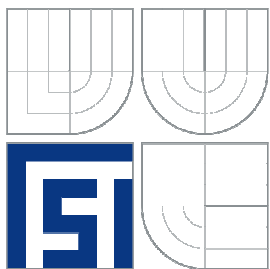


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

KONSTRUKCE A VÝROBA TĚLESA CHLAZENÍ PRO OPEN SOURCE FMD TISK

CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF COOLING ELEMENT FOR OPEN
SOURCE FDM PRINTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ladislav LUTERA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar ZEMČÍK, Ph.D.

BRNO 2013

Místo tohoto listu bude vloženo zadání (oboustranně). Zadání musí být vevázáno v obou vyhotoveních práce. Do druhého výtisku bude vložena kopie.

Tento list není třeba tisknut!

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na téma „Rozbor problematiky FDM tisku s ohledem na regulaci teploty místa tisku. Záměrem je konstrukce tělesa chlazení zvolené FDM tiskárny. Výroba tělesa chlazení na FDM tiskárně. Součástí práce je testování a hodnocení funkce chlazení místa tisku.

Klíčová slova

3D tisk, reppap, chlazení, FDM tisk.

ABSTRACT

The work is focused on "Analysis of the issue FDM printing with regard to the temperature control point print. The intention is to design cooling element selected FDM printer. Production of body cooling on FDM printert. Part of this work is the testing and evaluation of the cooling function space printing.

Keywords

3D Printing, RepRap, space cooling press, FDM printing.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LUTERA, Ladislav. *Konstrukce a výroba tělesa chlazení pro open source FDM tisk*. Brno 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 35 s. příloh. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Konstrukce a výroba tělesa chlazení pro open source FDM tisk** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Ladislav LUTERA

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Velké poděkování zaslouží manželka Marta, za trpělivost a podporu s jakou mě podporovala ve studiu.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1 3D TISK.....	9
1.1 Historie.....	9
1.2 Trendy	9
1.3 Technologie.....	10
1.4 Komerční vývoj.....	11
1.5 Open-source	12
1.6 RepRap.....	12
2 TECHNOLOGIE FDM.....	14
2.1 Ustavení modelu.....	14
2.2 Výhody technologie FDM.....	15
2.3 3D optické skenování a měření	15
2.4 Materiály pro FDM tisk	16
2.5 Charakteristika termoplastu ABS.....	17
3 MODEL CHLAZENÍ	18
3.1 Návrh modelu.....	18
3.2 Software	20
3.3 Technologičnost konstrukce tělesa	22
3.4 Návrh tvaru a umístění chlazení.....	22
3.5 Konstrukce dílu chlazení.....	24
3.6 Řezy.....	25
3.7 Technická data ventilátoru	28
4 VÝPOČTOVÉ VZTAHY PRO PROUDĚNÍ VZDUCHU	29
4.1 Měření hlučnosti.....	34
ZÁVĚR	35
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	36
SEZNAM PŘÍLOH.....	40

ÚVOD

3D tisk je v poslední době skloňován ve všech pádech, je to fenomén doby, kdy si každý uživatel může za poměrně malou počáteční investici pořídit 3D tiskárnu a v domácím prostředí vyrábět drobné plastové předměty. Muže si svoji tiskárnu, až na pár kovových dílu, celou vyrobit sám. Od toho je i název projektu RepRap. Slovo RepRap je zkratka pro Replicating Rapid-Prototyper. Tento projekt open-source se stal světovou revolucí. Každý se může zapojit do celosvětové diskuze, při které si uživatelé vzájemně poskytují informace při zlepšování a vývoji svých tiskáren.

Cílem této práce je posoudit a otestovat možnosti dodatečného řízeného chlazení místa v blízkosti tiskové hlavy a zároveň posoudit možnosti zvýšení rychlosti tisku. Návrh konstrukce dílu chlazení, tak aby splňoval podmínky výroby na vlastní 3D tiskárně a naplnila se tím myšlenka RepRap projektu.

První část práce se zabývá návrhem konstrukce dílu chlazení okolí tiskové hlavy s ohledem na technologičnost použitého materiálu. To znamená vyřešení umístění chladicí jednotky a s ní spojené díly pro vedení proudícího plynu s ohledem na tvarové provedení tiskárny.

Další část je věnována vlastní konstrukci dílu chlazení a rozbořem jednotlivých částí s ohledem na specifické vlastnosti použitého stavebního materiálu. Kde stavebním materiálem je termoplast ABS. Následná výroba dílu chlazení na 3D tiskárně, ověření technologičnosti konstrukce výroby.

Na závěr je provedeno testování proudění vzduchu a schopnost ochladit okolí místa tisku.

1 3D TISK

3D tisk je proces, při kterém se prostřednictvím specifického zařízení, vytvářejí trojrozměrné objekty z vhodného materiálu. Tisk po vrstvách je řízen elektronikou na základě programové předlohy.

3D tiskárna je zařízení, které vyrábí reálný plastový model z digitálního modelu vytvořeného pomocí některého z grafických programů např.: 3D studio nebo Rhino. Princip zařízení spočívá v rozložení digitálního modelu do vrstev o tloušťce přibližně 0,12 mm až 0,33 mm a následném sestavení těchto vrstev do fyzického modelu v pracovním prostoru tiskárny. Takto zhotovený model je možné dále upravovat (brousit, vrtat) nebo povrchově upravovat (tmelit, barvit). Rychlost tisku a spotřebu materiálu zásadně ovlivňují dva parametry, požadovaná kvalita a vnitřní výplň. Dalším nezanedbatelným parametrem je pak také složitost výtisku [1].

1.1 Historie

Počátky technologie 3D tisku sahají do druhé poloviny 20. století, kdy si Charles Hull nechal patentovat v roce 1986 technologii s názvem stereolitografie (SLA). Principem je trojrozměrný laserový tisk pomocí UV laseru a tekutého fotopolymery. Koncem 90. let pak Hull zakládá novou firmu 3D Systems a vytváří první zařízení tisknoucí v 3D formátu pro širokou veřejnost SLA -1. Tyto modely se staly základem vývoje dnešních 3D tiskáren. SteroLithography Aparatus SLA -1 je doposud k vidění ve Fordově museu v Dearborn Michigan.

Nástupem konkurence na trh přicházejí i nové technologie, např. Fused Deposition Modeling (FDM) nebo Selektive Laser Sintering (SLS) [1].

1.2 Trendy

Od roku 2003 je technologický vývoj urychlen vypršením některých patentů. Vzniká nová technologie polyjet, pracující s fotopolymery, který je kladen v tenkých vrstvách na podložku. V tavicí hlavici je roztaven plast a v tenké vrstvě dvojrozměrně pokládán na podložku, která se pohybuje ve třetím rozměru. Nejvíce využívanými materiály této technologie jsou akrylonitrilbutadienstyren (ABS), polyamid (PLA), polyetylen (HDPE). Tato technologie je vhodná i pro menší tiskárny, vznikají možnosti domácího využití. 3D tisk se využívá už i v lékařství, kde jsou vědci schopni tisku celých tkání. Na Vídeňské univerzitě byl proveden výzkum s „nanotiskem“, kdy se podařilo sestavit tak malé objekty. Oproti tomu se ověřilo, že jde i o tisk velkých předmětů. Jako například tisk domu. Tým doktora Behrokh Khoshnevis dokázal stavět kruhové zdi vysoké až 6 stop. Samozřejmě tyto domy nejsou z plastu, ale byl na ně použit materiál vláknobeton. Do budoucna to dává netušené možnosti v oblasti rychlé výstavby, například po živelných katastrofách.

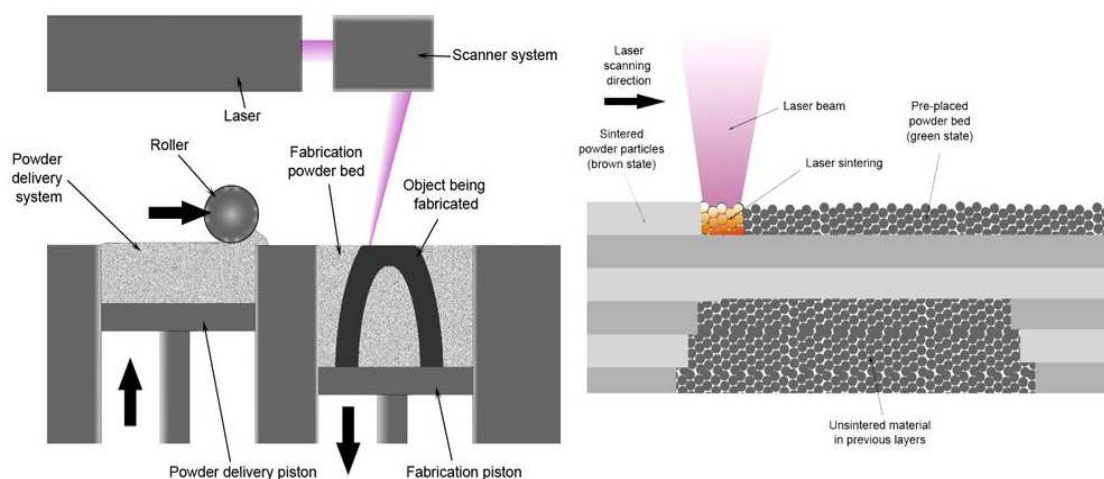
V současnosti se dostupnost tiskáren dostala na cenovou úroveň, kdy si každý může koupit tiskárnu pro méně náročné aplikace. Jedna z těchto „levných“ tiskáren od firmy MakerBot je na obr. 3 [1,18,25].

1.3 Technologie

Od konce dvacátého století vznikly nebo se vyvinuly nové technologie. Započal to komerční vývoj ve velkých firmách a dnes se tomu na platformě Open source věnuje mnoho jednotlivců a malých skupin z celého světa. Hlavní technologie jsou popsány dále.

SLA Stereolitografie – nejstarší technologie používaná od roku 1986, vytvrzování tekutého kompozitu laserovým paprskem, univerzální technologie.

SLS Selektive Laser Sintering (viz obr. 1) – zapékání práškového materiálu laserovým paprskem. Tloušťka vrstvy je asi 0.1 mm. Výhodou je nízká cena použitého materiálu a možnost jeho výběru (plast, kov, sklo v práškové podobě). Nevýhodou pak je jeho vysoká cena na pořízení stroje.



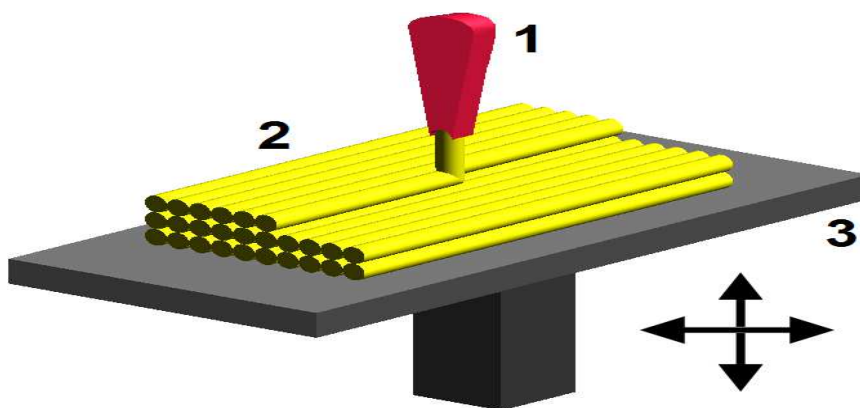
Obr. 1 Princip metody SLS [2].

ZCORP – z tiskové hlavy je vytlačováno pojivo, které spojuje práškový materiál, nanášený v tenkých vrstvách. Je možné použít barevné materiály, model je velmi křehký, jeho povrch není hladký a vyžaduje další povrchovou úpravu.

LOM – Laminated Object Manufacturing, vrstvy jsou vyříznuty z plastu a lepeny jedna na druhou, jejich tloušťka je 0,165 mm. Výhodou je levnější materiál, velmi kvalitní povrch i přesnost dílů, nevýhodou je velký odpad.

POLYJET MATRIX – z tiskové hlavy je vytlačován fotopolymer, který je následně vytvrzen pomocí lampy. Využívají se dva druhy materiálu – stavební a podpůrný. Velká přesnost detailů, malá životnost podpůrného materiálu. Vhodné na modely s vysokou mírou detailu.

