

Fakulta strojního inženýrství  
Ústav konstruování /  
Odbor Reverzního Inženýrství a Aditivních technologií

Faculty of Mechanical Engineering  
Institute of Machine and Industrial Design /  
Department of Revers engineering and additive technologies

## Robotický 3d tisk vysoce plněného recyklovaného PET

Projekt disertační práce  
[Dissertation work project]

Autor práce: **Ing. Martin Krčma**  
Author



---

## OBSAH

<b>OBSAH</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Název česky a anglicky</b> .....	<b>4</b>
<b>2 Klíčová slova</b> .....	<b>4</b>
<b>3 Anotace</b> .....	<b>5</b>
<b>4 úvod</b> .....	<b>6</b>
<b>5 Shrnutí současného stavu poznání</b> .....	<b>7</b>
Tisk ve stavebnictví.....	7
4.1.1 Dshape.....	8
4.1.2 Soukromý sektor .....	8
4.1.3 Tisk ve stavebnictví pomocí FFF (Fused Filament Fabrication) .....	8
4.1.4 Materiálové vlastnosti 3d tištěného betonu.....	9
4.1.5 Klasifikace stavebních prvků vhodných pro 3d tisk .....	10
4.2 Tisk robotickou paží .....	10
4.2.1 Anti gravity printing.....	11
4.2.2 Prostorový tisk .....	12
4.3 Melt extrusion printing .....	13
4.4 Recyklovaný plněný plast a jeho využití. ....	15
4.4.1 Důležité vlastnosti PET (Polyethylentereftalát):.....	15
4.4.2 Recyklace PET .....	16
4.4.3 Proces recyklace PET.....	16
4.4.4 Polybet.....	16
Polymerní betony .....	18
<b>6 Analýza, interpretace a zhodnocení</b> .....	<b>20</b>
5.1 3d tisk v architektuře .....	20
5.2 Zpracování tiskové metody .....	20
5.2.1 Robotický tisk .....	21
5.3 Recyklát PET jako materiál pro tisk stavebních prvků .....	21
5.3.1 Plastbeton vyvíjený firmou ViaAlta.....	21
<b>7 Podstata, cíle a přínos dizertační práce</b> .....	<b>22</b>
6.1 Podstata práce .....	22
6.2 Cíl disertační práce .....	22
Dílčí cíle disertační práce.....	22
1. Nalezení procesních parametrů materiálu, v závislosti na experimentálně zjištěných vlastnostech. ....	22
2. Vliv poměru matrice a plniva na mechanické vlastnosti 3D tisknutého materiálu a porovnání s lisovaným stavem včetně analýzy soudržnosti vrstev. ....	22
3. Vývoj tiskové strategie a jejích limitů pro plněný materiál PET.....	23
6.3 Přínosy disertační práce.....	23
<b>8 Vědecká otázka a pracovní hypotéza</b> .....	<b>24</b>
7.1 Jak závisí kvalita tiskové stopy na procesních parametrech tisku z vysoce plněného polymeru?.....	24
7.2 Jakých mechanických vlastností dosahuje 3d tisk z vysoce plněného polymeru: .....	25
<b>9 Způsob řešení a použité vědecké metody</b> .....	<b>27</b>

---

8.1	Testovací sestava.....	27
	Současný postup míchání směsi a tisku:.....	27
9.2	Zpracování procesních parametrů.....	28
8.2.1	Parametry extruze.....	28
8.2.2	Tiskový nános.....	28
9.3	Mechanické vlastnosti.....	29
8.3.1	Testy pro beton dle ČSN EN 12390:.....	29
8.3.2	Materiál a míšící poměry.....	29
8.4	Tisková strategie a aplikace technologie.....	30
	Testy tiskových strategií:.....	30
8.4.1	Aplikace robotického tisku ve stavebnictví.....	30
	Řídicí systém robota KUKA KR60.....	31
8.4.2	Kontrola geometrie pomocí digitalizace.....	31
8.5	Demonstrace technologie.....	32
<b>10</b>	<b>Časový rozvrh a etapy řešení.....</b>	<b>33</b>
<b>11</b>	<b>Odůvodnění nutnosti a potřeby řešení.....</b>	<b>34</b>
<b>12</b>	<b>Spolupráce s jinými institucemi.....</b>	<b>35</b>
<b>13</b>	<b>Předpokládané náklady s řešení a jejich zdroje.....</b>	<b>36</b>
<b>14</b>	<b>Charakteristika předpokládaného výsledku řešení.....</b>	<b>37</b>
<b>15</b>	<b>Bibliografie.....</b>	<b>38</b>
<b>16</b>	<b>Vědecký životopis.....</b>	<b>40</b>

---

## **1 NÁZEV ČESKY A ANGLICKY**

Robotický 3d tisk vysoce plněného recyklovaného PET

Robotic 3d printing of highly filled PET recycle

## **2 KLÍČOVÁ SLOVA**

### **Klíčová slova**

Aditivní výroba, PET, procesní parametry, recyklace, robotika

### **Keywords**

Additive manufacturing, PET, process parameters, recycling, robotics

---

### 3 ANOTACE

Práce se zabývá využitím plněného recyklátu PET, obchodní název Polybet, jako materiálu pro 3d tisk. Materiál má vlastnosti vhodné pro použití ve stavebnictví, v některých aplikacích i jako náhrada betonu, alternativně jako jeho komplement ve formě forem a výztuh. Práce identifikuje robotické metody tisku jako vhodné pro použití ve stavebnictví, a zkoumá vhodnost použití materiálu pro tyto aplikace. Za tímto účelem jsou zpracovány procesní parametry a tiskové postupy z materiálu, a je provedena charakterizace jeho mechanických a materiálových vlastností.

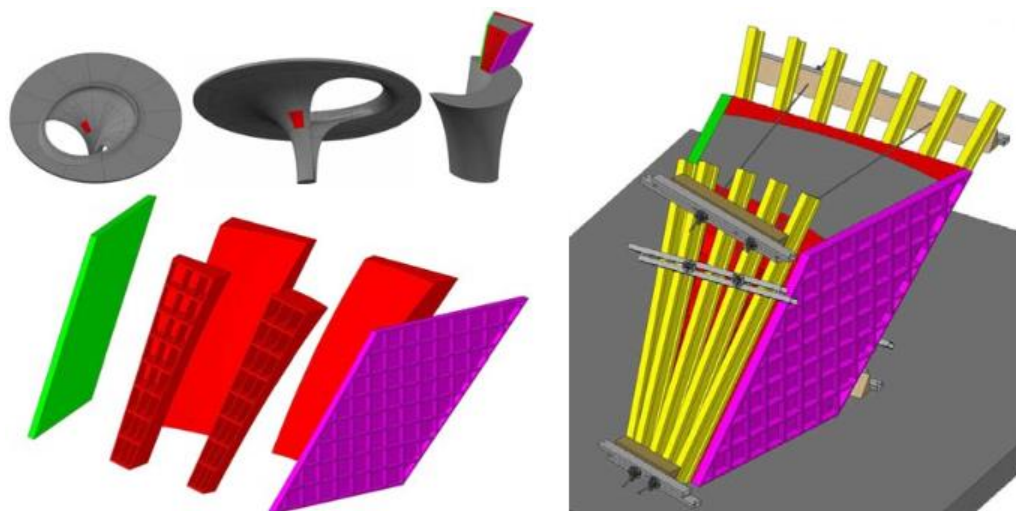
Společně s dospíváním metod aditivní výroby roste počet aplikací a využitých materiálů. V poslední době bylo dosaženo podstatného pokroku na poli 3d tisku ve stavebnictví. Roste počet institucí, které jsou v oboru aktivní, počet přístupů k problému a již dokončených projektů. Rostou už i první stavby.

Aditivní výroba v produkci bojuje s rozšířením měřítka na sériovou výrobu. Ale stavba, stavěná klasickým způsobem, je v jistém smyslu prototyp. Většina budov se staví pouze v jednom kuse, a většina práce je manuální, s nízkým stupněm automatizace. Je tu tedy potenciál, kdy by aditivní výroba do stavebnictví mohla přinést stejnou revoluci jako přinesla pro prototypovou výrobu. Umožnila by architektům žádanou, ale v současnosti ekonomicky nákladnou volnost formy, a snížení nákladů nejen pro ni, ale i pro běžné stavby. Se stavbou klasickým postupem je spojeno velké množství odpadu a podstatná časová investice. Zavedení aditivní výroby v tomto odvětví by naopak mohlo vést k zvýšení efektivity a možnosti sériovosti.

Jako první volba materiálu se jeví beton, ale beton je materiál s velmi specifickými vlastnostmi a jeho aplikace pro 3d tisk není přímočará. Termoplasty, používané pro 3d tisk v menším měřítku, nesplňují nároky na stavební materiál, jsou příliš drahé a vyvíjejí podstatnou zátěž na životní prostředí. Jejich použití pro 3d tisk je ale velmi dobře zpracované. Třebíčská firma ViaAlta nabízí řešení, na trh uvádějí technologii pro zpracování materiálu nazývaného jako Polybet. Je to kompozit, plnivem je běžný písek nebo drcené sklo, a pojivem je poměrně malé množství PET recyklátu. Materiál je velmi ekonomický kvůli recyklovanému plivu, a písek jako plnivo činí materiál vhodný pro stavebnictví.

---

## 5 SHRUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ



Obr 1 3d tisk forem pro lití betonu, výsledné formy vyrobeny metodou VoxelJet

### Tisk ve stavebnictví

První myšlenka pro využití metod rapid prototypingu ve stavebnictví byl J. Pegna, který v 1997 představil metodu aditivní výroby stavebních komponentů pomocí střídajících se nánosů písku, selektivních nánosů cementu, a následné hydratace a vytvrzení směsi pomocí páry. Nános byl proveden manuálně. Byly vyrobeny jednoduché objekty simulující stavební prvky a otestovány jejich mechanické vlastnosti, v nejsilnější ose 45° nánosů, měli pevnost v tahu 20.19 MPa a Youngův modul 335.15 MPa. Autor dále rozvádí potenciální podobu aplikace pro stavebnictví a výhody automatizace [1].

Pro použití ve stavebnictví byla vyvinuta metoda Contour Crafting, která funguje na principu extruze betonu a tvarování nánosů. Má hrubý nános (cca 5 cm), a tiskne pouze v 2,5D – nejsou schopné plnohodnotného 3D tisku. Podstata technologie spočívá v trysce, která ukládá betonový mix, a uhlazuje stopu pomocí nastavitelné lopatky. Ta následuje směr tisku, a výsledkem je stěna s hladkým bočním profilem. Díky velkému objemu extrudovaného materiálu je technologie vhodná pro disk rozměrných staveb. Její vynálezce, Ben Khoshnevic ji navrhnul pro stavbu celých budov v celku. Jako



Obr 2 Vize Contour Crafting

hlavní přednosti systému uvádí snížení závislosti na pracovní síle a ekonomické výhody díky snížení nákladů [2]. Jednodušší metodou je Direct concrete printing, technologie nepoužívá nastavitelnou lopatku, pro dosažení podobné kvality tisku je použita nižší výška vrstvy, a tryska má standardní kruhový průřez.



Obr 3 Pavilon od D shape a proces ApisCor

#### 4.1.1 Dshape

Vyšší stupeň volnosti je dosažen na tiskárnách DShape a Voxeljet, které tisknou metodou Binder Jet. Metoda je založená na principu nánosu tenkých vrstev prášku, jejich spojení pomocí nástřiku vody a aditiv, tiskovou hlavou podobnou inkoustovým tiskárnám. Výsledný díl je monolitický, s plnohodnotnou tvarovou volností, bez možnosti vložení výtuh, a mechanické vlastnosti jsou podstatně nižší než litý beton. Využití metody je tak především na formy pro litý beton, prototypy a vizuální prvky [3][4].

#### 4.1.2 Soukromý sektor

Vývoj v 3d tisku betonu a budov je podstatný v soukromém sektoru. Čínská firma WinSun již vytiskla například 10 rodinných domů nebo kancelářskou budovu v Dubaji. Jejich portálový stroj má pracovní rozměry 20 stop na výšku, 33 na šířku a 132 na délku. Tisknou jednoduše tvarované prvky pomocí direct concrete printing, které na místě spojují, doplňují armaturou, izolací, rozvody a vylévají betonem [5].

