



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY**

ANALÝZA TEPLOTNÍHO PROFILU HOT BED A HOT END U 3D TISKÁRNY POMOCÍ CAE

**ANALYSIS OF TEMPERATURE PROFILE OF 3D PRINTER HOT BED AND HOT END BY USING
CAE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Tomáš Severa

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Petr Vyroubal

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Tomáš Severa
Ročník: 2

ID: 119600
Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Analýza teplotního profilu hot bed a hot end u 3D tiskárny pomocí CAE.

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou 3D tisku na nekomerčních 3D tiskárnách typu rerap a s materiály, které se k tisku používají. Pomocí systému CAE vytvořte model hot bed a hot end a proveďte analýzu a optimalizaci teplotního profilu na těchto modelech. Získané výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 29.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Petr Vyroubal

Konzultanti semestrální práce:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Předkládaná diplomová práce se zabývá 3D tiskem na nekomerčních 3D tiskárnách typu RepRap a materiály, které se používají při tisku. Výstupem této práce je stručný úvod do problematiky 3D tisku, teorie šíření tepla a rozbor dvou nejdůležitějších částí tiskárny hot bed a hot end. K analýze a optimalizaci teplotního profilu hot bed a hot end jsou použity systémy pro podporu inženýrských prací CAD a CAE, SolidWorks a SolidWorks Flow Simulation.

Abstract:

This master's thesis deals with 3D printing for non-commercial RepRap 3D printer type and materials used in printing. The outcome of this work is a brief introduction to 3D printing, the theory of heat transfer and analysis of the two most important parts of the printer hot bed and hot end. To analyze and optimize the temperature profile of the hot bed and hot end are used Computer Aided Engineering systems CAD and CAE, SolidWorks and SolidWorks Flow Simulation.

Klíčová slova:

3D tisk, RepRap, Akrylonitril Butadien Styren, Polyaktid acid, hot bed, hot end, CAE

Keywords:

3D print, RepRap, Acrylonitrile Butadiene Styrene, Polyactid acid, hot bed, hot end, CAE

Bibliografická citace díla:

SEVERA, T. Analýza teplotního profilu hot bed a hot end u 3D tiskárny pomocí CAE. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 108 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Vyroubal.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza teplotního profilu hot bed a hot end u 3D tiskárny pomocí CAE jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. 5. 2014

.....
Bc. Tomáš Severa

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Vyroubalovi za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů v rámci zpracování semestrální práce.

.....
Bc. Tomáš Severa

Obsah:

ÚVOD	10
1. TEORETICKÁ ČÁST	11
1.1 ÚVOD - 3D TISK.....	11
1.2 TECHNOLOGIE 3D TISKU.....	12
1.3 REPRAP TISKÁRNA (REPLICATING RAPID-PROTOTYPER).....	17
1.4 HARDWAROVÉ KOMPONENTY REPRAP TISKÁRNY	19
1.5 SOFTWARE A FIRMWARE REPRAP TISKÁRNY.....	23
1.6 PLASTOVÉ MATERIÁLY PRO 3D TISK	29
2. TEORIE ŠÍŘENÍ TEPLA.....	37
3. PRAKTICKÁ ČÁST	43
3.1 SOLIDWORKS.....	43
3.2 METODA KONEČNÝCH OBJEMŮ (MKO).....	47
3.3 VYHŘÍVANÁ PODLOŽKA (HOT BED)	51
3.4 WADE EXTRUDER, TISKACÍ TRYSKA (HOT END)	66
3.5 TEPLOTNÍ ANALÝZA SESTAVY 3D TISKÁRNY	78
4. ZÁVĚR.....	82
5. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	84
6. PŘÍLOHA	87

Seznam obrázků

OBR. 1: ROZDĚLENÍ TECHNOLOGIE RAPID PROCESSING V PRŮMYSLVÉM ODVĚTVÍ. [1]	11
OBR. 2: PRINCIP TECHNOLOGIE SELECTIVE LASER SINTERING. [2]	12
OBR. 3: PRINCIP TECHNOLOGIE FDM. [3]	13
OBR. 4: PRINCIP TECHNOLOGIE FDM, TISK S PODPŮRNÝM MATERIÁLEM. [4].....	13
OBR. 5: PRINCIP TECHNOLOGIE FUSED DEPOSITION MODELING. [4].....	14
OBR. 6: PRINCIP TECHNOLOGIE LAMINATED OBJECT MANUFACTURE. [6]	15
OBR. 7: PRINCIP TECHNOLOGIE SOLID GROUND CURING. [2].....	16
OBR. 8: ROSTOUCÍ TREND 3D TISKÁREN. [6]	17
OBR. 9: 3D TISKÁRNA REPRAP (MODIFIKACE UETE FEKT).	18
OBR. 10: VYTISKNUTÉ 3D DÍLY NA NOVOU REPRAP TISKÁRNU. [9]	19
OBR. 11: ARDUINO MEGA 2560. [10]	19
OBR. 12: WADE EXTRUDER. [11]	20
OBR. 13: ŘEZ TRYSKOU (HOT END). [12]	21
OBR. 14: PRŮBĚH PULSNĚ ŠÍŘKOVÉ MODULACE (PWM). [13]	22
OBR. 15: PŘÍKLAD MODELU EXPORTOVANÉHO DO STL FORMÁTU. [16].....	24
OBR. 16: PROSTŘEDÍ PROGRAMU PRONTERFACE. [18]	26
OBR. 17: UKÁZKA ROZHŘANÍ PROGRAMU SKEINFORGE. [19]	27
OBR. 18: GRAFICKÉ ROZHŘANÍ PROGRAMU REPLICATORG. [19].....	28
OBR. 19: TLAKOVĚ – TEPLTNÍ DIAGRAM PRO MATERIÁL ABS. [22]	31
OBR. 20: STRUNA (DRÁT) PRO 3D TISKÁRNY. [25].....	35
OBR. 21: SCHÉMATICKÉ ZOBRAZENÍ TEPLTNÍHO POLE A IZOTERM. [26]	38
OBR. 22: ELEMENTÁRNÍ TĚLESO K ODVOZENÍ FOURIEROVY ROVNICE. [26].....	39
OBR. 23: GRAFICKÉ PROSTŘEDÍ SOLIDWORKS.	43
OBR. 24: ALGORITMUS ITERAČNÍHO POSTUPU VE FLOW SIMULATION. [29].....	46
OBR. 25: POUŽÍVANÉ TVARY KONEČNÝCH OBJEMŮ (STRUKTUROVANÁ A NESTRUKTUROVANÁ SÍŤ). [29]	47
OBR. 26: VÝPOČETNÍ SÍŤ. [30].....	48
OBR. 27: VÝPOČETNÍ SÍŤ – KONTROLNÍ OBJEM. [30]	48
OBR. 28: VYMODELOVANÁ VÝPOČTOVÁ SÍŤ.	50
OBR. 29: DEFEKT MODELU ZPŮSOBENÝ ABSENCÍ VYHŘÍVANÉ PODLOŽKY.	51
OBR. 30: VYHŘÍVANÁ PODLOŽKA REALIZOVANÁ SPIRÁLOU Z MĚDĚNÉHO DRÁTU. [32]	52
OBR. 31: VYHŘÍVANÁ PODLOŽKA REALIZOVÁNA VÝKONOVÝMI REZISTORY. [33]	53

OBR. 32: ROZDĚLENÍ MODELU HOT BED METODOU KONEČNÝCH OBJEMŮ (MESH).	55
OBR. 33: TEPLTNÍ PROFIL HOT BED VYHŘÍVANÉ VÝKONOVÝMI REZISTORY.	55
OBR. 34: TEPLTNÍ PROFIL HOT BED VYHŘÍVANÉ VÝKONOVÝMI REZISTORY.	56
OBR. 35: VYHŘÍVANÁ DESKA REALIZOVANÁ PLOŠNÝMI SPOJI. [34]	57
OBR. 36: ROZDĚLENÍ MODELU HOT BED METODOU KONEČNÝCH OBJEMŮ (MESH).	60
OBR. 37: MOTIV TOPNÉHO MEANDRU.	60
OBR. 38: TEPLTNÍ PROFIL HOT BED VYHŘÍVANÉ PLOŠNÝM SPOJEM.	61
OBR. 39: 3D TEPLTNÍ PROFIL HOT BED VYHŘÍVANÉ PLOŠNÝM SPOJEM.	61
OBR. 40: TEPLTNÍ PROFIL HOT BED ZACHYCENÝ TERMOKAMEROU.	62
OBR. 41: POROVNÁNÍ TEPLOT PODLE TYPU VYTÁPĚNÍ.	63
OBR. 42: PŘÍMKY DEFINOVANÉ PRO ZOBRAZENÍ TEPLTNÍHO PROFILU.	63
OBR. 43: TEPLTNÍ PROFIL MĚŘENÝ NA KONTROLNÍCH PŘÍMKÁCH U PODLOŽKY VYHŘÍVANÉ VÝKONOVÝMI REZISTORY.	64
OBR. 44: TEPLTNÍ PROFIL MĚŘENÝ NA KONTROLNÍCH PŘÍMKÁCH U PODLOŽKY VYHŘÍVANÉ MĚDĚNÝM MEANDREM.	64
OBR. 45: PŘÍKLAD VYTISKNUTÉHO MODELU DOPLNĚNÉHO MATKAMI.	65
OBR. 46: PŘÍKLAD VYTISKNUTÉHO MODELU DOPLNĚNÉHO O LOŽISKO.	65
OBR. 47: NA OBRÁZKU ZLEVA MODEL TISKACÍ TRYSKY, ŘEZ TISKACÍ TRYSKY A TISKACÍ TRYSKA PŘIPEVNĚNÁ K TĚLU EXTRUDERU S CHLAZENÍM STUDENÉ ČÁSTI TRYSKY.	67
OBR. 48: P-V KŘIVKA POUŽITÉHO VENTILÁTORU SUNON KDE1204PFV1.11. [35]	69
OBR. 49: ROZDĚLENÍ MODELU EXTRUDERU NA VÝPOČTOVOU SÍŤ METODOU KONEČNÝCH OBJEMŮ (MESH).	70
OBR. 50: DETAIL VÝPOČTOVÉ SÍŤE.	70
OBR. 51: TEPLTNÍ ROZLOŽENÍ NA HROTU TISKACÍ TRYSKY.	71
OBR. 52: TEPLTNÍ PROFIL TISKACÍ TRYSKY V ŘEZU.	71
OBR. 53: TEPLTNÍ ROZLOŽENÍ NA HROTU TISKACÍ TRYSKY.	72
OBR. 54: ZOBRAZENÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU KOLEM TISKACÍ TRYSKY.	72
OBR. 55: TEPLTNÍ PROFIL TISKACÍ TRYSKY V ŘEZU.	73
OBR. 56: POROVNÁNÍ TEPLOT JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ TRYSKY.	74
OBR. 57: POROVNÁNÍ TEPLOT NA PŘÍMCE VEDENÉ STŘEDEM TRYSKY (TRASA PRO FILAMENT).	74
OBR. 58: TEPLTNÍ PROFIL MODELU BEZ POUŽITÍ VENTILÁTORU A PROFIL S VENTILÁTOREM.	75
OBR. 59: TEPLTNÍ PROFIL TRYSKY ZACHYCENÝ TERMOKAMEROU BEZ POUŽITÍ VENTILÁTORU A PROFIL S VENTILÁTOREM.	75

OBR. 60: SCHÉMA ZAPOJENÍ PWM DRIVERU.....	76
OBR. 61: FYZICKÝ MODEL 3D TISKÁRNY REPRAP A MODEL VYTVOŘENÝ V SOLIDWORKS.	78
OBR. 62: TEPLTNÍ PROFIL 3D TISKÁRNY ZOBRAZENÝ V ŘEZU.	79
OBR. 63: TEPLTNÍ PROFIL NA POVRCHU HOT BED A HOT END.	79
OBR. 64: ZOBRAZENÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU TISKOVOU HLAVOU.	80
OBR. 65: TEPLTNÍ PROFIL CELÉ 3D TISKÁRNY ZACHYCENÝ TERMOKAMEROU.	81
OBR. 66: TEPLTNÍ PROFIL CELÉ 3D TISKÁRNY ZACHYCENÝ TERMOKAMEROU.	81
OBR. 67: TEPLTNÍ PROFIL VÝKONOVÝMI REZISTORY VYHŘÍVANÉ PODLOŽKY (HOT BED).	87
OBR. 68: TEPLTNÍ PROFIL VÝKONOVÝMI REZISTORY VYHŘÍVANÉ PODLOŽKY (HOT BED).	87
OBR. 69: TEPLTNÍ PROFIL MEANDREM VYHŘÍVANÉ PODLOŽKY (HOT BED).	88
OBR. 70: 3D TEPLTNÍ PROFIL MEANDREM VYHŘÍVANÉ PODLOŽKY (HOT BED).	88
OBR. 71: TEPLTNÍ PROFIL 3D TISKÁRNY ZOBRAZENÝ V ŘEZU (MAXIMÁLNÍ TEPLOTA STUPNICE: 96 °C).	91
OBR. 72: TEPLTNÍ PROFIL 3D TISKÁRNY ZOBRAZENÝ V ŘEZU (MAXIMÁLNÍ TEPLOTA STUPNICE: 96 °C).	91
OBR. 73: TEPLTNÍ PROFIL 3D TISKÁRNY ZOBRAZENÝ V ŘEZU (MAXIMÁLNÍ TEPLOTA STUPNICE: 60 °C).	92
OBR. 74: TEPLTNÍ PROFIL 3D TISKÁRNY ZOBRAZENÝ V ŘEZU (MAXIMÁLNÍ TEPLOTA STUPNICE: 60 °C).	92
OBR. 75: TEPLTNÍ PROFIL 3D TISKÁRNY NA POVRCHU HOT BED A HOT END (MAXIMÁLNÍ TEPLOTA STUPNICE: 235 °C).	93
OBR. 76: TEPLTNÍ PROFIL 3D TISKÁRNY NA POVRCHU HOT BED A HOT END (MAXIMÁLNÍ TEPLOTA STUPNICE: 235 °C).	93
OBR. 77: TEPLTNÍ PROFIL 3D TISKÁRNY NA POVRCHU HOT BED A HOT END (MAXIMÁLNÍ TEPLOTA STUPNICE: 30 °C).	94
OBR. 78: TEPLTNÍ PROFIL 3D TISKÁRNY NA POVRCHU HOT BED A HOT END SE ZOBRAZENÍM PROUDĚNÍ VZDUCHU STUDENOU ČÁSTÍ TISKACÍ TRYSKY (MAXIMÁLNÍ TEPLOTA STUPNICE: 235 °C).	94
OBR. 79: TEPLTNÍ PROFIL TISKACÍ TRYSKY ZACHYCENÝ TERMOKAMEROU.....	95
OBR. 80: TEPLTNÍ PROFIL CELÉ 3D TISKÁRNY ZACHYCENÝ TERMOKAMEROU.	95
OBR. 81: VYTISKNUTÝ MODEL OBSAHUJÍCÍ DEFEKT ZPŮSOBENÝ ABSENCÍ VYHŘÍVANÉ PODLOŽKY.	96
OBR. 82: PŘÍKLAD VYTISKNUTÉHO MODELU.	96
OBR. 83: PŘÍKLAD VYTISKNUTÉHO MODELU.	96
OBR. 84: PŘÍKLAD VYTISKNUTÉHO MODELU.	97
OBR. 85: 3D TISKÁRNA REPRAP.	97

Seznam tabulek

TAB. 1: VYBRANÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU ABS (AKRYLONYTRIL BUTADIEN STYREN)	30
TAB. 2: VYBRANÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU PLA (POLYACTID ACID)	34
TAB. 3: POUŽITÉ MATERIÁLY PRO MODEL EXTRUDERU.....	54
TAB. 4: POUŽITÉ MATERIÁLY PRO MODEL EXTRUDERU.....	59
TAB. 5: POROVNÁNÍ TEPLIT PODLE TYPU VYTÁPĚNÍ	62
TAB. 6: POUŽITÉ MATERIÁLY PRO MODEL EXTRUDERU.....	68
TAB. 7: POROVNÁNÍ TEPLIT JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ TRYSKY	73
TAB. 8: SEZNAM SOUČÁSTEK.....	77
TAB. 9: TEPLITY JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ 3D TISKÁRNY	80
TAB. 10: TEPLITY VYPOČÍTANÉ PROGRAMEM SOLIDWORKS (GOAL PLOTS)	89
TAB. 11: TEPLITY VYPOČÍTANÉ PROGRAMEM SOLIDWORKS (GOAL PLOTS)	89
TAB. 12: TEPLITY VYPOČÍTANÉ PROGRAMEM SOLIDWORKS (GOAL PLOTS)	90
TAB. 13: TEPLITY VYPOČÍTANÉ PROGRAMEM SOLIDWORKS (GOAL PLOTS)	90

Seznam použitých veličin

Název	Značka	Jednotka
čas	τ	s
teplota	ϑ	K
rychlost	v	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
měrná entalpie	i	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
objemová hustota	ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
gradient teploty	grad ϑ	$\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$
Hamiltonův operátor	Δ	m^{-1}
hustota tepelného toku	q	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
měrná tepelná kapacita při stálém tlaku dané látky	c_p	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
množství tepla	Q	J
objem	V	m^3
plocha	S	m^2
součinitel přestupu tepla	λ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
součinitel teplotní vodivosti	a	$\text{m}^2\cdot\text{s}$
teplotní tok	P	W
rychlost tekutiny	u	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
tlak tekutiny	P	Pa
hustota tekutiny	ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
teplota tekutiny	T	K
vnitřní energie	e	J
vnější hmotnostní síly	S_i	$\text{Kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
přívod či odvod tepla vztažený na jednotku objemu	Q_H	$\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$
difusní tok tepla	q_i	$\text{m}^2\cdot\text{K}$
tensor vazkých napětí	τ_{ik}	Pa
indexy u veličin udávají sumaci dle tří směrů souřadnic (Einsteinova sumace)	ij	-
napětí	U	V
proud	I	A
odpor	R	Ω
výkon	P	W
délka desky	l_b	mm
šířka desky	w_b	mm
tloušťka mědi	t_{cu}	mm

Úvod

3D tisk je laické označení technologie tzv. aditivní výroby, při níž vzniká výsledný produkt postupným nanášením stavebního materiálu po velmi tenkých vrstvách, které se vzájemně spojují např. tavením nebo lepením. Na rozdíl od tzv. konvenčních způsobů výroby, jako je třeba třískové obrábění, při nichž je materiál naopak odebírán, lze s pomocí 3D tisku vytvářet náročné tvary a konstrukce, jež by nebylo možné zhotovit žádným jiným způsobem. 3D tisk je pro rychlou přípravu výroby vhodný zejména pro kusovou a malosériovou výrobu.

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.

Naproti tomu, v dnešní době, pořízení „domácí“ 3D tiskárny začíná být pro nekomerční účely cenově dostupné. Ceny takovýchto tiskáren začínají na 45 000 – 65 000 Kč.