FDM - Fused Deposition Modeling (viz obr. 2) – tiskový materiál (termoplast) je pod tlakem zaváděn do tiskové hlavy, kde je roztaven, následně je pak tenkou vrstvou vytlačen ven. Celá tisková hlava provádí v horizontální poloze těsně nad podložkou 2D pohyb a nanáší na podložku vrstvu o tloušťce asi 0,25 mm. Po malých, vodorovných vrstvách nanášených na sebe vzniká model, který ale nemá dokonale hladký povrch, nevhodné pro subtilní konstrukce.



Obr. 2 Znáznornění nanášení vrstev materiálu FDM [6].

MULTI JET MODELING – vytlačování materiálu (termoplastického vosku) z tiskové hlavy. Používají se dva typy materiálů – stavební a podpurný, každý má jinou teplotu tání. Podpurný materiál je odstraněn pomocí zahřátí modelu.

THERMOPLASTIC INKJET WITH MILLING - tato technologie je kombinací vytlačování materiálu z tiskové hlavy a následným frézováním v horizontálním směru. Používán je termoplastický materiál, velmi vysoká přesnost.

EBM – Elektronik Beam Mealtng, technologie vyniká vysokou přesností vytištěných modelů a jejich dobrými technickými vlastnostmi. Pro svou náročnost je málo rozšířena. Používá usměrněný proud elektronů, který je pouštěn do tiskového materiálu (zpravidla titanového prachu). Zařízení pracující na základě této technologie jsou velice drahá, protože celý proces musí probíhat bez přítomnosti vzduchu [2,6,25].

1.4 Komerční vývoj

Komerční tisk na průmyslových tiskárnách je v současné době kvalitnější a vývojově dál než tisk na domácích nekomerčních tiskárnách, avšak je limitován vývojovými týmy a finančními prostředky. Pořízení průmyslové 3D tiskárny je velmi finančně nákladné.

V současné době se komerčnímu průmyslovému tisku věnuje řada firem, např. KIRAD, Object Geometries, Stratasys, 3D Systems, EOS GmgH či Z Corporation. Spolu s technologií polyjet vývoj 3D tisku směřuje k podobě malých domácích 3D tiskáren [5].

1.5 Open-source

Open-source, volně přeloženo jako volný přístup, je způsob vývoje a distribuce, který každému potenciálnímu zájemci umožňuje přístup ke zdrojovým datům daného produktu.

Největší výhodou volného přístupu je možnost volně upravovat a vyvíjet daný produkt v rámci komunity mnoha uživatelů. Vývoj je tak většinou mnohem rychlejší a v podstatě nepřetržitý v porovnání s komerčně vyvíjenými produkty. Firmy totiž nerady zadarmo uvolňují jakékoliv informace z vývoje.

Open-source taky znamená dodržovat distribuční podmínky. Musí splňovat určitá kritéria s ním spojené. Licence nesmí být v žádném směru nějak omezena, jako například poplatky, omezením v oblasti tvorby a distribuce díla, musí umožňovat další poskytování v neomezeném zdrojovém kódu. Jedním ze základních principů je nediskriminovat žádnou skupinu uživatelů. Licence má být technologicky neutrální, nemá omezovat ani jinak být omezována šířenými programy. Nesmí omezovat jiný software.

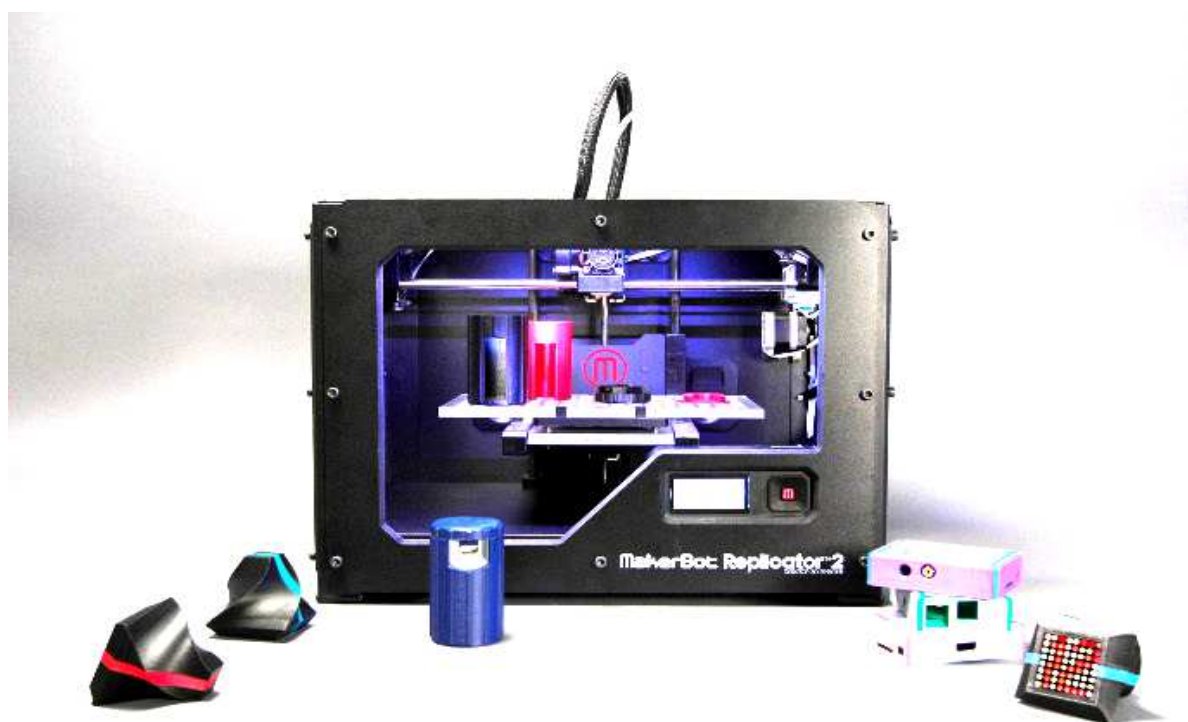
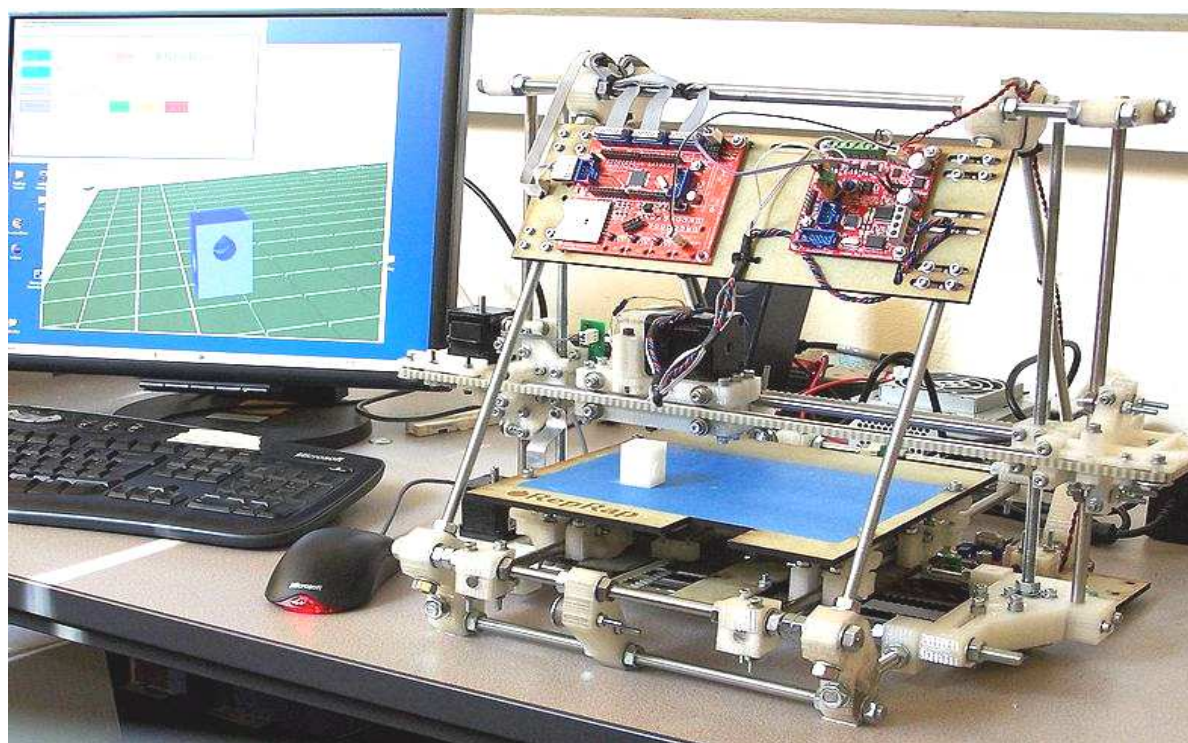
Nejčastěji se s tímto termínem pracuje v oblasti informačních technologií. Právě zde je také k nalezení nejvíce open-source produktů - programů a aplikací (například Mozilla Firefox či OpenOffice.org), jazyků (například Python, PHP) či operačních systémů (pravděpodobně nejznámější je Linux či mobilní Android).

Software označený jako "free software" je chráněn autorským právem, ačkoliv rozdíly oproti open-source jsou malé. Bývá definován licencemi, upravujícími vztah autor - uživatel. Mezi nejčastější z nich patří Apache License, MIT License, GNU GPL (GNU General Public License), či velmi liberální BSD [5,19].

1.6 RepRap

RepRap, jak již bylo vysvětleno výše, je praktická samo kopírovací 3D tiskárna, která vrstvením plastového materiálu vytváří předměty. Lze udělat spoustu užitečných věcí. Zajímavostí je, že takto se dá vyrobit většina vlastních dílů a tím i další 3D tiskárna. V rámci open-source licence a dle zásad volného software je možná další distribuce RepRap stroje. Prvořadým cílem projektu je vytvořit další stroje, aby mohli další majitelé levně a snadno využívat těchto výhod. Více hlav, více myšlenek na zdokonalení a tím i rychlejší vývoj.

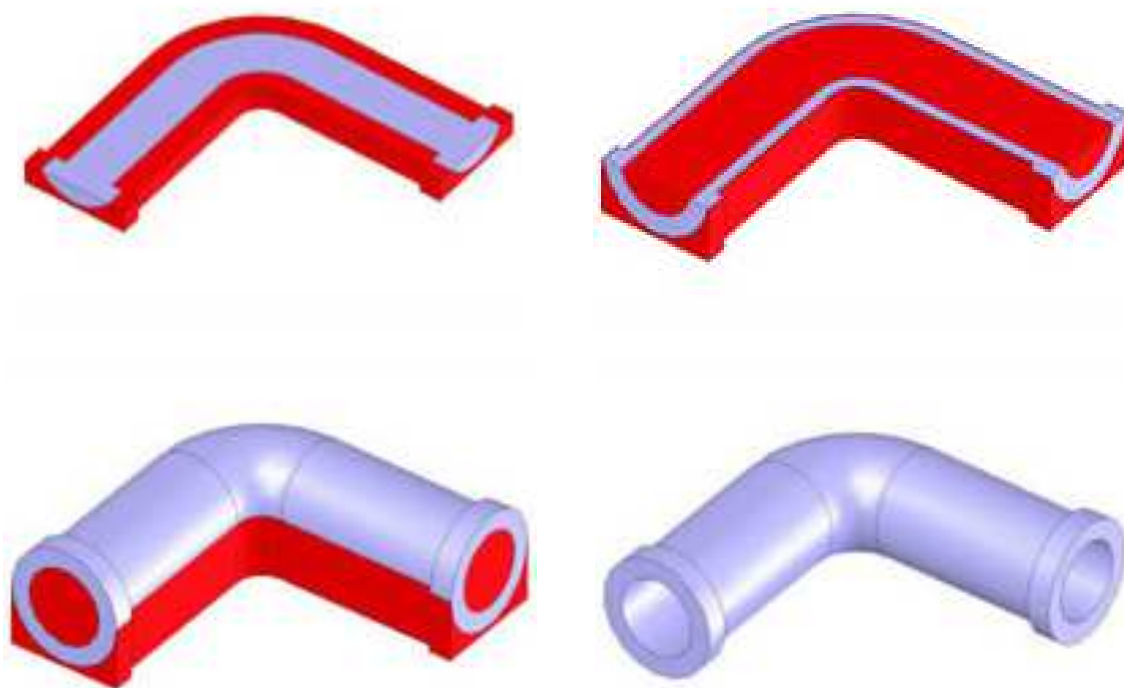
Reprap.org je komunitní projekt, to znamená, že jsou vítáni všichni při úpravě většiny stránek na tomto webu, nebo ještě lépe, k vytvoření nové vlastní stránky. Komunitní portál a nový vývoj stránek má více informací o tom, jak se zapojit. Pro porovnání: tiskárna předního výrobce MakerBot Replicator 2 a 3D tiskárna Průša Mendel od českého vývojáře Josefa Průši (viz obr 3). Josef Průša je asi nejznámější představitel tohoto projektu u nás. Patří mezi přední vývojáře RepRap projektu. Základem pro jeho tiskárnu byl model Mendel, který upravil a poskytl v rámci open-source dalším uživatelům. Renomovaná firma MakerBot představila levnou tiskárnu Replikátor 2. Tato tiskárna v současné době představuje špičku mezi levnými domácími tiskárnami [20,21].