Podobných úspěchů dosahuje ruská firma ApisCor. Používá také technologii direct concrete printing, ale s velmi malou tryskou, v rámci centimetru, oproti přibližně pěti centimetrům, které používá WinSun. Jejich stroj není portálový, ale je založený na stroji typu jeřábu, s válcovou tiskovou plochou, okolo 100 m<sup>2</sup>[6].

#### 4.1.3 Tisk ve stavebnictví pomocí FFF (Fused Filament Fabrication)

Použití metody FFF, která je mezi 3d tiskárnami na trhu nejčastěji zastoupená, je ve stavebním průmyslu méně časté, především kvůli malé tiskové obálce, nevhodnosti termoplastů pro konstrukční průmysl a vysoké ceně.

---

Existuje však několik aplikací, jak ve fázi návrhu, tak již instalovaných. Například práce Brian Peters—Building Bytes, která se zabývá návrhem nestandardních cihel s volitelnými akustickými, optickými a termálními vlastnostmi. Na stavbě se tyto elementy dají kombinovat s tradičními cihlami, a jde tak opustit omezení a vnést nové možnosti do tradiční konstrukční metody. Materiálem, který byl použit je směs keramické pasty s polymerem [7].

Experimentální projekt zaměřený na použití FFF v architektuře a vývoj nových postupů pro toto použití zpracovali DUS Architects, s názvem Canal House. Vlastní Canal house je struktura vytištěná na účelové 3d tiskárně s názvem KamerMaker. Vytištěné díly o maximální velikosti 2,2x2,2x3,5 metrů jsou přímo na místě instalovány. Jedná se o elementy zdí, s vnitřní strukturou, která poskytuje dutiny pro výplň strukturální a izolační, obsahuje rozvody pro vodu a energie a různé systémy výztuh. Jako výztuhy jsou použity vnitřní systémy příček, a tvarovaný povrch elementů. Vize domu je stavba na míru složená z na místě vyrobených prvků. V celém projektu je hojně využitý parametrický design [7].

#### 4.1.4 Materiálové vlastnosti 3d tištěného betonu

Beton pro 3d tisk má odlišné vlastnosti od běžně používaných konstrukčních betonů. Spojuje tyto reologické vlastnosti: Musí být dopravitelný pumpou, Musí být umožňovat extruzi, a musí být stavitelný – unést svou váhu a váhu následujících vrstev, když je stavěn. Tyto nároky vedou na beton s horšími vlastnostmi než kvalitní konstrukční beton, nebo vyšší cenou kvůli velkému přídavku aditiv. Sekundárním problémem metody je obtížné zahrnutí výztuží do betonu, a na vyztuženém betonu je založena podstatná část současné konstrukční techniky.



*Obr 3 Příčný trám s instalovaným systémem externích výztuží*

Testovací lité vzorek betonové směsi má po měsíčním vytvrzení krychelnou pevnost  $R_m$  53.5 MPa. Vzorek, vyroben tiskem, má pevnost 37.2 MPa. Nabízí dvojitě vysvětlení tohoto jevu: Nedokonalé vytvrzení mezi vrstvami a pokles průřezu na styku dvou vrstev. Z betonu je následně vytisknut příčný trám rozdělený do sekcí, je v něm instalován externí systém výztuže. Na trám byly vykonány zátěžové testy, a byl porovnán s ekvivalentním plným trámem. 3d tištěný trám ukázal předčasné selhání a celkově velkou deformaci, z důvodu selhání v místech spojů s elementy výztuže a mezi díly [8].

#### 4.1.5 Klasifikace stavebních prvků vhodných pro 3d tisk

Vytisknutelné prvky pro stavebnictví se dají rozdělit podle různých parametrů:

Velikosti největšího rozměru vytištěného objektu:

*Od jednoho decimetru, po metr, 5 metrů a 10 metrů*

Kde se objekt tisknul:

*Přímo na místě, Miniaturní, přenosná továrna, nebo továrna na prefabrikáty*

Skládá se z vytisknutého objektu větší celek?

*V celku přímo na místě, Skládání více vytištěných objektů, skládání s externími objekty při montáži, nebo skládání s externími prvky během tisku*

Podle typu podpor:

*Žádné, Tištěné a ponechané, nebo tištěné a odstraněné, Externí a ponechané, externí a odstraněné.*

Autor dále rozebírá vytisknutelné objekty s ohledem na stroje na kterých je možné je zpracovat, a na jejich výskyt v literatuře. Jeho poznatky jsou, že většina strojů je pouze 3 osá a pracuje s tryskou na úrovni centimetrů. Také zjistil, že systémy na extruzi betonu nepoužívají podpory, přestože by tak mohli překonat některá omezení systému, a skládání objektů do větších celků se provádí pouze na základní úrovni [7].

## 4.2 Tisk robotickou paží

Jako náhrada portálového stroje, především pro velkorozměrové aplikace, jsou využívány robotické paže – průmyslový robot definovaný normou ISO 8373:1994. Pro aplikace jako je obrábění, formování, podávání materiálu nebo 3d tisk jsou velmi výhodné vlastnosti robota – poměrně nízká cena, velký dosah a možnost využití různých koncových zařízení [9].



Obr 4 Příklad možnosti robotického tisku – zakřivené vrstvy, nános materiálu (Zaha Hadid Architects)

Výhodou 3d tisku robotickou paží je možnost využít více os, a tím se vyhnout některým omezením tříosých systémů. Nakloněním tiskové hlavy lze překročit maximální úhel převisu stěny, a dosáhnout zvýšené kvality povrchu [10]. Další z možností je tisk do formy, nebo na již existující objekt. Takto lze doplnit existující objekt, ušetřit

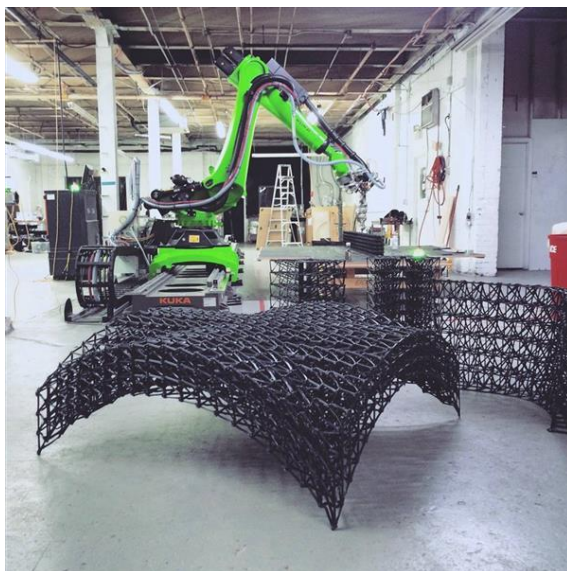
podpory a výrazně zvýšit povrchovou kvalitu. Metoda je velmi zajímavá i z inženýrského hlediska, umožňuje použít nejlepší orientaci vlákna vůči namáhání i když jsou směry namáhání v objektu kombinované.

Robotická paže umožňuje opustit rozdělení na horizontální vrstvy. To umožňuje několik výhodných přístupů k tisku. Například vytvořit kvalitní povrchy nánosem vrstev dle normál povrchu, včetně volitelných struktur na povrchu objektů. Je možné využít metodu adaptivního slicing, která byla výše zmíněná, nebo pokročit ještě dál a tisknout zakřivené vrstvy v závislosti na geometrii. Ch. Dai takto vytiskli i velmi čtenité objekty naprosto bez podpor [11].

#### 4.1.1 Anti gravity printing

Naprosté opuštění vrstev je ideou metody nazvané jako beztlížný tisk. Pomocí extruze dokáže technologie budovat křivky v prostoru. Výsledný objekt tak není definován spojením vrstev, ale spojením křivek. Materiál v první vezmi projektu byla rychle tvrdnoucí polymerní pěna. Tisková hlava ze skládala z mísící trysky, materiál byl dodáván dvojitým pístovým extruderem a hlava byla osazena horkovzdušným vytápěním. Pro ovládání robota byl vytvořen plugin v Grasshopperu [9].

Technologii dál vyvinul J. Laarman vyvinul tiskovou hlavu podobnou svářečce, která mu umožňuje tisknout touto metodou z kovu. Zařízení nazývá MX3D, a umožňuje tisk libovolně zakřivených prostorových drátů z kovů jako je nerezová ocel, hliník nebo bronz. Metoda vyžaduje jemnou kontrolu pulzu svářečí hlavy a kontrolu pojezdu v závislosti na používaném materiálu. Pro to je používán plugin HAL robot programming, pro řízení robota ABB. Jeden z prvních vytištěných objektů je Dragon bench, lavička o největším rozměru 3.5 m, která ukazuje tvarovou volnost a cenovou nenákladnost. Velkou výhodou je možnost libovolného zkřížení líní v prostoru. Budoucí využití pro technologii je pro tisk vyztužovací klece pro beton, a autor má v plánu vytisknout funkční most v Amsterdamu [9].



Obr 5 Branch technology – příklad tisku pomocí prostorové struktury

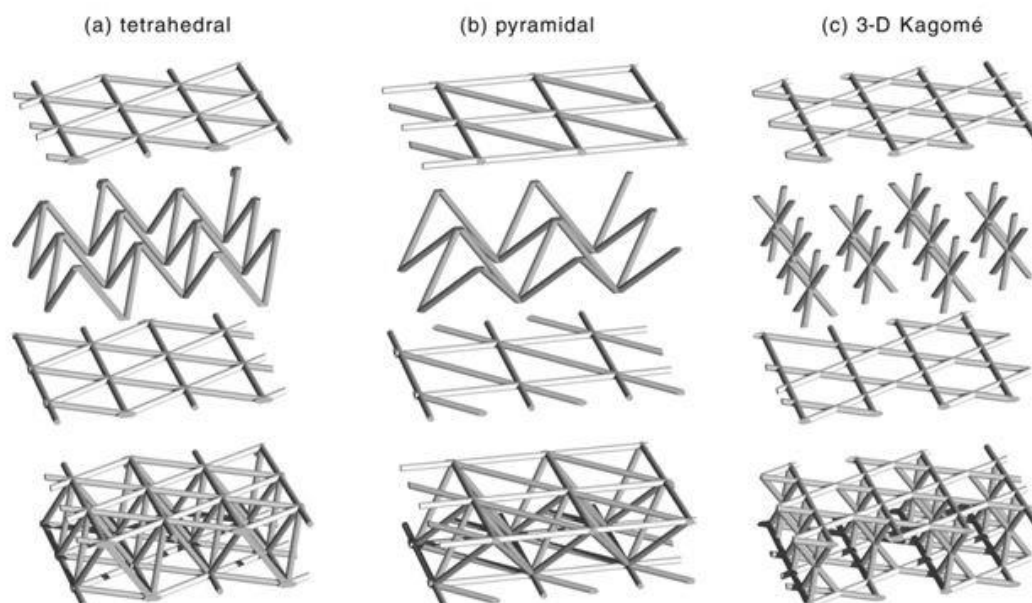


Obr 6 MX3D Anti-gravity print pomocí svářečí hlavy

#### 4.2.2 Prostorový tisk

Existuje několik patentů, které se zabývají tiskem v prostoru a tisknou strukturované „ježky“ které spojují do stavebních dílů, které mohou fungovat samy o sobě, nebo doplněné o výplň z pěny nebo cementového materiálu. [12] Metoda se používá jak v soukromém sektoru, tak ve výzkumných institucích. Používané zařízení jsou velmi podobné, hlavním prvkem je vždy průmyslový robot. Hlavní instituce na tomto poli jsou firmy Ai Build a Branch Technology, a Gramazio Kohler Institute. Všechny zkoumají možnost použití prostorově tištěné struktury jako formy a výztuž pro volně tvarované betonové prvky. Ai build pokračuje ve zvyšování komplexity navrhovaných objektů, a GmK Institute v práci pokračuje, ale začali používat tiskovou technologii na principu navařování kovu [13], [14].

Metoda oproti běžnému 3d tisku vyžaduje jemnou kontrolu rychlosti extruze, materiál je přesně uložen, zchlazen pro vytvrzení. Použitým materiálem jsou plněné termoplasty.