Další možností je takovou 3D tiskárnu si doma vyrobit. Existuje spousta návrhů a konstrukcí, které jsou v podstatě klonem takzvané REPRAP tiskárny (Replicating Rapid-prototyper), která se poprvé objevila v roce 2007 v takzvané verzi Darwin. Tato tiskárna se dá pořídit za 17 000 – 21 000 Kč.

Problém však nastává ve zprovoznění celé tiskárny. Jelikož je takovýto projekt „open source“ je řešení teplotních profilů, které jsou v tiskárně nastaveny a jsou nezbytné pro správnou funkci celého aparátu, na amatérské úrovni, to znamená metoda „pokus – omyl.“

Předkládaná diplomová práce se zabývá technologií 3D tisku na nekomerčních tiskárnách typu RepRap (Replicating Rapid-prototyper). Hlavním tématem této práce je analýza dvou nejdůležitějších částí této tiskárny, a to hot bed (vyhřívaná podložka) a hot end (tiskací tryska). Analýza je realizována jako teplotní s přestupem tepla pomocí konvekce a kondukce a je zde využito systému CAD (Computer Aided Design) a CAE (Computer Aided Engineering) SolidWorks pro vytvoření trojrozměrného modelu a SolidWorks Flow Simulation, pracující metodou konečných objemů, pro analýzy teplotních profilů v tiskárně.

V první části práce jsou teoreticky popsány technologie pro 3D tisk, jsou zde stručně rozebrány jednotlivé hardwarové komponenty, softwarové vybavení pro tiskárnu RepRap a nejčastěji používané plastové materiály pro 3D tisk a jejich výhody a nevýhody.

Podstatnou částí je kapitola, popisující matematické modely přestupu tepla, jenž jsou stěžejní pro realizaci teplotní analýzy navrhovaných částí 3D tiskárny.

V praktické části práce je charakterizován program SolidWorks a SolidWorks Flow Simulation, metoda konečných objemů a základní zákony zachování pro proudící tekutinu.

V programu SolidWorks je vytvořen inovovaný model 3D tiskárny pracující s ABS plastem, vytvořeny modely vyhřívaných podložek a tiskací trysky. Modely jsou podrobeny teplotní analýze a po získání teplotních profilů s následným vyhodnocením je realizováno nejlepší řešení.

1. Teoretická část

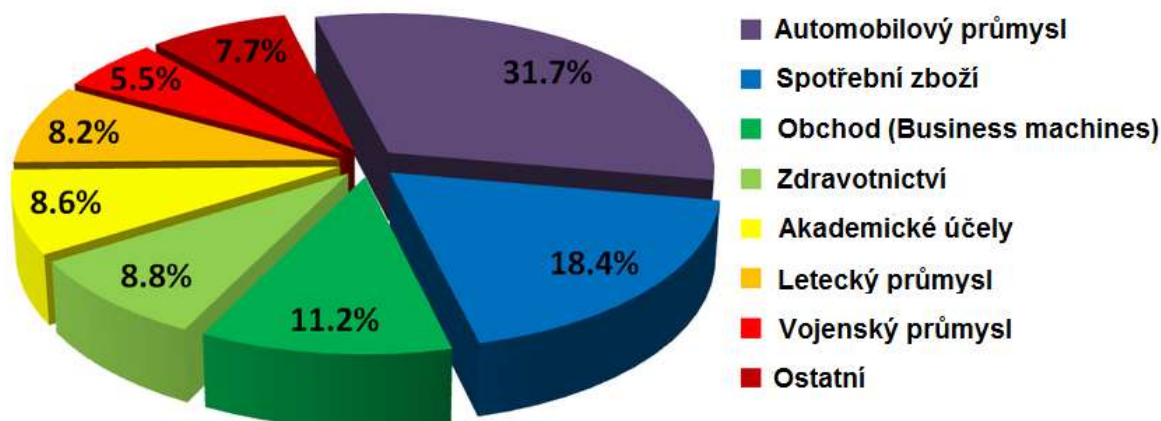
1.1 Úvod - 3D tisk

Technologie 3D tisku vznikla ve druhé polovině 20. století, kdy si Charles Hull nechal v roce 1986 patentovat technologii stereolitografie, tato metoda vytváří objekty pomocí postupného vytvrzování polymerů pomocí záření různých vlnových délek (UV záření). Později vznikla první pracovní 3D tiskárna pro širokou veřejnost vyrobená společností 3D Systems založená Charlesem Hullem.

V posledních letech zažívá 3D tisk obrovský úspěch. 3D tisk je proces vytvářející trojrozměrný pevný model libovolného tvaru podle digitální předlohy modelu. 3D tisku je dosaženo pomocí specifického zařízení, které z roztaveného materiálu tiskem vrstvy po vrstvě vytvoří finální model. 3D tisk je považován za odlišný od tradičních obráběcích technik, které vytvářejí model odstraněním materiálu metodami, jako je například frézování, vrtání a řezání. Technologie umožňuje tisknout z různých materiálů, jejichž škála se rychle rozšiřuje. V současné době se nejčastěji tiskne z plastů.

Využívá se v nejrůznějších odvětvích průmyslu. Můžeme se s ním setkat například při tvorbě modelů určených pro prezentační účely či v architektuře pro tvorbu zmenšených modelů budov nebo díky své přesnosti při výrobě kostních implantátů ve zdravotnictví nebo v automobilovém a leteckém průmyslu.

3D tiskárny používají pro tvorbu 3D modelů technologie Rapid Prototyping. Jedná se o skupinu technologií umožňující rychlou výrobu prototypů a modelů. Skládá se ze tří procesů preprocessing, processing a post-processing. Výrobní postup začíná vytvořením 3D modelu v CAD softwaru a převodem do formátu STL nebo načtením modelu prostorovým scannerem a transformováním do vhodného formátu pro obslužný software 3D tiskárny. Následně je v pre-processingovém softwaru model rozdělen na tenké vrstvy a jsou dopočítány dráhy pro tiskové hlavy v 3D tiskárně. Následně se provede samotný tisk modelu a jeho vyjmutí z 3D tiskárny. Dále můžou být na modelu provedeny finální úpravy pro zvýšení životnosti.



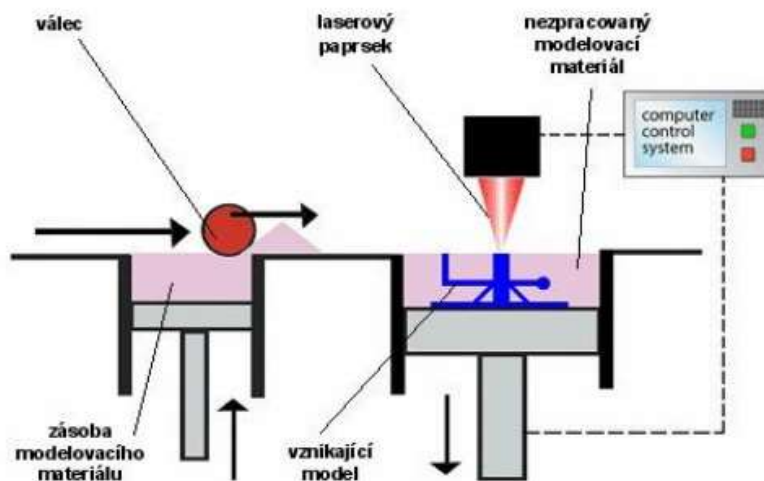
Obr. 1: Rozdělení technologie Rapid Processing v průmyslovém odvětví. [1]

1.2 Technologie 3D tisku

SLS - Selective Laser Sintering

Technologie SLS byla vynalezena v polovině osmdesátých let doktorem Carlem Deckardem. Nejznámějším výrobcem těchto zařízení je v současnosti společnost 3D Systems v USA.

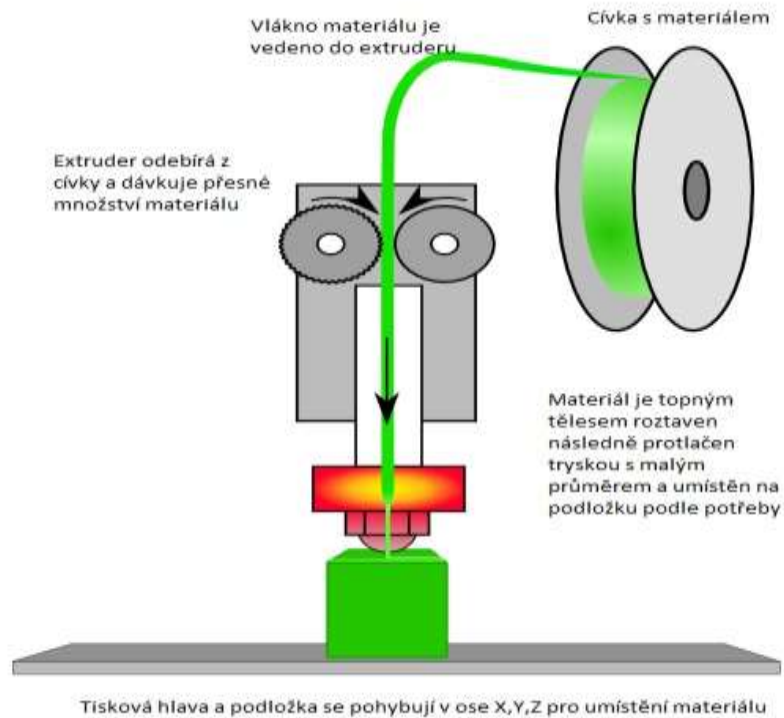
SLS je jednou z nejstarších, ale velmi efektivních metod výroby prototypů. Využívá vysoce výkonný laserový paprsek k tavení a spékání jemných zrněk tiskového materiálu do požadovaného tvaru. Tvorba objektů probíhá po vrstvách. Tato technologie nabízí řadu výhod. Pro tisk lze použít široké spektrum komerčních materiálů, dodávaných v práškové formě - plasty, kov, či dokonce sklo. Vzhledem k tomu že tištěný objekt je v době tvorby trvale obklopen neroztaveným materiálem, není nutná tvorba podpůrné struktury při tisku složitých objektů. Mezi nevýhody této technologie lze bezesporu zařadit vysokou energetickou náročnost, cenu zařízení, které je zpravidla vybaveno karbon-dioxidovým zdrojem paprsku, a dále pak nemožnost tisku uzavřených dutin, ve kterých samozřejmě materiál zůstane po tisku uzavřen. [2]



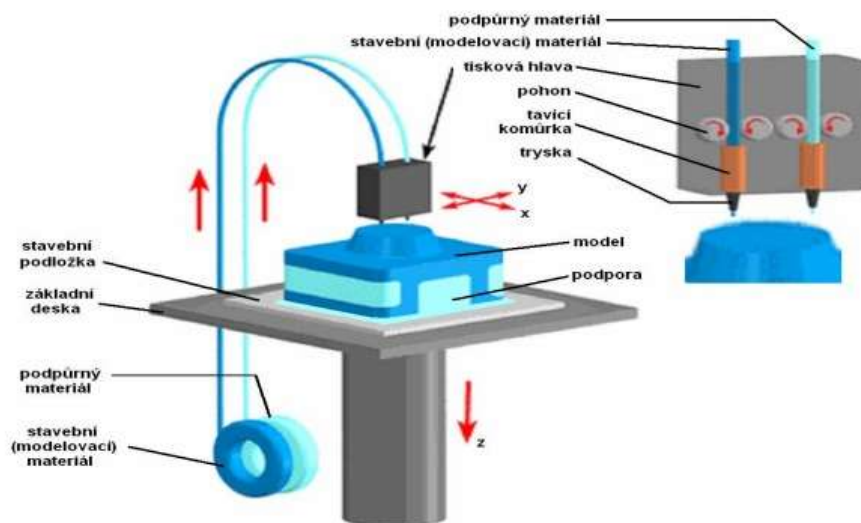
Obr. 2: Princip technologie Selective Laser Sintering. [2]

FDM - Fused Deposition Modeling

V současné době se jedná o jednu z nejpoužívanějších technologií pro 3D tisk, tvorbu prototypů a funkčních vzorků výrobků. Princip není podobně jako u SLS technologie složitý. Do tiskové hlavy je pod tlakem zaváděn tiskový materiál primární (stavební) a sekundární (podpůrný) pro vytvoření podpůrné konstrukce. Tisková hlava materiál roztaví a vytlačuje jej ven tenkou tryskou. Celá soustava se pohybuje nad tiskovým stolem a z vytlačovaného materiálu opět po jednotlivých vrstvách tvoří výsledný objekt. [2]



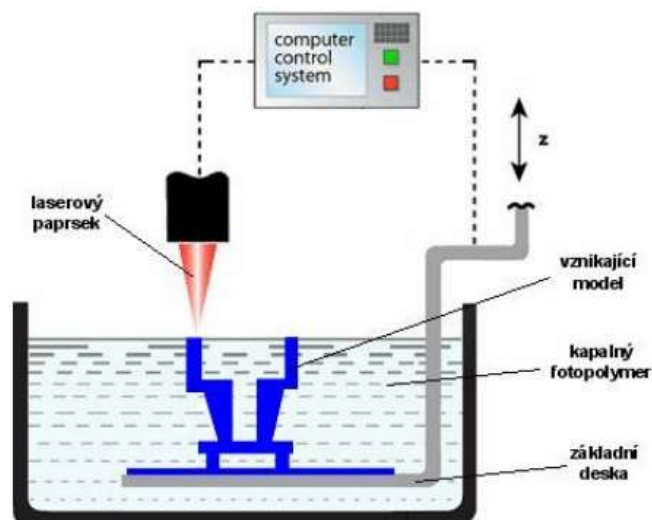
Obr. 3: Princip technologie FDM. [3]



Obr. 4: Princip technologie FDM, tisk s podpůrným materiálem. [4]

SLA – Stereolithography

Stereolitografie je již dnes také velmi rozšířenou technologií pro tvorbu trojrozměrných objektů. K vytváření jednotlivých vrstev objektu se využívá ultrafialového laserového paprsku, který vrstvu vykresluje na hladinu polymerové tekutiny, vytvrzované UV světlem. Po dokončení vrstvy se tištěný objekt ponoří do polymeru a následuje tvorba další vrstvy. Tato technologie byla vynalezena a patentována v roce 1986 Charlesem W. Hullem. Její základní nevýhodou je nemožnost výběru materiálu. I přesto, že UV laser potřebuje pro vytvrzování polymeru pouze zlomek výkonu v porovnání s technologií SLS, zůstává tato technologie cenově nedostupná běžnému uživateli. Jedná se o jednu z nejpřesnějších metod 3D tisku (teoretická přesnost odpovídá velikosti molekuly polymeru). Této metody se využívá při výrobě integrovaných objektů. Přesnost výsledného modelu je závislá na hustotě polymeru, šířce paprsku, délce a intenzitě ozařování. [2]

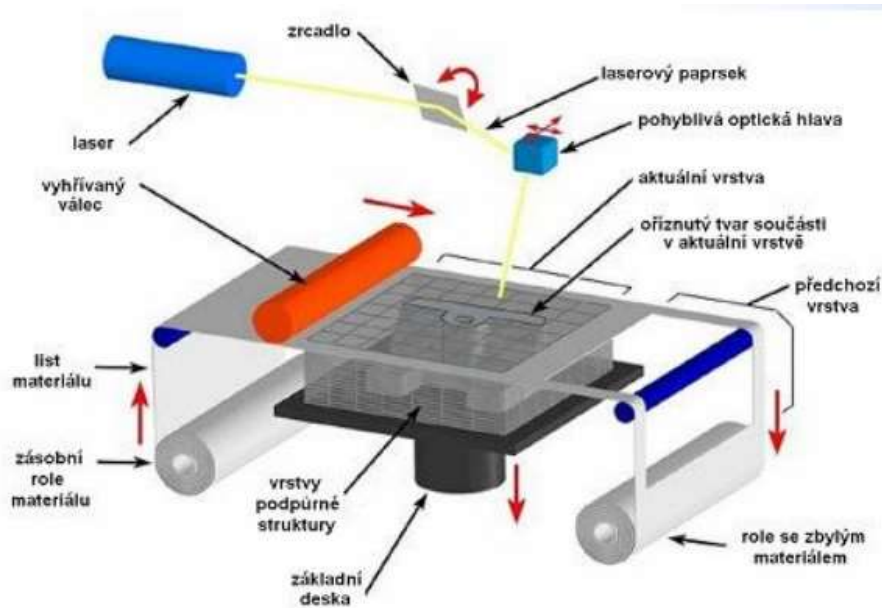


Obr. 5: Princip technologie Fused Deposition Modeling. [4]

Laminated Object Manufacture (LM, LOM)

Technologie laminování se také v poslední době dostává do popředí zájmu. Principem tohoto druhu tisku 3D objektů je laminování jednotlivých plátů materiálu (papír, nylon nebo polyester) na tištěný objekt a následné oříznutí přebývajícího materiálu buď mechanicky, nebo laserem. Vyřezáním profilu je plocha rozdělena na dvě části, vrstvu modelu a podpůrnou vrstvu (v různých částech nařezanou pro snadné vyjmutí modelu). Výhody této technologie je vysoká přesnost, možnost výroby rozměrnějších modelů, nevznikají žádné toxické látky, nízké náklady na pořízení a provoz tiskárny.

Naopak nevýhodou je obtížné zhotovení součástí s tenkou stěnou. Modely nejsou vhodné pro mechanické zkoušky a používají se především pro prezentační účely. Dále pak neefektivní spotřeba použitého materiálu, neboť část je použita jako podpůrná konstrukce a nelze ji znovu aplikovat. [2,4]



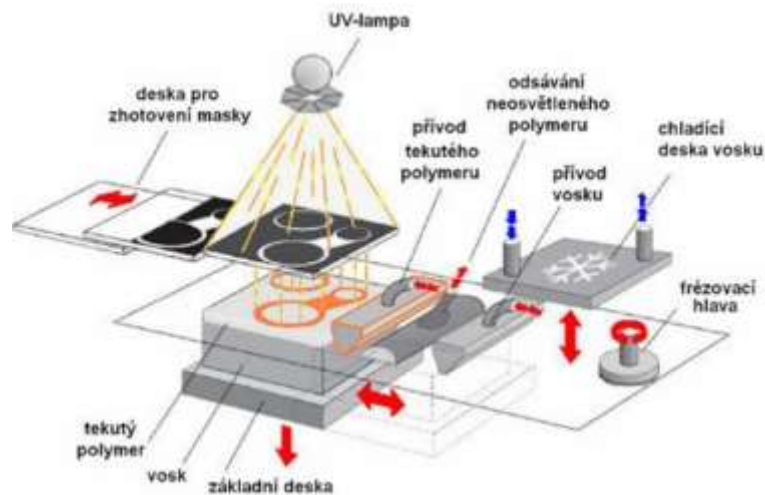
Obr. 6: Princip technologie Laminated Object Manufacture. [6]

Solid Ground Curing (SGC)

Technologie Ground Curing spočívá ve vytvrzování fotocitlivého polymeru. Jako materiál používá také tekutý opticky vytvrditelný polymer jako u stereolitografie, ale principem výroby se od ní liší. Rozdíl je v tom, že celá vrstva je zde vytvářena najednou, tj. na jedno osvětlení UV lampou. Osvícení se provádí přes negativní masku, která je nejčastěji tvořena skleněnou destičkou, na níž je vyznačen tvar vytvářené vrstvy. Vytváření součásti probíhá ve dvou oddělených, současně probíhajících cyklech. Nejdříve je vytvořena negativní maska, a potom dojde k osvětlení polymeru. Osvícený polymer je vytvrzen, neosvícený tekutý polymer je odsáván a vzniklý meziprostor je vyplněn voskem.