Obr. 3 3D tiskárna Průša Mendel a profi tiskárna Replicator 2 [6,22].

2 TECHNOLOGIE FDM

FDM (Fused Deposition Modeling) je výrobní technologie, která staví funkční prototypy a výrobní části vrstvením taveniny termoplastů na sebe. Skládá se ze zahřívání termoplastu ve formě vlákna na teplotu bodu tání. Následné vytlačování roztaveného plastu z tavící trysky a pokládání do horizontálních vrstev. Následné skládání jednotlivých vrstev povrchu dle cest generovaných STL souborem. Pokládání vrstvy po vrstvě umožňuje vytvářet složité geometrie, nedosažitelné tradičními výrobními metodami. Žádný proces, ale neumožňuje postavení části ve vzduchu bez možné podpory. FDM to řeší využitím podpůrného materiálu s výrazně nižším stupněm trvanlivosti než materiál modelu, které spolu tvoří hotové součásti. Materiál modelu je pokládán ve vrstvách spolu s nosným materiálem, po ukončení je podpůrný materiál odstraněn. Typické tloušťky vrstev jsou od 0,127 mm do 0,330 mm. Na obr. 4 je názorně ukázána technologie tisku FDM [9].



Obr. 4 Postupné vrstvení nosného a podpůrného materiálu u technologie tisku FDM [9].

2.1 Ustavení modelu

Model je při tisku ustavován na podložku s ohledem na:

- požadovanou pevnost,
- požadovanou kvalitu povrchu,
- čas tisku a cenu modelu.

2.2 Výhody technologie FDM

- technologie FDM je zvláště vhodná, pro výrobu funkčních prototypů plastových částí s mechanickými vlastnostmi, které se blíží reálnému výlisku,
- pro díly, které se uplatní při výrobě maket a pohledových vzorků,
- Touto technologií lze vyrobit téměř jakýkoliv tvar, včetně funkčních nerozebíratelných sestav,
- technologie umožňuje výrobu mechanismů a jejich částí,
- rychlé vytvoření dílů z dodaných 3D modelů - obdržíte funkční část v rozmezí hodin až dnů (podle složitosti a velikosti součástí),
- maximální velikost tisknutých součástí je omezena velikostí podložky. Větší části mohou být vyrobeny lepením menších dílů. Přesnost a pevnost lepených částí je velmi vysoká,
- nevýhodou bývá menší pevnost v ose „Z“ [8].

2.3 3D optické skenování a měření

Jednou z možností jak zadat tiskárně data pro tisk je 3D optické skenování. V podstatě je to převedení fyzického objektu do počítačových dat za použití 3D skeneru. Po nasnímání objektu vytvoří počítačový model a umožní tak jeho následný export do různých datových formátů. Další funkcí optického skenování je porovnání fyzického objektu s teoretickým CAD modelem a vyhodnocení odchylek tvaru a polohy (viz obr. 5).

Použití:

- digitalizace objektů, ke kterým nejsou k dispozici výrobní podklady,
- rozměrová a tvarová kontrola objektů,
- rekonstrukce poškozených objektů.

Přednosti optického skenování:

- okamžité vytvoření CAD modelu z nasnímaných dat,
- vysoké rozlišení a přesnost,
- mobilita měřicího zařízení,
- vyhodnocení odchylek od CAD dat dodaných zákazníkem, získání řezů apod.,
- export dat do různých formátů,
- možnost kombinace s metodami Rapid Prototyping nebo s CAM systémy,
- flexibilita - lze měřit objekty od několika milimetrů do několika metrů,
- hmotnost a velikost měřeného objektu je prakticky neomezená [8,15,25].



Obr. 5 Optický laserscanner Starter Kit [15].

2.4 Materiály pro FDM tisk

Mezi nejčastěji používané materiály patří ABS (Akrylonitril Butadien Styren), PLA (Polylactic acid), HDPE (HighDensityPolyEthylen), PP (polypropylen) nebo PCL (Polycaprolactone). Nejlepších výsledků z hlediska kvality je dosahováno s použitím ABS popřípadě s PLA.

Granulát ABS Akrylonitrilbutadienstyren nebo taky ACRYNITRIL - BUTADIEN - STYREN (zkratka ABS) je amorfni termoplastický průmyslový kopolymer, který je odolný vůči mechanickému poškození. Tuhý, houževnatý, dle typu odolný proti nízkým i vysokým teplotám, málo nasákavý, zdravotně nezávadný. Je odolný vůči kyselinám, louhům, uhlovodíkům, olejům, tukům. ABS se vyrábí z fosilních paliv, není proto biologicky odbouratelný. Povrchová úprava je možná broušením, tmelením nebo lakováním pomocí akrylových barev. Vlastní barevný odstín termoplastu může být černá, bílá, červená, žlutá, modrá, zelená a jejich vzájemné kombinace. Zpracovávat ho lze do teploty 280 °C. Při vyšší teplotě se začne rozkládat.

Mezi nejvýznamnější patří užití při výrobě nábytku, při zapravení hran u rovných i u tvarových LTD desek. Na lepení těchto hran jsou určeny speciální stroje, které lepí ABS hrany na díly z LTD desek pomocí tavného lepidla.

Může být tepelně tvarován, řezán, stříhán, dokonce je možné ho lisovat za studena. Spojování je možno provádět ultrazvukové svařování, tepelné svařování. Lepit lze lepidly na bázi toluenu a metylenchloridu a také polyakrylátovými lepidly. Je odolný proti nárazu. Vyrábějí se z něj části bezpečnostních přileb, potrubí, autodílny, tělesa manipulačních zařízení apod. [3,4].

Modely a prototypy z ABS materiálu jsou pevné, rozměrově stabilní a velmi snadno se povrchově upravují. Modely lze použít pro vizualizaci, testování, vyzkoušení smontovatelnosti sestavy a u méně namáhaných dílů i jako plně funkční prvky. Modely z ABS materiálu lze také použít pro zaformování do keramické skořepiny – metoda vytavitelného modelu, nebo jako master model pro výrobu silikonové formy pro následné odlití menších sérií z polyuretanových pryskyřic [10].

PLA neboli Polylactic acid je termoplastický alifatický polyester, vyrábí se z kyseliny mléčné.

Je tvrdší než PTFE a taje při nižší teplotě (asi 180 °C až 220 °C), teplota skelného přechodu je mezi 60-65 °C, takže je to potenciálně velmi užitečný materiál. Ale má snahu nasávat vlhko ze vzduchu.

Původní použití nachází v oblasti biomedicíny. Na konci minulého století se začal používat v potravinářství jako plastové obaly, folie nebo jednoúčelové nádoby. Je ideálním materiálem pro 3D tisk. Během 3D tisku velice rychle chladne, proto zamezuje zkroucení nebo deformaci hotového výrobku. Díky této vlastnosti je předurčen pro výrobu geometricky složitých a komplikovaných dílů [3,4].

2.5 Charakteristika termoplastu ABS

ABS (akrylonitril-butadien-styren) je termoplast, s dobrými mechanickými vlastnostmi a s dobrým poměrem mezi tuhostí a odolností proti nárazu. Tiskne s lesklým povrchem a vzhledem k jeho vyšší teplotě tání má tendenci se zvlnit trochu víc, než PLA. Není doporučován na velké a funkční části. V tab. 1, 2, 3 jsou uvedeny vlastnosti termoplastu ABS [12].

Tab. 1 Mechanické vlastnosti ABS [12,13].

MECHANICKÉ VLASTNOSTI PLASTU ABS		
Napětí na mezi kluzu	45	MPa
Tažnost	10	%
E- modul pružnosti v tahu	2300	MPa
Tvrdost podle Brinella	90	MPa
Měrná tepelná kapacita	1,4	$\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
Hustota	1020 – 1070	$\text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$
Nasákavost	0,22 - 1	%
Povrchový elektrický odpor	1,00E + 13	Ohm
Průrazová pevnost	41	$\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$

Tab. 2 Teplotní vlastnosti ABS [12,13].

TEPLOTNÍ VLASTNOSTI ABS		
Tepelná vodivost	0,17	$\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Teplota tavení pro tisk	195 - 250	°C
Teplota zesklivatění	110	°C
Tvarová stálost -1,8MPa	80	°C
Tvarová stálost – 0,45MPa	92	°C
Max. krátkodobá teplota	100	°C
Max. dlouhodobá teplota	95	°C
Min. teplota	-30	°C

Tab. 3 Chemické vlastnosti materiálu ABS [12].

CHEMICKÉ VLASTNOSTI ABS	
Minerální maziva	Odolný
Benzíny	Odolný
Horká voda (hydrolýza)	Odolný
Silné louhy	Odolný
Atmosférické podmínky	Podmíněně odolný
Perchlorethylen	Podmíněně odolný
Aceton	Podmíněně odolný
Alkoholy	Podmíněně odolný
Trichlorethylen	Neodolný
Silné minerální kyseliny	Neodolný

3 MODEL CHLAZENÍ

Využití modelů

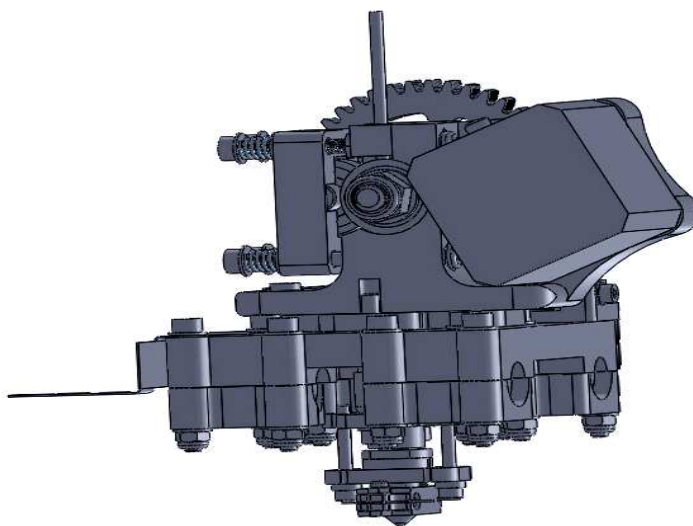
Modely a prototypy z ABS materiálu jsou pevné, rozměrově stabilní a velmi snadno se povrchově upravují. Modely lze použít pro vizualizaci, testování, vyzkoušení smontovatelnosti sestavy a u méně namáhaných dílů i jako plně funkční prvky. Modely z ABS materiálu lze také použít pro zaformování do keramické skořepiny – metoda vytavitelného modelu, nebo jako master model pro výrobu silikonové formy pro následné odlití menších sérií z polyuretanových pryskyřic.

3.1 Návrh modelu

Při návrhu modelu se vycházelo z potřeby ochladit vrstvu nově položeného materiálu tak, aby nedošlo ke ztrátě stability modelu, porušení pokládaných vláken a poškození podpůrných konstrukcí.

