

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
Katedra technologie staveb**



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Kontaktní zateplovací systém s využitím 3D tisku

Bc. Martin Trhan

2020

Vedoucí práce

Ing. Michal Kovářík

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne 5.1.2020

.....

Martin Trhan

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Michalu Kováříkovi za odborné konzultace a rady při psaní diplomové práce. Dále děkuji doc. Ing. Petru Semerákovi, Ph.D. a doc. RNDr. Vítězslavu Vydrovi, CSc. za cenné rady a pomoc při laboratorních měřeních.

Děkuji rodině za podporu během celého studia.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Trhan Jméno: Martin Osobní číslo: 410109
Zadávající katedra: K122 - Katedra technologie staveb
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Příprava, realizace a provoz staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Kontaktní zateplovací systém s využitím 3D tisku
Název diplomové práce anglicky: Contact thermal insulation system using 3D printing
Pokyny pro vypracování:
1) Rešerše technologií pro kontaktní zateplování zakřivených fasád.
2) Rešerše technologií 3D tisku z plastu.
3) Návrh konceptu tepelně-izolačního panelu pro výrobu technologií 3D tisku.
4) Výroba vzorku panelu pomocí 3D tisku.
5) Provedení zkoušek panelu.
6) Zhodnocení výsledků.
Seznam doporučené literatury:
Fabricated: the new world of 3D printing. LIPSON, Hod, Melba KURMAN. Indianapolis: John Wiley & Sons Ltd., 2013. ISBN 978-1-118-35063-8
AM envelope. The potential of Additive Manufacturing for facade construction. STRAUSS, Holger. Dissertation thesis. TU Delft, 2013
LINHART, Ladislav. Zateplování budov. Praha: Grada, 2010. Profí & hobby. ISBN 978-80-247-3361-6
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Michal Kovářík
Datum zadání diplomové práce: 23.9.2019 Termín odevzdání diplomové práce: 5.1.2020
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Kontaktní zateplovací systém s využitím 3D tisku

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi využití technologie 3D tisku k výrobě tepelně izolačních panelů určených ke kontaktnímu zateplování budov. Důraz je kladen na stavby se zakřivenou fasádou, objevující se stále častěji v moderní architektuře. Práce je složena z teoretické části, která obsahuje rešerši na technologie 3D tisku a úlohu této technologie při vývoji stavebnictví do budoucna. Práce je zaměřena především na nejrozšířenější technologie 3D tisku plastů. Dále práce obsahuje rešerši na kontaktní zateplovací systémy a jeho alternativy využívané k tepelné izolaci zakřivených fasád budov.

Druhá část práce obsahuje koncepční návrh tepelně izolačního panelu, výběr vhodné technologie k jeho výrobě a materiálové řešení panelu. Praktickou částí práce je návrh a výroba prototypu tohoto panelu na 3D tiskárně a následné provedení zkoušek tepelně – izolačních vlastností vzorků a vyhodnocení získaných dat.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kontaktní zateplovací systém, tepelná izolace, 3D tisk, plast, zakřivená fasáda

Contact thermal insulation system using 3D printing

ABSTRACT

This thesis deals with the possibility of using 3D printing technology for the production of thermal insulation panels intended for contact thermal insulation of buildings. Emphasis is placed on buildings with a curved façade that are becoming more and more frequent in modern architecture. Theoretical part of the thesis includes a research on 3D printing technology and the role of this technology in the development of the construction industry in the future. The work is focused on the most widespread 3D printing technology of plastic. Furthermore, the thesis contains a research for contact thermal insulation systems and its alternatives used for the thermal insulation of curved facades.

The second part contains conceptual design of thermal insulation panel, selection of suitable technology for its production and material solution of the panel. The practical part contains the design and production of a prototype of the panel on a 3D printer, testing the thermal properties of created samples and evaluation of the obtained data.

KEY WORDS

Contact thermal insulation system, thermal insulation, 3D printing, plastic, curved façade

OBSAH

| | | |
|-------|---|-----|
| 1 | Úvod | 10 |
| 1.1 | Cíle diplomové práce | 10 |
| 2 | Teoretická část..... | 11 |
| 2.1 | Technologie 3D tisku..... | 11 |
| 2.1.1 | Digitalizace stavebnictví | 11 |
| 2.1.2 | Aditivní výroba | 14 |
| 2.1.3 | Výhody a nevýhody 3D tisku | 21 |
| 2.1.4 | Využití 3D tisku | 22 |
| 2.1.5 | 3D tisk ve stavebnictví | 25 |
| 2.1.6 | Vliv 3D tisku na životní prostředí | 33 |
| 2.2 | Kontaktní zateplovací systém..... | 35 |
| 2.2.1 | Stavební tepelná technika - teorie | 35 |
| 2.2.2 | Princip a použití kontaktního zateplování staveb..... | 38 |
| 2.2.3 | Vývoj architektury..... | 43 |
| 2.2.4 | Zateplování zakřivených fasád budov | 47 |
| 3 | Tepelně – izolační panel | 53 |
| 3.1 | Základní koncept panelu | 53 |
| 3.1.1 | Technologie a materiály | 57 |
| 3.1.2 | Proces výroby a montáže..... | 64 |
| 3.1.3 | Možnosti využití | 68 |
| 3.2 | Vytvoření prototypu panelu | 73 |
| 3.2.1 | Virtuální návrh modelu | 75 |
| 3.2.2 | Tisk panelů..... | 81 |
| 3.2.3 | Plnění panelů | 84 |
| 3.3 | Zkoušky panelů..... | 88 |
| 3.3.1 | Provedení zkoušek..... | 89 |
| 3.3.2 | Vyhodnocení zkoušek..... | 91 |
| 4 | Závěr..... | 97 |
| | Použité zdroje a literatura | 99 |
| | Seznam obrázků | 106 |
| | Seznam tabulek | 109 |

1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá možností využití 3D tisku při kontaktním zateplování staveb, se zaměřením na budovy se zakřivenou fasádou.

Tato myšlenka vzešla z práce na úloze v předmětu Robotické technologie ve stavebnictví (122YRTS), kterou jsem se rozhodl dále zpracovat v rámci této diplomové práce.

Jedná se o možný směr vývoje stavebnictví v rámci probíhajícího přechodu na takzvaný Průmysl 4.0. S rozvojem technologií lze očekávat větší využití 3D tisku ve stavebnictví i dalších oborech v souvislosti s digitalizací stavebnictví nebo vývojem moderní architektury.

1.1 Cíle diplomové práce

Cílem této diplomové práce je vytvoření koncepčního návrhu tepelně – izolačního panelu vytvořeného technologií 3D tisku pro kontaktní zateplování staveb a prozkoumání možností využití 3D tisku v této oblasti stavebnictví.

Teoretická část diplomové práce se věnuje rešerši současného stavu technologie 3D tisku z plastu a možnému vývoji do budoucna. Dalším tématem jsou kontaktní zateplovací systémy, jejich výhody a nevýhody, alternativy a možnosti využití u zakřivených fasád staveb.

Hlavním bodem celé práce je koncepční návrh tepelně – izolačního panelu pro kontaktní zateplování budov vytvořeného technologií 3D tisku. Je zde popsán základní koncept panelu a možnosti jeho využití. Dále se věnuji výběru vhodné technologie a materiálů pro výrobu panelu. Následuje vlastní výroba tepelně – izolačního panelu technologií 3D tisku, provedení zkoušek jeho tepelně – izolačních vlastností a vyhodnocení výsledků.

2 Teoretická část

Teoretická část práce obsahuje obecný úvod do technologie 3D tisku a její místo v procesu digitalizace stavebnictví. Popisuje různé technologie tisku a možnosti jejich využití, zabývá se historií a možnou budoucností technologie.

Druhá část se týká tepelné izolace budov, popisuje výhody a nevýhody kontaktního zateplování staveb i jeho alternativ. Dále se zamýšlí nad možným vývojem architektury do budoucna s ohledem na vývoj technologií.

2.1 Technologie 3D tisku

Technologie 3D tisku je jednou z technologií digitální fabrikace, která je dále popsána v kapitole 2.1.1 *Digitalizace stavebnictví*. Samotný proces 3D tisku, různé tiskové technologie a používané materiály jsou obsaženy v kapitole 2.1.2 *Aditivní výroba*.

2.1.1 Digitalizace stavebnictví

Od konce 20. století dochází k rychlému rozvoji informačních technologií. S tím probíhá i **digitalizace stavebnictví**, která vede ke zjednodušení a zefektivnění řízení procesu výstavby, nakládání s informacemi a jejich vytváření nebo sdílení.

Prvním krokem bylo nahrazení ručního kreslení stavebních výkresů digitální tvorbou 2D výkresů. To vedlo ke zrychlení a zjednodušení projektování a umožnilo snadnou elektronickou komunikaci mezi subjekty. S rozvojem **CAD** systémů (Computer – Aided Design, počítačem podporované projektování) se přechází ke 3D modelům, jejichž zatím poslední formou je **BIM** (Building Information Modeling, informační model budovy). Jedná se o moderní proces správy projektu stavby během celého životního



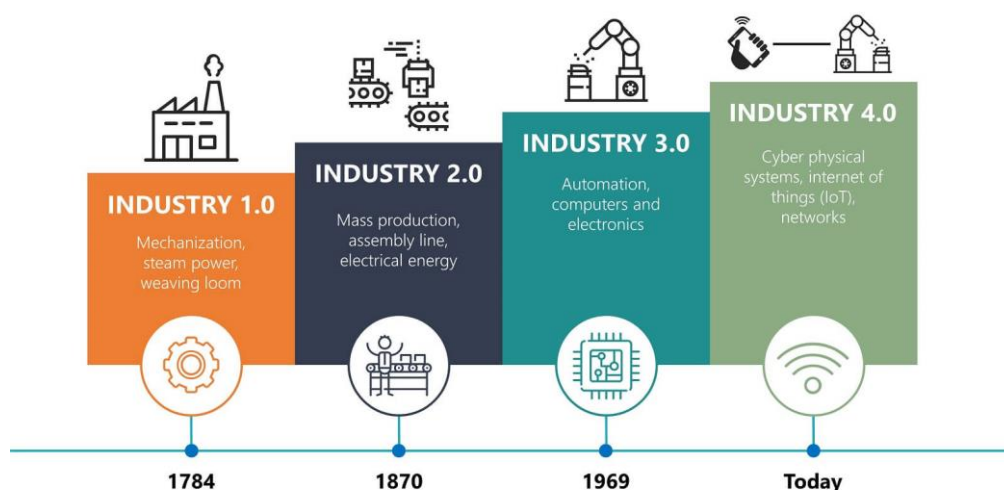
Obrázek 1 BIM [4]

cyklu. Je založený na 3D modelu budovy, který obsahuje kromě základního geometrického tvaru i další informace o technických, materiálových, statických, technologických nebo ekonomických vlastnostech jednotlivých prvků. Dále umožňuje koordinaci

různých profesí a detekci kolizí, usnadňuje práci Facility Managementu v průběhu užívání stavby a předávání informací mezi jednotlivými fázemi až do konce životního cyklu.

BIM se stává ve světě standardem při realizaci stavebních projektů. V České republice byla 25. 9. 2017 vládou schválena „*Koncepce zavádění metody BIM v ČR*“ [4], která mimo jiné uvádí, že BIM je základní nástroj digitalizace stavebnictví a počítá se zavedením povinnosti používání BIM pro nadlimitní veřejné zakázky od roku 2022.

Digitalizace stavebnictví je součástí takzvané čtvrté průmyslové revoluce a přechodu na **Průmysl 4.0** (Industry 4.0), respektive na Stavebnictví 4.0. Mezi hlavní znaky čtvrté průmyslové revoluce patří nahrazení lidské práce robotizací včetně zautomatizování zadávání výrobních dat a automatického předávání informací mezi stroji, materiály a výrobky.



Obrázek 2 Průmysl 4.0 [5]

Obecně lze za hlavní znak **Průmyslu 4.0** označit rozšíření a zautomatizování elektronické komunikace, které se projeví v mnoha oblastech. Kromě využití v průmyslové výrobě s ním souvisí například projekty *Smart Cities*, *Internet of Things*, datové sítě páté generace, vysílací standard *DVB-T2* nebo autonomní automobily.

Čtvrtá průmyslová revoluce bude mít zásadní vliv na stavebnictví, protože stavební projekty jsou rozděleny na menší celky, které řeší více subjektů a předávání informací mezi nimi způsobuje časové ztráty a společně s náročnou koordinací tím vznikají i ekonomické ztráty.

Stavebnictví je také specifické pomalejším nástupem inovací. V některých oblastech výrobního průmyslu, v IT nebo zemědělství stoupla produktivita v období 2000 - 2013 o 30 – 40 %, zatímco ve stavebnictví zůstala stejná. Dalšími problémy jsou závislost na těžké manuální práci a nedostatek pracovní síly, vázanost na pozemek, velká produkce odpadů nebo vliv klimatických podmínek.

Ke zvýšení efektivity stavebnictví je tedy zapotřebí dokončení 3. průmyslové revoluce, tedy robotizace, a nástup 4. průmyslové revoluce.

Technologií, která může zvýšit efektivitu stavebnictví snížením produkce odpadů a lepším využitím pracovní síly je 3D tisk. Situace 3D tisku ve stavebnictví je dále popsána v kapitole *2.1.5 3D tisk ve stavebnictví*.

2.1.2 Aditivní výroba

3D tisk, nebo také **aditivní výroba**, je proces vytváření objektu postupným přidáváním materiálu na základě digitálního modelu. Výroba probíhá na 3D tiskárně, kterých existuje mnoho typů, lišících se konstrukcí, velikostí, koncovým nástrojem nebo používanou technologií.

Počátek technologie je spojen s patentem Chucka Hulla na stereolitografii (SLA) z roku **1986**. Principem technologie bylo vytvrzování tekutého roztoku UV světlem a vycházela z japonské technologie *Rapid Prototyping* z roku 1981 od Hidea Kodama. Vývoj současných 3D tiskáren se odvíjí od patentu MIT (Massachusetts Institute of Technology, Massachusettský technologický institut) na tisk z práškového materiálu z roku 1993. Vypršení původních patentů v letech 2003 – 2009 umožnilo další rozvoj technologie. Jedním z projektů, který přispěl k rozvoji 3D tiskáren, je i **RepRap**, založený v roce 2004 A. Bowyerem. Jedná se o označení tiskárny, která dokáže vyrábět vlastní součástky a současně komunitního projektu hardwaru s otevřenou licencí, založeném na sdílení znalostí. 3D tiskárny začaly používat menší firmy i domácnosti a nejpoužívanější technologií se stalo tavení a vrstvení termoplastů technologií **FDM**.

Vývoj technologie stále pokračuje, zvyšuje se dostupnost 3D tiskáren, používají se nové materiály, nové technologie a vyvíjí se nové možnosti využití.

2.1.2.1 Digitální fabrikace

Technologie 3D tisku patří mezi formy digitální fabrikace, což je výrobní proces, při kterém je stroj ovládán počítačem. Principem je přímá interpretace virtuálního modelu stojem s využitím **CNC** (Computer Numeric Control, Počítačem řízené číslicové ovládání) a **CAM** (Computer Aided Manufacturing, Počítačem podporovaná výroba).

Formy digitální fabrikace:

- 3D tisk, aditivní výroba: koncový nástroj nanáší materiál
- CNC obrábění: koncový nástroj odebírá materiál z polotovaru
- Tavení laserem: koncový nástroj tvaruje materiál polotovaru
- Robotická montáž: koncový nástroj manipuluje s materiálem

Při digitální výrobě vzniká produkt bez potřeby papírové dokumentace. Celý výrobní proces je navrhnut v CAM prostředí – pracovní dráha stroje, typ a pohyb koncového nástroje a podobně. Lze tak odhalit chyby ještě před začátkem samotného výrobního procesu. Není potřeba vyrábět žádnou formu, takže lze rychle vyrobit prototyp a snadno provádět úpravy modelu bez dalších nákladů.

2.1.2.2 Typy technologií 3D tisku

Existuje velké množství technologií 3D tisku, lišících se principem výroby nebo jen konkrétním patentem a vlastnickými právy. Formy aditivní výroby jsou definovány normou *ISO/ASTM 52900:2015 Aditivní výroba - Obecné zásady – Terminologie*.

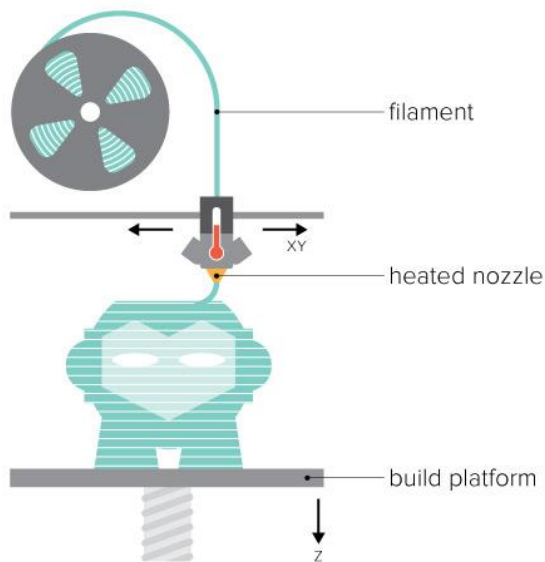
Seznam vybraných 3D tiskových technologií:

- SLS Selective Laser Sintering
- SLM Selective Laser Melting
- SHS Selective Heat Sintering
- BJ Binder Jetting
- MJP Multi Jet Printing
- EBM Electronic Beam Melting
- FDM / FFF Fused Deposition Modeling / Fused Filament Fabrication
- CFF Continuous Filament Fabrication
- SLA Stereolithography
- DLP Digital Light Processing
- LPM Layered Powder Metallurgy
- CJP Color Jet Printing
- DMP Direct Metal Printing
- LOM Laminated Object Manufacturing
- PolyJet Matrix
- Rapid Freeze Prototyping

Tyto technologie můžeme na základě principu jejich fungování rozdělit do čtyř základních kategorií.

1. Materiál je vytlačován tiskovou hlavou po vrstvách. Dostupná technologie s velkým spektrem materiálů, nevýhodou je dlouhý čas tisku. Obvykle se používají termoplasty, které se musí roztavit, po nanesení opět tuhnou.
 - Např.: **FDM, MJP**
2. Tekutý polymer je po vrstvách vytvrzován světelným paprskem, který kreslí požadovaný tvar. Výtisk je třeba omýt a vytvrdit UV světlem.
 - Příkladem je **SLS** nebo **SLA** - jedna z nejstarších a nejpřesnějších technologií
3. Materiál v práškové formě je rozprostřen na tiskové podložce a po vrstvách je vytvrzován laserem nebo lepidlem.
 - Např.: **SLS, CJP, DMP**
4. Zvláštní kategorie, kde je vrstva materiálu vyříznuta z fólie nebo papíru a na ni je nalepena další vrstva. Nejde o klasický 3D tisky, ale je to aditivní výroba.
 - Např.: **LOM**

Nejstarší technologií je **SLA** (Stereolitografie) a UV paprsek při ní vytvrzuje tekutou pryskyřici. Nevýhodou je malé množství použitelných materiálů. Podobnou technologií je i **SLS** (Selective Laser Sintering), kde je k natavení a následnému spékání materiálu použit výkonný laser. Je zde větší spektrum použitelných materiálů, ale nevýhodou zůstává energetická náročnost, vysoká pořizovací cena a nemožnost tisku dutin.



Obrázek 3 Schéma technologie FDM [25]

Nejrozšířenější technologií současnosti je **FDM** (Fused Deposition Modeling). Z důvodu patentu firmy Stratasys na název FDM se uvádí též pod názvem FFF (Fused Filament Fabrication). Materiálem neboli filamentem je tenká plastová struna, která je v tiskové hlavě roztavena, aby byla plastická a tryskou je po vrstvách nanášena na pracovní plochu, kde znovu tuhne. Technologie FDM je dostupná i pro domácnosti.

Málo rozšířenou technologií je **EMB** (Electronic Beam Melting), která využívá usměrněný proud elektronů ve vakuu k roztavení kovového prášku a jeho postupnému navařování. Velmi přesná, drahá a technicky náročná technologie tisku kovů.

Další technologií je **PolyJet Matrix**, kde tiskárna tryská kapky tekutého fotopolymeru a ty jsou na pracovní ploše vytvrzovány UV světlem. Tato technologie umožňuje tisk z více materiálů současně.

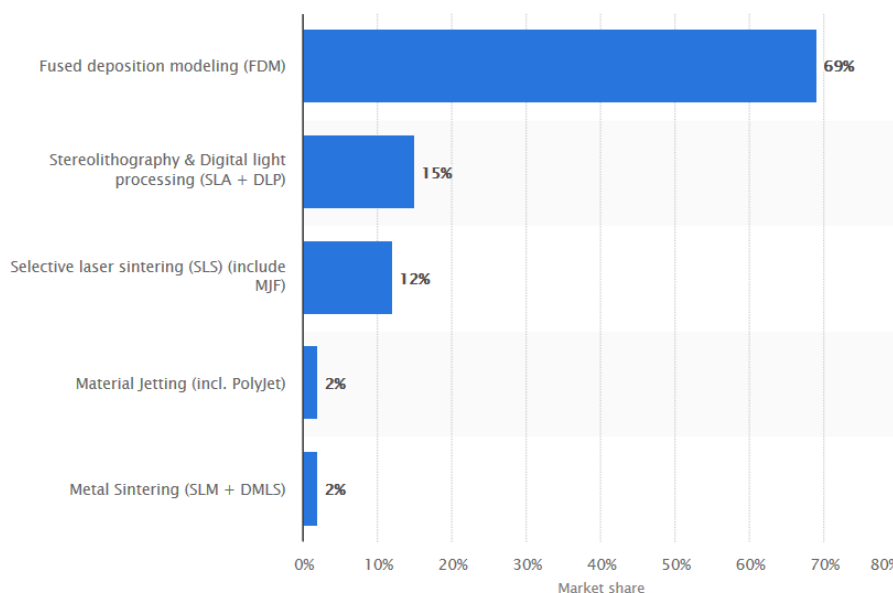
Nástrojem k vytvoření fyzického modelu jsou **3D tiskárny**. Různé technologie mají různé nároky na tiskárny z hlediska pořizovací ceny nebo energetické náročnosti. Díky dostupnosti 3D tiskáren a tiskových materiálů



Obrázek 4 3D tiskárna Prusa i3 [Prusa Research]

využívaných technologií FDM se tato technologie stala tou nejpoužívanější (viz. *Obrázek 5*).

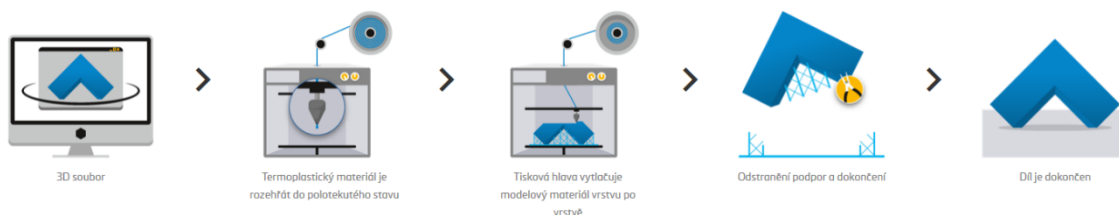
Vývoj 3D tiskáren je rozdělen do dvou proudů. Jedním jsou profesionální tiskárny pro průmyslové využití, druhý tvoří hobby tiskárny pro domácnosti a běžné uživatele. Jednou z nejpoužívanějších tiskáren druhé skupiny je 3D tiskárna Prusa i3 (viz. *Obrázek 4*) od českého vývojáře Josefa Průši. Většina tiskáren pro domácí využití je určena k tisku z plastu technologií FDM a jsou limitovány rozměrem tiskárny, který je obvykle mezi 20 - 50 cm. V profesionálním 3D tisku se častěji využívají kovy a dosahuje se větších přesností. Rozměrově lze tisknout od nanometrů po několik metrů. Používají se k výrobě testovacích prototypů, k tisku složitých geometrií nebo k individuální úpravě výrobků.



Obrázek 5 Graf nejpoužívanějších 3D tiskových technologií v roce 2018 [27]

Další kapitoly se věnují převážně tisku z plastu a nejrozšířenější a nejdostupnější technologii pro 3D tisk plastů, kterou je FDM.

Technologie FDM je použita k vytvoření prototypu tepelně – izolačního panelu v rámci praktické části této práce.



Obrázek 6 Schéma procesu 3D tisku technologií FDM [55]

2.1.2.3 Materiály pro 3D tisk

Spektrum materiálů, které se dají využít pro 3D tisk se stále rozšiřuje. Ve stavebnictví se začíná využívat tisk z betonu, ve zdravotnictví se provádí pokusy tisknout z organických materiálů. Velkým posunem je tisk z kovového prášku, který spojuje vysokou pevnost a kvalitu svařovaných nebo litých konstrukcí s výhodami 3D tisku, jako je schopnost tvořit detailní komplexní tvary nebo vylehčenou vnitřní strukturu.

K plastru lze přidávat další materiály a tím pozměnit jeho vlastnosti. Přidává se sklo, vosk, keramika nebo dřevěné piliny. Spojením polymeru a diamantového prášku vznikne materiál, jehož vlastnosti se blíží diamantu. Experimentuje se s tiskem elektrotechnických součástek a baterií, lze vytisknout oblečení nebo dokonce jídlo (filamentem může být například čokoláda).

Tato práce se zaměřuje především na nejrozšířenější materiál pro 3D tisk metodou FDM, kterým jsou plasty. Nazývají se tiskové filamenty a vyrábějí se ve formě struny. Jejich hlavní výhodou je cenová dostupnost a snadné zpracování.

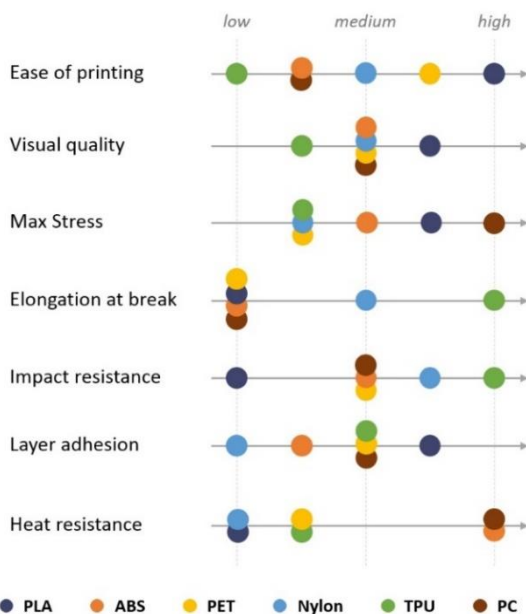
Nejčastěji se používají termoplasty na bázi styrenu (ABS, ASA, PS), polyamidu (Nylon), PE, PP, PVC a podobně. Další možností jsou plasty s příměsí kovových částic (měď, mosaz) případně dřevěných pilin. Tyto filamenty se nejběžněji vyrábí v tloušťce 1,75 mm a dodávají se v cívkách a hmotnostech 1000 g nebo 750 g.



Obrázek 7 Materiály pro 3D tisk [12]

Seznam vybraných plastových materiálů pro 3D tisk metodou FDM:

- ABS Akrylonitrilbutadienstyren
- ASA Akrylonitril-styren-akryl
- PLA Polylactic acid – kyselina polymléčná
- PC Polykarbonát
- PET Polyetyléntereftalát
- HDPE High-Density Polyethylene
- TPE Termoplastický Elastomer (kaučuk)
- PVC Polyvinylchlorid, vinyl 303
- HIPS High Impact Polystyrene - houževnatý polystyrén
- FLEX elastický filament na bázi polyuretanu
- PEEK Smartfil Innovatefil Peek, Polyether-ether-ketone
- BRONZEFILL tisková struna z PLA s obsahem bronzových částic
- PP Polypropylen
- Karbon Carbon Fibre, termoplast s karbonovými vlákny
- PA Nylon, Polyamid
- BAMBOOFILL tisková struna z PLA s obsahem bambusu
- 3DXNANO ESD mnohostěnné karbonové nanotrubičky
- PLASTER Eco3D, na bázi PLA
- CPE Kopolyester



Obrázek 8 Vlastnosti materiálů [14]

Jednotlivé materiály se liší svými vlastnostmi, jako je teplota tavení, pevnost, pružnost, odolnost na nízké a vysoké teploty a UV záření nebo náročnost tisku. Dále se liší kvalitou povrchu, barevností a také cenou.