V dalším kroku je povrch vytvořené vrstvy ofrézován na požadovanou výšku vrstvy, a tím je připraven na nanesení další tenké vrstvy tekutého polymeru. Vosková výplň zůstane v dutinách vytvářené součásti jako podpůrná konstrukce až do konce procesu vytváření, potom je chemickou cestou (pomocí kyseliny citronové) odstraněna. Výhodou je vznik celé vrstvy najednou a přesnost díky opracovávání vrstvy.

Naopak nevýhodou je vysoká cena zařízení i materiálu a nutnost kvalifikované obsluhy. [2,5]

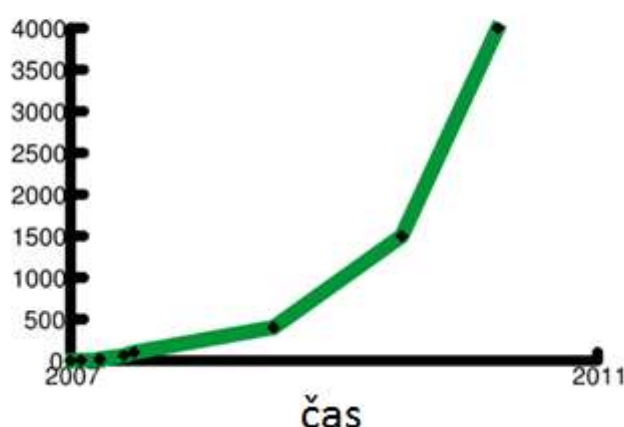


Obr. 7: Princip technologie Solid Ground Curing. [2]

1.3 RepRap tiskárna (Replicating Rapid-prototyper)

Celý projekt RepRap vznikl v roce 2005 na britské University of Bath a velmi rychle se rozšířil do celého světa. Je to klasický open-source projekt, takže každý si může tiskárnu postavit doma a začít ji vylepšovat libovolným směrem. Komerční stroje stojí řádově stovky tisíc, projekt RepRap se však snaží 3D tiskárny zpřístupnit širší veřejnosti. V současné době existují čtyři typy RepRap tiskáren Darwin (už se nepoužívá), Mendel, Mendel – Prusa a Huxley z těchto typů vznikají další modifikace RepRap tiskárny.

počet funkčních 3D tiskáren RepRap



Obr. 8: Rostoucí trend 3D tiskáren. [6]

Software pro tvorbu 3D modelu je stejně jako tiskárna open-source a je tedy možné použít výhradně otevřené aplikace. Nejdříve je vytvořen 3D model v programu Blender nebo Open SCAD, ve kterém se modely spíše programují, a lze zadávat modely přesněji. Výsledkem je 3D soubor formátu STL, který je potřeba zpracovat ve sliceru. Tento program rozdělí 3D model na tenké vrstvy a pro každou vrstvu vypočítá dráhu pro tiskovou hlavici a kolik materiálu se má vytlačit. Výsledkem je program pro tiskárnu, který obsahuje instrukce pro pohyb tiskové hlavy a dávkování materiálu. Počítač tento program předá ovládací elektronice Arduino.

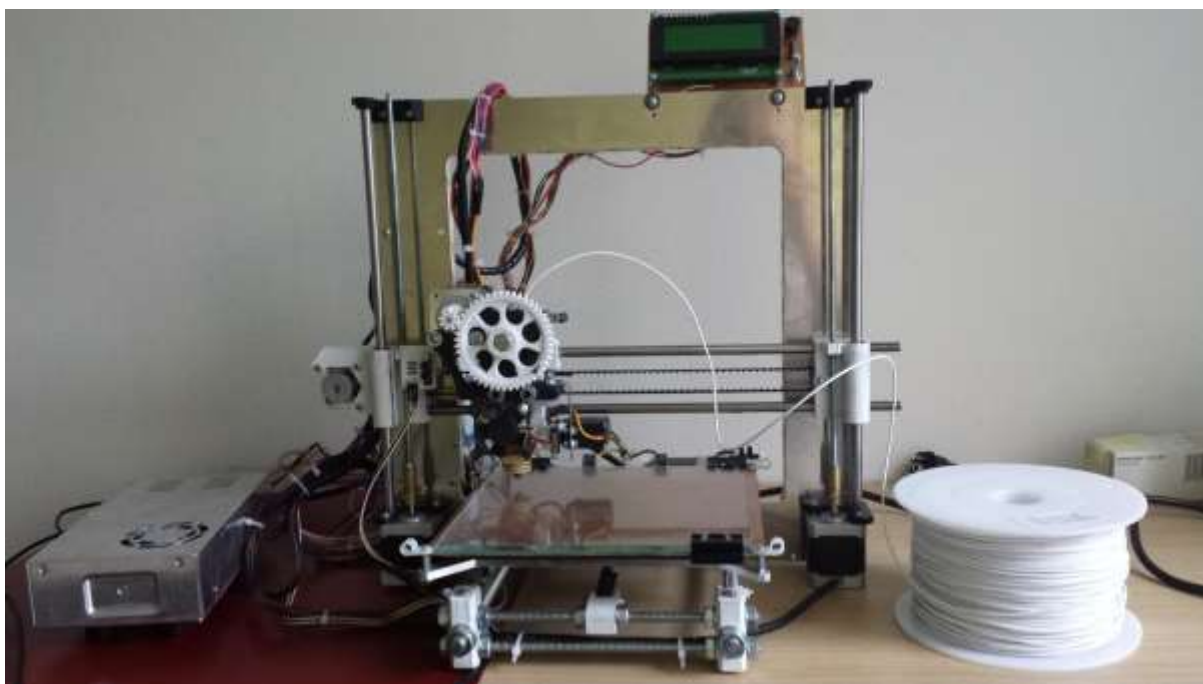
Tiskárna se skládá z velmi jednoduché konstrukce. V podstatě se skládá z plastových součástek, závitových tyčí, řídicí elektroniky, ložisek, krokových motorů, vyhřívané desky a tiskové hlavy s tryskou. Základnu tvoří vyhřívaná podložka, která se před stavbou modelu zahřeje na teplotu od 60 – 110 °C. Podložka je důležitá hlavně při tisku první vrstvy, aby se horký plast zachytil na podložku a aby nedocházelo k deformaci v rozích a k vnitřnímu pnutí v plastech (ABS), které se objeví v případě rychlého ochlazení. Podložka je nejčastěji vyrobena z plošného spoje, na kterém je vyleptán vhodný motiv topné spirály.

Technologie tisku v RepRap projektu spočívá ve vytlačování tiskového materiálu skrz tiskovou hlavu, kde se 3D tiskový materiál nataví a nanese na základnovou desku.

Nejčastěji používané materiály pro tisk jsou termoplasty ABS a PLA. Tyto materiály se pro tisk používají ve formě struny (drátu) namotané na roli o průměru 1,75 – 3 mm. Celkový pohyb při tisku je zajištěn třemi mechanismy. Základna vykonává pohyb dopředu a dozadu. Tisková hlava je umístěna na dvou kolejničkách, kde se pohybuje vlevo a vpravo. Tisková hlava pak nakreslí vždy jednu vrstvu a posune se o kousek výš, kde začne kreslit další. Takto dochází k nanášení jednotlivých vrstev, dokud není finální model dokončen.

Nespornou výhodou tohoto projektu je bezkonkurenční cena, která se pohybuje kolem 13 000 Kč. V budoucnu by měla tato tiskárna umět tisknout i tištěné spoje (v podstatě to dokáže už teď, dokonce na tomto open source byl vytištěn plně funkční bipolární tranzistor).

Další výhodou tiskárny RepRap je, že se umí sama replikovat. Tiskárna je schopna vyrobit plastové díly na novou tiskárnu za cca za 18 hodin. Nevýhodou v současné době je, že neumí tisknout podpůrný materiál, tím dochází k značnému omezení tisku konstrukčně složitých výrobků. Kvalita a povrchové rozlišení nejsou u zhotovených součástek tak dobré jako u jiných technologií 3D tisku. [7,8]



Obr. 9: 3D tiskárna RepRap (modifikace UETE FEKT).



Obr. 10: Vytisknuté 3D díly na novou RepRap tiskárnu. [9]

1.4 Hardwarové komponenty RepRap tiskárny

Elektronika Arduino Mega 2560

Elektronika Arduino Mega je využívána v RepRap tiskárnách k řízení krokových motorků, vytápění trysky extruderu a desky (hot bed), spínání větráku, tisku z SD paměťové karty a jiných periférií.

Arduino Mega 2560 je vývojová deska s mikroprocesorem založená na principu ATmega2560. Modul je vybaven 54 digitálními vstupy a výstupy (16 těchto vstupů a výstupů lze použít jako kanály s modulací šířkou impulsů PWM), 16 analogových vstupů, 4 UART, 16 MHz krystalový oscilátor, připojení pomocí USB, napájecí konektor, konektor IKSP, a resetovací tlačítko. ATmega2560 má 256 KB paměti flash pro ukládání kódu (z toho je 8 KB používá zavaděč), 8 KB SRAM a 4 KB EEPROM. Obsahuje vše potřebné k podpoře mikro kontrolérů. Arduino Mega je kompatibilní s většinou periférií určených pro Arduino Duemilanove nebo Diecimila.



Obr. 11: Arduino Mega 2560. [10]

Vyhříváná podložka (hot bed), Wade extruder a tiskací tryska (hot end)

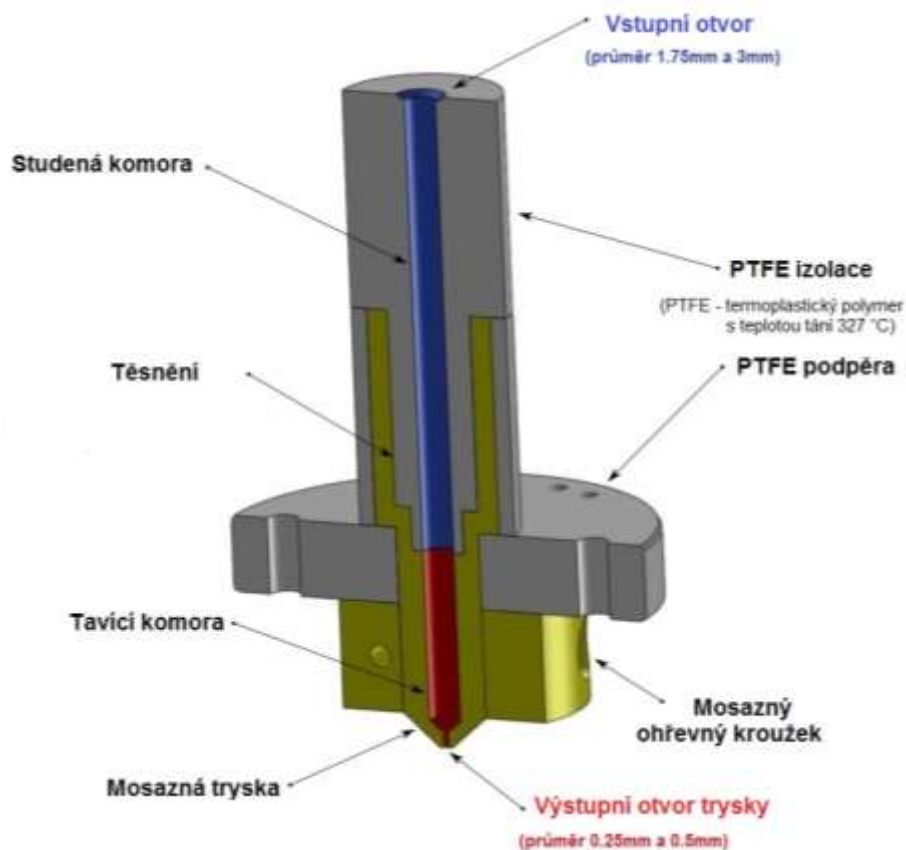
Vyhříváná podložka a tiskací tryska, která je součástí extruderu jsou dvě nejdůležitější části 3D tiskárny RepRap. Kvalita těchto částí je hlavním faktorem pro kvalitní tisk a podrobněji se jim věnuji v praktické části této práce.

Vyhříváná podložka (hot bed) je důležitá především při tisku první vrstvy z materiálu ABS, absencí vyhříváné podložky by docházelo prudkým ochlazením k vnitřnímu pnutí v materiálu a tím k posunutí a deformaci tisknutého modelu. Vyhříváná podložka by měla mít teplotu od 60 do 110°C.

Extruder je zařízení, které tlačí strunu (plast) do trysky a určuje, tak kolik plastu se vytlačí. RepRap je obvykle vybaven Wade extruderem, který se skládá ze dvou částí. Studená vrchní část k přivádění materiálu a teplá spodní část, která materiál roztaví a vytlačuje na vyhřívánou podložku.



Obr. 12: Wade Extruder. [11]



Obr. 13: Řez tryskou (Hot end). [12]

Způsob řízení teploty hot bed a hot end

Pulsně šířková modulace (PWM) s dostatečně velkými tranzistory typu MOSFET spolu s nízkým kmitočtem (100Hz s využitím až do 1kHz) se dobře osvědčila pro vytápění obvodů (hot bed a hot end).

Řízení teploty podložky je řešeno formou termistoru připojeného přes PWM driver na Arduino, který si teplotu řídí z tiskového softwaru spínáním napětí dle potřeby. Pro úspěšnou regulaci podložky je potřeba použít kvalitní a přesné termistory. Nejčastěji se používá NTC termistor o rezistivitě 100 k Ω a maximální teplotě 300°C.

Jako zdroj napětí se u RepRap používají ATX zdroje z osobních počítačů. Vyhřívaná podložka je napájena z 12V větve. Je nezbytně nutné, aby zdroj dodával pro větev 12V, alespoň proud 15A. V opačném případě mohou nastat problémy při napájení vyhřívané podložky, která potřebuje proud 10 až 15A. Důvodem je spínání podložky, které je řešeno pomocí PWM (pulsně šířková modulace).

U hot end se nastavuje maximální teplota na 275 °C, pokud se tato teplota překročí, dojde k zastavení vyhřívání, aby se zabránilo poškození hot end. Užitečným doplňkem u hot end je ventilátor řízený PWM, který se používá při vysoké rychlosti tisku se spousty převisů nebo mosty. Většina hot end pracuje lépe, když je studený konec (cold end) pod stálým proudem vzduchu. Používají se dva 12V ventilátory jeden pro tiskovou hlavu a druhý pro běžné chlazení.

Pulsně šířková modulace (PWM)

Pulsně šířková modulace (PWM) je diskrétní modulace pro přenos analogového signálu pomocí dvouhodnotového signálu. Jako dvouhodnotová veličina může být použito například napětí, proud, nebo světelný tok. Signál je přenášen pomocí střídavy. Pro demodulaci takového signálu pak stačí dolnofrekvenční propust. Vzhledem ke svým vlastnostem je pulsně šířková modulace často využívána ve výkonové elektronice pro řízení velikosti napětí nebo proudu.

Přenosový signál obsahující informaci o přenášené hodnotě může nabývat hodnot zapnuto/vypnuto (log.1/log.0). Hodnota přenášeného signálu je v přenosu "zakódována" jako poměr mezi stavy zapnuto/vypnuto. Tomuto poměru se říká střída. Cyklus, kdy dochází k přenosu jedné střídavy, se říká perioda. Omezením pro PWM je to, že přenos informace je vždy omezen na relativní vyjádření a to 0 - 100 %, to znamená, že musí být znám poměr mezi skutečnou hodnotou a procentuálním vyjádřením. Časové hodnoty střídavy se pohybují v sekundách nebo v milisekundách pro přesnější řízení. Perioda je vždy součtem doby zapnuto a vypnuto. [13]

Pro řízení elektrického topného tělesa se používá elektronický prvek, který má dva stavy zapnuto/vypnuto.

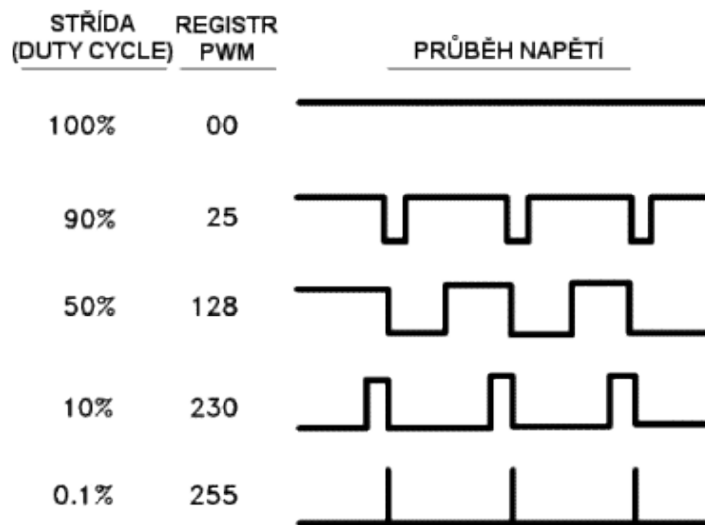
Příklad řízení vytápění:

Pokud požadujeme, aby topení bylo trvale vypnuto, je střída PWM signálu 0:100, to znamená, že stav zapnuto trvá 0 (nula) časových jednotek, stav vypnuto trvá 100 časových jednotek, jinými slovy 100% vypnutí.

Pokud požadujeme, aby topení bylo trvale zapnuto, je střída PWM signálu 100:0, to znamená, že stav zapnuto trvá 100 časových jednotek, stav vypnuto trvá 0 (nula) časových jednotek, jinými slovy 100% zapnutí.

Změnou střídavy zapnutí/vypnutí na poměr 25:75 nebo 50:50 nebo 75:25 se dosáhne stavu, kdy topení dodává výkon 25 nebo 50 nebo 75%

Nastavením jiné střídavy je tedy možno změnit výkon, ale pouze v rozsahu 0 - 100%. [14]



Obr. 14: Průběh pulsně šířkové modulace (PWM). [13]

1.5 Software a firmware RepRap tiskárny

STL (STereoLithography nebo Standard Triangulation Language)

Formát STL byl vyvinut společností 3D Systems pro ukládání dat modelů pro 3D tiskárny. STL soubory jsou otevřené a široce využívané v CAM (Computer Aided Manufacturing) a rapid prototyping. Tento formát reprezentuje velmi jednoduchý zápis trojrozměrných objektů složených z jednotlivých trojúhelníkových plošek. Každá ploška je definována normálou a třemi vrcholy. Normála je vektor (orientovaná úsečka), který určuje rub a líc dané plochy. Pro 3D tisk je nezbytné, aby byly všechny normály správně nastaveny směrem ven z daného objektu. Soubor STL je kompletní seznam souřadnic XYZ vrcholů a normál pro trojúhelníky (kartézský souřadný systém), které popisují 3D objekt.