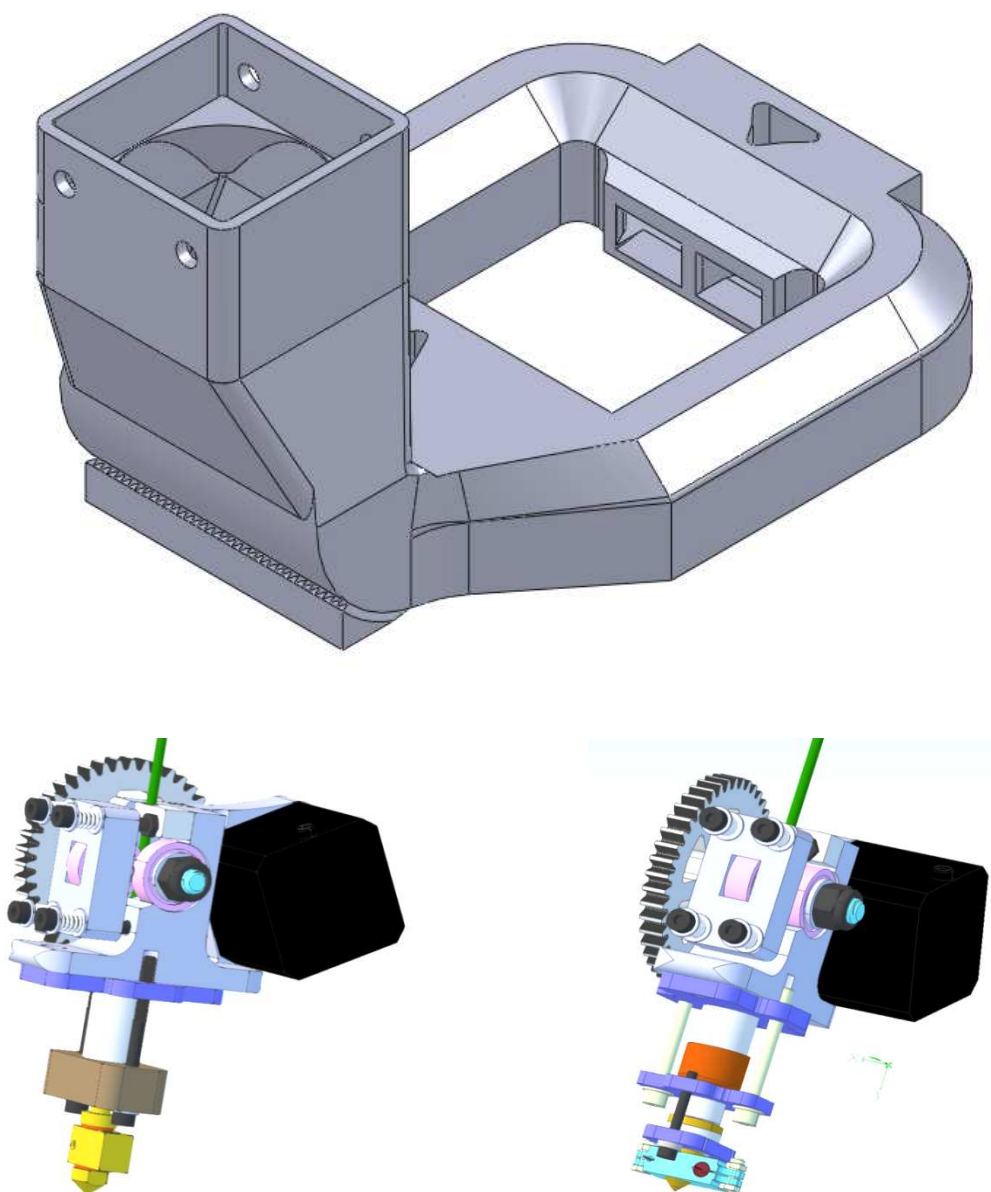
Při návrhu konstrukce dílu chlazení se vycházelo z tvaru tiskového vozíku a teplot tavící trysky - extruderu. Z možné polohy umístění pomocného ventilátoru a jeho napájení, tak aby nebyla ovlivněna funkčnost a rozsah pohybů vozíku, umístění vedení zdrojové soustavy a v neposlední řadě i kvality nasávaného vzduchu. Tím bylo myšleno, aby se nenasával a nevířil již jednou ohřátý vzduch z hlavního chladicího okruhu tiskové hlavy. Konstrukce a umístění chladicího vedení musela být dostatečně tuhá, odolná a zároveň stabilní, aby odolala setrvačným silám při rychlých přesunech vozíku. Konstrukce a velikost tiskové hlavy nemá ideální tvary a rozměry pro optimální návrh vedení proudění vzduchu.

Na obr. 6 je vyobrazena část 3D tiskárny označována jako vozík s tavící tryskou neboli s tiskovou hlavou.



Obr. 6 Vozík s tavící tryskou.

Uchycení tělesa chlazení je k základně vozíku tiskové hlavy pomocí šroubů. Z jedné strany jsou již součástí tělesa přichystané otvory na spojení přímo s tělesem vozíku. K zabránění chvění a vibrací je z druhé strany použita kovová úchytka s otvory pro spojovací materiál. Kovový úchyt je spojen šrouby k tělesu ventilátoru chlazení přechodové části tavící trysky, která je uchycená z druhé části tiskového vozíku. Na obr. 7 je vlastní těleso chlazení a dva typy tavících trysek. Chladicí rozváděcí část obklopuje tiskovou hlavu a přivádí chladný vzduch do prostoru nově naneseného tiskového materiálu.



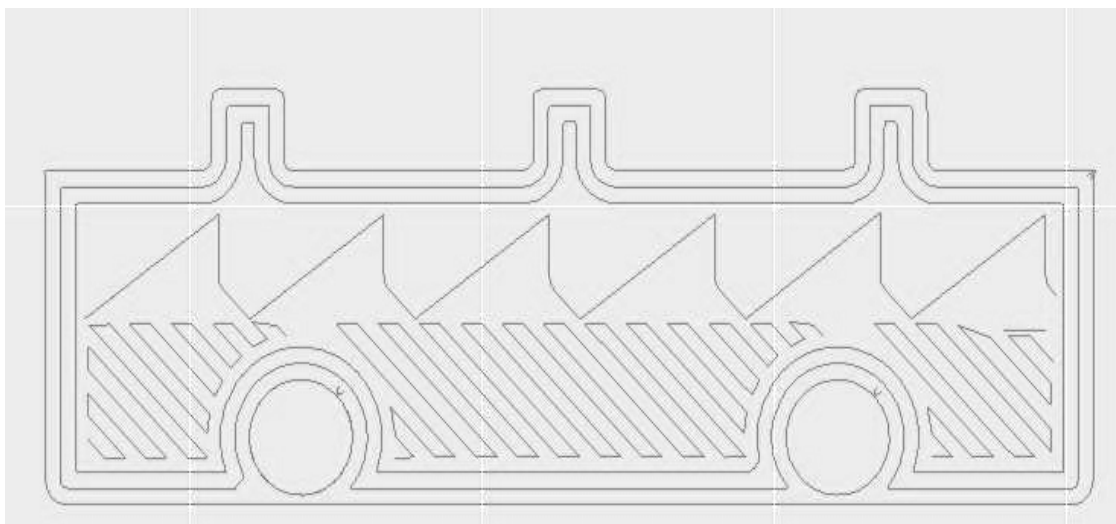
Obr. 7 Chlazení tiskové hlavy a dva typy provedení tavící trysky [14].

3.2 Software

Aby mohl být fyzický model vytvořen, musí být zadána vstupní data. Jsou to informace o geometrii tělesa. Data jsou dále zpracována speciálním softwarem pro rapid prototyping, který rozloží 3D geometrii na jednotlivé příčné řezy definované výšky.

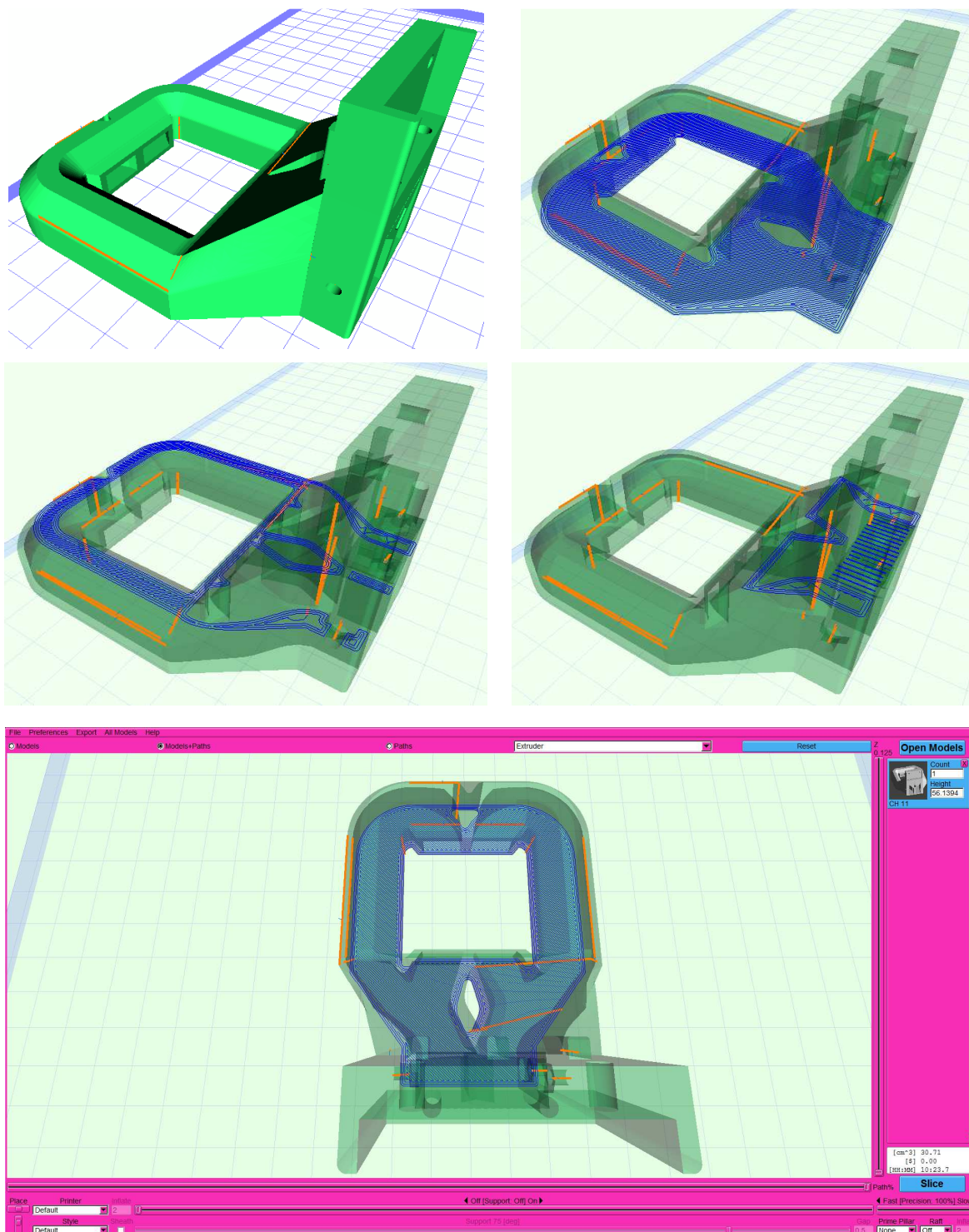
STL formát je určen pro uložení těles v polygonové reprezentaci, triangulaci. Formát je vzhledem ke své jednoduchosti používán v mnoha CAD. Existují dvě verze formátu: binární a textový.

STL formát je využíván i CAM systémy, pro výpočty dráhy nástroje na tvarových CAD dílech. Složité tvary ploch a objemů jsou převedeny na jednoduché, lineární. Formátem může CAM systém definovat i polotovary, držáky nástrojů, tvarové nástroje, upínače a zbytkový materiál.



Obr. 8 Dráhy tiskové hlavy v částečném výřezu v programu KISSlicer.

Volně ke stažení je například program KISSlicer. Zde si může uživatel zobrazit svůj 3D model. Program mu ukáže následně dráhy pohybu tiskové hlavy. Je zde možnost nastavení tisku s podporou i bez podpory. Na obr. 8 je částečný výřez, kde jsou vidět dráhy tiskové hlavy znázorněné v tomto programu. Z tohoto jednoduchého zobrazení se rozpozná, zda bude daný model potřebovat podpůrný materiál, či nikoliv. Dají se zde odhalit některé počáteční chyby při konstrukci modelu v předchozích CAD programech a následně se vrátit a opravit vzniklé nedostatky. Na obr. 9 je vidět jak může uživatel v programu KISSlicer sledovat dráhy pohybu tiskové hlavy a vhodnou korekcí parametrů ovlivnit konečný výsledek.



Obr. 9 Dráhy pohybu tiskové hlavy v programu KISSlicer.