Je proto důležité vždy zvážit vhodnost materiálu pro danou aplikaci.

Většina materiálů se vyrábí v několika variantách s lehce modifikovanými vlastnostmi a v různých barevných variantách.

Materiály je možné kombinovat, obvykle jeden slouží jako tisková podpora,

což je lehká a křehká struktura zajišťující stabilitu výrobku během tisku a po dokončení je odstraněna. Některé technologie umožňují tisk více materiálů současně.

2.1.2.4 Proces 3D tisku

3D tisk je proces vytváření fyzického modelu z digitální předlohy. Jedná se o aditivní proces, při kterém se materiál postupně přidává, obvykle v souvislých vodorovných vrstvách, dokud nevznikne požadovaný tvar (viz. *Obrázek 6*). Jedná se v podstatě o opačný proces než u obráběcích strojů, které materiál odebírají z celistvého objektu, dokud nezůstane výsledný tvar.

Prvním krokem procesu 3D tisku je vytvoření digitálního 3D modelu. Existuje několik metod. Nejběžnější je vymodelování v **CAD** softwaru (např. ArchiCAD, SketchUp, Fusion 360). CAD (Computer – Aided Design, počítačem podporované projektování) znamená použití grafického počítačového programu k projektování ve 2D i 3D. CAD je běžně používán ve stavebnictví (2D stavební výkresy, BIM - Building Information Modeling a podobně), geografii (GIS - geographic information systems) i dalších odvětvích. Tyto programy umožňují pomocí různých nástrojů virtuálně vytvořit zcela libovolný trojrozměrný tvar.

Další metody jsou skenování a fotogrammetrie. Obě spočívají v převodu skutečného předmětu do digitální podoby pomocí specializovaného 3D skeneru, respektive digitálních fotografií.

Výsledný digitální model se převede do formátu kompatibilního s 3D tiskárnou (klasicky *.stl*, novější *.amf* případně *.obj*) a pomocí specializovaného programu zvaného **slicer** (česky „plátkovač“) se rozloží na vrstvy a vytvoří se vnitřní struktura materiálu. Na základě *slicování* se vytvoří **G-code** (G-kód), který slouží k naprogramování dráhy stroje v pracovním prostoru určeném kartézským souřadnicovým systémem. Je to programovací jazyk, který stroji ovládanému počítačem (3D tiskárna) předá soubor instrukcí potřebných k tisku, například kam a kdy se pohnout, jakou rychlostí a určí přesnou trajektorii trysky.

Na základě těchto instrukcí 3D tiskárna objekt vytiskne podle dané technologie. V případě FDM je tavená struna plastového filamentu vytlačovaná tiskovou hlavicí a po tenkých vrstvách se skládá cílový objekt. Po nanesení každé vrstvy se podložka nebo tryska posune vertikálně o výšku vrstvy a pokračuje následující vrstvou. Spojení vrstev je zajištěno tavením plastu a jeho následným tuhnutím. Po vytištění mohou být zapotřebí ještě drobné úpravy objektu, například odstranění podpůrných tiskových konstrukcí, čištění, opilování nebo povrchová úprava.

Důležitým parametrem nastavovaným ve *sliceru* je tloušťka vrstvy. Obvykle se pohybuje mezi **0,05 – 0,25 mm** a má zásadní vliv na kvalitu výrobku a rychlost tisku. Kvalita je také ovlivněna teplotou tavení, vadami materiálu a tiskárny a vnitřní strukturou.

2.1.3 Výhody a nevýhody 3D tisku

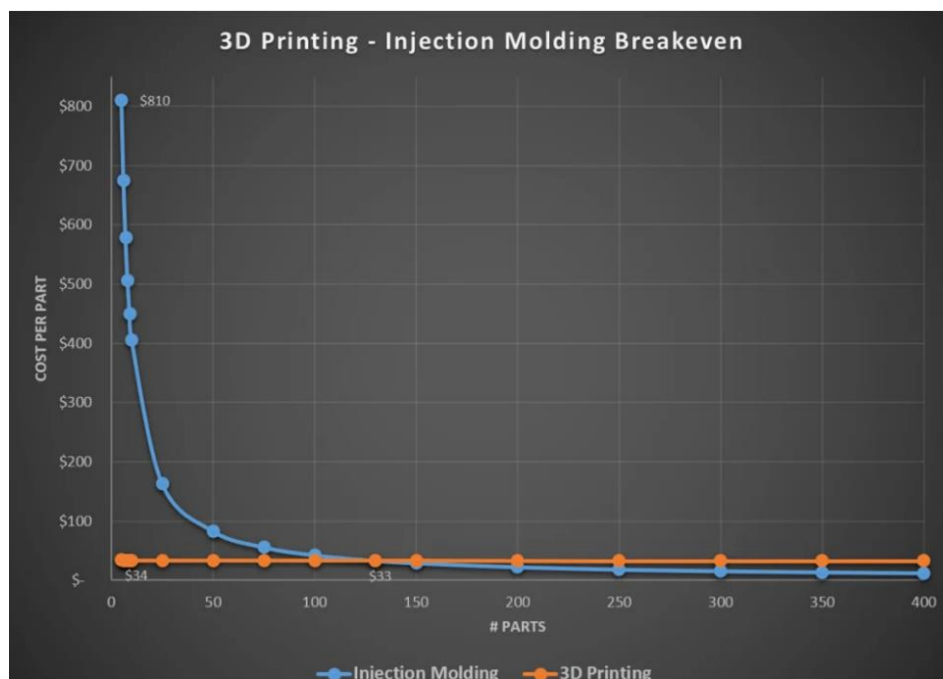
Výhody (+) a nevýhody (-) technologie 3D tisku oproti klasickým výrobním metodám jako odlévání nebo obrábění:

Výhody (+)

- + Lze vytvořit téměř jakýkoli tvar (včetně dutin nebo mechanických částí)
- + Složitost tvaru nemá vliv na cenu a pracnost
- + Možnost rychlé výroby prototypu
- + Optimalizované množství materiálu – vylehčená vnitřní struktura
- + Méně odpadu
- + Dostupnost 3D tiskáren
- + Universálnější využití tiskárny oproti klasickým technologiím

Nevýhody (-)

- Pomalá výroba (v závislosti na kvalitě)
- Horší kvalita povrchu
- Horší mechanické vlastnosti kvůli nehomogenitě materiálu
- Omezený výběr materiálu
- Limitace velikostí tiskárny
- Některé druhy materiálu jsou drahé (kovy)
- Nevhodné pro velké objemy výroby



Obrázek 9 Graf porovnání nákladů 3D tisku a vstřikování plastů v závislosti na počtu kusů [5]

2.1.4 Využití 3D tisku

Aditivní výroba má široké využití a možnosti technologie se stále posouvají. 3D tisk momentálně není ideální pro velkosériovou výrobu, ale při produkci do 50 – 100 kusů (viz. graf na *Obrázku 9*) je cenově a energeticky výhodnější než klasické výrobní technologie, vyžadující nákladnou tvorbu forem. Uplatní se tedy u výrobků vyžadujících individuální úpravy, speciálních nástrojů nebo prototypů. 3D tisk také umožňuje tvorbu komplexních tvarů, které není možné vytvořit jinými technologiemi. Je možné tisknout velikosti od nanočástic po celé stavební konstrukce. Vývoj nových materiálů umožní tisk organické tkáně, elektronických součástek a baterií nebo oblečení. 3D tisk usnadňuje výzkum a urychluje vývoj v mnoha odvětvích.

Oblasti využití 3D tisku:

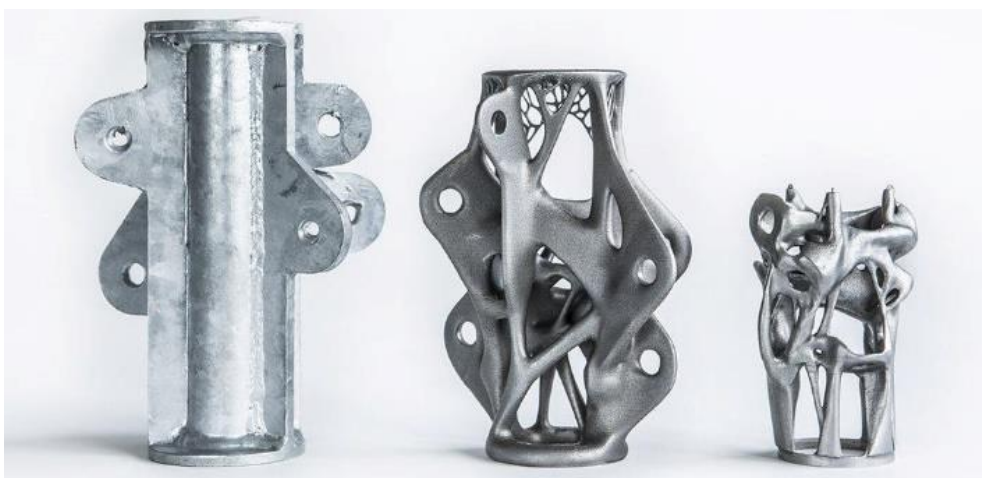
- **Výroba prototypů**

Jedním z nejběžnějších využití 3D tisku je výroba prototypů. Tento princip stál na počátku technologie, protože 3D tisk vychází z technologie *Rapid Prototyping*, tedy Rychlá výroba prototypu od Hidea Kodama z roku 1981.

3D tisk umožňuje rychlou výrobu prototypu bez nutnosti vyrábět formu. Prototypy vyrobené 3D tiskem se používají v mnoha odvětvích na testování designu, optimalizaci namáhání materiálu a snížení hmotnosti.

- **Optimalizace**

3D tiskem lze vytvořit vylehčenou dutinovou strukturu a tím ušetřit materiál a snížit hmotnost. Tento proces se nazývá topologická optimalizace. Lze také tisknout komplexní tvary, které umožní vytvořit prvky přenášeující stejné napětí s menší spotřebou materiálu.



Obrázek 10 Topologická optimalizace s využitím generativního designu a 3D tisku [16]



Obrázek 11 Architektonický pavouk z titanové litiny [Renishaw]

Optimalizací u 3D tisku lze dosáhnout kromě snížení spotřeby materiálu (například titanového prášku, obrázek 11) i zajištění celkové pevnosti, pružnosti a tuhosti konstrukce, schopnosti pohlcovat rázové energie, izolovat proti vibracím, hluku i úniku tepla.

o Individuální úpravy výrobků

3D tisk nabízí možnost upravit jakýkoli výrobek přesně pro potřeby koncového uživatele. Každý výrobek tak může mít unikátní design i vlastnosti bez navýšení nákladů. Tímto způsobem je možné vytvářet například sluchátka, šperky, oblečení, boty, sochy, interiéry automobilů, dekorace, kosmetiku a podobně.



Obrázek 12 3D tištěná obuv [Adidas]

Odvětví využívající 3D tisk:

- **Letecký průmysl**

Letecký průmysl patří mezi první odvětví, kde se začal 3D tisk výrazně využívat. Kromě tisku prototypů se uplatní při výrobě specializovaných nástrojů, náhradních dílů i složitých součástí motorů. 3D tisk také umožňuje optimalizovat rozložení hmoty a snížení hmotnosti částí letadel.

Používají se speciálně upravené termoplasty a také kovy, specificky titan.

Podobné je i využití ve **zbrojním průmyslu**.

- **Automobilový průmysl**

I v automobilovém průmyslu se 3D tisk používá k výrobě prototypů, součástek nebo náradí, dále umožňuje vytvářet některé složité tvary a upravovat auta na míru zákazníkům.

- **Zdravotnictví**

Velký význam má 3D tisk ve zdravotnictví, kde umožňuje výrobu cenově dostupných lékařských pomůcek přizpůsobených potřebám pacientů. Tisknou se protézy, naslouchací pomůcky nebo zubní náhrady.

Experimentuje se s tiskem z biologické tkáně za účelem vytvoření orgánů.

- **Architektura a stavebnictví**

Popsáno v kapitole 2.1.5 *3D tisk ve stavebnictví*.

- **Kosmonautika**

Velký význam má 3D tisk i pro vesmírný program. Vědci zkoumají možnosti tisku ve stavu beztlíže v rámci projektu „*Made in Space*“. 3D tisk z kovu se používá pro výrobu komplexních součástek motorů raketoplánů a satelitů. Evropská kosmická agentura (ESA) experimentuje s tiskem malých satelitů z *PEEK* [17]. Tisknout lze i další součástky pro použití ve vesmíru. Ještě významnější ale může být použití 3D tiskárny přímo na vesmírné stanici nebo raketoplánu k výrobě chybějící součástky, náradí nebo lékařské pomůcky.

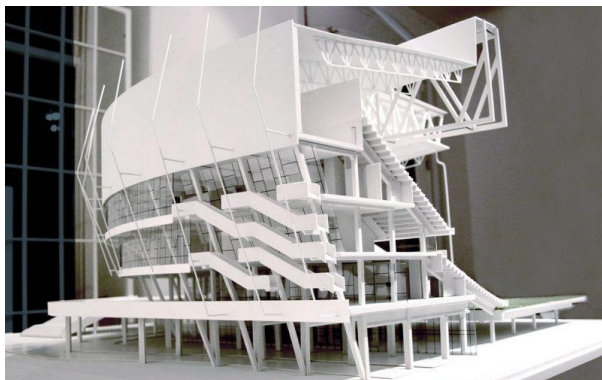
Aditivní výroba je také jednou z uvažovaných variant, jak postavit obydlí na Marsu nebo na Měsíci. Problém pro jakoukoli výstavbu mimo Zemi představuje přeprava materiálu. Předpokladem pro použití 3D tisku je proto schopnost zpracovat místní *regolít* (vrstva nezpevněného, různorodého horninového materiálu na povrchu) do formy umožňující 3D tisk. Tuto technologii vyvíjí NASA v rámci projektu „*Granular Mechanics and Regolith Operations*“.



Obrázek 13 Vizualizace 3D tisku stavby na Měsíci [NASA]

2.1.5 3D tisk ve stavebnictví

V současnosti je 3D tisk ve stavebnictví využíván převážně na tisk architektonických modelů na běžných průmyslových a hobby tiskárnách. Architektům to umožňuje rychle vytisknout fyzickou 3D vizualizaci projektu a předvést ji klientům. Pro účely městského plánování je možné vytisknout model celé ulice nebo čtvrti. Tiskovým materiálem je obvykle bílé PLA, možné jsou i barevné modely.



Obrázek 15 Architektonický model [21]



Obrázek 14 3D vizualizace [20]

K tisku stavebních konstrukcí a dílců v poměru 1:1 už stolní a průmyslové tiskárny rozměrově nestačí, jsou využívány specializované velkoformátové 3D tiskárny pro stavebnictví nebo průmyslové roboty s tiskovou koncovkou. Jejich hlavní využití je pro tisk celých staveb nebo konstrukcí. Využívají se různé materiály v čele s tiskem z cementové malty nebo betonu.

Technologie tisku z betonu i dalších materiálů se stále vyvíjí, ve světě však již byla technologií 3D tisku realizovaná řada projektů obvykle menších staveb.

Výhody využití 3D tisku ve stavebnictví:

- Téměř libovolný tvar konstrukce
- Snížení spotřeby materiálu
- Méně odpadů
- Srovnatelná nosnost při nižší hmotnosti
- Rychlá výstavba a menší potřeba pracovníků
- V malosériové výrobě může být levnější

Technologie 3D tisku se používá například k výrobě topologicky optimalizovaných styčnicků fasád (viz. *Obrázek 10*), netypických součástí TZB nebo designových prvků.

Dalším krokem je využití aditivní výroby k tisku celých stavebních konstrukcí.

- **3D tisk z betonu**

Technologií 3D tisku z betonu bylo realizováno několik staveb ve Švédsku, Nizozemsku, USA, UAE nebo v Číně. Pomocí robotů nebo velkých 3D tiskáren lze vytisknout svislé nosné konstrukce a příčky. Stavba vzniká postupným vrstvením betonu v plných nebo vylehčených průřezech. Problém představují vodorovné a jiné ohybem namáhané konstrukce, kvůli nemožnosti tisknout plnohodnotnou výztuž. Přesnost tisku a pohledovost také zatím nejsou ideální.

Materiálem je cementová malta se speciálními požadavky, jako malá velikost maximálního zrna kameniva, vyšší rychlost tuhnutí, vysoký obsah přísad a příměsí a nízký vodní součinitel.

Tisknout lze pomocí **rámové 3D tiskárny** nebo **3D tiskárny s robotickou rukou**. Problémem velkých tiskáren je jejich velká hmotnost a komplikovaná přeprava, proto existují mobilní 3D tiskárny, které mohou mít i vlastní podvozek.



Obrázek 17 Robotická technologie pro 3D tisk z betonu [Hyperion Robotics]



Obrázek 16 Rámová velkoformátová 3D tiskárna [28]

V roce 2016 byl ve Španělsku otevřen první most vytištěný z mikroskopicky vyztuženého betonu, předepnutý kabely (viz. *Obrázek 18*). Most je 12,0 m dlouhý a 1,75 m široký a nachází se v madridském parku Castilla La Mancha. Byl navržen na základě parametrického designování pro optimální rozložení hmoty.



Obrázek 18 3D tištěný most v Madridu [21]

- **3D tisk z přírodních materiálů**

Ekologickou variantou je tisk z místních přírodních materiálů, například zeminy nebo dřeva (dřevěné piliny smíchané s PLA). Tisk z lokálních materiálů je ekonomicky i ekologicky výhodný.

Hlína má ve srovnání s betonem lepší tepelně – izolační vlastnosti. Hodnota součinitele tepelné vodivosti betonu je v rozmezí $\lambda = 1,3 - 1,7 \text{ W/m.K}$, u hlíny je to přibližně $\lambda = 0,7 \text{ W/m.K}$. Pro plasty se tato hodnota pohybuje kolem $\lambda = 0,3 \text{ W/m.K}$.



Obrázek 19 3D tisk z hlíny [22]

Při 3D tisku z betonu nebo hlíny je sklon stěn omezen na přibližně 45° a nelze tedy tisknout vodorovné konstrukce. Při kopulovitém tvaru se projevuje takzvaný vrchlíkový efekt, kdy kvůli velkému úhlu následující vrstva nemá podporu.



Obrázek 20 Ekologický dům "TECLA", otvor na stropě jako řešení vrchlíkového efektu [22]

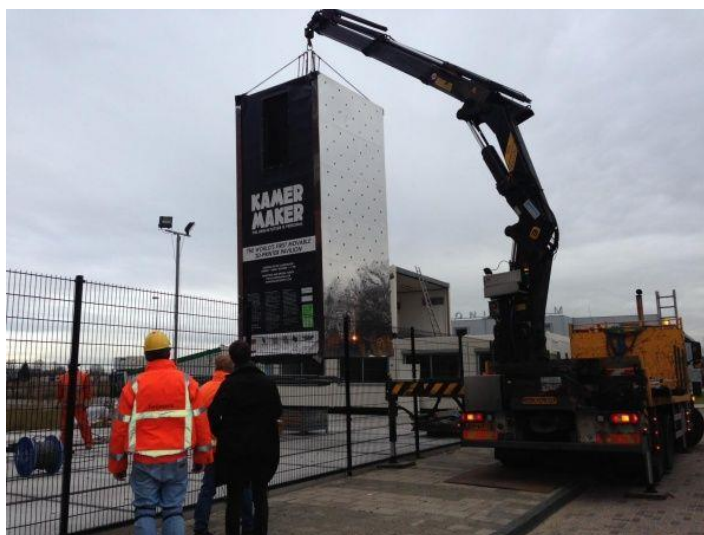
- **3D tisk z plastu**

Stavby lze tisknout i z plastu, je to rychlá a levná varianta. Příkladem realizace je experimentální ubytovací kabina vytištěná z recyklovaného termoplastu v Amsterdamu.

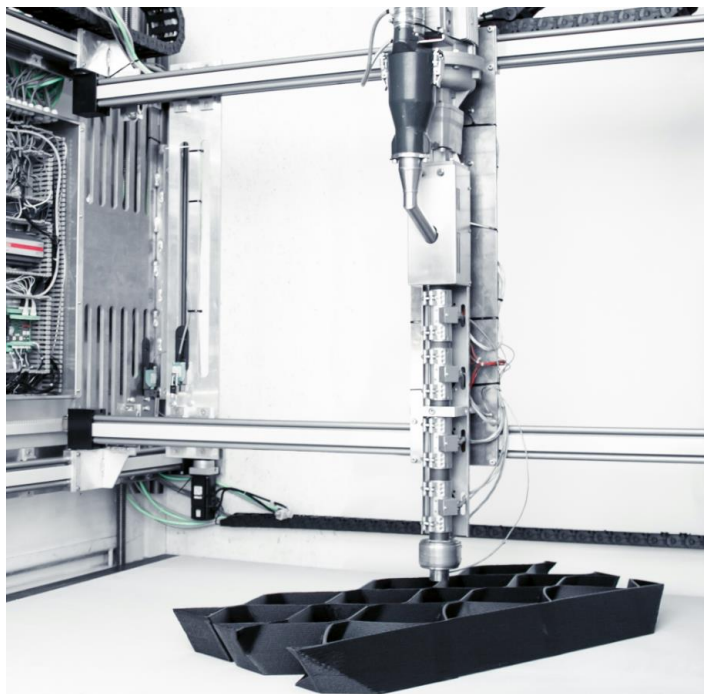


Obrázek 21 Vytištěná kabina v Amsterdamu [21]

Tato stavba od nizozemského studia **DUS Architects** byla vytvořena pomocí velkoformátové 3D tiskárny **KamerMaker**. Jedná se o unikátní mobilní 3D tiskárnu, která tiskne z plastu objekty až o rozměrech 2,0 x 2,0 x 3,5 m. Materiálem pro tisk není struna, ale plastové pelety z recyklovaného PET nebo bioplastu PLA. Tiskárna je primárně určena k tisku malých interiérů, ale lze ji využít k tisku stavebních konstrukcí. Ubytovací kabina v Amsterdamu byla sestavena z několika vytištěných dílů.



Obrázek 22 Velkoformátová 3D tiskárna KamerMaker [51]

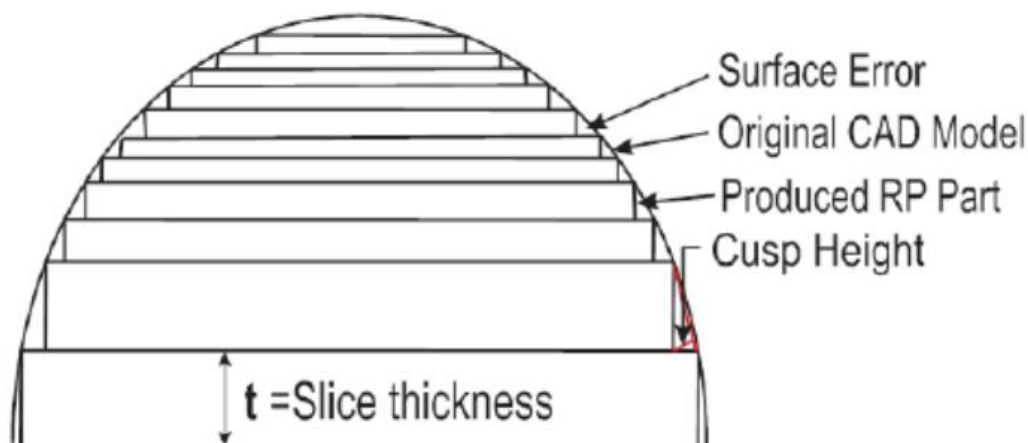


Obrázek 23 Velkoformátová 3D tiskárna KamerMaker [43]

Hlavní výhodou 3D tiskárny KamerMaker je její mobilita, lze ji převést přímo na staveniště, kde může tisknout potřebné stavební konstrukce a díly.

Velkoformátové přenosné 3D tiskárny jsou dalším krokem k rozšíření technologie a překonání problémů, které stéle má.

Technologie má určité limity dané principem tisku, tedy postupným vrstvením materiálu, který způsobuje nehomogenitu materiálu a tím horší únosnost v ohybu nebo kvalitu povrchu. Neumožňuje tisk vodorovných konstrukcí a maximální sklon svislých konstrukcí je také omezen. Čím větší sklon, tím více se projevují takzvaný schodišťový efekt (**staircase effect**) a vrchlíkový efekt (**cap effect**). Většina technologií umožňuje tisk maximálně do sklonu 45°. Vliv těchto efektů je možné zmírnit změnou tloušťky vrstvy případně použitím nehorizontálního plátkování.



Obrázek 24 Schodišťový efekt [31]

Vodorovné konstrukce lze vytisknout ve svislé poloze, vložit do nich dodatečnou výztuž a otočit. 3D tisk lze dále použít k výrobě ztraceného bednění nebo sendvičových stěn.

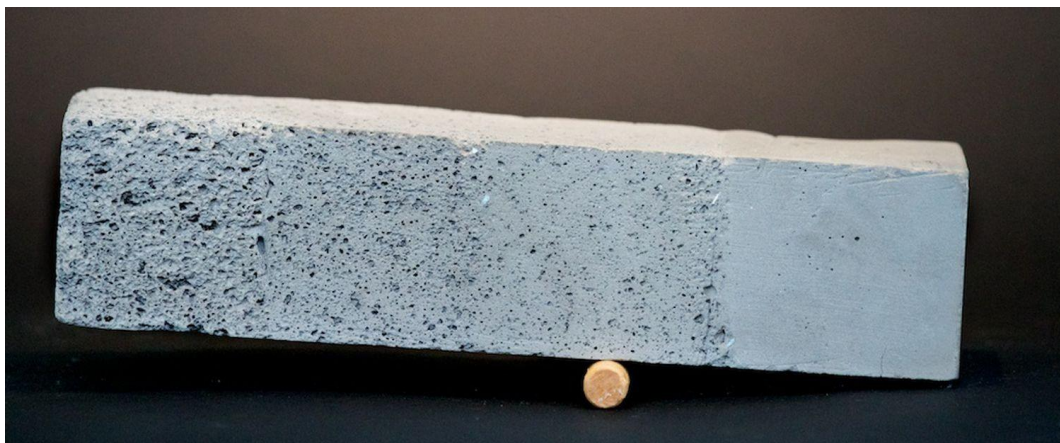
Jednou z hlavních výhod technologie 3D tisku je schopnost některých technologií přizpůsobit vnitřní strukturu materiálu a tím zlepšit například tepelně technické vlastnosti, optimalizovat namáhání, snížit hmotnost a ušetřit materiál. Je tedy možné dosáhnout lepších statických, dynamických a izolačních vlastností než u plně výplně [32].

Chytré vnitřní struktury jsou založené na organických tvarech, které se objevují v přírodě a na matematických modelech. Mohou i při snížené hmotnosti unést vysoká zatížení a mají nižší pravděpodobnost náhlého kolapsu. Příkladem takové prostorové struktury je **gyroid**. Jedná se o prostorovou strukturu založenou na principu minimálních ploch s dvojitým zakřivením.

Matematicky ji lze popsat rovnicí: $\cos x \cdot \sin y + \cos y \cdot \sin z + \cos z \cdot \sin x = 0$. V přírodě se vyskytuje v mikroskopické podobě v buňkách nebo ve struktuře kopolymerů.



Obrázek 25 Sloupy s vnitřní výplní na principu minimálních ploch, vytištěné z plastu [32]



Obrázek 26 3D tištěný gradientní beton [MIT]

Vnitřní struktura s minimálními plochami se obvykle tiskne z plastu (viz. *Obrázek 25*), pro tisk z betonu lze vytvořit pórovitou strukturu (viz. *Obrázek 26*). Takový tisk ovšem vyžaduje větší přesnost a je časově náročnější. Tato technologie tedy potřebuje zdokonalit, prozatím se proto ke 3D tisku větších konstrukcí používají větší trysky, které umožňují rychlou výstavbu bez tvarových omezení.

Podobné struktury lze tisknout i z kovu (viz. *Obrázek 11*).

Tisk z hlíny a dalších přírodních místních materiálů se může, po zdokonalení technologie, stát jednou z ekonomicky i ekologicky nejvýhodnějších forem stavby domů. 3D tisk z lokálních surovin by mohl hrát klíčovou roli i při výstavbě mimo Zemi, kde by umožnil robotickou výrobu obydlí před přiletem lidí.