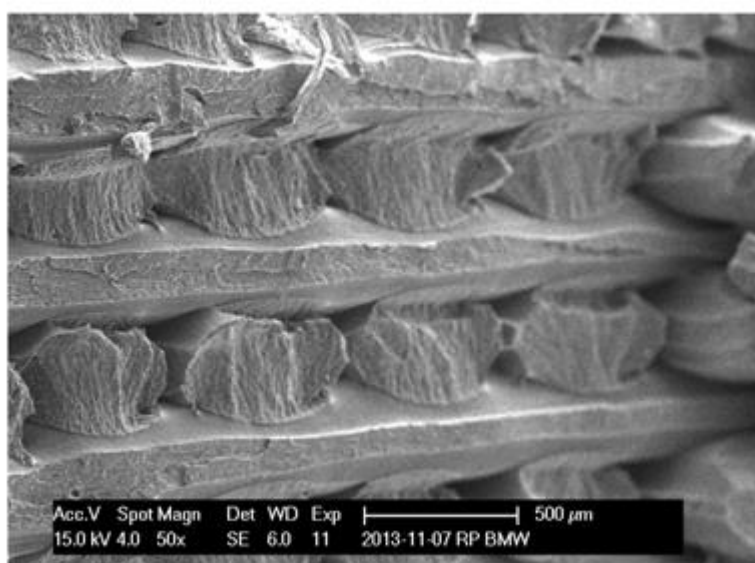


Obr 7 Vytvoření struktury v prostoru, (<http://www.virginia.edu/ms/research/wadley/cellular-materials.html>)

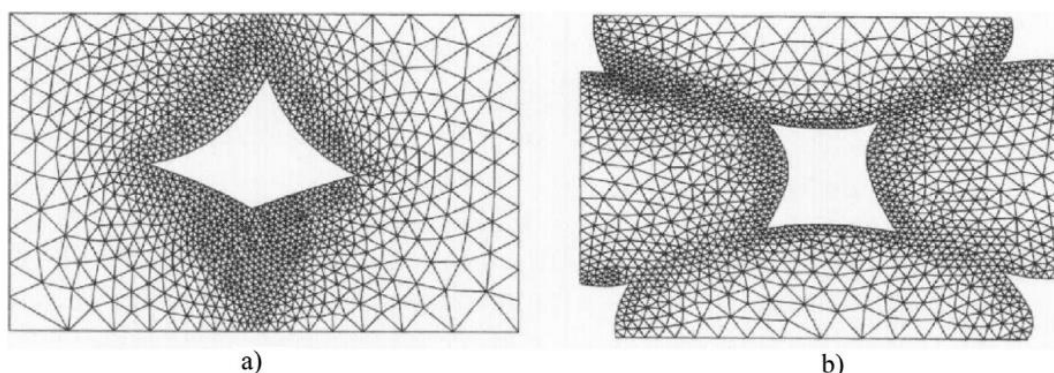
Výhodou je, že tak vytištěná struktura a výsledné díly mají velmi nízké procento vytištěného materiálu vůči vzduchu nebo plnivu a tisk dílů je tak velmi rychlý. Zároveň si ale mají excelentní mechanické vlastnosti. Materiály s podobnými strukturami, nazývané jako buňkové materiály, se používají v aplikacích je důležitá nejmenší váha při nejvyšší pevnosti, jako je aerospace. [15]

### 4.3 Melt extrusion printing

Na kvalitu tisku mají podstatný vliv procesní parametry – teploty a teplotní gradienty. Nejdůležitější je teplota trysky (a zároveň teplota nanášeného materiálu) dále teplota podložky a komory. Se zvyšující teplotou se zlepšuje přilnutí mezi jednotlivými nánosy a roste i výsledná krystalinita, která má podstatný vliv na mechanické vlastnosti polymeru [16]. Příliš vysoká teplota způsobuje degradaci polymeru a rozměrovou nepřesnost kvůli roztékání nánosové stopy. Proto je součástí vyústění trysky chlazení nanášené stopy. Příliš rychlé ochlazování zhoršuje přilnutí mezi vrstvami a v materiálu dochází k nerovnoměrnému smrštění, které má za následek pokroucení tisku. Tyto jevy lze omezit pomocí vyhřívané komory nebo podložky, kde je držena zvýšená teplota proti okolnímu prostředí, blízko bodu skelného přechodu daného plastu [17].



Obr 8 Adheze mezi vrstvami



Obrázek 9 Adheze mezi nánosy s pozitivním a negativním překryvem

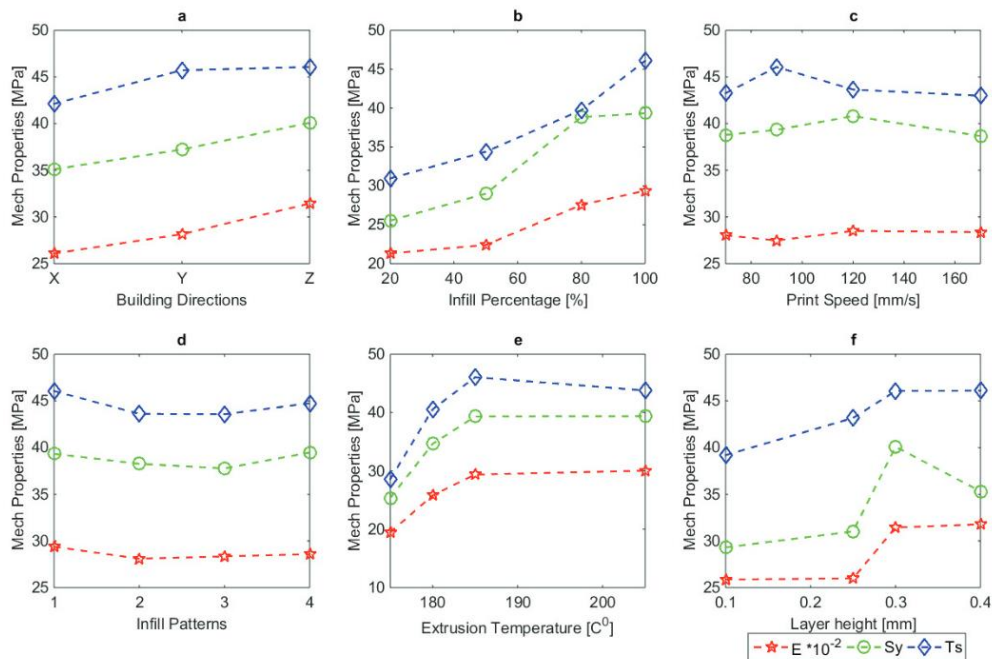


Figure 7: The resulting mechanical properties [MPa] caused by (a) building direction, (b) infill percentage, (c) printing speed, (d) infill patterns, (e) extrusion temperature, and (f) layer height, where E is Young's modulus and Sy is the yield strength and Ts is the tensile strength.

*Obr 10 Odlišné mechanické vlastnosti v závislosti na parametrech tisku*

Díly vyrobené 3d tiskem mají specifické problémy. Jejich mechanické vlastnosti nejsou konzistentní a záleží na orientaci při výrobě a směru zatížení. Tato vlastnost je nazvaná anizotropií, dá se snížit optimalizací procesních parametrů, především vyhříváním komory. Anizotropii způsobuje nedokonalé spojení nánosů materiálu, buď ve stejné vrstvě nebo mezi vrstvami – částečná vzdušná mezera mezi vlákny je nutná, dá se jí částečně vyhnout pomocí překryvu, ale pak můžu docházet k přelivu materiálu do nežádoucích oblastí. Při zatížení pak kvůli vzdušným mezerám a nedokonalému propojení materiálu nastává delaminace – oddělení vrstev – před dosažením meze pevnosti materiálu [18].

Pro testování mechanických vlastností 3D tisku je norma ISO 17296-3:2014. Obecná norma pro testování plastů je ISO 527 (Plastics – Determination of tensile properties), která předepisuje tvar vzorku, a běžně se používá pro díly vzniklé 3d tiskem [19][20].

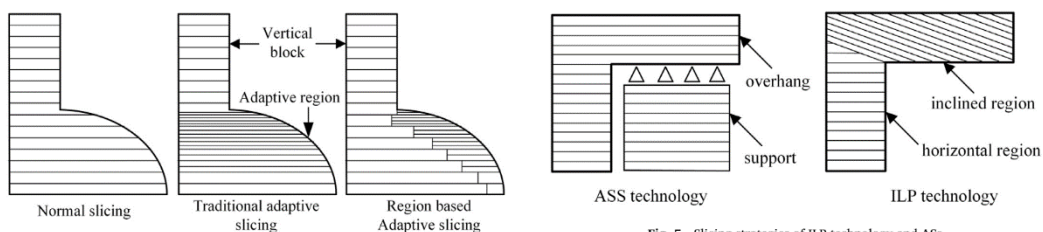
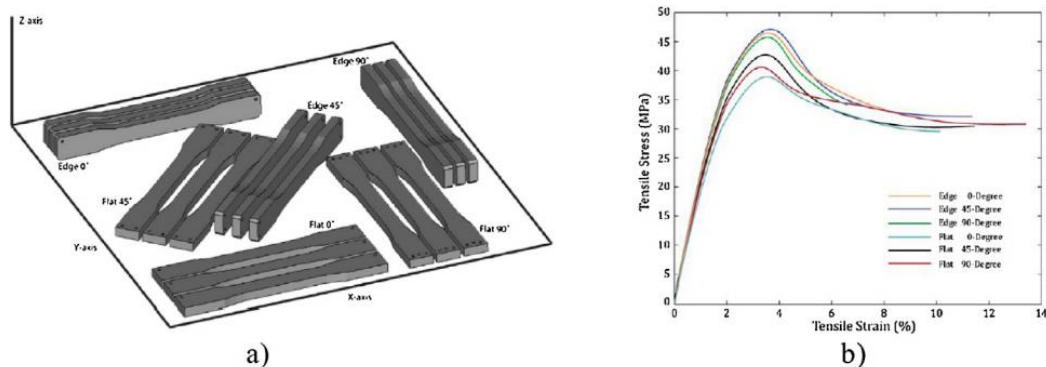


Fig. 4. Three types of HLP.

Fig. 5. Slicing strategies of ILP technology and ASS.

*Obr 11 Adaptivní slicing – dva přístupy*

Pro dosažení vysokých mechanických vlastností je nutné hledat ideální orientaci dílu. Zlepšení lze dosáhnout pomocí kombinace různých směrů při tisku. [21] Metodou pro návrh složitějších dílů, které využívají adaptivního slicing – generování tiskových cest s různou orientací nebo tloušťkou, se zabývá [22]. Demonstruje, jak se dají vytisknout díly s většími převisy a vyšší kvalitou povrchu pomocí natáčení jednotlivých vrstev.



Obr 12 Klasifikace vlivu anizotropie na pevnost v tahu

#### 4.4 Recyklovaný plněný plast a jeho využití.

Mezi nejčastěji používanými materiály pro 3D tisk – ABS a PLA, se v poslední době přidala celá řada materiálů, jak čisté polymery tak materiály kompozitní. Jeden z novějších polymerů používaným pro 3D tisk je PET, má vynikající mechanické vlastnosti, a slušnou teplotní stabilitu.

##### 4.4.1 Důležité vlastnosti PET (Polyethylentereftalát):

Hustota od amorfního stavu po čistě krystalický: 1,37-1,45 g/cm<sup>3</sup>.

Youngův modul: mezi 2800-3100 MPa.

Teplota skelného přechodu: 67°C, rozpouští se při 250°C, vaří při 350°C.

Při teplotách nad 300°C dochází k degradaci, především k uvolňování Acetaldehydu [23].

