



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 VYUŽITÍ SUROVIN NA BÁZI
SKELNÝCH RECYKLÁTŮ**

THE STUDY OF UTILIZATION OF RAW MATERIALS BASED ON GLASS RECYCLATE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Bajer

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK, CSc.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Tomáš Bajer
Název	Problematika využití surovin na bázi skelných recyklátů
Vedoucí práce	prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

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

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- i) Pytlík, P., Technologie betonu, VUTIUM Brno 2000, ISBN 80-214-1647-5
- ii) Rasmus R. Petersen, Jakob König, Yuanzheng Yue, The mechanism of foaming and thermal conductivity of glasses foamed with MnO₂, Journal of Non-Crystalline Solids, Volume 425, 1 October 2015, Pages 74-82, ISSN 0022-3093, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2015.05.030>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309315300491>)
- iii) SLIVKA, V., DIRNER, V., KURAŠ, M., Odpadové hospodářství I : praktická příručka. 1. vyd. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2006. 130 s. ISBN 80-248-1245-2.
- iv) BECHNÍK, B., Legislativa k recyklaci fotovoltaických panelů: Srovnání evropské směrnice a českého zákona. Tzb-info.cz [online]. 20. 8. 2012 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z:

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Evropská směrnice EU 2012/19/EU vyžaduje od roku 2015 zajistit u solárních panelů při jejich likvidaci 70% recyklaci a 80% využití, tj. minimálně 70 % panelu se musí recyklovat na druhotné suroviny a dalších 10 % se může využít například pro výrobu energie. Pouze zbylých 20 % lze zlikvidovat uložením na skládku. Typický krystalický solární panel (většinou panely instalované v ČR) obsahuje největší hmotnostní podíl skla, okolo 70 %, dalších asi 15 % hmotnosti tvoří plasty (EVA fólie a tedlar) a 10 % hliníkový rám, zbylé komponenty pak okolo 5 %. Vzhledem k technickým vlastnostem skla panelů je recyklace jen podmíněně použitelná a hledají se další možnosti pro jeho účelné využití.

V této souvislosti proveďte:

- i) přehled surovin pro výrobu skla, technologie a druhy vyráběných skla,
 - ii) literární rešerši způsobů využití odpadního skla ve formě skelného recyklátu,
 - iii) ověření využití skelných odpadů ve výrobcích s bezcementovými pojivy,
 - iv) související fyzikálně-mechanické zkoušky na zkušebních výrobcích pro ověření jejich užitných vlastností,
 - v) navrhnete způsob průmyslové výroby pro využití skelného recyklátu,
 - vi) posuďte potenciál využití odpadního skelného recyklátu pro výrobky s netradičními pojivy
- Při vypracování diplomní práce dbejte zásad platných na FAST VUT Brno; požadovaný rozsah diplomové práce 70 - 80 stran včetně tabulek a grafů.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá studiem využití odpadního solárního skla. Studium problematiky vychází z Evropské směrnice 2012/19/EU o recyklaci fotovoltaických panelů a s ní související povinnosti uložené členským státům ohledně likvidace a recyklace těchto zařízení. Dále jsou popsány způsoby recyklace fotovoltaických panelů, jsou shrnuty poznatky z výroby užitkového a solárního skla. Praktická část je zaměřena na ověření využitelnosti skelného recyklátu z fotovoltaických panelů ve výrobcích pojených polymerními pojivy. Ověřeny byly fyzikálně mechanické vlastnosti zkušebních dlaždic pojených polypropylenem a polyethylentereftalátem, a rovněž akustická pohltivost výrobků pojených epoxidovou pryskyřicí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotovoltaika, solární panel, skelný recyklát, recyklace, odpadní materiál, polymer, akustická pohltivost, ohrusnost, dlaždice

ABSTRACT

Presented work deals with the problem of solar glass waste recycling. In theoretical part recent EU regulation regarding waste management is presented. Different ways of PV panels recycling are explained as well as raw materials for glass production are listed. Differences between regular and solar glass is explained. In experimental part different recipes using solar glass waste and polymer binders are presented. Grindability was tested on specimen tiles. Potential of solar glass waste for manufacturing products with acoustic properties was examined.

KEYWORDS

Photovoltaic panels, solar glass waste, recycling, waste material, polymer, acoustic absorption, grindability, tile.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Tomáš Bajer *Problematika využití surovin na bázi skelných recyklátů*. Brno, 2017. 86 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 11. 12. 2017

Bc. Tomáš Bajer
autor práce

V první řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům, kteří mě během celé doby studia podporovali a byli mi při studiu oporou. Díky nim mohla vzniknout tato diplomová práce.

Dále bych rád poděkoval vedoucímu práce panu prof. RNDr. Ing. Stanislavu Šťastníkovvi, CSc. za odborné vedení a užitečné rady. Mé díky patří rovněž zaměstnancům firmy VIA ALTA panu Ing. Janu Čermákovi a jeho kolegům Ivovi Čonkovi a Rostislavu Smíškovi, kteří mi pomáhali s výrobou zkušebních vzorků v jejich laboratoři.

Obsah

1.0 Úvod	10
2.0 Evropská směrnice 2012/19/EU	12
2.1 Recyklace	12
3.0 Fotovoltaika	15
3.1 Fotovoltaické panely	15
3.2 Fotovoltaický jev	15
3.3 Typy fotovoltaických panelů	17
3.4 Skladba panelu	19
4.0 Sklo	22
4.1 Vznik skla	22
4.2 Vstupní suroviny	22
4.3 Sklotvorné suroviny	23
4.3.1 Sklářský písek	23
4.3.2 Soda a potaš	23
4.3.3 Vápenec či dolomit	24
4.4 Druhy skla podle sklářského kmene	25
4.4.1 Sodnovápenatá skla	25
4.4.2 Olovnatý křišťál a křišťálové sklo	25
4.4.3 Boritokřemičité klo	25
4.4.4 Speciální skla	26
4.5 Technologie výroby plochého skla	26
4.5.1 Zakládání vsázky	26
4.5.2 Tavení v tavícím agregátu	27
4.5.3 Plavení skla	27
4.5.4 Chlazení skla	27
4.5.5 Řezání a expedice	27
5.0 Solární sklo	29
5.1 Propustnost solárního skla	30
5.2 Mechanická odolnost solárního skla	31
5.3 Recyklace solárního skla	32
6.0 Využití odpadního skla ve formě skelného recyklátu	33
6.1. Glassfalt	33

6.2. Sklo jako náhrada kameniva v betonu	33
6.3 Sklo jako náhrada cementu v betonu	35
6.4 Pěnové sklo	35
7.0 Experimentální část.....	36
7.1 Odpadní sklo	36
7.2 Stanovení křivky zrnitosti	36
7.2.1 Postup zkoušky	36
7.3 PET odpadní lahve jako pojivo.....	38
7.3.1 Receptury	41
7.3.2 Stanovení objemových hmotností, pevností v tlaku a v tahu za ohybu.....	41
7.3.3 Stanovení pevností v tlaku.....	47
7.4 Polypropylen jako pojivo.....	49
7.4.1 Bílý polypropylen – Makroplus.....	49
7.4.2 Černý polypropylen.....	50
7.4.3 Expandovaný polypropylen.....	51
7.4.4 Receptury	52
7.4.5 Stanovení užitečných vlastností.....	53
7.5 Výroba zkušebních dlaždic.....	59
7.5.1 Stanovení obrusnosti metodou podle Böhma	60
7.5.2 Postup zkoušky.....	60
7.5.3 Výsledky měření	61
7.6 Nasákavost, mrazuvzdornost, hloubka průsaku tlakovou vodou.....	62
7.7 Epoxidová pryskyřice jako pojivo	62
7.8 Měření akustické pohltivosti.....	66
7.8.1 Výsledky měření.....	67
8.0 Návrh průmyslové výroby pro využití skelného recyklátu	68
9.0 Shrnutí výsledků	70
10.0 Závěr.....	74
Použitá literatura	76
Seznam použitých zkratk a symbolů	82
Seznam obrázků	83
Seznam grafů	85
Seznam tabulek	86

1.0 Úvod

Země přijímá obrovské množství sluneční energie, neboť uvnitř Slunce probíhá fúzní reakce, která během jedné minuty vyprodukuje dostatek energie k pokrytí světové spotřeby pro jeden rok. Během jednoho dne poskytne tolik energie, kolik naše moderní společnost spotřebuje během 27 let. Přestože je solární energie zdarma a její zdroj nevyčerpatelný, začalo ji lidstvo využívat relativně nedávno. První solární články vznikly před zhruba 30 lety a k největšímu posunu v jejich efektivitě došlo během rozvoje polovodičové technologie. Využívání solární energie pomocí fotovoltaických panelů má oproti jiným zdrojům energie několik nesporných výhod – aktivně neznečišťují životní prostředí, neobsahují žádné pohyblivé komponenty, které by se mohly porouchat, nevyžadují téměř žádnou údržbu či dozor a jejich životnost dosahuje 20-30 let s minimálními náklady na provoz. Všechny tyto aspekty, spolu s neustále se zvyšující efektivitou, vedou k tomu, že fotovoltaika je považována za jednu z nejslibnějších variant obnovitelných zdrojů energie pro budoucí energetickou spotřebu lidstva.

Odlehle oblasti si tak mohou samy produkovat elektrickou energii výstavbou menších či větších fotovoltaických systémů. Poptávka po těchto systémech roste především v rozvojových zemích, kde se tato decentralizovaná modulární řešení ukazují jako praktičtější než výstavba rozvodných sítí od klasických elektráren do velkého množství od elektrárny a od sebe navzájem vzdálených sídel či obydlí. [1]

Nezanedbatelná není ovšem ani zvyšující se poptávka ve vyspělých zemích, která je hnána jednak sílícím ekologickým smýšlením a snahou snižovat emise skleníkových plynů vedoucích ke změně klimatu, tak i v mnoha případech velmi štědrá dotační politikou státu týkající se solární energie, či energie z obnovitelných zdrojů obecně.

Solární energie má jednu zásadní nevýhodu a tou je schopnost produkovat elektrickou energii pouze přes den, kdy rovněž může být limitována oblačností. Vliv hraje rovněž podnebí a z toho plynoucí mění se délka dne a úhel dopadu slunečních paprsků. Tyto negativní faktory se poslední dobou snaží přední technologičtí giganti vyvážit usilovným výzkumem a vývojem vysokokapacitních baterií či bateriových setů, které mají za úkol docílit maximální energetické stability tzv. „off grid“ systémů, tedy ostrovních systémů nepřipojených na rozvodnou síť, či maximální energetické soběstačnosti systémů na síť připojených, a tím snižovat jejich finanční náklady na provoz spojené s odběrem elektřiny ze sítě. Zvyšující se obliba elektromobility, jakož i kroky vlád některých vyspělých států zakázat do budoucna prodej aut se spalovacími motory, povedou k ještě rychlejšímu vývoji v této oblasti a z toho plynoucí dostupnosti systémů fotovoltaika-akumulátor pro širší obyvatelstvo.

Do budoucna z toho vyplývá zvyšující se potřeba tyto systémy bezpečně a ekologicky recyklovat. Solární panely z počátků rozmachu této technologie již začínají dosluhovat a hledají se nové cesty pro využití použitých materiálů, z nichž jedné z nich je věnována tato diplomová práce.

2.0 Evropská směrnice 2012/19/EU

Směrnice evropského parlamentu a Rady 2012/19/EU ze dne 4. července 2012 o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (OEEZ) ukládá členským státům nové povinnosti ohledně likvidace a recyklace těchto zařízení. Samotné provedení těchto úkonů není nijak dáno a je tedy na samotných členských státech, jakým způsobem se k problému postaví – podmínkou ovšem bylo zapracovat tyto změny do národních legislativ do 14. února 2014. V České republice byly tyto změny zapracovány Vyhláškou č. 178/2013 Sb. ze dne 24. června 2013, kterou se mění Vyhláška č. 352/2005 Sb., o podrobnostech nakládání s elektrozařízeními a elektroodpady a o bližších podmínkách financování nakládání s nimi, a která vstoupila v platnost 28. června téhož roku.

Ve Směrnici 2012/19/EU byly zařazeny fotovoltaické panely do kategorie 4 přílohy I, což znamená, že musí být využito minimálně 80 % panelu, přičemž připraveno k opakovanému použití a recyklováno musí být minimálně 70 % panelu. Rozdíl tvořící 10 % může být využit jinak než recyklací, například spálením ve spalovně. Pouze zbývajících 20 % panelu může být zlikvidováno uložením na skládku. [2]

2.1 Recyklace

Směrnice rovněž neuvádí, kdo by měl fotovoltaické panely na konci jejich životnosti recyklovat. Nabízí se 5 možností [3]:

- 1.) Výrobci – museli by garantovat, že jsou schopni panely kompletně recyklovat, tedy získat zpět od zákazníků, kterým je prodali, a následně je dle platných směrnic recyklovat a připravit k novému využití. Za tímto účelem by bylo nutné vybudovat organizovanou síť odběru panelů, jejich distribuci na recyklační linky, výběr vhodných firem, které jsou schopny zajistit potřebný stupeň recyklace, a k tomu snést potřebnou administrativní a personální zátěž. Z tohoto důvodu je výhodnější založit

tzv. kolektivní systém (viz bod 3). Tímto způsobem jsou dle zákona řešeny recyklace panelů dodaných na trh po 1.1. 2013.¹

- 2.) Provozovatelé nejsou schopni ze své podstaty recyklaci zajistit. Znamenalo by to pro každou fotovoltaickou elektrárnu či majitele panelů použité panely rozebírat a mít vlastní recyklační linku.
- 3.) Kolektivní systém – spojují v sobě odpovědnost výrobce i provozovatele. Jde o systém zpětného odběru jako u běžného elektrozařízení. Výhodou tohoto způsobu zajištění recyklace je zázemí a zkušenost těchto společností s recyklační problematikou. Za kolektivními systémy stojí často velcí výrobci elektrospotřebičů, vybudovali síť odběrných míst a umí recyklovat velké objemy elektrošrotu.
- 4.) PV Cycle – Kolektivní systém specializující se na problematiku fotovoltaických panelů a elektrozařízení s fotovoltaikou spojených. Poskytuje možnost výrobcům panelů vypořádat se s jejich legislativními závazky efektivním způsobem – zaregistrují výrobce u národního orgánu odpovědného za regulaci odpadu z elektrických a elektronických zařízení (v České republice je tímto Ministerstvo životního prostředí) a informují je o produktech uváděných na trh či o jejich statutu se odpadem. Zajišťuje odběr panelů buďto na kontaktních sběrných místech či zajistí individuální odběr. Díky své specializaci je schopna recyklovat křemíkový panel až z 96 %. [4] V systému PV Cycle bylo v roce 2012 zapojeno všech 27 zemí EU

¹ Pro panely dodané na trh před tímto datem je situace odlišná. Na rozdíl od běžného elektroodpadu, kde je v pořizovací ceně schován poplatek za recyklaci jak kupovaného kusu, tak za recyklaci všech na trhu existujících historických elektrozařízení, a tedy kvůli velkému objemu neustále kupovaných spotřebních elektrozařízení není problém vybrat dostatek peněz na likvidaci těch historických, je situace u fotovoltaických panelů opačná. Objem nově zakoupených fotovoltaických panelů je v porovnání s objemem panelů zakoupených během solárního boomu v ČR před rokem 2013 zanedbatelný. Promítnutí tohoto poplatku do nově zakoupených panelů by tedy mělo extrémně negativní vliv na jejich cenu, která by byla pro nové zájemce neúnosná. Kdo zaplatí recyklaci panelů dnes již neexistujících výrobců zákon neřeší.

a EFTA. Podíl výrobců a dodavatelů v systému překročil 90 % objemu panelů uváděných na trh v těchto zemích [5].

5.) Trh – existují firmy, které se specializují na získávání cenných surovin z panelů, které buďto dále zpracují či přeprodají. Těmito surovinami mohou být například stříbro či měď. Nicméně fotovoltaické panely jsou z drtivé většiny složeny ze skla, které je téměř bezcenné. Navíc je toto sklo znečištěno, což drasticky snižuje jeho cenu a stává se tak odpadem. Právě o využití tohoto odpadního skla bude pojednávat experimentální část této práce.

3.0 Fotovoltaika

3.1 Fotovoltaické panely

Nejen kvůli výtěžnosti drahých kovů, ale i kvůli přítomnosti toxických látek je nutno panely recyklovat a ekologicky likvidovat. Druhů panelů existuje nepřeberné množství lišící se použitými materiály, účinností či typem prostředí – pozemské či vesmírné. Všechny však fungují na stejném principu – fotovoltaickém jevu.

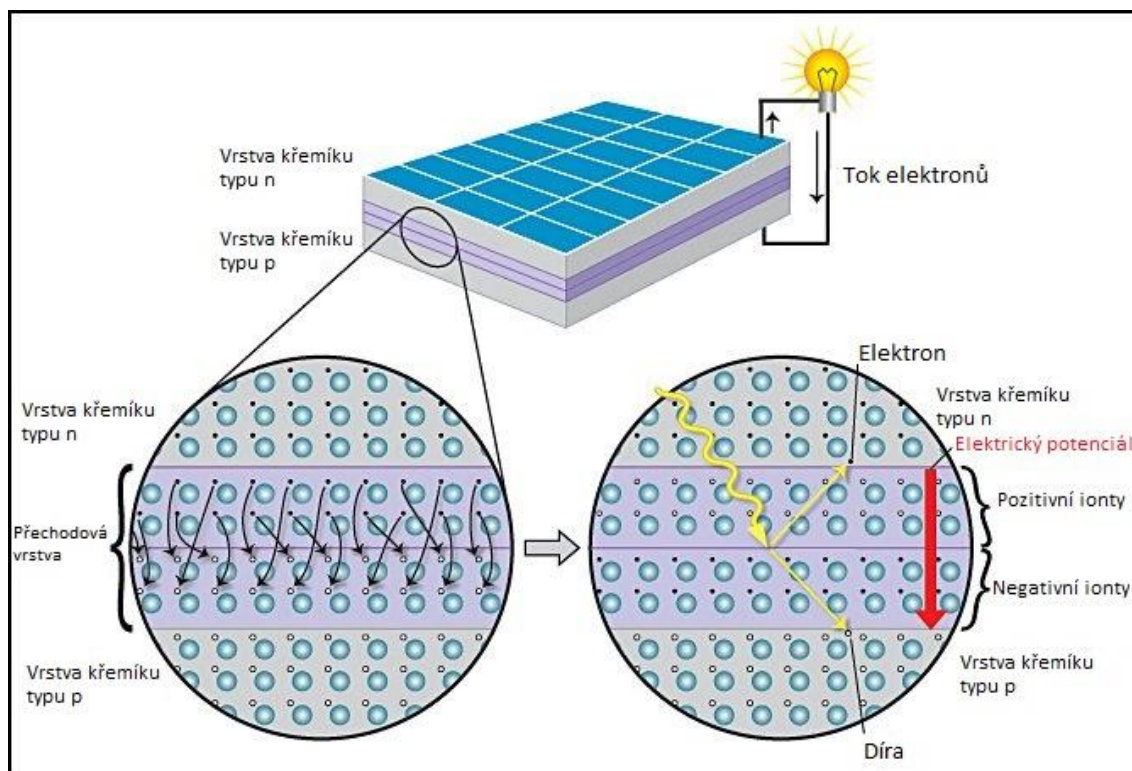
3.2 Fotovoltaický jev

PV článek je tvořen dvěma typy křemíkových polovodičů nazývaných p-polovodič a n-polovodič. P-polovodič je vytvořen přidáním atomů, např. bóru, které mají ve své vnější vrstvě o jeden elektron méně než křemík. Protože bór má o jeden elektron méně, než kolik je potřeba k vytvoření vazeb s křemíkovými atomy, vznikne elektronová díra.

N-polovodič je vytvořen přidáním atomů, které mají v jejich vnější vrstvě o elektron více než křemík, např. fosfor. Vytvoří se vazby s křemíkovými atomy, ale jeden elektron není nijak vázán a má tedy volnost pohybovat se v křemíkové struktuře.

Solární článek sestává z vrstvy křemíku typu P nacházející se vedle vrstvy křemíku typu N. Ve vrstvě N tak vzniká přebytek elektronů a ve vrstvě P přebytek děr. Poblíž styku těchto vrstev se elektrony N vrstvy přesunou do děr P vrstvy. Tato oblast na styku vrstev se nazývá „přechodová vrstva“.