Soubory STL popisují pouze povrchovou geometrii trojrozměrného objektu bez jakéhokoliv zastoupení barvy, textury a jiných běžných atributů modelů. Formát STL zahrnuje dva formáty dat ASCII a binární. ASCII formát je primárně určený pro testování nových CAD rozhraní. ASCII STL soubory mohou být velmi velké a tím se stávají nepraktické při všeobecném použití. Binární soubory jsou častější, protože jsou mnohem kompaktnější.

Téměř všechny dnešní CAD systémy jsou schopny produkovat STL soubor. Většina z předních CAD systémů umožňuje pomocí několika kroků vytvořit vysoce kvalitní soubor STL. Obecné možnosti ke zkvalitnění STL souborů jsou odchylka (změní celkový výstup nebo mozaikování) a úhlová tolerance (změní menší detaily v souboru). Ve všech případech se doporučuje STL exportovat jako binární soubor, ušetříme tím čas a velikost souboru.

Příklad exportu modelu v SolidWorks

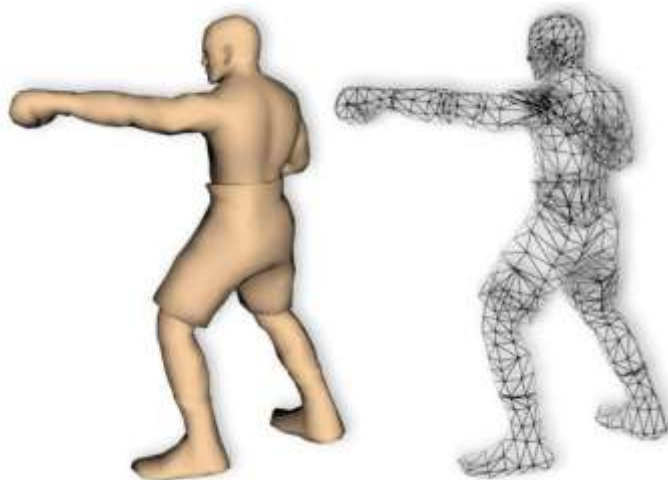
- Soubor > Uložit jako
- Nastavit Uložit jako typ STL
- Možnosti > Rozlišení > Jemné > OK
- Uložit

STL nastavení:

- Soubor > Uložit jako
- STL > Možnosti
- Pro hladší STL soubor, změníme rozlišení
- Změna odchylky 0.0005in (0,004 mm)
- Změna úhlu 5

(Zmenšením odchylky a úhlu získáme hladší model, ale velikost souboru se zvětší) [15]

SolidWorks vytváří soubory STL s čísly v matematickém zápisu, který ostatní programy ne vždy dokáží správně otevřít. Je tedy potřeba soubor v poznámkovém bloku přeformátovat pomocí změny několika hodnot.



Obr. 15: Příklad modelu exportovaného do STL formátu. [16]

G - Code

Pomocí softwaru (např. SkeinForge, Slic3r) je vygenerován G-code ze souboru STL. STL soubor je programově rozdělen na jednotlivé tiskové vrstvy. Pro každou vrstvu je pak vytvořena sekvence pohybů tiskové hlavy a rychlostí posunu materiálu, případně teploty tavné trysky. G-code je formát, kterému rozumí ovládací elektronika 3D tiskárny. G-code je název pro soubor instrukcí, které se používají pro počítačem řízený obráběcí stroj (CNC). Převážně se používá v automatizaci a je součástí počítačového inženýrství. Někdy se používá označení G programovací jazyk. G-code předává informace o řízení do řídicí jednotky 3D tiskárny. V projektu RepRap se G-code používá k řízení celé tiskárny, do tiskárny ho lze poslat přes USB nebo vložením SD karty pokud je elektronika vybavena čtečkou a není potřeba mít připojeny počítač během celé tiskové úlohy. G-code musí být vytvořený přímo na míru konkrétní tiskárně.

V programu SkeinForge jsou do G-code uloženy definice pro výsledný objekt. Kromě základních parametrů, jako je výška jednotlivých vrstev, rychlost a teplota tavení materiálu a dalších parametrů lze definovat například také hustotu vnitřní výplně.

Příklad G-code pro RepRap

```
N3 T0*57
// výběr výtlačné hlavy, převážná většina tiskáren disponuje jednou
N4 G92 E0*67
// nastaví absolutní hodnotu vytlačení na nula
N5 G28*22
// provede přesun ve všech osách do svého počátku
N6 G1 F1500.0*82
// nastaví standardní rychlost posuvu v mm za minutu
N7 G1 X2.0 Y2.0 F3000.0*85
// provede posun hlavy s určenou rychlostí
N8 G1 X3.0 Y3.0*33
// stejně jako předchozí, ale použije standardní rychlost posuvu
```

Na začátku každého řádku je N a číslo, což značí číslo řádku. Také říká tiskárně, aby provedla kontrolní součet a pokud nesedí, požádá o opakované zaslání řádku. Kontrolní součet je vždy na konci každého řádku a odděluje se hvězdičkou. [17]

Firmware Sprinter

Jedná se o firmware, který se nahrává do desky Arduino a následně ovládá celou elektroniku na tiskárně (např. desky Ramp). Podporuje tisk z SD paměťové karty, vyhřívání hotbed, zrychlení krokových motorků. Pro zkompilování Sprinteru a nahrání do Arduino slouží vývojové prostředí.

PrintRun

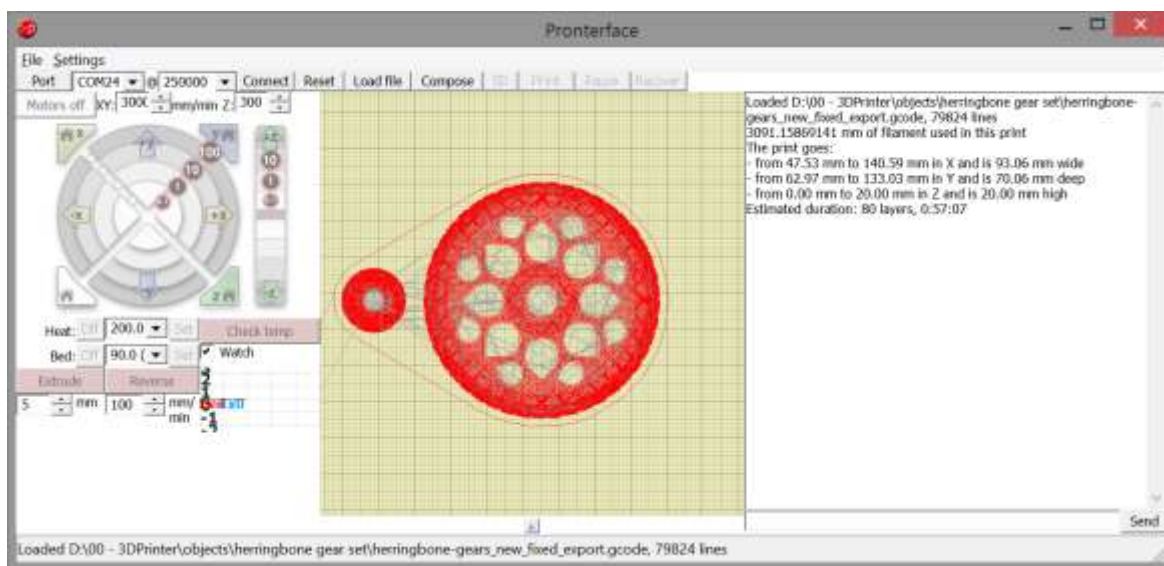
PrintRun je open source software, který slouží k ovládání tiskárny. Je multiplatformní, takže ho lze spustit na Linuxu, MAC OS X a Windows. Ovládání programu je velice intuitivní. Po spuštění programu se připojíme k tiskárně pomocí virtuálního sériového portu. Porty jsou značeny ve Windows pomocí COM1, COM2, atd.. (správné číslo musíme zjistit ve správci zařízení). Zařízení by se mělo hlásit jako FT232RL. V Linuxu je situace jednodušší, zde se zařízení nachází v /dev/ttyUSBx, kde x je číslo usb portu (číslováno od 0).

Po připojení tiskárny se v konzolovém okně PrintRun vypíše uvítací informace. Po navázání spojení se doporučuje zapnout Monitor Printer a zapnout zahřívání desky (hot bed) a hlavy (hot-end, heater). Z důvodu, že zahřívání hot bed trvá celkem dlouho. Výchozí teploty materiálu ABS pro hot bed jsou 110 °C a pro hot-end 235 °C.

G-Code nahrajeme do tiskárny pomocí tlačítka Load file. Po importu, který může u větších modelů chvíli trvat, již vidíme model rozvrhnutý na desce. Po kliknutí na mřížku se nám model zobrazí v novém okně, kde se můžeme podívat, jak se budou tisknout jednotlivé vrstvy.

Tlačítkem Extrude, respektive Reverse vytláčujeme materiál, případně vytáhneme zpět. Toto využijeme při výměně nebo zavádění materiálu.

PrintRun se skládá z printcore, pronsole a pronterface. Pronterface umožňuje přímo ovládat tiskárnu, pohyb v osách, nastavení podložky (hot bed), teploty extruderu a načtení souborů k tisku. Ve své podstatě jen posílá instrukce G-code v závislosti na akci vyvolané kliknutím na jednotlivé prvky uživatelského rozhraní.



Obr. 16: Prostředí programu Pronterface. [18]

Nastavení množství extrudovaného plastu pomocí softwaru SkeinForge

Pomocí programu SkeinForge lze nastavit parametry pro námi požadovanou kvalitu tisku. Množství odebíraného materiálu se nastavuje pomocí softwaru SkeinForge, kde nastavujeme rychlost otáček krokového motoru extruderu.

Pro maximální kvalitu tisku, by se měly nastavit hodnoty rychlosti posuvu a tloušťky vrstvy tisknutého materiálu na nízké, tím dosáhneme kvalitního a hladkého výsledku. Kvalitní tisk je časově náročný a je tedy vhodné zvážit požadovanou kvalitu.

Základní parametry pro nastavení odebíraného množství plastu:

Speed → **Feed Rate** - rychlost pohybu hlavy pohybovat při tisku

Travel Feed Rate - rychlost pohybu hlavy pohybovat při přesunech

Flow Rate Setting (float) - důležité pro nastavení rychlosti otáček krokového motoru extruderu, tedy kolik hmoty bude z trysky vytékat

Dimension → **Filament Packing Density** – udává rychlost přísunu struny do trysky



Obr. 17: ukázka rozhraní programu SkeinForge. [19]

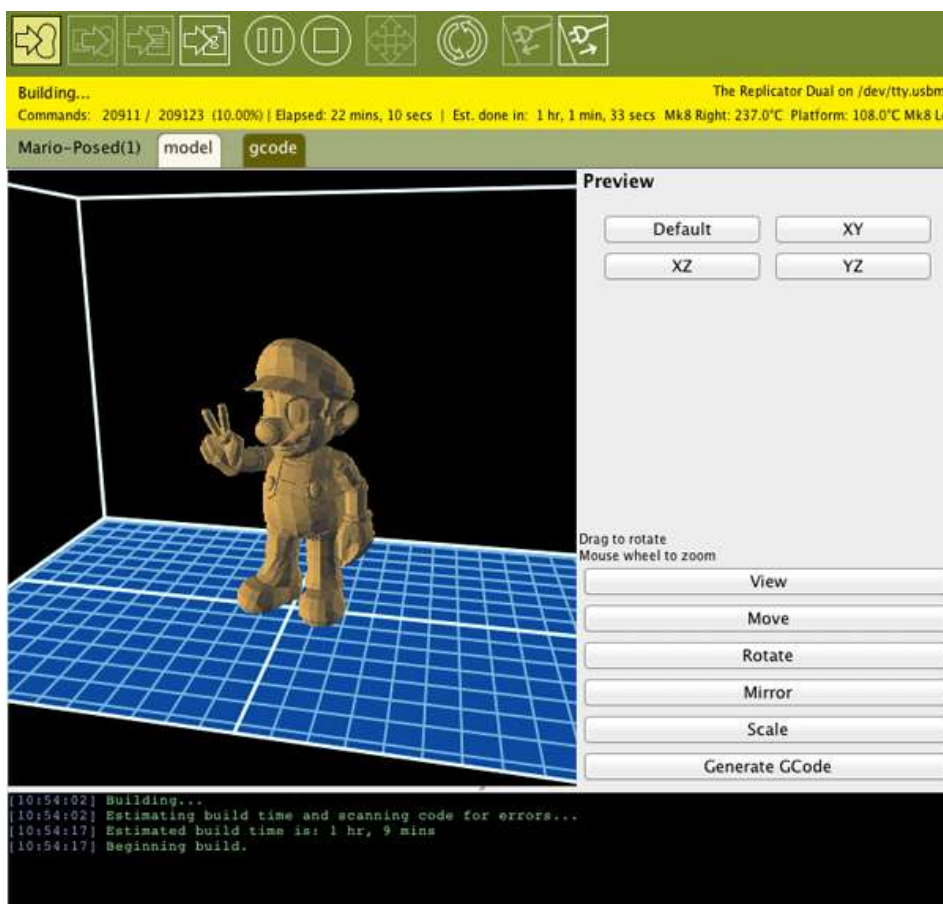
Uživatelské prostředí Linux a Windows

RepRap využívá velké množství open-source softwarových balíčků pro vývoj. Software pro RepRap je primárně vyvíjen pro Linux a následně vznikají implementace některých softwarů také pro Windows nebo Mac OS. Nejčastěji se používají Linuxové distribuce Debian a Ubuntu.

Grafické prostředí většiny programů je stejné pro všechny operační systémy. V Linuxu je potřeba k některým částem instalace a konfigurace systému přistupovat z příkazového řádku, který může běžného uživatele odradit od použití Linuxu. Většina programů je programována v Java a je tedy nutné mít nainstalovanou originál Sun Java.

Pro posílání G-code příkazů do tiskárny existuje několik variant softwarů od primitivních příkazů z příkazové řádky v Linuxu (Pronsole) přes jednoúčelové softwary s grafickým GUI typu Pronterface (oba jsou součástí balíku Printron) až po softwary typu all-in-one, jejichž snahou je na jedné straně otevřít STL soubor a na druhé straně vytisknout hotový výrobek, přičemž se postarají jak o převod do G-code (pomocí Skeinforge), tak i o ovládání tiskárny.

Základním představitelem této kategorie je software ReplicatorG dostupný pro operační systémy Linux, Windows a Mac OS. Pro začátek je jednodušší nainstalovat a používat Printron a SkeinForge. Tyto programy vyžadují mít nainstalovaný software Python 2.6.



Obr. 18: Grafické rozhraní programu ReplicatorG. [19]

1.6 Plastové materiály pro 3D tisk

V současnosti existují dva základní typy materiálů používaných pro 3D tisk, jsou to materiály ABS (Akrylonitril Butadien Styren) a materiál PLA (Polyactid Acid). ABS je na ropné bázi zatímco PLA je bioplast vyráběný z rostlin bohatých na škrob. Oba materiály mají své výhody i nevýhody a lze mezi nimi vybírat, který bude vhodnější pro danou situaci. Materiály pro 3D tisk se používají ve formě drátu nejčastěji o průměru 1,75 mm a 3 mm.

ABS je jedním ze základních materiálů, používaných v tiskárnách RepRap. Jeho velkou výhodou je nejnižší závislost na přesném nastavení tiskové hlavy, odolnost výtisků a přijatelný sklon ke kroucení. Přesto tento materiál nelze doporučit pro běžný tisk velkých objektů, tedy objektů přesahujících svým nejdelším rozměrem 80 mm.

ABS musí být extrudován při vyšších teplotách a při tisku vyžaduje použití vyhřívané podložky, aby se materiál uchytil a nedocházelo k posunu modelu při tisku. Díky vysoké tavné teplotě nedochází k zanesení tiskové hlavy při přehřátí. Nevýhodou ABS je, že musí být extrudovaný při vyšší teplotě (215 - 250 °C)

PLA je nejuniverzálnější materiál k použití na RepRap tiskárnách. Díky jeho poměrně velké stabilitě není potřeba vyhřívané podložky. Během 3D tisku velice rychle chladne. Jeho největší předností je nepatrný sklon ke kroucení, daný minimálním rozpínáním při tavení. Díky této vlastnosti je předurčen pro výrobu geometricky složitých a komplikovaných dílů. I při nižších teplotách je výtisk pevný a jednotlivé vrstvy kvalitně spojené.

Po tisku lze i tento materiál opracovávat běžnými postupy, nicméně díky nízkému tavnému bodu je nelze dobře například strojně brousit. Brusný papír strojní brusky materiál rychle zahřeje až k bodu měknutí. Tuto nevýhodu lze pochopitelně odstranit chlazením materiálu při opracování. Ruční broušení je možné prakticky bez omezení, materiál lze i dobře vrtat či lakovat (samozřejmě po ošetření základní barvou pro tvrdé plasty). PLA by měl být extrudovaný při teplotě 190 °C.

ABS – Akrylonitril Butadien Styren

ABS je polymer akrylonitrilu, butadienu a styrenu. Obvykle se skládá z přibližně poloviny styrenu a druhé poloviny tvořené stejným dílem butadienu a akrylonitrilu. Akrylonitril a styren zajišťují chemickou odolnost, tvrdost a odolnost vůči teple, butadien zajišťuje odolnost proti nárazu. Kopolymery styren - akrylonitril (SAN) se používají již od roku 1940. Díky větší pevnosti oproti styrenu nacházejí široké využití. Během výzkumných prací vycházejících z válečného programu zaměřeného na výrobu velkého množství syntetického kaučuku došlo k přidání butadienu jako třetího monomeru. Tak se zrodil plast se zkratkou ABS. V roce 1948 byl ABS patentován a následně v roce 1954 byl společností Borg-Warner Corporation uveden na trh. Jeho variabilita a snadné zpracování činí z ABS v současné době nejpoužívanější plastovou hmotu.

ABS vlastnosti

Akrylnitril - butadien - styren má vysokou pevnost v tahu, rozměrovou stálost, tvrdost povrchu a tuhost v širokém rozsahu teplot. Určité druhy vykazují dobrou rázovou pevnost při nízkých teplotách od -40 °C. Je flexibilní, chemicky odolný, má lesklý povrch a relativně nízké výrobní náklady. ABS se proto používá v široké škále produktů, od hraček až po díly pro automobilový průmysl.