Použití technologie 3D tisku při současné stavební výrobě, která je navrhovaná na stavbu klasickými postupy, může zefektivnit výrobu atypických prefabrikátů. Znamenalo by to ušetření materiálu i lidské práce, celkové zlevnění projektu a mohlo by pomoci zvýšit bezpečnost práce.

K plnému využití technologie 3D tisku ve stavebnictví bude nutné plánovat použití technologie od počátku projektu. To znamená začít navrhovat stavby s konstrukčním systémem přizpůsobeným aditivní výrobě. V takovém případě je návrh optimalizován tak, aby využil výhod 3D tisku. Stavba nemusí mít obdelníkové tvary, ale může být tvořena organickými tvary, které optimálně využívají materiál a rozkládají zatížení. Využití organických tvarů a další možnosti vývoje architektury do budoucna jsou popsány v kapitole 2.2.3. *Vývoj architektury*. Je možné využít jiné materiály, optimalizovat vnitřní strukturu, případně do nosné konstrukce zakomponovat přípravu na okna, instalační šachty, drážky na rozvody elektroinstalace a podobně.

V případě, kdy je projekt navržen v souladu s možnostmi technologie, se výstavba aditivní výrobou může technicky i ekonomicky vyrovnat běžným technologiím, nebo je dokonce překonat.

Dlouhodobě lze očekávat nahrazení některých klasických stavebních technologií 3D tiskem. Je to součást digitalizace stavebnictví, která znamená evoluci stavebnictví v přípravě, výrobě i provozu staveb a vede k optimalizaci, udržitelnosti a ekonomické efektivitě. Spolu s rozšířením technologie lze očekávat i zavedení norem pro stavbu 3D tiskem, které dnes prakticky neexistují.

2.1.6 Vliv 3D tisku na životní prostředí

V současnosti velmi diskutovaným společenským problémem je ekologie. Plasty, tedy nepoužívanější tiskový materiál, jsou považovány za jeden největších problémů při ochraně životního prostředí.

Technologie 3D tisku však může mít i pozitivní vliv. Hlavní výhodou je snížení množství produkovaného odpadu a optimalizované využití materiálu. Navíc lze 3D tiskem vyrobit produkty, které by se jinak musely dovážet, což vede ke snížení emisí z dopravy. 3D tiskárny lze využít k výrobě různých typů produktů bez nutnosti vyrábět formu, tedy bez zbytečných odpadů a nákladů.

Stavebnictví je odvětvím, které produkuje velké množství odpadů a CO₂. Podle statistik *Transparency Market Research* celosvětová produkce stavebních odpadů v roce 2018 přesáhla 1 miliardu (10⁹) tun a do roku 2025 by se mohla zdvojnásobit [29]. Téměř polovina materiálů dodávaných na stavbu končí jako stavební odpad.

Technologie 3D tisku nabízí způsob výstavby s minimem odpadů. Umožňuje také lepší využití času a pracovní síly.

Nevýhodou 3D tisku je vysoká energetická náročnost. Při velkoobjemové sériové produkci se tak stává méně efektivní.

Materiály pro tisk se postupně vyvíjí a stávají se méně škodlivými. Používají se filamenty z recyklovaných plastů (např. PET) nebo se do plastů přidávají přírodní suroviny, jako jsou dřevěné piliny nebo korek. Filamenty jako PLA jsou vyrobené z rostlinného materiálu, obvykle obilného škrobu a jsou tedy biologicky odbouratelné. Velký význam pro ekologii má tisk z lokálních přírodních surovin. V takovém případě není nutné materiál přepravovat a energetická náročnost přípravy je také nižší než například u betonu.

Samotná technologie 3D tisku i používané materiály se postupně zdokonalují a v budoucnu budou ekonomicky i ekologicky konkurovat klasickým stavebním technologiím. Dá se očekávat zavedení právních předpisů a regulací vedoucích k omezení negativních vlivů 3D tisku na životní prostředí.

2.2 Kontaktní zateplovací systém

2.2.1 Stavební tepelná technika - teorie

Tepelná technika je část stavební fyziky, která se věnuje prostupu tepla, vlhkosti a vzduchu stavební konstrukcí. Základními právními předpisy jsou Vyhláška č. 268/2009 Sb., o technických požadavcích na stavby a Vyhláška č. 148/2007 Sb., o energetické náročnosti budov.

Základní normy jsou:

ČSN 73 0540-1 Tepelná ochrana budov - Část 1: Terminologie

ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky

ČSN 73 0540-3 Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin

ČSN 73 0540-4 Tepelná ochrana budov - Část 4: Výpočtové metody

Část 1 definuje termíny a veličiny popisující šíření tepla, vlhkosti a vzduchu stavebními materiály a konstrukcemi. Část 2 stanovuje tepelně technické požadavky pro navrhování a ověřování, které zajišťují plnění základních požadavků na stavby. Část 3 stanoví normové, charakteristické a návrhové hodnoty fyzikálních veličin stavebních materiálů a výrobků a návrhové hodnoty veličin vnějšího a vnitřního prostředí pro navrhování a ověřování stavebních konstrukcí z hlediska šíření vlhkosti a jejich tepelné ochrany. Část 4 uvádí výpočtové metody pro veličiny z části 2, určuje za jakých okrajových podmínek se výpočtové hodnocení provádí a co se výpočtem hodnotí.

Další normy týkající se prostupu tepla stavební konstrukcí jsou ČSN EN ISO 6946 Stavební prvky a stavební konstrukce – tepelný odpor a součinitel prostupu tepla – výpočtová metoda, ČSN EN ISO 10456 Stavební materiály a výrobky – tepelně-vlhkostní vlastnosti – tabelové návrhové hodnoty a postupy pro stanovení deklarovaných a návrhových tepelných hodnot, ČSN EN ISO 13370 Tepelné chování budov - Přenos tepla zeminou - Výpočtové metody a ČSN EN ISO 13789 Tepelné chování budov - Měrné tepelné toky prostupem tepla a větráním - Výpočtová metoda.

- **Součinitel prostupu tepla**

Základní tepelně technickou veličinou je **součinitel prostupu tepla** ($U = [W/m^2K]$), který vyjadřuje tepelně – izolační schopnosti konstrukce. Je závislý na tloušťce konstrukce (d) a hodnotě součinitele tepelné vodivosti ($\lambda = [W/mK]$) použitého materiálu ($U = \lambda/d$). Další veličinou je tepelný odpor ($R = [m^2K/W]$), jedná se o obrácenou hodnotu U ($U = 1/R_T$) a je odvozen pro jednorozměrné teplotní pole za předpokladu ustáleného teplotního stavu. Kdy základní tepelný odpor konstrukce (R) je doplněn o odpor při přestupu tepla na vnitřní (R_{si}) a vnější (R_{se}) straně konstrukce. Platí $R_T = R_{si} + R + R_{se}$.

Teplo je druh energie, která se šíří prostředím z místa s vyšší teplotou do místa s nižší teplotou. Jsou 3 způsoby šíření tepla:

- Vedení (kondukce)
- Proudění (konvekce)
- Sálání (radiace)

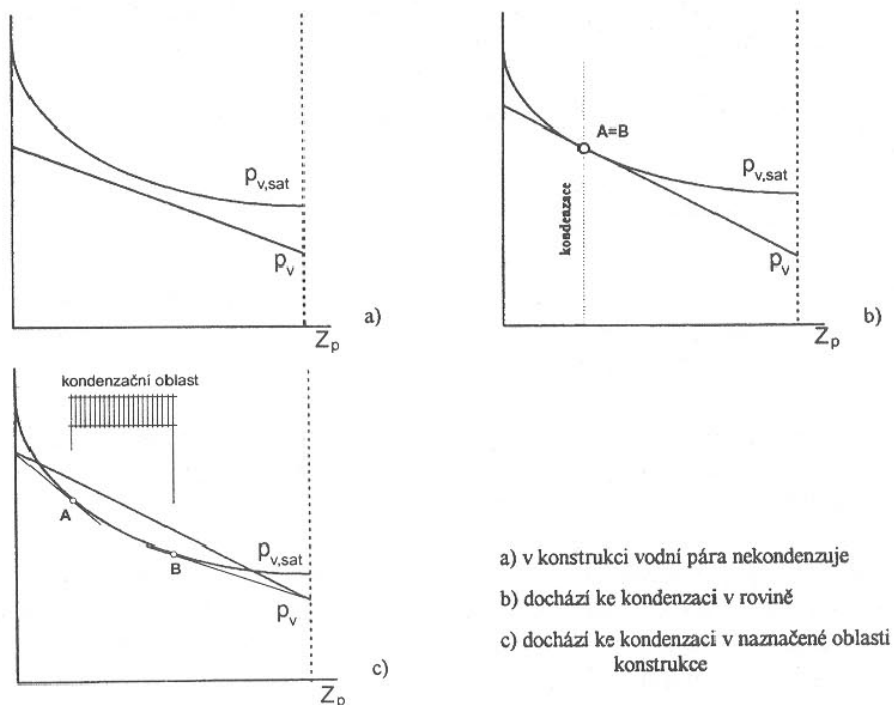
Nejběžnějším způsobem šíření tepla ve stavebních konstrukcích je vedení, ke kterému dochází v pevných látkách. Vedení tepla popisují první a druhý Fourierův zákon. V kapalných a plynných látkách dochází k proudění. Může být přirozené nebo vynucené ventilátorem. Posledním způsobem je sálání, tedy přenos infračerveného záření. Sálavý tok dopadající na těleso je rozdělen, kdy se část odrazí, část pohltí a část propustí.

Uvnitř konstrukce se teplo šíří výhradně vedením, v případě vzduchové vrstvy se uplatní i proudění a sálání. Na povrchu konstrukce dochází k výměně tepla mezi konstrukcí a okolním prostředím. Přestupové jevy probíhají díky proudění vzduchu na povrchu konstrukce a sálání mezi povrchy a uplatňuje se při nich součinitel přestupu tepla (převrácené hodnoty R_{si} a R_{se}).

- **Difuze a kondenzace vodní páry**

Ve stavební konstrukci dále dochází k **difuzi vodní páry**, tedy k pohybu vlhkosti, a to z místa s vyšším parciálním (částečným) tlakem vodní páry do místa s nižším parciálním tlakem ($p_v = [Pa]$). Základními veličinami jsou součinitel difuze vodní páry (δ_p), faktor difuzního odporu (μ , bezrozměrná veličina udávající propustnost materiálu pro vodní páru ve srovnání se vzduchem, platí: $\mu_{\text{vzduchu}} = 1$), ekvivalentní difuzní tloušťka materiálu ($s_d = [m]$) a difuzní odpor konstrukce (Z_p).

Ke kondenzaci vodní páry v konstrukci dochází při dosažení částečného tlaku nasycené vodní páry ($p_{v,sat}$, viz. *Obrázek 27*).



Obrázek 27 Oblast kondenzace vodní páry v konstrukci [61]

V konstrukci by ideálně nemělo docházet ke kondenzaci vodní páry, pokud k ní dochází, je třeba podle normy ČSN 73 0540 dodržet 3 podmínky:

- Nesmí ohrozit funkci konstrukce
- Bilance zkondenzované a vypařené vodní páry musí být aktivní
- Roční množství zkondenzované vodní páry nesmí překročit normové hodnoty

2.2.2 Princip a použití kontaktního zateplování staveb

Zateplování budov je důležitou součástí moderní výstavby. Tepelná izolace zlepšuje tepelně - technické vlastnosti stavby, jejím úkolem je zvýšit tepelný odpor obvodového pláště a zabránit unikání tepla z objektu a tím snižuje spotřebu energie na vytápění i chlazení. Kromě toho by tepelná izolace měla odvádět vlhkost, zabránit kondenzaci vodní páry uvnitř nosné konstrukce, chránit objekt před vnějšími vlivy a má zásadní vliv na estetiku fasády.

Nejběžnějším způsobem tepelné izolace v České republice je vnější kontaktní zateplovací systém [42] (*KZS, nebo VKZS - vnější kontaktní zateplovací systém*), známý též pod anglickou zkratkou **ETICS** (External Thermal Insulation Composite System). Alternativou je bezkontaktní zateplovací systém s provětrávanou mezerou, další možnosti jsou tepelně – izolační omítky, sendvičové zdivo nebo lehký obvodový plášť.

Základním předpisem pro provádění zateplovacích systémů je **ČSN 73 2901** - Provádění vnějších tepelně izolačních kompozitních systémů z roku 2005. Norma vychází ze Zákona č. 22/1997 Sb. a určuje technické požadavky na provádění vnějších tepelně - izolačních kompozitních systémů (ETICS) s tepelnou izolací z pěnového polystyrenu (EPS) nebo z minerální vlny (MW). Další požadavky na výrobky z minerální vlny jsou obsaženy v normě **ČSN EN 13500** Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Vnější tepelně izolační kompozitní systémy (ETICS) z minerální vlny – Specifikace.

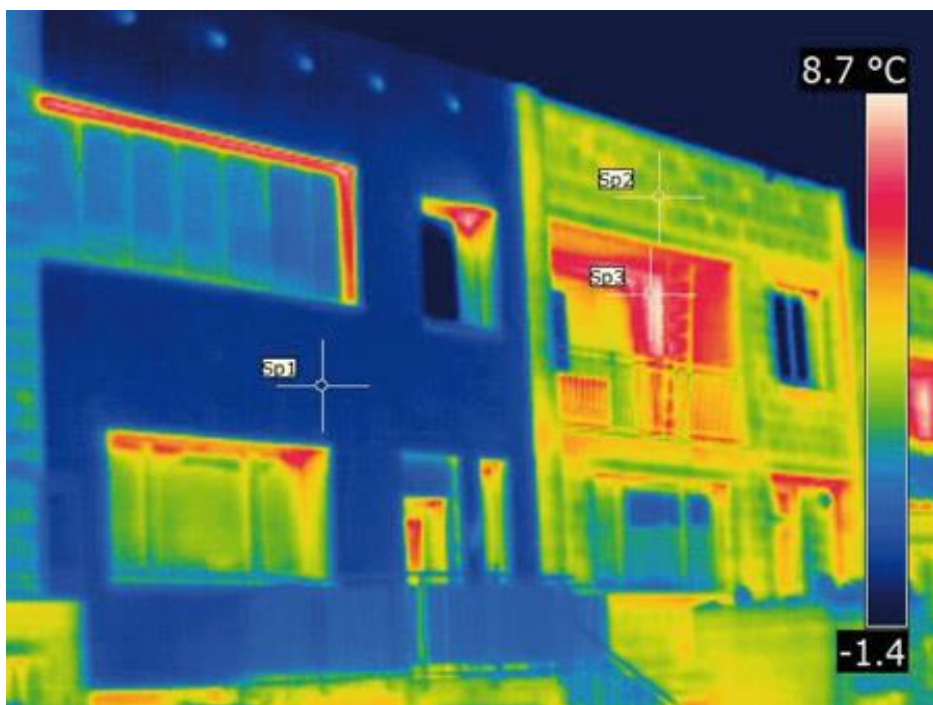
Norma **ČSN 73 0540-2** Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky uvádí hodnoty součinitele prostupu tepla požadované, doporučené a doporučené pro pasivní budovy pro jednotlivé konstrukce, tedy stěny, střechy nebo výplně otvorů.

Tabulka 1 Doporučené normové hodnoty součinitele prostupu tepla – výřez tabulky [37]

| Popis konstrukce | Součinitel prostupu tepla [W/(m ² ·K)] | | |
|----------------------------------|---|---------------------------------|--|
| | Požadované hodnoty $U_{N,20}$ | Doporučené hodnoty $U_{rec,20}$ | Doporučené hodnoty pro pasivní budovy $U_{pas,20}$ |
| Stěna vnější | 0,30 ¹⁾ | těžká: 0,25 lehká: 0,20 | 0,18 až 0,12 |
| Střecha strmá se sklonem nad 45° | 0,30 | 0,20 | 0,18 až 0,12 |

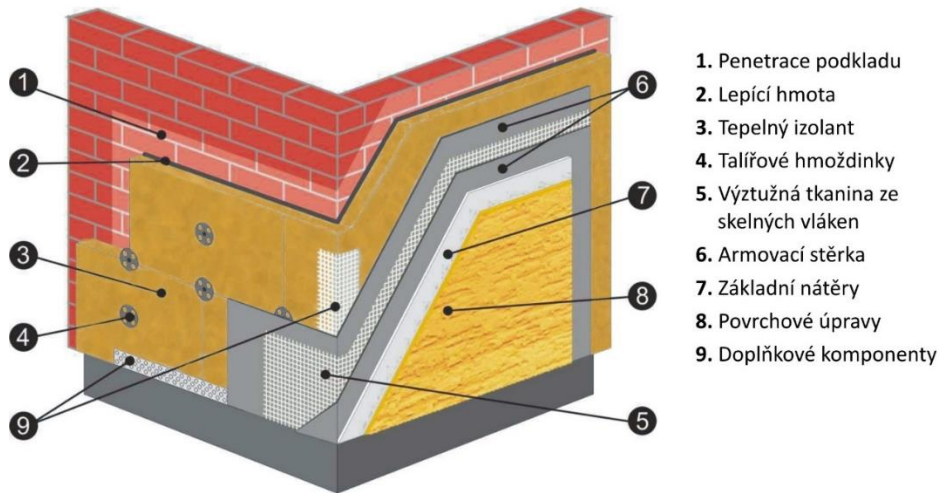
Aby zateplení budovy mělo smysl a bylo efektivní je třeba kromě obvodových stěn zateplit i další části stavby, kterými by mohlo unikat teplo. Je tedy potřeba správně zaizolovat všechny konstrukce:

- Obvodové stěny - polystyren, polyuretan, minerální vlna, pěnové sklo
- Okna - doporučená hodnota U okna $U_{rec,20} = 1,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^{-1}$
- Střechy - deskové nebo stříkané pěnové izolace
- Základy - XPS po obvodu, podsyp z keramzitu
- Tepelné mosty - systémově zabránit vzniku tepelných mostů (isonosníky)



Obrázek 28 Měření tepelných ztrát objektu termokamerou [50]

Složení klasického kontaktního zateplovacího systému:



Obrázek 29 Skladba ETICS [41]

- **Penetrace podkladu**
 - zpevnění podkladu a snížení nasákavosti
- **Lepící hmota**
 - např. minerální lepící tmel na bázi cementu
- **Tepelný izolant**
 - obvykle pěnový polystyren (EPS), desky z minerálních vláken (MW) nebo materiály na bázi polyuretanu (PU) a polyisokyanurátu (PIR)
 - tloušťka dostatečná k zajištění požadované hodnoty součinitele prostupu tepla U
- **Mechanický kotvicí prvek**
 - talířové hmoždinky, šroubovací nebo zatloukácí
 - kotvení k fasádě a zajištění stability
- **Armovací vrstva**
 - výztužná tkanina ze skelných vláken a armovací stěrka
- **Povrchová úprava**
 - omítka jádrová, štuková vápenocementová, tenkovrstvá silikátová, silikonová nebo akrylátová, omítka tepelněizolační, sanační nebo hydrofobizovaná
- **Doplňky a příslušenství**
 - základací profily, hliníkové lišty, spojky, distanční podložky, okenní profily a další systémové prvky

Základní technické operace při provádění KZS jsou:

- příprava podkladu pro ETICS
- lepení desek tepelné izolace
- kotvení desek hmoždinkami
- provádění základní vrstvy
- konečné povrchové úpravy

Splnění normových požadavků na provádění těchto činností má za úkol zajistit, aby fasádní systém plnil svou funkci a podílel se na plnění základních požadavků na obvodové plášti.

Technické požadavky na fasádní systémy:

- Mechanická odolnost a stabilita
 - Musí přenést vlastní tíhu i účinky stálých, nahodilých a mimořádných zatížení a odolat teplotním deformacím
- Vzduchotěsnost
- Ochrana proti povětrnostním vlivům
 - Musí zabránit pronikání vody a vlhkosti
 - Zkondenzovaná vodní pára nesmí ohrozit funkci konstrukce a musí se v průběhu roku vypařit
- Životnost
 - Životnost fasády minimálně 30-50 let
- Tepelná izolace
 - Splnění požadavků na U – součinitel prostupu tepla podle normy k zajištění úspory energie
 - $U_{rec,20} = 0,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$
- Požární bezpečnost
 - Požární odolnost pláště podle norem s ohledem na výšku budovy
- Akustika
 - Zajištění zvukové neprůzvučnosti konstrukce k zajištění normových požadavků na vnitřní hladinu akustického tlaku
- Otvory - Zajištění osvětlení a větrání vnitřních prostor
- Dodržení územního plánu z hlediska vzhledu fasády
- Bezpečnost při užívání

Kromě kontaktního zateplovacího systému jsou i další způsoby provedení vnější tepelné izolace stavby. Nepříliš využívanou možností je i vnitřní kontaktní zateplení, které ovšem nechrání nosnou konstrukci před promrzáním a je tedy použitelná jen ve výjimečných případech.

Každá varianta má určité výhody (+) i nevýhody (-). Všechny varianty jsou časově, technicky i finančně poměrně náročné. Kontaktní zateplovací systém je obvykle nejlevnější a technicky nejjednodušší. Mezi nevýhody patří nutnost stavět lešení, pracnost způsobená množstvím vrstev nebo vznik odpadů.

Další způsoby vnějšího zateplení staveb:

1. Provětrávané fasády

- Jedná se o bezkontaktní zateplovací systém
- Rošt (dřevo, hliník) je vyplněn izolantem, následuje provětrávaná vzduchová mezera
- Fasádu tvoří pohledové desky (dřevo, plast, kov, sklovláknobeton)

+ *odvádí vlhkost z objektu, různé varianty fasádního obkladu*

- *vyšší nároky na přípravu a organizaci práce*

2. Lehký obvodový plášť – modulová fasáda

- Prefabrikovaný modul přes celou výšku podlaží osazovaný vcelku na stavební konstrukci

+ *rychlá montáž, kontrola kvality při výrobě, dobré tepelněizolační a akustické vlastnosti, nabízí architektonické možnosti*

- *materiálová náročnost, nároky na přepravu a skladování*

3. Rastrové fasády

- Nosný rastr (sloupky a příčníky), do kterého se vkládají výplňové prvky (tepelněizolační, pohledové prosklené)

+ *umožňuje složité tvary, prosklené fasády, systémové řešení*

- *náročnější montáž, kompletace při montáži*

4. Sendvičové fasády

- Prefabrikovaný panel tvořící obvodový plášť
- Dvě vrstvy profilovaného plechu uzavírající tepelnou izolaci (EPS, MW, PU, PIR)

+ *jednoduchá a rychlá montáž, levné*

2.2.3 Vývoj architektury

Technologické inovace ve stavebnictví přináší architektům nové možnosti v navrhování staveb. Software jim může pomoci s optimalizací projektu díky generativnímu nebo parametrickému navrhování a nové technologie v čele s 3D tiskem umožní jejich dílo realizovat za ekonomicky přijatelných podmínek.

Stále častěji se v současné architektuře objevují zakřivené konstrukce. Architekti je projektují s využitím počítačového navrhování a technologie NURBS (*Non-uniform rational basis spline*, matematický model používaný v počítačové grafice pro generování a reprezentování křivek a ploch).

Výroba zakřivených konstrukcí je obvykle náročnější a nákladnější než u rovných konstrukcí, ovšem při použití technologie 3D tisku tento problém odpadá. S optimalizací může pomoci „panelizace“ fasády – viz. *Obrázek 51*.

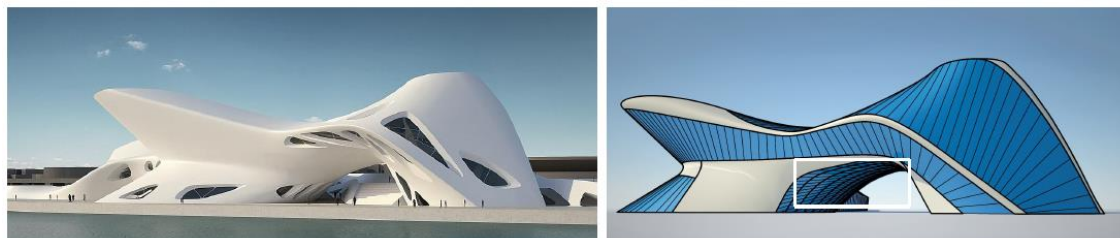
V architektuře se objevují takzvané **Freeforms**, tedy tvary s volnou geometrií. Geometrie fasády má kromě estetiky vliv i na náročnost výroby a výsledné vlastnosti. Stupeň zakřivení lze odvodit z **Gaussovy křivosti**:

$$K = k_1 \cdot k_2 = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2}$$

Gaussova křivost K – vychází z hlavních poloměrů křivosti R_1 a R_2 (největší a nejmenší ze všech poloměrů křivosti v daném bodě, leží v rovinách k sobě kolmých).

Podle Gaussovy křivosti se dělí plochy na:

- s nulovou křivostí – např. povrch válce
- s kladnou křivostí – např. povrch koule
- se zápornou křivostí – např. hyperbolický paraboloid
- s dvojitou křivostí – např. povrch anuloidu



Obrázek 30 Část konstrukce se zápornou Gaussovou křivostí [63]

Při stavbě objektu se obvykle snažíme o maximální efektivitu, rychlost a ekonomičnost při splnění funkčních a estetických požadavků. V minulosti se tak stavělo převážně z lokálních materiálů a s co nejefektivnějšími tvary (viz. *Obrázek 32*). Pak se objevily standardizované výrobky, jako cihly nebo panely a začala se požívat pravoúhlá geometrie (viz. *Obrázek 31*).



Obrázek 32 Stavba z místních materiálů [ice-camp.at] *Obrázek 31 Panelová výstavba [panelaky.info]*

Současné stavebnictví potýká s nárůstem cen materiálů a nedostatkem pracovní síly. Tyto problémy může pomoci vyřešit technologie 3D tisku, která umožňuje při stavební činnosti ušetřit materiál a vytvářet libovolné tvary, které není možné vytvořit jinou technologií. Moderní architektura často čerpá inspiraci v přírodě, kde má materiál vyšší cenu než tvar a musí se efektivně využívat. Naproti tomu v lidské výstavbě je vytvoření netypického tvaru obvykle dražší a náročnější než samotný materiál.

Moderní architektura se proto snaží využít organické tvary, nové materiály a technologie, které umožní jejich výstavbu.



Obrázek 33 Návrh stavby vytvořené technologií 3D tisku z plastu ABS vyztuženého karbonem [64]

Organické tvary vytváří zajímavé architektonické objekty a mohou být i ekologické a šetřit materiál. Na druhou stranu nové technologie zatím nejsou ošetřeny z hlediska stavebních norem. Nejsou dostatečně vyzkoušeny, mohou se v nich objevovat problémy s kondenzací vodní páry uvnitř konstrukce, která způsobuje narušení konstrukce nebo růst plísní. Dalšími problémy mohou být tepelné mosty nebo statika.



Obrázek 34 Návrh konstrukce vytvořené aditivní výrobou [65]



Obrázek 35 Organický design [3dprintingindustry.com]

Organické tvary se často objevují ve futuristických vizích architektů. Jedná se o vzdálenou budoucnost, ale pokud bude současný vývoj technologií a ekonomiky pokračovat, tak může jednou nastat. Tyto projekty naplno využívají možnosti aditivní výroby. Kladou důraz také na ekologii, nové technologie a udržitelnost stavebnictví budoucnosti.



Obrázek 36 Mrakodrap budoucnosti [Retro futuristic]

2.2.4 Zateplování zakřivených fasád budov

Zateplování zakřivených konstrukcí je technicky náročnější a dražší než u pravoúhlých fasád. Použití tuhých deskových izolantů je možné, vyžaduje ovšem práci navíc. Desky je potřeba ohýbat, případně rozřezat, přičemž vzniká odpad, a následně pracně nalepit. Stavba lešení je také složitá, v případě dvojité zakřivených fasád prakticky nemožná. Alternativou je zde použití zdvižné plošiny.



Obrázek 37 Tepelná izolace [Wetherby Building Systems Ltd]

Zateplení obloukových konstrukcí lze provádět například z tužených minerálních desek s kolmo orientovanými vlákny. Ohýbat lze i desky z kamenné vlny.



Další možností jsou stříkané pěnové izolace. Souvislou vrstvu lze vytvořit třeba z *chytré izolační pěny ICYNENE*.