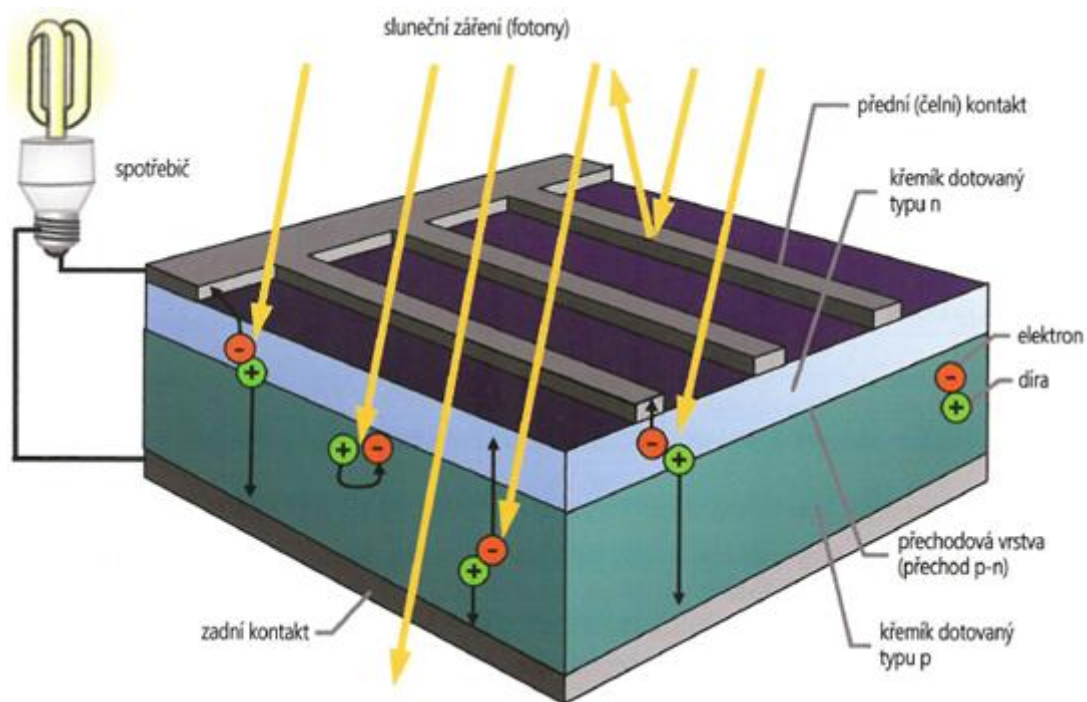
Když jsou v přechodové vrstvě všechny díry zaplněny elektrony, strana P přechodové vrstvy, kde předtím byly díry, nyní obsahuje negativně nabitě ionty a strana N přechodové vrstvy, kde předtím byly elektrony, nyní obsahuje pozitivně nabitě ionty. Přítomnost těchto opačně nabitých iontů vytváří vnitřní elektrické pole, které zabraňuje dalším elektronům N vrstvy, aby zaplnily díry P vrstvy – tvoří elektrickou bariéru. Základní vlastností tohoto PN přechodu je, že volné elektrony mohou přecházet z vrstvy P do vrstvy N, zatímco v opačném směru nikoli.



Obrázek 1: Princip vzniku P-N přechodu ve fotovoltaickém článku [6]

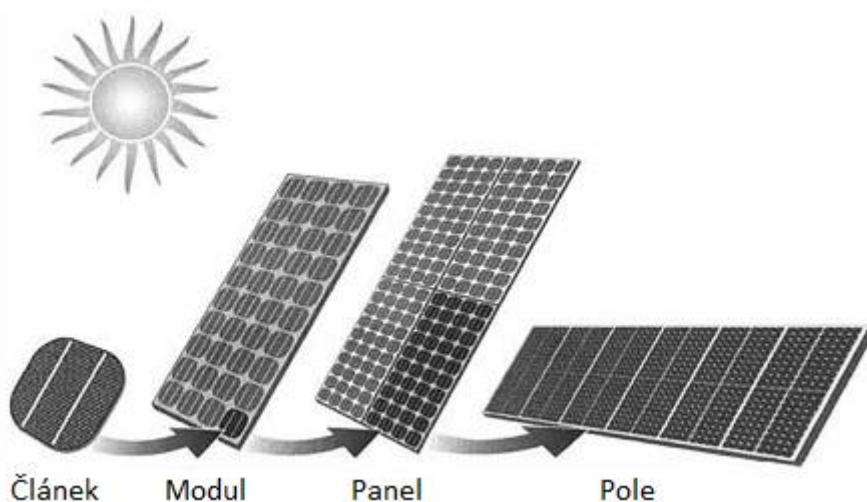
V momentě, kdy na článek dopadne sluneční záření, předávají fotony svou energii atomů v krystalické mřížce křemíku obou vrstev a uvolňují z nich elektrony (foton musí mít dostatečnou energii na to, aby byl schopen elektron z atomu vyrazit). V nepřítomnosti PN vrstvy by tyto elektrony jednoduše zaplnily díry a docházelo by k rekombinaci a článek by se nemohl stát zdrojem napětí. Za přítomnosti PN vrstvy dojde k hromadění volných elektronů v horní N vrstvě, jelikož se přes elektrickou bariéru nemohou dostat do dolní P vrstvy, a naopak k přechodu světlem uvolněných elektronů ze spodní P vrstvy do horní N vrstvy, kde se tak jejich množství dále navyšuje.

Pokud tyto dvě vrstvy spojíme vodičným materiálem, nahromaděné elektrony v horní N vrstvě budou moci skrze vodič obejít elektrickou bariéru PN přechodu a dostat se tak do spodní P vrstvy, kde zaplní díry. Pokud k vodiči připojíme spotřebič, vznikne tak elektrický obvod a jím protékat elektrický proud. [6][8]



Obrázek 2: Princip fungování fotovoltaického článku při dopadu slunečních paprsků. [7]

Články jsou spojovány do modulů, ty pak do solárních panelů a ty posléze mohou být spojeny do polí.



Obrázek 3: Schéma zapojení fotovoltaických článků do modulů a panelů. [9]

3.3 Typy fotovoltaických panelů

Solární články se dělí podle technologie na monokrystalické, polykrystalické či tenkostěnné.

Monokrystalické křemíkové články jsou vyrobeny z křemíku nejvyšší kvality, dosahují nejvyšších účinností a nejdelších životností. Kvůli způsobu výroby čistého křemíku Czochralského metodou tažením monokrystalu válcovitého tvaru nabývají tyto články charakteristického osmiúhelníkového tvaru – válec monokrystalu je ze 4 stran ořezán. Tyto články mají rovněž charakteristickou černou barvu. Jsou rovněž nejdražší.

Polykrystalické křemíkové články jsou vyráběny roztavením křemíku a nalitím do čtvercové formy, kde je následně ochlazen a vznikne křemíkový plátek, tzv. wafer, horší kvality než u monokrystalického článku. Z toho vyplývá nižší účinnost, nižší cena a kratší životnost. Typické je modré zabarvení a dokonale čtvercové tvary.



Obrázek 4: Vzhled různých druhů fotovoltaických panelů - zleva: monokrystalický, polykrystalický, tenkovrstvý
[11][12][13]

Tenkovrstvé panely mohou mít jako polovodičovou složku buďto amorfnní křemík, kadmium-tellurovou vrstvu (CdTe), vrstvu z kombinace mědi, galia, india a selenu (CIS, CIGS) či z vrstvy organického materiálu. Tyto panely mají jednotlý jednobarevný vzhled. [10]

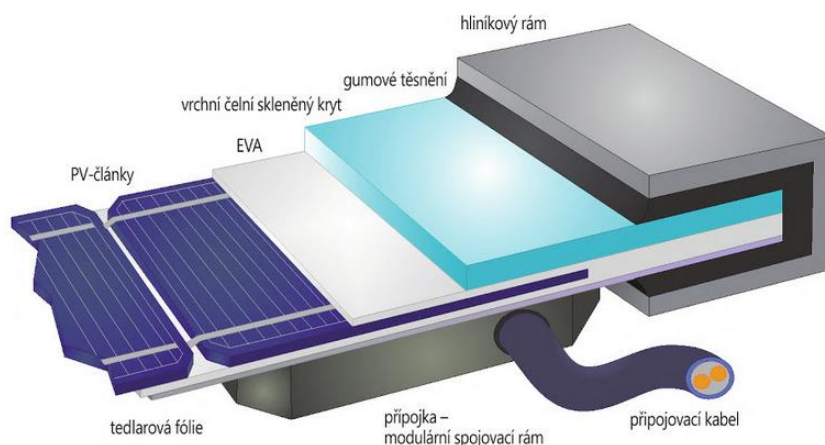
Přibližné úrovně účinnosti jednotlivých druhů panelů popisuje tabulka 1.

Tabulka 1: Přehled účinností různých materiálů fotovoltaických článků [7]

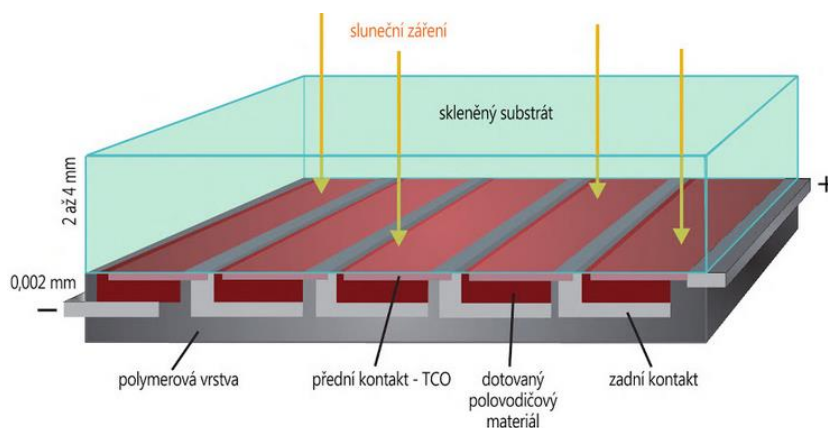
Materiál článku	Maximální laboratorní účinnost [%]	Maximální provozní účinnost sériového článku [%]	Typická modulární účinnost článku [%]	Plocha potřebná na 1 kW [m ²]
Monokrystalický křemík	24,7	21,5	15	6,7
Polykrystalický křemík	18,5	15	14	7,2
Amorfní křemík	12,7	8	6	16,7
CIS/CIGS	19,5	11	10	10,0
CdTe	16,5	10	7	14,3

3.4 Skladba panelu

Ať už se jedná o panel monokrystalický, polykrystalický či tenkovrstvý, všechny mají jedno společné – krycí skleněnou vrstvu. Solární články jsou velmi citlivé – jsou velmi tenké a snadno se rozbijí a rovněž podléhají korozi vlivem vlhka. Aby došlo k zabránění poškození článků, ukládají se do speciálního plastu mezi vrchní skleněný kryt a plastovou fólii na zadní straně. Někteří výrobci používají sklo i na spodní straně panelu – to zajišťuje mechanickou stabilitu. Jako plastového lože se používá dvou tenkých fólií z etylenvinylacetátu (EVA). Při teplotě asi 100 °C se spojují s články a se sklem, tento postup se nazývá laminování. Hotový laminát chrání články od vnějších povětrnostních vlivů.



Obrázek 5: Schéma základní konstrukce fotovoltaického modulu [7]



Obrázek 6: Průřez
fotovoltaického modulu
na bázi tenkých vrstev [7]

Kromě technologie tlustovrstvých či tenkovrstvých křemíkových nebo jiných tenkovrstvých technologií jsou ve stádiu výzkumu a vývoje i další technologie, například organické solární články, barvivy senzibilizované články či nanosolární články. Všechny ovšem musí být chráněny proti povětrnostním podmínkám, ať už proti vlhkosti či dešťovým nebo sněhovým srážkám, tak proti krupobití. K tomu slouží horní krycí vrstva z kaleného skla. Ta je v solárních panelech zastoupena jednoznačně nejvíce.

Tabulka 2: Přehled hmotnostních podílů jednotlivých složek fotovoltaických článků [14][15][16]

	c-Si (krystalický křemík) [%]	a-Si (amorfní křemík) [%]	CIS (měď-indium- selenový) [%]	CdTe (kadmium- tellurový) [%]
Sklo	74	90	85-97	84-97
Hliník	10	10	12	0,1
Polymery*	6,5-7,5	10	3-6	3,1-3,6
Křemík	~3	<0,1		
Měď	0,4-0,6		0,85-1,5	0,02-1
Tellur				0,07-0,13
Indium			0,02	
Zinek	0,12	<0,1	0,12	0,01
Stříbro	~0,1			~0,01
Kadmium			0,005	0,11-0,13
Selen			0,03	
Olovo	<0,1	<0,1	<0,1	<0,01

* EVA fólie (etylenvinylacetát) + tedlarová fólie (polyvinyl fluorid)

Z tabulky 2 je patrné, že největší podíl na hmotnosti panelu má sklo a hliník, zatímco ostatní komponenty se pohybují v řádech setin procenta až procent.

Hliník, jehož primární produkce je velmi energeticky náročná – 200MJ/kg elektřiny, se dá levně recyklovat se spotřebou 8MJ/kg energie a výtěžností blížící se 100 %.

Plastové komponenty jsou v praxi téměř nerecyklovatelné a během recyklačního procesu celého panelu vyhoří.

Fotovoltaické články, jež obsahují křemík solární kvality, se vyplatí recyklovat, protože se podílejí až 80 % na spotřebě energie na výrobu panelu a zhruba 50 % na jeho ceně. Na konci životnosti jsou přitom články v podstatě nezměněny (životnost fotovoltaického panelu je definována poklesem výkonu o 20 %. Téměř všichni výrobci běžně dostupných krystalických a tenkovrstvých panelů garantují maximální pokles účinnosti o 10 % za 10 nebo 12 let a 20 % za 25 let. V praxi se na nejstarších instalacích pokles účinnosti po 25 letech pohybuje kolem 6 až 8 %, z čehož vyplývá, že skutečná životnost bude výrazně delší).

Těžké kovy se podílejí na hmotnosti panelů minimálně, jejich zastoupení se pohybuje pod desetinami procenta. Přestože se energetická náročnost recyklace téměř rovná s výrobou z primárních surovin, je nutno tyto látky z panelu odstranit, protože jsou toxické a pro životní prostředí škodlivé. U stříbra se přepokládá, vzhledem k očekávanému vyčerpání ekonomicky těžitelných zásob, že jeho cena do budoucna poroste. [17]

Vzhledem ke směrnici 2012/19/EU a z ní vyplývajícího závazku recyklovat panel aspoň z 80 % je tedy zřejmé, že ať už bude ekonomická výtěžnost drahých kovů dostatečná či nikoliv, hlavní podstatou recyklace bude zpracování odpadního skla a hliníku, které tvoří drtivou část hmotnosti panelu.

4.0 Sklo

Sklo je obecně homogenní, amorfní, křehká a obvykle průhledná pevná látka. Pod pojmem sklo se v užším smyslu rozumí výhradně sklo křemičitanové, které je další surovinou pro výrobní zpracování. V širším slova smyslu se pod pojmem sklo skrývá nepřeberné množství různých typů skel – borosilikátové, olovnaté, sodnovápenaté hlinitokřemičité a jiné. Z hlediska výrobků se jedná o skla obalová, plochá, optická, umělecká, stavební, neprůstřelná aj.

4.1 Vznik skla

Z hlediska fyzikálního je podstatou procesu výroby skla ochlazování taveniny. Při tavně křemičitého písku dochází k rekrytalizaci krystalické mřížky, která je základem celého procesu. Molekuly, tvořící krystalickou mřížku písku, se během tavnby rozdělí na menší části – radikály, které však mohou samostatně existovat jen při vysokých teplotách, při ochlazování se musí vázat na jiné volné radikály. Při tavnbě se tedy rozbíjí původní krystalická mřížka tavených surovin a radikály se při chlazení opět začnou vázat a vytvářejí zcela novou, kvalitativně odlišnou hmotu – sklo. Podstatou tvorby skla je tedy dostatečně rychlé zchlazení taveniny, aby se nestačila vytvořit nová krystalická mřížka. [18]

4.2 Vstupní suroviny

Suroviny pro výrobu skla se dají rozdělit na sklotvorné, tedy vytvářející samotnou podstatu skla, a ostatní, které mají pouze technologický význam.

Mezi sklotvorné suroviny patří mřížkotvorné (vytvářejí novou krystalickou mřížku – křemičitanové sklo), taviva (umožňují tavnbu, tedy rozpad krystalické mřížky surovin) a stabilizátory (umožňují vznik radikálů, vznik nové krystalické mřížky a její stabilizaci). Tyto suroviny se během tavnby míchají a jejich směs se nazývá sklářský kmen.

Mimo sklotvorné suroviny se používají při sklářské výrobě suroviny, které sklo kalí, čeří (čistí), odbarvují, zrychlují tavnbu a barví do požadovaných odstínů. Těchto

surovin se používá jen velmi malé množství, ale jsou nezbytné, protože dávají sklu jeho výslednou podobu. [18]

4.3 Sklotvorné suroviny

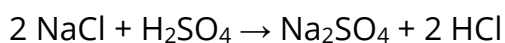
4.3.1 Sklářský písek

Sklářský písek je křemenná surovina obsahující oxid křemičitý – SiO₂. Běžná skla obsahují zhruba 60–80 % oxidu křemičitého, proto je z hlediska množství rozhodující složkou skla. Sklářské písky se upravují, aby získaly optimální vlastnosti pro výrobu skla. Vytěžený písek se plaví a pere, tím se odstraňují mikroskopické nečistoty, také se tím snižuje obsah železa. Poté se suší a prosévá pomocí speciální sít. Kromě toho existují i další úpravy, například otírání – odstraňování povrchových vrstviček železitých nečistot ze zrn písku, protiproudé třídění – odplavují se malé částice, flotace – odstranění těžkých minerálů, chemické čištění, magnetická separace a podobně. Jelikož je každé naleziště sklářského písku svým způsobem jedinečné, je i každá úprava písku jiná a neexistuje univerzální postup. Pro obalová a plochá skla není třeba příliš kvalitní písek, důležitá je jeho cena. Naopak pro křišťálové či solární sklo je důležitý co nejnižší obsah železa. [18]

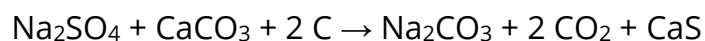
4.3.2 Soda a potaš

Potaš či soda jsou nejdůležitějšími přísadami, které podporují proces tavby. Jsou to sodné či draselné sloučeniny, bez kterých by nebylo možno většinu skel vůbec tavit.

Nejstarším způsobem získávání sody, Na₂CO₃, bylo prosté spalování mořských rostlin. V jejich popelu byla kromě jiných prvků obsažena i soda. V první polovině 19. století sklářství přešlo na syntetickou La Blancovu metodu, ve které se soda vyrábí z chloridu sodného (kamenné soli), za pomoci kyseliny sírové a vápence. Na chlorid sodný se působí koncentrovanou kyselinou sírovou za vzniku síranu sodného a kyseliny chlorovodíkové.

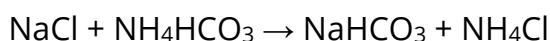


Síran sodný se poté smísí s uhličitanem vápenatým (vápencem) a uhlím a taví se v peci. Během pálení probíhá tato reakce:



Z vychladlé taveniny je poté uhličitan sodný vyloužen vodou.

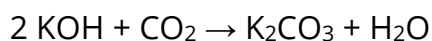
Ze stejné suroviny se vyrábí soda i Solvayovou metodou, při které se používá hydrogenuhličitan amonný. Postup spočívá v tvorbě poměrně málo rozpustného hydrogenuhličitanu sodného (NaHCO_3) reakcí hydrogenuhličitanu amonného a chloridu sodného ve vodném roztoku:



Technicky se postupuje tak, že se do téměř nasyceného roztoku NaCl zavádí nejprve amoniak a poté oxid uhličitý. Vzniklý hydrogenuhličitan sodný se odfiltruje a zahříváním (kalcinací) převede na uhličitan sodný (kalcinovanou sodu) [18][19]:



Potaš K_2CO_3 se kdysi vyráběla pálením stromů, především buků, borovic, dubů, javorů, smrků a vrb. Jelikož ale byla spotřeba dřeva pro výrobu potaše extrémně vysoká (účinnost 0,2-2 %, ze 100 kg dřeva tedy bylo možno vyrobit maximálně 2 kg potaše) a vyplatilo se jej prodat na zpracování pilám, přecházely sklárny v 19. na modernější draselné suroviny. Dnes se vyrábí synteticky – nejprve se provede elektrolýza chloridu draselného za vzniku hydroxidu draselného, vodíku a chloru. Vzniklý hydroxid draselný se pak sytí oxidem uhličitým. Při reakci hydroxidu draselného a oxidu uhličitého vzniká uhličitan draselný [18][20].



4.3.3 Vápenec či dolomit

Sloučeniny vápníku a hořčíku se podílejí na zlepšení tavitelnosti skla a výsledná sklovina se tedy dá déle a lépe tvarovat. Obě sloučeniny jsou obsaženy v popelu spáleného dřeva, ze kterého se vyráběla potaš, a proto se kdysi do sklářského

kmene nepřidávaly. Po upuštění potaše se začal přidávat vápenec. V USA ho posléze nahradil dolomit a jelikož skla tavená s dolomitem byla čistší a levnější, přešly evropské sklárny na dolomit také. Od roku 1960 se používá při výrobě užitkového skla kmenů kombinovaných, ve kterých jsou zastoupeny obě dvě tyto přísady. [18]

4.4 Druhy skla podle sklářského kmene

4.4.1 Sodnovápenatá skla

Většina průmyslově vyráběných skel má velmi podobné složení a obecně se nazývají skla sodnovápenatá. Typické sodnovápenaté sklo je složeno ze 71-75 % oxidu křemičitého (SiO_2 je dodán z písku), 12-16 % oxidu sodného (Na_2O z kalcinované sody Na_2CO_3), 10-15 % oxidu vápenatého (CaO z uhličitanu vápenatého CaCO_3) a z menšího množství dalších složek určených k ovlivnění specifických vlastností skla. Oxid vápenatý či oxid sodný se dá nahradit oxidem hořečnatým (MgO), resp. draselným (K_2O). Sodnovápenaté sklo se používá na lahve, sklenice, běžné stolní sklo a k výrobě plochého skla.