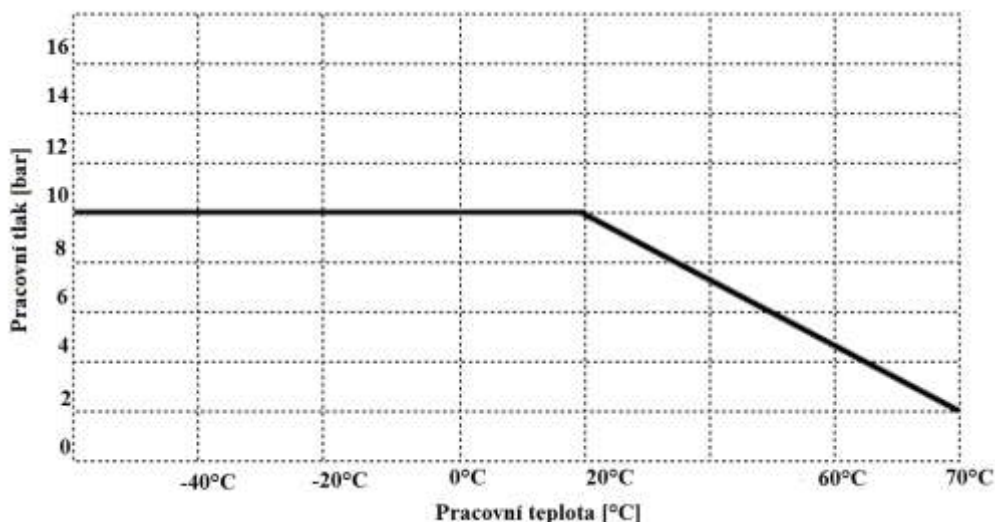
Přidáním různých látek v určitých poměrech dosáhneme různých druhů ABS, které mají celou řadu požadovaných vlastností, např. zvýšenou odolnost proti nárazům, houževnatost a tepelnou odolnost. Je možné přidat přísady pro ochranu proti ultrafialovému záření, látky zabraňující hoření (samo zhášecí schopnost) nebo galvanické látky.

ABS je snadno mísitelný s jinými polymery jako je polyvinylchlorid, polykarbonát nebo polysulfon, což dále zvyšuje rozsah užitných vlastností. Konečné vlastnosti ovlivňují do jisté míry i to, za jakých podmínek musí být materiál nahříván a ochlazován při procesu tepelného tvarování. Formování ABS při vysokých teplotách zvyšuje lesk a tepelnou odolnost, tvarování při nízkých teplotách přináší vyšší odolnost proti nárazu a pevnost.

Neupravený plast z ABS má neprůhlednou bílou nebo krémovou barvu, lze jej snadno obarvit různými pigmenty a barvivy. ABS může být potažen lakem, chrómem nebo natřen akrylem či polyesterem. ABS desky mohou být k sobě navzájem lepeny pomocí různých lepidel nebo látek obsahujících rozpouštědla nebo mohou být přilepeny na jiné materiály pomocí polyuretanu či epoxidu. [20,21]

Tab. 1: Vybrané vlastnosti materiálu ABS (Akrylonitril Butadien Styren)

Obecné	
Hustota	1,04 g/cm ³
Index toku (220°C, 10kg)	1 -36 g/10min
Mechanické vlastnosti	
Napětí na mezi kluzu	45 Mpa
Tažnost	10%
Modul pružnosti v tahu	2300 MPa
Teplotní vlastnosti	
Tepelná vodivost	0,17 W/mK
Koeficient délkové roztažnosti	95 · 10 ⁻⁶ /K
Bod tání	Amorfnní látka nemá skutečnou teplotu tání (103 - 128 °C)
Tvarová stálost za tepla	80 °C
Max. teplota dlouhodobá	95 °C
Max. teplota krátkodobá	100 °C
Min. teplota použití	-30°C



Obr. 19: Tlakově – teplotní diagram pro materiál ABS. [22]

ABS využití

ABS je díky své univerzálnosti světově nejpoužívanější technický plast, je využíván pro široký okruh produktů. Tuhost, síla a vysoce kvalitní povrchová úprava ABS stojí za tím, že je to velice oblíbený materiál pro výrobu plastových částí spotřebního zboží, používá v celé řadě odvětví od automobilového průmyslu až po výrobu nábytku. Vyrábí se z něj např. automobilové nárazníky, malé kuchyňské spotřebiče, interiéry lednic, mobilní telefony, počítače, tiskárny, kufry a kancelářské stroje. Sportovní a bezpečnostní přilby, stejně tak jako mnohé další sportovní vybavení bývají také vyrobeny z termoplastů Akrylonitril butadien - styrene.

Ostré a živé barvy ABS plastů dávají velké možnosti výrobcům hraček po celém světě. Výrobce slavné stavebnice LEGO používá k výrobě barevných zámkových plastových cihel ABS již od roku 1963. Mnoho hudebních nástrojů nebo jejich částí, jsou také vyrobeny z ABS, např. klarinety, flétny a klavíry. Vzhledem ke schopnosti přizpůsobení ABS požadavkům jako je tepelná odolnost, elektrická izolace, pevnost v tahu, rozměrová stálost, tvrdost povrchu, samo zhasací schopnost a odolnost vůči povětrnostním vlivům, je ABS používán ve značně velkých výrobních odvětvích. Mezi nejdůležitější patří automobilový a letecký průmysl. Komponenty pro interiéry i exteriéry automobilů, lodní trupy, interiéry letadel a velké díly pro obytná rekreační vozidla, to jsou jen některé z mnoha možností využití pro ABS plasty. [20,21]

Standardy: ISO, BS

ABS výhody

- vysoká rázová houževnatost i při nízkých teplotách
- odolnost proti korozi
- netoxický, bezproblémová recyklace
- velký útlumový součinitel (tlumení zvuku)
- jednoduché spojování lepením
- nízká tepelná vodivost
- materiál bez halogenů
- v souladu s RoHS

ABS nevýhody

- nízká odolnost vůči silným kyselinám, rozpouštědlům a uhlovodíkům
- krátkodobá odolnost vůči slabým kyselinám
- relativně vysoká cena
- hořlavý, vysoká produkce kouře
- při mírné teplotě
- musí být extrudován při vyšších teplotách a potřebuje vyhřívanou podložku, aby se uchytil a nedošlo k posunutí modelu při tisku (3D tiskárny).

PLA – Polyactid acid

PLA (Polymer mléčné kyseliny) je relativně nový materiál, jehož hlavní výhodou je biologická odbouratelnost a tím tedy nezatěžuje životní prostředí.

Vypadá na první pohled i dotek stejně jako běžně užívané plasty z ropy, dosahuje dokonce i stejných vlastností (pružnost, tvrdost, průhlednost, ohebnost a odolnost). Je ovšem specifický svým zpracováním a výrobním procesem.

PLA se vyrábí z rostlin bohatých na škrob, jako je cukrová řepa, kukuřice a pšenice. PLA je možné 100% zkompostovat v průmyslových kompostárnách a je tedy i 100% biologicky rozložitelný.

Kompostovatelný znamená, že je možno rozdělit na vodu, oxid uhličitý a biomasu, přičemž nebude produkovat žádné toxické látky, a může podporovat rostlinný život.

Biologicky rozložitelné znamená, že je možno rozdělit v průběhu času pomocí mikroorganismů (bakterie a houby). Při recyklaci může docházet ke vzniku metanu a ohrožení životního prostředí vlivem globálního oteplování.

Výrobky z tohoto bioplastu jsou chuťově neutrální a absolutně bez alergenů. Je celosvětově uznán a certifikován pro použití v potravinářství a je u nich garantována zdravotní nezávadnost. Největším výrobcem PLA je USA. [23,24]

PLA vlastnosti

PLA má jedinečné vlastnosti, jako je dobrý vzhled, vysoká mechanická pevnost a nízká toxicita. Nízká teplota skelného přechodu PLA omezuje užití v tepelně namáhaných aplikacích. Vzhledem k jeho deformaci a své nízké teplotě tání, je lepší využití pro tepelné spojování a teplotně tvarované aplikace.

Velice důležitou vlastností PLA je jeho dobrá snášenlivost v lidském těle (biokompatibilita). Lidské tělo po čase PLA resorbuje, aniž by tento proces pro něj představoval nadměrný stres. Toho se využívá především v medicíně, kdy se právě z PLA vyrábí samo vstřebatelné stehy a implantáty. Další důležitou vlastností polymerů je jejich rychlost krystalizace. [23,24]

Tab. 2: Vybrané vlastnosti materiálu PLA (Polyactid acid)

Obecné	
Hustota	1,2515 g/cm ³
Index toku (210°C, 2,16kg)	6 -78 g/10min
Mechanické vlastnosti	
Napětí na mezi kluzu	59 Mpa
Tažnost	7%
Modul pružnosti v tahu	3500 MPa
Teplotní vlastnosti	
Tepelná vodivost	0,197 W/m°C
Koeficient délkové roztažnosti	-
Bod tání	165 °C
Tvarová stálost za tepla	110 °C
Max. teplota dlouhodobá	120 °C
Max. teplota krátkodobá	140 °C
Min. teplota použití	-10°C

PLA využití

Často je používán tam, kde je potřeba použít plast se zkrácenou životností, nebo tam, kde se vyžadují vyšší požadavky na kvalitu a zdravotní nezávadnost, například nemocniční zařízení, ale také jako produkty pro domácnost a kuchyni, kde přichází plast do styku s potravinami.

V současné době lze z těchto materiálů vyrobit takřka vše (talíře, příbory, kelímky, sáčky, tašky, dózy na jídlo, krájecí prkénka, tácy, podnosy atd.). Nacházejí konečně využití v rychlých občerstveních, restauracích, na festivalech.

PLA vlákna se využívají i při výrobě funkčního sportovního prádla, ubrousků, čalounění, průmyslových kobereců, hygienických potřeb a geotextilií.

Masovému rozšíření bioplastů prozatím bránila jejich vysoká cena. V současnosti jsou stále ještě dražší než syntetické materiály vyráběné z ropy. Přísnější regulace jednotlivých států, či EU podporující použití ekologicky šetrných plastů a technologický vývoj však může tento stav brzy zvrátit.

S tím je i spojena nadměrná spotřeba ropy, její postupné zdražování a globální úbytek, což přispívá rychlému vývoji bioplastů, větší produkci a postupné snižování cen bioplastů.

PLA výhody

- biologická odbouratelnost, kompostovatelný, nezatěžuje životní prostředí
- výroba z kukuřice
- netoxický
- o 65 % nižší spotřeba energie a o 68 % méně skleníkových plynů než při výrobě konvenčních plastů
- cenově srovnatelná s materiálem PET
- nízké náklady a rychlost výroby
- mechanická pevnost a tepelná těsnost

PLA nevýhody

- cena a zásoby ropy a zemního plynu
- ochrana životního prostředí při rozkladu nebo spalování
- neekonomické náklady a kontaminace při recyklaci



Obr. 20: Struna (drát) pro 3D tiskárny. [25]

Porovnání ABS a PLA

PLA

- Křehčí než ABS
- Může docházet k deformaci, pokud je vystaven vyšší teplotě (v létě v automobilu)
- Obvykle zbělá v místě namáhaném ohýbáním a poté dojde k rozpadu na malé kousky
- Při tisku voní sladce
- Tuhost PLA je mnohem větší než u ABS
- Nižší teplotu tavení (nižší energetické nároky)
- Možnost tisku na chladné podložce
- Lesklejší a hladší vzhled
- Vyšší rychlost 3D tiskárny

ABS

- Odolná proti nárazu
- Lesklý, hořlavý
- Na ropné bázi
- Náchylný k popraskání při rychlém ochlazení
- Při namáhání ohybem praskne
- Při tisku silný toxický zápach
- Nižší tuhost než PLA
- Odděluje vrstvy rychleji a snadněji než PLA a tím lze vyrobit slabší 3D tištěné díly
- Lepší povrchová struktura modelu
- Lepší průchodnost tryskou, nižší síla na vytlačení z extruderu
- Nutnost použít vyhřátou podložku, aby nedocházelo k deformaci modelu
- Oproti PLA v exteriéru tak rychle nedegraduje

2. Teorie šíření tepla

- Šíření tepla se dělí na tři typy:
- šíření tepla vedením (kondukcí)
 - šíření tepla prouděním (konvekci)
 - šíření tepla zářením (radiací)

Vedení tepla i konvekce je vázáno na existenci hmotného prostředí, probíhá v tuhých, kapalných, nebo plynných látkách. Na rozdíl od sdílení tepla vedením a prouděním není sdílení tepla zářením vázáno na hmotné prostředí, to znamená, že záření se může uskutečňovat i ve vakuu. V běžném životě se nejčastěji setkáváme se všemi třemi druhy šíření tepla současně. Všechny tři druhy jsou při tom poměrově zastoupeny, ale mohou nastat situace, kdy je jeden ze tří druhů šíření tepla převládající, a ostatní druhy jsou zanedbatelné.

Šíření tepla vedením (kondukcí)

Šířením tepla se rozumí proces přenosu energie z oblastí o vyšší teplotě do oblastí s nižší teplotou. To je popsáno v druhém zákonu termodynamiky. Šíření tepla vedením se uskutečňuje v tuhých látkách obecně, nebo v tekutinách, které mohou, nebo nemusí být v pohybu.

Existující rozdíl teplot je základním předpokladem pro šíření tepla vedením. Matematicky lze zapsat jako:

$$\vartheta = f(x, y, z, \tau) \quad [\text{K}] \quad (2.1)$$

to znamená, že teplotní pole t může být funkcí až tří souřadnic (x, y, z) . Děj může záviset na čase τ , pak se jedná o nestacionární vedení tepla, nebo je děj závislý na čase a jedná se tedy o stacionární vedení tepla. Teplotní pole představuje izotermické plochy, což znamená plochy, ve kterých je stejná teplota. [28]

Nárůst teploty materiálu měnící se ve všech směrech je dán gradientem teploty, tzn. vektor kolmý k izotermě a směřující na stranu nárůstu teploty,

$$\text{grad } \vartheta = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = \Delta \vartheta \quad [\text{K} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (2.2)$$

kde Δ je Hamiltonův operátor (m^{-1}).

Množství tepla Q přenesené přes izotermickou plochu S za jednotku času t je klasifikováno jako teplotní tok P . Vzájemný vztah mezi tepelným tokem a hustotou tepelného toku q , což je tepelný tok vztážený na jednotku izotermické plochy je dán

$$P = q \cdot S \quad [\text{W}] \quad (2.3)$$

Množství tepla Q , procházející izotermickou plochou se vypočte jako součin tepelného toku a času

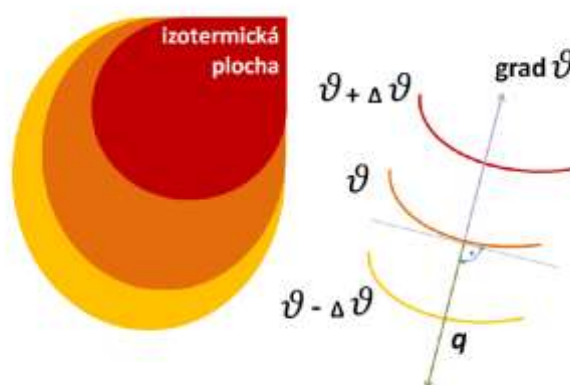
$$Q = P \cdot \tau = q \cdot S \cdot \tau \quad [\text{J}] \quad (2.4)$$

Se znalostí teplotního pole souvisí první Fourierův zákon, který říká, že hustota tepelného toku je úměrná zápornému gradientu teploty

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.5)$$

kde λ značí součinitel teplotní vodivosti [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] [28].

První Fourierův zákon platí pouze pro stacionární vedení tepla [28].



Obr. 21: Schématické zobrazení teplotního pole a izoterm. [26]

Součinitel tepelné vodivosti je fyzikálně tepelný parametr látky závisející na teplotě, tlaku a chemickém složení dané látky. Definice říká, že součinitel tepelné vodivosti λ závisí na množství tepla Q procházejícím za jednotku času t jednotkovou plochou izotermického povrchu S , přičemž v tělese je jednotkový gradient t , tedy

$$\lambda = -\frac{Q}{\text{grad}\vartheta \cdot S \cdot \tau} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (2.6)$$

Hodnota součinitele tepelné vodivosti je důležitá jako vstupní veličina pro numerické simulace tepelných dějů.

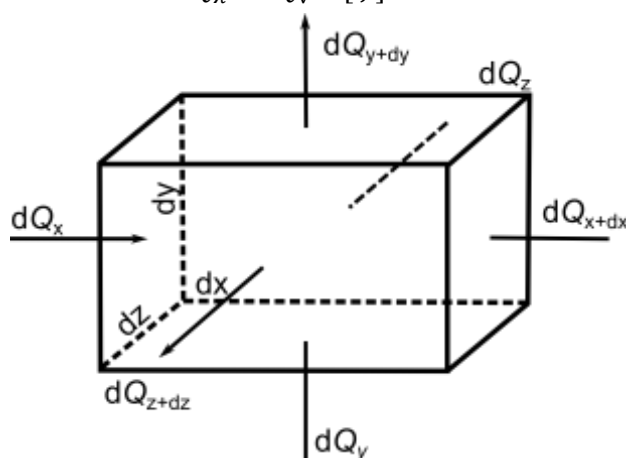
Druhým Fourierovým zákonem nazýváme Fourierovu rovnici vedení tepla, která bude řešením vztahu $\vartheta = f(x, y, z, \tau)$ [K]. V tomto případě budeme tedy uvažovat šíření tepla tělesem v učitým čase, tedy nestacionární vedení tepla.

V matematickém popisu se vychází ze zjednodušujících předpokladů

- tuhé těleso, které vede teplo, je homogenní a izotropní,
- fyzikální vlastnosti tělesa jsou konstantní,
- vnitřní objemové tepelné zdroje jsou rozmístěny rovnoměrně,
- jedná se o izobarický děj [28]

Rovnici druhého Fourierova zákona pro vedení tepla se uvažujeme pro odvození izobarický děj, kdy změna entalpie tělesa dI je rovna součtu tepla, které je za čas $d\tau$ do objemu přivedeno v důsledku tepelné vodivosti dQ_λ a teplo, které za stejný čas uvolní vnitřní objemové zdroje dQ_v , platí

$$dI = dQ_\lambda + dQ_v \quad [J] \quad (2.7)$$



Obr. 22: Elementární těleso k odvození Fourierovy rovnice. [26]

Přivedené a odvedené teplo je zobrazeno na obrázku výše. Na obrázku vidíme elementární objem o stranách x, y, z tedy dV . Množství tepla, které se za čas $d\tau$ přivede jednotlivými stranami do elementárního objemu je dQ_x, dQ_y, dQ_z . Množství tepla odvedené z elementárního objemu $dQ_{x+dx}, dQ_{y+dy}, dQ_{z+dz}$. Stěna elementárního objemu kolmá na osu x můžeme považovat za izotermickou plochu, je to plocha $d_y \times d_z$. Množství tepla, procházející izotermickou plochou je dáno rovnicí

$$\begin{aligned} dQ &= q \cdot dS \cdot d\tau \quad [J] \\ dQ_x &= q_x \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \\ dQ_{x+dx} &= q_{x+dx} \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \end{aligned} \quad (2.8)$$

kde q_i jsou teplené toky příslušné stěny.

Množství tepla předané elementárnímu objemu ve směru osy x – $dQ_{\lambda,x}$ vychází ze spojitosti q_{x+dx} , kterou vyjádříme Taylorovým rozvojem

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} \cdot \frac{dx^2}{2!} + \dots \quad (2.9)$$

po zanedbání členů druhého a vyšších řádů rozvoje dostaneme množství tepla

$$dQ_{\lambda,x} = dQ_x - dQ_{x+dx} = q_x - q_x - \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \quad (2.10)$$

analogicky postupujeme pro další osy.