**Table 1**  
Recollection amounts in 1000t of PET bottles in 2009 in Europe, USA, Brazil and Japan.

Country	Amount (1000t)	Percentage (only for Europe)	Recollection rates
Europe	1363 (sum)		48.4%
Germany	393	29%	93.5%
Italy	175	13%	41.7%
France	155	11%	62.8%
Spain	102	7%	39.2%
UK	102	7%	32.7%
other EU	436	32%	
USA	655		28%
Brazil	262		55.6%
Japan (2008)	445		77.9%

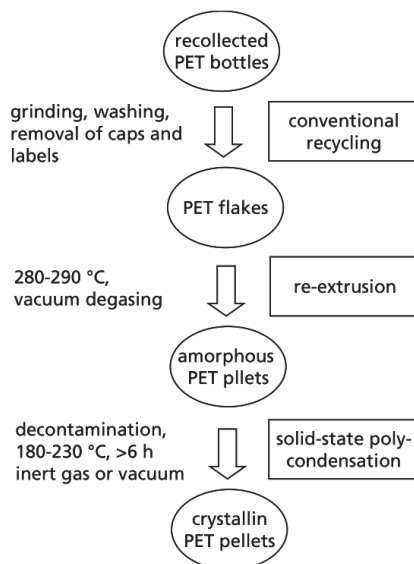
**Table 2**  
End markets for PET recyclates in Europe and in the USA (Petcore, 2011; Napcor, 2011).

Year	Percentage fibre	Sheet	Bottle (food, non-food)	Strapping	Other
2001					
EU	62	16	7	10	5
USA	62.1	5.3	17.3	11.7	3.6
2005					
EU	57.0	16.2	15.2	7.8	3.8
USA	53.6	8.2	20.6	15.2	2.4
2009					
EU	40.5	27.0	22.0	7.0	3.5
USA	36.7	17.0	28.6	12.2	5.5

Tab 1 Sběr PET lahví ve vybraných zemích

#### 4.4.2 Recyklace PET

Podstatná část recyklovaného PET je znovu použitelná pro výrobu lahví, nejčastějšího výrobku z tohoto materiálu. Je však část materiálu, kterou není možné kvůli inkluzi nečistot tímto způsobem použít znovu [23].



Obr 13 Základní proces recyklace PET lahví

#### 4.4.3 Proces recyklace PET

Nejdůležitější a nejnákladnější krok je vyčištění organických a mastných zbytků a vytrídění PET od ostatních plastů. Doplnkové plasty, kterými je kontaminováno recyklované PET je především polypropylen a polyethylen, ze kterého jsou vršky, inkluze tohoto materiálu nedegraduje mechanické vlastnosti PET, ale zhoršuje jeho vizuální kvalitu a průsvitnost. Vyšší problémy způsobuje PVC, ze kterého se v poslední době vyrábějí etikety, inkluze PVC podstatně zhoršuje vlastnosti PET, zabraňuje tvorbě dlouhých polymerních řetězců.

Zbytky náplní (sladké nápoje, olej a další mastné látky) jsou vymývány pomocí série lázní, a dále může být plast dekontaminován ve vakuu za zvýšené teploty až 230°C. PET je potom přetaveno a extrudováno do pellet, které jsou za zvýšené teploty krystalizovány a zbaveny zbývajících nečistot. Čisté pellety krystaliního PET lze potom znovu použít. Varianta tohoto procesu pracuje s povrchovou depolymerizací vloček pomocí NaOH [24].

#### 4.4.4 Polybet

Jednou z možných metod zpracování nerecyklovatelného materiálu je zpracování na konstrukční materiál, nazvaný Polybet firmou ViaAlta, která ho vyvíjí. [25] Zpracování podobných materiálů se zabývá patent od Midland Ross Corp a na podobný systém podal patentovou přihlášku A. Guven [26], [27]. Oba patenty pojednávají o metodě zpracování PET lahví pomocí sady procesů čištění a drcení, a následné extruzi vloček PET pomocí šnekové extruderu do kterého je podáváno plnivo, buď gravitačně nebo pomocí podavače. Směs materiálu je pomocí šneku zahřáta a promíchána, následně vytlačena do forem, a pod lisem vtlačena.

Polybet, který svým složením spadá pod polymerní betony, je to vysoce plněný materiál, plnivem je v něm bagrovaný písek a recyklované drcené sklo, například z vyřazených solárních elektráren. Frakce písku je o velikosti zrna 2-4 mm, sklo je drcené na 0,5 mm, plnění materiálu dosahuje až 77% a může být plně probarven. Postup výroby začíná v míchacím reaktoru, kde je vysušeno a předeřáto plnivo, na teplotu 250°C, dále je podáváno do šnekového extruderu, kde se míchá s termoplastem, směs je prohráta na teplotu tání termoplastu. Malý objem materiálu lze připravit přímým ohřevem ve vhodné nádobě.



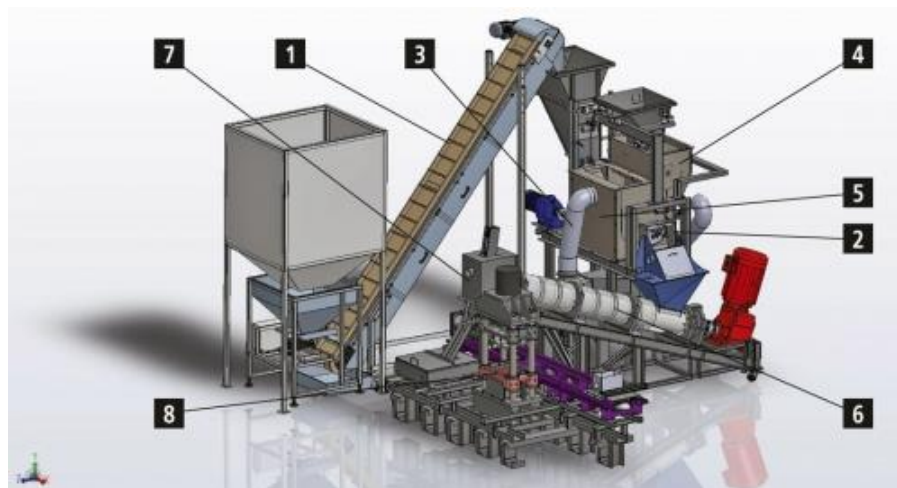
Obr 14 Dlaždice PolyBet

Jedním z využití v současné době je výroba střešních tašek a dlaždic. Firma Modrá Hvězda úspěšně dostala na trh a instalovala střešní tašky z materiálu.

Fyzikální vlastnosti (písek/PET 23/77)	POLYBET	konvenční beton
Objemová hmotnost	1950 kg/m <sup>3</sup>	2300 kg/m <sup>3</sup>
Střední pevnost v ohybu	14,6 MPa	7 MPa
Nasákavost	0 %	7 %
Mrazuvzdornost	1 [-]	0,8 [-]
Odolnost proti působení vody a CHRL po 50 cyklech	odpad 4 g/m <sup>2</sup> stupeň porušení: nenarušený	odpad 250 g/m <sup>2</sup> stupeň porušení: slabě narušený
Hloubka průsaku tlakovou vodou	0 mm	3 - 5 mm

Tab 2 Srovnání vlastností Polybetu a betonu

Materiál je UV stabilní a nehořlavý, plně nenasákavý (Nasákavost 0%, Odolnost proti vodě a CHRL po 50 cyklech – odpad 4 g/m<sup>2</sup>, nenarušený.), a splňuje předpoklady na použití ve stavebních průmyslu. Střední pevnost materiálu v ohybu je ~ 14,6 MPa, hustota je ~ 1950 kg/m<sup>3</sup>. Pro stavební beton jsou hodnoty 2300 kg/m<sup>3</sup>, pevnost v ohybu asi 7 MPa. Materiál je v porovnání s betonem odolný proti otěru, má lepší chování v tahu a ohybu, a nižší hmotnost pro stejnou pevnost.



Obr 15 Linka na výrobu Polybetu

### Polymerní betony

Zpracování materiálu popsala I. Sliptsova [28]. Zpracovali větší množství termo-plastů, ze skupin polyolefinů a polyesterů. Metoda zpracování byla podobná Vialta, použité materiály ale byly panenský polymer nebo recyklovaný polymer vysoké kvality. Jako plnivo byl použit stavební písek, přesívaný na 75 mikronů, byl vyčištěn, vysušen a ošetřen silanem. Vzorky byly vytvořeny buď zahřátím mixu písku a polymerů a následným mixováním materiálu, nebo byl již rozpuštěný polymer vmíchán do písku za chodu mixéru. U vzorků byla následně zkoušena hustota, pevnost v ohybu, pevnost v tahu a elasticita. Dále byla zjištěna teplota tvarové stálosti. (Heat Deflection Temperature). Byly porovnány kompozity, kde byl písek ošetřen silanem, který podporuje adhezi zrněk písku k plastu. Výsledky jsou na obrázku.

Polymer binder	Filling degree, mass %	Density ( $\rho$ ), kg/m <sup>3</sup>	Bending strength ( $\sigma_b$ ), MPa	Tensile elongation, %	Tensile strength, ( $\sigma_t$ ), MPa	Tensile modulus, $E_p$ , MPa	MFI, g/10 min	HDT, °C
PET	50	1840	74.2	4.4	31.3	1858	12.6	210
PET	65	2150	85.4	3.5	30.5	2250	8.3	215
PET	80	2350	105.2	2.1	24.6	2500	6.4	225
R-PET	50	1920	72.5	3.3	26.4	1950	14.5	216
R-PET	65	2205	86.4	2.2	24.3	2300	12.1	225
R-PET	80	2390	92.6	2.6	28.2	2650	13.0	220
PET-G	50	1730	76.4	8.3	31.5	1650	9.2	95
PET-G	65	1950	77.3	6.5	36.3	1800	6.3	98
PET-G	80	2150	87.4	5.7	34.7	1950	4.5	102

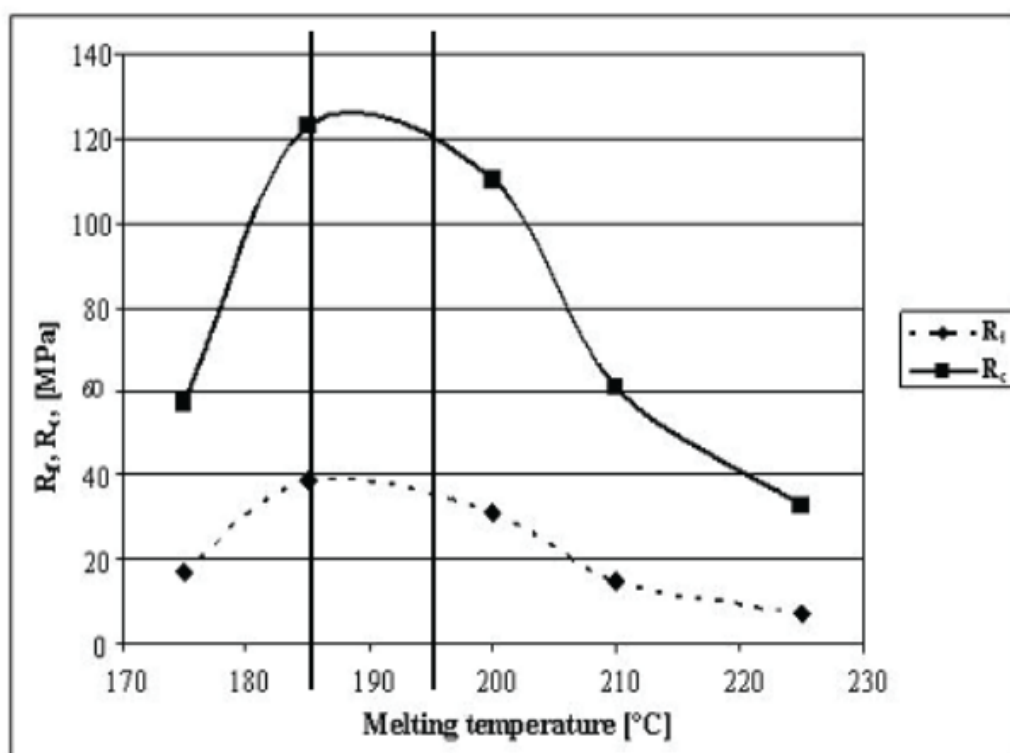
Tab 3 Vlastnosti polyesterových kompozitů

Binder polymer	Filling degree, % mass	Density ( $\rho$ ), kg/m <sup>3</sup>	Bending strength ( $\sigma_b$ ), MPa	Tensile elongation, %	Tensile strength, ( $\sigma_t$ ), MPa	Tensile modulus, $E_p$ , MPa	MFI, g/10 min	HDT, °C
R-PET	65	2160	89	5.4	26.5	2400	14.6	221
R-PET	80	2380	98	3.7	32.3	25000	16.5	220
PETG	65	1970	68	8.2	38.6	1700	7.8	97
PETG	80	2145	76	6.4	36.5	1890	7.5	100

Tab 4 Polyesterové kompozity se silanem

Sporné informace od toho co poskytuje firma ViaAlta jsem našel v literatuře publikované [29]. Jejich materiál byl vyroben postupem definovaným ve výše uvedených patentech. Zkoumali především pevnost v tlaku a ohybu v závislosti na teplotě při které byla směs zpracována. Dosáhli nejlepšího výsledku 87 MPa v kompresi a 27 MPa v ohybu, při objemovém poměru 0,62/1.22 rozpuštěného PET na písek. Zjistili, že tyto vlastnosti jsou nejlepší při zpracování materiálu mezi 185-195°C. Toto je v přímém rozporu s profilem tavení PET, které má začínat až při 230°C.