4.4.2 Olovnatý křišťál a křišťálové sklo

Olovnatý křišťál vznikne při náhradě velké části oxidu vápenatého ve kmeni, Typické složení je 54-65% SiO_2 , 25-30% PbO , 13-15% Na_2O nebo K_2O plus další různé minoritní příměsi. Tento typ složení s obsahem oxidu olovnatého nad 24 % dává sklo s vysokou měrnou hmotností a indexem lomu, tudíž sklo s vynikající brilancí a zvukem i s vynikající opracovatelností, která umožňuje vyrábět celou škálu tvarů a dekorů. Typickými výrobky je vysoce kvalitní nápojové sklo, karafy, misky a dekorované zboží. Pokud se oxid olovnatý částečně nebo úplně nahradí oxidem barnatým, zinečnatým nebo sodným, vznikne sklo známé jako křišťálové, které má menší brilanci než olovnatý křišťál.

4.4.3 Boritokřemičité klo

Boritokřemičitá skla obsahují oxid boritý (B_2O_3) a vyšší procento oxidu křemičitého. Typické složení je: 70-80 % SiO_2 , 10-15 % B_2O_3 , 4-8 % Na_2O nebo K_2O

a 2-7 % Al_2O_3 (oxid hlinitý). Skla s tímto složením vykazují vysokou odolnost vůči chemické korozi a vůči teplotním změnám (nízký koeficient tepelné roztažnosti). Jejich použití zahrnuje komponenty pro chemické procesy, laboratorní zařízení, farmaceutické obaly, svítidla, nádobí a okénka pro sporáky. Řada boritokřemičitých skel určených v malém rozsahu pro technické účely spadá spíše do kategorie speciálního skla. Dále se boritokřemičité sklo používá k výrobě skleněného vlákna. Kromě chemické odolnosti a nízkého koeficientu tepelné roztažnosti je oxid boritý důležitý pro rozvlákňování skloviny.

4.4.4 Speciální skla

Toto je velice rozmanité seskupení, které zahrnuje specializované vysoce hodnotné výrobky vyráběné v malém objemu, jejichž složení se výrazně mění podle požadovaných vlastností konečného výrobku. Některé aplikace jsou: speciální boritokřemičité výrobky, optická skla, skla pro elektrotechnologii a elektrotechniku, obrazovky, výrobky z taveného křemene, zátavy, rentgenky, pájkové sklo, sintrované sklo, elektrody, sklokeramika. [21]

4.5 Technologie výroby plochého skla

Mezi dnes nejpoužívanější a nejmodernější postupy výroby plochého skla je metoda tzv. plovoucího skla. Tato metoda díky své podstatě poskytuje skleněné tabule zrcadlové kvality bez optických vad. Spočívá v plavení roztaveného skla na hladině tekutého cínu. Výstup z této technologie představuje sklo zvané „float“, které je dodáváno na trh ve velkoformátových tabulích určených ke zpracování. Téměř většina výrobků z plochého skla je dnes odvozena od floatu.

4.5.1 Zakládání vsázky

Vstupní suroviny jsou na navažovacích linkách naváženy podle receptury odpovídající typu skla. Poté jsou smíchány a následně dopraveny do zásobníků před tavící agregát - pec. Během transportu je ke kmeni přidáno ještě požadované množství skleněných střeptů. Tak vzniká vsázka. V dnešní době jsou tyto operace plně automatizované.

4.5.2 Tavení v tavícím agregátu

Sklářská vsázka je tavena v peci za vysokých teplot, přibližně 1550–1600 °C, pomocí výkonných olejových či plynových hořáků. V průběhu tavení dochází k přeměně vsázky ve sklovinu, která postupně proudí v peci. V oblasti nejvyšších teplot dochází k procesu vyčeření plynů vzniklých rozkladnými reakcemi jednotlivých surovin. Sklovina se během několika hodin zbaví bublin a tepelně i chemicky se homogenizuje.

4.5.3 Plavení skla

Jak sklovina vytéká z tavícího agregátu, přitéká do plavicí lázně na hladinu roztaveného cínu, kde je pomocí principu plavení vytvarována do nepřetržitého pásu skla. Z jednoho konce lázně na druhý postupně klesá teplota skloviny i cínu z 1100 °C na 600°C. Aby mělo sklo požadovanou tloušťku a šířku, jsou do lázně skrze boční těsnění vloženy tvarovací nástroje tzv. top rolny, které pomáhají mechanicky upravovat parametry taženého pásu skla. Samotný pohyb je zajištěn pomocí tahu válců chladicí pece.

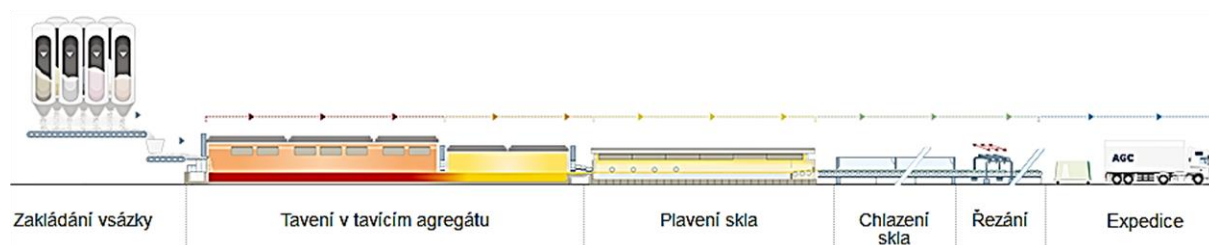
4.5.4 Chlazení skla

Sklovina přetvořená v plavicí lázni do formy nekonečného, zatím plastického, skleněného pásu je vyzdvihnuta pomocí zvedacích válců z cínu a je dále vtažena do tunelu chladicí pece, tzv. chladičky. Zde je skleněný pás postupně ochlazován podle chladicí křivky. Cílem je zajistit perfektní rovinnost a eliminovat nerovnoměrnost vnitřního mechanického napětí, které by mohlo způsobovat lomy. Skleněný pás vystupuje z chladičky s teplotou okolo 60–80 °C a je připraven k řezání.

4.5.5 Řezání a expedice

Po vychlazení je nejprve pás skla zkontrolován pomocí detektoru vad a pak automaticky nařezán na různě velké tabule. Tabule jsou rozděleny do jednotlivých zakázek podle zákazníkem požadovaných rozměrů a úrovně kvality a pomocí

automatizovaných snímacích zařízení naloženy na stojany, popřípadě do dřevěných obalů. Poté jsou tabule skla připraveny k expedici. [22]



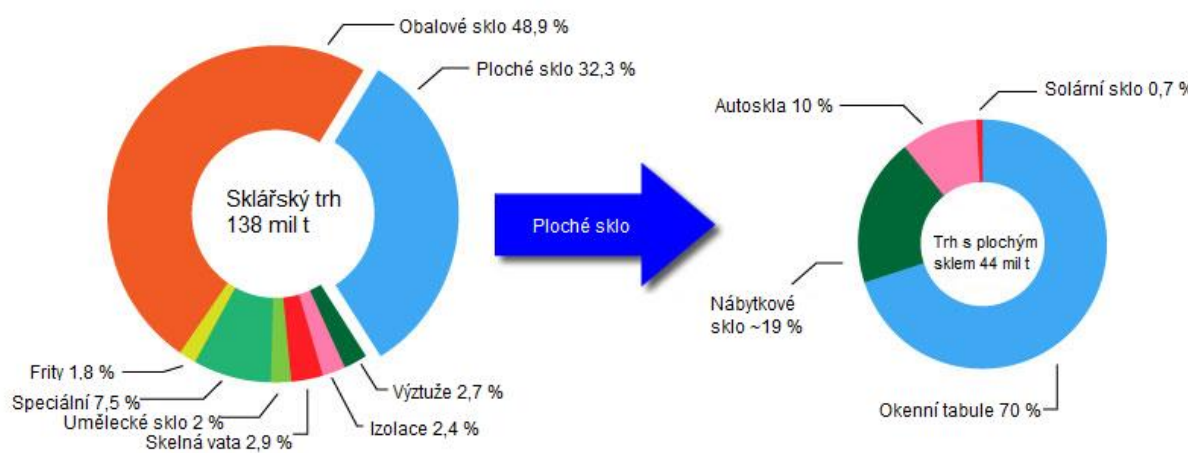
Obrázek 7: Schéma výroby floatového skla [22]

5.0 Solární sklo

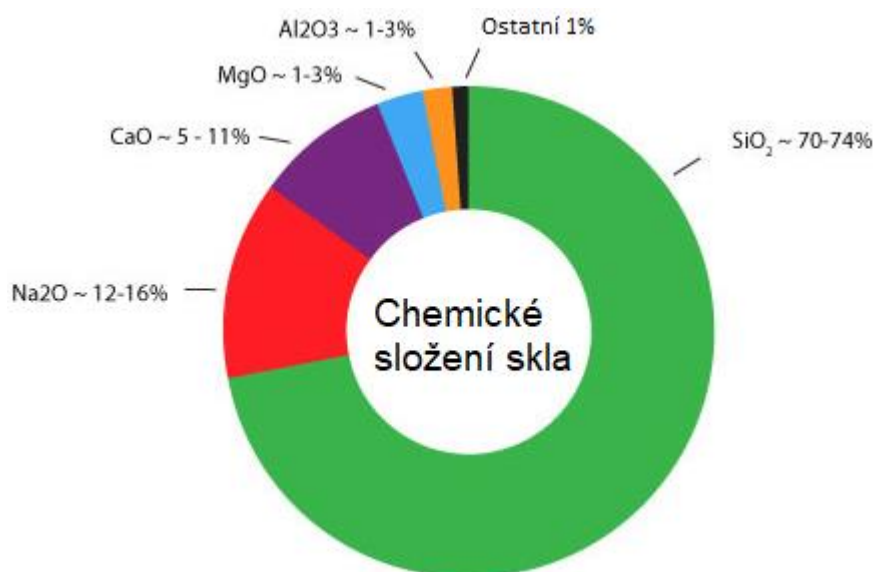
Solární sklo má stejné chemické složení jak běžná komerční skla. Důležitým faktorem je ovšem nízký obsah železa, který zhoršuje propustnost světla. Ten se do skla dostává v podobě oxidů železa nejčastěji z písků, kde jsou rovněž i stopové zbytky oxidu mědi a dalších kovů. V první řadě je třeba tedy zajistit co nejčistší materiál. Posléze se sklo odbarvuje.

Odbarvení skla závisí na přidání surovin, které přebarví tavené sklo z nazelenalé na neutrální barvu. Užití látek odbarvujících sklo závisí na typu pece a tavicího prostředí, na složení sklotvorných surovin a na dalších faktorech. V praxi se používá několik různých postupů.

Základem chemického odbarvování je redukce železa oxidací a jeho vytěkání z tavené skloviny. Pro tento postup se užívá síran sodný, oxid arzenitý a antimonitý a některé další oxidy. [17] Ideální obsah oxidu železa je <120 ppm. [18][23]



Obrázek 8: Grafické vyobrazení podílu plochého skla na trhu se skly, stav z roku 2007 [24]

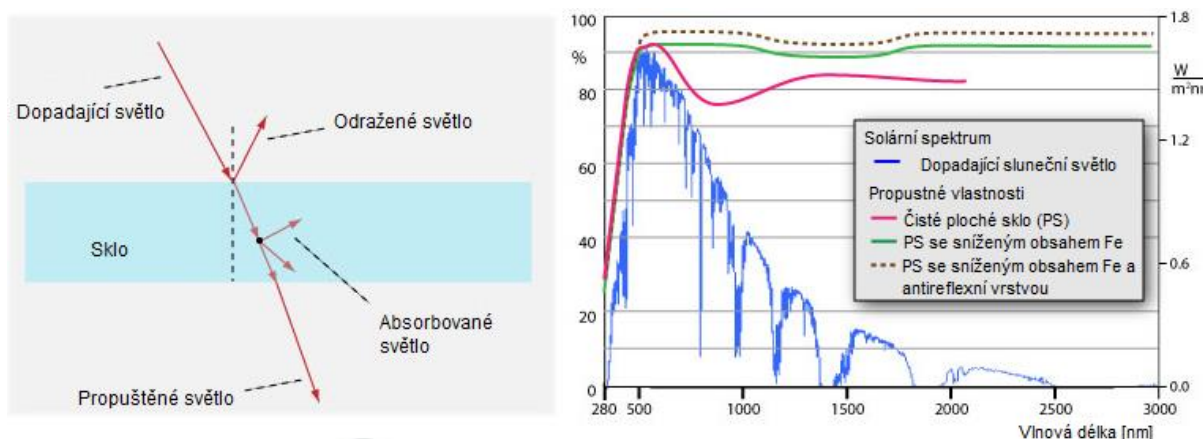


Obrázek 9: Grafické znázornění chemického složení skla [25]

Solární skla jsou posuzována podle propustnosti a mechanická odolnosti.

5.1 Propustnost solárního skla

Klasická komerční skla mají propustnost zhruba 83,7 %. To znamená, že 16,3 % slunečních paprsků by sklem neprošlo a nedopadlo tak na fotovoltaický článek. Tyto ztráty jsou způsobeny železnými nečistotami uvnitř skla, ale rovněž i obyčejným odrazem paprsků od skelného povrchu.



Obrázek 10: Schéma propustnosti skla, závislost propustnosti na typu skla a jeho opracování [25]

Z tohoto důvodu jsou solární skla potažena extrémně tenkou vrstvou z antireflexního materiálu. Tím může být nitrid křemičitý, oxid křemičitý, oxid

titaničitý, oxid wolframový, oxid hlinitý či sulfid zinečnatý. Tyto povlaky nadále zvyšují světelnou propustnost skla o zhruba 3-4 %. [26][27][28][29]

Pro zvýšení propustnosti se rovněž vyrábí sklo s vyraženým vzorem na jedné straně, který má za úkol světlo rozptylovat směrem do panelu a neodrážet jej. Takové sklo pak může dosáhnout propustnosti až 91,7 %. Tato skla jsou používána pro panely s články z krystalického křemíku, zatímco pro tenkovrstvé panely se používá rovné sklo.

V kombinaci s nízkým obsahem železa a antireflexní vrstvou se tak může propustnost dostat až nad hodnotu 94 % [25].

5.2 Mechanická odolnost solárního skla

Co se týče mechanických pevností, jsou solární skla kalena pro zvýšení jejich odolnosti. To spočívá v ohřátí skla na teplotu minimálně 600 °C (lépe nad 620 °C), následně je velmi rychle ochlazeno proudem vysokotlakého studeného vzduchu během 3-10 vteřin. V důsledku toho se povrch skla zmenší a zpočátku vyvine tahová napětí. Jakmile se začne vnitřek skla pomalu ochlazovat, začne se zmenšovat. Již pevný povrch skla je poté donucen se zmenšit, což má za následek vytvoření zbytkového tlakového napětí, zatímco uvnitř skla se vyvine kompenzující tahová napětí. Tlaková povrchová napětí vylepšují pevnost v tlaku, odolnost proti teplotnímu namáhání a ohybovou pevnost, zatímco ostatní vlastnosti jako barva, chemické složení, propustnost, součinitel tepelné roztažnosti či tepelná vodivost zůstávají konstantní. Tvrzená skla jsou zhruba 5-10 x odolnější proti nárazu či teplotnímu šoku (záleží na technologii tvrzení, čím rychlejší ochlazení, tím lépe). Vzhledem k velkému množství energie uložené ve zbytkových napětích se tvrzené sklo při rozbití roztříští na obrovské množství malých neostrých střepů, zatímco klasické sklo se roztříští na menší počet větších a ostřejších střepů. Kvůli podstaty tvrzení skla musí být sklo již předem nařezáno, po jeho vytvrzení již není rozměrová úprava možná – sklo by se roztříštilo. [30]

5.3 Recyklace solárního skla

Z výše zmíněných skutečností vyplývá, že solární sklo jako druhotná surovina má ve sklářském průmyslu omezené využití. Látky užívané pro povrchovou úpravu skla by kontaminovaly sklářskou vsázku. Stejně tak samotné tvrzené sklo, které se taví při vyšší teplotě, by vytvářelo v tavenině zrna a znehodnocovaly výsledný produkt. Problém jsou rovněž polymerní folie, jejichž chemické či tepelné odstranění snižuje ekonomickou výhodu skelného recyklátu jako druhotné suroviny.

6.0 Využití odpadního skla ve formě skelného recyklátu

Ve stavebnictví lze skelný recyklát využít mnoha způsoby, například na výrobu skleněných cihel či tvárnic, obkladového materiálu, podlahových krytin, umělé břidlice či ve formě skleněné vaty jako podlahové izolace. Skleněné střepy mohou rovněž být použity v asfaltu nebo jako zásypový pěchovatelný materiál, především u liniových staveb, ale rovněž jako tepelně izolační zásypový a výplňový materiál staveb. Jemně mleté sklo lze užít jako částečná náhrada cementu v betonu. [31]

6.1. Glassfalt

Jedná se o asfalt, ve kterém je 5–40 % kameniva či písku nahrazeno drcenými skleněnými střepy. Mezi výhody tohoto postupu patří rychlejší schnutí povrchu vozovky z důvodu nenasákavosti skleněných střepů, vyšší odrazivosti světla od povrchu vozovky v nočních hodinách, delšího zadržování tepla při přepravě asfaltového mixu na delší vzdálenosti, snížení ekologické zátěže a ceny.

Mezi nevýhody patří špatná přilnavost asfaltového pojiva na větší střepy kvůli jejich hladkému povrchu. To může způsobovat vážné problémy při obsahu skla vyšším než 15 %, kdy je poté nutno použít adhezní přísadu. Při použití větší frakce na povrchové části vozovky může vlivem odrazu světla docházet k nepříjemnému oslnění. Rovněž může dojít k vyššímu opotřebení pneumatik. Z tohoto důvodu je lepší použít vyššího obsahu skla do základových vrstev vozovek a nižší obsah do povrchových. Rovněž se doporučuje použít sklo jako náhradu písku či jemného kameniva o velikosti menší než 4,75 mm. [32] [33]

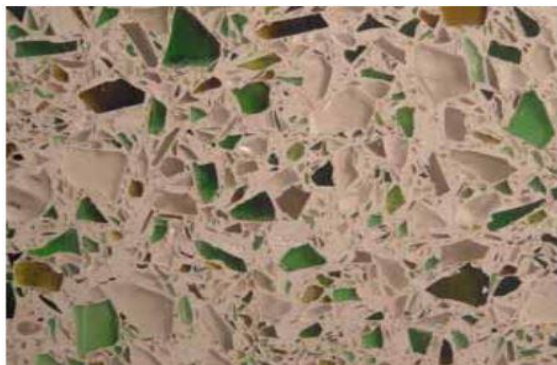
6.2. Sklo jako náhrada kameniva v betonu

Využití skelného recyklátu do tzv. nášlapné vrstvy plošných betonových dlažeb byla ověřována na Vysokém Učení Technickém v Brně pod vedením Ing. Přikryla. V kolovém mlýnu bylo sklo podrceno na frakce 0-1 mm a 1-4 mm a následně přidáno do betonu jako 100% náhrada plniva. Cement byl použit CEM I 42,5 R v množství 300 kg/m³. Jako příměs byl přidán anorganický pigment Fepren TP-105.

Posuzován byl vzhled povrchové vrstvy po vybroušení kvůli architektonickému využití. Výsledky pevnostní zkoušky ukázaly, že je nutno zvýšit mechanickou pevnost této plošné dlažby buď snížením množství záměsové vody použitím plastifikátoru či použitím cementu vyšší pevnostní třídy.



Obrázek 11: Fotografie povrchu tzv. nášlapné vrstvy plošné dlažby [34]



Obrázek 12: Fotografie povrchu broušené desky z pohledového betonu s využitím skelného recyklátu [34]

Rovněž byly zkoumány možnosti využití skelného recyklátu pro pohledové betony. Použity byly frakce drceného skla 0-1 mm, 1-4 mm a 4-8 mm. Jako pojivo byl použit bílý cement s příměsí jemně mleté strusky. Důraz byl opět kladen především na posouzení estetických vlastností betonu. Ze směsi byla vylita deska o rozměru 200x400x50 mm, která byla následně vybroušena. Jako problémová se ukázala vysoká nesmáčivost skelného recyklátu hrubší frakce, z čehož vyplývá nutnost mírně upravit křivku zrnitosti navýšením propadů v její spodní části. [34]

Drcené odpadní sklo má potenciál být vhodnou náhradou jemného kameniva v betonu. Optimální množství náhrady jemného kameniva bylo dle různých studií stanoveno na zhruba 20 %. Výsledky různých studií ohledně vlastností jako zpracovatelnost, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, modul pružnosti, nasákavost či odolnosti proti CHRL byly neprůkazné a protichůdné. Obecně se pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a modul pružnosti s přidavkem drceného odpadního skla zvyšoval, zatímco zpracovatelnost se snižovala, přestože byla dle některých výzkumníků dostatečná. Dále náhrada jemného kameniva drceným odpadním sklem obecně snižovala nasákavost a objemovou hmotnost, zatímco

zvyšovala náchylnost k alkalickokřemičité reakci. Na tu mělo vliv jak množství, tak velikost a barva skleněných střepů. Příměsi jako popílek, metakaolin, mletá granulovaná vysokopecní struska či jemně mleté sklo alkalickokřemičitou reakci v betonu s drceným odpadním sklem omezovaly. [35]

6.3 Sklo jako náhrada cementu v betonu

Mnoho studií klasifikuje jemně mleté sklo jako materiál s pucolánovou aktivitou. Optimální množství náhrady cementu v betonu se ukázalo jako 10 %. Obecně náhrada portlandského cementu jemně mletým sklem vedla ke zvýšení pevnosti v tlaku a snížení zpracovatelnosti. Rovněž se ukázalo, že omezuje alkalickokřemičitou reakci, ale méně než popílek či metakaolin. V některých případech dokonce víc než mikrosilika. [35]

6.4 Pěnové sklo

Odpadní obalové sklo se rozemele na skelnou moučku s velikostí zrna řádově desítky mikrometrů. Ta se smíchá s jemně mletým uhlíkovým práškem. Po zahřátí na teplotu okolo 1000 °C dojde k natavení skleněného prášku a zároveň k oxidaci uhlíkových částic za vzniku CO₂. Plyn posléze expanduje a vytvoří v materiálu mikroskopické bubliny, které mnohonásobně zvětší původní objem drceného odpadního skla. Vyrábí se ve formě desek nebo granulátu. Může být použit buďto jako náhrada kameniva v betonu, kde dokáže nahradit až 15 % jemného kameniva nebo až 40 % hrubého kameniva. Díky dostatečné únosnosti a tepelně izolačním vlastnostem se dá použít pro hutněnou podkladní vrstvu betonových základových desek, jako tepelně izolační zásypy v konstrukcích podlah nebo stropů, pro konstrukce zelených střech, zásypy potrubí či tepelná izolace podzemních betonových garáží. [34][35]

7.0 Experimentální část

V experimentální části této diplomové práce bylo ověřeno využití skelných odpadů ve výrobcích s bezcementovými pojivy. V první řadě bylo jako pojivo použito různých termoplastů, v řadě druhé byla použita epoxidová pryskyřice.