Celkové příchozí teplo do elementárního objemu v důsledku tepelné vodivosti,

$$dQ_V = dQ_{\lambda,x} + dQ_{\lambda,y} + dQ_{\lambda,z} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \cdot dV \cdot d\tau \quad [J] \quad (2.11)$$

Teplo uvolněné vnitřními objemovými zdroji za čas je dáno rovnicí

$$dQ_V = q_V \cdot dV \cdot d\tau \quad [J] \quad (2.12)$$

Přírůstek entalpie je dán

$$dI = m \cdot c_p \cdot d\vartheta = \rho \cdot dV \cdot c_p \cdot d\vartheta = \rho \cdot dV \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} \cdot d\tau \quad [J] \quad (2.13)$$

Dosazením do rovnice $dI = dQ_\lambda + dQ_V$ za výrazy dI , dQ_λ a dQ_V získáme

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + q_V \quad (2.14)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial i}{\partial \tau} = -\text{div } q + q_V \quad (2.15)$$

Tato rovnice je obecná diferenciální rovnice energie, kterou použijeme pro odvození Fourierovy - Kirchhoffovy rovnice a to dosazením do prvního Fourierova zákona za jednotlivé složky hustoty tepelného toku $q_x = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x}$; $q_y = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial y}$; $q_z = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z}$, poté můžeme napsat

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + q_V \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \frac{q_V}{c_p \cdot \rho} \quad [K \cdot s^{-1}] \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \vartheta + \frac{q_V}{c_p \cdot \rho} \quad [K \cdot s^{-1}] \quad (2.18)$$

kde ∇^2 je Laplaceův operátor a a je součinitel teplotní vodivosti. Posledním výrazem je Fourierova rovnice vedení tepla v parciálním diferenciálním tvaru. [26]

Šíření tepla prouděním (konvekcí)

Konvekce se uskutečňuje v proudícím prostředí, kde zároveň dochází k výměně tepla. Konvence představuje zároveň vedení tepla a proudění tekutiny, proto hovoříme o kondukčně – konvekčním přestupu tepla. Poměr konvekce s kondukcí na celkovém přestupu tepla je různý a záleží na celkovém přestupu tepla, je různý a záleží na druhu proudění a fyzikálních vlastnostech proudící tekutiny. Platí, že čím intenzivnější je pohyb molekul, tím menší je podíl sdílení tepla vedením. [26]

Konvekce se rozděluje na dva typy:

- Přírozená konvekce - nejčastěji vyvolaná působením gravitačního pole na nerovnoměrně prohřátou tekutinu.
- Nucená konvekce - vyvolaná externím zásahem do tekutiny například ventilátorem.

Podíl přírozené konvekce k nucené konvekci se odvíjí od rychlosti tekutiny. Přičemž platí, že podíl přírozené konvekce je tím větší, čím menší je rychlost nuceného proudění a čím větší jsou teplotní gradienty v tekutině.

Přestup tepla při konvekci je dán součinitelem přestupu tepla α_{kon} , jenž stanovuje intenzitu výměny tepla na rozhraní tekutiny a povrchu stěny. Čím je součinitel vyšší, tím intenzivněji k výměně tepla dochází [26].

Fourierova Kirchhoffova rovnice popisuje teplotní pole proudící tekutiny za předpokladu proudění tekutiny v homogenním, izotropním poli s konstantními fyzikálními vlastnostmi a s rovnoměrně rozprostřenými vnitřními objemovými zdroji. Děj probíhá při konstantním tlaku a zanedbává se ztrátové teplo [26].

Při odvození se vyjde z prvního Fourierova zákona vedení tepla

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta \quad (2.19)$$

Protože jde o vedení tepla, které se pohybuje je třeba k vektoru \mathbf{q} přidat teplo, jehož tekutina o rychlosti \mathbf{v} , hustotě ρ a měrné entalpii i přenese přes jednotku plochy za jednotku času

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta + \rho \cdot \mathbf{v} \cdot i \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.20)$$

Dosažením složek x, y, z do rovnice

$$q\rho \cdot \frac{\partial i}{\partial \tau} = -\text{div } \mathbf{q} + q_v \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (2.21)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial i}{\partial \tau} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) - \rho \cdot \left(v_x \cdot \frac{\partial i}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial i}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial i}{\partial z} \right) - \rho \cdot \cdot i \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + q_v \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (2.22)$$

Pro tekutiny platí $\rho = \text{konst.}$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad [\text{s}^{-1}] \quad (2.23)$$

platí

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial i}{\partial \tau} + v_x \cdot \frac{\partial i}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial i}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial i}{\partial z} \right) = \lambda \cdot \nabla^2 \vartheta + q_v \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (2.24)$$

Pro izobarický děj platí $di = c_p \cdot d\vartheta$, tedy

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} + v_x \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = \alpha \cdot \nabla^2 \vartheta + \frac{q_v}{c_p} \cdot \rho \quad [\text{K} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.25)$$

3. Praktická část

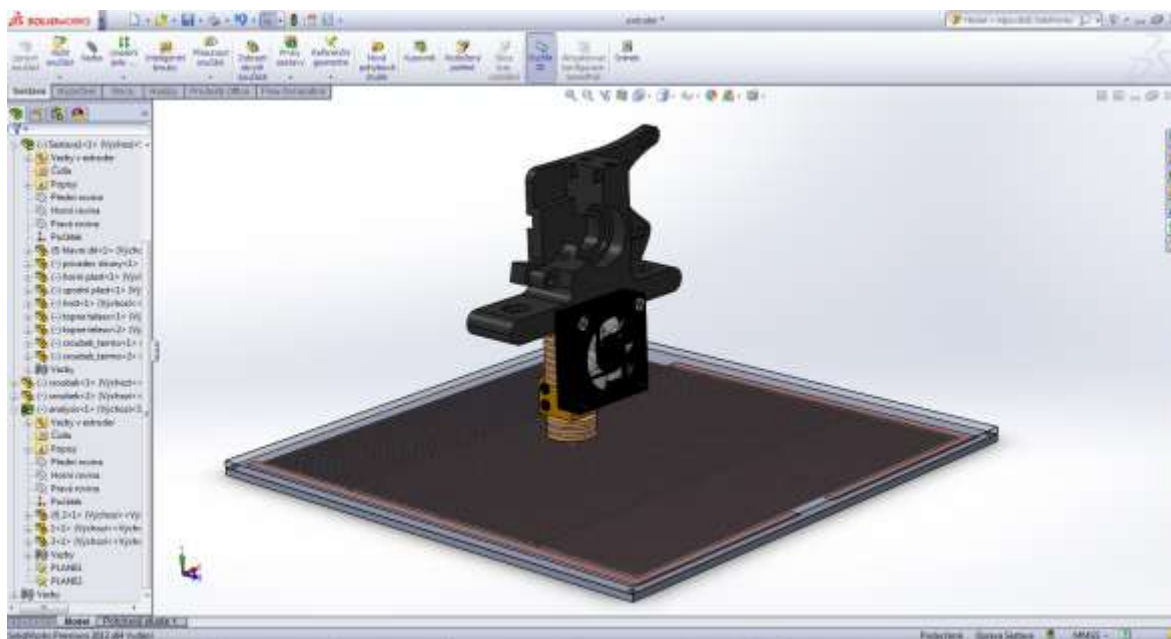
V praktické části se budeme zabývat nejdůležitějšími částmi RepRap tiskárny. Jedná se o vyhřívanou podložku (hot bed) a tiskací trysku (hot end), na kterých závisí kvalita tisku. Vyhřívaná podložka a tiskací tryska a jejich princip vyhřívání jsou zde stručně popsány s následným vytvořením modelů v programu SolidWorks a podrobení teplotní analýze v programu SolidWorks Flow Simulation.

3.1 SolidWorks

SolidWorks od společnosti Dassault Systèmes SolidWorks je v současné době nejúspěšnější strojírenský 3D CAD systém na českém trhu. Zároveň je SolidWorks jediný CAD systém na českém trhu, který je kompletně lokalizován přímo výrobcem, tedy společností Dassault Systèmes SolidWorks.

Jako parametrický 3D modelář nám SolidWorks nabízí výkonné objemové i plošné modelování a práci s neomezeně rozsáhlými sestavami a automatické generování výrobních výkresů. Dále máme k dispozici širokou škálu základních i specializovaných nástrojů, knihovny materiálů, vícetělové díly, realistické zobrazení modelů a specializované nástroje pro plechové díly, formy a svařování. K základní verzi SolidWorks je možné dokoupit nastavbové moduly pro tvorbu analýz (pevnostní, teplotní, vibrace,...), simulací proudění či pohybových simulací.

SolidWorks nabízí přehledné a intuitivní pracovní prostředí, které inovativně kombinuje moderní ovládací prvky (jako je CommandManager neboli pás karet, který seskupuje podobné nástroje pro modelování) se systémem roletových menu. Uživatelské rozhraní SolidWorks je velmi intuitivní a nabízí pohotové pracovní postupy, rapidně snižuje nutné pohyby myši a umožňuje okamžitou, kontextově závislou interakci s uživatelem. Ovládání je založené na technologii SWIFT, která redukuje potřebu opakujících se úkonů, manuálních zásahů i takových operací, kde si ani zkušený uživatel není dopředu jist postupem a často sahá po metodě pokus omyl. SWIFT dokáže ušetřit významné množství času a umožní se více věnovat samotnému procesu navrhování a ne ovládání systému. [27]



Obr. 23: Grafické prostředí SolidWorks.

SolidWorks Flow Simulation

V SolidWorks Flow Simulation lze jednoduše simulovat proudění kapalin a plynů. Software SolidWorks® Flow Simulation je velice výkonný nástroj na výpočet proudění tekutin (CFD - computational fluid dynamics), který umožňuje rychle a jednoduše simulovat proudění tekutiny, včetně sdílení tepla a analyzovat rozložení rychlosti, tlaku a další jevy, které mohou zásadně ovlivnit návrh výrobku.

Program je zcela integrovaný do prostředí 3D CAD systému SolidWorks. Základní verze může být rozšířena o modul HVAC (Heating, Ventilating, and Air Conditioning), který je vhodný například pro tepelné analýzy elektronických zařízení či obory vzduchotechniky. Další možností pak je rozšíření o modul Electronics Cooling. [27]

Funkce softwaru SolidWorks Flow Simulation

- Analýza přenosu tepla záření
- Analýza vnitřního proudění
- Analýza rotace referenčního rámce
- Analýza přechodového proudění
- Analýza přenosu tepla vedením a prouděním

Další funkce softwaru Flow Simulation:

- Analýza vnějšího proudění kapalin a plynů kolem objemových těles (tj. proudění vzduchu nad křídlem letadla nebo proudění vody kolem ponorky).
- Analýza turbulentního proudění pomocí modelů K-E pro ilustraci turbulentního proudění (například plynů z motorové trysky letadla).
- Simulace skutečného plynu pro přesné řešení aplikací plynu o vysokém tlaku nebo nízké teplotě.
- Analýza stlačitelného proudění pro proudění plynu v podzvukových, transsonických a nadzvukových rychlostech.
- Výpočet poklesu tlaku v trubkách pomocí hodnot nerovnosti povrchu.
- Optimalizace návrhu pomocí proudění na základě CFD a rozměrových parametrů.
- Analýza proudění ne-newtonovských kapalin (krev, zubní pasta a roztavený plast).
- Analýza proudění pohyblivé stěny při zkoumání proudění relativních vůči pohyblivému referenčnímu rámu.
- Analýza kavitace a identifikaci oblastí, kde k ní dochází.
- Analýza vlhkosti pro výpočet relativní vlhkosti uvnitř uzavřených prostor pro aplikace kontroly klimatu.

Základní rovnice popisující proudění

Numerické simulace v programu SolidWorks Flow Simulation vycházejí z fyzikálního popisu pohybu tekutiny, který je dán základními zákony zachování. Základní rovnice popisující proudění stlačitelné kapaliny jsou tři zákony zachování a to zákon o zachování hmotnosti, zákon zachování hybnosti a zákon zachování energie. Ty lze vyjádřit matematicky pomocí rovnice kontinuity, rovnice přenosu hybnosti a rovnice přenosu energie. Poslední dvě zmiňované se nazývají Stokes – Navier rovnice. Získáme tak soustavu nelineárních parciálních diferenciálních rovnic.

Pro rovnici kontinuity pro středovou hodnotu platí:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{U}_i)}{\partial x_i} = 0, \quad \text{složka } i = 1, 2, 3 \quad (3.1)$$

Stokes – Navierova rovnice, vyjadřující aplikovanou Newtonovu větu o změně hybnosti, ve tvaru:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \quad \text{index } j = 1, 2, 3 \quad (3.2)$$

Rovnice energie, vyjadřující zákon zachování energii pro stlačitelnou tekutinu, nabývá tvaru:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} (E + p) = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, \quad E = e + \frac{v^2}{2} \quad (3.3)$$

Rovnice stavu, vzájemící určovací veličiny stavu tekutiny, pro uvažovaný ideální plyn, ve tvaru:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (3.4)$$

Kde v uvedených rovnicích u je rychlost tekutiny, p je tlak tekutiny, ρ je hustota tekutiny, T je teplota tekutiny, e je vnitřní energie, S_i jsou vnější hmotnostní síly působící na jednotku hmotnosti (např. tíhová, odstředivá), Q_H je přívod či odvod tepla vztážený na jednotku objemu, q_i je tok tepla difusní, τ_{ik} je tensor vazkých napětí a ij jsou indexy u veličin udávající sumaci dle tří směrů souřadnic (Einsteinova sumace). [28]



Obr. 24: Algoritmus iteračního postupu ve Flow Simulation. [29]

Přestup tepla

Sdílení tepla mezi povrchem stěny a okolní tekutinou označujeme jako přestup tepla (ze stěny do tekutiny nebo z tekutiny do stěny). Přitom obvykle dochází ke sdílení tepla současně prouděním (konvekcí) a vedením (kondukcí).

Pro sdílení tepla konvekcí platí obecně:

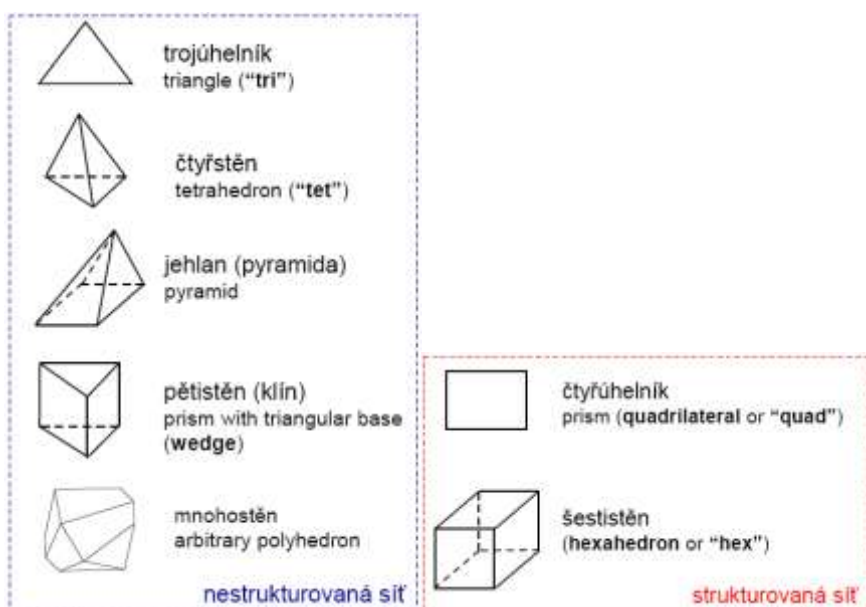
$$q = \alpha \cdot (T_S - T_0) \quad [W \cdot m^{-2}, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}, K] \quad (3.5)$$

Kde α je součinitel přestupu tepla konvekcí, q je plošná hustota tepelného výkonu vystupujícího ze stěny o povrchové teplotě T_S do tekutiny o teplotě T_0 . Platí-li $T_S > T_0$, přechází tepelný výkon za stěny do tekutiny a q je kladný, pokud platí $T_0 > T_S$, teče tepelný výkon z tekutiny do stěny a q je při takto zvolené orientaci záporné. [29]

3.2 Metoda konečných objemů (MKO)

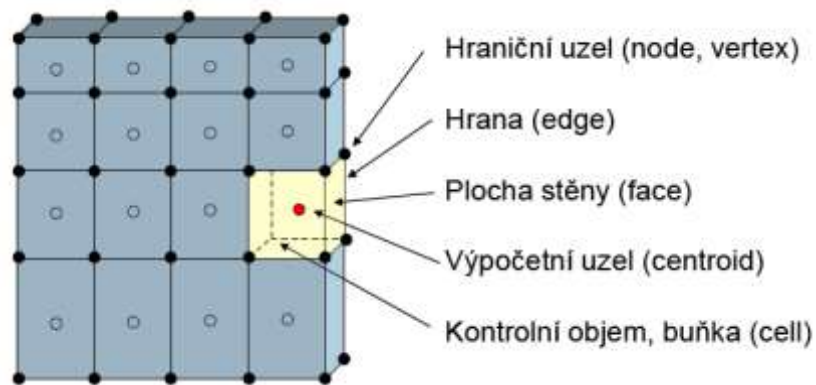
Metoda konečných objemů (Finite Volume Method) pracuje na principu rozdělení řešené oblasti modelu na konečný počet malých kontrolních objemů pomocí sítě (mesh, grid). Základní rovnice (kontinuity, pohybové, energie, transportní, ...), které popisují spojité prostředí, jsou diskretizovány do soustavy algebraických rovnic pro konečný počet neznámých v uzlových bodech sítě. MKO je efektivní metodou v případě použití u simulací na modelech se složitou geometrií. Rozdělí oblast na diskrétní objemy a dále numericky řeší diferenciální rovnice v konečném počtu elementárních objemů.

K rozdělení modelu na síť objemů se používají objemy tvaru čtyřúhelníku a šestistěnu, jedná se o takzvanou strukturovanou síť. V současnosti se začíná prosazovat nestruturovaná síť, kde konečné objemy mají tvary trojúhelníku, čtyřstěnu, jehlanu, pětistěnu nebo mnohostěnu. Tyto typy sítě lze kombinovat a tím získat optimální síť, kde v okolí stěn jsou použity prvky ze strukturované sítě a ve složitějších oblastech jsou použity prvky nestruturované sítě. Hranice prvků musí sousedit s jedinou hranicí sousedního objemu.