Další metodou přípravy polymerního betonu, kromě té uváděné ve výše uvedených pracích a patentech, je použití monoesterů. Plnivo je smícháno s roztokem monomerů, a je vytvrzeno za pomoci iniciátorů a katalyzátorů. Tento přístup je vhodný především pro aplikace, kde je materiálu využito k lití [30].



Obr 16 Závislost pevnosti v tlaku a v ohybu na teplotě zpracování PET

Využití materiálu pro 3d tisk jsem nezaznamenal. Další kompozity jsou běžně používány, především pro dosažení struktury a povrchu připomínající jiný materiál, například za pomoci dřevěného nebo kamenného prachu. Dále se používá kompozit s podílem krátkých karbonových vláken. Přímě polymerního betonu pro 3d tisk ještě nebylo použito. Existují práce, které používají druhý materiál nazývaný jako polymerní beton – směs cementu, agregátu a polymerního aditiva, přidávaného v tekutém stavu. Tento materiál se pomocí technologie BinderJet zpracovává pro použití v architektonických modelech [31].

---

## 6 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ

V přehledu byla popsána situace 3d tisku v architektuře. Byly představeny nejznámější metody, a alternativa, založená na polymeru. Podstatou je použití FFF v architektonickém měřítku, metoda byla rozebrána z pohledu technologie a materiálu. V další části byly uvedeny vlastnosti materiálu, který je pro metodu vhodný.

### 5.1 3d tisk v architektuře

Důvod pro použití 3d tisku v architektuře je dvojitý. Jednak vychází z nároků ekonomických a personálních, cílem je snížit množství použitého materiálu a náročnost na práci, nebezpečnou, náročnou a vyžadující zkušenosti. Druhým je zavedení komplikovaných forem, využívaných v architektonických studiích a v nejdražších projektech. Využití komplikovaných prvků vytištěných touto metodou nemusí být v architektuře očividné, ale masová kustomizace a tvarově volná architektura se tak stanou dostupné pro mnohem širší řadu aplikací, než jsou v současnosti [7].

Dva v současnosti nejpoužívanější postupy pro stavebnictví jsou contour crafting a direct concrete printing [2],[6]. Jsou omezené z pohledu materiálové volnosti, tisknou pouze 2,5D objekty a trpí materiálovými problémy spojeným s chováním betonové směsi při 3d tisku. Dalším problémem je obtížná instalace výztuh, základního konstrukčního prvku, na který spoléhají všechny moderní železobetonové stavby [8].

Podstatná sada problémů 3d tisku betonu vede k nutnosti prozkoumání alternativ. Ty nabízí nejen možnost náhrady betonu pro některé aplikace, ale i jeho doplnění v podobě formovacího materiálu a případně výztuže, u níž je výhodná zpracovatelnost stejnou technologií [32].

### 5.2 Zpracování tiskové metody

FFF metoda je dlouhodobě nejlevnější a nejvhodnější pro velké objemy materiálu. Existují metody tisku, které dosahují lepších výsledků, ale jejich cenová náročnost znemožňuje jejich masovou adopci ve stavebnictví. V kombinaci s materiálem vhodným pro stavebnictví se FFF jeví jako vhodný doplněk tisku betonu [9].

Pro metodu specifické problémy s mechanickými vlastnostmi, které vycházejí z anizotropie vzniklé nánosem po lineárních cestách a porozity objektu způsobené tvarem nánosu, nejdou v rámci metody plně odstranit [17]. Normované testy pro plast ukazují nejlepší dosažené výsledky 80% pevnosti v tahu oproti litému vzorku. Anizotropii lze limitovat pomocí rychlosti extruze a ovládání teploty v zařízení.

Podstatný vliv na výsledný tisk má rozložení teplot a teplotní gradienty. Je třeba udržet konstantní teplotu taveniny v extruderu, kterou je potřeba zchladit za tryskou kvůli zachování tvaru, a potom celou tiskovou oblast držet na zvýšené teplotě kvůli kroucení a dobrému propojení tiskových vrstev. Nános stopy je tedy komplexní problém, na výsledek mají vliv zmíněné parametry kombinované s pojezdovými rychlostmi [16].

---

Navrhování tvarů pro aditivní výrobu musí být provedeno podle specifické sady požadavků, které vycházejí jak z procesních omezení jako je tloušťka vrstvy, rozměry tiskové obálky atd., a z funkčních vlastností vyrobené součásti, jako je mechanická pevnost, teplotní vodivost atd. Oba typy omezení musí být zváženy společně, a to ve třech fázích vývoje: Z hlediska vývoje materiálu, z hlediska tiskové cesty a hlediska návrhu objektu [7].

### **5.2.1 Robotický tisk**

Tisk v architektuře má zvýšené nároky oproti použití v rapid prototypingu, což je nejčastější použití FFF tiskáren. Problémy metody se dají řešit aplikací víceosého tisku, například pomocí robotické paže. Pomocí optimalizace tiskových drah je možné orientovat tisková vlákna podle zatížení, a zároveň dosáhnout vyšší kvality povrchu [11].

Pro velkoformátový tisk je velkým přínosem možnost vynechání nebo snížení množství podpor, je tak snížen tiskový čas a množství použitého materiálu. Je umožněn tisk geometrie, která předtím nebyla zpracovatelná.

Prutový tisk v prostoru – Continuous Lattice Fabrication (CLF) je metoda tisku jejíž výstupem je buňkový materiál s velkým stupněm odlehčení. Dochází k vypuštění jednolitého povrchu, není strukturální součástí dílu, a geometrie která původně sloužila jako výplň určuje vzhled objektu. Je zajímavá i po inženýrské stránce, tento typ materiálu je využíván v aplikacích, kde je vyžadována maximální pevnost při minimální váze, například v aerospace [15].

Metoda představuje plné využití potenciálu robotického tisku, je obtížné realizovatelná bez jeho možností. Tisková hlava na robotickém ramenu dosáhne za možnosti rámového stroje, a je plně využito náklonu v pěti osách. Gramazio Kohler a Branch Technology také ukazují na potenciál technologie pro tisk ve stavebnictví, díky strukturální pevnosti, a nízkému množství použitého materiálu [33][13].

## **5.3 Recyklát PET jako materiál pro tisk stavebních prvků**

Recyklace PET se za posledních dvacet let dostala na vysoké procento odpadu, především v zemích západní Evropy. Pořád ale zůstává podstatný podíl materiálu, který recyklován není, především kvůli ekonomické náročnosti odstranění sekundárních obalových plastů a zbytků náplně. Recyklát plně vyčištěného PET v současné době cenově nekonkuruje panenskému PET, a ani nemůže být použit pro některé typy obalů. Zůstává tedy podstatné množství materiálů, které se buď spaluje, nebo končí na skládkách [24]. Hledá se tedy způsob zpracování materiálu, který není recyklován.

### **5.3.1 Plastbeton vyvíjený firmou ViaAlta**

Vlastnosti materiálu – únosnost, zvýšená tepelná odolnost – a i nevýhody (velký průměr extruderu kvůli plnivu) ho určují k tisku většího formátu a dílů pro využití ve stavebnictví, či exteriéru, kde jeho hrubá struktura nebude na škodu. Díky využití recyklátu a levného plniva je výsledná cena materiálu nízká, a materiál je lákavý i pro velkoformátové využití kde čisté polymery jindy používané pro 3D tisk díky své vysoké ceně atraktivitu ztrácejí [25].

---

## 7 PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DIZERTAČNÍ PRÁCE

### 6.1 Podstata práce

Podstatou disertační práce je identifikace hodnot klíčových procesních parametrů pro zpracování materiálu Polybet pomocí velkorozměrového 3D tisku technologií FDM. Jádrem disertační práce je aplikovaný výzkum založený na sérii experimentů. Zpracovávají se postupy a technologické parametry nutné pro tisk, a kvantifikují se dosažené výsledky s cílem dosáhnout kvalitního tisku pro použití ve stavebním sektoru. Předpokládá se dosažení mechanických vlastností srovnatelných s konvenčně zpracovaným materiálem stejného typu, a to pevnost v ohybu 15 MPa.

Předpokládané odvětví, kde by technologie mohla být využita, je výroba stavebních prefabrikátů, forem a zpevňujících elementů pro betonování. 3D tiskem je možné realizovat unikátní tvary, které vyžaduje architektura při stavbě tvarově volných budov nebo prefabrikáty s kustomizovatelnými vlastnostmi, jako je zahrnutí rozvodných sítí.

### 6.2 Cíl disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je vývoj 3D tiskových procesních parametrů vysoce plněného kompozitního materiálu Polybet určeného pro velkorozměrové díly. Vývoj je založen na experimentálním testování procesních parametrů (např. výška vrstvy, tlak extruze, teplota, chlazení) a objemových poměrů matrice a plniva s ohledem na tisknutelnost (printability) a vystavitelnost (buildability). Zkoumána bude viskozita a vliv procesních parametrů na mechanické vlastnosti materiálu Polybet s cílem aplikace ve stavebnictví. Součástí práce je návrh strategií 3D tisku pro realizaci velkorozměrových dílů, samonosných konstrukcí a výplňových struktur. Ověřována bude jejich schopnost samonosnosti a stability v procesu 3D tisku.

#### Dílčí cíle disertační práce

##### 1. Nalezení procesních parametrů materiálu, v závislosti na experimentálně zjištěných vlastnostech.

Jedná se o nalezení vztahu procesních parametrů, při kterých vzniká kvalitní tiskový nános, dále o ověření samonosnosti tisknutého materiálu a nalezení jeho limitů v závislosti na mísících poměrech matrice a plniva. Důležitou součástí je experimentální zjištění průtoku.

##### 2. Vliv poměru matrice a plniva na mechanické vlastnosti 3D tisknutého materiálu a porovnání s lisovaným stavem včetně analýzy soudržnosti vrstev.

Ověření a klasifikace mechanických vlastností dosažitelných aditivní výrobou vysoce plněného PET ve srovnání s výrobou lisováním. Získané hodnoty jsou stěžejní pro návrh staveb pro další práci.

---

### 3. Vývoj tiskové strategie a jejích limitů pro plněný materiál PET

Budou identifikovány vhodné tiskové postupy pro materiál Polybet, za využití potenciálu robotického tisku. Mezi řešení patří využití nehorizontálních a zakřivených vrstev, použití víceosých tiskových cest za cílem dosažení maximální kvality povrchu a tisk prutové struktury. U metody byl dokázán velký potenciál pro strukturální prvky a je podstatná pro dosažení aplikace ve stavebnictví. Víceosý tisk a tisk prutových struktur umožňuje tisk materiálově efektivních, rozměrných forem bez nutnosti podpůrného materiálu.

### 6.3 Přínosy disertační práce

Hlavní přínosy práce jsou zpracování procesních parametrů a kvalifikace mechanických vlastností materiálu Polybet. A následná charakterizace využití nového materiálu pro aditivní výrobu ve stavebnictví a architektuře. V důsledku práce podpoří snižování množství odpadu vzniklého při stavbě, typicky bednění, opěrné a samonosné konstrukce, především pro komplikovanější formy. Na základě tohoto výzkumu bude možné rozšířit možnosti využití recyklovaného PET v průmyslové praxi a přispět k udržitelnému rozvoji v oblasti stavebních materiálů.