7.1 Odpadní sklo

Hlavní surovinou pro zpracování této práce bylo odpadní sklo ze solárních panelů dodané firmou Aquatest a.s.. Sklo bylo dodáno ve dvou různých frakcích: 0-2 mm a 2-4 mm. Na obou byl proveden síťový rozbor za účelem získání křivky zrnitosti. Sklo bylo ze solárních panelů vyfrézováno a podrceno, dále na něm nebyly provedeny žádné další úpravy jako například chemické odstranění polymerních folií. Na skle jsou tyto zbytky polymerních folií tedy jasně viditelné, jak je patrné z obrázku 13.



Obrázek 13: Fotografie skelného recyklátu se zbytky polymerních folií

7.2 Stanovení křivky zrnitosti

Dle normy ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor byly stanoveny křivky zrnitosti na obou frakcích.

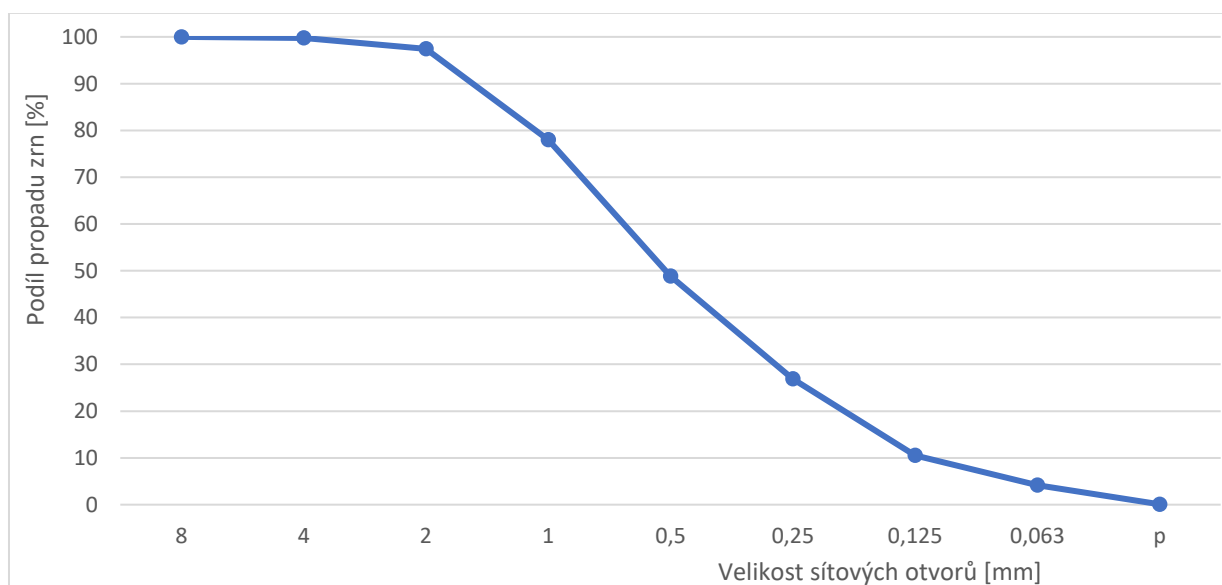
7.2.1 Postup zkoušky

Skelný recyklát o navážce 200 g byl umístěn na sadu sít s velikostí otvorů od 0,063 mm po 8 mm. Sada sít byla upevněna na vibrační zařízení, které bylo následně spuštěno. Po 20 minutách prosévání byly zbytky na jednotlivých sítích zváženy

s přesností 0,01 g. Výsledky této zkoušky jsou shrnuty v tabulkách 3 a 4. Grafické vyobrazení výsledků pak v grafech 1 a 2.

Tabulka 3: Výsledky síťového rozboru skelného recyklátu frakce 0-2 mm

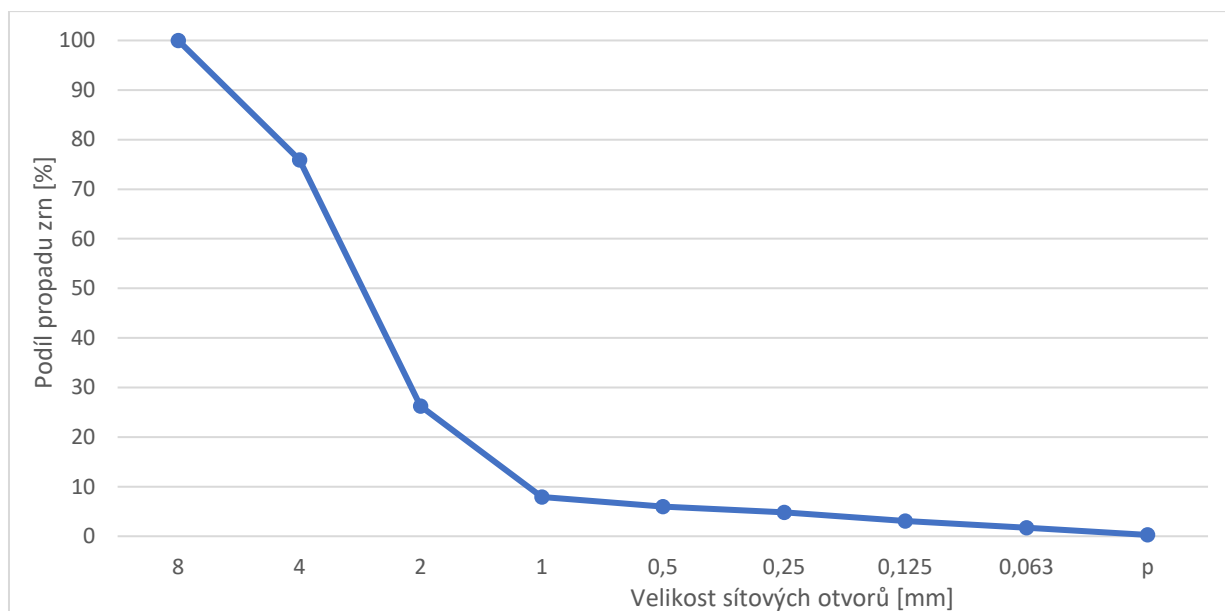
Síto	Kumulativní zbytek na sítu [g]	Propad sítem [g]	Propad sítem [%]
8	0,00	200,00	100,0
4	0,40	199,60	99,8
2	5,13	194,87	97,4
1	43,96	156,04	78,0
0,5	102,30	97,70	48,9
0,25	146,18	53,82	26,9
0,125	178,94	21,06	10,5
0,063	191,66	8,34	4,2
p	199,83	0,17	0,09



Graf 1: Křivka zrnitosti skelného recyklátu pro frakci 0-2 mm

Tabulka 4: Výsledky síťového rozboru skelného recyklátu frakce 2-4 mm

Síto	Kumulativní zbytek na sítu [g]	Propad sítem [g]	Propad sítem [%]
8	0,00	200,00	100,0
4	48,20	151,80	75,9
2	147,45	52,55	26,3
1	184,18	15,82	7,99
0,5	188,08	11,92	5,9
0,25	190,37	9,63	4,8
0,125	193,90	6,10	3,1
0,063	196,50	3,50	1,8
p	199,46	0,54	0,3



Graf 2: Křivka zrnitosti skelného recyklátu frakce 2-4 mm.

Z výsledků síťového rozboru je patrné, že v dodané frakci 2-4 mm se rovněž nachází určitý nezanedbatelný podíl frakce 1-2 mm, cca 20 %.

7.3 PET odpadní lahve jako pojivo

K výrobě prvních vzorků byly použity jako pojivo vločky z rozvlákněných nepropláchnutých PET odpadních lahví. Rozvlákněna byla spolu s PET lahvemi rovněž i jejich víčka, složení pojiva tedy není homogenní a je v něm zastoupen i HDPE či LDPE.

Tabulka 5: Hmotnostní parametry plastových lahví o objemu 2 l.

	m [g]	m [%]
Polyethylentereftalát (vlastní láhev)	33	87
Polyethylen (uzávěr)	5	13

Velikost vloček byla zhruba 1 cm, jejich tloušťka činí méně než 1 mm.



Obrázek 14: Vzhled zdrobněných PET lahví a HDPE/LDPE víček drcením.

Navážka odpadního skla byla nejprve v plechové nádobě, hrnci, za pomoci propanbutanové bomby nahřata na teplotu asi 300 °C. Po dostatečném a rovnoměrném zahřátí plniva bylo poté po dávkách přidáváno plnivo a za stálého míchání byla směs homogenizována. Postupem času plast měkl a stával se poddajnějším a směs se začala chovat jako homogenní. Stálé míchání bylo rovněž nutné z důvodu připékání plastu ke dnu zahřívané nádoby.

Z důvodu absence promytí PET lahví před jejich zvločkováním na nich ulpívaly kapky cukernatých nápojů, které za zvýšené teploty začaly nepříjemně zapáchat a dýmat. Z tohoto důvodu byla k zahřívané nádobě přistavena provizorní digestoř, která výpary odsávala. Pro rychlejší prohřátí skelného recyklátu bylo rovněž použito i elektrického přímotopu.



Obrázek 15: Fotografie aparatury k zahřívání a homogenizaci materiálu

Po zhomogenizování směsi byla tato přesunuta do kovové trojformy, která byla předem nahřáta pod plamenem, aby nedocházelo k příliš prudkému zchlazení pojiva při styku s ní. Snaha směs v trojformě zhutnit za pomoci střásání se ukázala jako nereálná, jelikož směs byla pro tento postup zhutňování příliš hutná. Z tohoto důvodu bylo ke zhutnění směsi použito dusání dusadlem. Přesto byl v některých případech plast příliš rychle ochlazen a začal tuhnout a k řádnému zhutnění buďto vůbec nedošlo, a nebo došlo, ovšem za výrazné deformace horního povrchu vzorku, jak lze vidět na obrázku 16.



Obrázek 16: Fotografie povrchu vzorku, který se nepodařilo upravit kvůli příliš rychlému ochlazení.

7.3.1 Receptury

Při návrhu receptur byl kladen důraz na rozdílný poměr pojiva k plnivu či poměr jednotlivých frakcí (1:1, 1:2, 1:3, 2:1) na mechanické vlastnosti. Ve dvou případech byl rovněž přidán pigment Fe_2O_3 . Přehled receptur je uveden v tabulce 6.

Tabulka 6: Přehled receptur s PET jako pojivem

Receptura	Sklo 0-2 mm [g]	Sklo 2-4 mm [g]	Pojivo [g]	Pigment [g]	Poměr frakcí [-]	Poměr plniva ku pojivu [-]
PET 1	-	1000	300	-	-	1:0,3
PET 2	-	2000	600	-	-	1:0,3
PET 3	500	1500	600	-	1:3	1:0,3
PET 4	500	1500	600	80	1:3	1:0,3
PET 5	1000	1000	600	100	1:1	1:0,3
PET 6	500	500	600	-	1:1	1:0,6
PET 7	666	333	600	-	2:1	1:0,6
PET 8	333	666	600	-	1:2	1:0,6
PET 9	1000	1000	600	-	1:1	1:0,3

7.3.2 Stanovení objemových hmotností, pevností v tlaku a v tahu za ohybu

Vzorky byly po odformování a vychladnutí změřeny. Vzhledem k často nepravidelnému či nerovnému tvaru zkušebních těles byla změřena délka 2x,

výška 4x a šířka 4x. Z těchto hodnot byly vypočítány průměrné hodnoty, se kterými byly následně vypočítány hodnoty objemových hmotností. Od každé receptury byly vyrobeny 3 vzorky.

Pevnosti v tahu za ohybu byly provedeny dle normy ČSN EN 14617-2 Umělý kámen - Zkušební metody - Část 2: Stanovení pevnosti za ohybu.

Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena dle vztahu:

$$R_{tf} = \frac{3Fl}{2bh^2},$$

kde:

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

F ... lomové zatížení (N),

b ... šířka vzorku (mm),

h ... výška vzorku v místě zlomu (mm),

l ... vzdálenost mezi podporami (mm).

Tabulka 7: Přehled délek jednotlivých vzorků pojených PET pojivem

Receptura	Vzorek	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_{av} [mm]
PET1	1a	159,87	159,22	159,55
	1b	159,45	159,35	159,40
	1c	159,33	159,42	159,38
PET2	2a	159,45	159,52	159,49
	2b	159,62	159,84	159,73
	2c	158,99	159,11	159,05
PET3	3a	159,79	159,33	159,56
	3b	159,62	159,75	159,69
	3c	159,91	159,45	159,68
PET4	4a	159,15	159,45	159,30
	4b	159,74	159,32	159,53
	4c	159,18	159,65	159,42
PET5	5a	159,63	159,87	159,75
	5b	159,83	159,32	159,58
	5c	159,98	159,84	159,91
PET6	6a	153,5	152,6	153,05
	6b	157,47	154,41	155,94
	6c	157,43	155,48	156,46
PET7	7a	158,55	158,83	158,69
	7b	158,84	158,33	158,59
	7c	158,63	158,95	158,79
PET8	8a	160,59	160,59	160,59
	8b	160,09	160,11	160,10
	8c	190,05	159,63	174,84
PET9	9a	159,24	159,22	159,23
	9b	159,31	159,28	159,30
	9c	159,44	159,33	159,39

Tabulka 8: Přehled výšek jednotlivých vzorků pojených PET pojivem

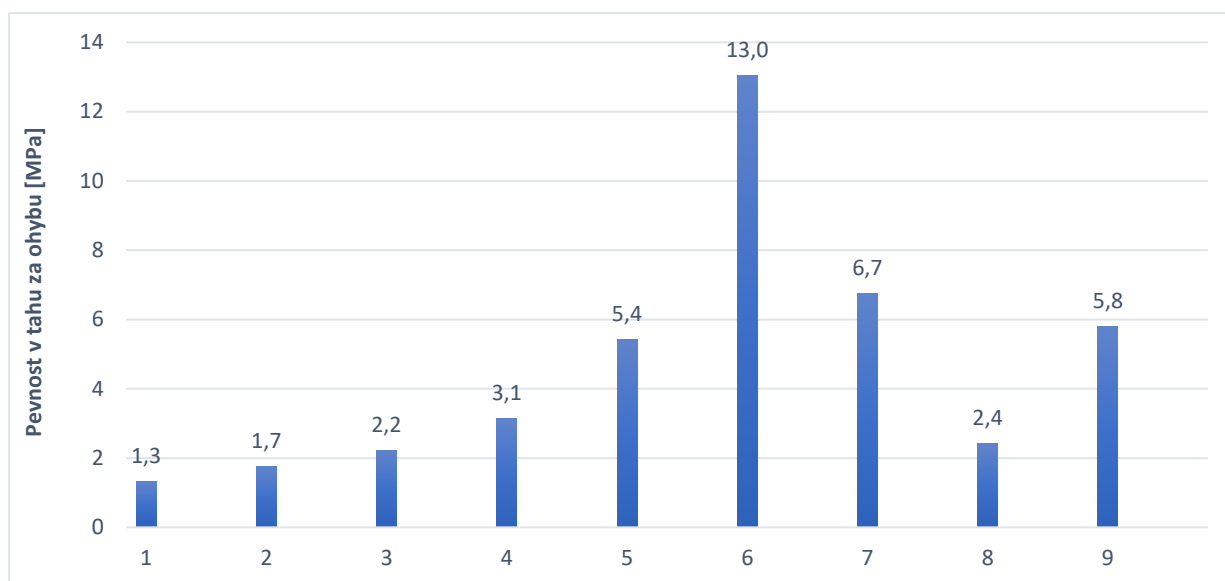
Receptura	Vzorek	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	h_4 [mm]	h_{av} [mm]
PET1	1a	40,11	40,15	40,01	39,98	40,06
	1b	38,99	39,89	40,12	40,11	39,78
	1c	40,12	40,25	40,4	40,05	40,21
PET2	2a	40,08	40,19	40,72	40,78	40,44
	2b	40,45	40,6	40,81	40,17	40,51
	2c	40	40,12	39,78	40,2	40,03
PET3	3a	39,89	40,15	40,15	39,98	40,04
	3b	41	40,78	41,15	40,09	40,76
	3c	40,68	40,01	39,01	39,98	39,92
PET4	4a	40,13	40,15	40,19	40,07	40,14
	4b	41,12	40,35	40,57	40,85	40,72
	4c	39,08	39,78	39,45	39,6	39,48
PET5	5a	42,05	41,85	40,15	40,08	41,03
	5b	42,04	40,12	41,88	40,99	41,26
	5c	41,9	41,85	41,45	40,19	41,35
PET6	6a	46,28	45,94	44,27	46,16	45,66
	6b	41,96	44,49	43,65	44	43,53
	6c	46,46	46,71	46,57	48,43	47,04
PET7	7a	45,8	43,32	50,5	46,48	46,53
	7b	48,98	45,76	45	43,87	45,90
	7c	46,36	47,5	47,28	45,5	46,66
PET8	8a	44,36	40,96	41,77	43,23	42,58
	8b	46,06	46,79	45,67	43,29	45,45
	8c	44,16	41,98	41	44,94	43,02
PET9	9a	38,87	39,65	39,92	40,09	39,63
	9b	40,55	40,45	40,59	40,46	40,51
	9c	40,12	40,37	40,42	40,52	40,36

Tabulka 9: Přehled šířek jednotlivých vzorků pojených PET pojivem

Receptura	Vzorek	b_1 [mm]	b_2 [mm]	b_3 [mm]	b_4 [mm]	b_{av} [mm]
PET1	1a	38,84	38,45	38,49	38,99	38,69
	1b	39,45	39,97	39,58	39,91	39,73
	1c	39,62	39,52	39,84	39,97	39,74
PET2	2a	39,78	39,41	39,12	39,48	39,45
	2b	39,91	39,78	39,21	39,52	39,61
	2c	39,29	39,05	39,91	39,07	39,33
PET3	3a	39,89	39,75	39,94	39,94	39,88
	3b	39,1	39,04	39,24	39,64	39,26
	3c	39,45	39,19	39,08	39,1	39,21
PET4	4a	39,7	39,13	39,15	39,74	39,43
	4b	39,15	39,49	39,14	39,47	39,31
	4c	39,12	39,15	39,16	39,14	39,14
PET5	5a	39,54	39,95	39,78	39,89	39,79
	5b	39,96	39,12	39,15	39,09	39,33
	5c	39,23	39,5	39,74	30,5	37,24
PET6	6a	38,5	38,14	39,19	39,12	38,74
	6b	39,57	39,1	38,88	39,22	39,19
	6c	39,72	39,22	39,15	39,21	39,33
PET7	7a	39,51	39,46	39,65	38,42	39,26
	7b	39,45	39,71	38,72	39,67	39,39
	7c	39,41	39,66	39,6	39,23	39,48
PET8	8a	39	39,94	39,15	39,95	39,51
	8b	93,72	40,41	39,98	39,67	53,45
	8c	38,88	39,65	39,32	40,04	39,47
PET9	9a	39,75	39,31	39,82	39,42	39,58
	9b	39,16	39,73	38,9	39,72	39,38
	9c	39,72	39,8	39,69	39,61	39,71

Tabulka 10: Přehled hmotností, objemových hmotností a pevností v tahu za ohybu vzorků pojených PET pojivem

	Vzorek	m [g]	OH [kg/m ³]	OH_{av} [kg/m ³]	F [kN]	$R_{ft,av}$ [MPa]	R_{ft} [MPa]
PET1	1a	428	1730	1730	0,51	1,23	1,3
	1b	441	1750		0,6	1,43	
	1c	435	1710		0,56	1,31	
PET2	2a	450,6	1770	1820	0,6	1,33	1,8
	2b	462,71	1810		0,8	1,78	
	2c	470,77	1880		0,9	2,14	
PET3	3a	472	1850	1863	0,9	2,21	2,2
	3b	474	1860		0,9	2,14	
	3c	470	1880		1,0	2,35	
PET4	4a	466	1850	1817	1,6	3,66	3,1
	4b	460	1800		1,1	2,53	
	4c	443	1800		1,3	3,20	
PET5	5a	464	1780	1763	2,8	6,16	5,4
	5b	442	1710		2,1	4,71	
	5c	470	1800		2,5	5,44	
PET6	6a	423	1562	1557	7,3	13,56	13,0
	6b	417	1568		6,5	13,13	
	6c	446	1541		7,2	12,41	
PET7	7a	457	1577	1597	3,6	6,35	6,7
	7b	470	1639		4,2	7,59	
	7c	461	1576		3,6	6,28	
PET8	8a	449	1662	1499	1,2	2,51	2,4
	8b	488	1255		0,9	1,22	
	8c	469	1580		1,7	3,49	
PET9	9a	455	1822	1780	2,5	6,03	5,8
	9b	448	1763		2,8	6,50	
	9c	448	1754		2,1	4,87	



Graf 3: Přehled hodnot pevností v tahu za ohybu vzorků pojených PET pojivem.