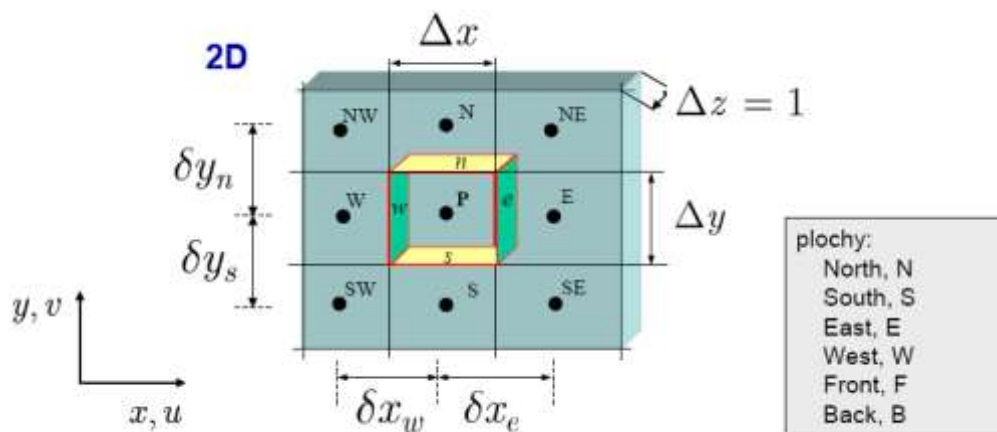
Obr. 25: Používané tvary konečných objemů (struturovaná a nestruturovaná síť). [29]

Kontrolní objemy se nepřekrývají. Hodnoty složek rychlosti a skalárních veličin jsou v geometrických středech kontrolních objemů, hodnoty na hranicích objemu se získávají interpolací.



Obr. 26: Výpočetní síť. [30]

Tok přes hranice kontrolního objemu je integrálním součtem přes čtyři (2D) nebo šest (3D) ploch kontrolního objemu.



Obr. 27: Výpočetní síť – kontrolní objem. [30]

Výpočtová síť

Síť představuje systém rozdělení výpočtové oblasti na dílčí na sebe navazující 2D buňky ve dvoudimenzionálním prostoru nebo 3D buňky ve třídimenzionálním prostoru. Lze říci, že výpočtová oblast pokrytá sítí je základem matematického modelování. Neboť samostatný matematický model (systém matematických vztahů) je pouze „pasivním“ nástrojem, který nabývá smyslu až ve chvíli, kdy je aplikován na konkrétní problém (výpočtovou oblast pokrytou sítí).

Pokud se hovoří o matematických modelech, které jsou založeny na numerickém řešení systému parciálních diferenciálních rovnic a vyžadují takto i zadání okrajových podmínek, lze konstatovat, že možnosti realizování úlohy jsou silně limitovány výkonem počítačové techniky.

Platí zde několik zásad:

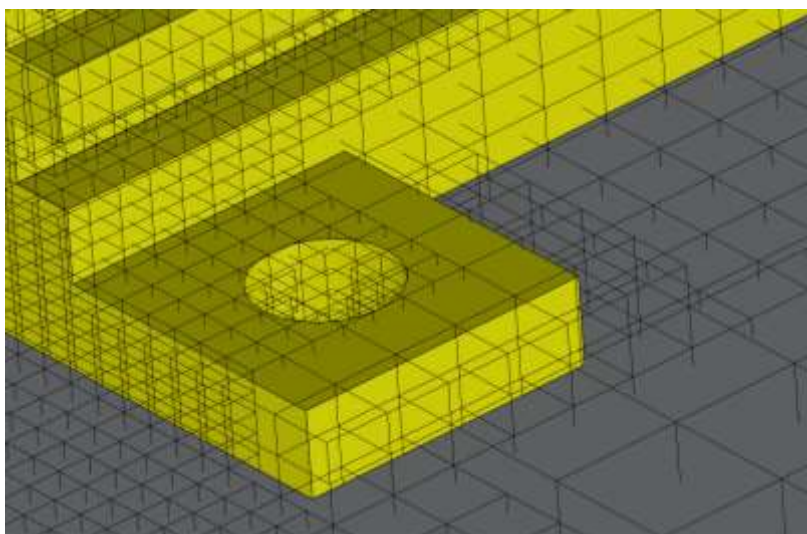
- výpočet je o to náročnější (pomalejší), čím více rovnic je v rámci matematického modelu do výpočtu zahrnuto (podle náročnosti a komplexnosti modelu)
- výpočet je o to náročnější, čím více má výpočtová oblast buněk
- výpočet je o to náročnější, čím méně kvalitní je síť výpočtové oblasti

V zájmu přesnosti matematické simulace je nutné provést tomu odpovídající nastavení matematického modelu. Do různých modelovaných fyzikálních jevů mohou svým vlivem zasahovat mnohé jevy další. Toto všechno je třeba v nastavení zohlednit. Ovšem s každým dalším vlivem vstupujícím do výpočtu přibývají také další rovnice, které matematický model musí řešit. Proto se mohou i při stejně definované výpočtové oblasti i síti časy výpočtu u různých úloh značně lišit.

Počet buněk patří k hlavním limitujícím faktorů současného matematického modelování. U mnohých praktických úloh se počty buněk výpočtové oblasti pohybují v řádu milionů či mnohdy i desítek milionů. Nejsou to zanedbatelná čísla, neboť v každé z buněk je počítáno mnoho různých veličin. Proto je cílem každého řešitele s ohledem na budoucí čas výpočtu redukovat počet buněk na nutné minimum. Z hlediska počtu buněk představuje obrovský nárůst například vytváření tzv. mezních vrstev.

Minimalizování počtu buněk by však nemělo být prováděno na úkor kvality sítě. Kvalitní síť je taková, která se skládá z na sebe navazujících geometricky pravidelných přibližně stejně velikých a pravidelně po celé výpočtové oblasti rozložených elementů (buněk). Elementy by měly mít rovněž přiměřenou velikost, aby bylo možné jimi zachytit v dostatečné míře modelovaný fyzikální děj (například turbulentní vírové struktury a jevy související s šířením tepla). Z hlediska reálného možného počtu buněk však v praxi dodržení všech ideálních předpokladů pro tvorbu sítě není většinou možné. Proto se používá zhušťování sítě v místech, která jsou z hlediska proudění tekutin nebo sdílení tepla pro řešitele zajímavá nebo pro výpočet stěžejní a naopak použití řidší sítě v místech jiných. Zvláštním případem zhuštění buněk je vytvoření tzv. mezní vrstvy v blízkosti stěn, která má za úkol zachytit velké změny fyzikálních veličin u stěny. Zhušťování buněk by mělo být plynulé. Pokud by byla změna ve velikosti buněk provedena příliš velkou skokovou změnou, projevilo by se to znatelně na průběhu výpočtu (problémy s konvergencí úlohy) i konečném výsledku výpočtu (chybný výsledek v daném místě výpočtové oblasti). [31]

Na obrázku níže je zobrazena automaticky vymodelovaná výpočtová síť (mesh). V místech kde je struktura stejná, je použita jednoduchá výpočtová síť, naopak v místě složitější struktury je síť zjemněna rozdělením jednoho objemu na několik menších.



Obr. 28: Vymodelovaná výpočtová síť.

3.3 Vyhřívání podložka (hot bed)

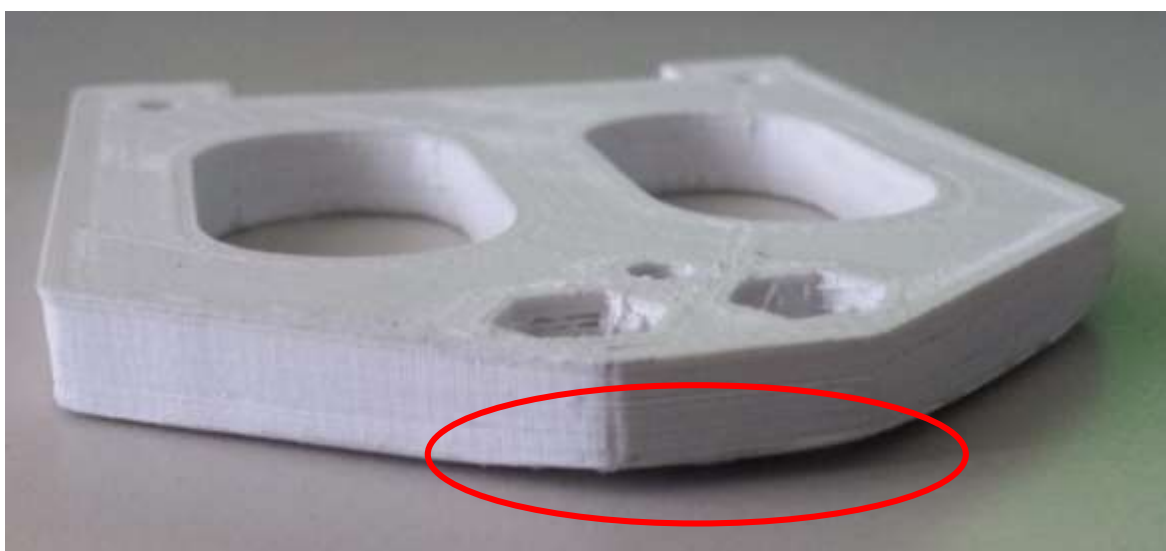
Jedním z největších problémů u RepRap tiskáren je výběr a použití správné vyhřívání podložky. Podložka je důležitou součástí tiskárny, bez které není možný kvalitní přesný tisk. Pokud by nebyla použita vyhřívání podložka, docházelo by při tisku kvůli prudkému ochlazení k deformaci, posunutí modelu a vnitřnímu pnutí v plastu, především u materiálu ABS. Aby se těmto nežádoucím jevům předešlo, je nutné, aby plocha, na kterou se tiskne, měla teplotu od 60 do 110°C. To je důležité hlavně při tisku první vrstvy, aby se horký plast zachytil na podložku.

Podložka by měla mít možnost regulovat teplotu kvůli použitému filamentu (vlákno). Pro kontrolu a ovládání teploty se k podložce připojuje teplotní čidlo, které pomáhá k udržení stálé teploty. Kolísání teploty by mohlo mít vliv na kvalitu tisku a přichycení tisknutého objektu k podložce. Důležité je aby, podložka byla vyhřívání rovnoměrně.

Podložka se ve skutečnosti skládá ze dvou desek. První vyhřívání deska se umísťuje na tzv. základnu, která je připevněná k tyčím s ložisky, druhá deska je namontována na vyhřívání desku a slouží jako plocha pro stisk, pro lepší přenos tepla mezi deskami je vhodné použít teplovodivou pastu. Horní deska musí být hladká a nejčastěji se používá skleněná podložka. Na samotné sklo přilne filament velmi špatně, proto podložku natíráme kalafunovým roztokem (kalafuna rozpuštěná v 0,5 ml lihu) nebo povrch přelepíme kaptonovou páskou.

Nejčastěji používaná podložka je vyrobená z plošného spoje a je komerčně dostupná.

Na obrázku níže obr. 29 je detailní pohled na defekt, kdy se tisknutý model absencí vyhřívání podložky odloupnul od základny během tisku. Odloupení modelu v jeho okrajích bylo způsobeno nedokonalým nepřichycením první vrstvy k podložce při tisku, kdy při chladnutí modelu vlivem teplotní roztažnosti materiálu došlo k dekompozici modelu od základny.



Obr. 29: Defekt modelu způsobený absencí vyhřívání podložky.

Vyhřívání podložka realizovaná spirálou z měděného drátu

Tato vyhřívání podložka je realizována měděným drátem, který se používá například na vinutí cívek o průměru 0,2mm. Drát je zespoda přilepen na skleněnou desku pomocí vysokoteplotní kaptonové pásky. Odpor topné mřížky lze doladit tloušťkou a délkou drátu. Topná mřížka je napájena 12V.

Dále je možné měděnou mřížku napájet topným tělesem s výkonem 350W a napájením 230V. Nevýhodou je váha podložky, která způsobuje pomalý tisk. Oproti podložce vyhřívání rezistory, které se při vyšší teplotě snadno přepálí, pracuje topné těleso hluboko pod hranicí své běžné pracovní teploty, která je až 600°C. Podložka s topným tělesem má dostatečný topný výkon, který umožňuje využití při tisku z mnoha druhů plastu.

Takovéto řešení je však neelegantní a přináší sebou řadu problémů, jako například delaminace pásky z drátů a postupné odlupování vrstev od základny. Dále nejsme schopni dosáhnout takové hustoty závitů, jako například u vytvoření motivu meandru, na klasické DPS typu FR4. Dalším problémem je, jak bylo uvedeno výše, značné předdimenzování tepelného výkonu, který nejsme schopni využít.

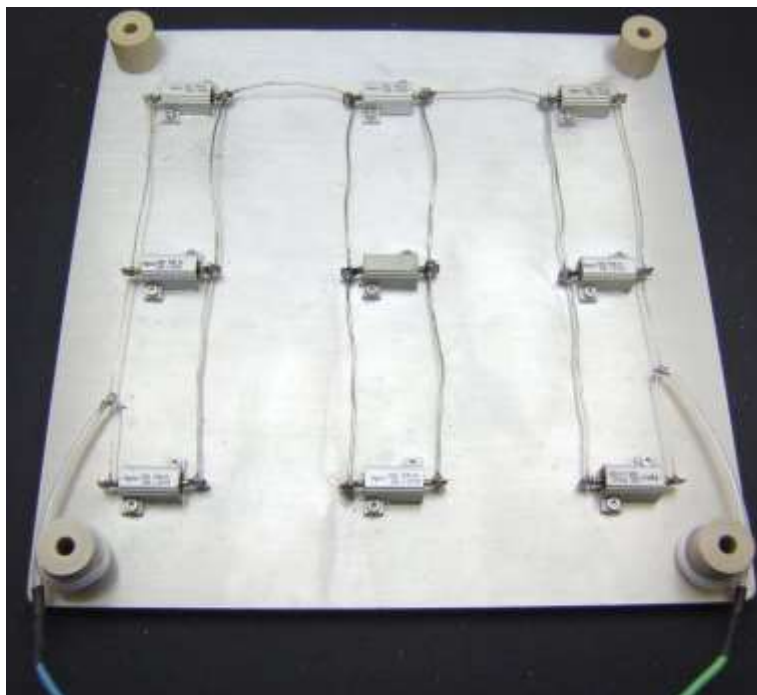


Obr. 30: Vyhřívání podložka realizovaná spirálou z měděného drátu. [32]

Vyhřívání podložka realizována výkonovými rezistory.

Na stavbu je použita kovová deska (např. hliník) s tloušťkou min. 5 mm, která má velkou tepelnou setrvačnost (pomalu se zahřívá a také pomalu chladne - energetická náročnost) a váhu. Pro vyhřívání jsou použity paralelně zapojené výkonové rezistory 12Ω/10W. Rezistory jsou k desce přišroubovány nebo přilepeny dvousložkovým lepidlem s kovovým plnivem odolným do 120°C a díky kovovému plnivu je výsledná sestava tepelně vodivá. Rezistorů musí být dostatečný počet, aby byla teplota konstantní po celé ploše.

Jako vrchní část podložky lze použít různé materiály, nejčastěji se používá sklo, které vytváří hezký hladký povrch a neohýbá se. Oproti kovovým deskám má nízké náklady na pořízení. Nevýhodou je jeho váha a křehkost, při použití nekvalitního skla může dojít k jeho prasknutí.



Obr. 31: Vyhřívání podložka realizována výkonovými rezistory. [33]

Geometrie modelu a simulace teplotního profilu

Teplotní profil vyhřívané podložky byl vytvořen pomocí SolidWorks Flow Simulation. Kde byla použita analýza pro vedení tepla v pevném materiálu (solid) v otevřeném prostoru (external analysis type).

Nastavení vstupních podmínek (Boundary Conditions)

Na fluid části je nastaven termodynamický tlak 1013,25 hPa a počáteční teplota okolí 20,05°C. Ostatní hodnoty zůstanou ponechány v základním nastavení.

Přiřazení materiálů (Solid Materials)

Všechny použité materiály jsou vybrány z knihovny SolidWorks. Pro jednotlivé díly byly vybrány materiály uvedeny v následující tabulce

Tab. 3: Použité materiály pro model extruderu

Díl	Přiřazený materiál	Měrné teplo [J·Kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Spodní deska, pouzdra rezistorů	Hliník 6061	953,86 (při 300 K)	155,5 (při 300 K)
Horní deska	Sklo	670	1,05 (při 300 K)
Výkonové rezistory	Alumina	1355	0,147

Oblast výpočtu (Computational Domain)

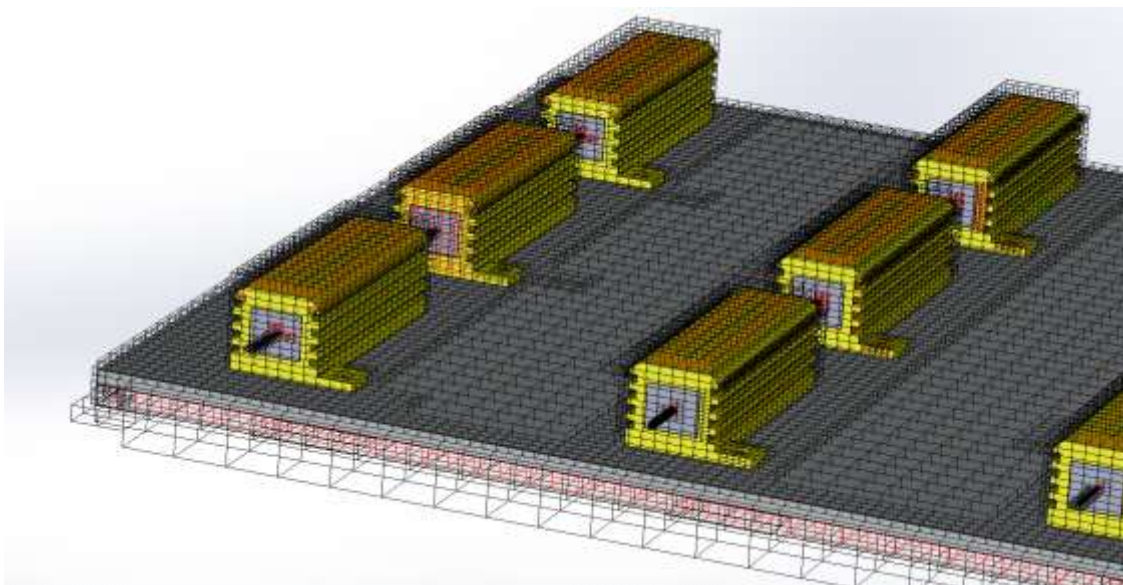
Následně byla vybrána a nastavena výpočtová doména, tzn. část kontinua, která je podrobena numerickému řešení. Zde je třeba volit doménu rozumně z hlediska velikosti, aby nedošlo například ke zkreslení vypočítaných hodnot. Ne však moc velkou, abychom zbytečně neprodlužovali výpočtový čas.

