$
Drcený PET + PE	7	21,9
Kamenivo frakce 0 – 4 mm	25	78,1



Obr. 11.14: Vzhled výrobku s rozměry 300 x 300 x 67,5 mm vyrobeného dle receptury 3 [zdroj: autor].

11.2.4 Vyhodnocení druhé poloprovozní zkoušky

Všechny nedostatky zjištěné v první poloprovozní zkoušce byly odstraněny, avšak byly zjištěny další nedostatky, které je nutné odstranit pro zajištění optimalizace výroby.

Zjištěné nedostatky:

- 1) Zvýšením lisovacího tlaku se projevila nevhodnost používaných podložek, na kterých dochází k lisování. Podložky jsou OSB desky o tloušťce 25 mm (viz obrázek 11.15). OSB deska se pod zatížením částečně slisovala a negativně ovlivňuje spodní stranu vyrobených dlaždic, jak je zobrazeno na obrázku 11.16.
- 2) Nízké množství pojiva v receptuře 2, bylo vyřešeno během prováděných experimentů zvýšením množství pojiva.
- 3) Při lisování vznikají na horní straně dlaždice nežádoucí „přerosty“, které jsou viditelné například u dlaždice na obrázku 11.13. Tento problém je způsoben nevhodně zvolenou vůlí mezi lisovacím razníkem a formou, kdy se lisovaná hmota do této mezery dostává a zatuhne zde.
- 4) Nerovnoměrné chladnutí plastbetonové směsi při dávkování do formy pomocí zavážecího vozíku.

- 5) Tuhnutí plastbetonové směsi v rozích míchačky. Bylo zjištěno, že v rohu míchačky zůstává nahromaděná plastbetonová směs, která zde po vychladnutí zatuhne a způsobuje ohýbání míchacích lopatek. Zatuhlá směs je na obrázku 11.17 označena červenými šipkami.



Obr. 11.15: Vzhled podložky pro lisování z OSB desky [zdroj: autor].



Obr. 11.16: Vzhled spodní strany dlaždice zalisované do OSB desky [zdroj: autor].



Obr. 11.17: Plastbetonová směs zatuhlá v rohu míchačky [zdroj: autor].

11.2.5 Odstranění zjištěných nedostatků z druhé poloprovozní zkoušky

11.2.5.1 Lisovací podložka

Lisovací podložka vyrobená z OSB desky byla nahrazena ocelovým plechem tloušťky 25 mm, aby nedocházelo k vylisování podložky do dlaždice tak, jako v předchozích zkouškách.

11.2.5.2 Vznik nežádoucích „přerostů“ při lisování

Vzhledem ke vzniku nežádoucích hrany na pohledové straně dlaždice byla provedena úprava lisovacího razníku. Došlo ke snížení vůle mezi razníkem a formou na 0,5 mm na každé straně a k obrobení razníku, aby na dlaždici vznikly po vylisování fazety pod úhlem 45°. Úprava razníku je zobrazena na obrázku 11.18.



Obr. 11.18: Vzhled razníku po geometrické úpravě a obrobení [zdroj: autor].

11.2.5.3 Nerovnoměrné chladnutí plastbetonové směsi při dávkování do formy

Při zkoušce bylo zjištěno, že dávkování pomocí vozíku je nevhodné vzhledem k nerovnoměrnému vychládání plastbetonové směsi v částech, kde se dotýká ocelového zavázacího stolu a ocelových boků vozíku. To způsobuje vady uvnitř i na povrchu dlaždic, což je nežádoucí. Prozatímní řešení je ruční dávkování plastbetonové směsi do lisu pomocí lopaty, kterou lze před použitím nahřát.

11.2.5.4 Tuhnutí plastbetonové směsi v rozích míchačky

Vyřešeno mechanickým odstraněním a plánem pravidelných kontrol míchacího zařízení.

11.3 Třetí poloprovozní zkouška výroby

Při druhé poloprovozní zkoušce byla ověřena vhodná receptura, která obsahuje dostatečné množství pojiva pro obalení všech zrn kameniva a vytvoření kompaktní struktury. Tato receptura byla zvolena i pro třetí poloprovozní zkoušku. Při této zkoušce bude ověřena možnost probarvení výrobku pomocí pigmentů na bázi Fe_2O_3 .

na žlutou a červenou barvu. Vzhledem k vysokému měrnému povrchu pigmentu byla receptura upravena přidáním 1 kg pojiva oproti receptuře v tabulce 11.5.



Obr. 11.19: Vzhled použitých pigmentů [zdroj: autor]

Tab. 11.6: Receptura 4 [zdroj: autor]

Složka	$m[\text{kg}]$	$m'[\%]$
Drcený PET + PE	8	23,2
Kamenivo frakce 0 – 4 mm	25	72,4
Pigment Fe_2O_3 červený/žlutý	1,5	4,4

11.3.1 Požadované výrobky

Vzhledem k prozatímnímu dávkování pomocí lopaty a jeho nepřesnosti nebyl u této zkoušky kladen požadavek na stejnou výšku dlaždic. Výstupem této zkoušky tedy byly dlaždice s rozměry 300 x 300 mm s různou výškou.

11.3.2 Výsledky třetí poloprovozní zkoušky

Na obrázku 11.19 je zobrazen výrobek dle receptury uvedené v tabulce 11.6 bez přidání barevného pigmentu, z obrázku je patrné, že výrobek je celistvý, nerozpadá se a má i kvalitní povrch. Design výrobku byl zlepšen výměnou lisovacího razníku a tím vytvoření fazet na horních hranách dlaždice.

Na obrázku 11.20 je zobrazen další výrobek dle receptury 11.6, ale zde již došlo k přidání pigmentu se žlutou barvou. Z obrázku je patrné, že nedošlo k obarvení na žlutou barvu tak, jak bylo před započatím výroby předpokládáno, ale vznikla barva oranžová, což je způsobeno základní barvou plastbetonové směsi, která je hnědá. Výrobek byl opět celistvý s kvalitním povrchem, což potvrzuje správnou volbu receptury.

Na obrázku 11.21 je zobrazen poslední výrobek dle receptury 11.6, kde byl přidán pigment s červenou barvou. Výrobek byl dle předpokladu probarven do červena a nedošlo ke změně barevnosti jako v předchozím případě. Výrobek byl celistvý

s kvalitním povrchem, bez větších vad, což opět potvrzuje správnost vybrané receptury. Na obrázku 11.22 je možné porovnat jednotlivou barevnost výrobků.



Obr. 11.19: Vzhled výrobku bez přidaného pigmentu [zdroj: autor].



Obr. 11.20: Vzhled výrobku po přidání žlutého pigmentu na bázi Fe_2O_3 [zdroj: autor].



Obr. 11.21: Vzhled výrobku po přidání červeného pigmentu na bázi Fe_2O_3 [zdroj: autor].



Obr. 11.22: Porovnání vzhledu výrobků, zleva: žlutý pigment, červený pigment, bez pigmentu. [zdroj: autor]

11.3.3 Vyhodnocení třetí poloprovozní zkoušky

V rámci předchozích etap byly vyřešeny nedostatky týkající se receptury, lisovacího zařízení a jeho geometrické přesnosti, celkového zařízení. Zbývajícím problémem

zůstávají objemové změny při chladnutí vzorků a doprava roztaveného materiálu z míchacího zařízení do lisu.

12 Problematika chladnutí vzorků

Při poloprovozním ověřování bylo zjištěno, že vylisované vzorky jsou ztuhlé pouze na povrchu a uvnitř jsou stále v roztaveném stavu, což způsobuje objemové změny při jejich chladnutí – konkrétně jde o vyboulení dlaždice ve směru odcházejícího tepla (vzhůru). Vzhledem k tomuto problému nelze dodržet geometrickou přesnost danou platnou technickou legislativou na dlažební prvky z umělého kamene. Prvním předpokladem vyřešení tohoto problému bylo vylehčení dlažebních prvků ze spodní strany (viz obrázek 12.1), což se ukázalo jako vhodné řešení (viz obrázek 12.2) pro zajištění geometrické přesnosti při vychládání vzorků.



Obr. 12.1: Vzhled spodní strany vylehčené dlaždice [zdroj: autor].



Obr. 12.2: Vzhled pohledové strany vylehčené dlaždice [zdroj: autor].



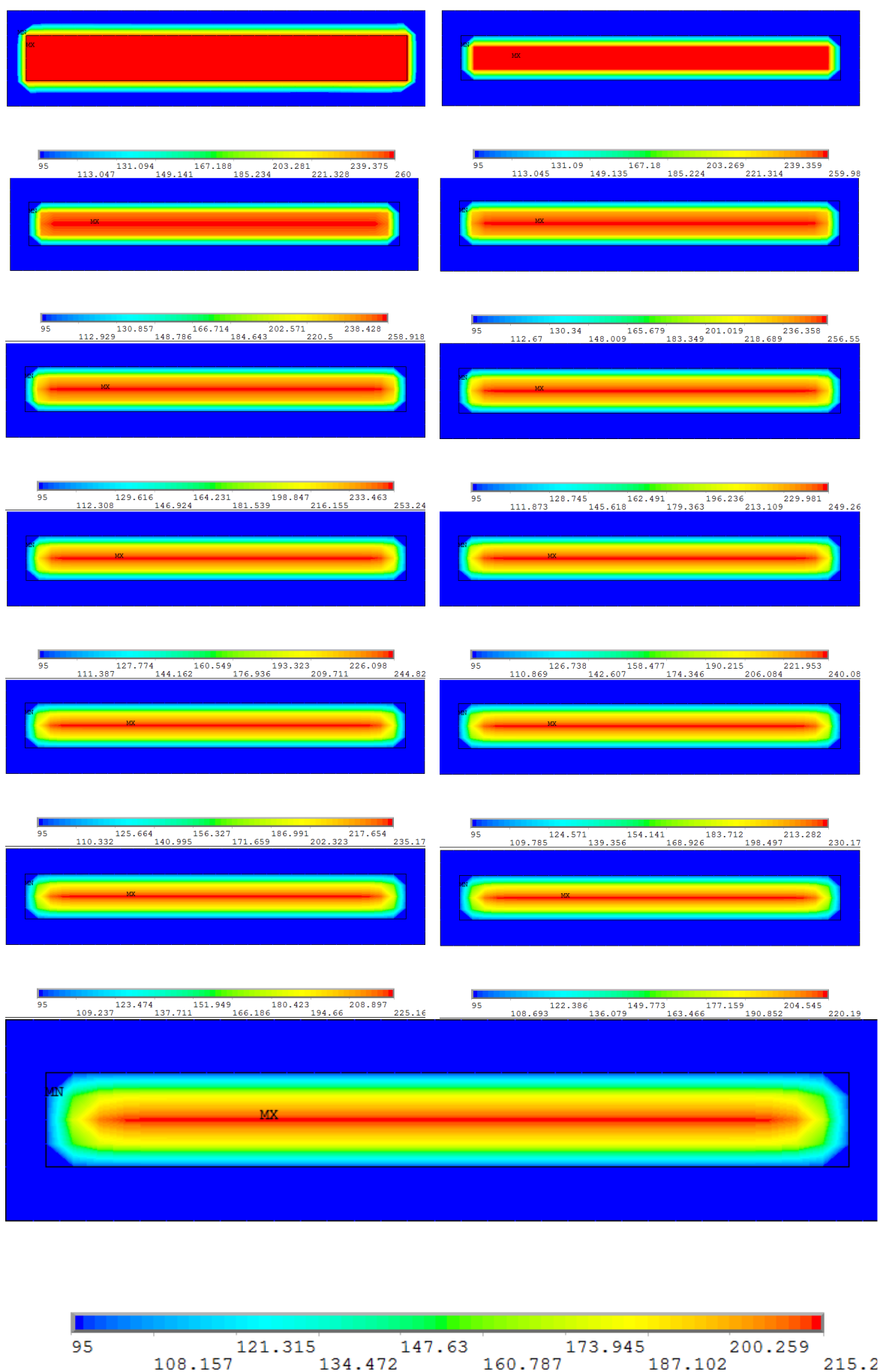
Obr. 12.3: Vzhled porušení vylehčené dlaždice při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN EN 14617-2 [zdroj: autor].

Z hlediska geometrické přesnosti vykazovaly vzorky s perforací spodní strany velmi dobré výsledky a bylo dosaženo hodnot požadovaných technickou legislativou. Problém nastal při zkoušce vzorků na pevnost v třibodovém ohybu dle ČSN EN

14617-2, kdy bylo zjištěno, že perforace způsobuje porušení vzorku mimo jeho zatěžovaný střed (viz obrázek 12.3) a tím pádem dochází ke znehodnocení zkoušky.

Druhým předpokladem vyřešení této problematiky byla zvýšená doba lisování, kdy bylo předpokládáno, že zvýšením lisovací doby bude vzorek v lisu chladnout v celém průřezu a po jeho vytažení nebude docházet k objemovým změnám. Pro první experiment byla stanovena doba lisování na 120 s, což bylo experimentálně prokázáno jako doba vhodná pro vychlazení vzorku, abych nedocházelo k objemovým změnám po vylisování. Předpokládaná doba lisování byla dostatečná, ale vznikl problém při opakovaném lisování dalších vzorků – forma a lisovací razník se dále zahřívaly a po čase byla jejich teplota natolik vysoká, že lisovací doba 120 s byla krátká.

Zkušenosti z druhého předpokladu byly využity pro modelování chladnutí vzorků v programu ANSYS, kde bylo nastaveno prostředí lisu a bylo zjišťováno jaká je možná teplota ocelové formy a razníku lisu, aby bylo možné po 120 sekundách lisování vytáhnout vzorek, který bude již dostatečně vychlazený a nebude docházet k jeho objemovým změnám. Modelováním chladnutí bylo zjištěno, že je nutné držet stálou teplotu formy a lisovacího razníku, která je v ideálním případě 95 °C. Zvolená teplota je vhodná i z hlediska degradace polymeru při jeho styku (v roztavené formě) s velmi chladnými povrchy ($t_p < 30$ °C). Výsledky modelování v programu ANSYS jsou viditelné na obrázku 12.4. Jednotlivé obrázky zobrazují teplotní stav vzorku v čase 0 – 120 s v krocích po 10 s. V posledním kroku je patrné, že dlaždice bude mít maximální teplotu 215,29 °C v úzkém pásu uprostřed, což znamená, že její povrch bude dostatečně zchlazený, aby nedocházelo už k dalším objemovým změnám vzorku.



Obr. 12.4: Modelování chladnutí vzorku v programu ANSYS [zdroj: autor].

13 ETAPA III – STANOVENÍ UŽITNÝCH VLASTNOSTÍ VÝROBKŮ

V rámci dalšího postupu byly stanoveny na vzorcích vyrobených dle receptur uvedených v tabulkách 11.5 a 11.6. Na vzorcích bylo provedeno stanovení pevnosti za ohybu dle ČSN EN 14617-2, odolnosti proti ohrusu dle ČSN EN 14617-4, odolnosti proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek dle ČSN 73 1326, součinitele smykového tření dle ČSN 74 4507, objemové hmotnosti a nasákavosti dle ČSN EN 14617-1, UV stability dle ČSN EN ISO 4892-2, hloubky průsaku tlakovou vodou dle ČSN 12390-8.

13.1 Výroba přesných zkušebních těles pro stanovení užitných vlastností

Pro účely experimentálního stanovení užitných vlastností výrobků byly vyrobeny vzorky s přesnou geometrií. Výroba vychází z předchozích poznatků o chování těles při chladnutí. Forma a razník lisu byl při této výrobě temperován na teplotu 95 °C pomocí odvodu tepla vodou. Lisování probíhalo 120 s za stálého tlaku 12 MPa.

13.2 Stanovení pevnosti za ohybu, objemové hmotnosti a nasákavosti dle [15] a [16]

13.2.1 Stanovení pevnosti za ohybu

13.2.1.1 Podstata zkoušky

Podstata této zkoušky spočívá v umístění zkušebního tělesa na dva válce a postupném zatěžování zkušebního tělesa ve středu pomocí válce. Při porušení se odečte lomové zatížení a následně se vypočítá pevnost za ohybu dle vzorce:

$$R_{tf} = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (1),$$

kde :

R_{tf} ... pevnost za ohybu (MPa),

F ... lomové zatížení (N),

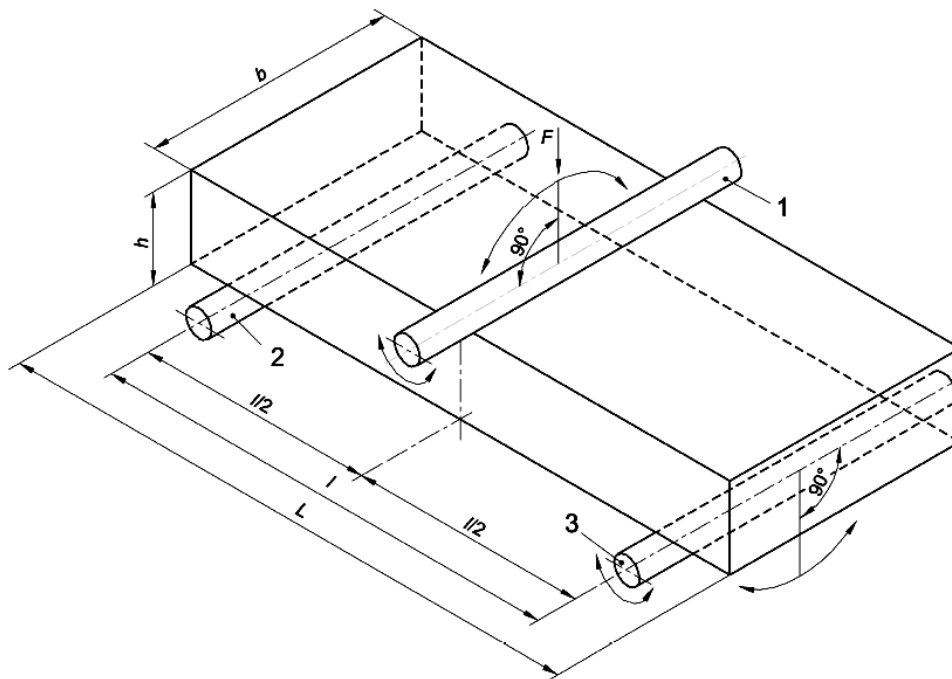
l ... vzdálenost mezi podpůrnými válci (mm),

h ... tloušťka zkušebního tělesa přiléhající k místu lomu (mm),

L ... celková délka zkušebního tělesa (mm).