7.3.3 Stanovení pevností v tlaku

Pevnosti v tlaku byly stanoveny modifikovaným postupem dle normy ČSN EN 206-1. Pevnosti v tlaku byly stanoveny dle vztahu:

$$R_c = \frac{F}{A},$$

kde:

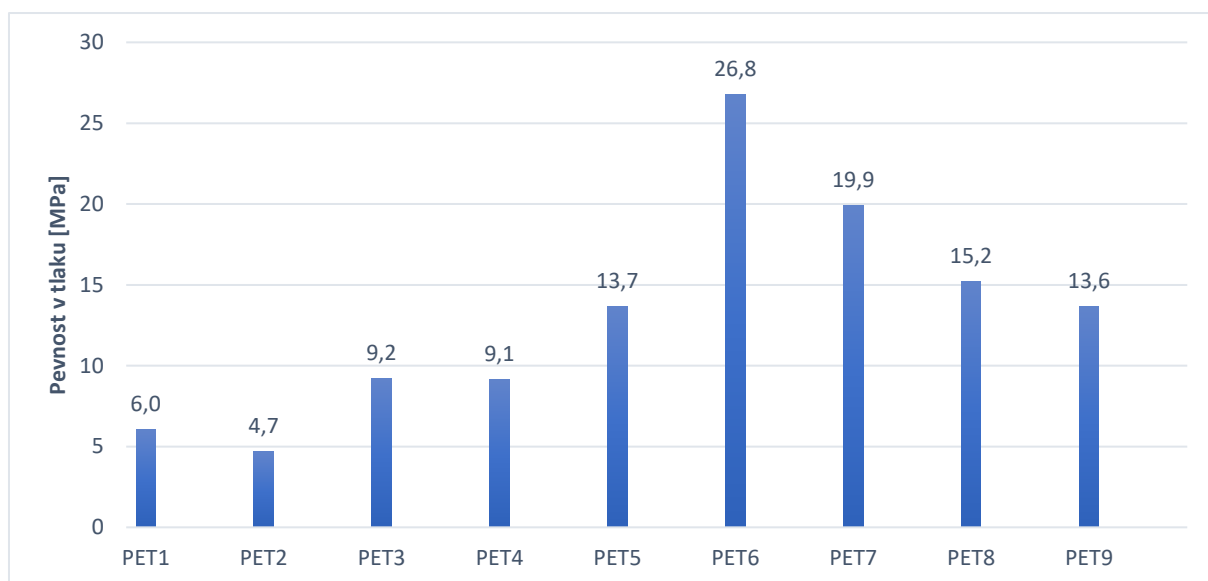
R_c ... pevnost v tlaku (MPa),

F ... tlaková síla (N),

A ... tlačná plocha (mm²).

Tabulka 11: Přehled pevností v tlaku vzorků pojených PET pojivem

	Vzorek	F_1 [kN]	F_2 [kN]	R_{1c} [MPa]	R_{2c} [MPa]	$R_{c,av}$ [MPa]	R_c [MPa]
PET1	1a	10	9	6,30	5,80	6,05	6,03
	1b	9	9	5,90	5,90	5,90	
	1c	10	10	6,20	6,10	6,15	
PET2	2a	6	7	3,90	4,20	4,05	4,67
	2b	8	7	4,90	4,40	4,65	
	2c	8	9	4,70	5,90	5,30	
PET3	3a	14	16	8,90	10,10	9,50	9,22
	3b	14	14	9,00	8,80	8,90	
	3c	14	15	9,00	9,50	9,25	
PET4	4a	17	16	10,63	10,00	10,31	9,15
	4b	12	15	7,63	9,38	8,50	
	4c	10	18	6,25	11,00	8,63	
PET5	5a	31	28	19,63	17,50	18,56	13,69
	5b	14	17	8,81	10,31	9,56	
	5c	22	19	13,75	12,13	12,94	
PET6	6a	48	40	30,00	25,00	27,50	26,77
	6b	42	46	26,25	28,75	27,50	
	6c	38	43	23,75	26,88	25,31	
PET7	7a	23	33	14,38	20,63	17,50	19,90
	7b	35	37	21,88	23,13	22,50	
	7c	31	32	19,38	20,00	19,69	
PET8	8a	26	21	16,25	13,13	14,69	15,21
	8b	25	23	15,63	14,38	15,00	
	8c	27	24	16,88	15,00	15,94	
PET9	9a	24	18	15,00	11,25	13,13	13,65
	9b	26	23	16,25	14,38	15,31	
	9c	18	22	11,25	13,75	12,50	



Graf 4: Přehled hodnot pevností v tlaku vzorků pojených PET pojivem

7.4 Polypropylen jako pojivo

Následně byly na stejné aparatuře za stejných postupů vyhotoveny vzorky, ve kterých hrál úlohu pojiva polypropylen dodaný firmou UP závody s.r.o. zabývající se výrobou tlumicích a výplňových prvků v automobilové průmyslu. PP byl trojího druhu: ve formě černých válcovitých granulek, ve formě černých expandovaných granulek (vzhledově připomínajících expandovaný polystyren) a bílých poloprůhledných či šedých granulek.

7.4.1 Bílý polypropylen – Makroplus

MAKROPLUS F 40-08/PPr od firmy Polymer Institute Brno je koncentrát 40% mastku ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) a 8% stearanu zinečnatého v polymerní matrici. Technické specifikace jsou v tabulce 12.

Tabulka 12: Přehled technických parametrů polymeru MAKROPLUS F 40-08/PPr [38]

Garantované parametry

Ukazatel kvality	Jednotka	Rozmezí hodnot	Metoda
<i>Sypná hmotnost</i>	kg/dm ³	0.7 ± 0.05	ČSN EN ISO 60

Informativní parametry

Údaj (norma)	
<i>Barva</i>	šedá
<i>Fyzikální forma</i>	granulát (velikost 2 - 4 mm)
<i>Koncentrace mastku</i>	40%
<i>Koncentrace stearanu zinečnatého</i>	8%
<i>Polymerní matrice</i>	PP random kopolymer
<i>Balení</i>	ventilové PE pytle, 25 kg



Obrázek 17: Fotografie MAKROPLUS F 40-08/PPr - polypropylen ve formě bílých poloprůhledných granulek

7.4.2 Černý polypropylen

Jedná se o výše zmíněný bílý polypropylen MAKROPLUS F 40-08/PPr s přídavkem aditiva MAKROSLIP EA 2042, Eltex P KS404N6996 a barviva CROMOFIX NEGRO/BLACK 69T006.

Eltex je aditivum na bázi ethyleny zlepšující zpracovatelnost a tvrdost.

MAKROSLIP EA 2042 je koncentrát kluzného činidla, určený pro povrchovou modifikaci výrobků z PP. Účinná složka koncentrátu snižuje povrchové tření

výrobku. Toto pojivo bude nadále označováno jako PPČ. Technické specifikace jsou v tabulce 13.

Tabulka 13: Přehled technických vlastností aditiva MAKROSLIP EA 2042 [39]

Garantované parametry

Ukazatel jakosti	Jednotka	Hodnoty	Metoda
<i>Sypná hmotnost</i>	kg/dm ³	0.55 ± 0.05	ČSN EN ISO 60

Informativní údaje

Údaj	Hodnota
<i>Fyzikální forma</i>	granule (velikost 2 - 4 mm)
<i>Barva</i>	bílá
<i>Doporučené dávkování</i>	1-3 % hm.
<i>Balení</i>	PE pytle 25 kg
<i>Nosičová matrice</i>	random kopolymer PP (ITT = 12 g/10 min.)



Obrázek 18: Fotografie polypropylenu MAKROPLUS s aditivu a barvivem

7.4.3 Expandovaný polypropylen

Jedná se o výše zmíněný mix bílého polypropylenu MAKROPLUS s aditivu, který byl následně v autoklávu expandován. Kuličky mají velikost zhruba 1,5-5 mm. Toto pojivo bude nadále označováno jako PPE.



Obrázek 19: Fotografie polypropylenu ve formě expandovaných granulek

7.4.4 Receptury

Receptury byly voleny obdobně jako v případě výroby vzorků pojených PET pojivem z odpadních lahví. Záměr byl porovnat fyzikálně-mechanické vlastnosti vzorků s rozdílným poměrem plniva k pojivu či různým poměrem jednotlivých frakcí při zachování stejného poměru plniva k pojivu.

Tabulka 14: Přehled receptur s různými druhy polypropylenu jako pojivem

	0-2 mm [g]	2-4 mm [g]	MAKROPLUS F 40-08/PPr [g]	Expandovaný černý PP [g]	Černý PP [g]	Poměr frakcí [-]	Poměr plniva a pojiva [-]
PPB1	500	500	600	-	-	1:1	1:0,6
PPB2	666	333	600	-	-	2:1	1:0,6
PPB3	750	750	500	-	-	1:1	1:0,33
PPČ1	750	750	-	-	500	1:1	1:0,33
PPČ2	500	500	-	-	450	1:1	1:0,45
PPČ3	666	333	-	-	450	2:1	1:0,45
PPE1	500	500	-	200	-	1:1	1:0,2
PPE2	666	333	-	150	-	2:1	1:0,15

7.4.5 Stanovení užitečných vlastností

Objemové hmotnosti byly stanoveny stejným způsobem jako v případě vzorků pojených PET pojivem. Stejně tomu bylo u pevností v tahu za ohybu a v tlaku.

Tabulka 15: Přehled délek a výšek vzorků pojených polypropylenem MAKROPLUS F 40-08/PPr

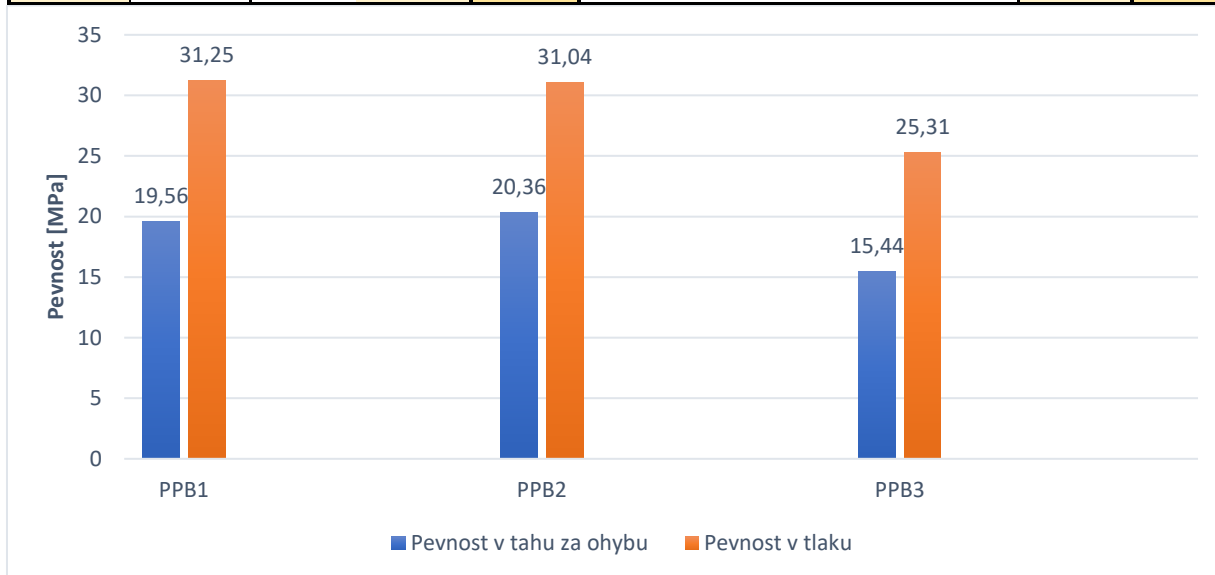
		l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_{av} [mm]	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	h_4 [mm]	h_{av} [mm]
PPB1	1	157,85	158,33	158,09	40,08	39,93	41,23	41,11	40,59
	2	157,79	157,84	157,82	40,64	41,02	39,63	41,61	40,73
	3	158,03	157,97	158,00	40,98	40,83	40,8	39,87	40,62
PPB2	1	157,82	157,95	157,89	43,16	42,93	43,94	43,92	43,49
	2	157,62	157,87	157,75	41,19	39,94	39,47	43,71	41,08
	3	157,76	157,6	157,68	39,49	38,41	40,19	40,95	39,76
PPB3	1	161,01	160,28	160,65	40,23	40,12	40,54	40,99	40,47
	2	159,48	159,85	159,67	39,47	40,41	40,01	39,99	39,97
	3	160,5	161,5	161,00	40,04	40,62	39,05	39,56	39,82

Tabulka 16: Přehled šířek, hmotností a objemových hmotností vzorků pojených polypropylenem MAKROPLUS F 40-08/PPr

		b_1 [mm]	b_2 [mm]	b_3 [mm]	b_4 [mm]	b_{av} [mm]	m [g]	OH [kg/m ³]	OH_{av} [kg/m ³]
PPB1	1	39,34	39,43	39,37	39,35	39,37	346,64	1372,11	1360
	2	39,24	38,79	39,63	39,62	39,32	343,09	1357,642	
	3	39,39	39,37	39,42	39,62	39,45	341,96	1350,614	
PPB2	1	38,76	39,22	38,98	38,82	38,95	353,35	1321,442	1590
	2	38,33	39,28	39,25	39,39	39,06	535,23	2114,564	
	3	38,8	39,97	38,08	39,43	39,07	328,51	1341,165	
PPB3	1	39,66	40,9	40,01	40,66	40,31	380	1450,098	1490
	2	40,68	39,08	40,62	40,01	40,10	383	1496,71	
	3	39,74	39,74	40,03	39,94	39,86	388	1518,334	

Tabulka 17: Přehled pevností v tahu za ohybu a v tlaku vzorků pojených polypropylenem MAKROPLUS F 40-08/PPr

		F [kN]	$R_{ft,av}$ [MPa]	R_{ft} [MPa]	F_1 [kN]	F_2 [kN]	R_{1c} [MPa]	R_{2c} [MPa]	$R_{c,av}$ [MPa]	R_c [MPa]
PPB1	1	8,35	19,31	19,56	52	47	32,5	29,375	30,94	31,25
	2	8,65	19,90		50	50	31,25	31,25	31,25	
	3	8,45	19,47		51	50	31,875	31,25	31,56	
PPB2	1	8,8	17,92	20,36	49	49	30,625	30,625	30,63	31,04
	2	10	22,76		50	52	31,25	32,5	31,88	
	3	8,4	20,40		48	50	30	31,25	30,63	
PPB3	1	6,7	15,22	15,44	41	42	25,625	26,25	25,94	25,31
	2	7,1	16,63		41	41	25,625	25,625	25,63	
	3	6,1	14,48		38	40	23,75	25	24,38	



Graf 5: Přehled hodnot pevností v tlaku a v tahu za ohybu vzorků pojených polypropylenem MAKROPLUS F 40-08/PPr

Tabulka 18: Přehled délek a výšek vzorků pojených PPČ pojivem

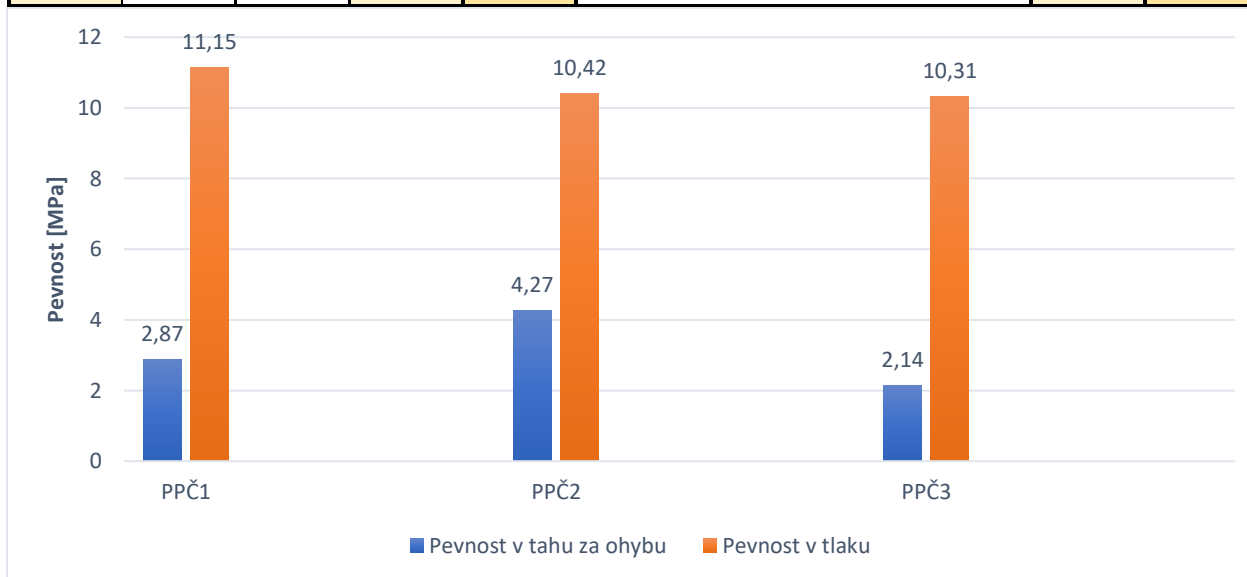
		l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_{av} [mm]	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	h_4 [mm]	h_{av} [mm]
PPČ1	1	159,85	159,81	159,83	41,02	40,88	40,77	41,09	40,94
	2	159,84	159,22	159,53	40,52	39,57	41,17	40,88	40,54
	3	159,74	160,32	160,03	40,16	40,53	40,27	41,47	40,61
PPČ2	1	159,64	158,74	159,19	40,72	39,67	40,07	41,86	40,58
	2	158,88	160,23	159,56	39,69	40,7	43,13	43,22	41,69
	3	159,24	159,4	159,32	41,05	40,57	39,94	40,04	40,40
PPČ3	1	158,68	158,88	158,78	41,43	41,09	41,48	42,08	41,52
	2	159,89	159,88	159,89	42,15	40,77	41,52	41,56	41,50
	3	159,32	160,02	159,67	41,95	42,95	42,74	42,16	42,45

Tabulka 19: Přehled šířek, hmotností a objemových hmotností vzorků pojených PPČ pojivem

		b_1 [mm]	b_2 [mm]	b_3 [mm]	b_4 [mm]	b_{av} [mm]	m [g]	OH [kg/m ³]	OH_{av} [kg/m ³]
PPČ1	1	39,73	39,72	40,13	40,02	39,90	409	1567	1540
	2	39,91	39,97	39,82	39,04	39,69	399	1555	
	3	39,82	39,83	40,66	39,64	39,99	392	1509	
PPČ2	1	40	40,27	40,16	39,67	40,03	397	1535	1470
	2	39,97	40,04	39,74	39,72	39,87	364	1373	
	3	40,04	40,07	39,48	39,62	39,80	381	1487	
PPČ3	1	40,52	40,18	39,74	39,34	39,95	372	1413	1430
	2	39,63	39,72	41,44	39,61	40,10	376	1413	
	3	40,26	40	40	41	40,32	401	1467	

Tabulka 20: Přehled pevností v tahu za ohybu a v tlaku vzorků pojených PPČ pojivem

		F [kN]	$R_{ft,av}$ [MPa]	R_{ft} [MPa]	F_1 [kN]	F_2 [kN]	R_{1c} [MPa]	R_{2c} [MPa]	$R_{c,av}$ [MPa]	R_c [MPa]
PPČ1	1	2	4,49	2,87	21	19	13,125	11,875	12,50	11,15
	2	1	2,30		18	18	11,25	11,25	11,25	
	3	0,8	1,82		14	17	8,75	10,625	9,69	
PPČ2	1	1,9	4,32	4,27	19	21	11,875	13,125	12,50	10,42
	2	2	4,33		15	12	9,375	7,5	8,44	
	3	1,8	4,16		18	15	11,25	9,375	10,31	
PPČ3	1	1,1	2,40	2,14	20	19	12,5	11,875	12,19	10,31
	2	1	2,17		16	10	10	6,25	8,13	
	3	0,9	1,86		19	15	11,875	9,375	10,63	



Graf 6: Přehled hodnot pevností v tlaku a v tahu za ohybu vzorků pojených PPČ pojivem