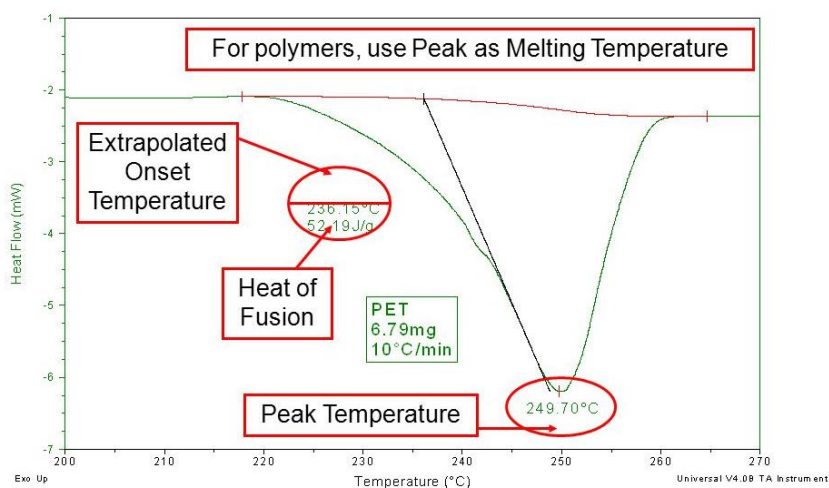
## 8 VĚDECKÁ OTÁZKA A PRACOVNÍ HYPOTÉZA

### 7.1 Jak závisí kvalita tiskové stopy na procesních parametrech tisku z vysoce plněného polymeru?

Výchozím bodem dle firmy ViaAlta je zpracování materiálu při 280°C, první testy ukázaly že pro 3d tisk je teplota 250°C vhodnější. Křivku přechodu skupenství pro PET nejde plně aplikovat kvůli neznámému stupni znečištění a infiltrace jinými plasty, které tyto teploty mění. Teplota, kdy plast začíná degradovat nám udává horní limit. Křivku degradace materiálu poskytla FCH VUT.

Kombinací dalších parametrů – průtoku a rychlosti pojezdu – hledám oblast, ve které dochází ke kvalitnímu nánosu. Kvalitní nános je charakterizován tvarovou stabilitou, s konstantním průřezem a drsností povrchu. Tvarovou stabilitu má i po nánosu další vrstvy.

**Předpoklad je, že takový nános má zároveň vysoké mechanické vlastnosti.**

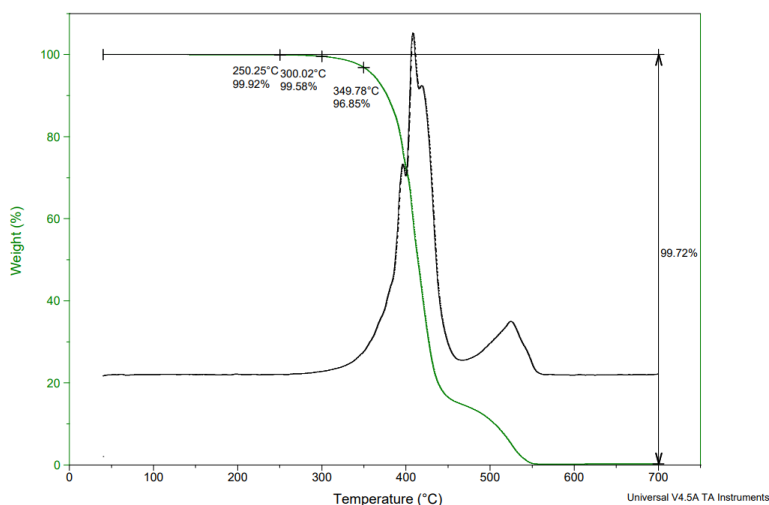


Obr 17 Sybil Dawis DSC Glass Transition & Melting, PET

Sample: PET vzduch  
Size: 8.1480 mg  
Method: Ramp  
Comment: 10°C/min do 700°C, vzduch

TGA

File: C:\...Desktop\ZETA TGA\PET vzduch.001  
Operator: MC  
Run Date: 01-Feb-2018 15:20  
Instrument: TGA Q500 V20.13 Build 39



Obr 18 Degradace znečištěného PET od FCH

---

## 7.2 Jakých mechanických vlastností dosahuje 3d tisk z vysoce plněného polymeru:

### a) Ve srovnání s díly vyrobenými z materiálu lisováním.

Budu provádět testy mechanického zatížení s cílem zjistit, jak blízko se dá přiblížit mechanickým vlastnostem dílu vyrobeného odléváním – pevnost v ohybu materiálu se současnou směsí je 14,6 MPa. Klasifikuji vliv procesních parametrů na mechanické vlastnosti, především procesní teploty a rychlosti nánosů mezi vrstvami.

### b) Při porovnání dílů vyrobených z panenského a recyklovaného polymeru.

Pro hledání parametrů ovlivňujících mechanické vlastnosti směsi budu klasifikovat vliv nečistot na materiál. Výchozí bod získám porovnáním se směsí z panenského PET.

Součástí optimalizace mechanických vlastností je hledání vlivu poměrů směsi a procesních parametrů na mechanické vlastnosti, včetně způsobu míchání směsi a před-sušení písku. **U míscího poměru je potřeba vyhodnotit rozložení plniva v matrici.** První testy byly provedeny s mixem jemného drceného skla, s hrubým říčním pískem se zrnem 2-4 mm. Toto je ale stará směs, a firma experimentuje s jinými poměry a materiály. Směs byla příliš hrubá pro extruzi, hrubý písek byl nahrazen drceným sklem. Je možné využití modifikátorů povrchu jako silan, které podporují přilnutí PET k plnivu.

## 7.3 Za jakých podmínek lze z materiálu vytisknout prostorový prut?

Současné znalosti ukazují vhodnost Polybetu jako strukturálního materiálu. Jeho únosnost odpovídá zamýšlenému použití, a odolnost proti vlivům okolního prostředí umožní použití výsledných dílů ve stavebnictví. Pro stavebnictví byly identifikovány jako vhodné metody robotického tisku.

**Je materiál pomocí upravené směsi a procesními parametry použitelný pro prostorový tisk?** Nejpodstatnější testem je tisk prostorového prutu. Dále je ověření mechanických vlastností a dosažitelné tvarové volnosti, aby použití metody bylo odůvodněné.

Tvarovou volnost ověřím zjištěním maximální dosažitelné velikosti tiskové obálky, a limitujících bodů vytisknutelné geometrie, jako je maximální dosažitelný převis, přemostění a sloup.

- Výchozí hodnoty na základě rešerše a znalostí firmy.

## 1. Procesní parametry

Cílem je kvalitní liniový nános, provádím optimalizaci více parametrů.



- Limitní procesní parametry - výkon ohřevu, průtok trysky, rychlost pohybu
- Pro vícevrstvý nános se přidává čas ochlazení vrstvy

S výsledky jsem schopen 3d tisku jednoduchých objektů.

## 2. Mechanické vlastnosti a kvalita tisku

- Mechanické zkoušky - porovnání s litým materiálem a betonem
- Optická digitalizace- porovnání navržených a vytištěných objektů
- Materiálový výbrus - rozmístění zrn, kvalita svárů mezi vrstvami

Výsledkem je klasifikace mechanických vlastností,  
a optimalizace procesních parametrů pro přesnost a pevnost.



1. Výstupem může být změna poměru směsi, přidavek aditiv a zpětné úprava procesních parametrů

## 3. Strategie robotického tisku

Tyto pokusy vyžadují šnekový extruder včetně chlazení, s ovládáním spřaženým s robotem.

**Zjištění limitních parametrů tisku:**

1. Výšková stabilita (slump factor)
2. Maximální převis stěny
3. Možná délka přemostění
4. Prut v prostoru

- Zakřivené vrstvy a pětiosý tisk - tisk na externí podpory
- Prutový tisk v prostoru - Vyžaduje říditelné chlazení a rychlost extruze, znalost procesních parametrů a limitů tisku, mechanické vlastnosti

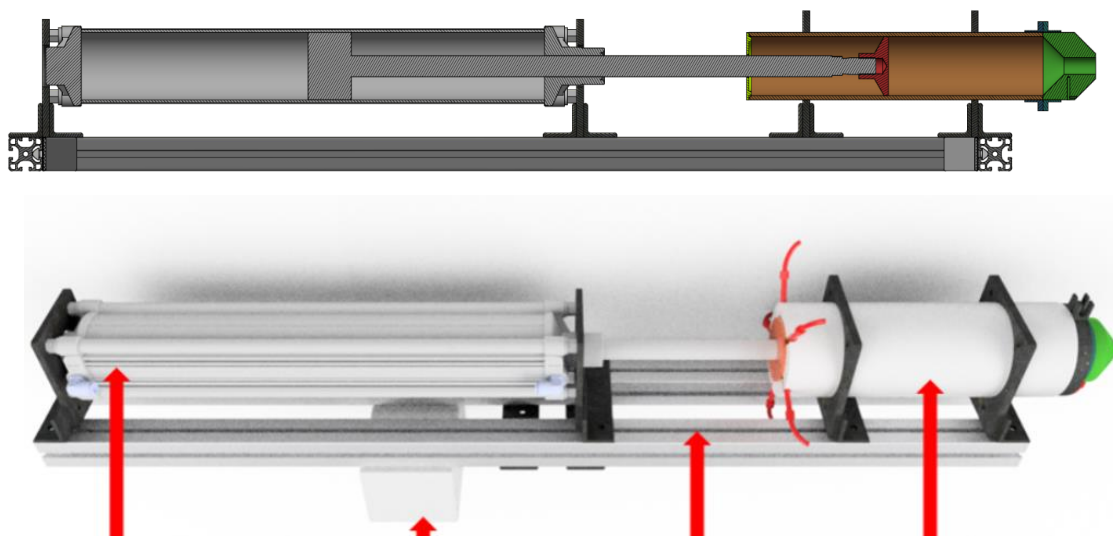


## Aplikace s využitím robotického tisku

- Strukturální prvek pomocí Lattice Fabrication
- Forma na beton ve volném tvaru

---

## 9 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY



Obr 19 Hlava Pístového extruderu

### 8.1 Testovací sestava

Pokusy budou prováděny na zařízení navrženém v projektu TAČR Zéta TJ01000354. V současnosti je to pístový extrudér s pneumatickým válcem a dvouzónovým výhřevem. Válec je AVENTICS 80mm, délka 500 mm, 0-10 Bar. Válec je ovládaný trojcestným ventilem a regulátorem. Výhřev materiálu je 5x topný pás 195W, a 2x topné těleso v trysce 300W. Extruder je osazen vyměnitelnou tryskou, současný průměr je 20 mm.

#### Současný postup míchání směsi a tisku:

1. Vysoušení písku v peci, při teplotě 250°C
2. Tavení vloček PET v otevřeném extruderu
3. Vsazení písku a homogenizace směsi pomocí externí metly
4. Předehřátí směsi na teplotu extruze
5. Vytvoření nánosu, pomocí manuálního ovládání robota nebo předem připraveného programu.

Alternativně, je možnost vložit již připravenou směs. Pracoviště není vybaveno vhodným mixérem, směs lze tedy připravit pouze manuálně na hořáku. Vzniká více spalin, ale je ušetřen čas na prohřátí směsi ve válci.

V rámci projektu má být navržený extruder na kontinuální extruzi, na šnekovém principu. Se současným extruderem není snadné tisknout rozměrné objekty, díky nutnosti přerušit tisk na doplnění materiálu.

Pracoviště je vybaveno robotem Kuka KR60, s nosností do 30 kg a maximálním dosahem 2429 mm, s dosažitelnou přesností 0,06 mm. Na pracovišti probíhaly experimenty s tiskem pomocí tiskové hlavy na 3 mm tiskovou strunu, a základními strategiemi robotického tisku.