13.2.1.2 Zkušební zařízení

- Váhy s přesností 0,1 g,
- délkové měřicí zařízení s přesností 0,05 mm,
- zkušební lis,
- zařízení pro aplikaci zatěžování na střed zkušebního tělesa – dva spodní podpůrné válce a jeden zatěžovací horní válec,
- prostor s udržovanou teplotou (20 ± 5 °C).



Legenda

- 1 válec přenášející zatížení
- 2 podpůrný válec
- 3 podpůrný válec

Obr. 13.1: Uspořádání zatěžování zkušebního tělesa. [15]

13.2.1.3 Zkušební postup

- 1) Povrch válců byl otřen dočista a byly odstraněny všechny částice z ploch zkušebních těles, které přijdou do styku s válci,
- 2) byla změřena šířka a tloušťka zkušebního tělesa, rozměry byly zaokrouhleny na 0,1 mm,
- 3) zkušební těleso bylo vystředěno na podpůrných válcích dle obrázku 13.1, zatěžovací válec byl umístěn na střed tělesa,
- 4) zatížení bylo plynule zvyšováno rychlostí ($0,25 \pm 0,05$) MPa/s do porušení tělesa,

- 5) lomové zatížení bylo zaznamenáno s přesností na nejbližších 10 N spolu s místem lomu.



Obr. 13.2: Vzhled zkušebního tělesa upnutého v přípravku pro stanovení pevnosti za ohybu [zdroj: autor].

13.2.1.4 Výsledky

Byla vypočtena pevnost za ohybu dle rovnice (1). Pevnost byla zaokrouhlena na nejbližší 0,1 MPa. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 13.1.

Tabulka 13.1: Výsledky zkoušek na vyrobených zkušebních tělesech [zdroj: autor].

i	a (mm)	b (mm)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	h_3 (mm)	h_4 (mm)	h (mm)	F (kN)	R_{ft} (MPa)
1	299,05	300,10	34,55	34,80	33,95	34,45	34,45	12100	10,2
2	299,50	299,30	34,60	35,50	35,90	35,10	35,25	13100	10,6
3	298,95	299,45	36,00	36,75	35,40	35,45	35,90	13000	10,1
4	299,30	300,05	28,40	39,00	39,70	38,50	36,40	13600	10,3
5	299,85	299,20	39,30	39,80	40,30	39,40	39,70	18200	11,6
6	300,20	299,65	41,00	41,40	40,90	40,80	41,05	19200	11,4
7	298,90	299,30	43,80	43,00	42,90	41,80	42,90	21500	11,7
8	299,20	299,65	43,55	44,00	42,90	42,70	43,30	21800	11,6
9	300,25	299,85	45,00	45,10	44,60	44,50	44,80	22200	11,1
10	299,15	298,80	45,20	45,35	45,60	45,40	45,40	23800	11,6
Průměr									11,0

Průměrná pevnost za ohybu testovaných vzorků byla $R_{ft} = 11,0$ MPa, což vyhovuje dle požadavku na dlažební prvky z umělého kamene dle ČSN 73 6131, tabulky 8, kde je požadovaná hodnota pro pevnost za ohybu plochých výrobků $\geq 7,0$ MPa.

13.3 Stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti dle [16]

13.3.1 Objemová hmotnost

Je poměr mezi hmotností (v kg) a zdánlivým objemem (v m³) vymezeným vnějším povrchem tělesa.

13.3.2 Nasákavost

Je maximální množství vody absorbované materiálem při ponoření v deionizované vodě, za pokojové teploty a tlaku v souladu s postupem stanoveným níže, vyjádřené jako procento z hmotnosti suchého vzorku.

13.3.3 Zkušební zařízení

- Uzavíratelná nádoba s plochým dnem, obsahující malé neoxidující a neabsorbující podložky pro zkušební tělesa,
- měřič času s přesností 1 s,
- váhy s přesností 0,1 g,

- hydrostatické váhy s přesností 0,1 g,
- sušárna s ventilací umožňující udržet teplotu (70 +/- 5) °C.

13.3.4 Kondicionování zkušebních těles

Zkušební tělesa byla vysušena do konstantní hmotnosti při teplotě (70 +/- 5) °C, tzn. mezi dvěma následnými váženími v intervalu (24 +/- 2) h nebyl rozdíl hmotností větší než 0,1 %. Dále byla zkušební tělesa ponechána v exsikátoru, dokud jejich teplota nedosáhla (20 +/- 5) °C.

13.3.5 Postup zkoušky

Zkušební tělesa byla zvážena a byla zjištěna hmotnost vysušených vzorků (M_0), poté byla umístěna do nádoby na 2 podložky, aby došlo k minimalizaci styčné plochy. Do nádoby byla nalita deionizovaná voda tak, aby byla tělesa úplně ponořena a hladina vody dosahovala 2 cm nad ponořená tělesa. Zkušební tělesa byla vážena po (1 +/- 0,25) h, (8 +/- 0,5) h, (24 +/- 1) h, (48 +/- 1) h a (72 +/- 1) h. Při každém vážení byla tělesa vyjmuta z vody, otřena vlhkou látkou a vážena na vzduchu. Proces vážení byl opakován, dokud změny v hmotnosti těles nebyly menší než 0,1 % a byla stanovena hmotnost vodou nasáklých těles (M_t). Po posledním vážení byla tělesa zvážena na hydrostatických vahách a byla stanovena jejich zdánlivá hmotnost (M_a).

Objemová hmotnost M_v se vypočítá:

$$M_v = \frac{M_0 \times \rho_{H_2O}}{(M_t - M_a)} \quad (2),$$

kde

M_0 ... hmotnost zkušební tělesa po vysušení váženého na vzduchu (kg),

M_t ... hmotnost zkušební tělesa nasáklého vodou, otřeného vlhkou utěrkou a váženého na vzduchu (kg),

M_a ... hmotnost zkušební tělesa nasáklého vodou a váženého ve vodě (kg),

ρ_{H_2O} ... hustota vody při měřicí teplotě (kg/m³).

Nasákavost C v procentech se vypočítá:

$$C = \frac{100 \times (M_t - M_0)}{M_0} \quad (3)$$

13.3.6 Vyhodnocení zkoušek

Tab. 13.2: Výsledky stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti [zdroj: autor].

Vzorek	Čas (h)	$M(\text{kg})$	$C(\%)$	$M_a(\text{kg})$	$M_v(\text{kg/m}^3)$
1	0	317,2	-	-	-
	1	317,3	0,03	-	-
	8	317,2	0	-	-
	24	317,2	0	-	-
	48	317,2	0	-	-
	72	317,3	0,03	152,1	1920
2	0	315,8	-	-	-
	1	315,8	0	-	-
	8	315,8	0	-	-
	24	315,8	0	-	-
	48	315,9	0,03	-	-
	72	315,8	0	150,5	1910
3	0	319,1	-	-	-
	1	319,1	0	-	-
	8	319,1	0	-	-
	24	319	0	-	-
	48	319,1	0	-	-
	72	319,1	0	153,8	1930
Průměr			0		1920

Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 13.2. Z výsledků vyplývá objemová hmotnost, která má průměrnou hodnotu 1920 kg/m^3 a nasákavost, kde některé naměřené hodnoty byly pravděpodobně ovlivněny chybou vážení, proto lze konstatovat, že testované vzorky nejsou nasákové.

13.4 Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou

13.4.1 Podstata zkoušky

Podle [24] tlaková voda se nechá působit na povrch zkušebního tělesa, které se pak rozlomí a změří se hloubka průsaku vody.

13.4.2 Zkušební zařízení

Zařízení na zkoušení průsaku vody značky BRIO, do kterého se zkušební těleso upne a tlaková voda bude působit na jeho povrch (viz obrázek 13.3).



Obr. 13.3: Vzhled zkoušky stanovení průsaku tlakovou vodou na zařízení BRIO [zdroj: autor].

13.4.3 Zkušební postup

Zkušební těleso bylo upnuto do přípravku tak, jak je zobrazeno na obrázku 13.3, poté se nechal působit vodní tlak (500 ± 50) kPa po dobu 72 h. Během zkoušení byl pravidelně sledován okolní povrch tělesa, zda nedošlo k průsaku vody.

Po ukončení předepsané doby bylo těleso vyjmuto, otřeno a rozlomeno v polovině. Na lomové ploše bylo sledováno, zda došlo k průsaku tlakové vody a do jaké hloubky.

13.4.4 Výsledek zkoušky

Výsledek zkoušky je zobrazen na obrázku 13.4. Z obrázku je patrné, že nedošlo k žádnému průsaku tlakové vody do zkušebního tělesa.



Obr. 13.4: Vzhled zkušebního tělesa po provedení stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou [zdroj: autor].

13.5 Stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek dle [17]

13.5.1 Metoda automatického cyklování

Tato zkušební metoda využívá automaticky řízené cyklické střídání kladných a záporných teplot, působících rovnoměrně na celé zkušební těleso, na jehož povrch je nalit 3% roztok NaCl.

13.5.2 Zkušební tělesa

Pro experimentální ověření byly použity upravené úlomky zkušebních těles zbylých ze zkoušky pevnosti za ohybu.

13.5.3 Zkušební postup

Zkušební tělesa byla umístěna do misek z nekorodujícího materiálu umístěných ve zkušebním prostoru. Do misky byl nalit 3% roztok NaCl tak, aby vzorek byl ponořen na výšku (5 +/- 1) mm.

Ve zkušebním zařízení byly vzorky podrobeny střídavému zmrazování na teplotu – 15 °C a rozmrazování na teplotu + 20 °C. Cyklus ochlazování zkušebního tělesa trvá 45 minut s 15 minutovou výdrží na teplotě – 15 °C. Opačný cyklus zahřívání trvá také 45 min s 15 minutovou výdrží na teplotě + 20 °C. Jeden cyklus tedy trvá 2 hodiny.

13.5.4 Vyhodnocení zkoušky

Odolnost povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek je dána hmotností odpadu na jednotku plochy ρ_A v g/m^2 .

$$\rho_A = \frac{\sum m}{A} \quad (4)$$

kde:

m ... odpad z jednotlivých cyklů (g),

A ... velikost zkušební plochy (m^2).

Tab. 13.3: Výsledky stanovení odolnosti proti vodě a CHRL [zdroj: autor]

n	a (mm)	b (mm)	m (g)	A (m^2)	ρ_A (g/m^2)
1	299,2	300,2	0,4	0,089814	4
2	298,2	299,0	0,6	0,089141	7
3	299,5	299,1	0,3	0,089551	3
Průměr					5

Po padesáti cyklech tělesa nevykazovala výraznější známky degradace a z hlediska odolnosti proti působení vody a chemických a rozmrazovacích látek je lze zařadit do stupně porušení: nenarušený – odpad v podobě jemných prachových částic do 1 mm.

13.6 Stanovení UV stability dle [18]

13.6.1 Podstata zkoušky

Xenonový oblouk s filtry je použit k simulaci rozložení relativního spektrálního ozáření denního světla v ultrafialovém (UV) rozsahu světla a viditelných rozsazích spektra.

Zkušební tělesa jsou vystavena různým hladinám světla, tepla, relativní vlhkosti a vody za řízených podmínek prostředí.

13.6.2 Zkušební zařízení

Stanovení bylo provedeno na přístroji Q-SUN XE-2, ve kterém dochází k ozařování zdrojem světla složeným z xenonových lamp, které vysílají záření ve vlnových délkách pod 270 nm v oblasti ultrafialového záření, přes viditelné spektrum až do infračerveného spektra. Pro simulaci denního světla jsou použity filtry, které odstraní krátké vlny ultrafialového záření.

13.6.3 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa s plošnými rozměry 300 x 300 mm byla upravena pro tuto zkoušku dle ČSN EN ISO 4892-1. Pro stanovení byly použity 3 vzorky hnědé barvy bez přidaného pigmentu vyrobené dle receptury v tabulce 11.5 a 3 vzorky červené barvy s přidaným pigmentem Fe_2O_3 vyrobené dle receptury v tabulce 11.6. Celkem bylo z každé receptury vyrobeno 6 ks vzorků, kdy další 3 vzorky byly uchovány ve tmě, aby bylo možné srovnat barevnou změnu a povrchovou degradaci zkušebních vzorků.

13.6.4 Zkušební postup

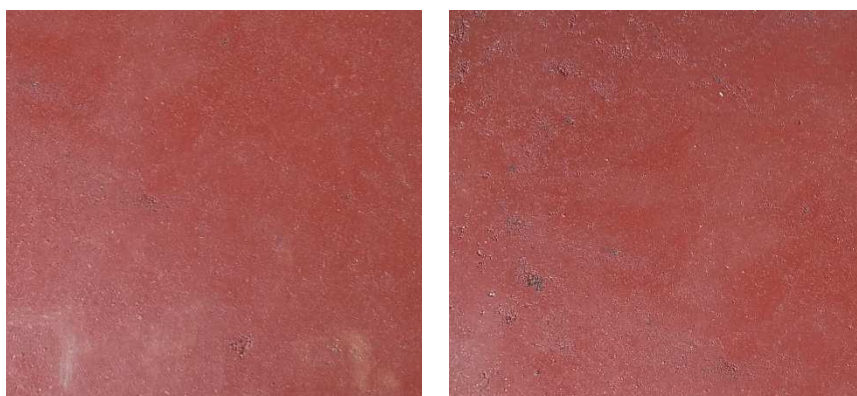
Zkušební tělesa byla upevněna do držáků v přístroji tak, aby nebyla vystavena vnějšímu zatížení. Byly nastaveny okrajové podmínky vystavení záření – suchý cyklus, okolní teplota 65 °C, intenzita záření 0,47 W/m², délka expozice 8000 hodin.

13.6.5 Vyhodnocení zkoušky

Zkouška byla vyhodnocena porovnáním povrchů a barevných odstínů vzorků vystavených záření a vzorků uchovaných ve tmě.



Obr. 13.5: Vzhled povrchu hnědého vzorku uchovaného ve tmě (vlevo) a vystavenému záření (vpravo) [zdroj: autor].



Obr. 13.6: Vzhled povrchu červeného vzorku uchovaného ve tmě (vlevo) a vystavenému záření (vpravo) [zdroj: autor].

Z obrázku 13.5 je patrné, že u vzorku bez přídavku barevného pigmentu došlo po expozici k barevné změně – vyblednutí hnědé barvy. U testovaného vzorku nedošlo k degradaci povrchu. Z obrázku 13.6 je patrné, že u vzorku s přídavkem barevného pigmentu nedošlo po expozici k žádným barevným ani povrchovým změnám. Tímto testem byl potvrzen předpoklad, že barevný pigment na bázi Fe_2O_3 odráží sluneční záření a nepropustí jej do struktury materiálu, proto je možné testovanou směs použít i v místech, kde je vystavena slunečnímu záření.

13.7 Mrazuvzdornost dle [19]

13.7.1 Podstata zkoušky

Podstatou této zkušební metody je stanovení poměru mezi pevností za ohybu zkušebních těles po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech a zkušebních těles, které nebyly vystaveny zmrazovacím cyklům. Jeden zmrazovací a rozmrazovací cyklus sestává ze zmrazovací části, kdy se zkušební těleso nasáklé vodou vloží do mrazicího boxu o teplotě $(-20 \pm 5)^\circ\text{C}$, a rozmrazovací části, kdy se zmrazené zkušební těleso ponoří do vody o teplotě $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$.

13.7.2 Postup zkoušky

- 1) Nasycení vodou – zkušební tělesa pro zmrazovací a rozmrazovací cykly se úplně ponoří do vody o teplotě $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ do dosažení ustálené hmotnosti, tj. rozdílu $<0,1$ hmotnostních % při následném vážení během 24 h.
- 2) Zmrazovací a rozmrazovací cykly - vodou nasáklá zkušební tělesa se umístí do mrazicího boxu. Zkušební tělesa by se měla v mrazicím boxu položit na drátěnou podložku tak, aby se nedotýkala vzájemně ani stěn mrazicího boxu. Po dosažení teploty $(-20 \pm 5)^\circ\text{C}$ se zkušební tělesa musí ponechat v mrazicím boxu po dobu nejméně 4 h. Poté se zmrazená zkušební tělesa vyjmou a ponoří do vody o teplotě $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$. Po dosažení této teploty se zkušební tělesa musí nechat ponořená po dobu nejméně 2 h. Vykoná se 25 těchto zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Po ukončení posledního cyklu se zkušební tělesa vyjmou z vody.
- 3) Stanovení pevnosti za ohybu – po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech se na zkušebních tělesech provede zkouška pevnosti za ohybu dle (15).

- 4) Výsledky se vyjádří jako poměr pevnosti za ohybu po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech a pevnosti za ohybu referenčních těles.

13.7.3 Vyhodnocení zkoušky

Vzhledem k výsledkům nasákavosti, uvedených v kapitole 13.3, není nutné provádět stanovení mrazuvzdornosti. Z postupu u zkoušky mrazuvzdornosti uvedeném v kapitole 13.7.2 vyplývá, že podstatou zkoušky je cyklické zmrazování a rozmrazování vzorků nasáklých vodou. U vzorků s pojivem na bázi odpadních termoplastů bylo prokázáno, že nejsou nasákavé. Protokol o měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech používaného kameniva se nachází v příloze č. 1.

13.8 Obsah radionuklidů

Stanovení obsahu přírodních radionuklidů přímo na vyvíjeném kompozitu nebylo nutné, jelikož se jedná o směs polymerů, které přírodní radionuklidy neobsahují a kameniva, u kterého byl obsah přírodních radionuklidů již stanoven (viz příloha č. 1).

13.9 Stanovení součinitele tepelné vodivosti λ

Na třech vzorcích plošné dlažby byl stanoven součinitel tepelné vodivosti λ . Výsledky stanovení jsou uvedeny v tabulce 13.4. Součinitel tepelné vodivosti λ byl stanoven metodou topného drátu pomocí přístroje Shotherm QTM.

Tabulka 13.4: Výsledky měření součinitele tepelné vodivosti λ [zdroj: autor].

n	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	$\Phi \lambda$ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
1	1,1522	1,150
	1,1482	
	1,1482	
2	1,2231	1,221
	1,2184	
	1,2218	
3	1,2825	1,281
	1,2859	
	1,2746	
Průměr		1,217

Na zkoušených vzorcích byl stanoven součinitel tepelné vodivosti s průměrnou hodnotou $\lambda = 1,217 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, což je zhruba o $0,1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ nižší než u prostého betonu.