Tabulka 21: Přehled délek a výšek vzorků spojených PPE pojivem

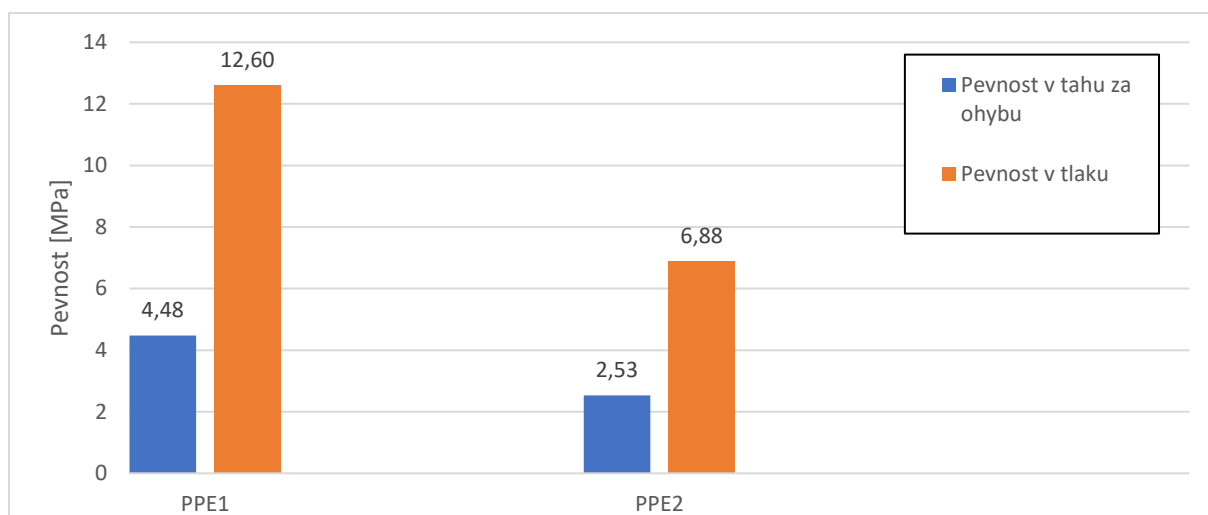
		l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_{av} [mm]	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	h_4 [mm]	h_{av} [mm]
PPE1	1	159,81	159,71	159,76	40,52	39,98	40,63	39,82	40,24
	2	159,75	159,79	159,77	40,43	39,73	39,71	39,7	39,89
	3	159,72	159,77	159,75	40,42	39,99	39,82	41,12	40,34
PPE2	1	160,03	159,87	159,95	40,09	40,4	52,23	40,31	43,26
	2	160,01	160,01	160,01	39,73	40,04	41,07	42,01	40,71
	3	160,02	160	160,01	39,99	40,01	41,05	41,12	40,54

Tabulka 22: Přehled šířek, hmotností a objemových hmotností vzorků spojených PPE pojivem

		b_1 [mm]	b_2 [mm]	b_3 [mm]	b_4 [mm]	b_{av} [mm]	m [g]	OH [kg/m ³]	OH_{av} [kg/m ³]
PPE1	1	39,84	39,82	39,75	39,72	39,78	448	1753	1740
	2	39,88	39,81	40,01	39,9	39,90	442	1738	
	3	39,87	39,65	39,95	39,78	39,81	445	1736	
PPE2	1	39,78	39,88	39,94	39,98	39,90	466	1689	1760
	2	39,65	40,02	39,51	39,05	39,56	464	1802	
	3	39,75	39,78	39,94	39,78	39,81	464	1796	

Tabulka 23: Přehled výsledků měření pevnosti vzorků spojených PPE pojivem

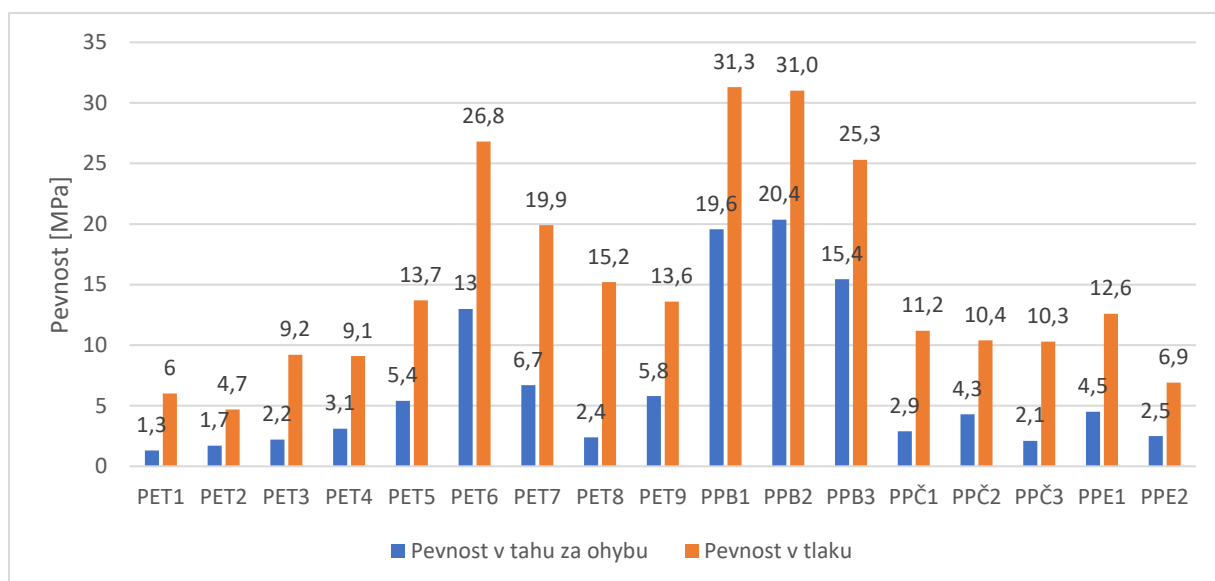
		F [kN]	$R_{ft,av}$ [MPa]	R_{ft} [MPa]	F_1 [kN]	F_2 [kN]	R_{1c} [MPa]	R_{2c} [MPa]	$R_{c,av}$ [MPa]	R_c [MPa]
PPE1	1	2,2	5,12	4,48	22	20	13,75	12,5	13,13	12,60
	2	1,75	4,13		18	21	11,25	13,125	12,19	
	3	1,8	4,17		20	20	12,5	12,5	12,50	
PPE2	1	1,1	2,21	2,53	10	12	6,25	7,5	6,88	6,88
	2	1,2	2,75		11	11	6,875	6,875	6,88	
	3	1,15	2,64		11	11	6,875	6,875	6,88	



Graf 7: Přehled hodnot pevností vzorků spojených PPE pojivem

Tabulka 24: Shrnutí výsledků měření pevností v tlaku a v tahu za ohybu všech receptur

	R_{ft} [MPa]	R_c [MPa]
PET1	1,3	6
PET2	1,7	4,7
PET3	2,2	9,2
PET4	3,1	9,1
PET5	5,4	13,7
PET6	13	26,8
PET7	6,7	19,9
PET8	2,4	15,2
PET9	5,8	13,6
PPB1	19,6	31,3
PPB2	20,4	31,0
PPB3	15,4	25,3
PPČ1	2,9	11,2
PPČ2	4,3	10,4
PPČ3	2,1	10,3
PPE1	4,5	12,6
PPE2	2,5	6,9



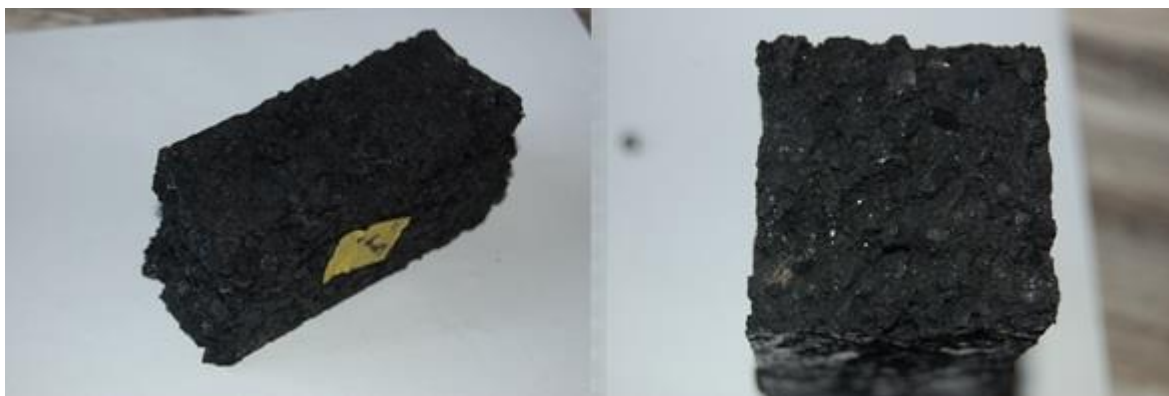
Graf 8: Srovnání hodnot pevností v tlaku a v tahu za ohybu všech receptur



Obrázek 20: Fotografie detailu lomové plochy vzorku PPB2 – MAKROPLUS F 40-08 jako pojivo



Obrázek 21: Fotografie detailu lomové plochy vzorku PPE2 – expandovaný PP jako pojivo



Obrázek 22: Fotografie detailu lomové plochy vzorku PPČ1 – granulovaný černý PP jako pojivo



Obrázek 23: Fotografie detailu lomové plochy vzorku PET8 – pojeného PET pojivem

7.5 Výroba zkušebních dlaždic

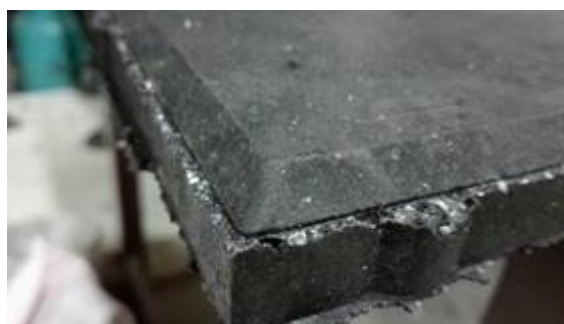
Na základě výsledků předchozích zkoušek byly vyrobeny zkušební dlaždice. Postup byl stejný jako u výroby zkušebních trámečků, ale po zhomogenizování nahřátého plniva a pojiva byla směs vsypána do formy hydraulického lisu, která byla elektrickým přímotopem zahřívána, a následně zalisována tlakem 21 MPa. Vzhledem ke schopnosti lisu zpracovat směs s nižším množstvím pojiva, než se kterým je možno operovat při výrobě zkušebních trámečků, bylo množství pojiva značně sníženo. To umožňuje vyšší využití skelného recyklátu při zachování stejné hutné struktury vzorku.

Tabulka 25: Přehled receptur pro výrobu zkušebních dlaždic

Označení vzorku	0-2 mm [g]	2-4 mm [g]	PET [g]	Makroplus [g]	PPE [g]	Poměr plniva ku pojivu [-]
D1	500	1500	600	-	-	1:0,3
D2	500	1500	-	500	-	1:0,25
D3	500	1500	-	-	355	1:0,18



Obrázek 24: Fotografie vylisované dlaždice pojené PET pojivem



Obrázek 25: Fotografie vylisované dlaždice pojené MAKROPLUS pojivem

7.5.1 Stanovení obrusnosti metodou podle Böhma

Dle normy ČSN EN 1340. Betonové obrubníky - Požadavky a zkušební metody bylo provedeno stanovení obrusnosti na zkušebních dlaždicích.

7.5.2 Postup zkoušky

Dlaždice byly pilou upraveny na čtverce o hraně 71 mm a jejich hrany zarovnány. Rozměry vzorku byly změřeny s přesností na 0,1 mm a dále byl vzorek zvážen s přesností na 0,1 g. Poté byl umístěn do zkušebního zařízení pro stanovení obrusnosti a zatížen silou 300 N. Na brusnou dráhu bylo vsypáno 20 g brusiva – korundu. Brusný kotouč byl po 22 cyklech zastaven a vzorek otočen o 90°. Brusný kotouč byl očištěn od brusiva a odpadu ze vzorku a byla nasypána nová dávka brusiva. Vzorek byl postupně otáčen, dokud nebyl obroušen ze všech stran. Poté byl zvážen s přesností na 0,1 g. Celkově byl tento postup zopakován 4x a poté byl vzorek naposledy zvážen a byla změřena jeho výška z 4 stran.

7.5.3 Výsledky měření

Tabulka 26: Přehled výsledků měření obrusnosti

Označení vzorku	$l_0^{1,2,3,4}$ [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]
D1	69,9	70,0	14,1	12,5	m_0 134,6	119,4
	69,9	69,5	14,1	12,5	m_4 132,7	
	69,4	69,7	14,1	12,6	m_8 130,0	
	68,7	69,9	14,2	12,6	m_{12} 125,7	
D2	69,1	70,0	14,3	13,5	m_0 110,4	105,8
	68,8	69,9	13,9	13,3	m_4 109,3	
	68,7	69,8	14,0	13,6	m_8 108,3	
	70,1	70,0	14,2	13,3	m_{12} 106,9	
D3	69,1	70,6	11,4	10,4	m_0 104,4	94,6
	69,1	69,6	11,5	10,5	m_4 102,2	
	70,1	71,4	11,8	10,7	m_8 99,8	
	71,1	72,2	11,7	10,7	m_{12} 97,2	

Obrusnost se stanoví jako zmenšení velikosti tělesa dle vztahu:

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

kde:

ΔV ... zmenšení objemu na konci zkoušky v mm³,

Δm ... snížení hmotnosti na konci zkoušky v g,

ρ ... hustota vzorku v g/mm³.

Tabulka 27: Shrnutí vypočtených hodnot obrusnosti

Označení vzorku	Δm [g]	ρ [g/mm ³]	ΔV [mm ³]
D1	15,2	0,001966	7732
D2	4,6	0,001619	2842
D3	9,8	0,001816	5396

U všech zkoušených vzorků byla naměřena hodnota obrusnosti menší než 18 000 mm³/5000 mm², čímž se řadí dle normy do třídy 4 označení I.

7.6 Nasákavost, mrazuvzdornost, hloubka průsaku tlakovou vodou

Na základě výsledků obdobné práce, zabývající se výrobou umělého kamene za užití odpadních termoplastů jako pojiva a písku jako plniva, bylo rozhodnuto, že tyto zkoušky nebudou provedeny. Ze závěrů uvedené práce vyplývá, že charakter tohoto materiálu je zcela kompaktní a nepórovitý a tudíž vykazuje nulovou nasákavost. Podstatou zkoušky mrazuvzdornosti je cyklické zmrazování a rozmrazování vzorků nasáklého vodou. Rovněž stanovení průsaku tlakovou vodou přineslo negativní výsledky – nedošlo k vůbec žádnému průsaku vody do vzorku. Z tohoto důvodu byla rovněž zkouška průsaku tlakovou vodou v této práci vynechána. [36]



Obrázek 26: Fotografie na lomu zkušebním tělesem pojeného termoplastem a plněného pískem po zkoušce průsaku tlakovou vodou [36]

7.7 Epoxidová pryskyřice jako pojivo

Pro posouzení využitelnosti skelného recyklátu jako akusticky izolačního materiálu byly vytvořeny vzorky s epoxidovou dvousložkovou pryskyřicí coby pojivem. Vzhledem k povaze izolačních materiálů bylo zapotřebí do vzorku zanást potřebné

množství pórů vhodné velikosti. Za tímto účelem byl skelný recyklát za pomoci sady sít rozdělen do jednotlivých frakcí: 4-8 mm, 2-4 mm, 1-2 mm a 0,5-1 mm. Následně byla zrna recyklátu jednotlivých frakcí obalena epoxidovou pryskyřicí a vnesena do formy. Ta byla vyrobena z plastových trubek o průměru 110 mm a 40 mm. Pro měření akustické pohltivosti v Kundtově trubici je zapotřebí kruhových vzorků o průměru 99 mm a 29 mm. Plastové trubky byly tedy nařezány nejdříve příčně na velikost zhruba 2 cm a poté podélně, aby bylo možno jejich vnitřní průměr zmenšit při zachování kruhového tvaru. Toho bylo docíleno obalením kruhové formy po jejím obvodu izolační páskou. Vnitřek formy byl vylepen samolepící hliníkovou páskou kvůli snadnému pozdějšímu odlepení od formy.



Obrázek 27: Fotografie postupu výroby forem pro výrobu vzorků na měření akustické pohltivosti v Kundtově trubici

Nejprve byly vytvořeny vzorky s monofrakcí skelného recyklátu, na základě jejichž akustických pohltivostí byly následně jednotlivé frakce spolu míchány, aby bylo dosaženo lepších výsledků. Rovněž byl testován vliv množství pojiva.

Jako pojivo byla použita nízkoviskozní dvousložková epoxidová pryskyřice Epolam 2017 od firmy Asxon Technologies se standardním tužidlem. Technická specifikace epoxidu je v tabulce 29. Na 100 hmotnostních dílů pryskyřice bylo použito 30 hmotnostních dílů tužidla.

Tabulka 28: Technické parametry epoxidové pryskyřice Epolam 2017 [40]

MECHANICKÉ A TEPELNÉ VLASTNOSTI @ 23°C PO VYTVRZENÍ					
			TUŽIDLO EPOLAM 2013	TUŽIDLO EPOLAM 2017	TUŽIDLO EPOLAM 2018
Ohybový modul pružnosti	ISO 178	MPa	2800	3000	2750
Pevnost v ohybu	ISO 178	MPa	100	132	108
Konečná tvrdost @ 23°C	ISO 868-85	Shore D15	86	88	86
Prodloužení do přetržení	ISO 527	%	7	6	8
Tahový modul	ISO 527	MPa	3000	3700	3200
Pevnost v tahu	ISO 527	MPa	65	73	68
Teplota zesklivatění Tg	ISO 11359	°C	70	89	83
Teplotní odolnost v zátěži	ISO 75	°C	66	84	75

Výše uvedené hodnoty byly naměřeny na standardním vzorku vytvrzeném 24h@23°C+16h@80°C.

Vzorky byly ponechány 24 hodin k vytvrzení, následně odformovány a podrobeny zkoušce akustické pohltivosti.



Obrázek 28: Fotografie velkého vzorku vyhotoveného z frakce 4-8 mm



Obrázek 29: Fotografie 2 velkého vzorku vyhotoveného z frakce 4-8 mm



Obrázek 30: Fotografie velkého vzorku vyhotoveného z frakce 0,5-1 mm



Obrázek 31: Fotografie 2 velkého vzorku vyhotoveného z frakce 0,5-1 mm



Obrázek 32: Fotografie malého vzorku vyhotoveného z frakce 4-8 mm



Obrázek 33: Fotografie malého vzorku vyhotoveného z frakce 0,5-1 mm

7.8 Měření akustické pohltivosti

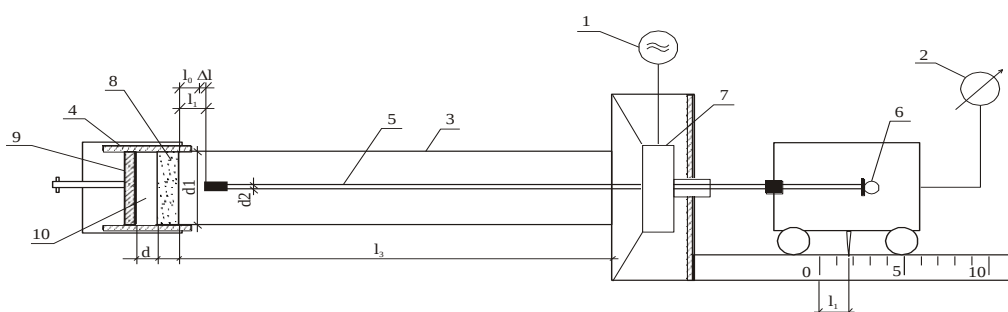
Měření akustické pohltivosti bylo provedeno dle normy ČSN ISO 10534-1 Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích - Část 1: Metoda poměru stojaté vlny.