3.3 Technologičnost konstrukce tělesa

Při 3D tisku se na duté tvary používá běžně výplňový-podpurný materiál, který se po vytvoření modelu odstraní. A to mechanicky nebo působením teploty (rozpustí se).

Při tisku drobných součástí je vhodné umístit více součástí na tavnou podložku, aby se plně využilo místa a schopností tiskárny. Další možností při tisku složitějších, rozměrných, ale méně namáhaných tvarů je dělení. Součástka je rozdělena na díly již při zadávání do programu tisku. Po vytisknutí dílů jsou polotovary slepeny, za předpokladu, že lepený spoj není v exponované části namáhání a má požadovanou pevnost. V nastavení programu je možnost tisku s podporou nebo bez podpory. Při konstrukci jednoduchého nebo plného tvaru se podpurný materiál nepoužívá.

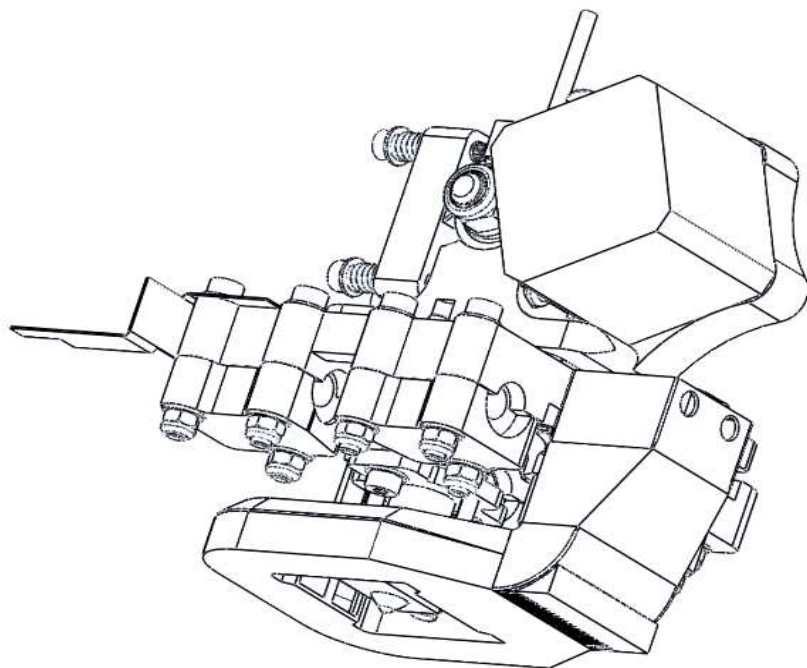
Při návrhu chladicí jednotky se vycházelo z technologičnosti tisku bez podpurného materiálu. Základní podmínky technologičnosti při tisku bez podpurných materiálů jsou:

- široká základna - stabilní a pevné uchycení na vyhřívané podložce (stolku),
- svislé stěny,
- omezit použití subtilních konstrukcí,
- úhel vychýlení stěny ze svislé roviny do 45° - kvalitní spojení následujících vrstev,
- tisk s přemostěním volného prostoru na podpurné konstrukce, co nejkratší,
- šířka pokládané vrstvy 0,3-0,4 mm,
- výška (tloušťka) jednotlivé vrstvy asi 0,25 mm.

3.4 Návrh tvaru a umístění chlazení

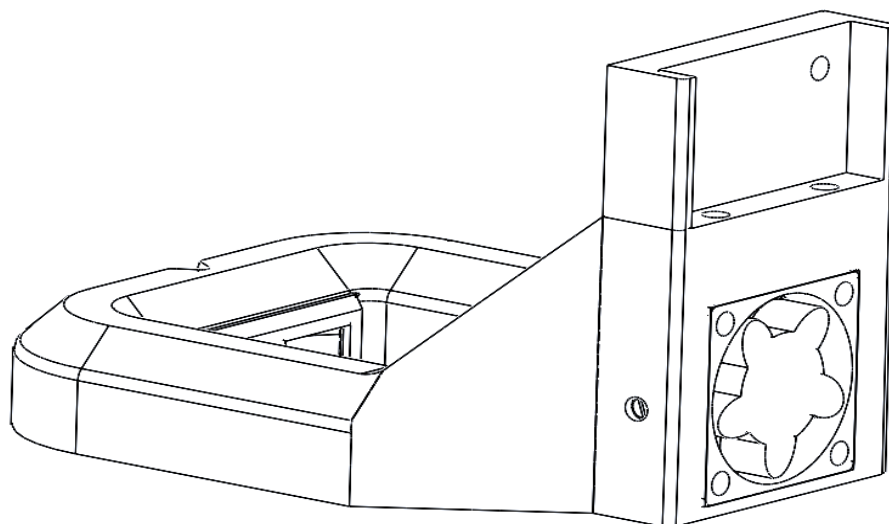
Navržený tvar modelu chlazení tiskové hlavy odpovídá možností umístění a uchycení na vozíku s tavící tryskou. Hlavní zřetel byl věnován umístění a uchycení tělesa tak, aby se nedostal do kolize s pevnými částmi konstrukce tiskárny. A to i v pozici odstavení vozíku po ukončení tisku. Výškové umístění bylo voleno s ohledem na možnosti proudění chladicího vzduchu a následné ochlazování nanášeného roztaveného plastu. V průběhu vytváření konstrukce tělesa byly postupně možnosti tvaru a uchycení chladicí jednotky zredukovány na dvě varianty.

V první variantě se počítá s umístěním ventilátoru chlazení ve vrchní části čtverhranného tubusu, kde je vytvořena dosedací plocha pro ventilátor, jež je v poloze horizontální. Tubus s ventilátorem AKASA AK-189BK je uchycen do těla vozíku pomocí dvou šroubů M3x5mm. K zabránění možného chvění je rozváděcí část uchycena pomocí vloženého kovového pásku ke stávajícímu hlavnímu ventilátoru chlazení. Na obr. 10 je zřetelně vidět uchycení tělesa chlazení k vozíku s tiskovou hlavou.



Obr. 10 Uchycení tělesa chlazení na vozíku tiskové hlavy.

Ve druhé konstrukční variantě byla použita upravená rozváděcí část, k ní byl navržen krátký vertikální díl s dosedací plochou a zajišťovacími šrouby pro uložení ventilátoru ve vertikální poloze. K uchycení do těla vozíku slouží krátké svislé žebrovaní s dorazy a otvory pro šrouby M3 x 5 mm. Jak ukazuje obr. 11.

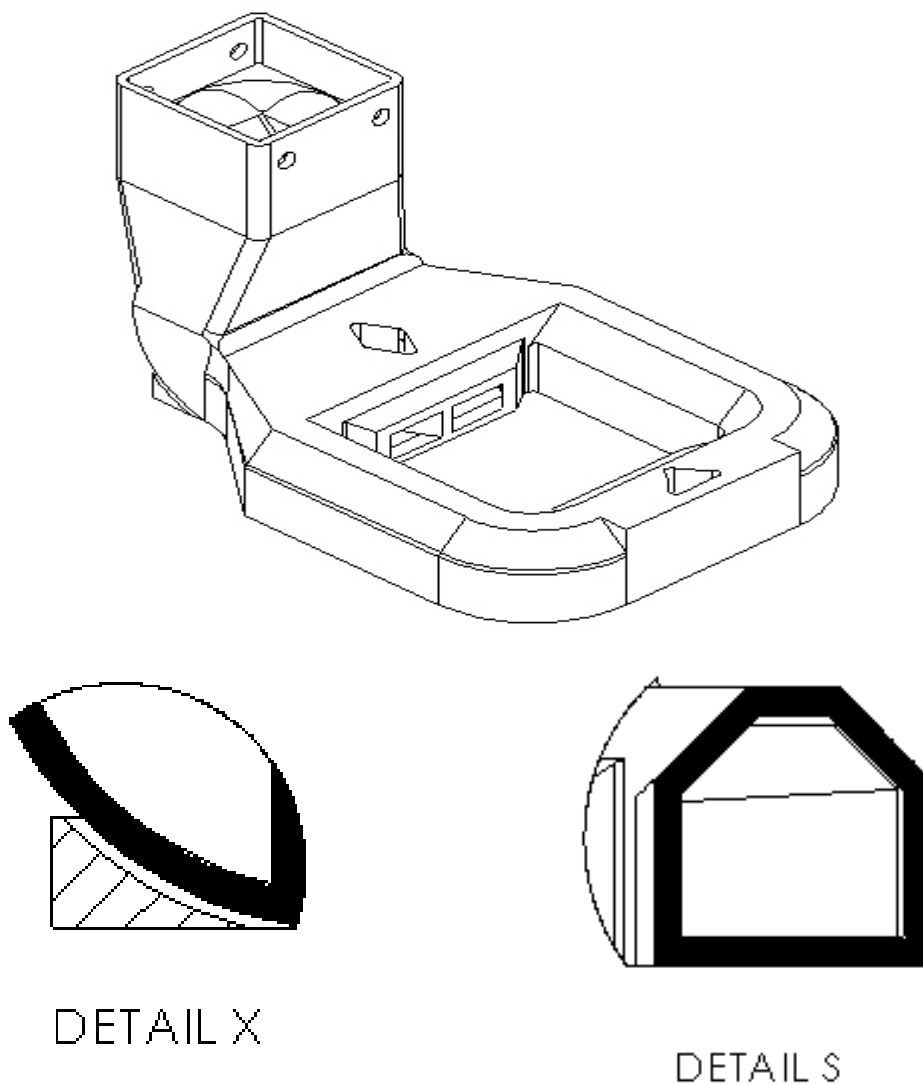


Obr. 11 Vertikální uložení ventilátoru v tělese chlazení.

3.5 Konstrukce dílu chlazení

Návrh konstrukce dílu chlazení je řešen jako samonosný, bez podpůrného materiálu. Maximální rozměry výrobku jsou 102 x 67 x 57 mm, tloušťka stěn max. 2 mm. Základním pravidlem při návrhu tvaru je dodržení minimální tloušťky stěny 1mm, úhel naklonění od svislé roviny max. do 45°. Při pokládání housenky roztaveného plastu přes volný prostor zachovat co nejkratší vzdálenost. Pro vznik správného překlenutí volného prostoru je potřebné mít dostatečně velký počáteční a koncový prostor k uchycení taveného materiálu s ohledem na smrštění při chladnutí.

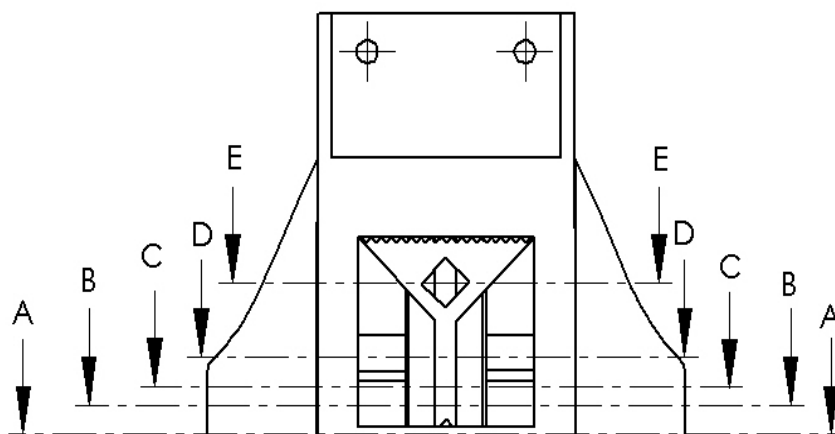
Vedení vzduchu u horizontální varianty v části ohybu je řešeno s dodatečnou podporou. Na obr. 12 je na detailu „X“ vidět podepření stěny s úhlem větším jak 45° od svislé roviny. Po vyrobení bude podpora odlomena nebo odříznuta. Detail „S“ znázorňuje profil rozváděcí částí tělesa.



Obr. 12 Díl chlazení, s podporou v ohybu detail „X“ a průřez rozváděcí částí detail „S“.

3.6 Řezy

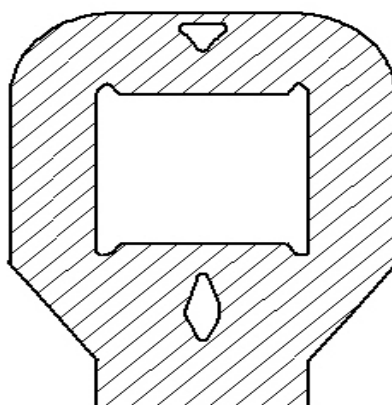
Na obr. 13 je ukázáno pět řezů v různých výškových rovinách. V následujících odstavcích je popsán postup nanášení jednotlivých vrstev termoplastu ABS. Konstrukce tělesa byla vymodelována a navržena v programu SolidWorks.