13.10 Stanovení obrušnosti metodou podle Böhma dle [20]

13.10.1 Podstata zkoušky

Čtvercové desky nebo krychle se umístí do zkušebního zařízení pro měření odolnosti proti obruš metodou Böhme, na brusnou dráhu se nasype normalizované brusivo. Brusný kotouč se otáčí a zkušební vzorky jsou vystavené obruš pro daný počet cyklů při zatížení $(294 \pm 3) \text{ N}$.

13.10.2 Příprava vzorku

Zkušební vzorek byl upraven na rozměry $(71 \pm 1,5) \text{ mm}$. Styčné plochy vzorku byly upraveny.

Před zkoušením byla zjištěna hustota vzorků ρ_R měřením s přesností na $0,1 \text{ mm}$ a vážením s přesností na $0,1 \text{ g}$.

13.10.3 Postup zkoušky

Před zkouškou a po každých 4 cyklech bylo těleso zváženo s přesností na $0,1 \text{ g}$.

Na brusnou dráhu bylo vsypáno 20 g brusiva a těleso bylo upevněno do upínacího zařízení styčnou plochou k brusné dráze, těleso bylo zatíženo uprostřed silou $(294 \pm 3) \text{ N}$.

Brusný kotouč byl uveden do chodu a brusivo bylo rovnoměrně rozloženo na brusné dráze.

Zkušební vzorek byl zkoušen v 16 cyklech o 22 otáčkách.

Po každém cyklu byl očištěn brusný kotouč a styčná plocha vzorku. Těleso bylo postupně otáčeno o 90° a na brusnou dráhu bylo vsypáváno nové brusivo.

13.10.4 Výpočet výsledků

Výpočet ztráty obrusem po 16 cyklech byl stanoven jako zmenšení objemu zkušebního tělesa ΔV dle vztahu:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_R}$$

kde:

ΔV ... zmenšení objemu po 16 cyklech v mm^3 ;

Δm ... ztráta hmotnosti po 16 cyklech v gramech;

ρ_R ... hustota vzorku v g/mm^3 .

Tabulka 13.5: Vyhodnocení stanovení obrusnosti. [zdroj: autor]

Vzorek	$l_0^{1,2,3,4}$ [mm]	$b_0^{1,2,3,4}$ [mm]	$h_0^{1,2,3,4}$ [mm]	$h_{16}^{1,2,3,4}$ [mm]		$m_{0,4,8,12}$ [g]	m_{16} [g]	ρ_R [g/mm ³]	Δm [g]	ΔV [mm ³]
1	71,3	71,9	38,2	36,8	m_0	399,1	365,1	0,002038	34	16683
	71,8	70,9	38,9	37,1	m_4	371,8				
	71,7	71,1	38,1	37,3	m_8	369,5				
	71,7	71,9	38,2	36,7	m_{12}	368,3				
2	71,4	71,7	40,1	35,4	m_0	367,8	354	0,001792	13,8	7702,454
	71,7	71,5	39,5	37,2	m_4	363,1				
	71,1	71,3	38,1	37,2	m_8	359,3				
	71,3	71,7	39,4	36,3	m_{12}	354,9				
3	70,8	71,6	38,2	35,8	m_0	369	339,3	0,001906	29,7	15586
	70,4	71,7	37,9	35,5	m_4	350,6				
	70,2	71,6	35,2	34,6	m_8	348,4				
	70,1	71,7	37,7	33,8	m_{12}	3473,1				
Průměr										16000

13.10.5 Vyhodnocení

Naměřené hodnoty vzorku č. 2 nelze použít vzhledem k nedodržení rovinnosti styčných ploch vzorku. U dalších vzorků byly naměřeny hodnoty, jejichž průměr je $16\,000\text{ mm}^3/5\,000\text{ mm}^2$ odpadu, z čehož vyplývá zatřídění měřených vzorků dle [20] tabulky 4 do třídy 4 označení I, kde musí být naměřená hodnota $\leq 18\,000\text{ mm}^3/5\,000\text{ mm}^2$.

13.11 Stanovení hodnoty odolnosti proti skluzu na nevyleštěném vzorku (USRV) dle [21]

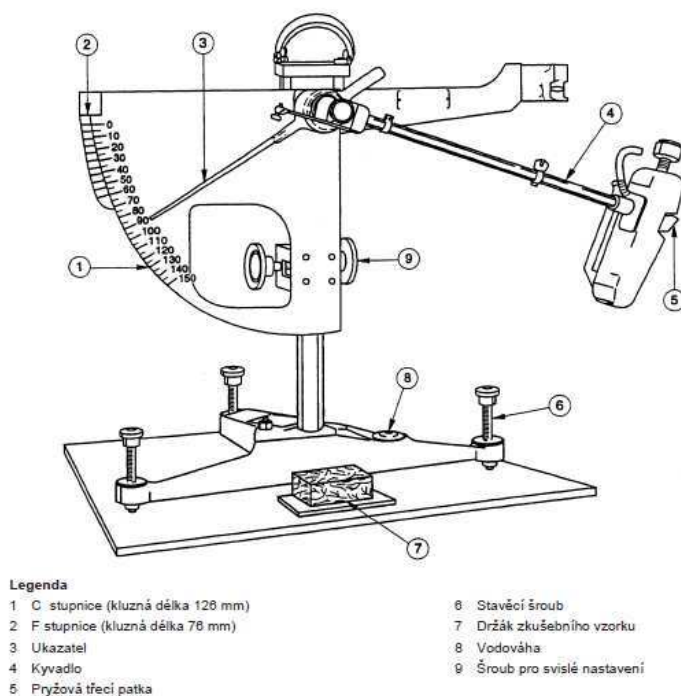
13.11.1 Podstata zkoušky

Měření USRV na vzorku se dělá s použitím zkušebního zařízení s třecím kyvadlem k vyhodnocení protiskluzových vlastností horního líce vzorku.

Zkušební zařízení s třecím kyvadlem zahrnuje kluznou třecí patku s pružinou, zhotovenou z normované pryže, připevněnou na konci kyvadla. Při kývání kyvadla se měří třecí síla mezi třecí patkou a zkušebním povrchem zmenšením délky výkyvu s použitím kalibrované stupnice.

13.11.2 Přístroj

Zkušební zařízení s třecím kyvadlem je zhotoveno dle obrázku 13.7.



Obr. 13.7: Vzhled zkušebního zařízení s třecím kyvadlem [21].

13.11.3 Postup zkoušky

Zkušební zařízení pro zkoušku bylo uloženo v místnosti při teplotě $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ nejméně 30 minut před zahájením zkoušky.

Vzorek byl na 30 minut před zkoušením ponořen do vody o teplotě $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Zkušební vzorek byl upevněn svým delším rozměrem tak, aby ležel v dráze kyvadla a byl dostředěn k třecí patce a k ose závěsu kyvadla. Třecí dráha patky byla rovnoběžná s podélnou osou vzorku po celé třecí délce.

Byla seřízena výška ramene kyvadla tak, aby při přejíždění byla pryžová třecí patka ve styku se vzorkem po celé šířce třecí patky a po stanovené třecí délce. Povrch vzorku a třecí patky byl navlhčen.

Kyvadlo a ukazatel byly uvolněny z vodorovné polohy a rameno kyvadla bylo zachyceno na jeho zpětném kmitu. Tato operace byla provedena pětikrát, byl zaznamenán průměr z posledních tří čtení. Vzorek byl otočen o 180° a postup se opakoval.

13.11.4 Výsledky zkoušky

Byla použita široká třecí patka na třecí délce 126 mm, proto byla vypočtena kyvadlová hodnota každého vzorku jako průměr ze dvou zaznamenaných středních hodnot měřených v opačných směrech se zaokrouhlením na 1 jednotku C stupnice.

Tabulka 13.6: Vyhodnocení zkoušky USRV. [zdroj: autor]

Vzorek		1	2	3	4	5	Střední hodnota	USRV
1	Kmity směr 0°	47	47	46	46	46	46	43
	Kmity směr 180°	43	41	40	40	40	40	
2	Kmity směr 0°	46	46	46	46	46	46	47
	Kmity směr 180°	48	47	47	48	48	48	
3	Kmity směr 0°	42	40	40	40	40	40	40,5
	Kmity směr 180°	42	42	41	41	41	41	
Průměr								44

Byla stanovena odolnost proti smyku, která je reprezentována průměrnou hodnotou USRV 44, která vyhovuje dle požadavku na dlažební prvky z umělého kamene dle ČSN 73 6131, Tabulka 8, kde je požadováno, aby hodnota USRV byla větší nebo rovna 35.

14 OPTIMALIZACE ZAVÁŽECÍHO MECHANISMU LISU

Zavážecí stůl popsaný v kapitole 9.1.5 byl vyhodnocen jako nedostatečný vzhledem k vychládání směsi při přepravě do lisovacího zařízení. Z materiálového hlediska je nutné zajistit přepravu materiálu tak, aby nedocházelo k jeho ochlazení a tuhnutí. Z tohoto důvodu byla provedena rešerše možných dopravních a míchacích systémů, které pro tuto problematiku mohou být použity.

14.1 Rešerše k problematice kontinuálního dávkování vysoce plněných materiálů s vysokou mírou abraze se zaměřením na zpracování odpadního PET a písku

Vzhledem k tuhnutí směsi uvnitř míchačky (popsané v kapitole 11.2.4) bylo navrženo, aby zařízení nesloužilo pouze k dopravě, ale aby sloužilo i k ohřevu na přesnou tavicí teplotu, tím pádem by docházelo k tavení až uvnitř tohoto zařízení a nedocházelo by k zatuhnutí směsi v rozích míchačky.

Základní informace a vstupní podmínky:

Objemová hmotnost směsi písku 78 %, plast PET 22 %

Písek – kamenivo frakce 0-4 mm, kopané, neprané, obyčejný písek, kopaným pískem se rozumí písek ostrohranný, znečištěný příměsemi hlín a jílu. Ve složení písku převládají minerály (křemen, muskovit, živce), což z hlediska Mohsovy stupnice tvrdosti odpovídá hodnotě 6-7, v případě převodu je to 70 HRC (1015 HV).

PET – podrcené částice frakce 4-10 mm, teplota tání PET recyklátu je udávána při teplotě cca 250 °C s teplem tání 140 J/g. [21] Vzhledem k tomu, že se jedná o flakesy PET z odpadu o různém původu a různé kvalitě, je zřejmé, že viskozita taveniny PET se bude měnit v čase.

Současný způsob zpracování, vyhřívaná míchačka s horizontálně umístěnými lopatkami, bez působícího vnějšího tlaku.

Výrobky – plošné dlaždice 300 x 300 x 35 mm

Úkol navrženého zařízení – dohřátí na tavící teplotu cca 260-270 °C a doprava do dávkovacího zařízení.

14.1.1 Míchání

V plastikářském průmyslu patří míchání mezi hlavní technologické postupy, související s přípravou a úpravou polymeru. Touto technologií lze homogenizovat nejen směsi tuhých látek, ale i směsi tuhých a kapalných látek. Příkladem takového postupu může být např. příprava homogenní směsi polymeru s pomocnými surovinami, jako jsou maziva, plniva, pigmenty, tepelné a světelné stabilizátory, atd. Mícháním se navíc zintenzivňuje výměna tepla a hmoty, což je s hlediska kontinuální technologického pochodu nezbytné.

Vzhledem ke složitosti hydromechanického děje s rozmanitostí technologických postupů bylo vyvinuto velké množství míchacích strojů nejrůznějších konstrukcí. Většinou jsou však tyto stroje málo univerzální a jsou schopny realizovat jen úzký okruh technologických operací.

Způsob a podmínky míchání jsou ovlivňovány jednak skupenstvím promíchávaných surovin, jednak sledem technologických operací. Podmínky, při kterých je směs připravována, jsou posuzovány především podle teploty. Některé suroviny, jakými jsou například základní polymer, pigmenty a změkčovadla, se mohou smíchat jak za normální teploty, tak i za teploty zvýšené (50 až 60°C), čímž se doba potřebného míchání směsi snižuje. Má-li dojít v průběhu směřování i k částečné želatinaci polymerů, pak se míchací proces uskutečňuje při teplotách 130 až 150°C. Takto připravované směsi se mohou ihned dále zpracovávat např. na ohřívacím a míchacím dvouválci. Teoreticky je možno míchací proces suchých a viskózních hmot uskutečňovat na libovolných míchacích strojích. Je však věcí ekonomické úvahy a požadovaných homogenizačních účinků, zda je ten či onen míchací stroj vhodný. Z tohoto důvodu je třeba výběru míchacího stroje věnovat nemalou pozornost.

Podle druhu zpracovávaného materiálu se míchací stroje dělí na:

- Míchací stroje pro přípravu sypkých materiálů,
- Míchací stroje pro přípravu nízko-viskózních kapalných směsí,
- Míchací stroje pro přípravu past,
- Míchací stroje pro přípravu vysoce-viskózních těstovitých směsí.

Na přípravu sypkých směsí jsou v plastikářské technologii používány míchací stroje: bubnové, ramenové (s míchadly pásovými), kuželové, fluidní, planetové.

Pro přípravu kapalných, nízko-viskózních směsí se používají nejrůznější typy míchacích strojů s míchadly: lopatkovými, vrtulovými, turbinovými, šnekovými.

K přípravě past se často používají stroje: ramenové, planetové, turbinové.

K homogenizaci vysoce-viskózních těstovitých materiálů, za současné plastikace či želatinace, se používá: tlakových hnětičů, rychloběžných míchacích strojů, šnekových strojů normální a speciální konstrukce. [21]

Dále v textu budou blíže představeny míchací stroje pro sypké materiály a vysoce-viskózní směsi.

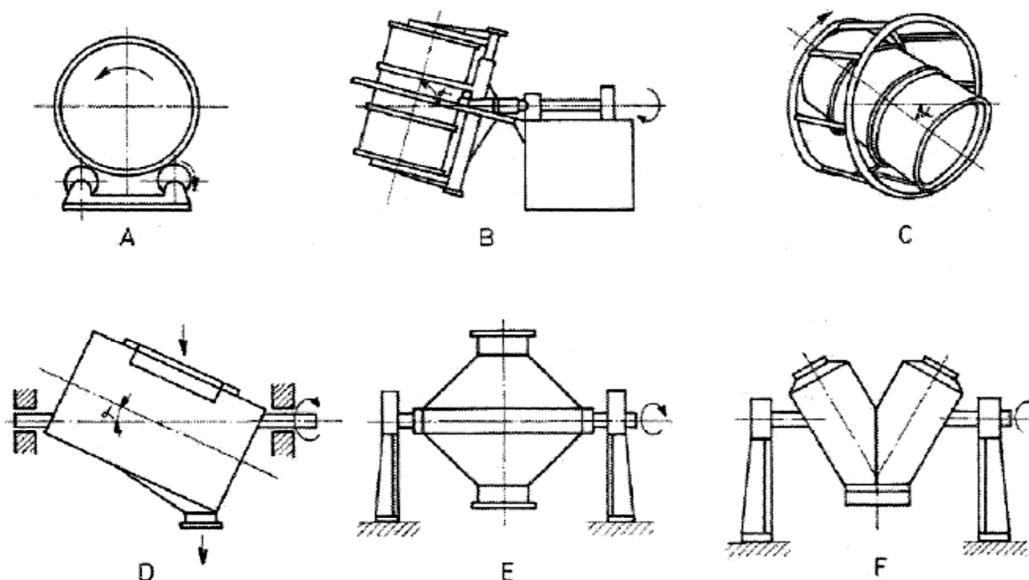
14.1.2 Míchací stroje pro sypké materiály

Mísení zrnitých látek je zvláštním případem míchání. Od míchání v kapalném prostředí se odlišuje výrazně rozdílnými vlastnostmi směřovaných komponentů a výsledných směsí. Zrnité látky mohou být konglomerátem několika chemických látek. Z tohoto důvodu obvykle bývá za složku směsí považován soubor částic, které mají při dynamických operacích stejné chování. K jejich charakteristice patří rozměry, tvar, kvalita povrchu a hmotnost částic. Za homogenní je považována taková zrnitá směs, kde jsou částice různého chování rovnoměrně rozděleny v celkovém objemu směsi.[22]

14.1.2.1 Bubnové mísiče

Bubnové mísiče slouží k míchání kapalin a sypkých látek, např. pro suché barvení, přípravu suchých směsí (dry blend) apod. Míchacího účinku se zde dosáhne pohybem míchací nádoby a uplatněním tíhových sil. Nejjednoduššími typy bubnových míchaček jsou sudy zčásti naplněné míchaným materiálem, které se otáčejí kolem vlastní osy nebo kolem osy, která je různoběžná k ní a skloněná pod úhlem α . Na míchaný materiál v bubnových míchačkách působí jen nepatrné smykové síly. Proto se tímto způsobem obtížně míchají materiály, které mají sklon k tvorbě hrudek (vlhkost, statický náboj). Také se v nich obtížně připravují viskózní roztoky. Intenzita míchání se zvyšuje vnitřní vestavbou, nebo se zabudovává míchadlo. Vestavbu zpravidla tvoří příčky a žebra, která usměrňují tok materiálu při pohybu bubnu.

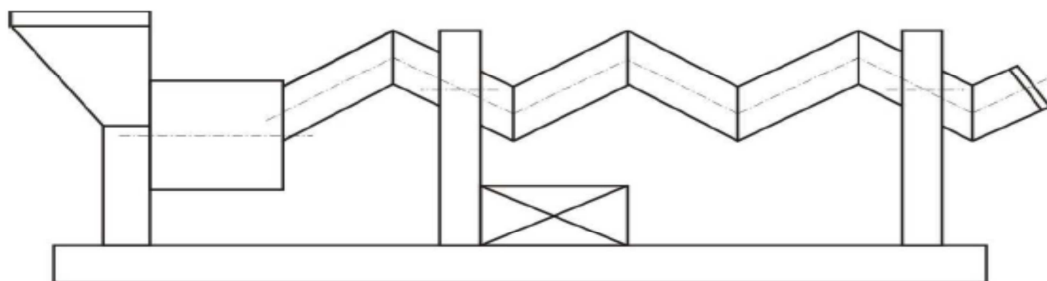
Bubny se zaplňují asi z 1/4 až 1/3 celkového jejich objemu. Pohyb materiálu je v podstatě určován silami tíhovými a odstředivými. Buben se vyprazdňuje prostým sklopením a otočením vyprazdňovacího otvoru. Na obr. 14.1 jsou vyobrazeny typy bubnových mísičů.