Měření činitele zvukové pohltivosti v interferometru - Kundtově trubici - metodou poměru stojaté vlny je založeno na principu částečného stojatého vlnění. Součástí interferometru je pohyblivá sonda, kterou se určuje maximum a minimum akustického tlaku stojaté vlny v místech, která jsou nejbližší zkoumanému vzorku. Na konci sondy je umístěn mikrofón se zesilovačem, který je připojen k voltmetru. Maximálnímu akustickému tlaku $p_{\max}$ a minimálnímu akustickému tlaku $p_{\min}$ odpovídají příslušná změřená napětí na voltmetru, tzn. $U_{\max}$ a $U_{\min}$. Potom poměr akustických tlaků n je úměrný poměru napětí:

$$n = \frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}.$$

Velikost činitele zvukové pohltivosti při kolmém dopadu akustického vlnění metodou poměru stojaté vlny se následně stanoví z rovnice [37]:

$$\alpha_N = \frac{4 \cdot U_{\max} \cdot U_{\min}}{(U_{\max} + U_{\min})^2} = \frac{4}{2 + n + \frac{1}{n}}.$$



Obrázek 34: Schéma interferometru - Kundtovy trubice. 1 - generátor; 2 - analyzátor; 3 - trubice; 4 - držák vzorku; 5 - sonda; 6 - mikrofón; 7 - reproduktor; 8 - vzorek; 9 - píst (dno) držáku; 10 - vzduchový polštář [38]

Na kmitočet 250–1800 Hz se používají trubice o vnitřním průměru (d_1) od 85 do 115 mm a délce od 690 do 1000 mm (velká trubice) a na kmitočet od 1801 do 6300 Hz trubice o vnitřním průměru od 24 do 33 mm a délce 190 až 280 mm (malá trubice). [38]

Tabulka 29: Přehled plošných hmotností a tloušťek vzorků pro měření akustické pohltivosti

Vzorek z frakce	Plošná hmotnost [g/mm ²]	Tloušťka vzorku [mm]
4-8 mm	3,34	24,2
2-4 mm	3,21	24,8
1-2 mm	3,08	23,2
0,5-1 mm	3,51	24,9

7.8.1 Výsledky měření

Tabulka 30: Přehled výsledků měření součinitele zvukové pohltivosti pro vzorky vyrobené ze skelného recyklátu

frakcí 4-8 mm a 2-4 mm

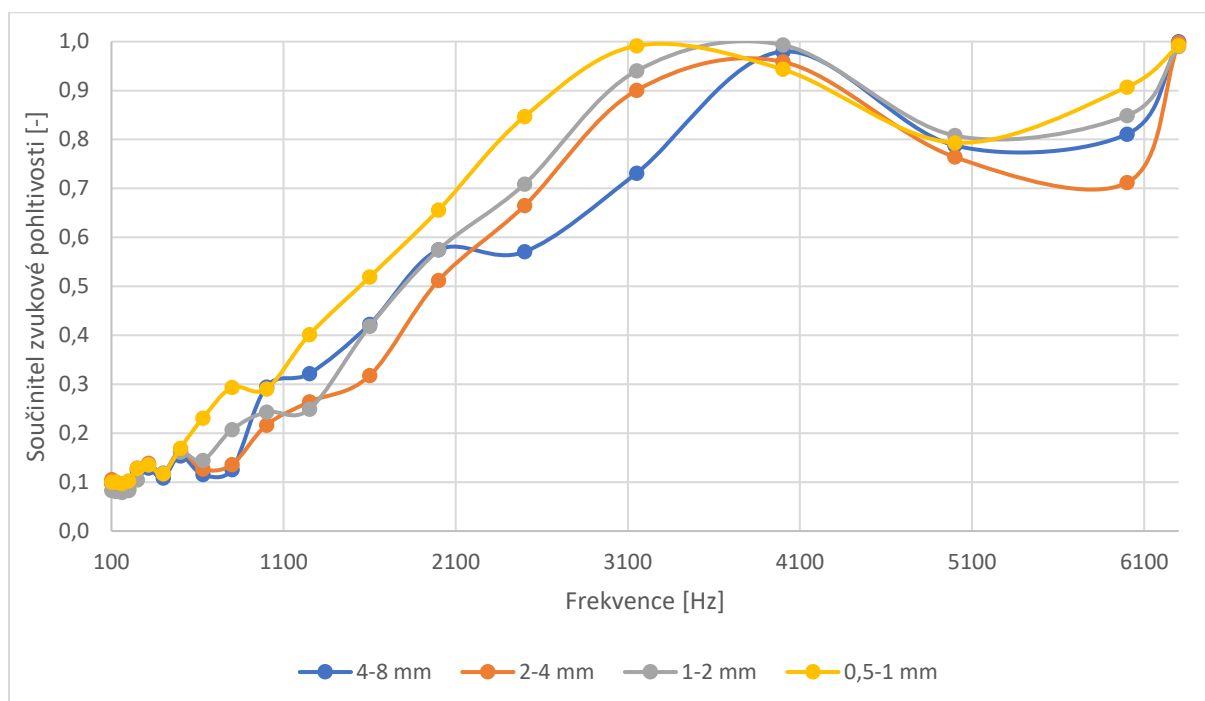
f [Hz]	4-8 mm				2-4 mm			
	U_{max} [mV]	U_{min} [mV]	n [-]	α_n [-]	U_{max} [mV]	U_{min} [mV]	n [-]	α_n [-]
100	19,60	0,50	39,20	0,097	18,00	0,50	36,00	0,105
125	19,00	0,50	38,00	0,100	18,50	0,40	46,25	0,083
160	20,50	0,50	41,00	0,093	19,10	0,40	47,75	0,080
200	19,00	0,50	38,00	0,100	18,00	0,40	45,00	0,085
250	15,10	0,50	30,20	0,124	14,50	0,50	29,00	0,129
315	14,50	0,50	29,00	0,129	13,40	0,50	26,80	0,139
400	17,40	0,50	34,80	0,109	15,90	0,50	31,80	0,118
500	12,00	0,50	24,00	0,154	11,30	0,50	22,60	0,162
630	16,30	0,50	32,60	0,116	14,80	0,50	29,60	0,126
800	14,90	0,50	29,80	0,126	13,70	0,50	27,40	0,136
1000	11,50	1,00	11,50	0,294	11,50	0,70	16,43	0,216
1250	15,50	1,50	10,33	0,322	15,70	1,20	13,08	0,264
1600	11,00	1,50	7,33	0,422	10,50	1,00	10,50	0,318
2000	28,50	6,00	4,75	0,575	31,00	5,50	5,64	0,512
2500	12,00	2,50	4,80	0,571	12,00	3,20	3,75	0,665
3150	22,40	7,10	3,15	0,731	20,20	10,50	1,92	0,900
4000	6,00	4,50	1,33	0,980	7,40	4,90	1,51	0,959
5000	13,00	4,80	2,71	0,788	13,00	4,50	2,89	0,764
6000	16,50	6,50	2,54	0,811	15,60	4,70	3,32	0,712
6300	5,70	5,50	1,04	1,000	6,00	5,50	1,09	0,998

Tabulka 31: Přehled výsledků měření součinitele zvukové pohltivosti pro vzorky vyrobené ze skelného recyklátu

frakcí 1-2 mm a 0,5-1 mm

f [Hz]	1-2 mm				0,5-1 mm			
	U_{max} [mV]	U_{min} [mV]	n [-]	α_n [-]	U_{max} [mV]	U_{min} [mV]	n [-]	α_n [-]
100	18,50	0,40	46,25	0,083	19,00	0,50	38,00	0,100
125	19,00	0,40	47,50	0,081	19,00	0,50	38,00	0,100
160	19,50	0,40	48,75	0,079	19,50	0,50	39,00	0,098
200	18,50	0,40	46,25	0,083	18,50	0,50	37,00	0,102
250	14,50	0,40	36,25	0,104	14,60	0,50	29,20	0,128
315	13,70	0,50	27,40	0,136	13,80	0,50	27,60	0,135
400	15,90	0,50	31,80	0,118	16,10	0,50	32,20	0,117

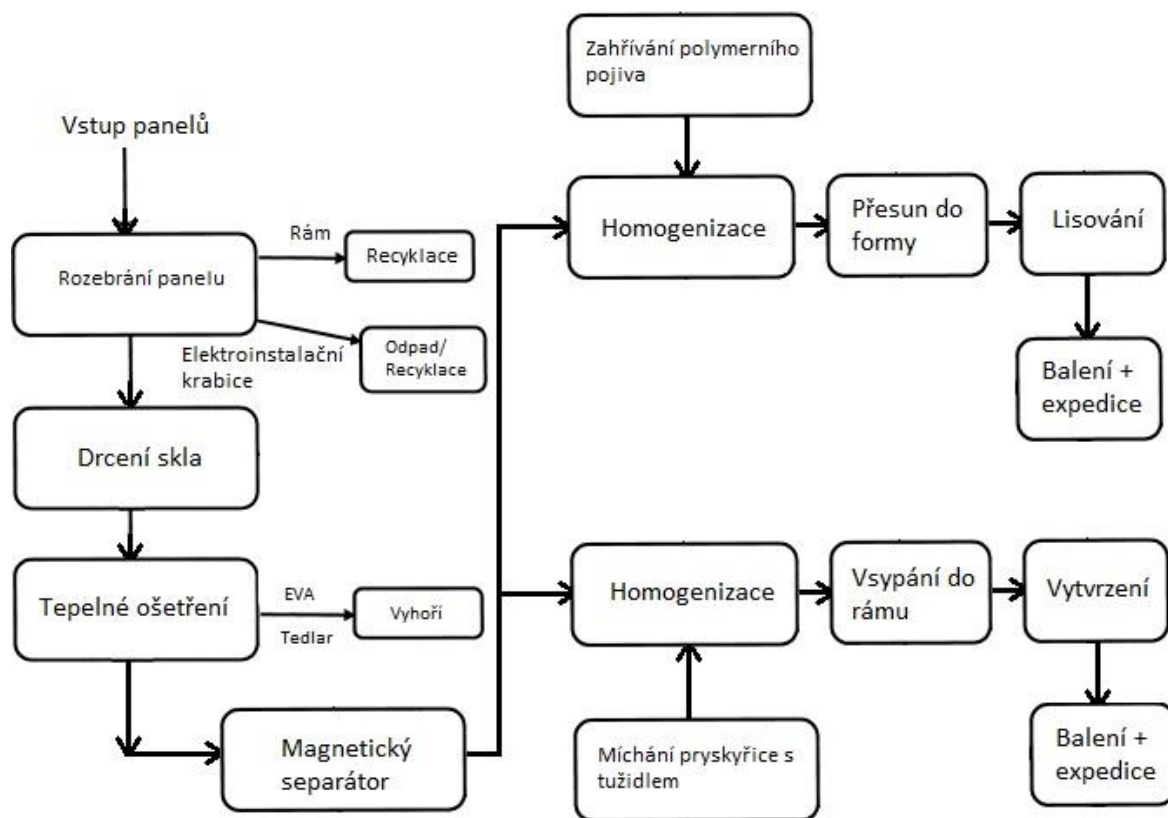
500	11,40	0,50	22,80	0,161	10,80	0,50	21,60	0,169
630	15,40	0,60	25,67	0,144	15,30	1,00	15,30	0,230
800	13,80	0,80	17,25	0,207	12,70	1,10	11,55	0,293
1000	11,50	0,80	14,38	0,243	11,70	1,00	11,70	0,290
1250	15,40	1,10	14,00	0,249	14,90	1,90	7,84	0,401
1600	10,40	1,40	7,43	0,418	10,50	1,90	5,53	0,519
2000	9,50	2,00	4,75	0,575	30,70	8,00	3,84	0,656
2500	11,70	3,50	3,34	0,709	11,20	4,90	2,29	0,847
3150	18,80	11,40	1,65	0,940	19,30	16,00	1,21	0,991
4000	5,90	5,00	1,18	0,993	6,50	4,00	1,63	0,943
5000	12,80	5,00	2,56	0,808	12,00	4,50	2,67	0,793
6000	12,50	5,50	2,27	0,849	12,20	6,50	1,88	0,907
6300	5,50	4,50	1,22	0,990	5,40	4,50	1,20	0,992



8.0 Návrh průmyslové výroby pro využití skelného recyklátu

Vzhledem k omezeným možnostem recyklace ve sklářském průmyslu má odpadní sklo z fotovoltaických panelů potenciál k využití jako plnivo ve stavebních materiálech. Nabízí se možnost výroby dlaždic pojených polymerními pojivy, nicméně je nutno v praxi ověřit případný obrus povrchu dlaždice jejím dlouhodobým používáním. Nebezpečné se jeví především vystupování skleněných zrn z povrchu dlaždice a z toho vyplývající poranění v případě užití v interiéru

bez obuvi. Další možností je využít skelný recyklát k výrobě pohledových obkladů, které mají částečné akusticky izolační vlastnosti. V takovém případě je vhodné použít průhledné bezbarvé pryskyřice k dosažení lepších estetických vlastností.



Obrázek 35:: Schéma návrhu průmyslového zpracování odpadního skla z fotovoltaických panelů

9.0 Shrnutí výsledků

Z výsledků fyzikálně-mechanických zkoušek je patrné, že poměr plniva vůči pojivu hraje zcela zásadní roli. Receptury byly navrženy tak, aby za stejného poměru plniva k pojivu bylo možno testovat vliv rozdílných poměrů malé frakce 0-2 mm k velké frakci 2-4 mm na pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku. Případně v opačném režimu testovat vliv různých poměrů plniva k pojivu při zachování totožného poměru frakcí. Ze zkušebních vzorků pojených recyklátem z odpadních PET lahví vykazovaly nejvyšší hodnoty pevností vzorky s poměrem plniva k pojivu 1:0,6. V tomto poměru byly zhotoveny vzorky s poměrem frakcí 1:1, 1:2 a 2:1. Nejvyšší pevnosti dosáhly vzorky s vyrovnaným poměrem frakcí 1:1 a to 26,8 MPa v tlaku a 13 MPa v tahu za ohybu. Vzorky s poměrem frakcí 2:1 ve prospěch frakce 0-2 mm dosáhly průměrných pevností 19,9 MPa v tlaku a 6,7 MPa v tahu za ohybu. Překvapivý je výsledek měření pevností u vzorků s poměrem frakcí 1:2 ve prospěch větší frakce 2-4 mm, kde pevnost v tlaku byla srovnatelná s pevností výše zmíněné receptury, ale pevnost v tahu za ohybu byla výrazně nízká – 2,4 MPa. Při porovnání výsledků zkoušek pevností u receptur s poměrem plniva k pojivu 1:0,3 je patrné, že vyrovnaný poměr frakcí vykazuje lepší pevnosti než přebytek frakce velké. Anorganické barvivo nemělo na pevnosti žádný vliv – u porovnávaných vzorků PET5 a PET 9 se stejnými poměry frakcí i pojiva k plnivu jsou výsledky téměř totožné – 13,7 MPa pevnost v tlaku pro vzorek s barvivem a 13,6 MPa pevnost v tlaku pro vzorek bez barviva, 5,4 MPa pevnost v tahu za ohybu pro vzorek s barvivem a 5,8 MPa pro vzorek bez barviva.

Při výrazném nadbytku menší frakce ve směsi docházelo k problémům se zpracovatelností a směs se velmi lepila.

U vzorků pojených polypropylenem MAKROPLUS bez aditiv vyšlo najevo, že při zachování poměru plniva k pojivu 1:0,6 nemá rozdílné množství malé a velké frakce na pevnosti téměř žádný vliv. Receptury PPB1 (poměr frakcí 1:1) a PPB2 (2:1 ve prospěch frakce 0-2 mm) vykazovaly téměř shodné pevnosti jak v tlaku –

31,3 MPa u PPB1, 31,0 MPa u PPB2, tak v tahu za ohybu – 19,6 MPa u PPB1 a 20,4 MPa u PPB2. To může být způsobeno velkým množstvím pojiva, které tak může být nositelem pevnosti. Nicméně jeho snížení na téměř poloviční množství u receptury PPB3 (poměr plniva k pojivu 1:0,33, poměr frakcí 1:1) výrazné snížení pevností nepřineslo – 25,3 MPa u pevnosti v tlaku a 15,4 u pevnosti v tahu za ohybu. Nicméně se velmi zlepšila zpracovatelnost směsi, která v předchozích dvou případech představovala problém jak při homogenizaci směsi v hrnci, tak při samotném vyhotovování zkušebních vzorků. Ty bylo velmi obtížné dostat do trojformy a ztuhnout je.

Se zpracovatelností velmi pomohlo přidání kluzného činidla MAKROSLIP do polymerní matrice MAKROPLUSu za účelem a snížení povrchového tření. Různé poměry frakcí či pojiva k plnivu zde neměly téměř žádný vliv na pevnosti. Přestože v receptuře PPČ3 bylo dvakrát více menší frakce 0-2 mm než frakce 2-4, při zachování poměru plniva ku pojivu vykazovaly vzorky této receptury téměř shodné výsledky jako vzorky receptury PPČ2, ve kterém byl poměr frakcí vyrovnaný – 10,4 MPa u PPČ2 v pevnosti v tlaku, 10,3 MPa u PPČ3 v pevnosti v tlaku. Mírně vyšší pevnost vykazovala receptura PPČ1, ve které bylo oproti prvním dvěma zmíněným množství pojiva sníženo na poměr 1:0,33. Pevnost v tlaku byla 11,2 MPa. Ohybové pevnosti: PPČ1 – 2,9 MPa, PPČ2 4,5 MPa, PPČ3 2,5 MPa.

U receptur, kde bylo použito expandovaného polypropylenu MAKROPLUS se stejnými aditivami jako u neexpandovaného, došlo k výraznému zlepšení zpracovatelnosti. Množství pojiva bylo sníženo až na poměr 1:0,15 a to dokonce u receptury, která obsahovala dvojnásobné množství menší frakce než frakce větší, a tudíž by potřebovala větší množství pojiva k plnému obalení zrn skelného recyklátu. To může být způsobeno rychlým prohřátím pěnových kuliček, které rychle ztrácely na objemu a rychleji obalovaly zrna skelného recyklátu, zatímco granulovaný polypropylen se rozpouštěl pomaleji. Z logiky věci ale pevnosti vzorků s tímto pojivem nevykazovaly přílišné odchylky od pevností vzorků pojených

neexpandovaným černým polypropylenem, jelikož se jedná o tu samou směs polymerů a aditiv. Pevnost v tlaku u receptury s vyrovnaným množstvím plniva obou frakcí byla 12,6 MPa, pevnost v tahu za ohybu 4,5 MPa. Pevnost v tlaku u receptury s dvojnásobným množstvím menší frakce oproti frakci větší byla 6,9 MPa, pevnost v tahu za ohybu 2,5 MPa.

Zpracovatelnost všech receptur byla hodnocena subjektivně. Přestože ocelová trojforma, do které byly směsi ukládány, byla nahřívána plamenem, docházelo k velmi rychlému chladnutí a tuhnutí směsí po přenosu z hrnce do formy. Extrémně rychle tuhly především vzorky pojené čistým MAKROPLUSEm, které bylo z tohoto důvodu velmi obtížné dusadlem zhutnit. Z toho vyplývají i nerovné povrchy těchto vzorků.

Pro výrobu zkušebních dlaždic byly použity receptury se sníženým obsahem pojiva, jelikož hydraulický lis dokázal pracovat i s velmi „suchou“ směsí. Ke snížení obsahu pojiva došlo z ekonomických důvodů, protože cena případných budoucích výrobků bude ovlivňována především množstvím pojiva. Z výsledků zkoušek obrusnosti je patrné, že nejvyšší obrusnosti vykazovala dlaždice, jejímž pojivem byl recyklát z PET odpadních lahví. Obrusnost byla $7732 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$. Naopak nejnižší obrusnost vykazovala dlaždice pojená pojivem MAKROPLUS bez aditiv. Obrusnost této dlaždice byla $2842 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$. Obrusnost dlaždice pojené pojivem MAKROPLUS s aditivou byla $5396 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$.

Za základě výsledků obdobné práce zaměřené na pojení písku odpadními termoplasty vyšlo najevo, že po vylisování dlaždice dojde k vytvoření zcela kompaktního a nepórovitého materiálu, který vykazuje nulovou nasákavost a nulovou hloubku průsaku tlakovou vodou. Z toho vyplývá i mrazuvzdornost, jelikož poškození mrazem je způsobováno cyklickým mražením a rozmrazováním vody nasáklé ve výrobku. Z tohoto důvodu nebyly tyto zkoušky v této práci provedeny.

Na závěr byly provedeny zkoušky akustické pohltivosti na vzorcích vyrobených slepením zrn skelného recyklátu epoxidovou pryskyřicí. Snaha byla tato zrna lepidlem pouze obalit a dostat do kontaktu, nikoliv prostor mezi zrny plně vyplnit pryskyřicí. Na základě rozdílných frakcí bylo očekáváno vytvoření porézních struktur o rozdílné velikosti pórů a z toho vyplývající odlišné součinitele akustické pohltivosti pro dané frekvence. Výsledky měření však nic takového neukázaly a součinitel akustické pohltivosti je tak u všech frekvencí téměř stejný bez ohledu na monofrakci, ze které byly zkušební vzorky vyrobeny. Záměrem bylo na základě výsledků měření zvolit takovou kombinaci frakcí skelného recyklátu, aby byla akustická pohltivost materiálu nejlepší. Ukázalo se ale, že v nízkých frekvencích jsou si vzorky velmi podobné a rozdíl se začne objevovat u frekvence 1000 Hz, kde se ukazuje monofrakce 0,5-1 mm jako nejlepší. Se vzrůstající frekvencí si svůj náskok nad ostatními frakcemi drží a kombinovat ji tedy s jinou frakcí postrádá smyslu. Zvýšená akustická pohltivost tohoto vzorku oproti ostatním je tak nejspíše způsobena nejvyšší plošnou hmotností a nikoliv tvorbou vhodně velkých a distribuovaných pórů.

10.0 Závěr

Cílem diplomové práce bylo ilustrovat problematiku využití skelného recyklátu ve stavebních hmotách. V teoretické části byla přiblížena problematika fotovoltaiických článků a skladba typického fotovoltaiického panelu včetně jeho chemického složení. Dále byly shrnuty vstupní suroviny pro výrobu skel a postup výroby floatového skla. Shrnuty byly rozdíly mezi běžným sklem a speciálním solárním sklem určeným k ochraně panelů před povětrnostními vlivy.

V praktické části byly ověřeny užité vlastnosti výrobků pojených polymerními pojivy. V první řadě byly vyrobeny zkušební tělesa s obsahem skelného recyklátu jako plniva a polyethylentereftalátem a polypropylenem různého druhu jako pojiva. Na základě fyzikálně-mechanických vlastností a zpracovatelnosti jednotlivých vzorků byly navrženy 3 receptury pro výrobu zkušebních dlaždic, na kterých byla provedena zkouška ohrusnosti. V každé receptuře bylo použito jiné pojivo – polyethylentereftalát, polypropylen MAKROPLUS a polypropylen MAKROPLUS s aditivem. Nejlepšího výsledku u zkoušky ohrusnosti dosáhla receptura pojená pojivem MAKROPLUS bez aditiv a to $2842 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$. To koresponduje s výsledky pevností v tahu za ohybu a v tlaku, kde zkušební vzorky pojení tímto pojivem dosahovaly rovněž nejlepších výsledků. Nejhorší obstála dlaždice pojená pojivem z odpadních PET lahví, její ohrusnost byla $7732 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$. Všechny zkušební dlaždice ovšem vykázaly ohrusnost nižší než $18\,000 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$ a byly tak zařazeny do třídy 4 označení I.