Obrázek 38 Aplikace stříkané pěnové izolace [ICYNENE]

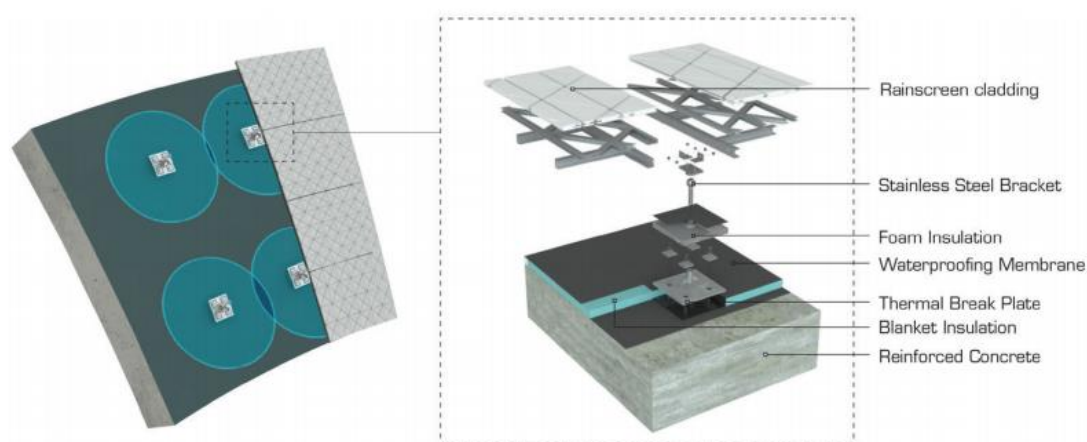
Ještě složitější variantu představují **dvojitě zakřivené fasády** (tvary jako koule, anuloid, paraboloid, elipsoid, nebo takzvané *Freeforms*), u kterých je velký problém postavit lešení a nejefektivnější způsob izolace představují fóliové izolace nebo stříkané pěnové izolace. Používají se polyuretanové pěny s uzavřenou buněčnou strukturou, které obvykle vyžadují dodatečnou povrchovou úpravu, obvykle ve formě fasády s provětrávanou mezerou. Montáž předsazené konstrukce zvyšuje pracnost a náklady.

Často bývá nosná konstrukce i tepelně izolační vrstva rovná a zakřivená je pouze předsazená fasáda.



Obrázek 39 Heydar Aliyev Centre v Baku [44]

Příkladem stavby s dvojitě zakřivenou fasádou je *Heydar Aliyev Centre* v Baku (viz. *Obrázek 39*) v Ázerbájdžánu. Tepelná izolace stavby je řešena izolační fólií a pěnovou izolací (viz. *Obrázek 40*). Fasádu tvoří dvojitě zakřivené keramické desky.



Obrázek 40 Detail fasády Heydar Aliyev Centre [45]



Montáž tepelné izolace i fasádního obkladu probíhala za pomoci zdvižné montážní plošiny (viz. *Obrázek 41*).

Obrázek 41 Montáž fasády Heydar Aliyev Centre [46]

Velké množství ze současných staveb s výrazně zakřivenou fasádou se nachází v teplejších klimatických oblastech, jako jihovýchodní Asie nebo Blízký východ. To přináší jiné nároky na tepelnou izolaci z hlediska vysokých teplot a v případě Asie i vysoké vlhkosti vzduchu. Často je zde používán bezkontaktní zateplovací systém s provětrávanou vzduchovou mezerou odvádějící vlhkost a světlym obkladem k odražení slunečního záření.



Dalším prvkem moderní architektury jsou velké prosklené plochy. Zakřivená dvojskla mohou mít součinitel prostupu tepla $U = 1,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$, trojskla až $U = 0,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$

Obrázek 42 Zakřivené skleněné výplně otvorů [47]

Jednoduše zakřivené stavební konstrukce jsou běžné, například ve formě sloupů, a lze je jednoduše zateplovat pomocí izolačních desek z minerální vlny nebo fenolické pěny. Běžné jsou i stříkané izolace nebo ohýbané sklo.

U dvojitě zakřivených tvarů je takové řešení také možné, ale je pracnější a náročnější. Příkladem použití tuhé izolace na dvojitě zakřivenou fasádu je **Tančící dům** v Praze (viz. *Obrázek 43*). U této stavby z roku 1996 byla tuhá tepelná izolace dodatečně nalepena na mírně zakřivené fasádní železobetonové panely.



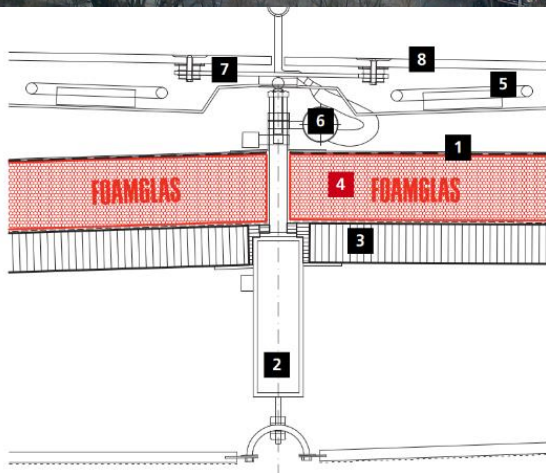
Obrázek 43 Tančící dům v Praze [49]

Častěji se dvojitě zakřivené fasády zateplují bezkontaktním zateplovacím systémem, kdy je tepelná izolace tvořena stříkanou pěnovou izolací nebo izolační fólií. Stříkaná izolace je nejrychlejší a nejjednodušší způsob zateplování, ale není na ní možné nanášet omítku. Proto je nutné fasádu řešit jako předsazenou konstrukci, což navyšuje náklady, zvyšuje pracnost a může vést k vytvoření tepelných mostů.

Nosná konstrukce i tepelná izolace mohou být rovinné a výsledný zakřivený tvar je tvořen předsazenou konstrukcí. Příkladem je muzeum Art museum Kunsthhaus v rakouském Grazu (viz. *Obrázek 44*). Tento způsob usnadňuje a zlevňuje provádění tepelné izolace při zachování zakřivené fasády.



Obrázek 44 Art museum Kunsthhaus Graz [Foamglas]



Obrázek 45 Detail fasády Art museum Kunsthhaus Graz [Foamglas]

Nevýhodou je vznik tepelných mostů – viz. *Obrázek 45*. Další komplikace mohou vzniknout u detailů, jako jsou okna a podobně.

3 Tepelně – izolační panel

Cílem této části práce je návrh konceptu tepelně – izolačního panelu, jehož obálka bude vytvořena technologií 3D tisku, výroba prototypu panelu a provedení zkoušek jeho tepelně – izolačních vlastností.

3.1 Základní koncept panelu

Záměrem je pomocí technologie 3D tisku vytvořit panel, který bude sloužit ke kontaktnímu zateplování staveb. Jednalo by se o efektivní alternativu určenou ke kontaktnímu zateplování zakřivených fasád.

Základním předpokladem je splnění požadavků na kontaktní zateplovací systémy.

Základní technické požadavky na KZS:

- *Mechanická odolnost a stabilita*
- *Vzduchotěsnost*
- *Ochrana proti pronikání vody*
- *Životnost*
- *Tepelná izolace*
- *Požární bezpečnost*
- *Akustika*
- *Bezpečnost při užívání*

Dalším předpokladem je prefabrikace pomocí technologie 3D tisku. Využití aditivní výroby v jiných odvětvích ukazuje, že technologii lze výhodně použít pro menší produkce a pro individuální úpravu jednotlivých částí. Z toho vyplývá, že použití pro KZS na velkých jednolitých plochách by nebylo efektivní, ale na menších projektech s členitou, zakřivenou fasádou by použití 3D tisku mohlo být vhodným řešením. Navíc umožňuje téměř absolutní architektonickou volnost, která umožní přizpůsobit se vývoji architektury. Lze tvořit unikátní tvary a upravovat vnitřní strukturu nebo pohledovost.

Technologií aditivní výroby lze již vytisknout téměř celou stavbu, přičemž tepelně – izolační vlastnosti by mohlo být v budoucnosti možné implementovat přímo do nosné konstrukce využitím vhodných materiálů a jejich vnitřní struktury. Rozšíření tisku celých budov je však podmíněno zdokonalením technologie a zvýšením dostupnosti 3D tiskáren. Do té doby lze 3D tisk z dostupných materiálů využít k tvorbě dílčích částí stavby.

S vývojem nového architektonického tvarosloví přichází komplexnější tvary stavebních konstrukcí, jejichž zateplování může být komplikované (viz. 2.2.4 *Zateplování zakřivených fasád budov*).

Technologií 3D tisku je možné vytvořit zateplovací systém přesně uzpůsobený tvaru budovy a dalším potřebám architekta.

Tepelně – izolační panel vyrobený technologií 3D tisku by měl splňovat:

- Základní požadavky na KZS
- Snadná, rychlá a ekonomická výroba
- Přizpůsobitelné libovolnému tvaru fasády
- Architektonická volnost
- Možnost výroby přímo na stavbě
- Rychlá montáž

Navrhovaný tepelně – izolační panel by sloužil jako alternativa ke klasickým způsobům zateplování. Aplikoval by se jako kontaktní zateplovací systém na běžné nosné konstrukce, tedy zdivo nebo železobeton. Předpokladem je využití dostupné technologie a běžných plastů.

Hlavní výhoda panelu spočívá v možnosti použití na zakřivené i dvojité zakřivené fasády. Panel lze libovolně upravovat, což umožňuje vytvořit architektonické prvky nebo, ve spojení se stavební připraveností, usnadnit montáž. Materiály je možné při 3D tisku kombinovat, takže pohledovou stranu lze vizuálně upravovat podle potřeby.

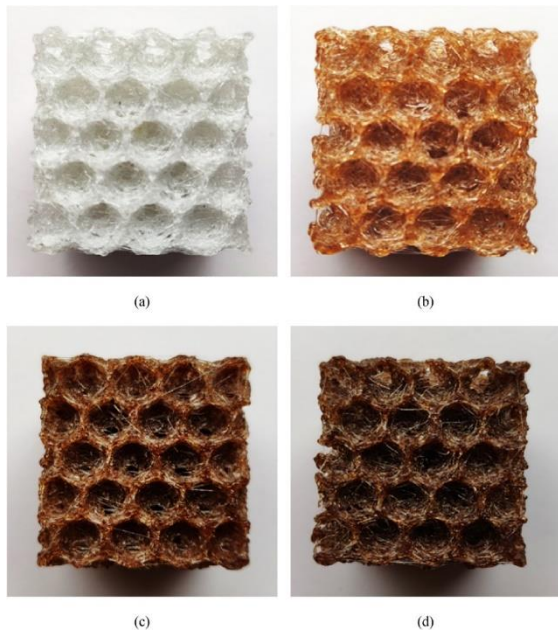
Výrobky vytvořené technologií 3D tisku mají horší kvalitu povrchu a mohou být mechanicky méně odolné. Proto jsou v některých případech nutné dodatečné úpravy. Jednotlivé části lze slepit vteřinovým lepidlem, namáhané části můžeme vyztužit armaturou z kovových profilů, další možné operace jsou tryskání, tmelení nebo omílání. Vlastnosti panelu se dají dále vylepšit pomocí povrchové úpravy.

Existuje řada technologií povrchové úpravy plastů, některé však nemusí být vhodné pro 3D tištěné výrobky vzhledem ke specifickému povrchu a také tloušťce panelu. Alternativou je aplikace fólie, sítě nebo stěrky na hotovou fasádu.

Technologie na úpravu povrchu plastů:

- Lakování
 - vytvoření tenkého organického povrchu, který plní estetickou a ochrannou funkci
- Broušení
 - Základní úprava povrchu pomocí broušení a následného kytování
- Barvení
 - Nanášení barvy pomocí spreje nebo štětce
- Pokovování
 - Vytvoření kovového povlaku pro zlepšení mechanických vlastností, změnu vzhledu a zajištění neprostupnosti
- Kaširování
 - Vrstva z jiného materiálu nalepená suchým kaširováním, kaširováním pomocí vosku nebo teplým kaširováním
- Pvlakování
 - Vytvoření povlaku s ochrannou nebo estetickou funkcí pomocí laminování, plátování, žárového stříkání nebo tavení prášku
- Dezénování
 - Vytvoření plastického reliéfu pomocí dezénovacího válce, případně chemicky
- Leštění
 - Zlepšení kvality povrchu mechanickým způsobem, rozpouštědly nebo plamenem
- Sametování
 - Vytvoření textilního povrchu pomocí lepidla a vláken
- Potiskování
 - Úprava povrchu nanášením barev

Tepelně – izolační panel je možné technologií 3D tisku vyrobit jako jednotný celek. V takovém případě bychom využili schopnost technologie 3D tisku vytvořit pórovitou vnitřní strukturu. Použitím materiálů s nízkou tepelnou vodivostí získáme panel, který je lehký, dokáže odolávat nárazům a slouží k izolaci proti hluku i úniku tepla.



Pokusy prováděné na *CICECO - Aveiro Institute of Materials and Department of Chemistry, University of Aveiro* ukazují možnosti 3D tisku polyuretanové pěny s příměsí korku [53].

Tepelná vodivost vzorků se pohybuje kolem hodnoty $\lambda = 0,045 \text{ W/m.K}$.

Obrázek 46 Vzorky vytištěné technologií 3D tisku z PU pěny a korku [53]

Materiálem s ještě lepšími vlastnostmi je aerogel. Má velmi dobré tepelně – izolační vlastnosti: $\lambda = 0,033 - 0,039 \text{ W/m.K}$ [54], je lehký, pevný a odolný proti požáru. Dá se vyrábět technologií 3D tisku pomocí mikroskopického vytvrzování.

Nevýhodou těchto materiálů je horší dostupnost, vyšší cena, pomalejší výroba a náročnější technologie.

Proto je v současnosti praktičtější variantou využít technologii 3D tisku pouze k výrobě dutého panelu, který bude následně vyplněn tepelně – izolačním materiálem. Výhodou takového panelu je rychlá a levná výroba a dostupnost potřebných materiálů a technologií. Nevýhodou je nutnost dodatečného plnění a možnost vzniku tepelných mostů ve spárách mezi jednotlivými panely a v plastové obálce, která má horší tepelně – izolační vlastnosti než výplň.

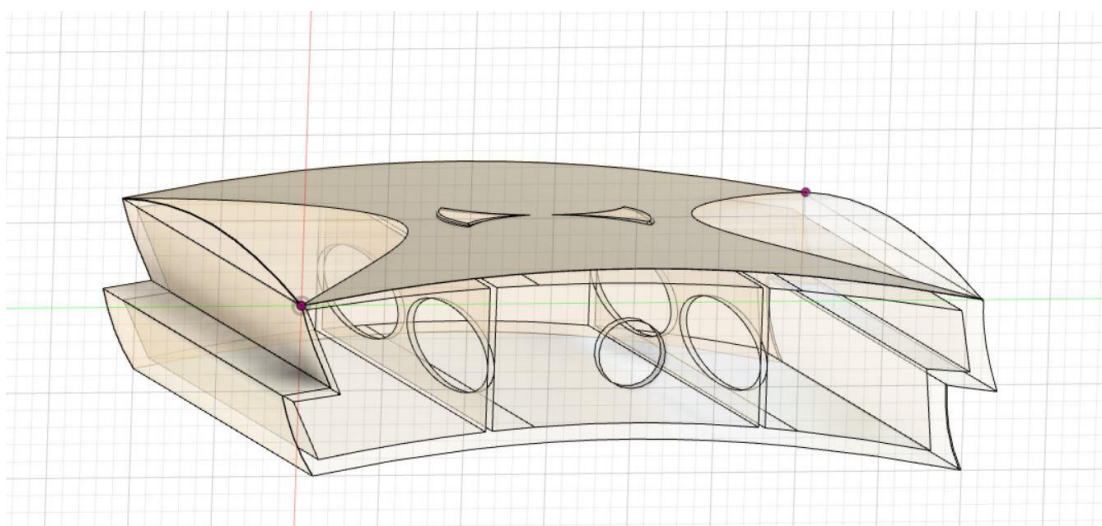
Popis dutého panelu a vhodné materiály a technologie pro jeho výrobu jsou popsány v následující kapitole 3.1.1 *Technologie a materiály*.

Tepelně – izolační panel je prefabrikovaný výrobek zabudovaný do konstrukce, který ovlivňuje parametry konstrukce. Jedná se tedy o **stavební výrobek**. Požadavky na stavební výrobky udává zákon č. 22/2013 Sb. Musí mimo jiné plnit svou funkci po celou dobu životnosti a být bezpečný pro užívání.

3.1.1 Technologie a materiály

Nejrozšířenější technologií pro tisk z plastů je FDM (Fused Deposition Modeling). Tato technologie je vhodná k výrobě panelu, je dostupná a nabízí dostatečnou kvalitu. Menší panel lze vytvořit na běžné stolní 3D tiskárně využívající FDM (k výrobě prototypu byla použita domácí 3D tiskárna Prusa i3 Mk3), ale jsme limitováni velikostí pracovního prostoru. Maximální rozměr panelu je pak obvykle 20 – 30 cm.

Dutý panel není homogenní, kdy výplň má lepší tepelně – izolační vlastnosti než vnější plastová schránka. To mimo jiné znamená, že v místě spáry a v případném vnitřním vyztužení mohou vznikat tepelné mosty. Tyto tepelné mosty lze redukovat snížením tloušťky stěny panelu a zalomením spáry a jejím utěsněním například PU lepidlem. Dalším rozhodujícím faktorem je velikost panelu. Platí, čím větší panel tím méně spar. Nevýhodou velkého panelu může být náročnější manipulace a doprava a větší nároky na mechanickou odolnost. Výhodou je méně tepelných mostů nebo rychlejší montáž.



Obrázek 47 Model panelu "A" [autor]

Na obrázku 47 je CAD model dutého panelu připraveného k 3D tisku. Jedná se o zakřivený panel s tloušťkou stěny 1,6 mm, se zalomenou hranou pro přesnější napojení a vylehčeným vyztužením k redukcí tepelného mostu. Otvorem na boku bude panel naplněn tepelně – izolačním materiálem. Rozměry panelu jsou 20 x 20 cm s výškou 5 cm. Počítá se s výrobou na domácí stolní tiskárně metodou FDM z plastu.

Větší panely lze vyrobit pomocí velkoformátových 3D tiskáren. Vhodná je velkoformátová přenosná 3D tiskárna **KamerMaker** (viz. str. 29), která umožňuje tisk objektů až do velikosti 2,0 x 2,0 x 3,5 m. Její výhodou je i možnost přivést ji přímo na

stavenišťe, kde lze panely vytisknout bez nutnosti další přepravy. Navíc využívá plastový materiál ve formě pelet, který je levnější než klasické filamenty ve formě struny.



Obrázek 48 3D tiskárna KamerMaker - vstupní materiál [51]

Tloušťka stěn musí zajistit dostatečnou pevnost, tuhost a odolnost panelu, současně musí být tenká, aby nezpůsobovala tepelné mosty. Pro běžné plasty odhadují vhodnou tloušťku stěny panelu na 1 – 2 mm.

Technologie FDM má poměrně vysokou přesnost. Výška vrstvy bývá kolem 0,05 – 0,25 mm s přesností 0,02 mm a má zásadní vliv na kvalitu povrchu. Polohová přesnost závisí i na šířce trysky, která může být kolem 0,4 mm, a může být přibližně 0,05 – 0,1 mm.


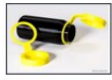








Dalším důležitým krokem je výběr materiálu. Technologie FDM nabízí velké množství plastových filamentů. Většina běžných materiálů se nehodí pro použití v exteriéru. Často mají velkou teplotní roztažnost a na slunci se deformují, například PLA, další materiály pod vlivem UV záření degradují nebo mění barvu, jako například ABS.

Navrhované plasty mají nízkou propustnost infračerveného záření.

Materiál i výrobky musí být skladovány tak, aby nedošlo ke změně vlastností. Podmínky skladování jsou dány hlavně teplotou, vlhkostí a zatížením.

| |  ABS Learn More |  Flexible Learn More |  PLA Learn More |  HIPS Learn More |  PETG Learn More |  Nylon Learn More |  Carbon Fiber Filled Learn More |
|---|--|---|--|---|---|--|--|
| Compare Selected Show All | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ultimate Strength |  40 MPa |  26 - 43 MPa |  65 MPa |  32 MPa |  53 MPa |  40 - 85 MPa |  45 - 48 MPa |
| Stiffness |  5 / 10 |  1 / 10 |  7.5 / 10 |  10 / 10 |  5 / 10 |  5 / 10 |  10 / 10 |
| Durability |  8 / 10 |  9 / 10 |  4 / 10 |  7 / 10 |  8 / 10 |  10 / 10 |  3 / 10 |
| Maximum Service Temperature | 98 °C | 60 - 74 °C | 52 °C | 100 °C | 73 °C | 80 - 95 °C | 52 °C |
| Coefficient of Thermal Expansion | 90 µm/m·°C | 157 µm/m·°C | 68 µm/m·°C | 80 µm/m·°C | 60 µm/m·°C | 95 µm/m·°C | 57.5 µm/m·°C |
| Density | 1.04 g/cm ³ | 1.19 - 1.23 g/cm ³ | 1.24 g/cm ³ | 1.03 - 1.04 g/cm ³ | 1.23 g/cm ³ | 1.06 - 1.14 g/cm ³ | 1.3 g/cm ³ |
| Price (per kg) | \$10 - \$40 | \$30 - \$70 | \$10 - \$40 | \$24 - \$32 | \$20 - \$60 | \$25 - \$65 | \$30 - \$80 |
| Printability |  8 / 10 |  6 / 10 |  9 / 10 |  6 / 10 |  9 / 10 |  8 / 10 |  8 / 10 |
| Extruder Temperature | 220 - 250 °C | 225 - 245 °C | 190 - 220 °C | 230 - 245 °C | 230 - 250 °C | 220 - 270 °C | 200 - 230 °C |
| Bed temperature | 95 - 110 °C | 45 - 60 °C | 45 - 60 °C | 100 - 115 °C | 75 - 90 °C | 70 - 90 °C | 45 - 60 °C |
| Heated Bed | Required | Optional | Optional | Required | Required | Required | Optional |
| Recommended Build Surfaces | Kapton Tape, ABS Slurry | PEI, Painter's Tape | Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI | Glass Plate, Glue Stick, Kapton Tape | Glue Stick, Painter's Tape | Glue Stick, PEI | Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI |
| Other Hardware Requirements | Heated Bed, Enclosure Recommended | Part Cooling Fan | Part Cooling Fan | Heated Bed, Enclosure Recommended | Heated Bed, Part Cooling Fan | Heated Bed, Enclosure Recommended, May Require All Metal Hotend | Part Cooling Fan |
| Flexible | — | ✓ | — | — | — | ✓ | — |
| Elastic | — | ✓ | — | — | — | — | — |
| Impact Resistant | ✓ | — | — | ✓ | — | ✓ | — |
| Soft | — | ✓ | — | — | — | — | — |
| Composite | — | — | — | — | — | — | ✓ |
| UV Resistant | — | — | — | — | — | — | — |
| Water Resistant | — | — | — | — | ✓ | — | — |
| Dissolvable | — | — | — | ✓ | — | — | — |
| Heat Resistant | ✓ | — | — | ✓ | — | ✓ | — |
| Chemically Resistant | — | — | — | — | ✓ | — | — |
| Fatigue Resistant | — | ✓ | — | — | ✓ | ✓ | — |
| Heated Bed Not Required | — | ✓ | ✓ | — | — | — | ✓ |
| | ABS | Flexible | PLA | HIPS | PETG | Nylon | Carbon Fiber Filled |

Tabulka 2 Vlastnosti plastových filamentů [56, upraveno autorem]

| |  ASA Learn More |  Polycarbonate Learn More |  Polypropylene Learn More |  Metal Filled Learn More |  Wood Filled Learn More |  PVA Learn More |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Compare Selected Show All | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ultimate Strength |  55 MPa |  72 MPa |  32 MPa |  20 - 30 MPa |  46 MPa |  78 MPa |
| Stiffness |  5 / 10 |  6 / 10 |  4 / 10 |  10 / 10 |  8 / 10 |  3 / 10 |
| Durability |  10 / 10 |  10 / 10 |  9 / 10 |  4 / 10 |  3 / 10 |  7 / 10 |
| Maximum Service Temperature | 95 °C | 121 °C | 100 °C | 52 °C | 52 °C | 75 °C |
| Coefficient of Thermal Expansion | 98 µm/m·°C | 69 µm/m·°C | 150 µm/m·°C | 33.75 µm/m·°C | 30.5 µm/m·°C | 85 µm/m·°C |
| Density | 1.07 g/cm ³ | 1.2 g/cm ³ | 0.9 g/cm ³ | 2 - 4 g/cm ³ | 1.15 - 1.25 g/cm ³ | 1.23 g/cm ³ |
| Price (per kg) | \$38 - \$40 | \$40 - \$75 | \$60 - \$120 | \$50 - \$120 | \$25 - \$55 | \$40 - \$110 |
| Printability |  7 / 10 |  6 / 10 |  4 / 10 |  7 / 10 |  8 / 10 |  5 / 10 |
| Extruder Temperature | 235 - 255 °C | 260 - 310 °C | 220 - 250 °C | 190 - 220 °C | 190 - 220 °C | 185 - 200 °C |
| Bed temperature | 90 - 110 °C | 80 - 120 °C | 85 - 100 °C | 45 - 60 °C | 45 - 60 °C | 45 - 60 °C |
| Heated Bed | Required | Required | Required | Optional | Optional | Required |
| Recommended Build Surfaces | Glue Stick, PEI | PEI, Commercial Adhesive, Glue Stick | Packing Tape, Polypropylene Sheet | Painter's Tape, Glue Stick, PEI | Painter's Tape, Glue Stick, PEI | PEI, Painter's Tape |
| Other Hardware Requirements | Heated Bed | Heated Bed, Enclosure Recommended, All Metal Hotend | Heated Bed, Enclosure Recommended, Part Cooling Fan | Wear Resistant or Stainless Steel Nozzle, Part Cooling Fan | Part Cooling Fan | Heated Bed, Part Cooling Fan |
| Flexible | - | - | ✓ | - | - | ✓ |
| Elastic | - | - | - | - | - | - |
| Impact Resistant | ✓ | ✓ | - | - | - | - |
| Soft | - | - | ✓ | - | - | ✓ |
| Composite | - | - | - | ✓ | ✓ | - |
| UV Resistant | ✓ | - | - | - | - | - |
| Water Resistant | - | - | ✓ | - | - | - |
| Dissolvable | - | - | - | - | - | ✓ |
| Heat Resistant | ✓ | ✓ | ✓ | - | - | - |
| Chemically Resistant | - | - | - | - | - | - |
| Fatigue Resistant | - | ✓ | ✓ | - | - | ✓ |
| Heated Bed Not Required | - | - | - | ✓ | ✓ | - |
| | ASA | Polycarbonate | Polypropylene | Metal Filled | Wood Filled | PVA |

Tabulka 3 Vlastnosti plastových filamentů [56, upraveno autorem]

Z nejpoužívanějších filamentů pro 3D tisk (ABS, ASA, PLA, PETG) jsou pro venkovní použití určeny materiály **ASA** a **PETG** [57]. Tyto filamenty dokážou odolat venkovnímu prostředí. Pod vlivem teplotních změn a UV záření nemění zásadně tvar, fyzikální vlastnosti ani vzhled.

Pro účely výroby prototypu lze použít i jiné, dostupnější materiály, například **PLA**.

ASA - Akrylonitril-styren-akryl

Filament určený pro 3D tiskárny založené na FDM. Kvalitní termoplast odolný proti povětrnostním podmínkám.

| | |
|--------------------------|---|
| Výhody: | mechanická odolnost, odolnost proti vysokým i nízkým teplotám, odolnost proti UV záření, voděodolná, nemění barvu |
| Nevýhody: | vyšší cena, nutná vyšší teplota extrudéru, při tavení může uvolňovat nebezpečné plyny |
| Tepelná vodivost: | $\lambda = 0,17 \text{ W/m.K}$ (přibližná hodnota při pokojové teplotě) |
| Hustota: | 1,07 g/cm ³ |
| Teplota tavení: | 220 – 250 °C |
| Cena: | 699 Kč / 0,85 kg (cena na shop.prusa3d.com v 12 / 2019) |



Obrázek 49 Barevné varianty filamentu ASA [3DXTech]

PETG – Polyetyléntereftalát – modifikovaný glykol

Modifikovaná kopolymerová verze běžného PET (lahve, obaly). Obvykle průhledný.

| | |
|--------------------------|---|
| Výhody: | odolnost proti vysokým i nízkým teplotám, odolný proti nárazům, dobrá adheze mezi vrstvami, lze recyklovat, odolný vůči kyselinám |
| Nevýhody: | obtížnější tisk |
| Tepelná vodivost: | $\lambda = 0,21 \text{ W/m.K}$ (přibližná hodnota při pokojové teplotě) |
| Hustota: | 1,35 g/cm ³ |
| Teplota tavení: | 210 – 235 °C |
| Cena: | 599 Kč / 1 kg (cena na shop.prusa3d.com v 12 / 2019) |

Vylepšená varianta je CPE (kopolyester) s vyšší odolností nebo PET – G/CF s karbonovým vláknem pro větší tuhost a odolnost.