Obr. 14.1: Typy bubnových mísičů – A a C míchání v sudu; D šikmý válec; E dvoukužel; F dvouválec. [23]

Také lze upravovat tvar nádoby. U mísičů s upraveným tvarem lze získat kvalitnější produkt (s vyšším stupněm homogenity) než u jednoduchých bubnových mísičů. Dráha jednotlivých částic materiálu v průběhu přesypávání je složitější vlivem tvaru těchto zařízení, takže je mísení účinnější. [23]

Tyto typy mísičů mohou pracovat i kontinuálně, příkladem může být kontinuální mísič typu V viz obr. 14.2.



Obr. 14.2: Schéma kontinuálního mísiče typu V. [23]

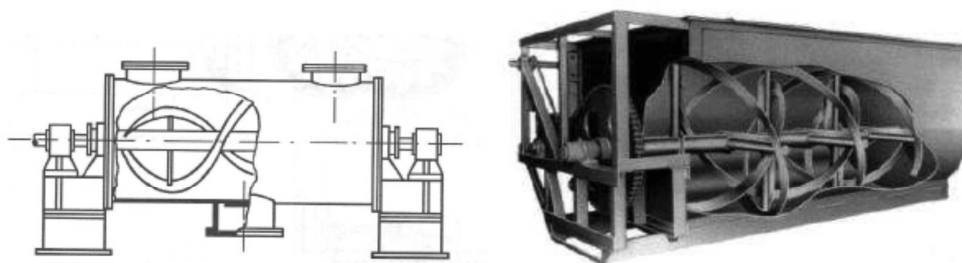
14.1.2.2 Mísiče s pevnou komorou

U zařízení tohoto typu je samotný mísič nehybný a vsádka se uvádí do pohybu zvláštním mísicím ústrojím. Konstrukční uspořádání jsou různá, jak pokud jde o tvar

mísičů, tak pokud jde o způsob mísení. Konkrétní typ zařízení se musí volit podle druhu a vlastností míseného materiálu tak, aby účinnost mísení byla co největší. [23]

14.1.2.3 Pásové mísiče

Pásové mísiče (obr. 14.4) se mohou užívat pro mísení materiálů v širokém rozmezí vlastností – od nesoudržných zrněk s velkou mezerovitostí, až po vláknité substance a husté pasty. Není však vhodný pro mísení lepivých materiálů. Podle charakteru mísených materiálů se používané mísiče mohou lišit šířkou pásu, vzdáleností pásu od povrchu mísicího bubnu, počtem závitů, frekvencí otáčení, způsobem plnění a vyprazdňování atd. Hodí se pro periodický i kontinuální provoz.[23]

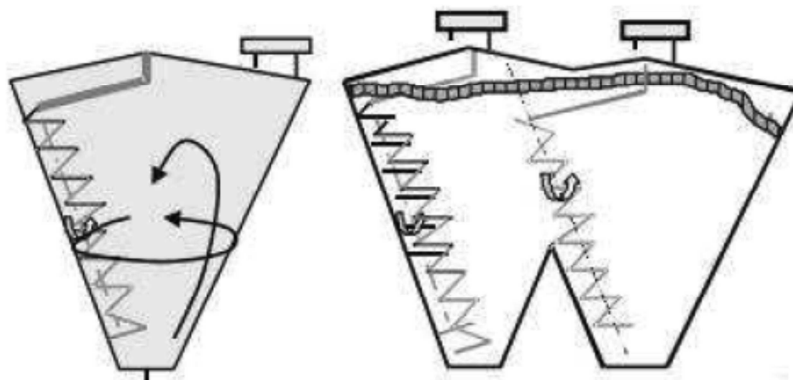


Obr. 14.4: Vzhled mísiče s pásovými míchadly. [23]

14.1.2.4 Planetové mísiče

Planetové mísiče (zobrazené na obrázku 14.5) mají hřídel mísicího šneku uloženou excentricky vzhledem k svislé ose kuželové komory. Šnek tedy koná dvojí rotační pohyb – otáčí se kolem vlastní osy a současně kolem svislé osy mísiče. Planetové mísiče se hodí pro sypké materiály s malou soudržností i kapané látky.

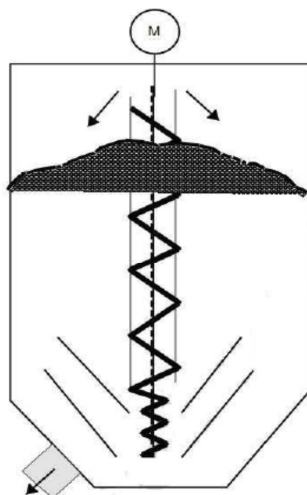
Materiál je zároveň mísen lokálně a přesouván podél stěny kuželové komory. Je vynášen šnekem směrem ke hladině vsádky a potom se přesypává dolů ve směru osy mísiče. Tento složitý pohyb částic zabezpečuje dobré promísení vsádky.[23]



Obr. 14.5: Vzhled planetového mísiče.[23]

14.1.2.5 Mísiče se zdvihacím šnekem

Tyto mísiče (obr. 14.6) se skládají ze dvou soustředných válcových nádob se šnekem umístěným ve svislé ose. Šnek unáší materiál vzhůru podél osy nádoby, načež se přesypává a klesá do prostoru mezi oběma válci a klesá dolů. Tato zařízení mají objem řádově několika krychlových metrů, se někdy používají při skladování materiálů vyznačujících se sklonem ke spékání, takže je třeba udržovat vsádku ve stálém pohybu.

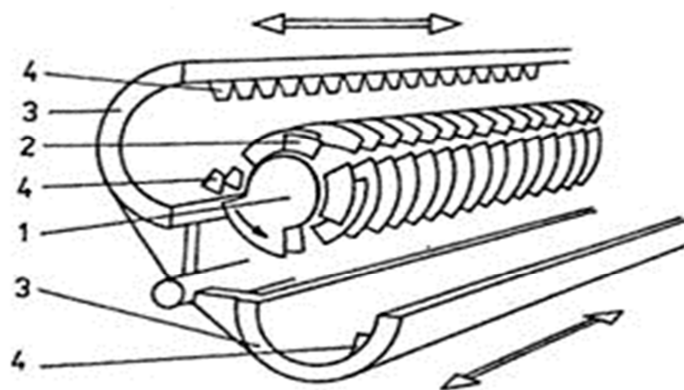


Obr. 14.6: Vzhled mísiče se zdvihacím šnekem. [23]

14.1.2.6 Kontinuální hnětič

Kontinuální hnětiče výsledkem zvětšování hnětacího účinku jednošnekových vytlačovacích strojů. Jedná se o šnekový vytlačovací stroj s mezerami v závitě šneku, do kterých zasahují v řadách uspořádané hnětací zuby, upevněné na vnitřní straně pouzdra. Během provozu vykonává otáčející se šnek v axiálním směru oscilační pohyb takového druhu, že mezery v závitě těsně míjejí hnětací zuby pouzdra. Šneky mají otáčky 100 až 120 min⁻¹ a jsou poměrně krátké.

Ve strojích tohoto typu lze zpracovávat většinu termoplastů a jsou v nich zpracovávány i reaktoplasty, v základním provedení slouží k zásobování kalandrů. Jejich nedostatek, tj. pulsace vytlačovaného materiálu, je řešen při granulaci tím, že je kolmo na kontinuální-hnětač zařazen šnekový vytlačovací stroj s krátkým šnekem, který tuto pulsaci vyrovná.[23]



Obr. 14.7: Vzhled kontinuálního hnětače, kontinuální hnětač - 1 – šnek, 2 – přerušovaná šroubovice šneku, 3 – dělené pouzdro, 4 – zuby v pouzdru. [23]

14.1.3 Opatření funkčních částí míchacího zařízení

V případě zpracování písku se jedná o vysoce abrazivní částice, které budou opotřebovávat funkční části míchacího zařízení, proto je nutné zvolit míchací zařízení tak, aby docházelo k minimálnímu opotřebení.

Vzhledem k výše uvedenému byla zvolena kombinace zařízení typu KO hnětač a šnekový extrudér (dále jen „extrudér“). Mezi válcem a šnekem extrudéru je určitá minimální mezera, kde mohou ulpívat částice písku a odírat válec. Určitý tlak v extrudéru bude vždy, ale je možno jej minimalizovat nepřipojením žádné vytlačovací hlavy a vytlačovat taveninu kompozitu volným tokem ven. Z hlediska opotřebení bude vhodné se vyhnout použití komponent, které jsou náchylné na zničení abrazivním materiálem, tj. zubová čerpadla a pístové mechanismy.

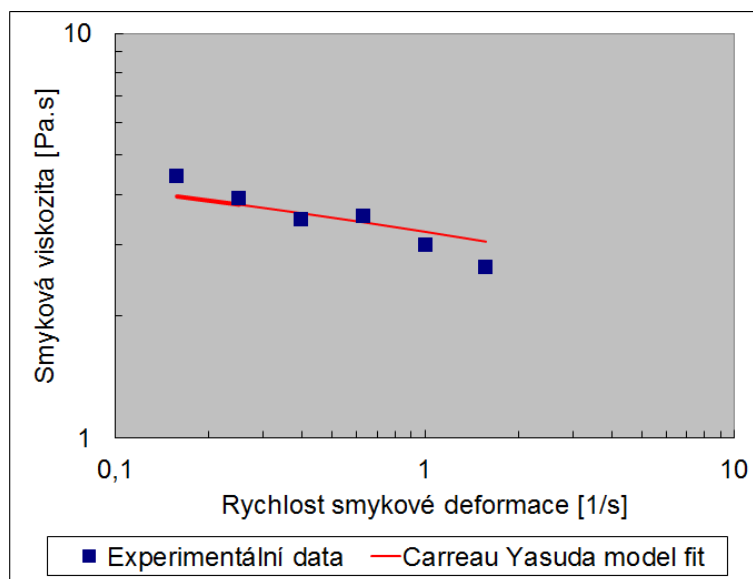
14.2 Řešení

Ve stávající míchačce bude docházet k přehřevu a homogenizaci směsi, která bude dále dopravována a tavena pomocí jednošnekového vytlačovacího stroje. Cílem tavicího procesu vytlačovacího stroje je, aby pracoval kontinuálně, proto bude vhodným řešením kontinuální vytlačování do temperované komory, kde bude skladována tavenina před dávkováním.

15 NÁVRH JEDNOŠNEKOVÉHO VYTLAČOVACÍHO STROJE Z MATERIÁLOVÉ HLEDISKA

Pro účely modelování v programu ANSYS byl proveden experiment reologického chování směsi při teplotě 270 °C s cílem co nejlépe popsat chování směsi

s následným proložením získaných experimentálních dat reologickým modelem Carreau-Yasuda. Výsledek experimentu je zobrazen v grafu 15.1.



Graf 15.1: Reologické chování směsi při teplotě 270 °C [zdroj: autor].

Dále byly pro účely modelování zjištěny materiálové parametry směsi:

- Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 1,17 \text{ W/(m.K)}$,
- Měrné skupenské teplo $c = 950 \text{ J/(kg.K)}$,
- Hustota při teplotě 20 °C $\rho = 1960 \text{ kg/m}^3$.

Okrajové podmínky výpočtu:

- vstup – hmotnostní průtok 1,2 t směsi za hodinu,
- výstup – bez vytlačovací hlavy – bez působení tečných a normálových sil,
- plášť – stacionární,
- šnek – rotační pohyb s definovanými otáčkami,
- vnitřní prostor – nenulové složky rychlosti v tečném a normálovém směru – skluz směsi při kompresi.

V matematické simulaci bude uvažováno:

- disipace směsi,
- neizotermální procesní podmínky,
- newtonoské chování polymerní směsi,
- iterační numerická metoda výpočtu.

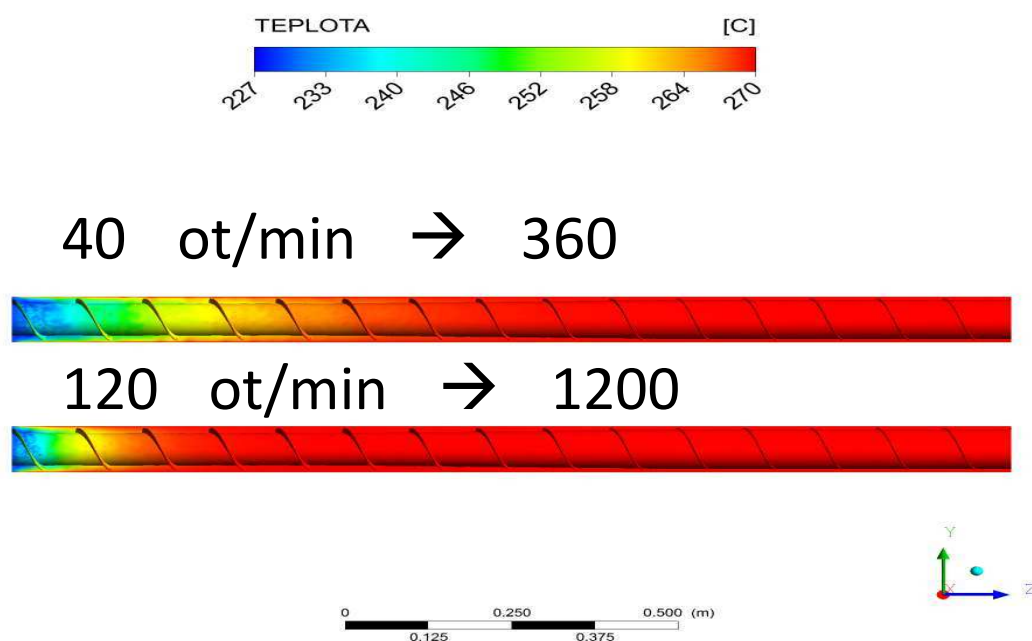
Dále byly definovány teplotní okrajové podmínky:

- vstup – teplota směsi 220 °C,
- výstup – nulový teplotní tok,
- plášť – teplota topného pásu 270 °C,
- vnitřní prostor – vedení tepla mezi pláštěm, materiálem a šnekem.

Definice numerické výpočetní metody:

- V numerickém výpočtu je využita Iterační metoda s nastaveným počtem iteračních kroků na hodnotu 30,
- Interpolace k dosažení ustálené výsledné hodnoty iterační metodou je v případě rychlosti a teploty lineární, v případě tlaku konstantní, v případě viskozity Newtonova (metoda tečen),
- Evoluční metoda – divergence v případě materiálového parametru Indexu nenewtonského chování.

15.1 Výsledky simulace



Obr. 15.1: Grafické výsledky návrhu č. 1 a č. 2 [zdroj: autor].

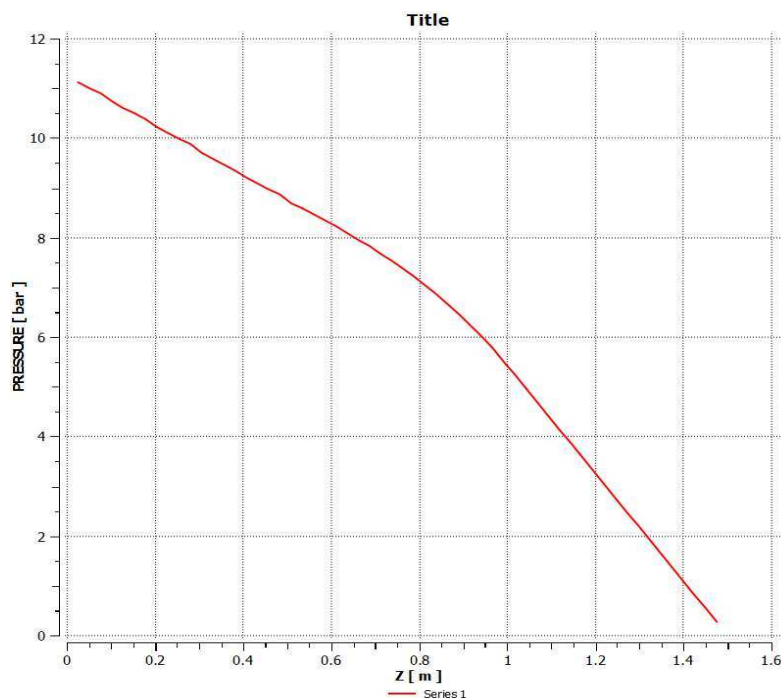
Tabulka 15.1: Výsledky návrhu č. 1. [zdroj: autor]

Průměr šneku	0,07 m
Délka šneku	1,5 m
Otáčku šneku	40 ot/min

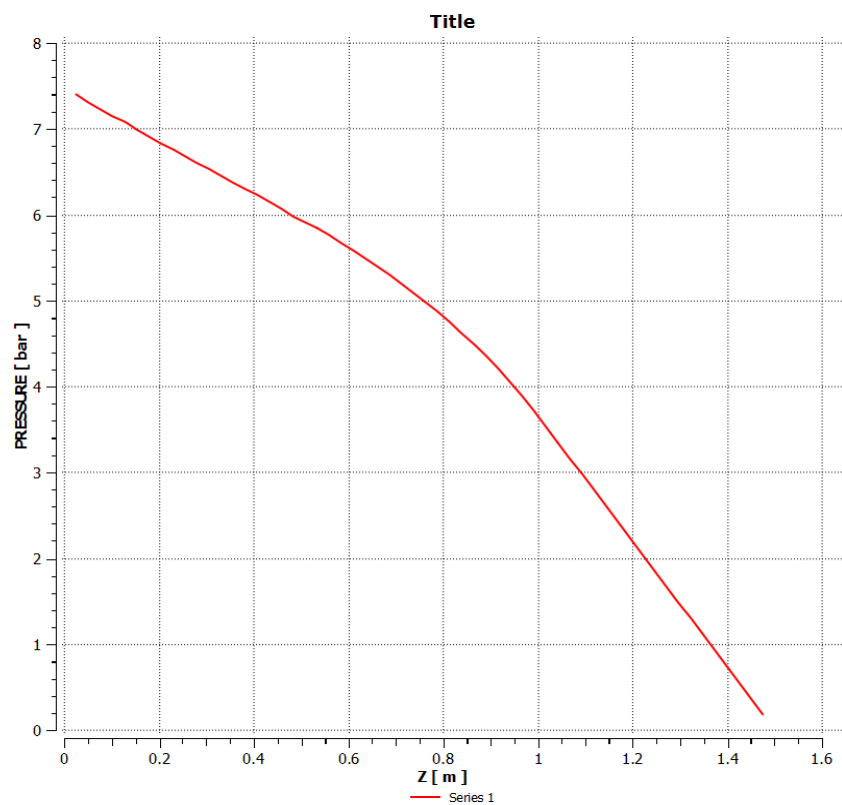
Tabulka 15.2: Výsledky návrhu č. 2. [zdroj: autor]