Obr. 13 Řezy tělesem chlazení.

Řez A-A

V počáteční fázi tisková hlava nanese kontaktní vrstvu sloužící k vyrovnání případných nerovností a k přilepení k podložce z důvodů zamezení pohybu vytvářeného tělesa. Teplota podložky je udržována na stabilní teplotě 59°C. Z obr. 14 je patrné, jak velká plocha je v kontaktu s vyhřívanou podložkou.

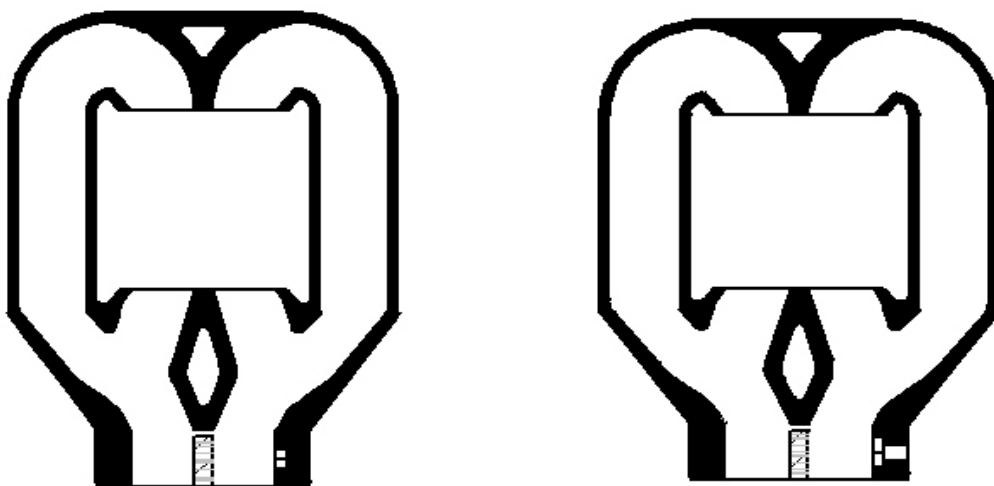


ŘEZ A-A

Obr. 14 Řez A-A, kontaktní plocha s podložkou.

Řez B-B, C-C

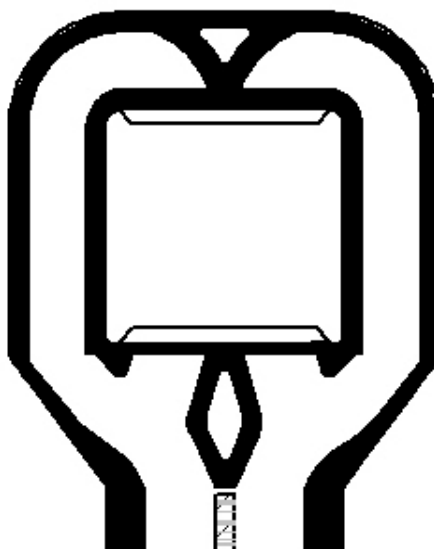
Po vytvoření dna tubusu rozváděcího dílu se začíná rýsovat tvar vedení vzduchu. Ve vtokové části se začíná rýsovat širší podpůrné žebro pro překlenutí volného prostoru a pro usměrnění proudícího vzduchu. Viz obr. 15 řez B-B a C-C. Profil budoucího rozváděcího tvaru je vidět na obr. 9 detail „S“.



Obr. 15 Řez B-B, C-C stavba stěn tubusu tělesa chlazení.

Řez D-D

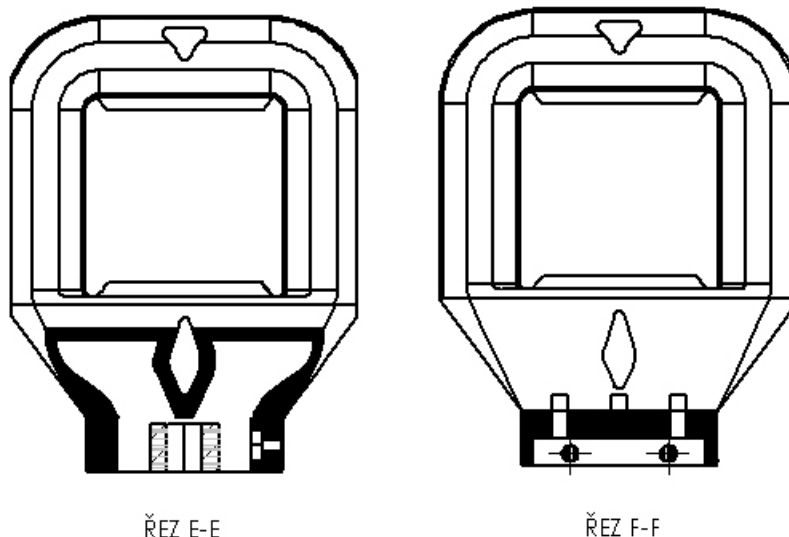
Zde je již patrné ukončení výfuků, rozšiřování šikmých částí stěn, příprava na překlenutí volného prostoru a vytvoření stropu rozváděcí části (viz obr. 16).



Obr. 16 Řez D-D počátek stavby šikmých částí stěn.

Řez E-E, F-F

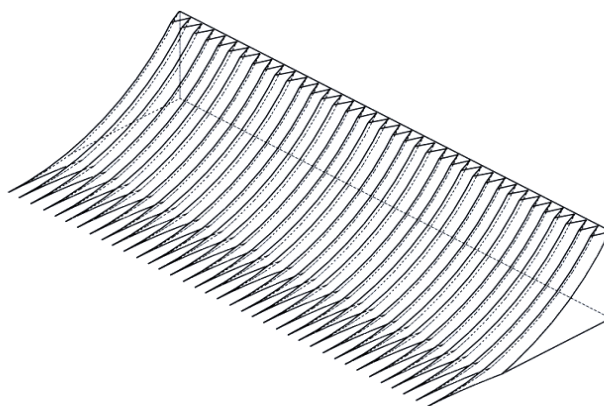
V této závěrečné fázi dochází k vytváření šikmé části nad vstupním otvorem pro ventilátor, pokračování svislou stěnou s žebry a otvory pro uchycení v těle vozíku tavicí trysky (viz obr. 17).



Obr. 17 Řez E-E, F-F dokončení šikmých částí a výstavba držáku tělesa.

Podpěra ohybu tubusu

U varianty s horizontálním uložením dochází k výstavbě obdélníkového tubusu s následnou dosedací plochou v horní části pro uložení ventilátoru. Ve spodní části tvoří tubus ohyb. Pro podepření zaoblení slouží podpěra (viz obr. 8) se zubovými drážkami. Výška i šířka zubů drážek je 1 mm. Je to dostatečné k zachycení taveného plastového vlákna do požadovaného tvaru, kdy úhel sevření mezi svislou stěnou a pokládanou rovinou je větší jak 45°. Vláknem je pokládáno kolmo na drážky. Drážky slouží ke snadnému odlomení podpůrného dílu po dokončení operace.



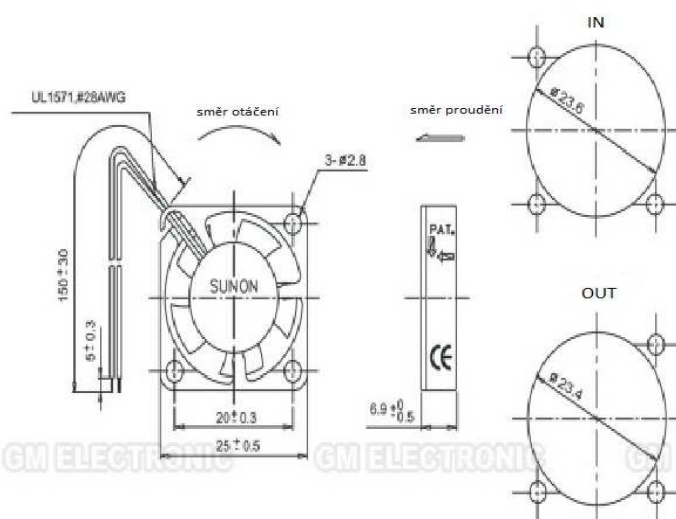
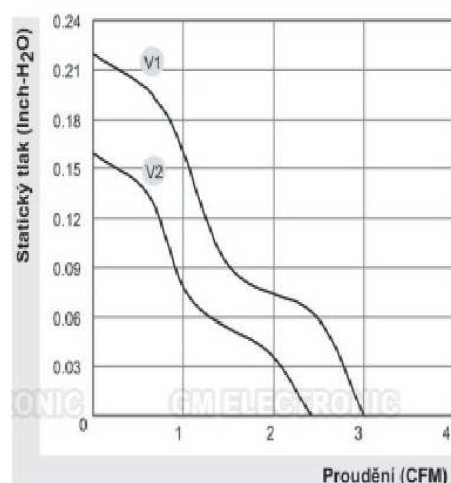
Obr. 18 Podpěra pro ohyb tubusu horizontální varianty.

3.7 Technická data ventilátoru

Těleso chlazení je osazeno ventilátorem značky SUNON MC25060V2-A99. Technické parametry jsou uvedeny v tab. 4 a výkonová charakteristika (datasheet) je na obr. 19. Z hodnot výkonové charakteristiky se vychází při porovnání objemových průtoků vzduchu v různých režimech otáček. Naměřené hodnoty se použijí při následných výpočtech.

Tab. 4 Technické parametry ventilátoru [11]

Výkonové parametry:	
Rozměry [mm]	25 x 25 x 6
Příkon [W]	0,38
Napětí [V]	5
Proud [mA]	75
Otáčky [min^{-1}]	10000
Ložisko	MagLev Vapo
Průtok vzduchu [CFM], [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]	2,2; 3,74
Hlučnost [dB]	23
Vývody [AWG]	2 x 28
Hmotnost [g]	5
Délka vývodů [mm]	150



Obr. 19 Výkonová a rozměrová data ventilátoru [16].

4 VÝPOČTOVÉ VZTAHY PRO PROUDĚNÍ VZDUCHU

Následné výpočtové vztahy a definice byly použité ze studijních materiálů pro první stupeň magisterského studia Hydromechanika VUT Brno [17].

Objemový průtok

je definován jako objem kapaliny, který proteče zvoleným průřezem „S“ za jednu sekundu.

Př.: 1 Objemový průtok vzduchu byl počítán dle vztahu (4.1).

$$Q_v = S \cdot v \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.1)$$

kde: $Q_v \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ - průtok vzduchu,
 $S \text{ [m}^2]$ - plocha potrubního vedení,
 $v \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$ - rychlost,

1 CFM - $1,69901079552 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, (2,2 CFM - $1,038284375 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

$$v = \frac{Q_v}{S} = \frac{1,038 \times 10^{-3}}{4,42 \times 10^{-4}} = 2,349 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Druhy proudění

ke zjištění druhu proudění v uzavřeném profilu je potřeba znát Reynoldsovo číslo. Je to bezrozměrné číslo charakterizující chování proudící kapaliny. Podle jeho hodnoty lze usuzovat na to, zda bude proudění laminární nebo turbulentní. Kritická hodnota Re_{krit} pro potrubí kruhového průřezu je 2320. Reynoldsovo číslo se vypočítá dle vztahu 4.2.

Př.: 2 Proudění laminární $Re < Re_{krit}$ se vypočítá dle vztahu (4.2).

$$Re = \frac{d_h \cdot v_s}{\nu} [-] \quad (4.2)$$

kde: $v_s \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$ - střední rychlost v potrubí,
 $d_h \text{ [m]}$ - hydraulický průměr potrubí,
 $\nu \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ - kinematická viskozita ($1,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

$$Re = \frac{2,1 \times 10^{-2} \cdot 2,349}{1,33 \times 10^{-5}} = 3709 [-]$$

Výsledné hodnoty Re pro různé otáčky ventilátoru jsou uvedeny v tab. 6.