PLA – Polylactic acid – kyselina polymléčná

PLA je jedním z nejpoužívanějších a nejuniverzálnějších filamentů pro 3D tisk metodou FDM. Je vyráběn z kukuřičného nebo bramborového škrobu či z cukrové třtiny a je biologicky plně odbouratelný.

| | |
|--------------------------|--|
| Výhody: | univerzální materiál, dostupnost, tvrdý a odolný, biologicky odbouratelný |
| Nevýhody: | rozpuštěný v hydroxidu sodném, obtížnější odstranění podpůrných prvků, teplotní roztažnost |
| Tepelná vodivost: | $\lambda = 0,25 \text{ W/m.K}$ (přibližná hodnota při pokojové teplotě) |
| Hustota: | 1,25 g/cm ³ |
| Teplota tavení: | 185 – 235 °C |
| Cena: | 549 Kč / 1 kg (cena na shop.prusa3d.com v 12 / 2019) |

Dalším důležitým bodem je výběr výplňového materiálu. Rozhodujícími faktory jsou tepelná vodivost, snadnost plnění a objemová stabilita.

Lze tedy použít stříkané nebo sypané izolace. Nejběžnější jsou stříkané pěny na bázi **polyuretanu**, které dokonale vyplní dutý prostor a dosahují výborných tepelně – izolačních vlastností, součinitel tepelné vodivosti od $\lambda = 0,033 \text{ W/m.K}$, objemová hmotnost od 30 kg/m^3 . Nevýhodou je, že jsou expanzivní a mohly by deformovat panel. Další možností jsou stříkané pěny z izokyanátu a pryskyřice, které ovšem také výrazně expandují, součinitel tepelné vodivosti může být až $\lambda = 0,021 \text{ W/m.K}$.

Problém s expanzí lze vyřešit použitím foukané/sypané izolace. Příkladem je tepelná izolace z celulózy, jejíž udávaná tepelná vodivost je $\lambda = 0,04 \text{ W/m.K}$. Běžnější jsou izolace z kuličkového polystyrenu (EPS). Mají dobré izolační vlastnosti, jsou lehké, nevýhodou je sedání. Příkladem je **STYROBALL** [59], což je tepelná izolace z pěnového, stabilizovaného expandovaného polystyrenu, obohacená o mikrovlnáčko.



Obrázek 50 STYROBALL [59]

Styroball lze volně sypat nebo vyplnění provést strojem na foukání izolace. Mezi deklarované vlastnosti dále patří dobré akustické vlastnosti, zdravotní nezávadnost a nevyžaduje parozábranu. Podle výrobce je i prostorově stabilní a tedy nesedá. Objemová hmotnost je 27 kg/m^3 a součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,037 \text{ W/m.K}$.

Plast pro 3D tisk stavebních prvků pro externí použití s nejlepšími vlastnostmi je **ASA**, ale vzhledem k vyšší ceně (při stejném objemu o 8% dražší než PETG) a horší dostupnosti nemusí být nejvýhodnější volbou. **PETG** je dobrá možnost, výhodou jsou dobré vlastnosti a recyklovatelnost, nevýhodou náročnější tisk.

Jako nejvhodnější výplňový tepelně – izolační materiál jsem vybral nízkoexpanzní **PUR pěnu**. Má velmi dobré tepelně – izolační vlastnosti, dokonale vyplní dutinu a po vytvrnutí je objemově stálá. Tuhnutí trvá přibližně 24 hodin, v této době dochází k expanzi a je nutné panely zajistit proti deformaci.

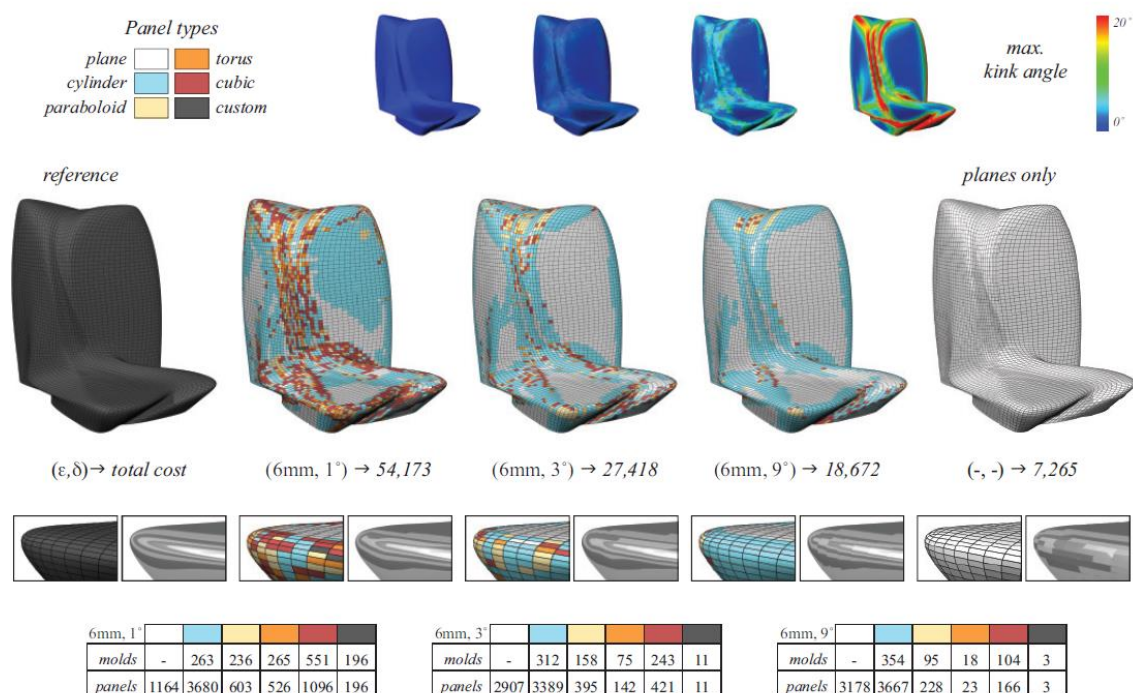
3.1.2 Proces výroby a montáže

○ Příprava

Navrhované tepelně – izolační panely jsou prefabrikované, takže je velmi důležitá část přípravy stavby. Je nutné zkontrolovat skutečný stav stávajících konstrukcí a zajistit potřebnou stavební připravenost. Hlavní je stav konstrukce, na kterou se panel bude montovat. Povrch musí být hladký, čistý a zakřivení musí odpovídat panelu. Rovinnost podobná jako u ETICS, tedy 10 mm/m pro lepené systémy podle normy ČSN 73 2901.

Návrh panelu v CAD programu a *sliceru* je dále popsán v kapitole 3.2.1 *Virtuální návrh modelu*. Návrh musí odpovídat skutečnému stavu nosné konstrukce a splňovat všechny požadované parametry (odolnost, tepelná izolace, estetika...).

Důležité je správně rozdělit zakřivenou fasádu na jednotlivé panely. Panelizací povrchů takzvané free form architektury se zabývá práce „*Paneling Architectural Freeform Surfaces*“ [62], která navrhuje algoritmus určený k optimalizaci počtu a tvaru panelů na fasádě.



Obrázek 51 Proces panelizace [62]

Pro běžné technologie výroby je podstatné minimalizovat počet různých panelů, pro 3D tisk, kde není nutné tvořit formu, nehraje tvar roli. Jde o počet a velikost panelů a určení jejich přesné pozice v systému.

Po vytvoření návrhu všech panelů v CAD programu je třeba vytvořit vrstevnatou strukturu ve *sliceru*. Následuje vytvoření G – kódu a důležité je i správné nastavení tiskárny. Návrh je třeba provést s ohledem na vybrané materiály.

Velikost panelu musí odpovídat velikosti tiskového prostoru použité 3D tiskárny. Kvalitu je možné dále ovlivnit tloušťkou vrstvy, kdy tenčí vrstvou docílíme vyšší kvality povrchu, ale prodloužíme tím dobu tisku. Tlustší vrstva může vytvořit schodišťový efekt, ale zkrátí se doba tisku.

Projekční připravenost je klíčová součást projektu. Kromě stavební dokumentace a CAD modelu panelu by měla zahrnovat i kontrolní a zkušební plán, pokyny k manipulaci a technologický postup montáže. Je třeba mít k dispozici potřebnou techniku a lidské zdroje.

○ **Výroba**

Když je vše řádně připraveno, následuje samotná výroba panelů. Daly by se použít průmyslové 3D tiskárny využívající technologii FDM nebo i domácí tiskárna. Pro výrobu prototypu byla použita malá stolní tiskárna Prusa i3 Mk3. Panely lze vyrábět přímo na stavbě s využitím mobilní 3D tiskárny, například velkoformátové KameMaker. Umístěním tiskárny na staveniště odpadá nutnost přepravy, při které hrozí poškození panelů a vznikají další náklady. Pokud to podmínky dovolují, jedná se obvykle o výhodnější možnost. Na druhou stranu 3D tiskárna umístěná v továrně zajišťuje neměnné výrobní podmínky a dává lepší možnost kontroly kvality.

Kontrola kvality musí probíhat podle předem nastavených kritérií, podobným způsobem jako u jiných prefabrikovaných dílů. Jednotlivé panely musí splňovat požadavky na přesnost, aby do sebe dobře pasovaly. Důležitá je shoda skutečného stavu podkladové konstrukce i vlastních panelů s projektem. 3D tiskárny mohou vykazovat jistou chybovost, při špatném nastavení se tisk nezdaří. Dalším nebezpečím je kroucení plastů, které může nastat mimo jiné při změně teploty.

Obálky panelů vytvořené 3D tiskem je dále potřeba naplnit tepelně – izolačním materiálem. Sypaný materiál (EPS) lze plnit ručně nebo pomocí stroje na foukané izolace (hrozí slehnutí foukané izolace). Stříkané pěnové izolace (PUR) lze rovněž plnit ručně nebo strojně. Při větším počtu panelů je vhodná automatizace plnění. Je nutné brát ohled na objem a pevnost panelu, expanzní pěnou plníme podle pokynů výrobce do cca 70% objemu. Během doby expandování a tuhnutí pěny je třeba zajistit panely proti změně tvaru a objemu. Přebytečná expandovaná pěna vyteče plnicím otvorem a po ztuhnutí ji odřízneme. Plnicí otvor nakonec uzavřeme přilepením víčka.

○ Montáž

Pokud panely nebyly vyrobeny na staveništi, je nutné při jejich přepravě a skladování zajistit, aby nedošlo k poškození. Manipulace po staveništi může být vzhledem k nízké hmotnosti panelů ruční. Před montáží je nutné zkontrolovat stav panelů a připravenost nosné konstrukce, na kterou budeme panely instalovat.

Montáž bude probíhat ručně z lešení nebo zdvižné plošiny (viz. *Obrázek 52*). Panely je možné kotvit mechanicky, kdy lze na panelu připravit otvory pro kotvy. Mechanické kotvení je vhodné spíše pro velké panely nebo jako pojistné kotvení.

Vhodnější je panely lepit. Lze použít například konstrukční **PU lepidlo** (viz. *Obrázek 51*), které odolá UV záření i změnám teplot a lepí plasty i beton. Vhodné je nízkoexpanzní lepidlo se snadnou a rychlou aplikací, které je určeno k lepení plastů i betonu.

PU lepidlo navíc přispívá k tepelné izolaci konstrukce a lze jím lepit i panely k sobě, což vede k vyšší tuhosti a redukuje tepelné mosty ve spárách mezi panely. Ke slepení panelů lze použít i běžné vteřinové lepidlo nebo PU lepidlo ve formě spreje, kde nehrozí deformace panelů v důsledku expanze lepidla.



Obrázek 52 Zdvižná montážní plošina [Plošiny-Perutka]



Jednosložkové polyuretanové lepidlo, v průběhu vytvrzování bez zápachu. Odolává UV záření, vodě (odolnost D4), teplotám, ozonu, rozpouštědlům, zředěným chemikáliím. Lepidlo nevykazuje smrštění, naopak mírně pění.

Vhodné pro lepení dřeva, kamene, betonu, pevných plastů, polyuretanové a polystyrenové pěny, skelné tkaniny, plechů, kovových stavebních prvků na savé i nesavé podklady. Vhodné pro stavbu lodí a lehkých letadel, na chemické kotvení ve stavebních konstrukcích. Vytváří velmi pevný spoj.

Odolává UV záření, nesmršťuje se naopak mírně pění.

Doba zpracování: 15 min.
Vulkanizace: 2 mm za 24 hodin
Pevnost v tahu Nmm²: 10
Smrštění: 0%
Aplikační teplota: +5 až +45°C
Tepelná odolnost: -40 až +80°C
Doba skladování: 12 měs.

Obrázek 53 Ilustrační obrázek univerzálního konstrukčního PU lepidla [Mastersil]

V současné době je ruční montáž prakticky nevyhnutelná, do budoucna je možné uvažovat i o automatizované montáži s využitím jeřábů nebo i dronů. Automatizace montáže panelů by zřejmě vyžadovala dodatečnou stavební přípravu na nosné konstrukci.

Pomocí velkoformátové 3D tiskárny lze vytvořit panely o rozměrech i více než 2 x 2 m, k manipulaci s nimi je nutné použít jeřáb.



Obrázek 54 Velkoformátové panely vytištěné na tiskárně KamerMaker [Fabbaloo, DUS Architects]

Tepelně – izolační panely vyráběné technologií 3D tisku by měly nabízet rychlou montáž, podobně jako další prefabrikované fasády, například rastrové fasády nebo lehké obvodové pláště. Důraz bude kladen na důkladnou přípravu a vysokou přesnost montáže. Jakákoli chyba výrobku nebo montáže může narušit funkci fasády.

3.1.3 Možnosti využití

Z hlediska výroby panelů pomocí 3D tisku je třeba si uvědomit, že výhoda aditivní výroby spočívá v jednoduché prototypizaci a variabilitě, není však vhodná pro velkosériovou výrobu stejného výrobku. Použití je proto vhodné pro netypické a nepravidelné fasády, kdy každý jednotlivý panel bude mít jiný tvar.

V této kapitole uvádím několik příkladů, kde lze panely vytvořené technologií 3D tisku použít v oblastech spojených se stavebnictvím.

Jednou z možností je využití 3D tisku k výrobě komplexních tvarů, které nelze vytvořit jinými způsoby (viz. *Obrázek 55*).



Obrázek 55 3D vytištěná struktura "digital grotesque II" [Designboom]

Technologii 3D tisku lze použít k vytvoření uměleckých děl, soch nebo kamenických prací na konstrukci. Praktické využití spočívá v restaurování historických budov. Stavbu lze naskenovat a poškozené části nahradit vytištěnými. Další možností je levnější imitace historické stavby nebo výroba náročných uměleckých instalací.



Obrázek 56 Vizualizace moderní ornamentální fasády [66]

Tímto způsobem je možné kompletně nahradit poškozené části stavby nebo vytvořit zcela novou stavbu. Do fasádních panelů (viz. *Obrázek 57*) by navíc bylo možné přidat tepelně – izolační výplň, což by usnadnilo zateplování historických objektů.



Obrázek 57 Ornamet vytvořený technologií 3D tisku [66]



Náročná je i výroba dvojité zakřivených konstrukcí, které se v moderní architektuře často vyskytují. Technologii 3D tisku lze využít k efektivní výrobě takových panelů – *Obrázky 58 a 59.*

Obrázek 58 Nordpark Cable Railway, Rakousko [67, Zaha Hadid Architects]

Fasáda na *obrázku 59* je vytvořena z dvojité zakřivených panelů [68]. Jejich návrh a výroba klasickými metodami zabraly více než rok. Využití technologie 3D tisku by vedlo ke zkrácení této doby a zjednodušení celého procesu.



Obrázek 59 Obchodní dům Neiman Marcus, USA [68]

Technologií 3D tisku lze vytvářet přímo panely nebo pouze bedně. V roce 2017 byl tento způsob použit při výrobě zakřivených betonových panelů pro londýnské metro (viz. *Obrázek 60*). Technologii 3D tisku byly vytvořeny formy, které byly následně vylity betonem. Tato metoda se ukázala jako rychlejší a levnější než běžné způsoby a bylo při ní vyprodukováno méně odpadů [69].

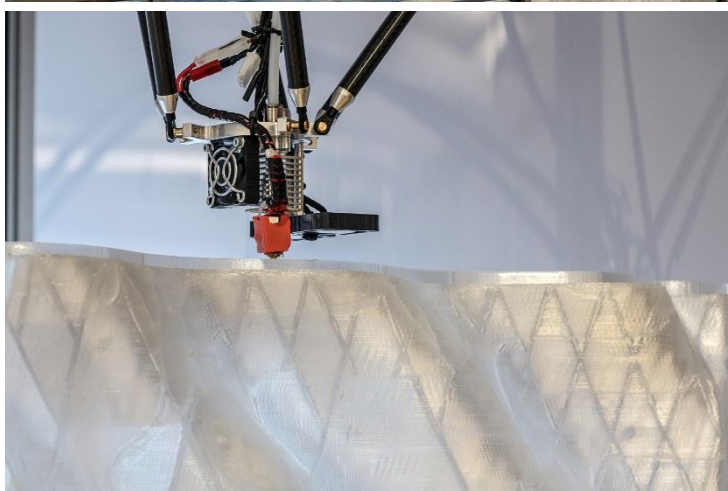


Obrázek 60 Betonové panely v londýnském metru [69].

Panely vytvořené technologií mohou mít další specifické vlastnosti. Mají vysokou odolnost proti nárazům a povrch může imitovat pohledovost betonu, dřeva, kovu nebo skla. Pro Deutsches Museum v Mnichově byla navržena zakřivená průhledná fasáda vyrobená technologií 3D tisku. Fasáda má plnit funkci tepelné izolace a jsou v ní implementované prvky jako ventilace nebo stínění.



Obrázek 61 Deutsches Museum v Mnichově [70]



Obrázek 62 Detail fasády vytvářené 3D tiskem [70]

3.2 Vytvoření prototypu panelu

Cílem praktické části je vyrobit prototyp tepelně – izolačního panelu pomocí dostupné technologie 3D tisku a změřit jeho tepelně – izolační vlastnosti.

Základní tvar panelu může být téměř libovolný, ale jsme omezeni velikostí tiskárny. Prototyp bude vytvořen technologií FDM na 3D tiskárně **Prusa i3 Mk3** s tiskovým prostorem 210 x 250 x 210 mm. Klíčovým bodem návrhu panelu je výběr vhodného materiálu. Ten musí být dostupný, dobře zpracovatelný a vhodný pro venkovní použití.

Na základě provedené rešerše jsem za nejvhodnější materiálem zvolil termoplast ASA. Tento filament nabízí dobré mechanické vlastnosti, relativně nízkou tepelnou vodivost a také odolnost proti změnám teploty a UV záření.

Nevýhodou ASA je vyšší cena a horší dostupnost. Zásilka filamentu ASA byla kvůli chybě a nekomunikaci přepravní společnosti doručena s dvoutýdenním zpožděním, takže vzhledem k časové náročnosti tisku a omezeným časovým možnostem musely být všechny vytvořené panely vytištěny z alternativních materiálů, konkrétně PLA a PET (viz. 3.2.2 *Tisk panelů*).

Proces výroby a měření panelu:

1. Návrh CAD modelu
2. Výroba panelu na 3D tiskárně
3. Plnění panelu tepelně – izolačním materiálem
4. Změření součinitele tepelné vodivosti λ
5. Vyhodnocení výsledků

ASA Filament

Acrylonitrile-Styrene-Acrylate (ASA) polymers are amorphous and have mechanical properties similar to those of ABS plastics. However, the ASA properties are far less affected by outdoor weathering. The outstanding weather resistance abilities of ASA is due to the acrylic ester elastomer. ASA parts have good chemical and heat resistance, and high impact strength, even at low temperatures. Typical ASA applications are buiding/construction, automotive and recreation parts.

The 3D4MAKERS ASA Filament contains unique properties because the material has an extremely constant diameter and roundness. On top of that the ASA filament does not come into contact with water during the production process and is directly packaged in a vacuum packaging. These properties make the 3D4MAKERS ASA Filament particularly suitable for FDM and FFF 3D printers. The material has an excellent adhesion between layers which results in great improvement of the impact resistance, strength, durability and the printing process.

| PHYSICAL | CONDITIONS | TEST METHOD | TYPICAL VALUE |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------|------------------------|
| Density | | ASTM D792 | 1.05 g/cm ³ |
| Melt volume-Flow Rate (MVR) | | ASTM D1238 | 12 g/10 min |
| Molding Shrinkage-Flow | 3.20 mm | ASTM D955 | 0.40 to 0.70 % |
| MECHANICAL | | | |
| Tensile modulus | 3.20 mm | ASTM D638 | 2080 MPa |
| Tensile Strength | Yield, 3.20 mm | ASTM D638 | 47.1 MPa |
| Tensile Elongation | Yield, 3.20 mm | ASTM D638 | > 6.0% |
| | Break, 3.20 mm | ASTM D638 | 25% |
| Flexural Modulus | 3.20 mm | ASTM D790 | 2210 MPa |
| Flexural Strength | 3.20 mm | ASTM D790 | 75.5 MPa |
| IMPACT | | | |
| Notched Impact Strength | 23 °C, 3.20 mm | ASTM D256 | 180 L/m |
| THERMAL | | | |
| Heat Deflection Temperature | | ASTM D648 | |
| | 0.45 MPa, Unannealed, 6.40 mm | | 96.0 °C |
| | 1.8 MPa, Unannealed, 6.40 mm | | 86.0 °C |
| Vicat Softening Temperature | | ASTM D1525 | 95.0 °C |
| HARDNESS | | | |
| Rockwell Hardness (R-Scale) | | ASTM D785 | 103 |
| FLAMMABILITY | | | |
| Flame Rating | 1.6 mm | UL 94 | HB |
| | 3.1 mm | UL 94 | HB |

Info@3d4makers.com | www.3d4makers.com | Waarderweg 56, 2031 BP Haarlem | The Netherlands



1/2

Tabulka 4 Technický list filamentu ASA [3D4Makers.com]

Samotný proces výroby panelu probíhá podle 2.1.2.4 *Proces 3D tisku*.

3.2.1 Virtuální návrh modelu

Prvním krokem při tvorbě panelu byl výběr vhodného CAD softwaru. Kritériem výběru byla uživatelská náročnost tvorby modelu, možnosti návrhu a dostupnost licence. Na základě těchto kritérií jsem zvolil **Autodesk® Fusion 360**.

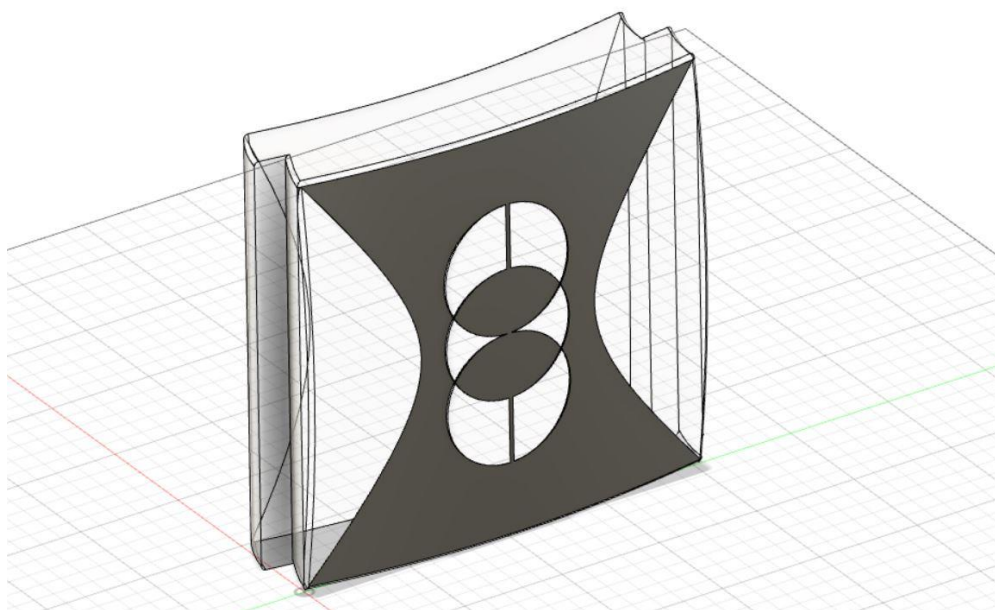
Pomocí CAD softwaru jsem vytvořil několik virtuálních modelů panelu. Zásadním omezením byla velikost 3D tiskárny, která limitovala velikost pracovního prostoru na 25 x 21 x 21 cm (Prusa i3 Mk3). Vlastní tvar měl za cíl ukázat možnosti použití panelu na zakřivené fasádě. Vzniklo proto několik variant s jednoduchým i dvojitým zakřivením.

Pro účely měření tepelně technických vlastností panelu bylo potřeba vytvořit rovné vzorky o rozměrech 30 x 30 cm. Vzhledem k omezené velikosti tiskárny byly měřené vzorky poskládány ze 4 menších panelů. Tloušťka panelu byla zvolena na **5 cm**.

V rámci modelování panelu jsem vyzkoušel různé designy, způsoby zalomení a možnosti napojení panelů, navrhnul jsem plné panely i duté panely s vyztužením. Je možné vytvořit architektonické designové prvky, vzduchové mezery nebo přípravu pro napojení dalších konstrukcí.

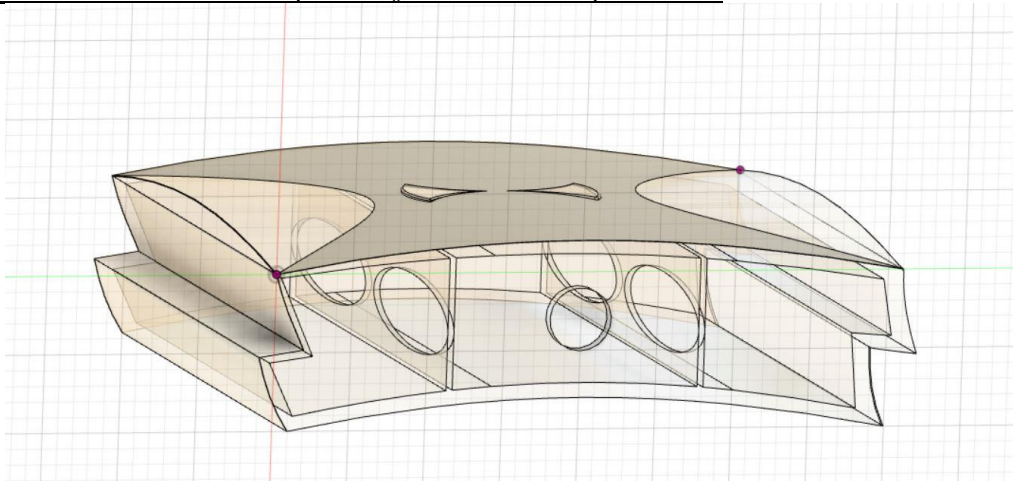
Následující obrázky ukazují několik návrhů provedených pomocí *Fusion 360*:

1. Plná verze zakřiveného panelu „A“ s jednoduchým zalomením



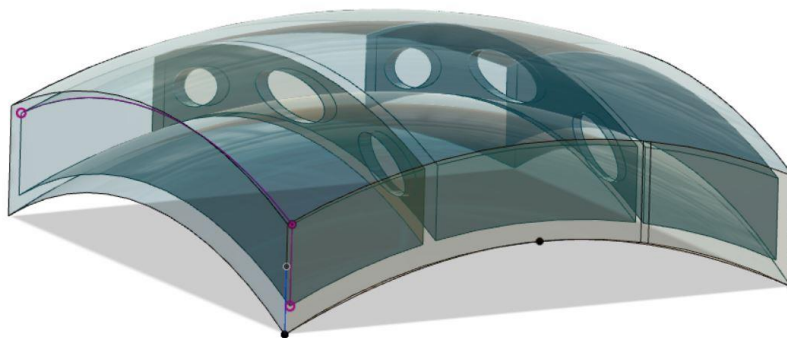
Obrázek 63 Model panelu - varianta A1 [autor]

2. Dutá verze zakřiveného panelu „A“ s vnitřním vyztužením



Obrázek 64 Model panelu - varianta A2 [autor]

3. Dutá varianta dvojitě zakřiveného panelu „B“ s vnitřním vyztužením



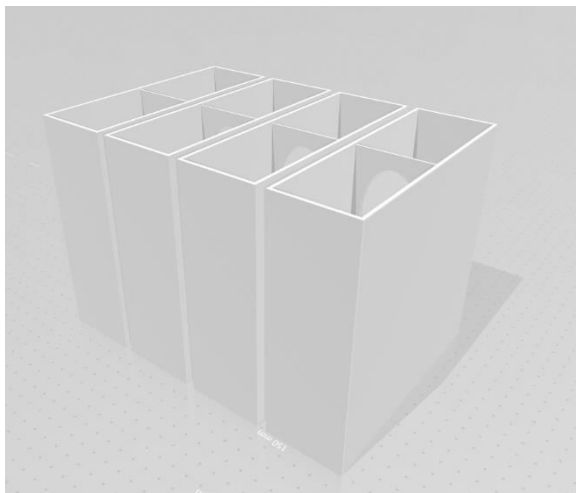
Obrázek 65 Model panelu - varianta B1 [autor]

První vytvořený panel označíme „A“. Na tomto panelu jsem zkoušel možnosti modelovacího softwaru. Panel je jednoduše zakřivený, boční hrany jsou zalomené kvůli lepšímu napojení a minimalizaci tepelného mostu. Dále jsem zkoušel možné designové prvky a varianty zalomení. Vznikla jak plná, tak dutá varianta s vnitřním vyztužením.