Průměr šneku	0,07 m
Délka šneku	1,5 m
Otáčky šneku	120 ot/min

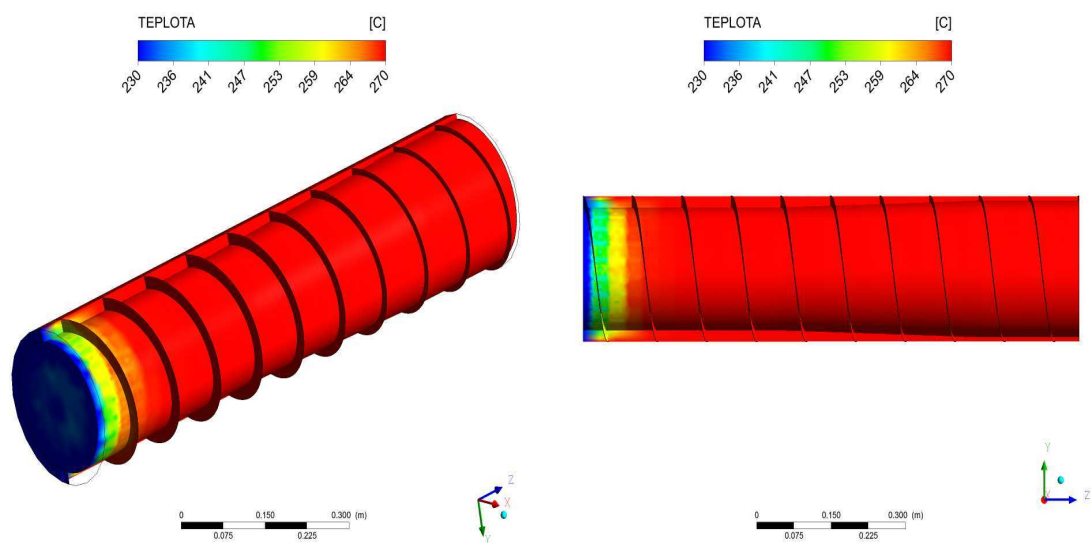
V rámci první simulace byly zjištěny výsledky uvedené na obrázku 15.1 a v tabulkách 15.1 a 15.2. Z návrhů vyplývá, že je možné využít návrh č. 2, který zajišťuje požadovaný hodinový výkon vytlačovacího stroje. Nevýhodou tohoto návrhu jsou vysoké otáčky šneku (120 ot/min), což může způsobovat problémy při zpracování tak velkého objemu materiálu v krátkém čase. Z grafů 15.2 a 15.3 vyplývá menší tlakové zatížení jednošnekového vytlačovacího stroje při použití návrhu č. 2, což je výhodné z hlediska opotřebování funkčních částí stroje, které bude způsobeno vysokou abrazí použitého plniva.



Graf 15.2: Průběh tlaku po délce vytlačovacího stroje návrhu č. 1 [zdroj: autor].



Graf 15.3: Průběh tlaku po délce vytlačovacího stroje návrhu č. 2 [zdroj: autor].

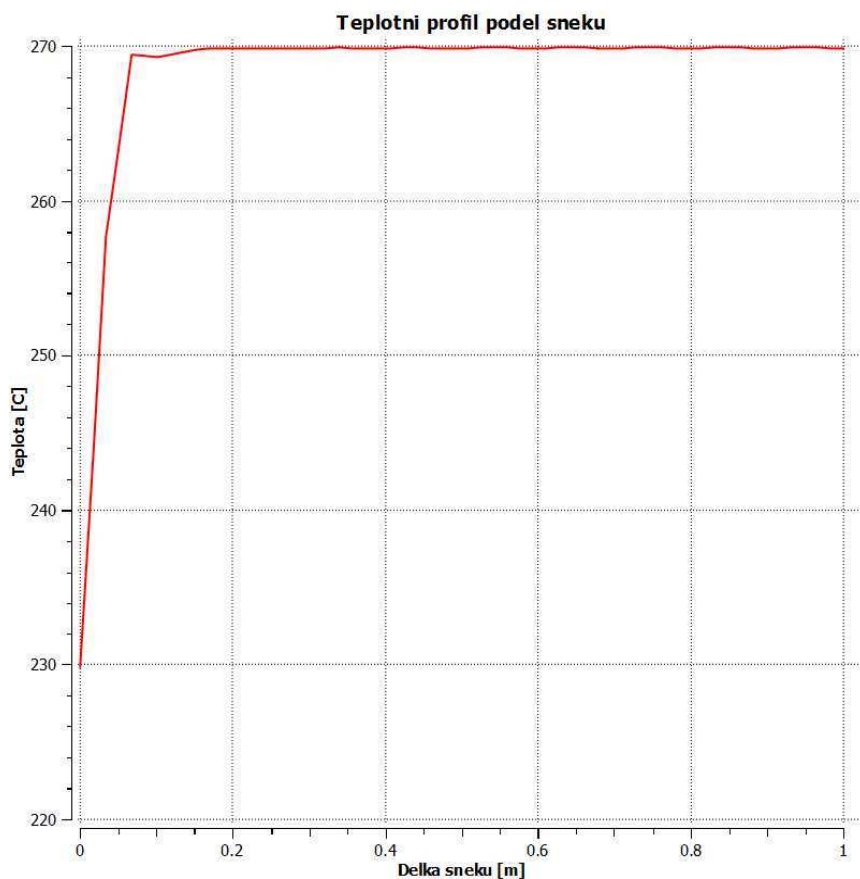


Obr. 15.2: Grafické výsledky návrhu č. 3 [zdroj: autor].

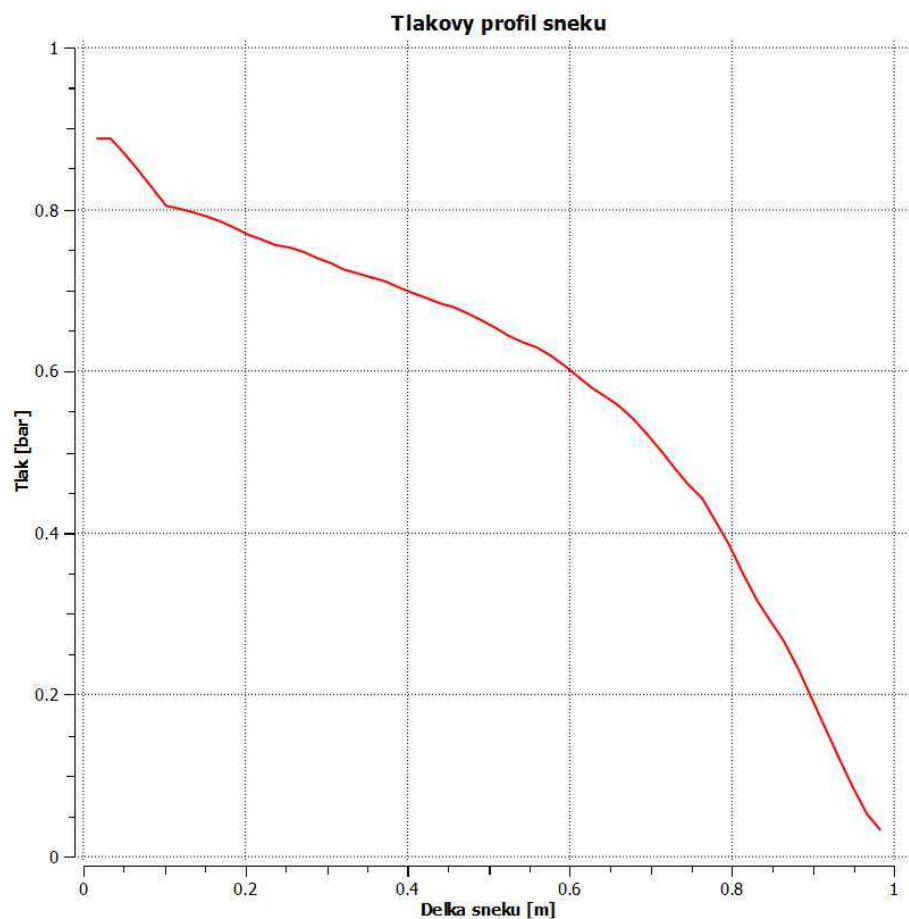
Tabulka 15.3: Výsledky návrhu č. 3. [zdroj: autor]

Průměr šneku	0,25 m
Délka šneku	1,0 m
Otáčku šneku	50 ot/min

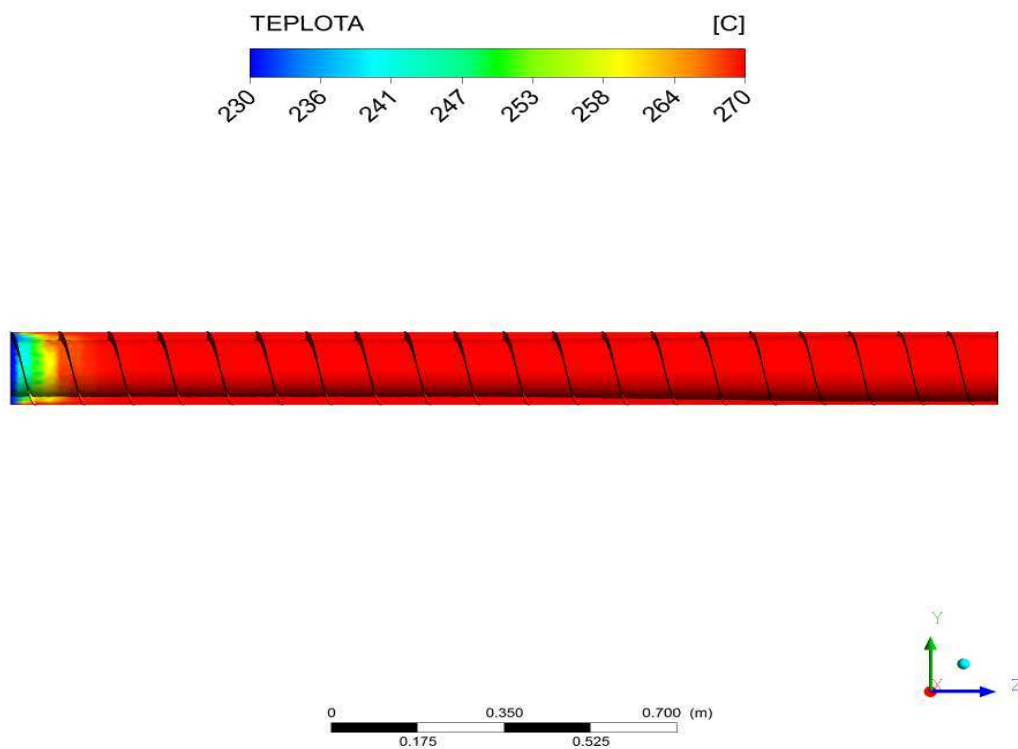
V rámci druhé simulaci byl zjištěn výsledek uvedený na obrázku 15.2 a v tabulce 15.3. Z návrhu vyplývá, že byla zmenšena délka šneku a byl výrazně zvětšen jeho průměr. Otáčky šneku byly při zachování výkonu 1,2 t/h zmenšeny na 50 ot/min, což je výhodné vzhledem ke zpracování velkého objemu materiálu. Z grafu 15.4 vyplývá teplotní průběh podél šneku, který je potřebný, aby byl procházející materiál roztaven při správné teplotě. Z grafu 15.5 vyplývá, že díky zvětšení průměru šneku bylo výrazně sníženo tlakové zatížení působící na vytlačovací stroj, což je výhodné vzhledem k menšímu opotřebování jeho funkčních částí způsobeného abrazí použitého plniva.



Graf 15.4: Teplotní průběh po délce vytlačovacího stroje návrhu č. 3 [zdroj: autor].



Graf 15.5: Průběh tlaku po délce vytlačovacího stroje návrhu č. 3 [zdroj: autor].

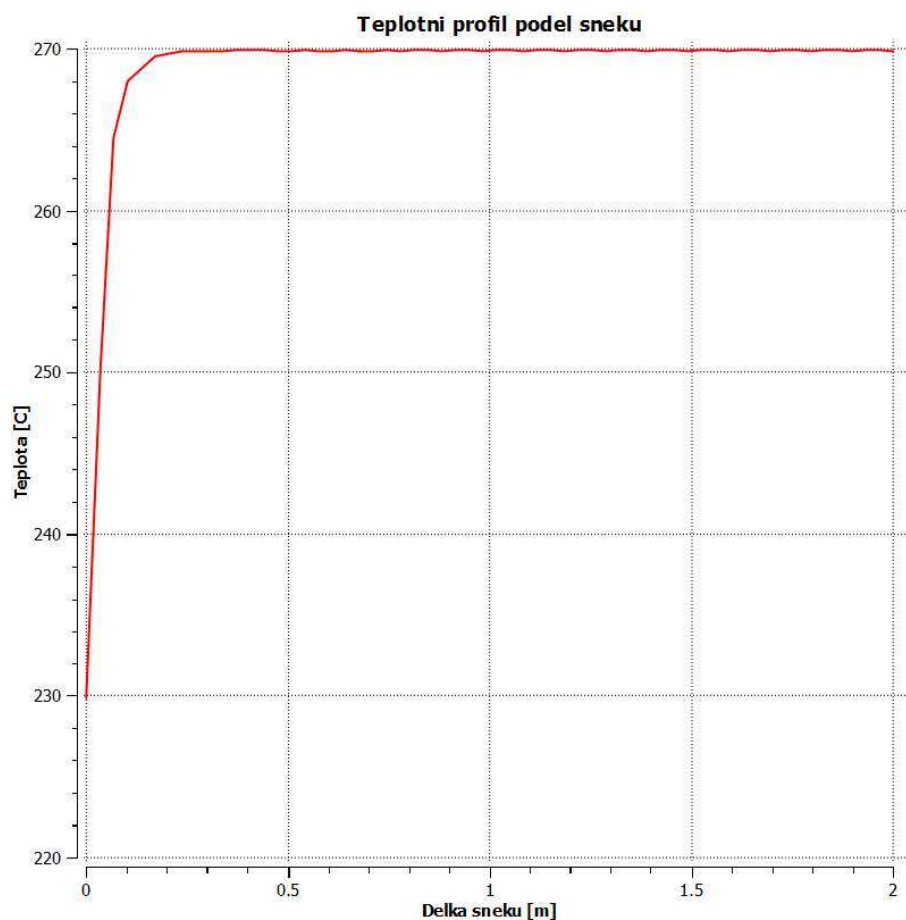


Obr. 15.3: Grafické výsledky návrhu č. 4 [zdroj: autor].

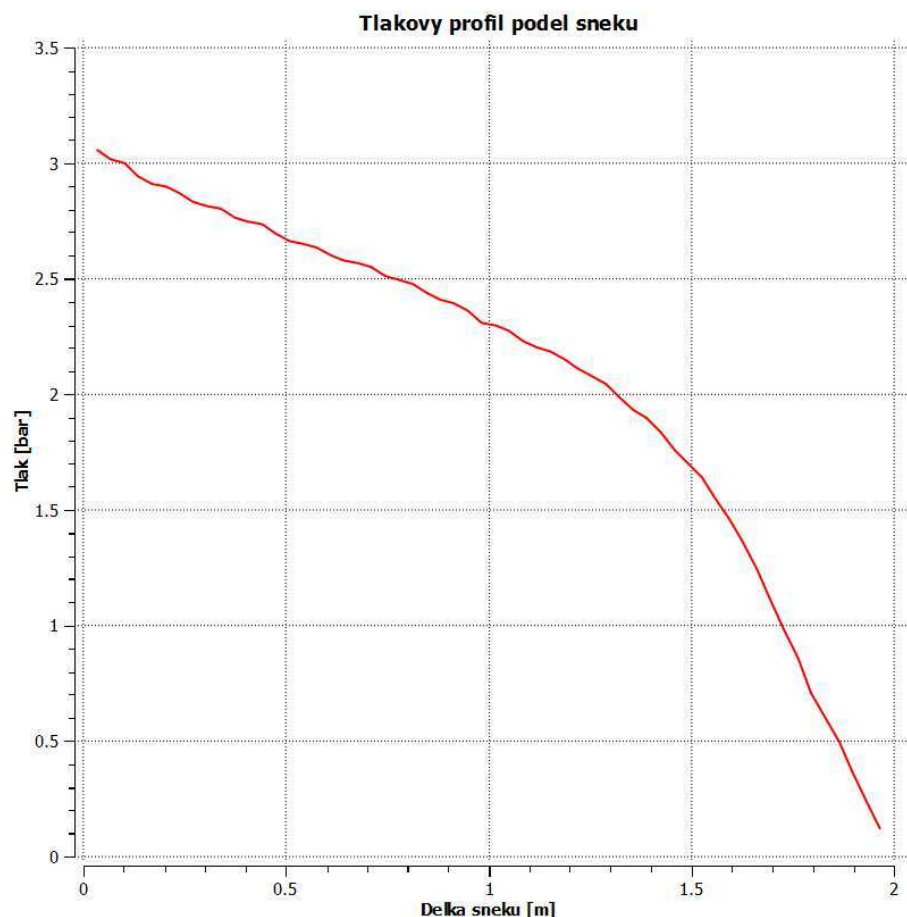
Tabulka 15.4: Výsledky návrhu č. 4. [zdroj: autor]

Průměr šneku	0,18 m
Délka šneku	2,0 m
Otáčku šneku	65 ot/min

V třetí simulaci byl zjištěn výsledek uvedený na obrázku 15.3a v tabulce 15.4. V tomto modelu byla dvojnásobně zvětšena délka šneku, tím pádem došlo ke snížení jeho průměru, ale také k mírnému zvýšení jeho otáček. Pozitiva a negativa těchto důsledků jsou popsána výše u návrhů č. 1, 2 a 3. Z grafu 15.6 vyplývá teplotní průběh po délce vytlačovacího stroje potřebný k roztavení procházejícího materiálu. Z grafu 15.7 vyplývá mírné zvýšení tlakového zatížení vytlačovacího stroje oproti návrhu č. 3, ale oproti návrhům č. 1 a 2 jde stále o velmi výrazné snížení.