Hydraulický průměr

je definován poměrem čtyřnásobku vnitřního průřezu daného profilu potrubí „S“ a jeho omočeného obvodu „O“, což umožňuje stanovení charakteristického rozměru obecných nekruhových profilů (viz tab. 5) [17].

Tab. 5 Výpočtové vztahy pro hydraulický průměr potrubí [17].

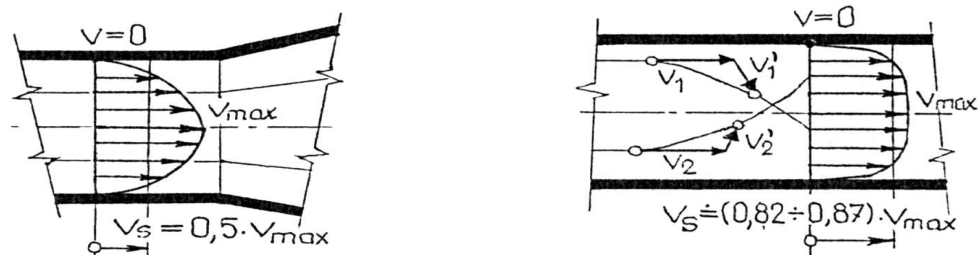
Výpočtový vztah pro hydraulický průměr	$D_h = \frac{4 \cdot S}{O} [m]$
Kruhový D_h o průměru „d“:	$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, $O = \pi \cdot d \Rightarrow D_h = d$
Čtvercový o stranách „a“	$S = a^2$, $O = 4 \cdot a \Rightarrow d_h = a$
Obdélníkový o stranách „a,b“	$S = a \cdot b$, $O = 2 \cdot (a+b) \Rightarrow D_h = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b}$

Laminární proudění

je proudění, kdy částice se pohybují ve vrstvách, přičemž nedochází k přemísťování částic napříč průřezem. Při jednorozměrném proudění v potrubí má rychlostní profil tvar rotačního paraboloidu (viz obr. 20a).

Turbulentní proudění

je proudění, kdy částice mají kromě postupné rychlosti „v“ i tzv. **flukтуаční** (turbulentní) složku rychlosti „v'“, kterou se částice přemísťují po průřezu (viz obr. 20b).



Obr. 20 Proudění reálné kapaliny: (a) Laminární, (b) Turbulentní [17].

Př.: 3 Skutečná výtoková rychlost dle vztahu (4.3).

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (4.3)$$

kde: $S_1 [m^2]$ - průřez potrubí,
 $v_1 [m \cdot s^{-1}]$ - rychlost v potrubí,
 $S_2 [m^2]$ - plocha výfukových otvorů,
 $v_2 [m \cdot s^{-1}]$ - rychlost v ústí výfuku.

$$v_2 = \frac{4,42 \times 10^{-4} \cdot 2,349}{264} = 3,933 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

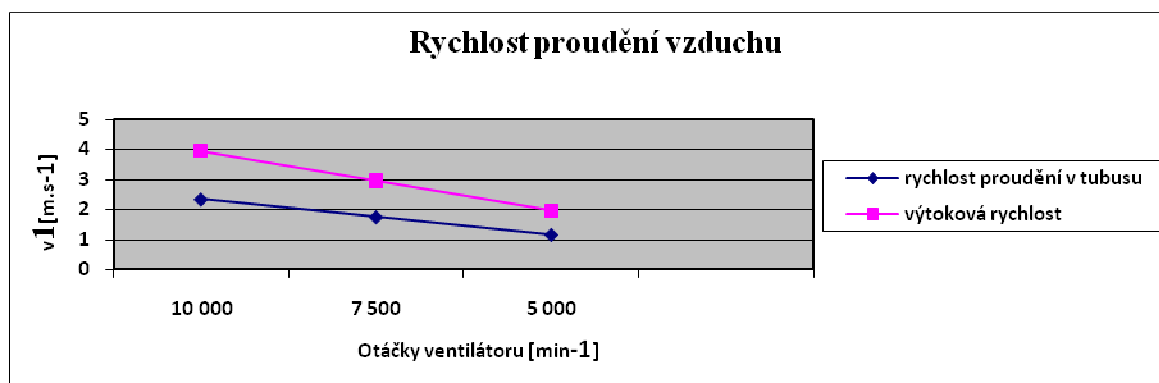
Výsledná hodnota $Re = 3709$ nám udává proudění turbulentní v tubusu rozváděcí části chlazení. K dosažení vhodného proudění v uzavřeném profilu je nutno snížit otáčky ventilátoru. V tab. 6 jsou uvedeny hodnoty Re při změně otáček. Regulací otáček ventilátoru se dosáhne podstatného snížení objemu dodávaného vzduchu, tak aby hodnota Reynoldsova čísla splňovala podmínku pro laminární proudění v tubusu tělesa chlazení. Regulace otáček bude řídit příslušný software.

Nikuradseho diagram je vyjádřen závislostí koeficientu tření „ λ “ na Re -číslu a ukazuje jednotlivé oblasti laminárního a turbulentního proudění [17].

Tab. 6 Proudění vzduchu v závislosti na otáčkách ventilátoru.

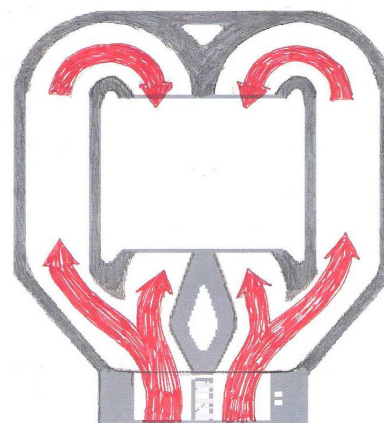
Otáčky ventilátoru	Rychlost proudění v tubusu	Re	Výtoková rychlost vzduchu
10 000 min^{-1}	$v_1 - 2,349 \text{ m.s}^{-1}$	3709	$v_2 - 3,933 \text{ m.s}^{-1}$
7 500 min^{-1}	$v_1 - 1,761 \text{ m.s}^{-1}$	2782	$v_2 - 2,948 \text{ m.s}^{-1}$
5 000 min^{-1}	$v_1 - 1,174 \text{ m.s}^{-1}$	1854	$v_2 - 1,966 \text{ m.s}^{-1}$

Skutečná Výtoková rychlost proudícího vzduchu z tělesa chlazení byla vypočítána podle vztahu 4.3. Hlavní hodnoty pro různé otáčky ventilátoru viz tab. 6, graf 1.



Graf 1 Rychlost proudění vzduchu v různých režimech otáček.

Konstrukce a tvar rozváděcí části tělesa chlazení byl navržen tak, aby proudění ze všech ústových trysek bylo stejné. Na obrázku je znázorněný objemový průtok vzduchu u tělesa chlazení s vertikálním uložením ventilátoru. Tvar a rozměry rozváděcí části tělesa jsou u varianty horizontální i vertikální totožné (viz obr. 21). Levá i pravá větev rozváděcí části jsou stejné, tak jako jsou identické rozměrově i obě části výfuku.



Obr. 21 Směr a velikost proudícího vzduchu.

K výpočtům potřebného množství chladícího vzduchu, přenosu tepla byly použity výpočtové vztahy ze skript pro první stupeň magisterského studia, Přenos tepla a látky VUT Brno [26]. Pro přenos tepla byl použit výpočtový vztah 4.4 tepelný tok.

Př.: 4 Výpočtový vztah pro odvedený tepelný výkon (4.4).

$$Q = S \cdot \alpha \cdot (T_{\text{plastu}} - T_{\text{vzduchu}}) \text{ [W]} \quad (4.4)$$

kde: α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] - součinitel přestupu tepla,
 S [m^2] - ochlazovaná plocha,
 T_{plastu} [$^{\circ}\text{C}$] - střední teplota plastu,
 T_{vzduchu} [$^{\circ}\text{C}$] - teplota chladícího vzduchu.

Př.: 5 Výpočtový vztah pro součinitel přestupu tepla α (4.4.1).

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4.4.1)$$

kde: Nu [-] - Nusseltovo číslo,
 D [m] - charakteristický rozměr,
 λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] - tepelná vodivost.

Nu – Nusseltovo kritérium vyjadřuje intenzitu tepelného toku mezi vrstvami.

Př.: 6 Vyjádření Nusseltova čísla (4.4.2).

$$Nu = c \cdot Re^m \cdot Pr^{0,37} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{1/4} \quad (4.4.2)$$

kde: c [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] - měrná kapacita, která je uvedena v tabulkách,
 Re [-] - Reynoldsovo číslo,
 Pr [-] - Prandtlovo číslo je podobnostní číslo, je tabulováno,
 m [kg] - hmotnost taveného materiálu.

$Re > 40$ a tomu odpovídající tabulkové hodnoty koeficientu:

$$c = 0,51,$$

$$m = 0,5.$$

Tabulkované hodnoty pro výpočet uvádí tab. 7, vlastní hodnoty jsou v tab. 8.

Tab. 7 Tabulované hodnoty [26].

Vzduch	Veličina	jednotka
Teplota vzduchu na výstupu z trysky (z tabulek)	27	°C
Kinematická viskozita	1,57E-05	m ² .s ⁻¹
Tepelná vodivost	0,02624	W(m.K) ⁻¹
Prandtlovo číslo	0,708	-
Prandtolovo číslo pro střední teplotu plastu Pr _w	0,685	-
Plast		
Rychlost výtaku	60	mm.s ⁻¹
Průměr trysky	0,3	mm
Hustota plastu	1050	kg.m ⁻³
Měrná tep. kapacita	1400	J.(kg.K) ⁻¹
Teplota výstupu	200	°C
Teplota konce chlazení	150	°C
Hmotnostní tok plastu	4,45321E-06	kg.s ⁻¹
Požadovaný chladičí výkon	0,311724531	W
Délka chlazeného válečku	35	mm
Povrch válečku	3,29867E-05	m ²

Tab. 8 Vypočtové hodnoty.

Otáčky	výtoková rychlost	Re	Nu	Alfa	odvedný výkon [W]	max. rychlost
10000	3,933	75,25	3,925706	343,3684	1,676336447	359,2583571
7500	2,948	56,40	3,398752	297,2775	1,451319244	293,3332202
5000	1,966	37,61	2,77554	242,7672	1,185198167	254,0314155

Hodnoty ve sloupci zobrazující maximální rychlost, ukazují na teoretické možnosti rychlosti pohybu tiskové hlavy. Reálná hodnota bude rozhodně nižší. Ať už z důvodu nemožnosti využití chlazení v polohách blízkých vyhřívané podložce, zde by mohlo docházet k nadměrnému ochlazení podložky a k odlepení tisknutého modelu. Nebo z důvodu jiných vlivů nezohledněných ve výpočtech. Ale i přesto je zjevné, že vyrobením a instalací tělesa chlazení na vozík tiskové hlavy dojde k úspoře času při vlastním tisku.

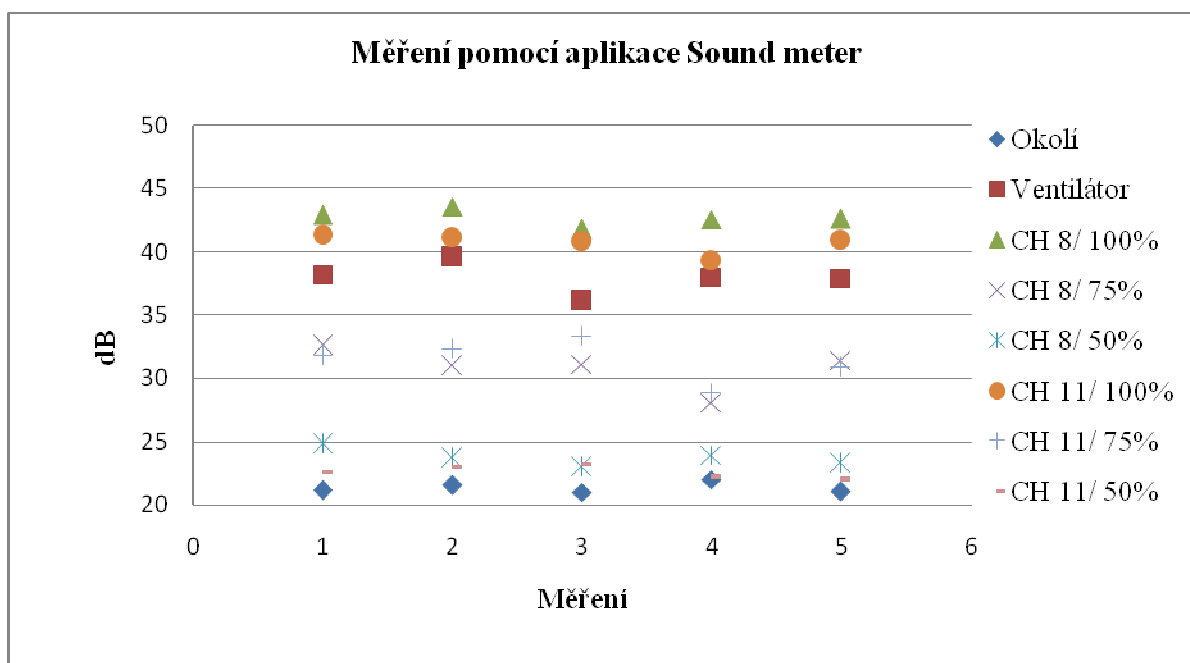
4.1 Měření hlučnosti

Měřením hlučnosti proudícího vzduchu v různých režimech otáček byly zjištěny hodnoty uvedené v tab. 9 a znázorněné v grafu 2. Měření byla provedena pomocí aplikace Sound Meter nainstalované v Samsung Galaxi verze Android. Měření byla prováděna ve vzdálenosti 0,1 m od měřeného dílu chlazení. Hlukoměr používá pro měření hladiny hluku mikrofon telefonu a ukazuje hodnoty v decibelech [dB].