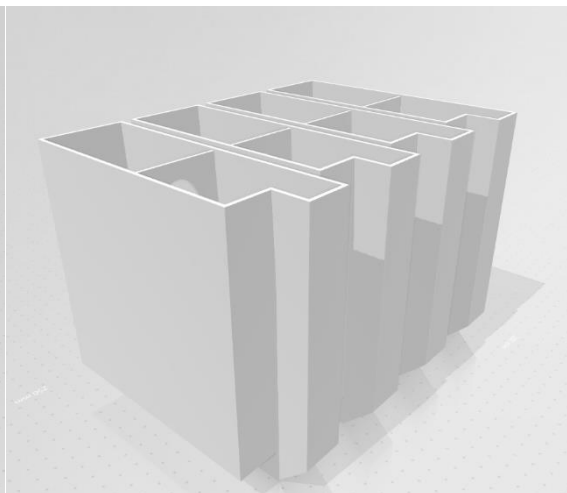
Panel „B“ je dvojitě zakřivený, jedná se o část povrchu koule. Panel je dutý s vylehčeným vnitřním vyztužením, které má zajistit dostatečnou pevnost a tuhost panelu a současně umožnit plnění a zamezit vzniku tepelných mostů.

Kromě zakřivených panelů bylo potřeba vytvořit ploché panely určené ke změření součinitele tepelné vodivosti panelu. Měřicí přístroj (viz. kapitola 3.3 Zkoušky panelu) měří vzorky o rozměrech 30 x 30 cm. Vzhledem k limitované velikosti použité 3D tiskárny musely být tyto vzorky sestavené ze 4 menších panelů.

K měření jsou určeny panely „C“ a „D“. Panel „C“ je složen ze 4 kvádrů o rozměrech 15,0 x 15,0 cm a výšce 5,0 cm. Jednotlivé panely tvořící vzorek „D“ mají zalomené hrany a je možné je složit do požadovaného tvaru 30,0 x 30,0 x 5,0 cm. Cílem je posoudit vliv rovné nebo zalomené spáry na tepelný odpor panelu.

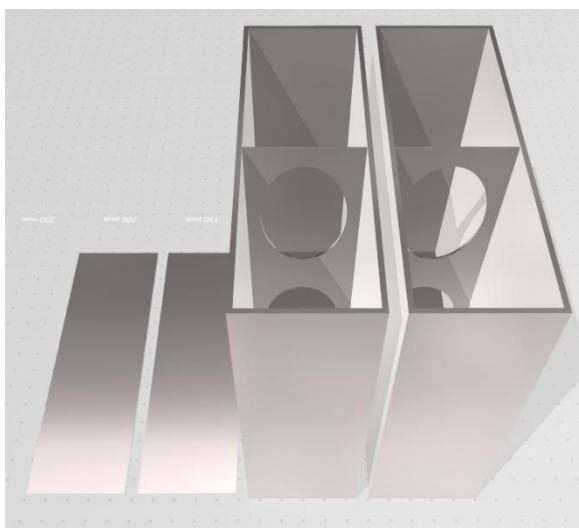


Obrázek 67 Vizualizace sestavy panelů C pro měření součinitele tepelné vodivosti [autor]

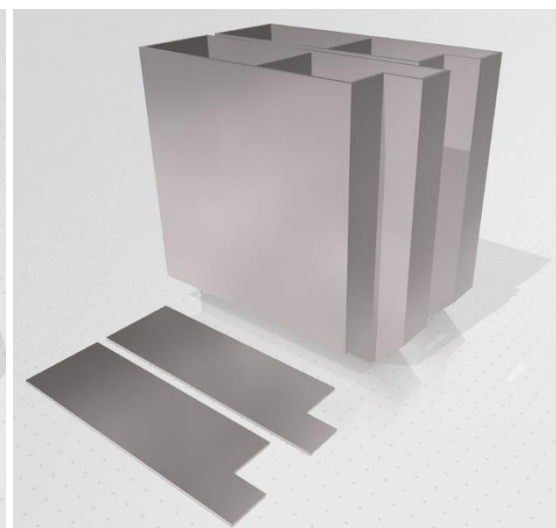


Obrázek 66 Vizualizace sestavy panelů D se zalomenou spárou [autor]

Panely jsou opět duté s vylehčeným vyztužením, horní strana chybí, kvůli snadnému vyplnění a jednoduššímu tisku. Výztuž nechává prostor pro víčko, které lze po vyplnění přilepit a panel tak uzavřít.



Obrázek 69 Vizualizace sestavy panelů C s víčky [autor]

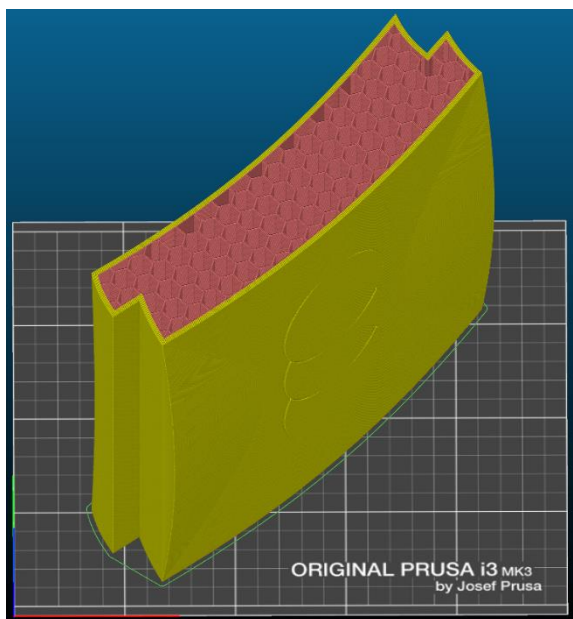


Obrázek 68 Vizualizace sestavy panelů D s víčky [autor]

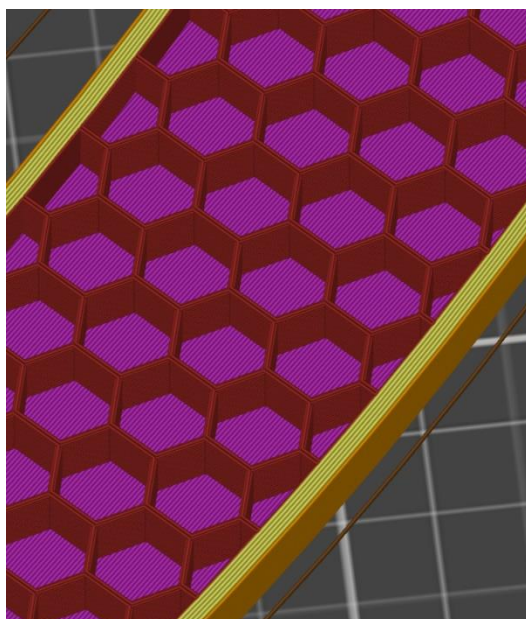
Modely byly uloženy do formátu *.stl* a exportovány do *slíceru*, kde následuje jejich rozdělení na vrstvy a finální příprava k 3D tisku.

Zvoleným softwarem byl **Slic3r PE** (*Slic3r Prusa Edition, verze 1.41.0, Copyright Prusa Research*). Ve sliceru se vytváří finální podoba panelu, lze vybrat strukturu a hustotu vnitřní výplně, tloušťku stěny a nastavit vlastnosti tiskárny.

Tato nastavení mohou výrazně ovlivnit výsledné vlastnosti. Hustší struktura zajistí vyšší pevnost a tuhost, ale může zhoršit tepelně – izolační vlastnosti panelu. Během návrhu jsem pracoval s hustotou výplně 5–10 %. Dalším nastavením je vzor výplně, například *Grid*, *Honeycomb* nebo *Gyroid*. Objekt je rozdělen na vrstvy tvořené tenkou strunou a na základě vložených okrajových podmínek je vygenerován *G-kód* obsahující instrukce pro 3D tiskárnu.



Obrázek 71 Panel A ve Slic3r PE [autor]

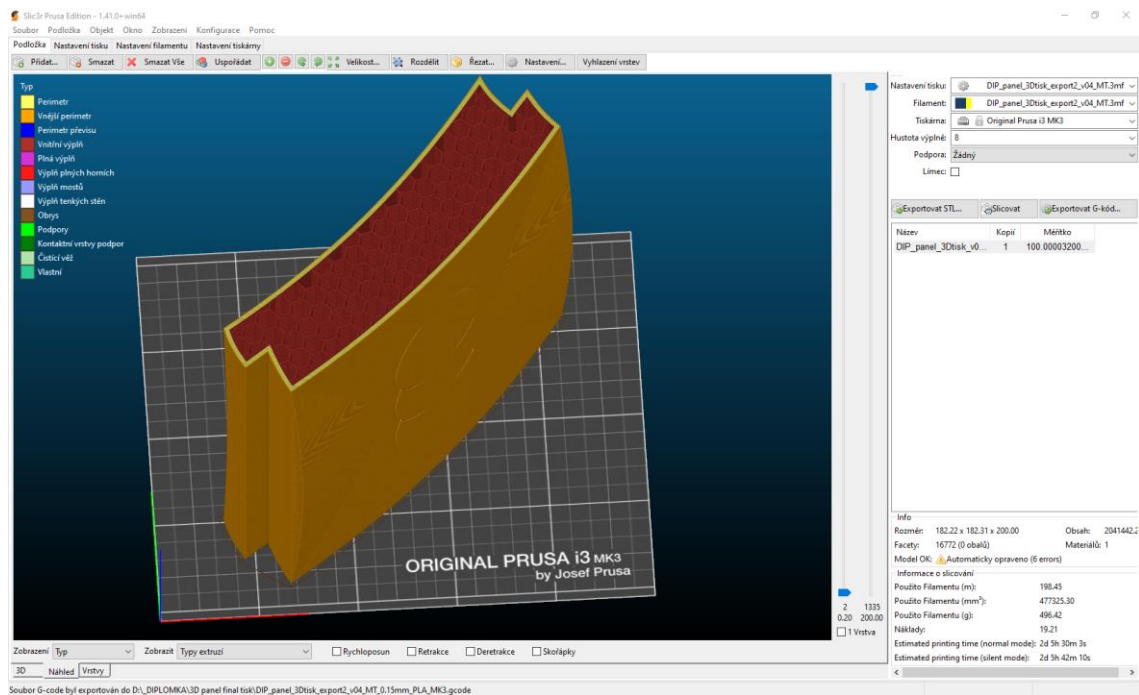


Obrázek 70 Detail panelu A ve Slic3r PE [autor]

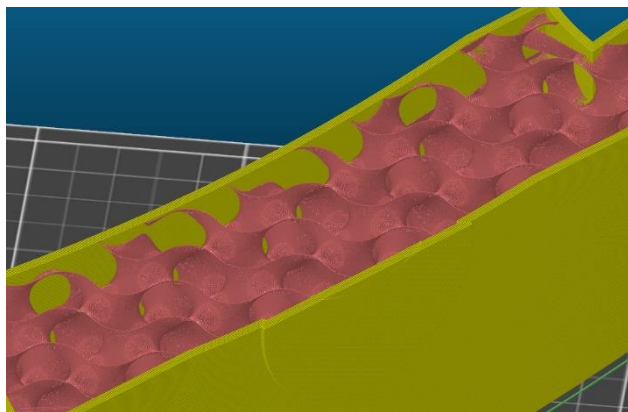
Na *obrázcích 70 a 71* je panel „A“ s výplní *honeycomb* 8 %, boční stěnou složenou z 6 perimetrů a výškou vrstvy 0,15 mm. Po nastavení parametrů tisku, výběru materiálu (ASA) a dalších nastavení tiskárny slicer vytvoří G – kód (viz. *Obrázek 71*). Z něj můžeme zjistit, že na výrobu panelu je potřeba 496,4 g filamentu a odhadovaná doba tisku je 2 dny a 5,5 hodiny. Panel „A“ byl nakonec vytištěn z PLA a výplní *honeycomb* s hustotou 6 %.

Hlavní obsah G – kódu jsou ovšem instrukce pro 3D tiskárnu, podle kterých dojde k vytvoření fyzického modelu.

Panely „A“ a „B“ byly kvůli svým rozměrům na pracovní plochu umístěny pod úhlem 45°. Panely „C“ a „D“ mohly být vytištěny 4 současně.



Obrázek 72 Panel A ve Slic3r PE - export G -code [autor]



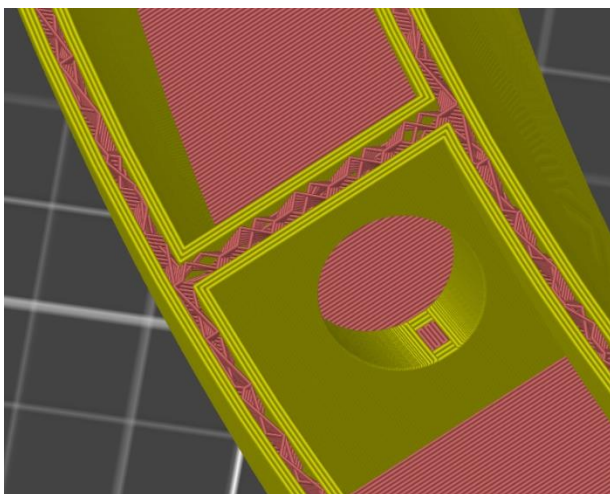
Obrázek 73 Panel A s výplní gyroid [autor]

Lze nastavit různou hustotu výplně. Alternativou ke vzoru *honeycomb* je například *gyroid*. Na obrázku 73 je panel „A“ s výplní *gyroid* o hustotě 5 %.

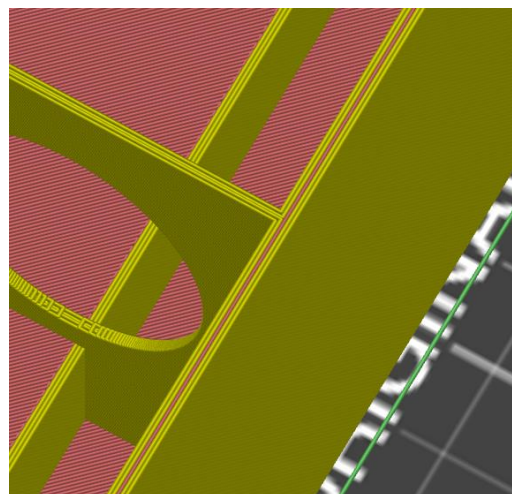
Z hlediska tepelně – izolačních vlastností je pravděpodobně lepší dutá varianta panelu. V takovém případě vnitřní struktura nehraje roli, panel je složen pouze z plných stěnových perimetrů.

Tímto způsobem byly vytvořeny panely „B“, „C“ a „D“. Filamentem panelu „B“ je PLA, stěny jsou tvořeny 3 perimetry z vnější i vnitřní strany a mezi nimi je výplň 3D *honeycomb* s hustotou 10 %. Stěny tohoto panelu mají průměrnou tloušťku 2,4 mm a jsou v nich uzavřené vzduchové dutiny. Díky tomu je panel velmi pevný a vzduchové dutiny mohou zlepšit jeho tepelně – izolační vlastnosti.

Panel „D“ je vytvořen z filamentu PET, přesněji z vylepšené varianty CPE. Tisk panelu „C“ z PET selhal, proto byl vytvořen z PLA. Výška vrstvy byla nastavena na 0,2 mm, ve spodní straně se objevuje vnitřní výplň s hustotou 25 % a vzorem *gyroidu*.

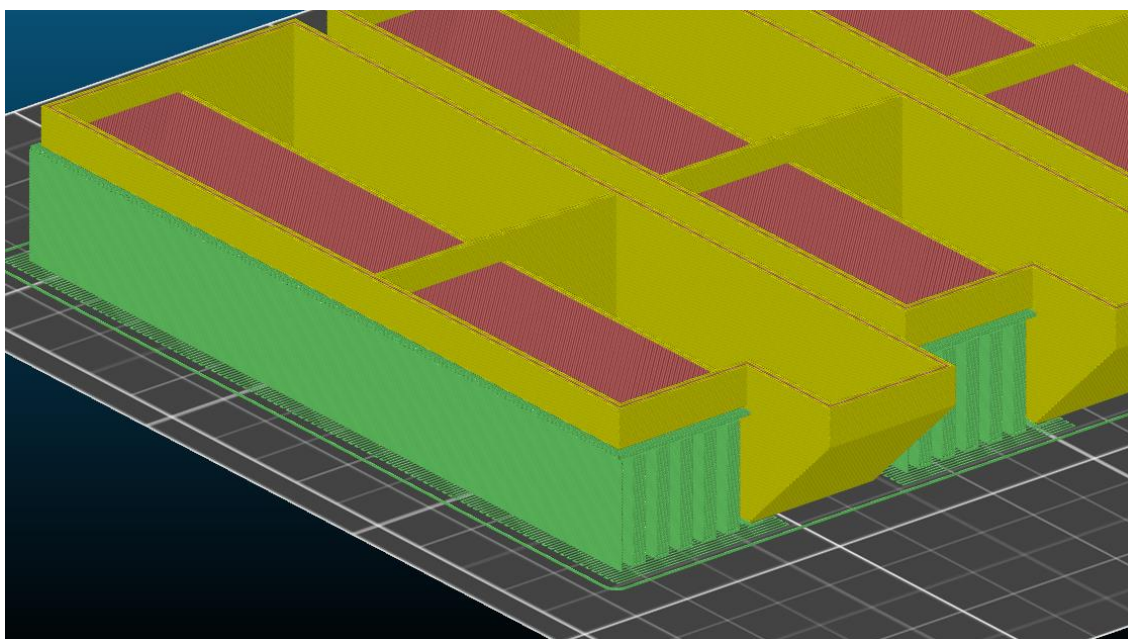


Obrázek 75 Struktura panelu B [autor]



Obrázek 74 Struktura panelu D [autor]

Kvůli zalomené spáře panelu „D“ bylo nutné ve *sliceru* vygenerovat podpůrnou konstrukci. V nastavení podpor byl určen mezní úhel převisu na 55°, rozteč podpor 2 mm a vzor výplně *rectilinear*. Na obrázku 76 jsou podpory znázorněny zeleně.



Obrázek 76 Vizualizace tiskových podpor panelu D [autor, slic3r PE]

3.2.2 Tisk panelů

Všechny plastové prototypy panelů včetně nastavení byly zhotoveny na 3D tiskárně **Prusa i3 Mk3** v majetku Katedry technologie staveb, která laskavě poskytla také tiskové materiály PET a PLA. Tiskárna využívá technologii FDM. 3D tisk na stolní hobby tiskárně je časově náročný a mohou se objevit chyby tisku.

Jako první byly vytištěny panely „A“ a „B“ s dvojitým zakřivením z materiálu PLA. Panely „C“ a „D“ určené k měření součinitele tepelné vodivosti měly být vytištěny z filamentu ASA, který ovšem nebyl včas dodán, takže byl zvolen alternativní materiál PET. Nevýhodou tohoto materiálu je vysoká náročnost tisku, která způsobila selhání při tisku některých kusů panelů. Panel „D“ byl úspěšně vytištěn z PET, panel „C“ nakonec z PLA.



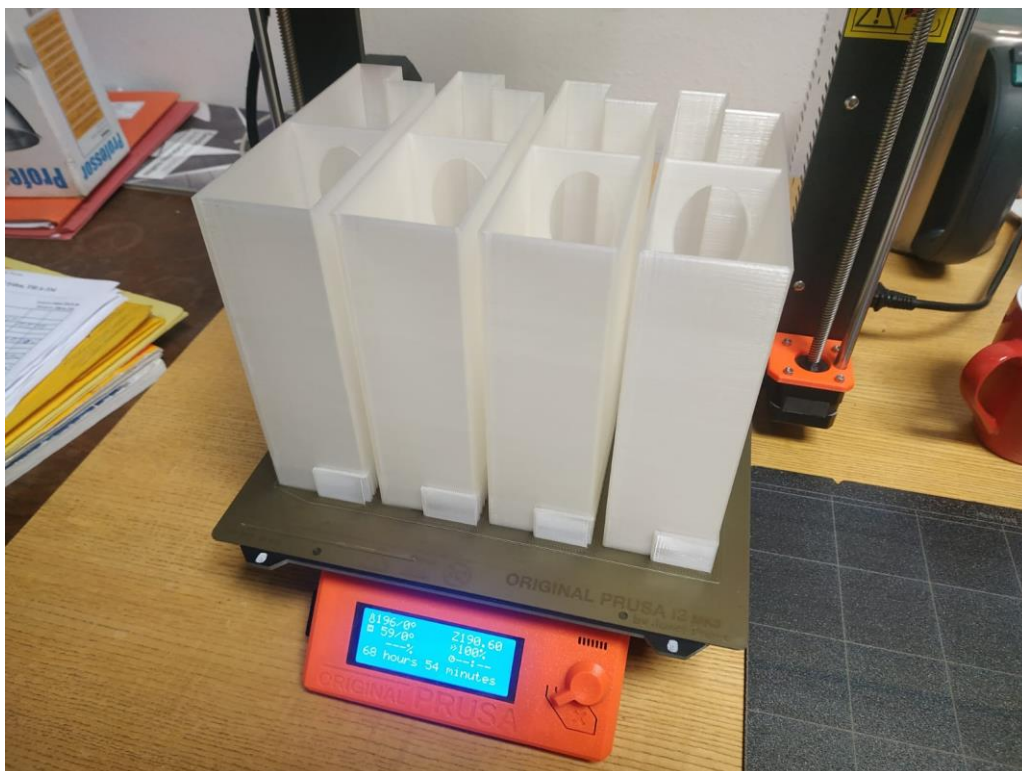
Obrázek 77 Tisk panelů na 3D tiskárně [autor]

Pro dosažení relevantního měření a vyloučení náhodných chyb bylo záměrem vytvoření 3 sestav (složených ze 4 panelů) panelů „C“ a „D“ ze stejného materiálu (ASA). Tisk jedné takové sestavy trvá přibližně 3 dny a některé pokusy selhaly, takže bylo nutné tiskové úlohy opakovat. Z těchto důvodů byla v daném čase vytištěna pouze 1 sestava z každého typu panelu.

Na následujících obrázcích je zachycen tisk panelů na stolní 3D tiskárně **Prusa i3 Mk3**, včetně víček k uzavření panelů, nezdařeného tisku panelu „D“ i úspěšného tisku s dočasnými tiskovými podporami, které byly následně odstraněny.

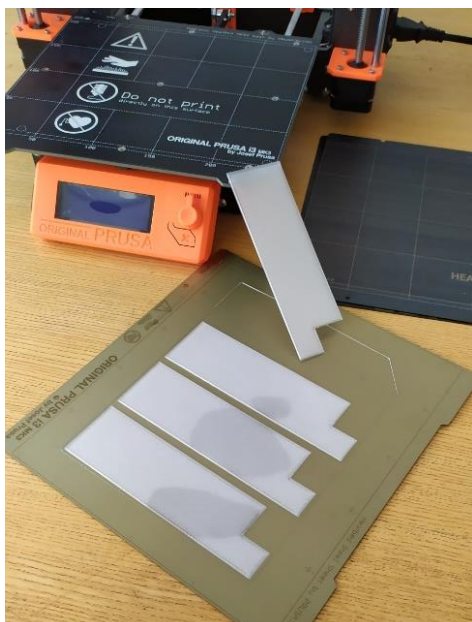


Obrázek 78 Nezdařený tisk panelu D [Ing. M. Kovářik]



Obrázek 79 Vytisknuté panely s dočasnými podporami [Ing. M. Kovářík]

Dočasné tiskové podpory slouží k zajištění stability vrstev nad prázdným prostorem během tisku. Měly by mít minimální spotřebu materiálu, bývají křehké a po vytisknutí jdou snadno odstranit.



Obrázek 81 Víčka k uzavření panelů [autor]

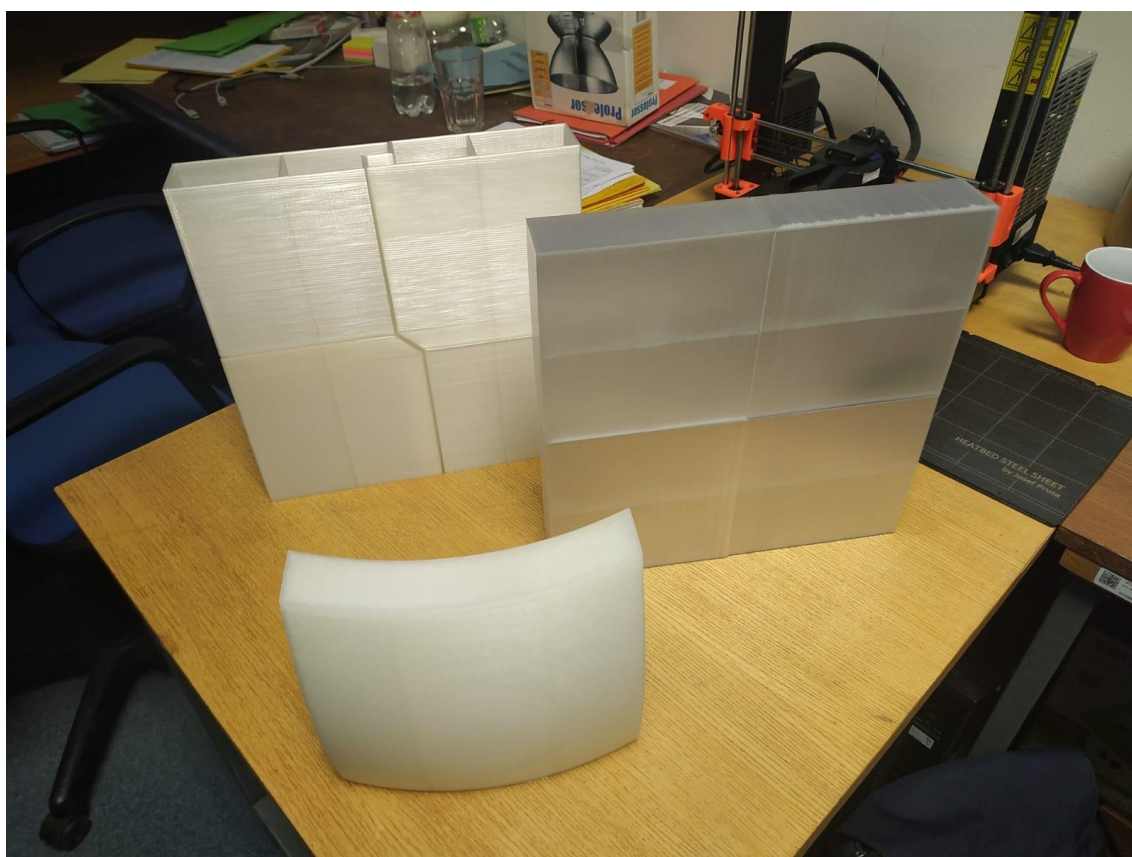


Obrázek 80 Odstraněná tisková podpora [autor]

V závěru kapitoly se nachází přehledová tabulka vytisknutých panelů a fotografie vytvořených panelů, včetně sestavených panelů „C“ a „D“.