Graf 15.6: Teplotní průběh po délce vytlačovacího stroje návrhu č. 4 [zdroj: autor].



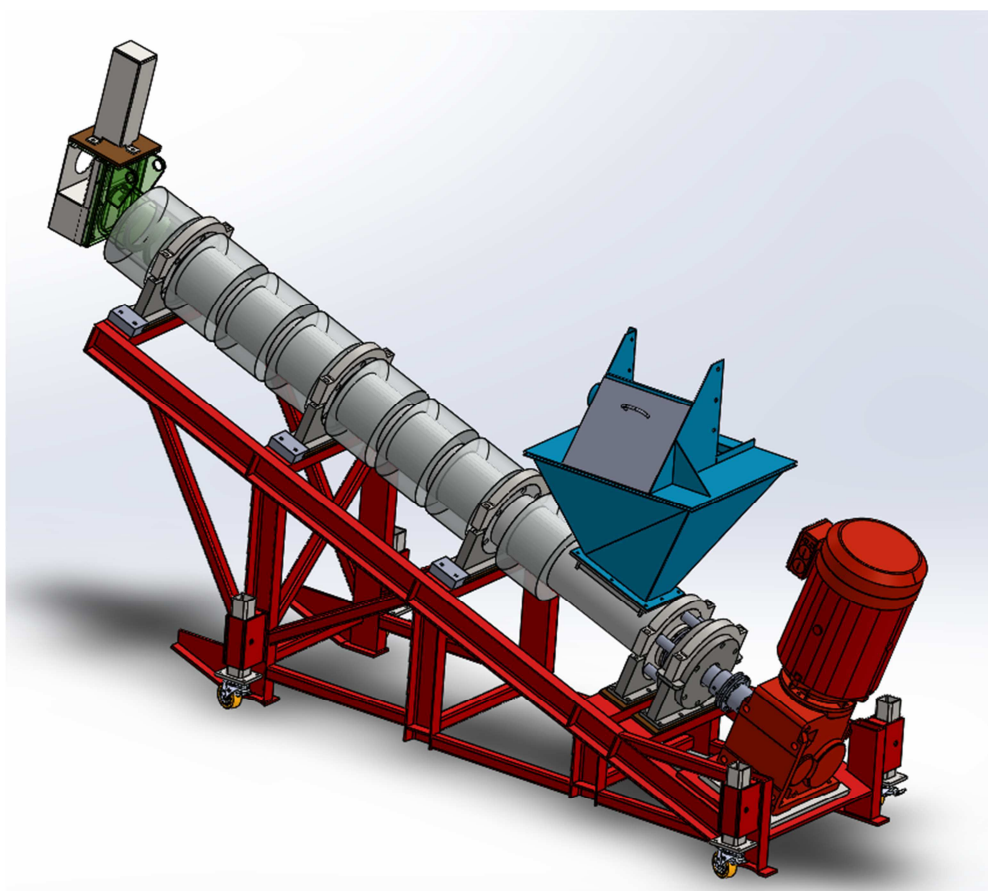
Graf 15.7: Průběh tlaku po délce vytlačovacího stroje návrhu č. 4 [zdroj: autor].

Dle získaných výsledků simulací v programu ANSYS byly vytvořeny finální návrhy vytlačovacího stroje, které jsou zobrazeny v tabulce 15.5. Vzhledem k vysušení plniva již v sušárně technologické linky není nutné řešit u vytlačovacího stroje jeho odplynění – nebude se již uvolňovat žádná vlhkost. Tlakové zatížení vytlačovacího stroje je oproti konvenčně využívaným vytlačovacím strojům velmi nízké, proto vytlačovací stroj bude plnit funkci hlavně dopravní a dohřívací.

Tabulka 15.5: Finální návrhy vytlačovacího stroje [zdroj: autor]

	Návrh č. 1	Návrh č. 2
Průměr šneku (včetně šroubovice) [m]	0,250	0,180
Délka šneku [m]	1	2
Průměr šneku ve vstupní zóně [m]	0,210	0,140
Průměr šneku ve výstupní zóně [m]	0,233	0,163
Délka vstupní zóny [m]	0,4	1,0
Délka kompresní zóny [m]	0,4	0,7
Délka výstupní zóny [m]	0,2	0,3

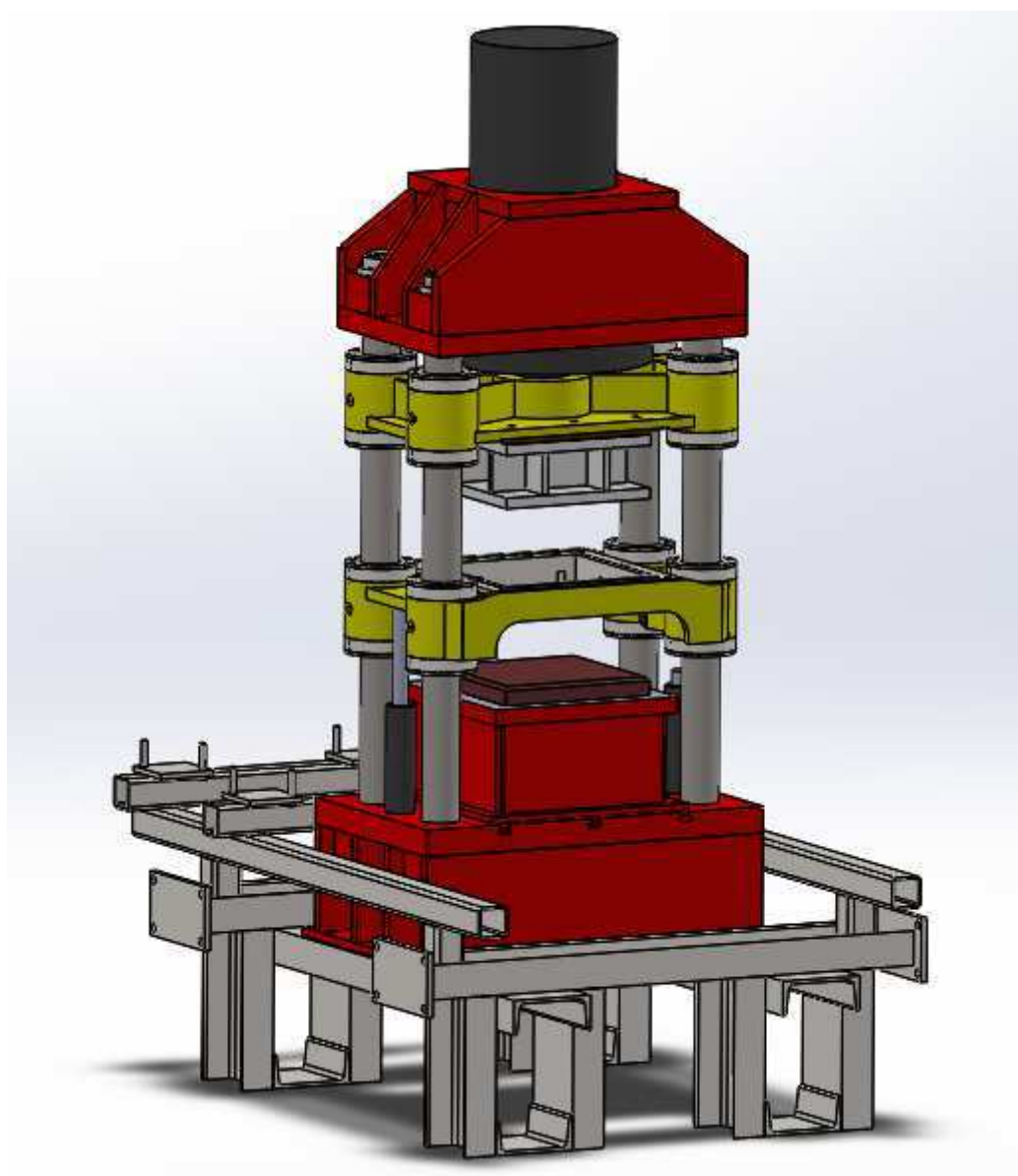
Vzhledem ke vzdálenosti přepravy směsi byl zvolen finální návrh č. 2, který je zobrazen na obrázku 15.4 a má délku 2 m, což je výhodnější z hlediska prostorového uspořádání a dávkování materiálu.



Obr. 15.4: Vizualizace návrhu č. 2 [zdroj: autor].

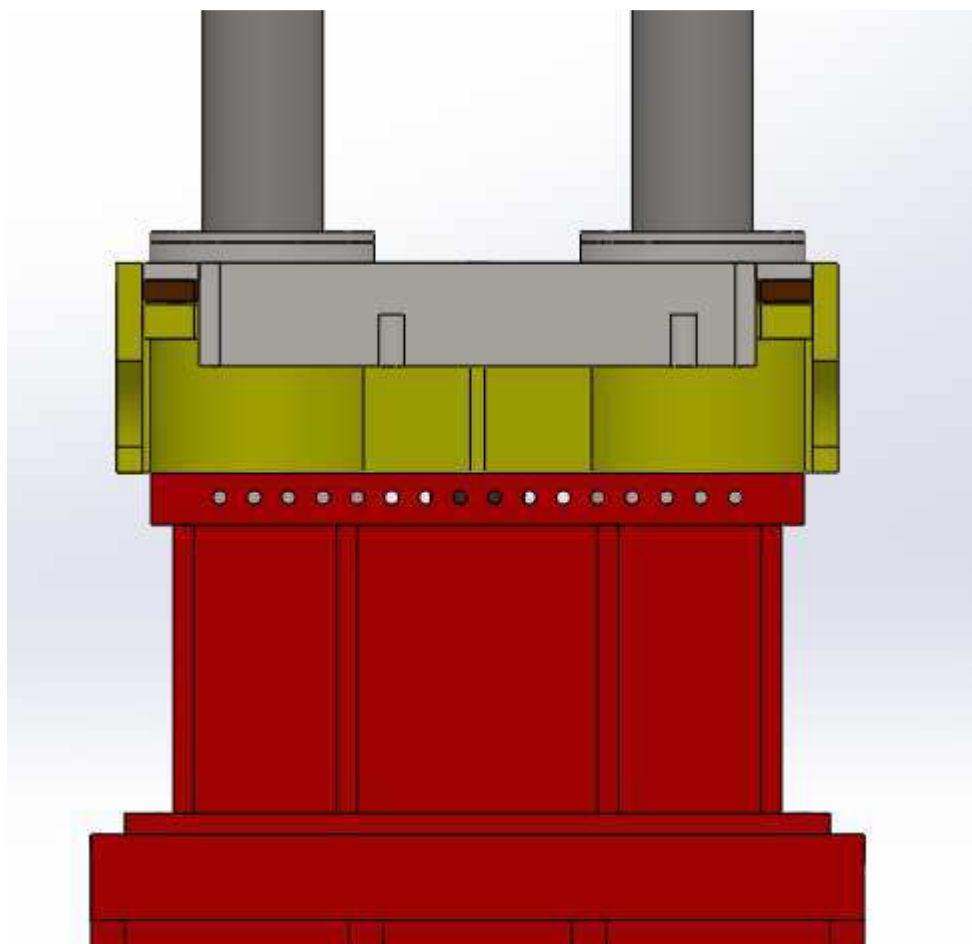
16 Návrh lisovacího zařízení

Dle normativních požadavků na stavební výrobky jsou dány třídy geometrické přesnosti, které musí být při výrobě dodrženy. Z tohoto hlediska je stávající lisovací zařízení nevyhovující, proto je nutný návrh zařízení nového. Vzhledem k dodržení geometrické přesnosti bylo navrženo čtyřsloupové lisovací zařízení, které je zobrazeno na obrázku 16.1.



Obr. 16.1: Vizualizace lisovacího zařízení [zdroj: autor].

Na obrázku 16.2 je zobrazen řez lisovacím zařízením, na kterém je možné pozorovat kanály pro chladicí kapalinu, která bude proudit lisovací podložkou a stěnami formy.



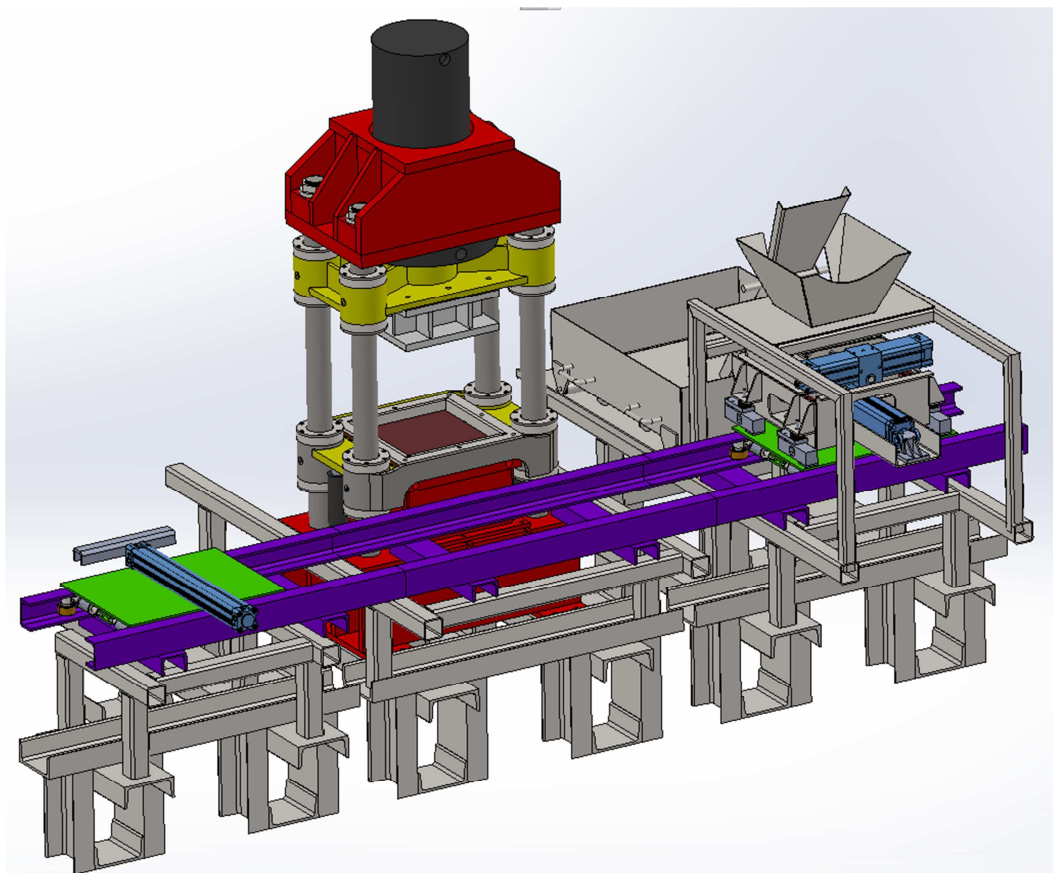
Obr. 16.2: Vzhled chladících kanálů v lisovacím zařízení [zdroj: autor].

Dle výsledků v kapitole 12 byla zvolena teplota, na kterou se bude forma temperovat, aby docházelo k rovnoměrnému chlazení výrobku po dobu 120 s. Teplota formy bude 95 °C a je zvolena z hlediska nejvyšší možné rychlosti chlazení při zachování jeho užitných vlastností. Při velmi rychlém procesu chlazení by došlo k degradaci polymeru.

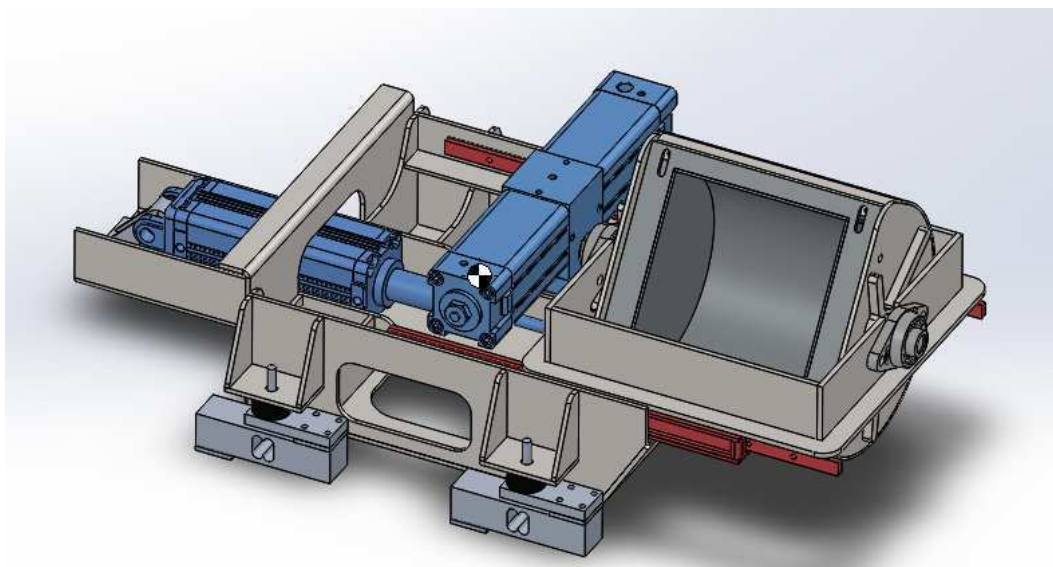
17 Návrh zavážecího mechanismu lisovacího zařízení

Vzhledem k problémům s vychládáním směsi popsaných v kapitole 11.2 bylo nutné navrhnout zavážecí mechanismus, který bude schopen udržet teplotu přepravované směsi tak, aby nedocházelo k jejímu tuhnutí. V rámci této optimalizace byl navržen zavážecí mechanismus, který je zobrazen na obrázku 17.1. Navržený zavážecí mechanismus (obr. 17.2) sestává ze zavážecího vozíku, který obsahuje nádobu o objemu 10 l, do které bude dávkována směs přímo z vytlačovacího stroje. Nádoba je zhotovena dvouplášťově, kdy meziprostor je vyplněn izolací z minerální vlny, aby

nedocházelo k vychládání roztavené směsi při její přepravě do lisovacího zařízení. Zavážecí vozík je uložen na tenzometrech, směs tedy bude vážena při výstupu z vytlačovacího stroje.