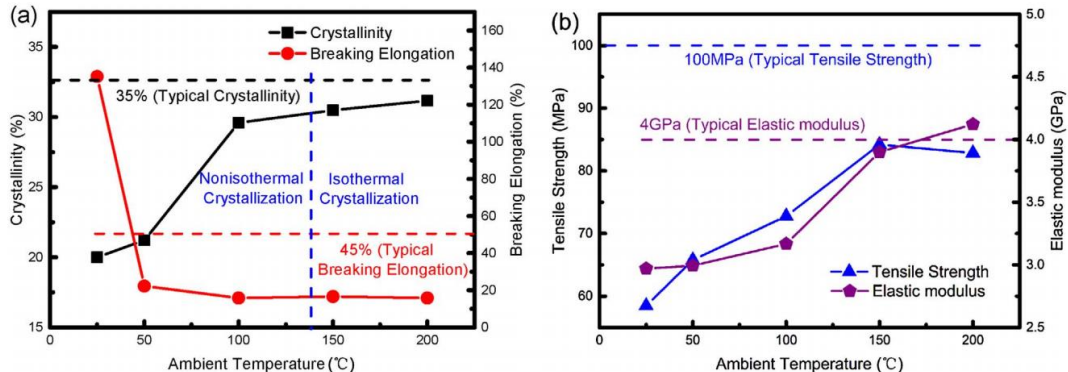
## 9.2 Zpracování procesních parametrů



Obr 20 Testovací nános z první sady pokusů, teplota směsi 290 °C, výška vrstvy 10 mm

### 8.2.1 Parametry extruze

Na zařízení budou zpracovány procesní parametry. Máme postup na přípravu směsi od firmy, co PolyBet zpracovává, ale ty pro 3d tisk nemusí být nejvhodnější. Vyzkoušim teplotu pro tisk v rozsahu od 230°C kde začíná tavení směsi, po teplotu 280°C, kterou používá firma. Směs při této teplotě příliš teče, první testy ukázaly vyšší stálost při teplotě 250°C.



Obr 21 Příklad vlivu teploty prostředí při nánosu na výsledné vlastnosti polymeru

### 8.2.2 Tiskový nános

Cílem je získat kvalitní, rovnoměrnou tiskovou stopu, nalezením vhodné oblasti hodnot parametrů. Limitujícími parametry jsou průtok v trysce, z důvodu neznámé viskozity směsi ho zjistím experimentálně, dále výkon ohřevu materiálu. Limit, který pro nás nehraje roli je maximální rychlost pohybu robota – 2m/s, které nedosáhneme.

Po zpracování základních parametrů pro tisk následuje zpracování vícevrstvého nánosu. Cílem je nanášet materiál, když předchozí vrstva je schopná nést váhu vrstvy na ní, ale zároveň mezi nimi vznikne kvalitní svár, tj. teplota materiálu na spoji je okolo skelného přechodu plastu (180°C pro PET). Pro kontrolu rychlosti tisku bude instalováno chlazení nanášené stopy. Zvažované přístupy jsou buď pomocí průmyslo-

---

vého ventilátoru, nebo tlakovým vzduchem. Zde hraje roli viskozita, zjištěná v předchozím kroku, a reologie materiálu, nanesená směs musí nést následující vrstvy bez deformace.

Následovně určím rychlost chlazení a najdu správný poměr mezi teplotou extruze, chlazením a rychlostí tiskové hlavy. Po nalezení vhodné teploty směsi najdu limitní množství extrudovaného materiálu, a potom zbývá poměr rychlosti a chlazení. Cílem je dosáhnout konzistentní tiskové stopy, dobré adheze mezi vrstvami a k podložce a tvarové stability při chladnutí vrstev.

### 9.3 Mechanické vlastnosti

Po dosažení vyhovujícího nánosu ověřím kvalitu tisku, které dosahují a zpětně upravovat procesní parametry. Porovnám mechanické vlastnosti vytištěných vzorků s vlastnostmi vzorků vyrobených litím – na zkoušení dílů z 3D tisku je norma ISO 17296-3:2014, testy provedu podle ní. Pro stavební průmysl je důležitá pevnost v tlaku, a největší potenciál pro zlepšení je ve zvýšené síle v tahu a ohybu Polybetu oproti betonu. Je možné, že díky zrnitému charakteru směsi nebudou zkoušky pro polymery poskytovat konzistentní výsledky, a i v souvislosti s uvažovaným použitím materiálu ve stavebnictví budou vhodnější testy používané pro beton, s odlišnou geometrií vzorků a větším průřezem.

#### 8.3.1 Testy pro beton dle ČSN EN 12390:

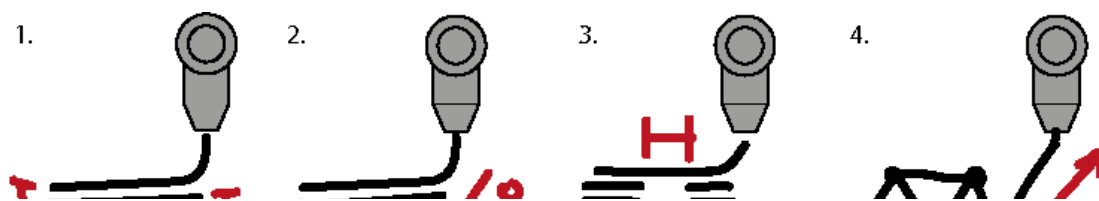
Pevnost v prostém tahu, vzorek je válec 100 mm, nebo hranol 100x100 mm, umístěn do trhačky, jejíž čelisti mají možnost volného otáčení.

Pevnost v tlaku krychlenou a válcovou, kde je zkoušecí těleso krychle 150x150x150 mm, respektive válec 150x300 mm.

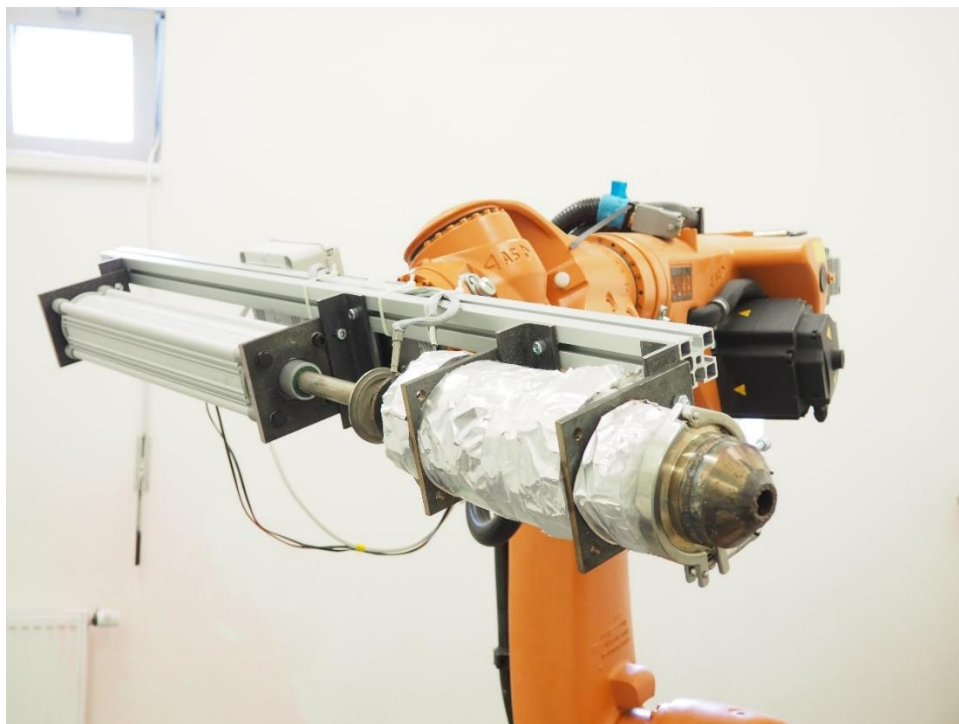
#### 8.3.2 Materiál a mísicí poměry

Vytištěné vzorky budou zhodnoceny po materiálové stránce, bude posouzena kvalita svárů a rozměrová přesnost. Důležité hledisko je rozmístění plniva v materiálu, které bude vyhodnoceno pomocí výbrusů. Pokud by rozmístění zrn nevyhovovalo, bude nutné upravit směs.

Směs, kterou doporučuje firma je 75/25 plniva ku pojivu na váhu, plnivo, které jsme zatím používali je písek 2-4 mm, a jemné drcené sklo pod 0,5 mm, 50/50 na váhu. Zrno písku ve směsi se ale ukázalo jako příliš hrubé, a navržené úpravy jsou buď výměna písku za pouze mleté sklo, ve frakci 0-2 mm, nebo použití jemného stavebního písku. Pokud by se tavenina dále roztékala, je možné přistoupit k modifikaci směsi, v literatuře je postup pro ošetření písku vodním roztokem silanu, který složí jako modifikátor kontaktu písku s PET.



Obr 22 Testy možnosti 1. Výška nánosu 2. Maximální převis 3. Maximální přemostění 4. CLF



*Obr 23 Extruder na robotu KUKA*

## **8.4 Tisková strategie a aplikace technologie**

Zhodnotím vhodnost známých tiskových strategií pro materiál a následně určím okrajové podmínky pro jejich využití. To mi pomůže i při návrhu dílů, která jsou pro tisk vysoce plněným PET vhodné.

### **Testy tiskových strategií:**

1. Maximální převis stěny
2. Výšková stabilita stěny
3. Spirálová váza
4. Adaptivní tisková cesta
5. Tisk tečnou návazností
6. Maximální délka přemostění
7. Prut v prostoru (Anti gravity)
8. Tisk příhrady v prostoru (CLF)

Ověřím možnosti pracoviště Robotického obrábění v 3D tisku, a provedu případné modifikace a dovybavení, nutné pro tisk zakřivených a nerovnoběžných vrstev.

Tyto postupy využívají náklonu tiskové hlavy pro dosažení kvalitní tiskové stopy i za možnosti tříosého stroje. Pro návrh tiskových cest a řízení robota bude použito prostředí Grasshopper, které umožňuje návrh objektů včetně výše zmíněných tiskových metod a přímé řízení robota pomocí pluginu Kuka KRL.

### **8.4.1 Aplikace robotického tisku ve stavebnictví**

Strategie Continuous Lattice Fabrication byla zhodnocena jako výhodná pro použití ve stavebnictví. Ověřím použitelnost materiálu pro tuto technologii. Výchozím bodem

---

je schopnost vytisknout prostorový prut, což vyžaduje chlazení a možnosti plynulého ovládní tiskové hlavy, kterou v současnosti pracoviště nemá. Ovládat extruder společně s pohybem hlavy je ale nutné pro dosažení pokročilých tiskových metod, proto je nutné doplnit řídicí systém robota.

Následující krok je tisk prostorové prutové struktury, problémem je spojení konců. Ve styku prutů je obtížné zajistit kvalitu sváru, díky rozdílným teplotám. Kvalita sváru má podstatný vliv na mechanické vlastnosti vzorku a je pro ni nutná jemná, kontinuální kontrola rychlosti pojezdu a extruze.

### **Řídicí systém robota KUKA KR60**

Na robota je v současnosti ovládací kabinet KRC2, se sedmi říditelnými pohony, šest z nich řídí robota a sedmý rotační stůl. Počet os lze rozšířit až na čtrnáct. Rychlost extruze je v současnosti řízena externě, u tiskové hlavy na standardní filament samostatným pohonem, u pístového extruderu pomocí pneumatického ventilu.