Tabulka 5 Přehled vytvořených panelů [autor]

| Označení | Počet kusů [ks] | Filament | Výplň | Rozměry [cm] | Spotřeba materiálu [g] |
|----------|-----------------|----------|--------------|--------------|------------------------|
| „A“ | 1 | PLA | Honeycomb 6% | 20 x 20 x 5 | 500,38 |
| „B“ | 1 | PLA | Dutý | 20 x 20 x 5 | 418,58 |
| „C“ | 4 | PLA | Dutý | 15 x 15 x 5 | 117,53 |
| „D“ | 4 | PET | Dutý | 15 x 15 x 5 | 152,56 |



Obrázek 82 Sestavy tepelně - izolačních panelů vyrobených technologií 3D tisku [Ing. M. Kovářik]

3.2.3 Plnění panelů

Aby vytištěné schránky panelů získaly požadované tepelně technické vlastnosti, bylo nutné vyplnit je izolačním materiálem.

Výběr vhodného izolantu je velmi důležitou, avšak složitou záležitostí. Je třeba zvážit jak tepelně – technické vlastnosti, tak i reakci na vlhkost, spolupůsobení s plastem nebo náročnost naplnění panelu (viz. kapitola 3.1.1 *Technologie a materiály*). Před praktickým použitím by bylo nutné provést další zkoušky.

Použitelné jsou sypané a stříkané izolace. Některé pěny vyžadují k aplikaci speciální technologie. Pro výrobu prototypu byla kvůli dostupnosti a jednoduché aplikaci zvolena nízkoexpanzní trubičková PUR pěna (viz. *Tabulka 6*).

Před aplikací nízkoexpanzní PUR pěny bylo potřeba zajistit panely proti nežádoucí deformaci (viz. *Obrázek 83*).



Obrázek 83 Zajištění panelů D proti deformaci během plnění [autor]

Panely byly umístěny mezi dřevěné desky a naplněny PUR pěnou. Panely byly takto zajištěny po dobu 24 hodin, kdy probíhala expanze a tuhnutí PUR pěny. Poté byly uvolněny kvůli měření tepelně – izolačních vlastností.



Obrázek 84 Panely vyplněné PUR pěnou [autor]

PUR pěna během 24 hodin v panelu expandovala a ztuhla. Po uvolnění panelu byla přebytečná pěna odříznuta.



Obrázek 85 Vypěněný panel [autor]



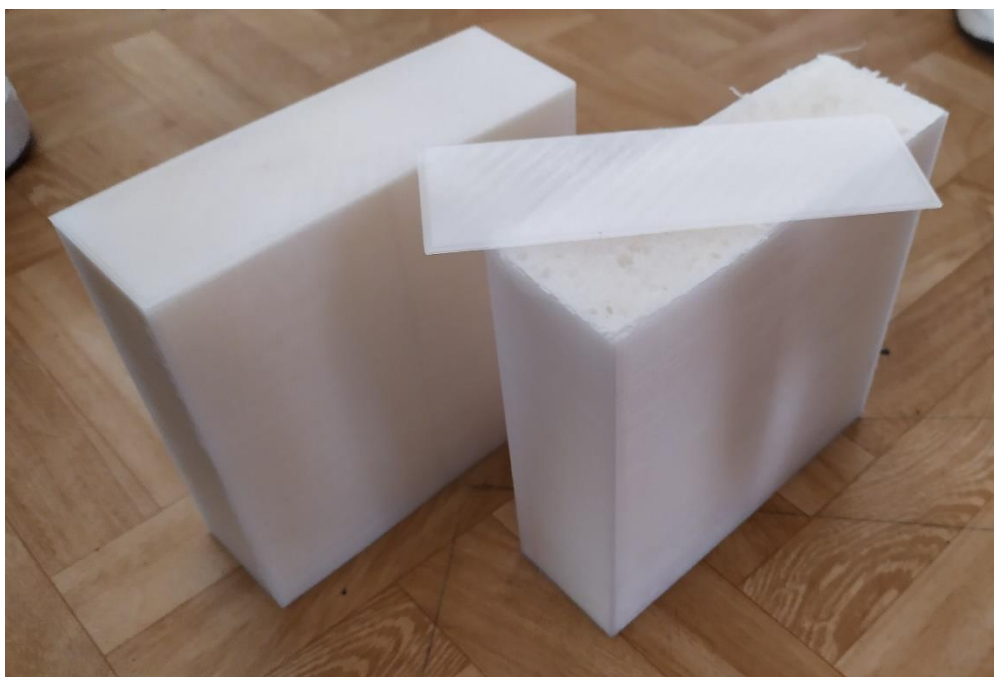
Obrázek 86 Odříznutá přebytečná PUR pěna [autor]

Expanze v menší míře probíhala i po uvolnění panelů a došlo k mírné deformaci. Tomu by se dalo zabránit ponecháním panelů zajištěných proti deformaci delší dobu než 24 hodin.

V jednom z panelů neproběhlo vypěnění správně a vznikla tak dutina. Ruční plnění vedlo k různé míře vypěnění panelů, které se projevilo v rozdílných hmotnostech. Řešením je strojní plnění nebo zkušený personál.

Hmotnosti jednotlivých panelů po vypěnění:

| | |
|----|----------|
| C1 | 188,91 g |
| C2 | 188,78 g |
| C3 | 192,34 g |
| C4 | 190,43 g |
| D1 | 224,54 g |
| D2 | 213,26 g |
| D3 | 203,89 g |
| D4 | 200,83 g |



Obrázek 87 Tepelně - izolační panely [autor]



Den Braven Czech and Slovak a.s.

Technický list 05.03 Maxi trubičková nízkoexpanzní pěna

| | | | |
|-------------------------------------|--|---------------|--|
| Výrobek | Speciálně vyvinuta v našich laboratořích pomocí nejmodernější high tack technologie, aby splňovala nejnáročnější požadavky maximální výtěžnosti a malé expanze, kvalitní a pravidelné struktury, flexibilním použitím, vysokým útlumem hluku a pohlcováním vibrací. Vysoká výtěžnost výrobku je dosažena pomocí speciální trubičky s tryskou na konci. Výborná přilnavost na beton, omítku, zdivo, dřevo, polystyren, neměkčené PVC apod. | | |
| Vlastnosti | <input checked="" type="checkbox"/> Nízkoexpanzní; <input checked="" type="checkbox"/> Extra vysoká výtěžnost; <input checked="" type="checkbox"/> Rychle vytvrzuje i při nízkých teplotách; <input checked="" type="checkbox"/> Vysoká přilnavost a lepivost k různým stavebním podkladům - beton, zdivo, kámen, dřevo, polystyren, neměkčené PVC apod.; <input checked="" type="checkbox"/> Dobrá zvuková a tepelná izolace; <input checked="" type="checkbox"/> Nemá nutriční hodnotu pro hmyz nebo hlodavce, nepodporují růst plísní a hub. | | |
| Použití | - Vyplňování spár při montáži okenních ráků a dveřních zárubní; - Izolace potrubních systémů; - Utěsňování průchodů ve stěnách; - Výplně dřevěných obkladů stěn, izolace a zateplování střešních konstrukcí; | | |
| Balení | Trubičková dóza 500 ml, 825 ml; | | |
| Barva | Zelená | | |
| Technické údaje | | | |
| Základ | - | polyuretan | |
| Hustota | kg/m ³ | 15 – 25 | (dle ISO 7390) |
| Struktura | % | 60 - 80 | (stejnomyšných uzavřených buněk) |
| Součinitel tepelné vodivosti λ | W/mK | 0,030 – 0,035 | |
| Tepelná odolnost | °C | -40 / +90 | (po vytvrzení, krátkodobě až +140°C) |
| Tepelná odolnost | °C | -15 | (při přepravě) |
| Teplota při aplikaci | °C | +5 / +35 | |
| Rozměrová stálost DS | % | -5% < DS < 0% | |
| Doba vytvoření nelepivé vrstvy | min. | 8 - 10 | (v závislosti na teplotě a relat.vlhkosti) |
| Řezatelnost | min. | 15 - 40 | (při 23°C / 55% rel. vlhkosti vzduchu) |
| Odolnost vůči UV záření | - | ne | (nutno povrchově chránit – omítka, lišty, nátěr) |
| Třída reakce na oheň | - | F | (dle ČSN EN 13501-1) |
| Skladovatelnost | měsíce | 18 | (Dnem dolů!! Při teplotách -15 °C až +25 °C) |
| Omezení | Nedoporučujeme použití pro aplikace pod vodou a do uzavřených prostor, nulová adheze na PE, PP, silikon, teflon a mastné podklady. Nedoporučujeme při nízkých teplotách pěnu nebo spáry nahřívát, neaplikovat na podklady pokryté jinovatkou. | | |
| Podklad | Musí být čistý, suchý, pevný, bez prachu, volných částic, mastnot, oleje a námrazy. | | |
| Ošetření (příprava) podkladu | Použít na bezprašné a odmaštěné povrchy. Zařízení a další povrchy ohrožené znečištěním překrýt. Před nanesením doporučujeme savý podklad navlhčit vodou pomocí rozprašovače pro kvalitnější strukturu pěny a pěnu navlhčit i po její aplikaci. Při minusových teplotách nepoužívat vlhčení!!! | | |

Údaje o zápisu do OR: Zapsáno KS Ostrava, oddíl B, vložka 2951

Den Braven Czech and Slovak a.s.

Adresa: 793 91 Úvalno 353, tel.: 554 648 200, fax: 554 648 205, Česká republika

Bankovní spojení: KB Křmlov, č. ú. 19 - 0848810297 / 0100

info@denbraven.cz

IČO: 26872072, DIČ: CZ26872072

www.denbraven.cz

3.3 Zkoušky panelů

Vytištěné a vyplněné tepelně – izolační panely „C“ a „D“ byly vytvořeny za účelem změření hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ . Z panelů byly kvůli požadavkům přístroje sestaveny vzorky o rozměrech 30 x 30 cm, výška byla zvolena na 5 cm.

Zkoušky proběhly v laboratoři Katedry fyziky (K102, Fsv ČVUT v Praze) za asistence doc. Ing. Petra Semeráka, Ph.D. a doc. RNDr. Vítězslava Vydry, CSc. Měřicím přístrojem byl **Měřič tepelného toku Linseis HFM 300**.



Obrázek 88 Měřič tepelného toku Linseis HFM 300 [autor]

Vzorek je vložen do komory mezi 2 desky kalibrované na teploty 30°C a 10°C. Mezi těmito deskami měří probíhající tepelný tok. Nejdříve byly panely „C“ a „D“ změřeny v původním dutém stavu, po vyplnění PUR pěnou byly změřeny znovu.

První série měření je kontrolní, cílem je zjistit rozdíly mezi panely způsobené kombinací různosti materiálů (PLA, PET) a tvarů (na sraz a se zalomením spáry). Bohužel byl vytvořen pouze jeden vzorek každého tvaru, a to z různých materiálů. Nelze tedy určit jaký podíl na výsledku má materiál a jaký tvar.

U dutého panelu se projeví vedení tepla prouděním a radiací, na které má vliv orientace panelu. Panel je v přístroji umístěn ve vodorovné poloze, výsledky jsou tedy mírně horší, než by byly při svislé orientaci, která je uvažovaná při použití na fasádě. U vyplněného panelu tento problém odpadá. Vliv zakřivení fasádních panelů by byl také téměř zanedbatelný. Výsledky jsou dále ovlivněny nastaveným tepelným rozdílem 30°C – 10°C, kdy v praxi lze počítat s nižšími teplotami (venkovní výpočtová teplota pro Prahu je -13°C, teplota interiéru kolem 21°C), při kterých se hodnota součinitele tepelné vodivosti snižuje.

3.3.1 Provedení zkoušek

Vzorek je vložen do komory přístroje a desky jsou k němu přitlačeny. Po spuštění přístroje je nutné počkat na ustálení teplot, přibližně 30 – 60 minut. Po skončení měření připojený software vytvoří protokol s výsledky, kde je mimo jiné uveden výsledný součinitel prostupu tepla (U) vzorkem a z něj vyplývající součinitel tepelné vodivosti (λ) materiálu.



Obrázek 89 Panel D vložený do měřícího přístroje [autor]

Výsledný součinitel prostupu tepla dutého panelu „C“ byl $U_C = 4,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, při tloušťce panelu $d_C = 5,0 \text{ cm}$ to znamená součinitel tepelné vodivosti $\lambda_C = 0,24 \text{ W/mK}$. Pro dutý panel „D“ platí: $U_D = 3,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, což při tloušťce panelu $d_D = 5,0 \text{ cm}$ znamená $\lambda_D = 0,19 \text{ W/mK}$. Jedná se o výsledky jednoho měření, data tedy nelze statisticky vyhodnotit.

Rozdíl je patrně způsoben rozdílnými materiály panelů, kdy panel „C“ je z PLA, jehož udávaná hodnota $\lambda_{PLA} = 0,25 \text{ W/mK}$ s panel „D“ z PET, kde $\lambda_{PET} = 0,21 \text{ W/mK}$. Menší vliv má v tomto případě zalomení spáry panelu „D“.

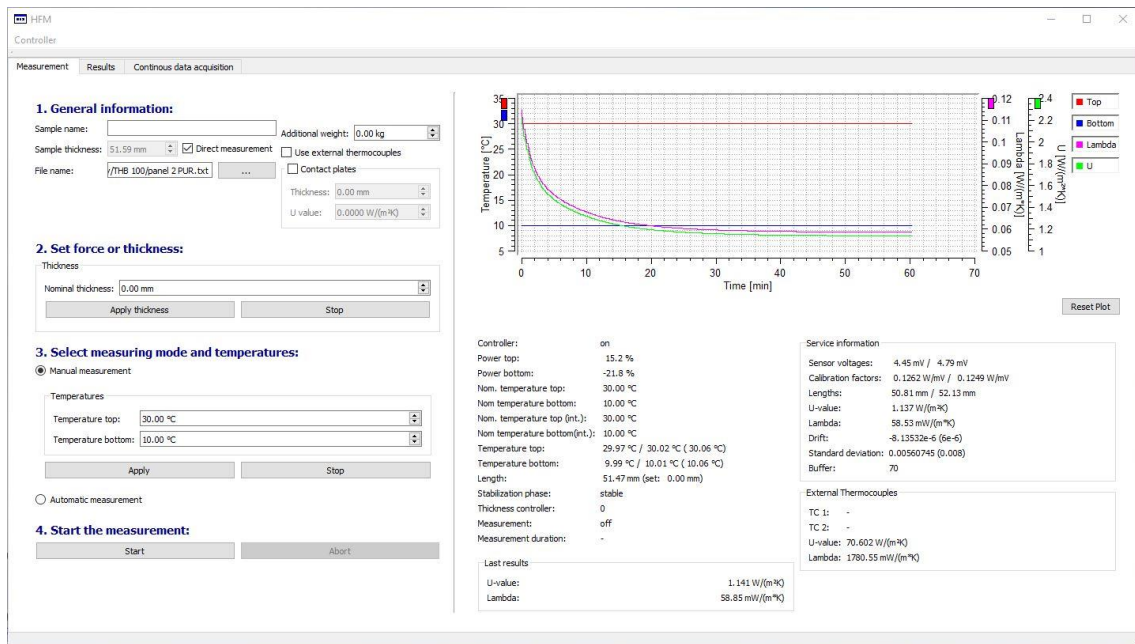
Následně byly stejným způsobem změřeny oba panely vyplněné PUR pěnou. Udávaný součinitel tepelné vodivosti PUR pěny je $\lambda_{PUR} = 0,033 - 0,045 \text{ W/mK}$, je závislý mimo jiné na objemové hmotnosti. Z hmotností panelů lze vypočítat objemovou hmotnost výplně, průměrná hodnota vychází na $\rho_{PUR} = 0,065 \text{ g/cm}^3$.

Panely byly expanzí pěny mírně deformovány. Aby desky přístroje správně doléhaly na vzorek, byl pomocí závaží zvýšen tlak desek (viz. Obrázek 90).



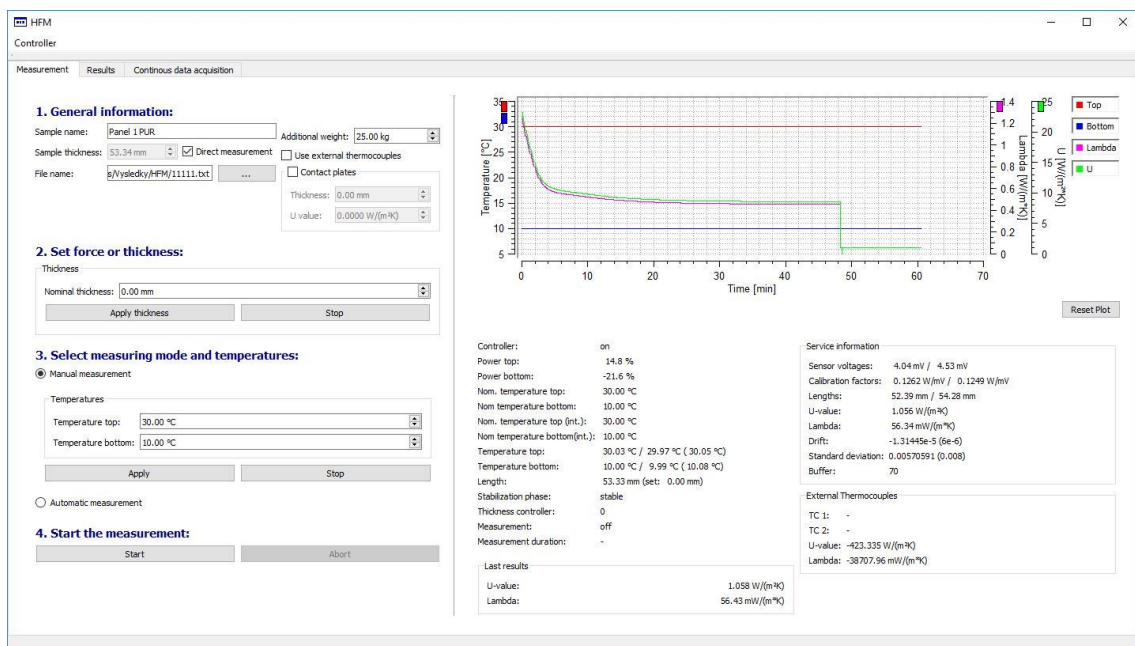
Obrázek 90 Naplněný panel C v měřícím přístroji zatížený závažími [autor]

Výsledný součinitel prostupu tepla vypěněného panelu „C“ byl $U_c = 1,137 \text{ W/m}^2\text{K}$, tloušťka panelu byla expanzí pěny zvýšena na $d_c = 5,15 \text{ cm}$, výsledný součinitel prostupu tepla je tedy $\lambda_c = 0,058 \text{ W/mK}$ (viz. Obrázek 91).



Obrázek 91 Měření panelu C [autor]

Vypěněný panel „D“ dosáhl mírně lepších výsledků, přestože jedna jeho část nebyla dokonale vyplněna. Výsledný součinitel prostupu tepla $U_D = 1,056 \text{ W/m}^2\text{K}$, maximální tloušťka panelu $d_D = 5,33 \text{ cm}$ a výsledný součinitel prostupu tepla $\lambda_D = 0,056 \text{ W/mK}$ (viz. Obrázek 92).



Obrázek 92 Měření panelu D [autor]

3.3.2 Vyhodnocení zkoušek

V případě panelů vyplněných PUR pěnou se výsledné hodnoty blíží samotné výplni, zhoršují je tepelné mosty ve spáře a v plastové obálce panelu. Během měření nebyly panely nijak slepeny. Dále se projevila expanze pěny a nedokonalé vypěnění panelu „D“.

K lepšímu výsledku panelu „D“ v naplněném stavu přispěla jeho konstrukce se zalomenými spárami, stejně jako použitý filament s nižší tepelnou vodivostí. Ještě lepší výsledky by bylo možné očekávat s filamentem ASA, jehož součinitel tepelné vodivosti může být až $\lambda_{ASA} = 0,17 \text{ W/m.K}$.

Kvůli problémům s dodávkou materiálu a samotným tiskem byla vytvořena pouze 1 sestava z každého typu panelu („C“ a „D“), navíc z různých materiálů. Naměřená data proto není možné statisticky vyhodnotit a vyloučit náhodné chyby. Pro větší relevanci výsledků by bylo nutné provést měření minimálně 3 vzorků každého typu panelu vyrobených ze stejného materiálu.

Tabulka 7 Výsledky měření tepelně - izolačních vlastností panelů [autor]

| Panel | Výplň | Tloušťka mm | U W/m ² K | λ W/mK |
|-------|----------|----------------|-------------------------|-------------------|
| „C“ | Dutý | 50,0 | 4,80 | 0,240 |
| „D“ | Dutý | 50,0 | 3,80 | 0,190 |
| „C“ | PUR pěna | 51,5 | 1,14 | 0,058 |
| „D“ | PUR pěna | 53,3 | 1,06 | 0,056 |

Pro kontrolu byl proveden obecný výpočet pro teoretický panel z plastu, s tepelnou vodivostí $\lambda = 0,3 \text{ W/m.K}$, vyplněný PUR pěnou s $\lambda = 0,035 \text{ W/m.K}$ o tloušťce 5,0 cm.

Tabulka 8 Prvky v teoretickém panelu [doc. RNDr. Vítězslav Vydra, CSc]

| Materiál | λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹) | μ (-) | ε (-) | X _{min} (mm) | Y _{min} (mm) | Z _{min} (mm) | X _{max} (mm) | Y _{max} (mm) | Z _{max} (mm) |
|-------------|--|-----------|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Desky z PET | 0,3 | 94000 | - | 2 | 0 | 2 | 148 | 2 | 148 |
| lepidlo PUR | 0,035 | 13 | - | 2 | 2 | 2 | 148 | 48 | 148 |
| Desky z PET | 0,3 | 94000 | - | 2 | 48 | 2 | 148 | 50 | 148 |
| Desky z PET | 0,3 | 94000 | - | 148 | 0 | 2 | 150 | 50 | 150 |
| Desky z PET | 0,3 | 94000 | - | 0 | 2 | 148 | 148 | 48 | 150 |
| Desky z PET | 0,3 | 94000 | - | 2 | 2 | 0 | 150 | 48 | 2 |
| Desky z PET | 0,3 | 94000 | - | 0 | 2 | 0 | 2 | 48 | 148 |

1.1.1 Součinitel prostupu tepla U dle ČSN EN ISO 6946

$$U = (1,033 \pm 0,044) \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

1.1.2 Tepelný tok přes vnitřní povrchy

$$\Phi = 0,459 \text{ W}$$

Výsledná hodnota součinitele tepelné vodivosti takového panelu je $\lambda = 0,052 \text{ W/m.K}$. Rozdíl je pravděpodobně způsoben tepelnými mosty ve spárách mezi panely, odlišnými vlastnostmi použitých materiálů, případně chybou při měření.

Pokud naměřenou hodnotu součinitele tepelné vodivosti panelu „D“ $\lambda_D = 0,056 \text{ W/m.K}$ použijeme při výpočtu tepelně technických vlastností konstrukce v softwaru **AREA 2017 EDU**, můžeme výsledky porovnat s normovými hodnotami požadavků na součinitel prostupu tepla stavební konstrukce ($U_{\text{rec},20}$).

Zvolená konstrukce se skládá z nosné konstrukce ze zdiva tloušťky 250 cm, vrstvy PU lepidla tloušťky 1 cm (v praxi stačí méně) a tepelně – izolačního panelu o tloušťce 10 cm. Vnější okrajové podmínky jsou zvoleny pro Prahu.

Tabulka 9 Zkrácený protokol o výpočtu [autor, AREA 2017 EDU]

DVOUROZMĚRNÉ STACIONÁRNÍ POLE TEPLŮ A ČÁSTEČNÝCH TLAKŮ VODNÍ PÁRY

podle EN ISO 10211 a ČSN 730540 - MKP/FEM model

Area 2017 EDU

Název úlohy : **Tepelně - izolační panel D**

Varianta

Zpracovatel : Martin Trhan

Zakázka : DP

Datum : 28.12.2019

KONTROLNÍ TISK VSTUPNÍCH DAT :

Parametry pro výpočet teplotního faktoru:

Teplota vzduchu v exteriéru: -13.0 C

Teplota vzduchu v interiéru: 20.6 C

Zadané materiály :

| č. | Název | LambdaX | LambdaY | MiX | MiY | X1 | X2 | Y1 | Y2 |
|----|-----------------|---------|---------|-------|-------|----|----|----|----|
| 1 | Porotherm | 0.210 | 0.210 | 10 | 10 | 1 | 17 | 1 | 33 |
| 2 | Polyuretan pěno | 0.040 | 0.040 | 2.500 | 2.500 | 17 | 18 | 1 | 33 |
| 3 | Tepelně izolačn | 0.056 | 0.056 | 90000 | 90000 | 18 | 31 | 1 | 33 |

Poznámka: LambdaX a LambdaY jsou návrhové hodnoty tepelné vodivosti materiálu ve směru osy X a Y ve W/(m.K);
MiX a MiY jsou návrhové faktory difúzního odporu materiálu ve směru osy X a Y; X1 a X2 jsou čísla os ve směru osy X a Y1 a Y2 jsou čísla os ve směru osy Y vymezující zadanou oblast.

Zadané okrajové podmínky a jejich rozmístění :

| číslo | 1.uzel | 2.uzel | Teplota [C] | Rs [m2K/W] | RH [%] | P [kPa] | h,p [s/m] |
|-------|--------|--------|-------------|------------|--------|---------|-----------|
| 1 | 1 | 33 | 20.60 | 0.13 | 50.0 | 1.21 | 0.00 |
| 2 | 991 | 1023 | -13.00 | 0.04 | 84.0 | 0.17 | 0.00 |

Poznámka: Rs je odpor při přestupu tepla na příslušném povrchu, RH je relativní vlhkost v prostředí působícím na příslušný povrch, P je částečný tlak vodní páry v prostředí působícím na daný povrch a h,p je součinitel přestupu vodní páry na příslušném povrchu.

VÝSLEDKY VÝPOČTU HODNOCENÉHO DETAILU :**NEJNIŽŠÍ POVRCHOVÉ TEPLoty A HUSTOTY TEPELNÉHO TOKU:**

| Prostředí | T [C] | Rs [m2K/W] | R.H. [%] | Ts,min [C] | Tep.tok Q [W/m] | Propust. L [W/mK] |
|-----------|-------|------------|----------|------------|-----------------|-------------------|
| 1 | 20.6 | 0.13 | 50 | 19.76 | 6.48405 | 0.19298 |
| 2 | -13.0 | 0.04 | 84 | -12.74 | -6.48412 | 0.19298 |

Vysvětlivky:

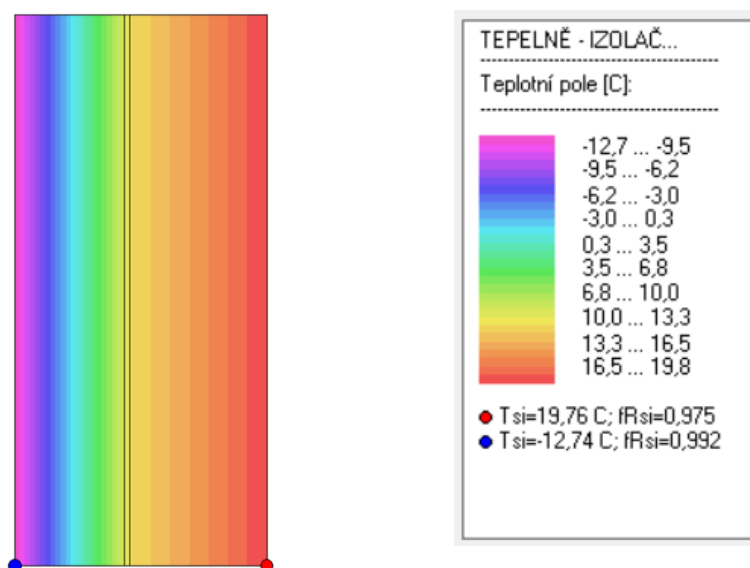
T zadaná teplota v daném prostředí [C]
Rs zadaný odpor při přestupu tepla v daném prostředí [m2K/W]
R.H. zadaná relativní vlhkost v daném prostředí [%]
Ts,min minimální povrchová teplota v daném prostředí [C]
Tep.tok Q hustota tepelného toku z daného prostředí [W/m]
(hodnota je vztažena na 1m délky tepelného mostu, přičemž ztráta je kladná a zisk je záporný)
Propust. L tepelná propustnost mezi daným prostředím a okolím [W/mK]
(lze určit jen pro maximálně 2 prostředí; pro určité charakteristické výseky lze získat průměrný součinitel prostupu tepla vydělením hodnoty L šířkou hodnoceného výseku konstrukce)

NEJNIŽŠÍ POVRCHOVÉ TEPLoty, TEPLTNÍ FAKTORY A RIZIKO KONDENZACE:

| Prostředí | Tw [C] | Ts,min [C] | f,Rsi [-] | KOND. | RH,max [%] | T,min [C] |
|-----------|--------|------------|-----------|-------|------------|-----------|
| 1 | 9.81 | 19.76 | 0.975 | ne | --- | --- |
| 2 | -14.90 | -12.74 | 0.992 | ne | --- | --- |

Výsledný součinitel prostupu tepla konstrukce **U = 0.19 W.m⁻².K⁻¹ VYHOVUJE** doporučené hodnotě U_{rec,20} = 0.20 W.m⁻².K⁻¹ dle ČSN 73 0540-2:2011.