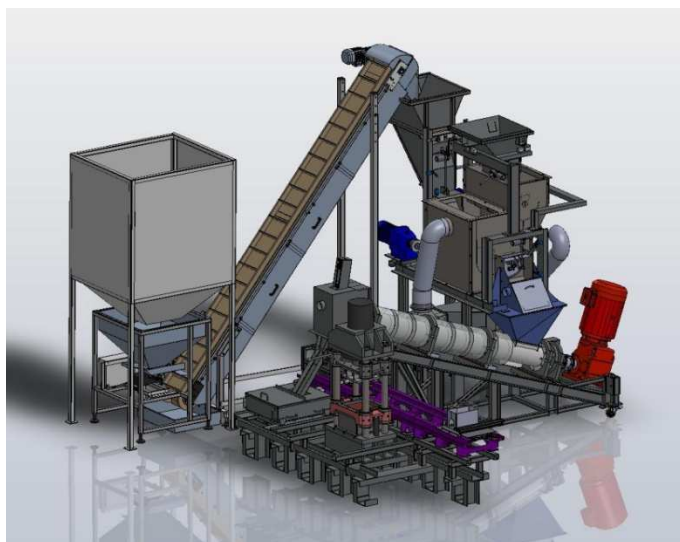
Obr. 17.1: Vzhled zavážecího mechanismu lisovacího zařízení [zdroj: autor].



Obr. 17.2: Vzhled zavážecího vozíku [zdroj: autor].

18 Popis výroby po optimalizaci výrobního zařízení

Výrobní zařízení bylo optimalizováno dle nedostatků zjištěných v průběhu výroby stavebních dílců na bázi termoplastického pojiva a inertních plniv. Vzhledem k výrazným změnám technologie výroby je nutné uvést nový způsob výroby stavebních dílců. Výrobní zařízení po optimalizaci je zobrazeno na obrázku 18.1.



18.1: Vzhled výrobního zařízení po optimalizaci [zdroj: autor].

Proces výroby lze nyní popsat následujícími kroky:

- 1) drcení odpadních termoplastů na frakci 2 – 10 mm a jejich doprava do vážené násypky pojiv,
- 2) doprava plniv, pomocí šnekového dopravníku do vážené násypky plniv,
- 3) otevření násypky plniv a jejich přesun do sušárny, kde dochází k jejich vysušení a ohřátí na požadovanou teplotu,
- 4) přesun ohřátého plniva ze sušárny do míchačky,
- 5) otevření násypky pojiv a jejich přesun do míchačky,
- 6) homogenizace pojiv a plniv, dosažení teploty směsi 220 °C,
- 7) přesun směsi do temperované násypky vytlačovacího zařízení
- 8) přeprava, dohřátí směsi na teplotu tání 260 °C ve vytlačovacím zařízení,
- 9) dávkování směsi do zavážecího vozíku,
- 10) naplnění lisovací formy pomocí zavážecího vozíku,
- 11) lisování stavebního dílce po dobu 120 s,
- 12) dochlazování výrobku na válečkové dráze,
- 13) paletizace výrobků.

19 Etapa IV - Experimentální ověření použitelnosti dalších termoplastických pojiv a rozptýlené výztuže

V rámci experimentálního provozu byla ověřena možnost využití dalších termoplastických pojiv pro výrobu stavebních dílců. Pro experimentální ověření byl použit vzorek materiálu PA6.6 s přidavkem 30 % skelných vláken (dále jen „PA 6.6 GF30“). Pro experiment byla zvolena receptura ověřená v minulých zkouškách, receptura je uvedena v tabulce 19.1. Nastavení procesu výroby bylo možné zanechat stejné jako při předchozích experimentech vzhledem ke stejné teplotě tavení PA 6.6 GF30 a PET ($t_m = 255\text{ °C}$).

Tab. 19.1: Receptura směsi [zdroj: autor]

Složka	$m[\text{kg}]$	$m[\%]$
Drcený PA 6.6 GF30	8	23,2
Kamenivo frakce 0 – 4 mm	25	72,4

Při tomto experimentu byly vyráběny plošné dlaždice s rozměry 300 x 300 mm. Vzhledem k ručnímu dávkování směsi do lisu nebyl kladen požadavek na přesnou výšku plošné dlaždice. Výsledek experimentu je zobrazen na obrázku 19.1.



Obr. 19.1: Vzhled výrobku s použitím pojiva PA 6.6 GF30 [zdroj: autor]

Po vylišování vzorku se z materiálu začala uvolňovat kapalina podobná parafínu. Tento jev byl pravděpodobně způsoben nedodržením tlakových podmínek pro tavení PA 6.6, kdy je polymer v roztaveném stavu velice hygroskopický a váže na sebe vzdušnou vlhkost. V rámci tohoto experimentu byly vyrobeny čtyři vzorky,

na kterých byla zjištěna objemová hmotnost dle ČSN EN 14617-1 a pevnost za ohybu dle ČSN EN 14617-2. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 19.2.

Tab. 19.2: Výsledky zkoušek na vyrobených vzorcích [zdroj: autor]

<i>i</i>	<i>m</i> (g)	<i>a</i> (mm)	<i>b</i> (mm)	<i>h</i> ₁ (mm)	<i>h</i> ₂ (mm)	<i>h</i> ₃ (mm)	<i>h</i> ₄ (mm)	<i>h</i> (mm)	ρ (kg/m ³)	<i>F</i> (kN)	<i>R</i> _{tf} (MPa)
1	7142	299	299	39,3	39,77	40,31	39,38	39,69	2010	16,1	10,3
2	7624	299	299	41,04	41,38	40,86	40,83	41,0275	2080	16,9	10,1
3	7984	299	299	43,82	43,02	42,9	41,84	42,895	2080	18,2	9,9
4	7835	299	299	43,55	43,97	42,91	42,73	43,29	2020	18,6	10,0
Průměr									2050		10,1

V rámci tohoto experimentu byly zjištěny vlastnosti vzorků vyrobených z polymeru PA 6.6 GF30 a kameniva frakce 0 – 4 mm. Průměrná objemová hmotnost je $\rho = 2050$ kg/m³ a průměrná pevnost v ohybu $R_{tf} = 10,1$ MPa.

19.1 Využití odpadního skla jako plniva

V rámci tohoto experimentu bylo vyzkoušeno, zda je možné využít drcené odpadní sklo pocházející z fotovoltaických panelů jako plnivo. Výsledek experimentu je zobrazen na obrázku 19.2. Pro zkoušku byla použita frakce odpadního skla 2 – 4 mm. Receptura byla použita stejná jako v tabulce 19.1.



Obr. 19.2: Vzhled drceného odpadního skla pojeného odpadním termoplastem [zdroj: autor].

19.2 Možnosti využití odpadních minerálních vláken jako rozptýlené výztuže

V rámci tohoto experimentu byly vyrobeny tři vzorky, kde byla ověřována možnost využití rozptýlené výztuže ve formě minerálních vláken. Byla použita hrubě

rozdělená minerální vlákna, jejichž vzhled je zobrazen na obrázku 19.3. Takto rozdružená vlákna byla smíchána a zahřívána s plnivem a dle [26] bylo předpokládáno rozdružení minerální vlny na jednotlivá vlákna pomocí abrazivní schopnosti použitého kameniva frakce 0 – 4 mm. Receptura byla zvolena tak, aby množství minerálních vláken bylo 10 % z množství použitého termoplastického pojiva tak, jak je uvedeno v tabulce 19.3.

Tab. 19.3: Receptura [zdroj: autor]

Složka	$m[\text{kg}]$	$m'[\%]$
Drcený PET + PE	7	20,3
Kamenivo frakce 0 – 4 mm	25	72,4
Minerální vlákna	2,5	7,3



Obr. 19.3: Vzhled rozdružených chomáčů minerální vlny. [zdroj: autor]

Vyrobené vzorky byly podrobeny stanovení pevnosti za ohybu dle ČSN EN 14 617-2 a stanovení nasákavosti a objemové hmotnosti dle ČSN EN 14 617-1. Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny v tabulkách 19.4 a 19.5.

Tab. 19.4: Výsledky stanovení pevnosti za ohybu. [zdroj: autor]

i	a (mm)	b (mm)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	h_3 (mm)	h_4 (mm)	h (mm)	F (kN)	R_{ft} (MPa)
1	299,20	299,85	35,10	35,20	35,10	35,00	35,1	13400	10,9
2	299,40	299,60	35,00	34,90	34,80	35,10	35	13100	10,7
3	298,85	299,10	34,80	35,10	35,30	34,90	35	13600	11,1
Průměr									10,9

Tab. 19.5: Výsledky stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti [zdroj: autor]

Vzorek	Čas (h)	M (kg)	C (%)	M_o (kg)	M_v (kg/m ³)
1	0	285,3	-	-	-
	1	285,3	0	-	-
	8	285,3	0	-	-
	24	285,3	0	-	-
	48	285,3	0	-	-
	72	285,3	0	130,2	1840
2	0	291,2	-	-	-
	1	291,3	0,04	-	-
	8	291,2	0	-	-
	24	291,2	0	-	-
	48	291,2	0	-	-
	72	291,2	0	134,6	1860
3	0	301,5	-	-	-
	1	301,5	0	-	-
	8	301,5	0	-	-
	24	301,6	0	-	-
	48	301,5	0	-	-
	72	301,5	0	140,3	1870
Průměr			0		1860

Na vzorcích byla stanovena pevnost za ohybu s průměrnou hodnotou $R_f = 10,9$ MPa, což neprokazuje přínos minerálních vláken jako rozptýlené výztuže při porovnání s výsledky vzorků bez vláken, kde byla pevnost za ohybu $R_f = 11,0$ MPa. Dále byla stanovena objemová hmotnost $M_v = 1860$ kg/m³, která se přidáním minerálních vláken snížila o 60 kg/m³ oproti vzorkům bez vláken. Nasákavost zůstala nezměněna na nulové hodnotě. Po rozlomení vzorků nebylo možné pozorovat shluky minerálních vláken v jeho struktuře (viz obr. 19.4), proto lze předpokládat, že došlo k rozdělení minerálních vláken na jednotlivá vlákna.



Obr. 19.4: Vzhled struktury vzorku s obsahem minerálních vláken po rozlomení. [zdroj: autor]

20 PŘÍNOSY PRÁCE V ROVINĚ VĚDECKO-VÝZKUMNÉ, ENVIRONMENTÁLNÍ A EKONOMICKÉ

Tato disertační práce prezentuje výsledky výzkumu odpadních termoplastů a jejich použití jako pojiv ve stavebních prvcích. Z hlediska přínosu pro vědní obor byla studována problematika a princip využití odpadních materiálů jako nahrazujících konvenčně využívaná pojiva ve stavební praxi. Celkové přínosy práce lze popsat těmito body:

- Přínos této práce má nezanedbatelný význam v rámci stavebního odvětví, neboť v současné době strmě vzrůstá poptávka po alternativních metodách výroby a zvýšení využitelnosti odpadních materiálů. Výroba těchto netradičních prvků sebou nese jistá úskalí, která jsou v práci popsána a disertační práce nabízí i možnosti jejich řešení.
- Tato disertační práce výrazně rozšiřuje dostupnost relevantních informací o problematice tepelně zpracovaných odpadních polymerů a o možnostech jejich využití při výrobě stavebních hmot a dílců.
- Hlavním přínosem této práce je využití odpadních materiálů namísto konvenčních pojivových materiálů, zejména cementu. Náhrada cementu je v souladu s celosvětově zaměřenou politikou na snižování emisí CO₂, který při výrobě cementu vzniká v nezanedbatelné míře. Práce pojednává především o možnostech a optimalizaci odpadních polymerních pojiv pro výrobu stavebních prvků.
- V rámci disertační práce bylo zjištěno, že nahrazení hydraulických pojiv polymerními odpady má pozitivní vliv nejen na životní prostředí, ale i na užité vlastnosti výrobků. Výrobky obsahující odpadní polymerní pojivo mají oproti výrobkům na bázi hydraulických pojiv vysokou odolnost vůči mrazu, vůči chemickým rozmrazovacím látkám, nulovou nasákavost, nižší objemovou hmotnost, která je velmi variabilní vzhledem k množství použitého pojiva a nižší součinitel tepelné vodivosti, který koresponduje s množstvím polymerního pojiva a lze ho snížit zvýšením dávky polymerního pojiva. Klíčovým přínosem je zjištěný vliv částic Fe₂O₃ na UV stabilitu materiálu, kdy při přidání oxidu železitého dochází k uzavření struktury polymeru a ke zvyšování UV stability materiálu.

- Nesporným vědním přínosem je identifikace a detailní analýza nového kompozitního materiálu, u kterého nebyly dosud známe žádné jeho vlastnosti.
- Prostřednictvím recyklace plastů, která představuje strategii k opětovnému využívání odpadů, rovněž šetří přírodní zdroje a současně omezuje zatěžování životního prostředí škodlivinami, s těmito novodobými technologiemi umožňuje zajistit suroviny v případě jejich nedostatku, snížení nákladů při stoupajících cenách primárních materiálů a snížení ekologické zátěže životního prostředí produkovánými odpady.
- V environmentální rovině je klíčovým přínosem zajištění dostupnosti další alternativy na poli materiálového využití odpadních termoplastů, stavebních recyklátů a případně i odpadního skla a dalších vhodných odpadních materiálů.
- V ekonomické rovině je přínosem využití odpadních materiálů, což výrazně sníží cenu koncového produktu oproti stejným výrobkům vyrobených z konvenčně využívaných materiálů.

21 ZÁVĚR

Cílem této disertační práce bylo vymezit možnosti využití odpadních polymerních recyklátů pro výrobu stavebních hmot a dílců, což je vzhledem k politice Evropské unie ohledně nakládání s odpady velice aktuální téma. V kapitole 5 této práce je popsána každoročně se zvyšující produkce polymerů ve světě, jejímž důsledkem je stále se zvyšující množství skládkovaných a dále nevyužitých polymerů, čímž zůstává nevyužita vysoká energie do nich vložená při výrobě a dochází k úbytku neobnovitelných zdrojů. Konkrétně se tato práce zabývá možnostmi využití odpadních termoplastů ve stavební výrobě a definuje jejich možnosti užití, vlastnosti a popisuje zařízení, ve kterém je možné tyto materiály zpracovávat.

V teoretické části byly popsány odpady jako kategorie, jejich vlastnosti a nakládání s nimi. Metody zpracování odpadů jsou v dnešní době velmi důležité, protože pokud je odpad zpracován a nadále využit, tak nedochází k jeho skládkování. To pomáhá nejen k ochraně životního prostředí a k ušetření přírodních zdrojů, ale ve většině případů je to výhodné i z hlediska ekonomického. Odpady tak mohou být levnou vstupní surovinou při výrobě, proto je možné do jejich zušlechtní investovat více prostředků. Tyto aspekty jsou důležité pro trvale udržitelný rozvoj nejen ve stavebnictví, ale i v ostatních průmyslových oborech.

Dále jsou v teoretické části popsány polymery, jejich spotřeba, příprava, rozdělení a původ. Odpady na bázi polymerů jsou původem především z obalových materiálů, kterých je stále větší množství vzhledem k jejich hygienické a zdravotní nezávadnosti. Dosud neexistuje přímá náhrada polymerních materiálů v tomto odvětví. Recyklace těchto odpadů je složitá a ekonomicky náročná vzhledem k vyskytujícímu se velkému množství různých druhů na trhu, kdy při sběru dochází k jejich mísení. Značná část polymerních odpadů je také znečištěná buď od původně uchovávaného materiálu, nebo od dalších nečistot. Vzhledem k ekonomické náročnosti jejich třídění na jednotlivé druhy a následného čištění bylo vhodné navrhnout řešení, které bude schopné zpracovávat heterogenní polymerní odpad, který neprojde předúpravou a nebude vyčištěný. Dále jsou v kapitole popsána plniva do polymerů, která jsou v případě využití ve stavebnictví klíčová. Při tomto využití odpadních termoplastů jsou důležité termodynamické vlastnosti a přechodové teploty polymerů. V kapitole 0 jsou popsány technologie zpracování plastů, které se běžně využívají pro zpracování nových polymerních materiálů, je zde popsána i recyklační linka na polymery, která ovšem je schopna recyklovat pouze vyčištěný materiál.

Odpady na bázi polymerů lze označit jako problematický z důvodu jeho značné životnosti při volném skládování a časté vzájemné kombinace různých polymerních odpadů.

Z výše uvedeného vyplývá, že ekologická likvidace odpadů na bázi termoplastů je v České republice i ve světě velmi žádoucí. Pokud se jedná o vyčištěný jednodruhový odpad, je možné jej, například pomocí regranulace, použít znovu při výrobě nových produktů. Čištění a třídění plastových odpadů je náročná záležitost z hlediska energetického i ekonomického. Právě z těchto důvodů je vhodné vytvořit technologii, která bude zpracovávat i vícedruhový znečištěný plastový odpad.

V praktické části byla nejprve popsána výrobní technologie pro zpracování odpadních termoplastů a proces výroby stavebních dílců z těchto materiálů. V rámci experimentů byly provedeny zkoušky výroby stavebních dílců, při kterých byla ověřována možnost využití termoplastů a optimální receptura výsledného kompozitu. Při experimentech byly zjištěny materiálové nedostatky výsledných produktů, proto musela být navržena opatření pro jejich odstranění.

Primárně zvoleným pojivem byl odpadní termoplast PET (polyethylentereftalát), ve formě PET láhví, vzhledem k jeho snadné dostupnosti. Odpad nebyl separován ani

vyčištěn a nacházely se v něm také víčka a etikety z PE (polyethylenu). Pro první experiment byla zvolena receptura uvedená v kapitole 11.1.4 a byly vyrobeny plošné dlaždice s rozměry 600 x 600 x 100 mm. Uvedená receptura byla po experimentu prohlášena za nevhodnou vzhledem k nízkému množství obsahu pojiva. V rámci prvního experimentu byly zjištěny některé nedostatky výrobního zařízení, které byly pro další experimenty odstraněny.