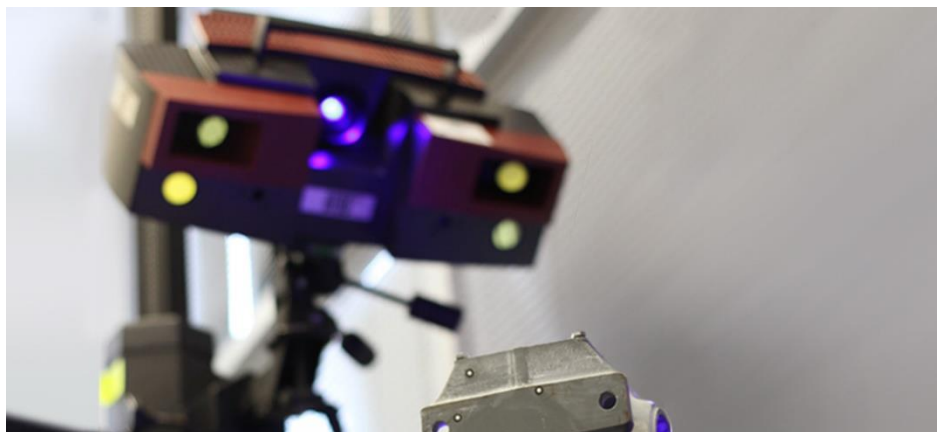
Schopnost ovládat rychlost extruze je potřeba pro možnost přejezdů robota mezi díly, a tisk prostorového prutu ji vyžaduje pro dosažení zadaného rozměru, v průběhu tisku bude zpomalena rychlost extruze a pojezdu robota, aby zatím nanesený prut částečně zchladnul a mohl nést svou vlastní váhu, než robot bude pokračovat dál.

Pro řízení extruze je tedy potřeba použít extruder se šnekovým pohonem, řízený pomocí KRC. Další možnost, jak řešení dosáhnout je propojení robotické paže s externě řízeným extruderem pomocí prostředí Grasshopper a pluginu Firefly.

#### **8.4.2 Kontrola geometrie pomocí digitalizace**

Pro dosažení přesnosti tisku použijí optickou digitalizaci, zjištěné rozdíly mezi navrženým objektem a výsledkem zpětně ovlivní postup tisku a procesní parametry. Kontrolované jevy jsou množství extrudovaného materiálu, sedání vrstev a deformace při chlazení.

Bude využito vybavení laboratoře Optické digitalizace, skener ATOS v kombinaci s programem GOM Inspect.



*Obr 24 Optická digitalizace Atos*

---

## 8.5 Demonstrace technologie

V závěru práce budou vytištěny demonstrativní vzorky objektů. Informace, jaké objekty je možné tisknout, a k jakým komponentům se tisková metoda hodí, nasbírám v průběhu práce. Tyto „design guidelines“ budou zahrnovat vytisknutelnou geometrii, minimální detail objektu a mechanické vlastnosti.

Cílem je tisknout velkorozměrové objekty využívající možnosti robotického tisku.

Měl by být využit velký tiskový prostor robota, a vyroben prefabrikát s rozměry nad 1 m ve všech osách, s využitím v architektuře. V závislosti na výsledku experimentů to budou odlehčené strukturální prvky, nebo formovací díly.

---

## 10 ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ

Semestr	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Rešerše	Yellow	Yellow						
Vlastnosti materiálu		Red	Red	Red				
Tiskové vzorky/Test hlavy		Orange	Orange					
Testování tisknutelných struktur			Cyan	Cyan				
Procesní parametry			Green	Green				
Zátěžové testy vzorků					Orange			
Možnosti robotického tisku				Blue	Blue	Blue		
Státní doktorská zkouška				Purple				
Tisky konkrétních řešení					Red	Red		
Text disertační práce						Purple	Purple	Purple
Obhajoba disertační práce								Blue

---

## 11 ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ

Držím se předpokladu, že ve stavebním průmyslu poroste stupeň automatizace a tím odpadne nutnost stavebních dělníků provádět nebezpečnou, repetitivní práci a místo toho se soustředit na kontrolní práce. K tomuto směru také motivuje vzrůstající finanční nákladnost lidské práce.

Ze stránky ekologie a udržitelnosti je přínos mnohonásobný. Množství použitého materiálu já podstatně sníženo tím, že metoda by měla minimalizovat množství odpadu při stavbě. Nízké množství materiálu, které se ve výsledku bude používat je recyklát, konečná možnost uložení materiálu, který prošel několika životními cykly jako kontejner na nápoje, a jeho stabilita bude v této aplikaci vhodně využita.

O zpracování a výrobky z tohoto materiálu je na trhu zájem, viz projekt TAČR ZÉTA. Technologie by firmě mohla přinést konkurenční výhodu, především při nárůstu cen práce a materiálu.

---

## **12 SPOLUPRÁCE S JINÝMI INSTITUCEMI**

Tato disertace zčásti zpracovává výstupy pro projekt TAČR ZÉTA TJ01000345 ve spolupráci s firmou ViaAlta, která hledá vhodné využití pro nepoužitelný plast z recyklované PET, a vyvinuli materiál, který nazývají plastbeton. Věří, že materiál má využití ve stavebnictví, díky svým mechanickým vlastnostem, stabilitě a možnosti dosažení estetického povrchu. Projekt prozkoumává možné využití materiálu pro 3d tisk a možné výsledné objekty. V projektu probíhá spolupráce s VUT FCH, na výzkumu vlastností recyklovaných polymerů, především z pohledu jejich vhodnosti pro zpracování na polymerní beton.

---

### **13 PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY S ŘEŠENÍ A JEJICH ZDROJE**

Vybavení pracoviště KUKA nástroji pro přípravu vzorků z recyklátu PET – pec, digestoř, odsávání, nádoby a nářadí. - 40 000 Kč

Výroba tiskové hlavy, vývoj potřebné elektroniky, možná ve spolupráci s VUT FEKT, nebo externě – uhrazeno v rámci projektu.

Práce je podporovaná z projektu TAČR ZÉTA V-TJ01000354-1.

---

## **14 CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU ŘEŠENÍ**

Výsledky zpracované práce budou rozděleny následovně a podány do impaktovaných časopisů, popřípadě předneseny na konferencích:

Článek pojednávající o vlastnostech plastbetonu jako materiálu pro 3d tisk

Článek zkoumající mechanické a materiálové vlastnosti vytištěných vzorků

Článek o tiskových strategiích a návrhu objektů z plastbetonu

Možné impaktované časopisy pro publikaci:

Materials and Design

3D Printing and Additive Manufacturing

Smart Materials and Structures

---

## 15 BIBLIOGRAFIE

- [1] J. Pegna, “Exploratory investigation of solid freeform construction ’,” *Autom. Constr.*, vol. 5, no. February 1997, pp. 427–437, 1997.
- [2] B. Khoshnevis, R. Russell, H. Kwon, and S. Bukkapatnam, “Crafting large prototypes,” *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 8, no. 3, pp. 33–42, 2001.
- [3] D. Mathijsen, “Bigger, stronger, faster... pushing the envelope of 3D printers to turn them into true production tools,” *Reinf. Plast.*, vol. xx, no. xx, 2017.
- [4] J. Teizer, A. Blickle, T. King, O. Leitzbach, and D. Guenther, “Large scale 3D printing of complex geometric shapes in construction,” *33rd Int. Symp. Autom. Robot. Constr. ISARC 2016*, vol. i, no. Isarc, pp. 948–956, 2016.
- [5] Winsun, “Yingchuang Building Technique (Schangai) Co. Ltd. (WinSun),” 2017. [Online]. Available: <http://www.winsun3d.com/>.
- [6] ApisCor, “Apis Cor: We print building,” 2018. [Online]. Available: <http://apis-cor.com/en/>.
- [7] R. Duballet, O. Baverel, and J. Dirrenberger, “Automation in Construction Classi fication of building systems for concrete 3D printing,” *Autom. Constr.*, vol. 83, no. October 2016, pp. 247–258, 2017.
- [8] D. Asprone, F. Auricchio, C. Menna, and V. Mercuri, “3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 218–231, 2018.
- [9] R. Naboni, *SPRINGER BRIEFS IN APPLIED SCIENCES AND Advanced Customization in Architectural Design and Construction*. .
- [10] N. Oxman, W. J. Mitchell, M. Arts, T. Supervisor, and J. Beinart, “Material-based Design Computation,” 2010.
- [11] C. Dai, “Support-Free Volume Printing by Multi-Axis Motion,” vol. 37, no. 4, 2018.
- [12] R. P. Boyd, “Additive manufacturing of buildings and other structures.” Google Patents, 2015.
- [13] “Branch Technology,” 2018. [Online]. Available: [www.branch.technology](http://www.branch.technology).
- [14] “AI BUILD,” 2018. [Online]. Available: [ai-build.com](http://ai-build.com).
- [15] S. Liu, Y. Li, and N. Li, “A novel free-hanging 3D printing method for continuous carbon fiber reinforced thermoplastic lattice truss core structures,” *Mater. Des.*, vol. 137, pp. 235–244, 2018.
- [16] C. Yang, X. Tian, D. Li, Y. Cao, F. Zhao, and C. Shi, “Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 248, no. April, pp. 1–7, 2017.
- [17] B. N. Turner, R. Strong, and S. A. Gold, “A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 192–204, 2014.
- [18] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, and R. C. Advincula, “Mechanical characterization of 3D-printed polymers,” *Addit. Manuf.*, vol. 20, pp. 44–67, 2018.
- [19] K. Thrimurthulu, P. M. Pandey, N. V. Reddy, and N. Venkata Reddy, “Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, no. 6. pp.

- 
- 585–594, 2004.
- [20] “A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 21, no. 3, pp. 250–261, 2015.
- [21] A. Qattawi, B. Alrawi, and A. Guzman, “Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters : a Design-for-Manufacturing Approach,” vol. 10, pp. 791–803, 2017.
- [22] H. ming Zhao, Y. He, J. zhong Fu, and J. jiang Qiu, “Inclined layer printing for fused deposition modeling without assisted supporting structure,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 51, no. May 2016, pp. 1–13, 2018.
- [23] F. Awaja and D. Pavel, “Recycling of PET,” *Eur. Polym. J.*, vol. 41, no. 7, pp. 1453–1477, 2005.
- [24] F. Welle, “Twenty years of PET bottle to bottle recycling - An overview,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 55, no. 11, pp. 865–875, 2011.
- [25] ViaAlta, “POLYBET,” 2016. [Online]. Available: <http://www.via-alta.cz/polybet/>.
- [26] Midland-Ross Corp, “Extrusion devices and methods of reclaiming scrap plastic material.” 1981.
- [27] A. H. Guven, “A METHOD FOR RECYCLING WASTE THERMOPLASTIC MATERIALS AND USING THIS RECYCLED THERMOPLASTIC IN COMPOSITE MATERIAL PRODUCTION,” vol. 1, no. 19, pp. 1–26, 2014.
- [28] I. Sliptsova, B. Savchenko, N. Sova, and A. Sliptsov, “Polymer sand composites based on the mixed and heavily contaminated thermoplastic waste,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 111, no. 1, 2016.
- [29] O. Dumitrescu, I. Ropotă, M. Bratu, and M. Muntean, “Reuse of pet waste as thermoplastic composites,” *Environ. Eng. Manag. J.*, vol. 10, no. 8, pp. 1179–1181, 2011.
- [30] B. W. Jo, S. K. Park, and J. C. Park, “Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 12, pp. 2281–2291, 2008.
- [31] R. S. F. A. V. S. Ronald Rael, University of California Berkeley, “Developing Concrete Polymer Building Components for 3D Printing Fratello, San Jose State University, Rael San Fratello Architects.”
- [32] I. Paoletti, “Mass customization with additive manufacturing : new perspectives for multi performative building components in architecture,” *Procedia Eng.*, vol. 180, pp. 1150–1159, 2017.
- [33] N. P. HACK, W. V LAUER, F. M. GRAMAZIO, M. Kohler, and N. Blank, “Method of fabricating a 3-dimensional structure, mesh formwork element for fabricating a 3-dimensional structure, and method of fabricating the same.” 2016.

---

## 16 VĚDECKÝ ŽIVOTOPIS

### Vzdělání

2015 – 2017: Magisterský studijní program Průmyslový design ve strojírenství, fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně

2012 – 2015: Bakalářský studijní program Průmyslový design ve strojírenství, fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně

### Odborná praxe

2015: Dynamic Hearing Company, Delft, NL: Product Design Intern

2016-17: TEKEFF s.r.o., Brno: Product design, grafická práce

Pedagogická činnost:

Bakalářské studium: Rapid Prototyping - YRP

Bakalářské studium: Základy konstruování - 1K

Bakalářské studium: Konstruování - 2K

Bakalářské studium: Konstruování a CAD - 4KC

Magisterské studium: Projektová výuka

### Vědecká činnost

2017 – 2018: TAČR ZÉTA V-TJ01000354-1.