Dále byly testovány potenciál skelného recyklátu pro využití jako akusticky izolačního materiálu. Byla vyrobena zkušební tělesa, ve kterých byl povrch zrn skelného recyklátu obalen malým množstvím epoxidové pryskyřice a zrna k sobě byla přilepena se snahou vytvořit mezi nimi pórovitou strukturu nevyplněnou lepidlem. V této pórovité struktuře se měly zvukové vlny materiálem pohlcovat a přeměňovat v teplo. Byly zhotoveny 4 vzorky, každý s jinou monofrací skelného recyklátu, a byl zkoumán vliv velikosti pórovité struktury na akustickou pohltivost

materiálu. Na základě těchto výsledků byl záměr poté frakce namíchat v různých poměrech pro dosažení co nejlepších akustických vlastností. Z výsledků zkoušek je ovšem patrné, že vzorky se svou akustickou pohltivostí téměř nelišily a nenastal případ, kdy by jedna frakce měla akustickou pohltivost lepší v určitých frekvencích, zatímco jiná frakce v jiných frekvencích, a navzájem by se tak mohly doplňovat pro zajištění lepších akustických vlastností. Nejlepších hodnot akustické pohltivosti bylo dosaženo u frekvencí mezi 3000 Hz a 4000 Hz.

Na závěr je uvedeno schéma návrhu průmyslové linky pro zpracování skelného recyklátu ve stavebnictví pro výrobu dlaždic či pohledových panelů s akusticky pohltivou vlastností.

Použitá literatura

- [1] ASKARI, M.B., MIRZAEI M.A.V., MIRHABIBI, M., *Types of Solar Cells and Application* American Journal of Optics and Photonics. Vol. 3, No. 5, 2015, pp. 94-113 [online] [cit. 2017-7-18] ISSN: 2330-8494, Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/281148723_Types_of_Solar_Cells_and_Application
- [2] Směrnice Evropského parlamentu a rady 2012/19/EU ze dne 4. července 2012 o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (OEEZ). *Úřední věstník Evropské Unie*, L 197, 24.6.2012. s. 40-76. ISSN 1977-0626. Dostupné na <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:FULL:CS:PDF>
- [3] Recyklace solárních panelů – existuje správná cesta? *Česká Fotovoltaická Asociace*. [online] [cit. 2017-7-20]. Dostupné z:
http://www.cefas.cz/FileShare/Articles/1000019/M%C3%BDty%20a%20fakta_pdf.pdf
- [4] Breakthrough in PV module recycling. [online] [cit. 2017-7-21] Dostupné z:
<http://www.pvcycle.org/press/breakthrough-in-pv-module-recycling/>
- [5] BECHNÍK, B. Legislativa k recyklaci fotovoltaických panelů: Srovnání evropské směrnice a českého zákona. 20.8.2012. *oze.tzb-info.cz* [online] [cit. 2017-7-22]. Dostupné z:
<http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/8945-legislativa-k-recyklaci-fotovoltaickych-panelu>
- [6] How a solar cell works. *The American Chemical Society. Acs.org* [online] [cit 2017-7-22] Dostupné z:
<https://www.acs.org/content/acs/en/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/archive-2013-2014/how-a-solar-cell-works.html>
- [7] QUASCHNING, V., *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [8] Fotovoltaický jev. *Cez.cz*. [online] [cit. 2017-7-30]. Dostupné z:

<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/f8.htm#model>

[9] What is solar panel efficiency and how does it affect your system's performance? . Sunmetrix.com. [online] [cit. 2017-8-15] Dostupné na

<http://sunmetrix.com/what-is-solar-panel-efficiency-and-how-does-it-affect-your-systems-performance/>

[10] MAEHLUM, M.A., *Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film* <http://energyinformative.org> 15.8.2017. [online] [cit 2017-9-12] Dostupné z:

<http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>

[11] Monocrystalline solar panel. *Weamerisolar.eu/* [online] [cit 2017-9-12] Dostupné z:

<http://www.weamerisolar.eu/best-solar-panels/monocrystalline-solar-panel/>

[12] Polycrystalline solar panel. *Gogreensolar.com* [online] [cit 2017-9-12] Dostupné z:

<https://www.gogreensolar.com/products/rec-rec280tp-280-watt-multicrystalline-solar-panel-with-black-frame>

[13] Thin film solar panel. *Gogreensolar.com* [online] [cit 2017-9-12] Dostupné z:

<https://www.gogreensolar.com/products/sharp-na-v121h1-121-watt-thin-film-solar-panel>

[14] Recycling photovoltaic modules. *Bine.info*. [online] [cit 2017-9-20] Bonn: BINE informationsdienst *FIZ Karlsruhe*.

http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Englische_Infos/projekt_0210_engl_internetx.pdf

[15] BERGER, W., SIMON F.-G., WEIMANN, K., ALSEMA, E. A., *A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules*, Conservation and Recycling, Vol: 54, Issue: 10, Page: 711-718, ISSN: 0921-3449, 2010, Dostupné na <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344909002808> [cit. 2017-11-15]

- [16] WAMBACH, K., SCHLENKER, S., MÜLLER, A., KONRAD B., A voluntary take back scheme and industrial recycling of photovoltaic panels. [online] [cit 2017-10-15]. Dostupné na https://www.bnl.gov/pv/files/PRS_Agenda/3_4_PV-Module-RecyclingWambach.pdf
- [17] BECHNÍK, B. Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti. 26.9.2011. *oze.tzb-info.cz* [online] [cit. 2017-1-15] Dostupné na <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/7868-recyklace-fotovoltackych-panelu-na-konci-zivotnosti>
- [18] VONDRUŠKA, Vlastimil. *Sklářství*. Praha: Grada, 2002. Řemesla, tradice, technika. ISBN 80-247-0261-4.
- [19] Uhličitan sodný. *Cs.wikipedia.org* [online] [cit. 2017-10-20] Dostupné na https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhličitan_sodný
- [20] Uhličitan draselný. *Cs.wikipedia.org* [online] [cit. 2017-10-20] Dostupné na https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhličitan_draselný
- [21] HONSKUS, P. a kolektiv. Ministerstvo životního prostředí. *Výroba a zpracování skla*. 1
- Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách u stacionárních zdrojů nespádajících pod BREF. Říjen 2015. [online] [cit. 2017-10-25] Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_stacionarnich_zdroju_vystupu_projektu/\\$FILE/000-Vyroba_a_zpracovani_skla_20160222.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_stacionarnich_zdroju_vystupu_projektu/$FILE/000-Vyroba_a_zpracovani_skla_20160222.pdf)
- [22] Od písku ke sklu. *Agc-glass.eu* [online] [cit. 2017-11-5] Dostupné z: <http://www.agc-glass.eu/cs/produkty/od-pisku-ke-sklu>
- [23] Solar Tempered Pattern Glass For PV Industry. *Yuruglass.com* [online] [cit. 2017-11-6] Dostupné na <http://www.yuruglass.com/en/products/gfblxl/2012030457.html>
- [24] Value chain activity: Manufacturing solar glass. *Greenrhinoenergy.com* [online] [cit. 2017-11-6] Dostupné na http://www.greenrhinoenergy.com/solar/industry/ind_15_solarglass.php

[25] Solar glass and mirrors. *Greenrhinoenergy.com* [online] [cit. 2017-11-6]

Dostupné z:

http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/solar_glass.php

[26] DRICUS, de R. Anti Reflective Coating: usage for solar panels. *Sinovoltaics.com*

[online] [cit. 2017-11-11] Dostupné z:

<http://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/anti-reflective-coating-for-solar-panels/>

[27] AMMAR T.S., AUS A.N., MALEK A.H.M., KADHIM R., *Single-material multilayer*

ZnS as anti-reflective coating for solar cell applications. Optics Communications, ,

Vol: 388, Page: 84-89, 2017. ISSN: 0030-4018 [cit. 2017-11-12] Dostupné na

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401816311051>

[28] BROCK, R., REWARI, R., D.NOVOA, F., HERBERT, P., ERMER, J., C.MILLER, D.,

H.Dauskardt, R., *Quantitative adhesion characterization of antireflective coatings in*

multijunction photovoltaics Solar Energy Materials and Solar Cells, , Vol: 153, Page:

78-83, 2016, ISSN: 0927-0248. [online] [cit 2017-9-12] Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024816300411>

[29] HEE, N., SEUNG, Y., *Antireflective coating using a WO₃-TiO₂ nanoparticle*

photocatalytic composition for high efficiency thin-film Si photovoltaic modules Solar

Energy Materials and Solar Cells, , Vol: 121, Page: 108-113, 2014, ISSN: 0927-0248

[online] [cit 2017-9-12] Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092702481300559X>

[30] How is glass made? Read about toughened glass manufacture.

Breakglass.org [online] [cit. 2017-11-15] Dostupné z:

<http://www.breakglass.org/How-is-glass-made.html>

[31] KRENÍKOVÁ, V., *Odpady a druhotné suroviny II*, Univerzita J. E. Purkyně v

Ústí n. Labem, Fakulta životního prostředí 2014, ISBN 978-80-7414-872-9. [online]

[cit 2017-9-12]

Dostupné z:

http://envimod.fzp.ujep.cz/sites/default/files/skripta/47e_final_tisk.pdf

[32] User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, *Federal Highway Administration report*, U.S. Department of Transportation. [online] [cit. 2017-11-17] Dostupné z:

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/wg2.cfm>

[33] WU, S., YANG, W., XUE, Y., Preparation and properties of glass-asphalt concrete. Key Laboratory for Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan, China, 2004. [online] [cit. 2017-11-17] Dostupné z:

https://www.vegvesen.no/_attachment/110556/binary/192739

[34] PŘÍKRYL, J. *Využití skelných recyklátů ve stavebních hmotách*. Sborník konference RECYCLING 2008. Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v České Republice. [online] [cit. 2017-11-18] Dostupné z:

http://www.arism.cz/dok/REC_08.pdf

[35] MOHAJERANI A., VAJNA, J., CHEUNG, T., KURMUS, H., ARULRAJAH, A., HORPIBULSUK, S., *Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review*. Construction and Building Materials, Vol. 156, Page: 443-467, 2017. ISSN: 0950-0618. [online] [cit. 2017-11-18] Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817318068?via%3Dihub>

[36] ČERMÁK, J., *Problematika tepelně zpracovaných odpadních recyklátů a optimalizace vlastností pro jejich využití ve stavebnictví*, doktorská disertační práce FAST VUT Brno, Brno 2017.

- [37] VAŠINA, M., *Studium materiálů z hlediska tlumení zvuku a vibrací: Study of materials in terms of sound and vibration damping: teze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-4218-4 [online] [cit 2017-12-15] Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-4218-4.pdf>
- [38] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J., *Zvukoizolační materiály a materiály proti přenosu vibrací*. Učební texty FAST VUT Brno, Brno 2005.
- [39] Technický list produktu MAKROPLUS F 40-08/PPr, Unipetrol RPA, s.r.o. - Polymer Institute Brno 2017
- [40] Technický list produktu Makroslip EA 2042, , Unipetrol RPA, s.r.o. - Polymer Institute Brno 2017
- [41] Technický list produktu Epolam 2017, AXSON TECHNOLOGIES, Francie, 2017

Seznam použitých zkratk a symbolů

PV	fotovoltaika	
EVA	ethylenvinylacetát	
PET	polyethylentereftalát	
HDPE/LDPE	polyethylen s vysokou/nízkou hustotou	
PP	polypropylen	
PPČ	polypropylen černý	
PPE	polypropylen expandovaný	
PPB	polypropylen bílý	
EU	Evropská Unie	
l_i	měřená délka (i značí číslo měření)	[mm]
l_{av}	průměrná délka	[mm]
b_i	měřená šířka (i značí číslo měření)	[mm]
b_{av}	průměrná šířka	[mm]
h_i	měřená výška (i značí číslo měření)	[mm]
h_{av}	průměrná výška	[mm]
m	hmotnost	[g]
OH	objemová hmotnost	[kg/m ³]
OH_{av}	průměrná objemová hmotnost	[kg/m ³]
F	síla	[kN]
F_1	tlaková síla první poloviny trámečku	[kN]
F_2	tlaková síla druhé poloviny trámečku	[kN]
R_{ft}	pevnost v tahu za ohybu	[MPa]
$R_{ft,av}$	průměrná pevnost v tahu za ohybu	[MPa]
A	plocha	[mm ²]
R_c	pevnost v tlaku	[MPa]
$R_{c,av}$	průměrná pevnost v tlaku	[MPa]
R_{c1}	pevnost v tlaku první půlky trámečku	[MPa]
R_{c2}	pevnost v tlaku druhé půlky trámečku	[MPa]
$l_0^{1,2,3,4}$	délky vzorku, měřeny 4x	[mm]
$b_0^{1,2,3,4}$	šířky vzorku, měřeny 4x	[mm]
$h_0^{1,2,3,4}$	výšky vzorku před zkouškou ohrubnosti, měřeny 4x	[mm]
$h_{16}^{1,2,3,4}$	výšky vzorku, měřeny 4x, na konci zkoušky ohrubnosti	[mm]
m_i	hmotnost vzorku, i značí počet otočení vzorku o 90°	[g]
ρ	hustota	[g/mm ³]
U_{max}	maximální napětí	[mV]
U_{min}	minimální napětí	[mV]
p_{max}	maximální akustický tlak	[Pa]
p_{min}	minimální akustický tlak	[Pa]
n	poměr max/min akustického tlaku/napětí	[-]
α_n	akustická pohltivost	[-]

Seznam obrázků

Obrázek 1: Princip vzniku P-N přechodu ve fotovoltaickém článku [6] **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 2: Princip fungování fotovoltaického článku při dopadu slunečních paprsků. [7]
..... **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 3: Schéma zapojení fotovoltaických článků do modulů a panelů. [9]..... **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 4: Vzhled různých druhů fotovoltaických panelů - zleva: monokrystalický, polykrystalický, tenkovrstvý [11][12][13]..... **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 5: Schéma základní konstrukce fotovoltaického modulu [7] .**Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 6: Průřez fotovoltaického modulu na bázi tenkých vrstev [7] **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 7: Schéma výroby floatového skla [22]..... **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 8: Grafické vyobrazení podílu plochého skla na trhu se skly, stav z roku 2007 [24] **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 9: Grafické znázornění chemického složení skla [25] **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 10: Schéma propustnosti skla, závislost propustnosti na typu skla a jeho opracování [25] **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 11: Fotografie povrchu tzv. nášlapné vrstvy plošné dlažby [34].....**Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 12: Fotografie povrchu broušené desky z pohledového betonu s využitím skelného recyklátu [34]..... **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 13: Fotografie skelného recyklátu se zbytky polymerních folií**Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 14: Vzhled zdrcených PET lahví a HDPE/LDPE víček drcením. ...**Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 15: Fotografie aparatury k zahřívání a homogenizaci materiálu**Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 16: Fotografie povrchu vzorku, který se nepodařilo upravit kvůli příliš rychlému ochlazení. **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 17: Fotografie MAKROPLUS F 40-08/PPr - polypropylen ve formě bílých poloprůhledných granulek **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 18: Fotografie polypropylenu MAKROPLUS s aditivou a barvivem ...**Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 19: Fotografie polypropylenu ve formě expandovaných granulek **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 20: Fotografie detailu lomové plochy vzorku PPB2 – MAKROPLUS F 40-08 jako pojivo **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 21: Fotografie detailu lomové pochy vzorku PPE2 – expandovaný PP jako pojivo **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 22: Fotografie detailu lomové plochy vzorku PPČ1 – granulovaný černý PP jako pojivo **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 23: Fotografie detailu lomové plochy vzorku PET8 – pojeného PET pojivem **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 24: Fotografie vylisované dlaždice pojené PET pojivem..... **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 25: Fotografie vylisované dlaždice pojené MAKROPLUS pojivem...**Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 26:Fotografie na lomu zkušebním tělesem pojeného termoplastem a plněného pískem po zkoušce průsaku tlakovou vodou [36] **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 27: Fotografie postupu výroby forem pro výrobu vzorků na měření akustické pohltivosti v Kundtově trubici **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 28: Fotografie velkého vzorku vyhotoveného z frakce 4-8 mm **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 29: Fotografie 2 velkého vzorku vyhotoveného z frakce 4-8 mm...**Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 30: Fotografie velkého vzorku vyhotoveného z frakce 0,5-1 mm...**Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 31: Fotografie 2 velkého vzorku vyhotoveného z frakce 0,5-1 mm **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 32: Fotografie malého vzorku vyhotoveného z frakce 4-8 mm **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 33: Fotografie malého vzorku vyhotoveného z frakce 0,5-1 mm ...**Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 34: Schéma interferometru - Kundtovy trubice. 1 - generátor; 2 - analyzátor; 3 - trubice; 4 – držák vzorku; 5 - sonda; 6 - mikrofon; 7 - reproduktor; 8 – vzorek; 9 – píst (dno) držáku; 10 – vzduchový polštář) [38] **Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 35:: Schéma potenciálního průmyslového zracování odpadního skla z fotovoltaických panelů **Chyba! Záložka není definována.**

Seznam grafů

Graf 1: Křivka zrnitosti skelného recyklátu pro frakci 0-2 mm..... **Chyba! Záložka není definována.**

Graf 2: Křivka zrnitosti skelného recyklátu frakce 2-4 mm..... **Chyba! Záložka není definována.**

Graf 3: Přehled hodnot pevností v tahu za ohybu u vzorků pojených PET pojivem.. **Chyba! Záložka není definována.**

Graf 4: Přehled hodnot pevností v tlaku vzorků pojených PET pojivem..... **Chyba! Záložka není definována.**

Graf 5: Přehled hodnot pevností v tlaku a v tahu za ohybu vzorků pojených polypropylenem MAKROPLUS F 40-08/PPr..... **Chyba! Záložka není definována.**

Graf 6: Přehled pevností v tlaku a v tahu za ohybu vzorků pojených PPČ pojivem... **Chyba! Záložka není definována.**

Graf 7: Přehled hodnot pevností vzorků pojených PPE pojivem **Chyba! Záložka není definována.**

Graf 8: Srovnání hodnot pevností v tlaku a v tahu za ohybu všech receptur **Chyba! Záložka není definována.**

Graf 9: Grafické znázornění výsledků zkoušky akustické pohltivosti.... **Chyba! Záložka není definována.**

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled účinností různých materiálů fotovoltaických článků [7]	19
Tabulka 2: Přehled podílů jednotlivých složek fotovoltaických článků [14][15][16]	20
Tabulka 3: Výsledky síťového rozboru skelného recyklátu frakce 0-2 mm	37
Tabulka 4: Výsledky síťového rozboru skelného recyklátu frakce 2-4 mm	38
Tabulka 5: Hmotnostní parametry plastových lahví o objemu 2 l.....	39
Tabulka 6: Přehled receptur s PET jako pojivem.....	41
Tabulka 7: Přehled délek jednotlivých vzorků pojených PET pojivem	43
Tabulka 8: Přehled výšek jednotlivých vzorků pojených PET pojivem	44
Tabulka 9: Přehled šířek jednotlivých vzorků pojených PET pojivem	45
Tabulka 10: Přehled hmotností, objemových hmotností a pevností v tahu za ohybu vzorků pojených PET pojivem	46
Tabulka 11: Přehled pevností v tlaku vzorků pojených PET pojivem	48
Tabulka 12: Přehled technických parametrů polymeru MAKROPLUS F 40-08/PPr [38]....	50
Tabulka 13: Přehled technických vlastností aditiva MAKROSLIP EA 2042 [39]	51
Tabulka 14: Přehled receptur s různými druhy polypropylenu jako pojivem	53
Tabulka 15: Přehled délek a výšek vzorků pojených polypropylenem MAKROPLUS F 40- 08/PPr	53
Tabulka 16: Přehled šířek, hmotností a objemových hmotností vzorků pojených polypropylenem MAKROPLUS F 40-08/PPr.....	53
Tabulka 17: Přehled pevností v tahu za ohybu a v tlaku vzorků pojených polypropylenem MAKROPLUS F 40-08/PPr.....	54
Tabulka 18: Přehled délek a výšek vzorků pojených PPČ pojivem	54
Tabulka 19: Přehled šířek, hmotností a objemových hmotností vzorků pojených PPČ pojivem.....	55
Tabulka 20: Přehled pevností v tahu za ohybu a v tlaku vzorků pojených PPČ pojivem ..	55
Tabulka 21: Přehled délek a výšek vzorků pojených PPE pojivem	56
Tabulka 22: Přehled šířek, hmotností a objemových hmotností vzorků pojených PPE pojivem.....	56
Tabulka 23: Přehled výsledků měření pevnosti vzorků pojených PPE pojivem	56
Tabulka 24: Shrnutí výsledků měření pevností v tlaku a v tahu za ohybu všech receptur	57
Tabulka 25: Přehled receptur pro výrobu zkušebních dlaždic.....	60
Tabulka 26: Přehled výsledků měření obrusnosti	61
Tabulka 27: Shrnutí vypočtených hodnot obrusnosti	61
Tabulka 28: Technické parametry epoxidové pryskyřice Epolam 2017 [40].....	64
Tabulka 29: Přehled plošných hmotností a tloušťek vzorků pro měření akustické pohltivosti	67
Tabulka 30: Přehled výsledků měření součinitele zvukové pohltivosti pro vzorky vyrobené ze skelného recyklátu frakcí 4-8 mm a 2-4 mm	67