Pro další experiment bylo nutné zjistit vhodnou teplotu, na kterou je potřeba zahřát plnivo, aby po jeho homogenizaci s pojivem došlo k tavícímu procesu. V rámci tohoto byla experimentálně ověřena teplota tání termoplastu PET a provedena DSC analýza používaného termoplastu. Z těchto zkoušek byla zjištěna teplota tání termoplastu PET $t_{t,pet} = 251,7\text{ °C}$ a výpočtem ověřena teplota, na kterou je nutné ohřát plnivo $t_{t,pln} = 330,1\text{ °C}$.

V rámci dalšího experimentu byla změněna receptura kompozitu (viz kapitola 11.2.1) a bylo zvýšeno množství termoplastického pojiva. Zmenšily se i rozměry požadovaných výrobků na 300 x 300 x 67,5 mm. V rámci druhého experimentu byly zjištěny další nedostatky výrobního zařízení, které se projeví na kvalitě výrobků. Během experimentu bylo dále navýšeno množství termoplastického pojiva (viz kapitola 11.2.3). Nejzávažnějším nedostatkem bylo nerovnoměrné chladnutí plastbetonové směsi při dávkování do lisovacího zařízení, což způsobovalo vady uvnitř i na povrchu dlaždic. Tento problém byl vyřešen v závěru disertační práce návrhem jednošnekového vytlačovacího zařízení a optimalizovaným zavážecím vozíkem.

Ve třetím experimentu byla zachována upravená receptura z experimentu druhého (kap. 11.2.3) a byla vytvořena receptura nová, která obsahovala barevné pigmenty na bázi Fe_2O_3 (viz kap. 11.3). V rámci tohoto experimentu se podařilo vyrobit bezvadné výrobky, které byly pouze zčásti narušeny objemovými změnami při chladnutí horkého materiálu.

Při experimentech bylo zjištěno, že vylišované vzorky jsou ztuhlé pouze na povrchu a uvnitř jsou stále v roztaveném stavu, což způsobuje objemové změny při jejich chladnutí. Prvním předpokladem pro vyřešení tohoto problému byla perforace dlažebních prvků ze spodní strany. Tento postup se ukázal jako vhodný z hlediska geometrické přesnosti, ale nevhodný z hlediska pevnostních testů, kdy u zkoušky pevnosti za ohybu docházelo k porušení vzorků mimo jejich zatěžovaný střed,

což bylo způsobeno nevhodně zvolenou perforací, která se chovala jako vrub a k porušení došlo na její hraně. Dalším předpokladem řešení objemových změn při chladnutí vzorků bylo zvýšení lisovací doby a temperování formy na stálou teplotu. Toto řešení bylo ověřeno v programu ANSYS, a bylo zjištěno, že optimální teplota formy je 95 °C a optimální lisovací doba je 120 s, což bude uvažováno při návrhu celkového výkonu technologie.

V další části se disertační práce věnuje stanovení užitečných vlastností vzorků plošné dlažby vyrobených podle receptur v tabulkách 11.5 a 11.6. Prvním bylo stanovení pevnosti za ohybu, objemové hmotnosti a nasákavosti. Na deseti vzorcích, s různou tloušťkou, byla stanovena pevnost za ohybu s průměrnou hodnotou $R_{ft} = 11,0$ MPa, což vyhovuje požadavku na dlažební prvky z umělého kamene dle ČSN 73 6131 $R_{ft} \geq 7,0$ MPa. Stanovení objemové hmotnosti s výsledkem $M_v = 1920$ kg/m³ a stanovení nasákavosti s výsledkem $C = 0$ %. Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou bylo s negativním výsledkem, nedošlo k žádnému průsaku tlakové vody do zkoušeného vzorku. Výsledkem stanovení odolnosti povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek byl průměrný odpad po padesáti cyklech $\rho_A = 5$ g/m² a vzorky nevykazovaly žádné známky degradace, z čehož vyplývá zatřídění plastbetonové směsi do třídy: nenarušený – odpad v podobě jemných prachových částic do 1 mm. Z výsledků UV stability vyplývá vliv kladný použitého pigmentu Fe₂O₃ na odolnost kompozitu vůči UV záření. Stanovení mrazuvzdornosti nebylo provedeno vzhledem k nulové nasákavosti materiálu, protože podstatou samotné zkoušky a cyklické zmrazování a rozmrazování vzorků nasáklých vodou. Stanovení obsahu přírodních radionuklidů nebylo provedeno vzhledem k tomu, že polymery přírodní radionuklidy neobsahují a obsah radionuklidů v použitém kamenivu je prokázán dle protokolu v příloze č. 1. Na vzorcích plošné dlažby byl stanoven součinitel tepelné vodivosti λ s průměrnou hodnotou $\lambda = 1,217$ Wm⁻¹K⁻¹. U vzorků byly naměřeny hodnoty odolnosti vůči obruš, jejichž průměr je 16 000 mm³/5 000 mm² odpadu, z čehož vyplývá zatřídění měřených vzorků dle [20] tabulky 4 do třídy 4 označení I, kde musí být naměřená hodnota $\leq 18\,000$ mm³/5 000 mm². Dále byla stanovena odolnost vůči smykovému tření, kterou reprezentuje hodnota USRV = 44, která vyhovuje dle požadavku na dlažební prvky z umělého kamene dle ČSN 73 6131, Tabulka 8, kde je požadováno, aby hodnota USRV byla větší nebo rovna 35.

V další části disertační práce byla provedena rešerše možných řešení dopravy roztaveného materiálu vzhledem k výše popsanému problému tuhnutí kompozitu v míchačce a během přepravy do lisovacího zařízení. Z této rešerše byl vybrán pro další modelování vybrán jednošnekový vytlačovací stroj. Základní parametry jednošnekového vytlačovacího stroje byly navrženy pomocí programu ANSYS. Nejprve byly definovány vstupní parametry a výpočtová metoda, poté došlo k samotnému výpočtu a byly navrženy 4 možnosti, které byly následným výpočtem optimalizovány pro požadovaný výkon 1,2 t materiálu za hodinu.

V další kapitole experimentální části je popsána modernizace lisovacího zařízení vzhledem ke geometrické přesnosti výrobků. V novém lisovacím zařízení jsou kanály pro chladicí kapalinu, aby mohla být lisovací podložka a forma temperována na teplotu 95 °C.

V rámci optimalizace přepravy roztaveného kompozitu do lisovacího zařízení byl navržen zavážecí mechanismus, kde je z materiálového hlediska nejzajímavější nádoba na přepravu roztaveného kompozitu, která byla navržena dvouplášťová s izolací z minerální vlny mezi jednotlivými plášti, aby nedocházelo ke chladnutí přepravovaného materiálu.

Optimalizované výrobní zařízení je popsáno v kapitole 18, kde je definován nový proces výroby vzhledem k přidaným komponentům.

V rámci disertační práce byla ověřena možnost využití dalších termoplastických pojiv a inertních plniv. Jako pojivo byl zvolen odpadní polymer z výroby automotive, polyamid 66 s obsahem 30 % skelných vláken. Nejprve byla zjištěna teplota tání tohoto termoplastu, která je $t_m = 255$ °C, proto bylo možné zanechat stejné nastavení procesu výroby (obdobná teplota tání jako u PET). Na vyrobených vzorcích byla stanovena pevnost za ohybu $R_{ft} = 10,1$ MPa a objemová hmotnost $M_v = 2050$ kg/m³, což je o 0,9 MPa méně, respektive o 140 kg/m³ více než u vzorků s pojivem na bázi PET a PE. V rámci tohoto experimentu byla také ověřena možnost využití rozptýlené výztuže v tomto kompozitu, výsledkem je její možné využití ovšem s omezením – nelze využít výztuž s nízkou teplotní odolností. Při dalším experimentu byla ověřena možnost využití odpadního skla z fotovoltaických panelů jako inertního plniva. Výsledkem tohoto experimentu je soudržný vzorek pocházející z velikosti frakce odpadního skla 2 – 4 mm a pojiva na bázi PET a PE dle receptury uvedené v tabulce

19.1, z čehož vyplývá, že využití odpadního skla je možné a vhodné vzhledem k jeho nynějšímu skládkování.

Citovaná literatura

- [1] ROVNANÍKOVÁ, P. a ŽIŽKOVÁ, N. *Ekologie ve stavebnictví*. Brno : VUT, 2009.
- [2] MŽP. Odpady. *Ministerstvo životního prostředí*. [Online] 2013. [Citace: 31. Leden 2014.] http://www.mzp.cz/cz/odpady_podrubrika.
- [3] Dekonta, a.s. Stabilizace a solidifikace odpadů. [Online] 2014. [Citace: 21. 10 2014.] <http://www.dekonta.cz/sluzby-a-produkty/odstraneni-odpadu/uprava-odpadu/stabilizace-a-solidifikace-odpadu.html>.
- [4] HÁJEK, P. Udržitelná výstavba budov a její uplatňování ve střední Evropě. *Časopis stavebnictví*. [Online] 12 2007. [Citace: 17. 12 2014.] http://www.casopisstavebnictvi.cz/udrzitelna-vystavba-budov-a-jeji-uplatnovani-ve-stredni-evrope_N465.
- [5] BĚHÁLEK, L. *Polymery*. místo neznámé : Publi.cz, 2016. 978-80-88058-68-7.
- [6] LENDFELD, P. Katedra tváření kovů a plastů. *Katedra tváření kovů a plastů*. [Online] [Citace: 15. 12 2016.] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm.
- [7] CHVOJKA, A. Návrh opatření pro zajištění možnosti vytlačování svařovaných drážů z polyamidu na univerzálním vytlačovacím stroji. [Online] 2008.
- [8] KREJČÍ, M. Porovnání technologií pro zhotovení velkorozměrových desek z termoplastů. *Bakalářská práce*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní Katedra strojírenské technologie, 2010.
- [9] BOCO PARDUBICE MACHINES, s.r.o. BOCO PARDUBICE. [Online] [Citace: 12. 1 2017.] <http://www.boco.cz>.
- [10] JANOŠKO, I. Komunální technika. *komunalweb.cz*. [Online] 15. 02 2011. [Citace: 18. 08 2016.] <http://komunalweb.cz/odpadni-plasty-odstranovani-a-recyklace/>.
- [11] MOSER, S. WegezumeffizientenKunststoff-Recycling. [Online] [Citace: 17. 08 2016.] <https://www.vdi.wissensforum.de/vdi-wissensforum/presse/wege-zum-effizienten-kunststoff-recycling/>.
- [12] VÖRÖS, F. Aktuální údaje o plastech a využití plastových odpadů. *tzb-info*. [Online] 2014. <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/11996-aktualni-udaje-o-plastech-a-vyuziti-plastovych-odpadu>.
- [13] JUTA a.s. Vlastnosti polypropylenu a polyethylenu. <http://www.umela-trava.cz>. [Online] [Citace: 20. 08 2016.] http://www.umela-trava.cz/download/cjvlastnosti_polypropylenu_a%20polyethylenu.pdf.

- [14] DUCHÁČEK, V. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN: 80-7080-617-6.
- [15] ČSN EN 14617-2. *Umělý kámen - Zkušební metody - Část 2: Stanovení pevnosti za ohybu*. Praha : UNMZ, 2017.
- [16] ČSN EN 14617-1. *Umělý kámen - Zkušební metody - Část 1: Stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti*. Praha : UNMZ, 2013.
- [17] ČSN 73 1326 - Z1. *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Praha : UNMZ, 2003.
- [18] ČSN EN ISO 4892-2. *Plasty - Metody vystavení laboratorním zdrojům světla - Část 2: Xenonové lampy*. Praha : UNMZ, 2013.
- [19] ČSN EN 16417-5. *Umělý kámen - Zkušební metody - Část 5: Stanovení mrazuvzdornosti*. Praha : UNMZ, 2012.
- [20] ČSN EN 1340. *Betonové obrubníky - Požadavky a zkušební metody*. Praha : ÚNMZ, 2004.
- [21] OTT, R. *Stroje a zařízení v gumárenské a plastikářské technologii I*. Praha : SNTL, 1975.
- [22] RIEGER, F., NOVÁK, V., JIROUT, T. *Hydromechanické procesy II*. Praha : ČVUT, 2005. 1. vydání.
- [23] MAŇAS, M., STANĚK, M., MAŇAS, D. *Výrobní stroje a zařízení I. Stroje gumárenské a p*. Zlín : UTB Zlín, 2007.
- [24] ČSN EN 12390-8. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8. Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Praha : ÚNMZ, 2009.
- [25] ČSN EN 1339. *Betonové dlažební desky - Požadavky a zkušební metody*. Praha : ÚNMZ, Prosinec 2004.
- [26] Bc. Jan Čermák *Studium využitelnosti odpadů z izolačních materiálů*. Brno, 2015. 73 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.

22 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ČR	...	Česká republika
EU	...	Evropská unie
PCB	...	polychlorovaný bifenylyl
POPs	...	perzistentní organické polutanty
HDP	...	hrubý domácí produkt
PE	...	polyethylen
PET	...	polyethylentereftalát
PVC	...	polyvinylchlorid
PVC-U	...	neměkčený polyvinylchlorid
PVC-P	...	měkčený polyvinylchlorid
POM	...	polyoxymethylen
PA	...	polyamid
PP	...	polypropylen
PF	...	fenol-formaldehydová pryskyřice
EP	...	epoxidová pryskyřice
UP	...	polyesterová pryskyřice
TPE	...	termoplastické elastomery
WEEE	...	wasteofelectric and electronicequipments
REACH	...	Registrace, Evaluace, Autorizace, omezování Chemických látek
ČSU	...	Český statistický úřad
ČSN	...	Česká technická norma
CHRL	...	chemické rozmrazovací látky

24 SEZNAM POUŽITÝCH JEDNOTEK A VELIČIN

t/T	...	Teplota	[°C]
ρ	...	Objemová hmotnost	[kg.m ⁻³]
τ	...	Čas	[s]
λ	...	Součinitel tepelné vodivosti	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]
R_{ft}	...	Pevnost v ohybu	[MPa]
R_c	...	Pevnost v tlaku	[MPa]
F	...	Síla	[N]
m	...	Hmotnost	[kg]
l	...	Délka	[m]
M	...	Molární hmotnost	[g/mol]
S	...	Plocha	[m ²]
H	...	Výhřevnost	[J/kg]
P	...	Výkon	[W]
p	...	Tlak	[Pa]
h	...	Tloušťka	[m]
M_v	...	Objemová hmotnost	[kg.m ⁻³]
I_e	...	Intenzita záření	[W/m ²]

26 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Protokol o měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů
v používaném kamenivu

Příloha č. 1: Protokol o měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v používaném kamenivu



Výzkumný ústav stavebních hmot, a. s.

Hněvkovského 30/65, 617 00 BRNO

zapsaná v OR u Krajského soudu v Brně, oddíl B, vložka 3470

IČO: 26232511

DIČ: CZ26232511

Radionuklidová laboratoř

Povolení SÚJB ze dne 1.11.2006 na dobu neurčitou, č.j.: 53241/2006

tel. č.: +420 543 529 321

mobilit: +420 723 964 260

www.vustah.cz

e-mail: radionuklidy@vustah.cz

Protokol

o měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech

č. 128/2014

Specifikace zkoušky: Systematické měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech na základě zákona 18/1997 Sb. ve znění pozdějších předpisů §6 odst. 6. Tuto činnost podrobněji upravuje vyhláška SÚJB č. 307/2002 Sb. ve znění pozdějších předpisů (dále jen vyhláška) §96, příloha č. 10, tabulky č. 1, 2, 3.

Měřicí metodika: spektrometrie záření gama

Použitý přístroj: spektrometr InSpector, GC3018 P-Type Ge detektor firmy CANBERRA

Kalibrace přístroje: standardy RM typ CBSS, ČMI IIZ Praha dne 24.7.2012, platnost do 31.12.2014

Měření provedl: Radionuklidová laboratoř, pí. Jáhlová

Měřeno dne: 17.6.2014

Vzorek č.: 128

Měřený materiál: Přírodní těžné kamenivo - Žabčice

Datum a způsob odběru vzorku: 5.5.2014

Závod, místo, osoba: QUALIFORM SLOVAKIA s.r.o., šterkovna Žabčice, Ing. Záchková

Datum výroby: 5.5.2014

Objednatel: QUALIFORM SLOVAKIA s.r.o., Lesní 693, 664 01 Bilovice nad Svitavou

Výrobce: Pískovna Žabčice s.r.o., Slovanské náměstí 9, 612 00 Brno

Výsledky měření:

⁴⁰ K	<i>u</i>	²²⁶ Ra	²³² Th	<i>u</i>
hmotnostní aktivita v Bq/kg		hmotnostní aktivita v Bq/kg	hmotnostní aktivita v Bq/kg	
750	±68	<15	18	±2

u - hodnota rozlišení nejmenší typická s použitím koeficientu rozšíření 2, který odpovídá intervalu spolehlivosti 95 %

Stanovení indexu hmotnostní aktivity dle vyhlášky §3 písm. h): $I = 0,38 \pm 0,02$

Hodnocení:

Index hmotnostní aktivity nepřevyšuje směrnou hodnotu $I = 0,5$ stanovenou vyhláškou příloha č. 10, tabulka č. 2 pro stavební materiály určené ke stavbě zdi, stropů a podlah ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi. Index hmotnostní aktivity nepřevyšuje směrnou hodnotu $I = 1$ stanovenou vyhláškou příloha č. 10, tabulka č. 2 pro ostatní stavební materiály určené k použití ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi. Index hmotnostní aktivity nepřevyšuje směrnou hodnotu $I = 2$ stanovenou vyhláškou příloha č. 10, tabulka č. 2 pro stavební materiály určené k použití jinému než ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi. Hmotnostní aktivita ²²⁶Ra nepřevyšuje mezí hodnotu 300 Bq/kg stanovenou vyhláškou příloha č. 10, tabulka č. 1 pro stavební materiál (stavební kámen, písek, šterk, kamenivo a jily) používaný pro stavby s obytnými nebo pobytovými místnostmi.

Protokol vydán dne: 17.6.2014

Mgr. Vilma Poloučková, Ph.D.

Mgr. Vilma Poloučková, Ph.D.
odpovědná osoba se ZOZ

Radionuklidy: 1. SLOVAKIA SLOVAKIA S.R.O.

Výzkumný ústav
stavebních hmot, a.s.
Hněvkovského 65, 617 00 Brno, CZ
IČ: 26232511 DIČ: CZ26232511

Ing. Rašek Holesinský
ředitel, člen představenstva

1. SLOVAKIA SLOVAKIA S.R.O.