Těleso chlazení s horizontálním uložením má označení CH 8, těleso s vertikálním je označeno CH 11. Procenta označují hodnotu otáček ventilátoru.

Tab. 9 Naměřené hodnoty hluku.

Měření	Okolní vliv	Ventilátor	CH 8 100%	CH 8 75%	CH 8 50%	CH 11 100%	CH 11 75%	CH 11 50%
1	21,18	38,21	42,91	32,63	24,8	41,31	31,84	22,62
2	21,54	39,61	43,65	30,98	23,71	41,12	32,35	23,01
3	20,99	36,13	41,83	31,14	23,45	40,78	33,37	23,22
4	22,01	38,02	42,56	28,08	23,92	39,28	28,92	22,15
5	21,08	37,92	42,64	31,43	23,3	40,92	30,90	21,98



Graf 2 Měření hluku pomocí aplikace Sound meter.

Zjištěné hodnoty jsou nízké a hladina hluku vlastního ventilátoru odpovídá údajům v datasheetu poskytnutým výrobcem ventilátoru. Hlukové rozdíly v konstrukčním uspořádání a tvaru těles chlazení jsou dle mého názoru zanedbatelné.

ZÁVĚR

Zadání bakalářské práce znělo: Konstrukce a výroba tělesa chlazení pro open source FDM tisk. Z důvodu zrychlení tisku a rozsahu kvality byla řešena otázka chlazení položeného materiálu.

3D tiskárna pracuje na principu vytvoření reálného tělesa na základě nákresu ve 3D softwaru, např. SolidWorks, Inventor. Který je následně transformován ve formátu STL do příslušného programu tiskárny. K tisku je používán plastový drát o malých průměrech (1,75 a 3 mm), který je v extruderu roztaven a následně vytlačován tryskou do prostoru, kde je následně po vrstvách vytvářeno reálné těleso.

Při konstrukci vlastního tělesa chlazení se vycházelo z předpokladu omezení použití podpůrného materiálu a možnosti vlastního tisku. Prostorové uspořádání omezilo konstrukční možnosti na dvě varianty. Postupným technologickým vývojem byly odstraňovány chyby a nedostatky v samotné konstrukci. Ať již za pomoci programu KISSlicer, nebo až při vlastním tisku.

Jak již bylo řečeno, chlazení roztaveného právě položeného plastu by mělo přispět ke zvýšení kvality a rychlosti tisku. U subtilních, dutých vysokých částí by mělo chlazení dopomoci k rychlejšímu pokládání další vrstvy plastu.

Podle provedených výpočtů se potvrdila teorie možnosti zrychlení tisku, i přes jisté omezené možnosti použití v začátcích tisku a dolních polohách. Dle mého názoru a názoru odborníků z fóra RepRapu není chlazení jedinou a dostačující podmínkou. Měl by se vzít v úvahu i druh použitého materiálu, naprogramování softwaru tiskárny i vlastní nastavení teploty tiskové hlavy.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. 3D tisk. [online]. [cit. 2012-12-08]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk
2. 3D printer. [online]. [cit. 2012-12-08]. Dostupné z: <http://www.pkmodel.cz/3Dprinter.html>
3. Akrylonitrilbutadienstyren. [online]. [cit. 2012-12-08]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Akrylonitrilbutadienstyren>
4. Plastic Properties of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS). [online]. [cit. 2012-12-08]. Dostupné z: http://www.dynalabcorp.com/technical_info_abs.asp
5. Open-source. [online]. [vid. 2012-12-08]. Dostupné z: <http://wiki.aktualne.centrum.cz/datarama/open-source-software/>
6. Wikipedie: Fused deposition modeling. [online]. [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling
7. Solidis: Materials and colors. [online]. [cit. 2012-12-22]. Dostupné z: <http://www.solidis.pt/en/support/materials>
8. Rapid Prototyping: 3D tisk technologií FDM. [online]. [cit. 2013-02-04]. Dostupné z: <http://www.evektor.cz/3d-tisk-fdm.aspx>
9. Digital Mechanics: FDM. [online]. [cit. 2013-02-04]. Dostupné z: <http://www.digitalmechanics.com/fdm.php>
10. Katedra výrobních systémů: Technologie Rapid Prototyping FDM. [online]. [cit. 2013-02-04]. Dostupné z: <http://www.kvs.tul.cz/rapid>
11. GM ELECTRONIC: DC VENTILÁTORÝ. [online]. [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/dc-ventilatory-25x25-mm/ventilator-sunon-mc25060v2-a99-p625-313/#dokumentace>
12. LPM: Materiály. [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://www.lpm.cz/cgi-bin/riweta.cgi?nr=2110&lng=2>
13. DYNALAB Corp: Plastic Properties of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS). [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: http://www.dynalabcorp.com/technical_info_abs.asp
14. RepRap.Org: ZemcikO hot end. [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/ZemcikO_hot_end
15. SolidVision: 3D-skenování. [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz/>
16. GM ELEKTRONIC: Datasheet. [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/dokumentace/625/625-313/dsh.625-313.1.pdf>
17. ŠOB, František. Hydromechanika: studijní materiál pro I. stupeň magisterského studia, 2. a 3. ročník. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002, 238 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2037-5.
18. VTM: Věda. [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/netusene-moznosti-3d-tisku>

19. Open Source Initiative: The Open Source Definition. [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://opensource.org/osd>
20. Josef Průša: Co je RepRap?. [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://josefprusa.cz/co-je-reprap/>
21. RepRap: Wiki. [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Main_Page
22. MakerBot: Replicator 2. [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://www.makerbot.com/blog/2013/03/14/makerbot-replicator-2-now-with-more-adafruit/>
23. CHUA, C.K., K.F. LEONG a C.S. LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.
24. Heat flow fundamentals. Ansys Theory reference: v. 13 [online]. 2011. vyd. Southpointe: Ansys, Inc. [cit. 2011-07-14].
25. CAXMIX: Počítačové technologie v průmyslu. Praha: Springwinter, s.r.o, 2012, roč. 3, 4. ISSN 1804-5154. Dostupné z: <http://www.caxmix.cz>
26. JÍCHA, Miroslav. Přenos tepla a látky. 1. vyd. Brno: CERM, 2001, 160 s. ISBN 80-214-2029-4.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.

Zkratka	Popis
ABS	AkrilonitrilButadienStyren
BSD	Berkeley Software Distribution
CAD	Computer aided design
CAM	Computer aided manufacturing
EBM	Elektronic Beam Mealting
FDM	Fused Deposition Modeling
GNU	General Public License
HDPE	High density polyethylene
LOM	Laminated Object Manufacturing
LTD	Laminované dřevotřískové desky
OSI	Open Source Initiative
PET	Polyethylentereftalát
PLA	Polylactic asic
PTFE	Polytetrafluoroethylene
RepRap	Rep licating Rapid-Prototyper
SLA	SteroLithography Aparatus
SLS	Selektive Laser Sintering
STL	Standard Template Library
3D	trojdimenzionální

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.

Symbol	Jednotka	Popis
CFM	[cuft]	Kubická stopa
D	[m]	Charakteristický rozměr
Nu	[-]	Nusseltovo číslo
O	[m]	Obvod
Pr_r	[-]	Prandtlovo číslo
Pr_w	[-]	Prandtlovo číslo pro střední teplotu plastu
Q_v	[m ³ .s ⁻¹]	Objemový průtok
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
Re_{krit.}	[-]	Kritická hodnota Re
S, S₁, S₂	[m ²]	Průřez daného profilu potrubí
T_{plastu}	[°C]	Střední teplota plastu
T_{vzduchu}	[°C]	Teplota chladícího vzduchu
a, b	[m]	Délka stran
c	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]	Měrná kapacita
d_h	[m]	Hydraulický průměr potrubí
d	[m]	Průměr
g	[m.s ⁻¹]	Tíhové zrychlení
h	[m]	Vzdálenost - výška
m	[kg]	Hmotnost taveného materiálu
p, p₁, p₂	[Pa]	Tlak
v	[m ² .s ⁻¹]	Kinematická viskozita
v, v₁, v₂	[m.s ⁻¹]	Rychlost
v_s	[m.s ⁻¹]	Střední rychlost v potrubí
α	[W.m ⁻² K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla
Δ	[-]	Delta, rozdíl
λ	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]	Lambda, tepelná vodivost
π	[-]	Pí, Ludolfovo číslo
ρ	[kg.m ⁻³]	Ró, objemová hustota

SEZNAM PŘÍLOH

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 Princip metody SLS [2].	10
Obr. 2 Znázornění nanášení vrstev materiálu FDM [6].	11
Obr. 3 3D tiskárna Průša Mendel a profi tiskárna Replicator 2 [6,22].	13
Obr. 4 Postupné vrstvení nosného a podpůrného materiálu u technologie tisku FDM [9]. ..	14
Obr. 5 Optický laserscanner Starter Kit [15].	15
Obr. 6 Vozík s tavící tryskou.	18
Obr. 7 Chlazení tiskové hlavy a dva typy provedení tavící trysky [14].	19
Obr. 8 Dráhy tiskové hlavy v částečném výřezu v programu KISSlicer.	20
Obr. 9 Dráhy pohybu tiskové hlavy v programu KISSlicer.	21
Obr. 10 Uchycení tělesa chlazení na vozíku tiskové hlavy.	23
Obr. 11 Vertikální uložení ventilátoru v tělese chlazení.	23
Obr. 12 Díl chlazení, s podporou v ohybu detail „X“ a průřez rozváděcí částí detail „S“. ..	24
Obr. 13 Řezy tělesem chlazení.	25
Obr. 14 Řez A-A, kontaktní plocha s podložkou.	25
Obr. 15 Řez B-B, C-C stavba stěn tubusu tělesa chlazení.	26
Obr. 16 Řez D-D počátek stavby šikmých částí stěn.	26
Obr. 17 Řez E-E, F-F dokončení šikmých částí a výstavba držáku tělesa.	27
Obr. 18 Podpěra pro ohyb tubusu horizontální varianty.	27
Obr. 19 Výkonová a rozměrová data ventilátoru [16].	28
Obr. 20 Proudění reálné kapaliny: (a) Laminární, (b) Turbulentní [17].	30
Obr. 21 Směr a velikost proudícího vzduchu.	31
Tab. 1 Mechanické vlastnosti ABS [12,13].	17
Tab. 2 Teplotní vlastnosti ABS [12,13].	17
Tab. 3 Chemické vlastnosti materiálu ABS [12].	17
Tab. 4 Technické parametry ventilátoru [11]	28
Tab. 5 Výpočtové vztahy pro hydraulický průměr potrubí [17].	30
Tab. 6 Proudění vzduchu v závislosti na otáčkách ventilátoru.	31
Tab. 7 Tabulované hodnoty [26].	33
Tab. 8 Výpočtové hodnoty.	33
Tab. 9 Naměřené hodnoty hluku.	34

PŘÍLOHA

PŘÍLOHA 1 Obrazová příloha výroby tělesa chlazení na 3D tiskárně.