Na *obrázku 93* je znázorněn průběh teplot uvnitř konstrukce podle modelu *AREA 2017 EDU*.



Obrázek 93 Teplotní pole [autor, AREA 2017 EDU]

Z hlediska propustnosti tepla jsou tepelně – izolační panely vytvořené technologií 3D tisku použitelné ke kontaktnímu zateplování staveb. Změřená hodnota součinitele tepelné vodivosti je $\lambda = 0,056 \text{ W/m.K}$. Tato hodnota může být dále vylepšena použitím filamentu ASA, lepším vypěněním nebo utěsněním spáry mezi panely. Vzhledem k nehomogenitě panelu lze předpokládat, že při větší tloušťce panelu se bude výsledek více blížit výplňovému materiálu.

Vlastnosti panelu jsou srovnatelné s běžnými tepelně – izolačními materiály (viz. *Tabulka 10*).

Tabulka 10 Tabulka tepelně izolačních materiálů [autor]

| Materiál | Součinitel tepelné vodivosti λ W/mK |
|------------------------|--|
| Expandovaný polystyren | 0,040 |
| Extrudovaný polystyren | 0,035 |
| kamenná vlna | 0,045 |
| skelná vata | 0,038 |
| pěnové sklo | 0,050 |
| Polyuretanová pěna | 0,036 |
| Fenolická pěna | 0,023 |
| dřevovláknité izolace | 0,043 |
| technické konopí | 0,045 |
| ovčí vlna | 0,045 |
| Panel „C“ | 0,058 |
| Panel „D“ | 0,056 |

4 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala možnostmi využití technologie 3D tisku k výrobě panelů určených ke kontaktnímu zateplování zakřivených fasád budov.

Provedená rešerše na technologii 3D tisku ukazuje, že aditivní výroba se stále rozvíjí a bude hrát důležitou úlohu ve vývoji stavebnictví a v přechodu na Průmysl 4.0. Její výhody spočívají v tvarové volnosti, možnosti rychlé výroby prototypu bez nutnosti vyrábět formu a schopnosti ušetřit čas, materiál i lidské zdroje. Naopak není efektivní pro velkosériovou výrobu stejného produktu. Z toho vyplývá, že využití technologie 3D tisku k výrobě neidentických panelů s komplexními tvary může být efektivní způsob tepelné izolace dvojitě zakřivené fasády.

Dvojitě zakřivené konstrukce jsou výraznou součástí moderní architektury a řešení jejich izolace bude i s ohledem na ekologii důležitou otázkou budoucího stavebnictví.

Rešerše zateplovacích systémů dále ukázala, že alternativní způsoby zateplování dvojitě zakřivených fasád bývají technicky náročné, drahé nebo jinak neefektivní.

Jako nejvýhodnější způsob výroby tepelně izolačních panelů se jeví použití 3D tiskárny k vytvoření duté schránky z plastového filamentu, ideálně ASA nebo PETG, a následné vyplnění dutiny tepelně izolačním materiálem. Při výrobě prototypu byla k tomuto účelu použita nízkoexpanzní polyuretanová pěna.

Byly vyrobeny 2 zakřivené panelu k ukázce tvarových možností 3D tisku a 2 sestavy o 4 panelech k provedení zkoušek tepelně izolačních vlastností. Kvůli problémům s dodávkou materiálu a několika selháním tiskové úlohy, které způsobily, že byly vytištěny pouze 2 vzorky pro měření tepelně technických vlastností, nelze naměřená data statisticky vyhodnotit. Nicméně výsledky ukazují, že panel může mít tepelně izolační vlastnosti srovnatelné s běžnými materiály pro zateplování staveb.

Z tepelně – technického hlediska mohou tady panely být použitelné, pro získání relevantních dat by bylo nutné provést více měření. Je také potřeba zhodnotit ekonomickou výhodnost nebo náročnost montáže, které nebyly hlavním záměrem této práce.

Tato práce ukazuje jeden z možných přechodných způsobů využití 3D tisku ve stavebnictví před eventuálním tiskem celých objektů.

Cíle diplomové práce byly splněny.

Použité zdroje a literatura

- [1] O 3D tisku. *Josef Průša* [online]. [cit. 2019-10-02]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/o-3d-tisku/>
- [2] Pros-and-cons-of-3d-printing/. *3space* [online]. © 2013-2018 [cit. 2019-10-02]. Dostupné z: <https://3space.com/blog/pros-and-cons-of-3d-printing/>
- [3] LIPSON, H., KURMAN, M. Fabricated: the new world of 3D printing: The promise and peril of a machine that can make anything, Indianapolis: Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-35036-8
- [4] BIM: Koncepce zavádění metody BIM v ČR schválena vládou. *Ministerstvo průmyslu a obchodu: Stavebnictví a suroviny* [online]. ©Copyright2005-2019 [cit. 2019-10-02]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/stavebnictvi-a-suroviny/bim/koncepce-zavadeni-metody-bim-v-cr-schvalena-vladou-232136/>
- [5] What is Industry 4.0 and Why is it Important? *Trunovate* [online]. 2019 [cit. 2019-10-02]. Dostupné z: <https://trunovate.com/blog/what-is-industry-4-0-and-why-its-important/>
- [6] Advantages & Disadvantages of 3D Printing in 2019. *All3dp* [online]. [cit. 2019-10-05]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/advantages-and-disadvantages-of-3d-printing/>
- [7] How 3D Printing Is Reshaping Architecture. *All 3DP* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/how-3d-printing-is-reshaping-architecture/>
- [8] Co se skrývá pod výrazy Industry 4.0 / Průmysl 4.0 ? *Automatizace.hw.cz* [online]. ©1997-2014 [cit. 2019-10-12]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mimochodem/co-je-se-skryva-pod-vyrazy-industry-40-prumysl-40.html>
- [9] Co je to BIM. *BIM Koncepce 2022* [online]. Copyright©2018-2019 [cit. 2019-10-18]. Dostupné z: <https://www.koncepcebim.cz/203-3-1-co-je-to-bim>
- [10] O 3D Tisku: 3D TISK, PRINCIPY, TECHNOLOGIE. *ABC 3D* [online]. Copyright©2018-2019 [cit. 2019-10-18]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/115-3d-tisk-principy-technologie>
- [11] Thermoplastics. *MakeItFrom.com* [online]. 2009 [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-group/Thermoplastic>
- [12] Průvodce materiály. *Prusa Research* [online]. 2019©PrusaResearcha.s. [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>

- [13] Is 3D Printing Environmentally Friendly? *3 Space* [online]. ©2013-2018 [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <https://3space.com/blog/is-3d-printing-environmentally-friendly/>
- [14] What is the best type of plastic for my 3D printing application? *My3DMatter* [online]. ©2019 [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <https://my3dmatter.com/what-is-the-best-type-of-plastic-for-my-3d-printing-application/>
- [15] Industrial Applications of 3D Printing: The Ultimate Guide. *My3dmatter* [online]. [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <https://amfg.ai/industrial-applications-of-3d-printing-the-ultimate-guide/>
- [16] Optimized 3D Print Production with Generative Design. *ProtoCAM* [online]. ©2019 [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <https://www.protocam.com/learningcenter/blog/generative-design/>
- [17] 3D printing CubeSat bodies for cheaper, faster missions. *European Space Agency* [online]. ©2019 [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/3D_printing_CubeSat_bodies_for_cheap_faster_missions
- [18] 3D Printing in Space: 4 Most Promising Projects. *All 3DP* [online]. [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printing-in-space-4-most-promising-projects/>
- [19] Knowledge: Enter the world of 3D printing and reach the latest 3D news. *3Dgence* [online]. [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://3dgence.com/en/10-applications-of-industrial-3d-printer/>
- [20] 3D Tisk v architektuře. *Arch Print* [online]. ©2016 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <http://www.archprint.cz/3dtisk.html>
- [21] The Future of 3D Printing for Architecture. *3D Insider* [online]. 2019© [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printing-architecture/>
- [22] 3D Printed Houses From Locally Sourced Clay. *3dprintingprogress* [online]. 2019 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.3dprintingprogress.com/articles/18552/3d-printed-houses-from-locally-sourced-clay>
- [23] Your Next Home Could Be 3D-Printed. *Fortune* [online]. Fortune Media IP Limited, ©2019 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://fortune.com/2018/04/22/3d-printed-homes/>

- [24] Is 3D printing really as ecofriendly as we think it is? *3D Printing Industry* [online]. ©2017 [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/is-3d-printing-really-as-ecofriendly-as-we-think-it-is-136335/>
- [25] 3D Printing. *Obsessively Geek* [online]. ©2016 [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <https://www.og3dprinting.com/3d-printing>
- [26] Encyklopedie 3D tisku. *3D tisk.cz* [online]. Nová média, ©2019 [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/encyklopedie-3d-tisku/>
- [27] Worldwide most used 3D printing technologies, as of July 2018*. *Statista* [online]. [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/756690/worldwide-most-used-3d-printing-technologies/>
- [28] Technologie 3D tisku v architektuře a stavebnictví. *Earch* [online]. 2012 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <http://www.earch.cz/cs/stavitelstvi/technologie-3d-tisku-v-architekture-stavebnictvi>
- [29] Global volume construction demolition waste. *Recycling Today* [online]. GIE Media, ©2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.cdrecycler.com/article/global-volume-construction-demolition-waste/>
- [30] Environmental Sustainability of Plastics in Construction. *Modern Building Alliance* [online]. [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://www.modernbuildingalliance.eu/environmental-sustainability-plastics-construction/>
- [31] SIKDER, S., Ahmad BARARI a H. A. KISHAWY. Effect of Adaptive Slicing on Surface Integrity in Additive Manufacturing. In: Volume 1A: 34th Computers and Information in Engineering Conference [online]. American Society of Mechanical Engineers, 2014, 2014-08-17, s. - [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.1115/DETC2014-35559. ISBN 978-0-7918-4628-5. Dostupné z: <https://asmedigitalcollection.asme.org/IDETC-CIE/proceedings/IDETC-CIE2014/46285/Buffalo,%20New%20York,%20USA/256626>
- [32] Prostorové materiály pro 3D tisk. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. ©2019 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/vut/aktuality-f19528/prostorove-materialy-pro-3d-tisk-odbornik-z-brna-navrhuje-unikatni-stavebni-vyplne-d164630>

- [33] BOCK, Thomas a Thomas LINNER. Robot-oriented design: design and management tools for the deployment of automation and robotics in construction. New York: *Cambridge University Press*, [2015]. ISBN 978-1-107-07638-9.
- [34] BOCK, Thomas a Thomas LINNER. Construction robots: elementary technologies and single-task construction robots. New York, NY: *Cambridge University Press*, 2016. ISBN 978-1-107-07599-3.
- [35] BOCK, Thomas a Thomas LINNER. Site automation: automated/robotic on-site factories. New York, NY: *Cambridge University Press*, 2016. ISBN 978-1-107-07597-9.
- [36] ČSN 73 2901: Provádění vnějších tepelněizolačních kompozitních systémů (ETICS). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005., 20 s, Třídící znak 732901
- [37] ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky (10.2011); Změna Z1 (4.2012). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005., 56s, Třídící znak 730540
- [38] Zateplovací systémy ETICS. *Tzb-info* [online]. ©CopyrightTopinfos.r.o.2001-2019 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/zateplovaci-systemy/303-zateplovaci-systemy-etics>
- [39] Zateplovací, tepelně izolační systémy. *Fasády - zateplení - Kwaczek* [online]. ©2019 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://www.zatepleni-kwaczek.cz/zateplovaci-systemy>
- [40] Kontaktní zateplovací systém: Materiály a návrh. *VýrobkyProStavbu.cz* [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://www.vyrobkyprostavbu.cz/kontaktni-zateplovaci-system-i-materialy-a-navrh/>
- [41] Zateplovací systém s minerálním izolantem. *MM-Servis* [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <http://www.mm-servis.cz/cs/detail/760-Zateplovaci-system-s-mineralnim-izolantem.html>
- [42] Kontaktní zateplovací systémy. *Isover* [online]. ©2019 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://www.isover.cz/produkty/systemy-isover/kontaktni-zateplovaci-systemy>
- [43] XL 3D printer: KamerMaker. *DUS Architects* [online]. [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://houseofdus.com/project/kamermaker/>

- [44] Zaha Hadid's Heydar Aliyev Centre in Baku wins Design of the Year. *Wallpaper** [online]. © TI Media Limited [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: https://www.wallpaper.com/architecture/zaha-hadids-heydar-aliyev-centre-in-baku-wins-design-of-the-year#pic_27461
- [45] HAND, Jennifer. Optimizing The Performance of Complex Building Façade [online]. , s.3 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: https://www.comsol.jp/story/download/309771/Newtecnic_CN2015.pdf
- [46] GRUNEWALD, Steffen, Roel SCHIPPER a Joost WALRAVEN. Deliberate deformation of concrete after casting [online]. In: . Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, *Department of Structural and Building Engineering (NL)*, June 2012 [cit. 2019-12-02].
- [47] Unitised façades. *Seele* [online]. 2019 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://seele.com/facades/unitised-facades/>
- [48] Stavby: Tančící dům. *Archizone.cz* [online]. ©2014-2015 [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <http://www.archizone.cz/stavby/tancici-dum/>
- [49] Tančící dům. *Stavba roku* [online]. [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <http://www.stavbaroku.cz/printDetail.do?Dispatch=ShowDetail&siid=1645&coid=79>
- [50] Termokamera. *KVStav* [online]. (c)2008-2019 [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <http://kvstav.cz/termokamera.php>
- [51] DUS architects: kamermaker 3D printer pavilion. *Designboom* [online]. ©2019 [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://www.designboom.com/architecture/dus-architects-kamermaker-3d-printer-pavilion/>
- [52] KamerMaker. *ArchDaily* [online]. 2008-2019 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/274798/kamermaker-mobile-3d-printer-inspires-potential-for-emergency-relief-architecture>
- [53] GAMA, N., A. FERREIRA a A. BARROS - TIMMONSA. 3D printed cork/polyurethane composite foams. In: *Materials & Design* [online]. Elsevier, 2019 [cit. 2019-12-03].

- [54] MALEKI, Hajar, Susan MONTES, Nastaran HAYATI-ROODBARI, Florian PUTZ a Nicola HUESING. Compressible, Thermally Insulating, and Fire Retardant Aerogels through Self-Assembling Silk Fibroin Biopolymers Inside a Silica Structure—An Approach towards 3D Printing of Aerogels. *ACS Applied Materials & Interfaces* [online]. 2018, 10(26), 22718-22730 [cit. 2020-01-03]. DOI: 10.1021/acsami.8b05856. ISSN 1944-8244. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.8b05856>
- [55] Fused Deposition Modeling (FDM). *Materialise* [online]. ©2019 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/fused-deposition-modeling-fdm>
- [56] Filament Properties Table. *Simplify 3D* [online]. ©2019 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/?highlight=asa>
- [57] Filaments for Outdoor Use. *Tractus 3D* [online]. ©2019 [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://tractus3d.com/filaments-for-outdoor-use/>
- [58] Materiálový slovník. *Materialpro3D* [online]. ©2019 [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [59] STYROBALL PLUS. *Enroll CZ spol. s r.o* [online]. [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <https://www.enroll.cz/cs/styroball-plus-tepelna-izolace-z-expandovaneho-polystyrenu-s-ochranou-proti-skudcum/>
- [60] Prostup tepla stavební konstrukcí. *Tzb-info* [online]. Topinfo, ©2001-2020 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/prostup-tepla-stavebni-konstrukci>
- [61] KULHÁNEK, František. Stavební fyzika II: stavební tepelná technika. Vyd. 3., přeprac. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03408-9.
- [62] EIGENSATZ, Michael, Martin KILIAN, Alexander SCHIFTNER, Niloy J. MITRA, Helmut POTTMANN a Mark PAULY. Paneling architectural freeform surfaces. *ACM Transactions on Graphics* [online]. 2010, 29(4) [cit. 2020-01-03]. DOI: 10.1145/1778765.1778782. ISSN 07300301. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1778765.1778782>

- [63] WALLNER, Johannes a Helmut POTTMANN. Geometric Computing for Freeform Architecture. *Journal of Mathematics in Industry* [online]. 2011, 1(1) [cit. 2020-01-03]. DOI: 10.1186/2190-5983-1-4. ISSN 2190-5983. Dostupné z: <http://mathematicsinindustry.springeropen.com/articles/10.1186/2190-5983-1-4>
- [64] "Curve Appeal" will be globe's first Freeform 3D printed house. *Archinect* [online]. 2016 [cit. 2019-12-26]. Dostupné z: <https://archinect.com/news/article/149956296/curve-appeal-will-be-globe-s-first-freeform-3d-printed-house>
- [65] Softkill. *AA school* [online]. c2014 [cit. 2019-12-26]. Dostupné z: <http://drl.aaschool.ac.uk/portfolio/softkill/>
- [66] The future of facades: How 3D printing is revolutionising architectural restoration. *Independent* [online]. 2018 [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: <https://www.independent.co.uk/life-style/design/3d-printing-buildings-architecture-design-futuristic-restoration-a8297911.html>
- [67] Projects. *Arch - photos* [online]. [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://www.arch.photos/projects/nordpark-cable-railway4>
- [68] Building a dual-curved facade with pre-fabricated panels. *Zahner* [online]. 2014 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://www.azahner.com/blog/building-a-dual-curved-facade-with-pre-fabricated-panels>
- [69] How Crossrail is using 3D-printing to build its stations. *IanVisits* [online]. 2017 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.ianvisits.co.uk/blog/2017/09/28/how-crossrail-is-using-3d-printing-in-its-stations/>
- [70] 3F Studio designs a 3D Printed Façade for Munich's Deutsches Museum. *Archdaily* [online]. 2019 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/912560/david-wolfertstetter-and-tum-design-a-3d-printed-facade-for-munichs-deutsches-museum>

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 BIM [4]..... | 11 |
| Obrázek 2 Průmysl 4.0 [5]..... | 12 |
| Obrázek 3 Schéma technologie FDM [25] | 16 |
| Obrázek 4 3D tiskárna Prusa i3 [Prusa Research] | 16 |
| Obrázek 5 Graf nejpoužívanějších 3D tiskových technologií v roce 2018 [27] | 17 |
| Obrázek 6 Schéma procesu 3D tisku technologií FDM [55] | 17 |
| Obrázek 7 Materiály pro 3D tisk [12] | 18 |
| Obrázek 8 Vlastnosti materiálů [14] | 19 |
| Obrázek 9 Graf porovnání nákladů 3D tisku a vstřikování plastů v závislosti na počtu kusů [5] | 21 |
| Obrázek 10 Topologická optimalizace s využitím generativního designu a 3D tisku [16] | 22 |
| Obrázek 11 Architektonický pavouk z titanové litiny [Renishaw] | 23 |
| Obrázek 12 3D tištěná obuv [Adidas]..... | 23 |
| Obrázek 13 Vizualizace 3D tisku stavby na Měsíci [NASA]..... | 24 |
| Obrázek 14 3D vizualizace [20]..... | 25 |
| Obrázek 15 Architektonický model [21]..... | 25 |
| Obrázek 16 Rámová velkoformátová 3D tiskárna [28]..... | 26 |
| Obrázek 17 Robotická technologie pro 3D tisk z betonu [Hyperion Robotics]..... | 26 |
| Obrázek 18 3D tištěný most v Madridu [21] | 27 |
| Obrázek 19 3D tisk z hlíny [22] | 27 |
| Obrázek 20 Ekologický dům "TECLA", otvor na stropě jako řešení vrchlíkového efektu [22] | 28 |
| Obrázek 21 Vytištěná kabina v Amsterdamu [21] | 28 |
| Obrázek 22 Velkoformátová 3D tiskárna KameMaker [51]..... | 29 |
| Obrázek 23 Velkoformátová 3D tiskárna KameMaker [43]..... | 29 |
| Obrázek 24 Schodišťový efekt [31] | 30 |
| Obrázek 25 Sloupy s vnitřní výplní na principu minimálních ploch, vytištěné z plastu [32] | 31 |
| Obrázek 26 3D tištěný gradientní beton [MIT]..... | 31 |
| Obrázek 27 Oblast kondenzace vodní páry v konstrukci [61]..... | 37 |
| Obrázek 28 Měření tepelných ztrát objektu termokamerou [50] | 39 |
| Obrázek 29 Skladba ETICS [41] | 40 |
| Obrázek 30 Část konstrukce se zápornou Gaussovou křivostí [63] | 43 |
| Obrázek 31 Panelová výstavba [panelaky.info] | 44 |
| Obrázek 32 Stavba z místních materiálů [ice-camp.at]..... | 44 |
| Obrázek 33 Návrh stavby vytvořené technologií 3D tisku z plastu ABS vyztuženého karb. [64] | 44 |
| Obrázek 34 Návrh konstrukce vytvořené aditivní výrobou [65]..... | 45 |
| Obrázek 35 Organický design [3dprintingindustry.com]..... | 45 |
| Obrázek 36 Mrakodrap budoucnosti [Retro futuristic]..... | 46 |
| Obrázek 37 Tepelná izolace [Wetherby Building Systems Ltd] | 47 |
| Obrázek 38 Aplikace stříkané pěnové izolace [ICYNENE] | 47 |
| Obrázek 39 Heydar Aliyev Centre v Baku [44]..... | 48 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 40 Detail fasády Heydar Aliyev Centre [45]..... | 48 |
| Obrázek 41 Montáž fasády Heydar Aliyev Centre [46] | 48 |
| Obrázek 42 Zakřivené skleněné výplně otvorů [47]..... | 49 |
| Obrázek 43 Tančící dům v Praze [49]..... | 49 |
| Obrázek 44 Art museum Kunsthaus Graz [Foamglas] | 50 |
| Obrázek 45 Detail fasády Art museum Kunsthaus Graz [Foamglas] | 50 |
| Obrázek 46 Vzorky vytištěné technologií 3D tisku z PU pěny a korku [53] | 56 |
| Obrázek 47 Model panelu "A" [autor]..... | 57 |
| Obrázek 48 3D tiskárna KamerMaker - vstupní materiál [51]..... | 58 |
| Obrázek 49 Barevné varianty filamentu ASA [3DXTech]..... | 61 |
| Obrázek 50 STYROBALL [59] | 63 |
| Obrázek 51 Proces panelizace [62] | 64 |
| Obrázek 52 Zdvíhací montážní plošina [Plošiny-Perůtka] | 66 |
| Obrázek 53 Ilustrační obrázek univerzálního konstrukčního PU lepidla [Mastersil] | 66 |
| Obrázek 54 Velkoformátové panely vytištěné na t. KamerMaker [Fabbaloo, DUS Architects] ... | 67 |
| Obrázek 55 3D vytištěná struktura "digital grotesque II" [Designboom] | 68 |
| Obrázek 56 Vizualizace moderní ornamentální fasády [66] | 69 |
| Obrázek 57 Ornament vytvořený technologií 3D tisku [66]..... | 69 |
| Obrázek 58 Nordpark Cable Railway, Rakousko [67, Zaha Hadid Architects] | 70 |
| Obrázek 59 Obchodní dům Neiman Marcus, USA [68] | 70 |
| Obrázek 60 Betonové panely v londýnském metru [69]. | 71 |
| Obrázek 61 Deutsches Museum v Mnichově [70] | 71 |
| Obrázek 62 Detail fasády vytvářené 3D tiskem [70]..... | 71 |
| Obrázek 63 Model panelu - varianta A1 [autor] | 75 |
| Obrázek 64 Model panelu - varianta A2 [autor] | 76 |
| Obrázek 65 Model panelu - varianta B1 [autor] | 76 |
| Obrázek 66 Vizualizace sestavy panelů D se zalomenou spárou [autor]..... | 77 |
| Obrázek 67 Vizualizace sestavy panelů C pro měření součinitele tepelné vodivosti [autor]..... | 77 |
| Obrázek 68 Vizualizace sestavy panelů D s víčky [autor] | 77 |
| Obrázek 69 Vizualizace sestavy panelů C s víčky [autor] | 77 |
| Obrázek 70 Detail panelu A ve Slic3r PE [autor] | 78 |
| Obrázek 71 Panel A ve Slic3r PE [autor] | 78 |
| Obrázek 72 Panel A ve Slic3r PE - export G -code [autor]..... | 79 |
| Obrázek 73 Panel A s výplní gyroid [autor]..... | 79 |
| Obrázek 74 Struktura panelu D [autor] | 80 |
| Obrázek 75 Struktura panelu B [autor]..... | 80 |
| Obrázek 76 Vizualizace tiskových podpor panelu D [autor, slic3r PE] | 80 |
| Obrázek 77 Tisk panelů na 3D tiskárně [autor]..... | 81 |
| Obrázek 78 Nezdařený tisk panelu D [Ing. M. Kovářík]..... | 81 |
| Obrázek 79 Vytištěné panely s dočasnými podporami [Ing. M. Kovářík]..... | 82 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 80 Odstraněná tisková podpora [autor] | 82 |
| Obrázek 81 Víčka k uzavření panelů [autor] | 82 |
| Obrázek 82 Sestavy TI panelů vyrobených technologií 3D tisku [Ing. M. Kovářík]..... | 83 |
| Obrázek 83 Zajištění panelů D proti deformaci během plnění [autor]..... | 84 |
| Obrázek 84 Panely vyplněné PUR pěnou [autor] | 85 |
| Obrázek 85 Vypěněný panel [autor] | 85 |
| Obrázek 86 Odříznutá přebytečná PUR pěna [autor] | 85 |
| Obrázek 87 Tepelně - izolační panely [autor]..... | 86 |
| Obrázek 88 Měřič tepelného toku Linseis HFM 300 [autor] | 88 |
| Obrázek 89 Panel D vložený do měřicího přístroje [autor] | 89 |
| Obrázek 90 Naplněný panel C v měřícím přístroji zatížený závažím [autor] | 89 |
| Obrázek 91 Měření panelu C [autor] | 90 |
| Obrázek 92 Měření panelu D [autor] | 90 |
| Obrázek 93 Teplotní pole [autor, AREA 2017 EDU] | 94 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 1 Doporučené normové hodnoty součinitele prostupu tepla – výřez tabulky [37]..... | 38 |
| Tabulka 2 Vlastnosti plastových filamentů [56, upraveno autorem]..... | 59 |
| Tabulka 3 Vlastnosti plastových filamentů [56, upraveno autorem]..... | 60 |
| Tabulka 4 Technický list filamentu ASA [3D4Makers.com]..... | 74 |
| Tabulka 5 Přehled vytvořených panelů [autor]..... | 83 |
| Tabulka 6 Technický list PUR pěny [Den Braven] | 87 |
| Tabulka 7 Výsledky měření tepelně - izolačních vlastností panelů [autor] | 91 |
| Tabulka 8 Prvky v teoretickém panelu [doc. RNDr. Vítězslav Vydra, CSc] | 91 |
| Tabulka 9 Zkrácený protokol o výpočtu [autor, AREA 2017 EDU] | 92 |
| Tabulka 10 Tabulka tepelně izolačních materiálů [autor]..... | 94 |