Nastavení zdroje tepla

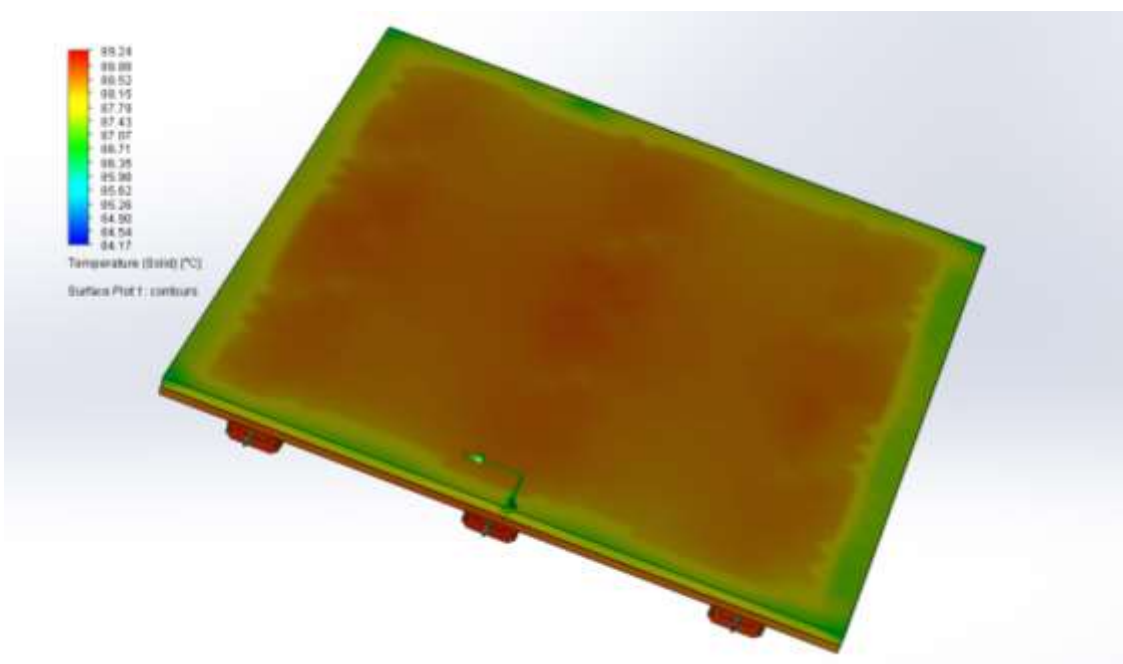
Zdrojem tepla (Volume Source) byly vybrány výkonové rezistory s nastaveným tepelným výkonem 10W (Heat generation rate).

Parametry konečného výsledku simulace

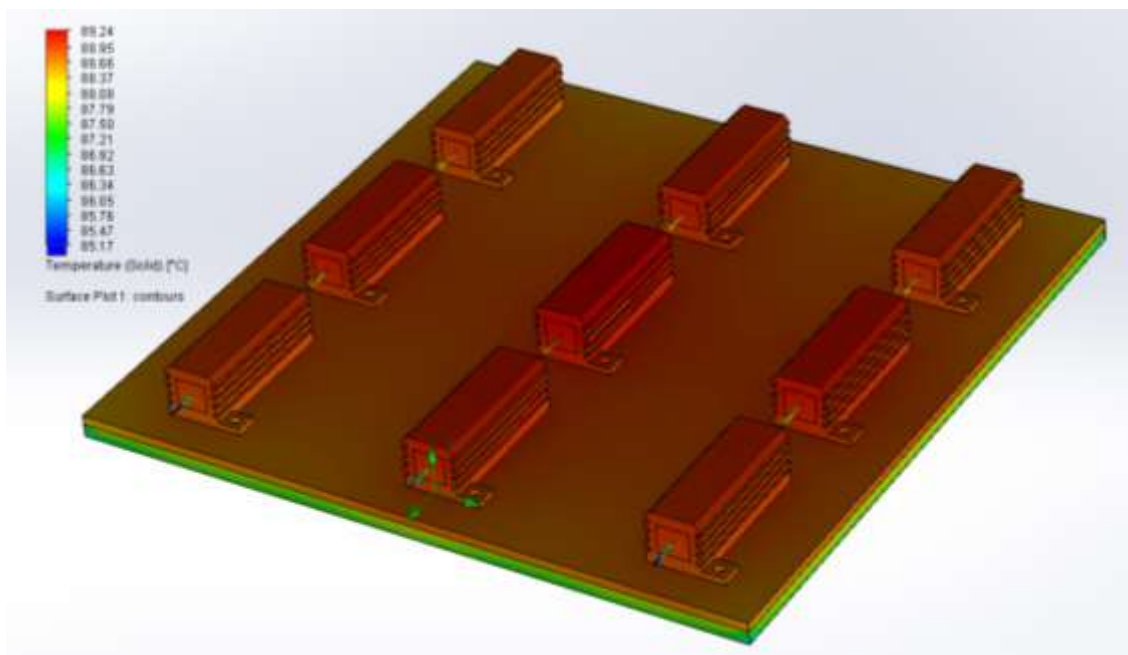
Kapalné buňky (Fluid cells)	60 940
Pevné buňky (Solid cells)	4261
Dílčí buňky (Partial cells)	20 502
Opakování (Iterations)	219



Obr. 32: Rozdělení modelu hot bed metodou konečných objemů (mesh).



Obr. 33: Teplotní profil hot bed vyhřívané výkonovými rezistory.



Obr. 34: Teplotní profil hot bed vyhřívané výkonovými rezistory.

Z výsledku simulace teplotního profilu v SolidWorks je rozložení teploty na podložce téměř rovnoměrné a teploty jsou dostačující pro 3D tisk. Vyhřátí podložky na teplotu 80°C dosáhneme přibližně za 15 minut (záleží na použitém materiálu). Nevýhodou tohoto řešení vyhřívání je pomalé zahřívání a chladnutí, vyšší cena a pracnost při výrobě podložky, nízká životnost výkonových rezistorů a celkové rozměry a váha sestavy, která přetěžuje krokové motorky a může docházet k nepřesnostem při tisku a výška sestavy ubírá v rozsahu pohybu v ose Z.

Jelikož bude teplotní profil hot bed vyhřívané výkonovými rezistory porovnán s profilem hot bed vyhřívané měděným meandrem, bude vyhodnocení a srovnání obou profilů provedeno dohromady v následujících odstavcích.

Vyhříváná deska z plošného spoje (PCB Heatbed)

Simulace teplotního profilu vyhříváné podložky motivem meandru je založena na principu Jouleova tepla.

Jouleovo teplo

Jouleovo teplo vzniká ve vodiči průchodem elektrického proudu. Předáváním části kinetické energie částic způsobujících elektrický proud (nejčastěji elektronů) částicím, které se elektrického proudu neúčastní (kladné ionty v pevných pozicích) se zvyšuje tepelný pohyb těchto částic a vzniká zahřívání vodiče.

Pro velikost Jouleova tepla Q vznikajícího ve vodiči, kterým prochází elektrický proud I po dobu t , platí:

$$Q = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t \quad [J, W, s, V, A, \Omega] \quad (3.6)$$

Jouleovo teplo má koeficient výkonu 1, to znamená, že každý 1 watt elektrické energie je přeměněn na 1 joule tepla.

Hlavní myšlenkou je použití odporu plošných spojů jako topného elementu. Vyhříváná deska na principu plošného spoje (např. MK1), byla vyvinuta Josefem Průšou. V současné době dochází k různým modifikacím této desky. Vytápění je realizováno pomocí dlouhých měděných stop vyleptaných z 35 μ m plátované mědi.

Řídící elektronika (Andruino, Sanguinololu) zahřívá podložku až na teplotu 110°C a může být napájena napětím 12V nebo 24V, nutností je dodat proud alespoň 15A.

Při napětí 12V deska MK1 odebírá proud 10A a teploty 100°C dosáhne asi za 4,5 minut, měřeno na straně tepelného pole. Základní materiál této desky vydrží teplotu 150°C, doporučené je ale použít maximální teplotu 120°C pro dlouhodobé zahřívání.



Obr. 35: Vyhříváná deska realizovaná plošnými spoji. [34]

Výpočet meandru

Naměřené hodnoty

Po dosazení naměřených hodnot (napětí $U = 12\text{V}$, počáteční proud $I_p = 4,29\text{A}$) zjistíme odpor vyhřívané podložky

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12}{4,29} = 2,79 \quad [\Omega] \quad (3.7)$$

Dosazením do následujícího vzorce získáme šířku cesty meandru

$$w_{tr} = \frac{-w_{ja} + \sqrt{w_{ja}^2 + 4 \times \frac{R_{S,cu} \times l_b \times w_b}{R \times t_{cu}}}}{2} =$$
$$= \frac{-0,3 + \sqrt{0,3^2 + 4 \times \frac{1,68 \times 10^{-5} \times 192 \times 202,5}{2,79 \times 0,035}}}{2} = 2,441 \quad [\text{mm}] \quad (3.8)$$

Kde:

R = odpor podložky (2,79 Ω)

w_{tr} = šířka stopy meandru

w_{ja} = šířka izolace mezi stopami meandru (0,3 mm)

l_b = délka desky (192 mm)

w_b = šířka desky (202,5 mm)

$R_{S,cu}$ = měrný odpor mědi ($1,68 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \Rightarrow 1,68 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{mm}$)

t_{cu} = tloušťka mědi (35 $\mu\text{m} = 0,035 \text{ mm}$)

Vztah pro určení celkového počtu stop meandru

$$n_{tr} = \frac{w_b}{w_{tr} + w_{ja}} = \frac{202,5}{2,441 + 0,3} = 73,88 \quad (3.9)$$

Vztah pro výpočet odporu na jeden metr

$$R_s = \frac{\text{měrný odpor}}{\text{tloušťka stopy meandru} \times \text{šířka stopy meandru}} = \frac{1,68 \times 10^{-2}}{0,035 \times 2,441} = 0,1966 \quad [\Omega/\text{m}] \quad (3.10)$$

Výpočet celkového odporu

$$R = n_{tr} \times l_b \times R_s = 74 \times 0,192 \times 0,1966 = 2,793 \quad [\Omega] \quad (3.11)$$

Z následujícího vztahu je patrné, že vyhřívaná podložka o rozměrech 192 mm x 202,5 mm je navržena tak aby při výkonu 1500 W/m² a napětí 12 V dodala výkon přibližně 60 W.

$$P = l_b \times w_b \times 1500 \text{ W/m}^2 = 0,192 \times 0,2025 \times 1500 \text{ W/m}^2 = 58,32 \text{ [W]} \quad (3.12)$$

Přiřazení materiálů (Solid Materials)

Všechny použité materiály jsou vybrány z knihovny SolidWorks. Pro jednotlivé díly byly vybrány materiály uvedeny v následující tabulce

Tab. 4: Použité materiály pro model extruderu

Díl	Přiřazený materiál	Měrné teplo [J·Kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Spodní deska	FR4	0,3	880
Horní deska	Sklo	670	1,05 (při 300 K)
Meandr	Měď	397,8 (při 400 K)	393 (při 400 K)

Oblast výpočtu (Computational Domain)

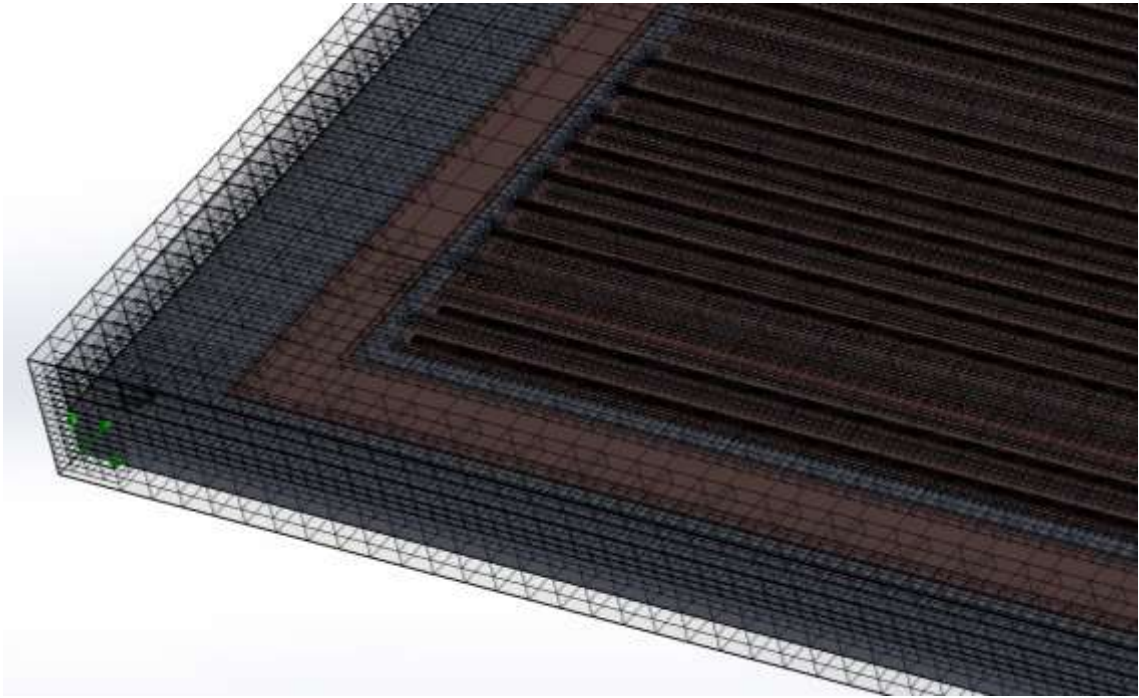
Následně byla vybrána a nastavena výpočtová doména, tzn. část kontinua, která je podrobena numerickému řešení. Zde je třeba volit doménu rozumně z hlediska velikosti, aby nedošlo například ke zkreslení vypočítaných hodnot. Ne však moc velkou, abychom zbytečně neprodlužovali výpočtový čas.

Nastavení elektrických podmínek pro vyhřívání (Electrical Conditions)

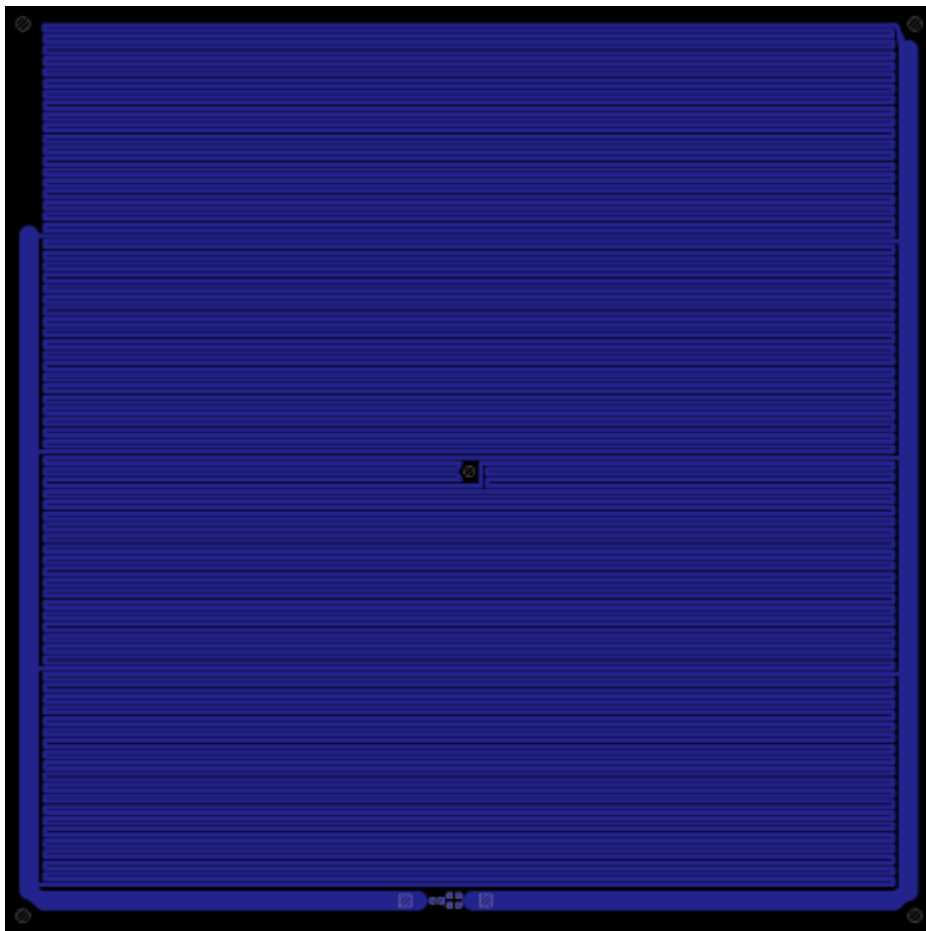
Vyhřívání podložky je realizováno motivem meandru na materiálu FR4, k simulaci pak byl využit přestup tepla vedením, který byl iniciován Jouleovým teplem, které vzniká ve vodiči průchodem elektrického proudu o velikosti 7A.

Parametry konečného výsledku simulace

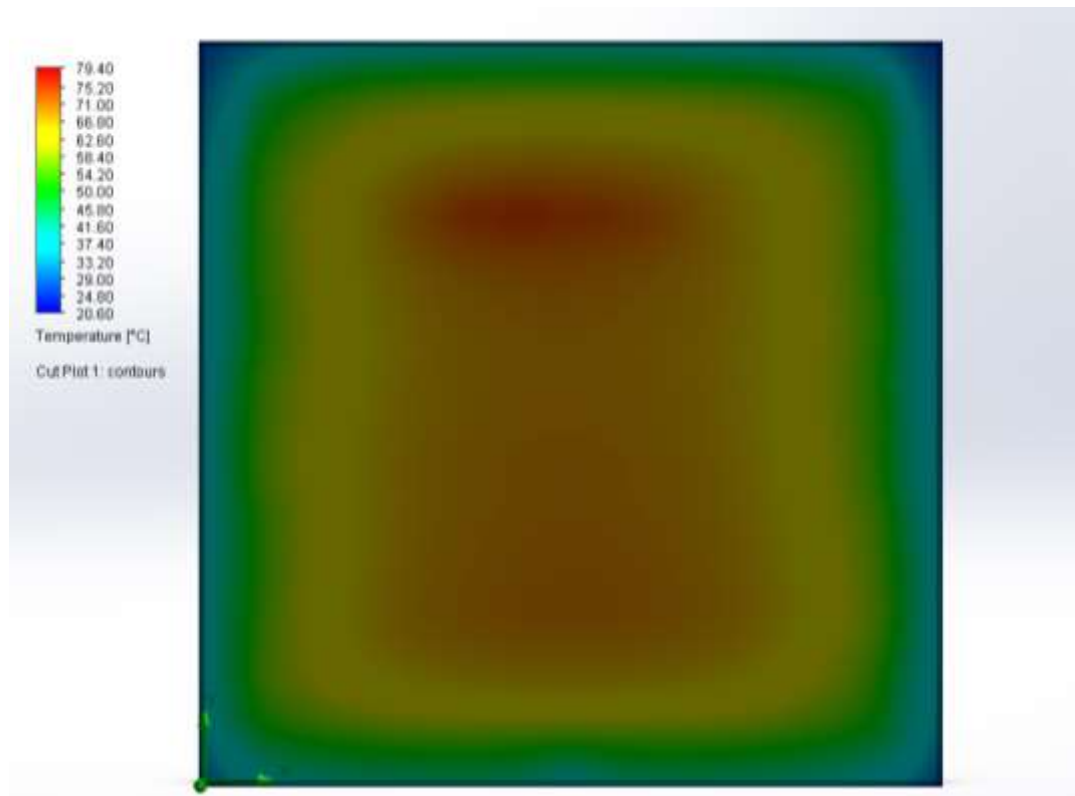
Kapalné buňky (Fluid cells)	287 928
Pevné buňky (Solid cells)	575 948
Dílčí buňky (Partial cells)	449 492
Opakování (Iterations)	243



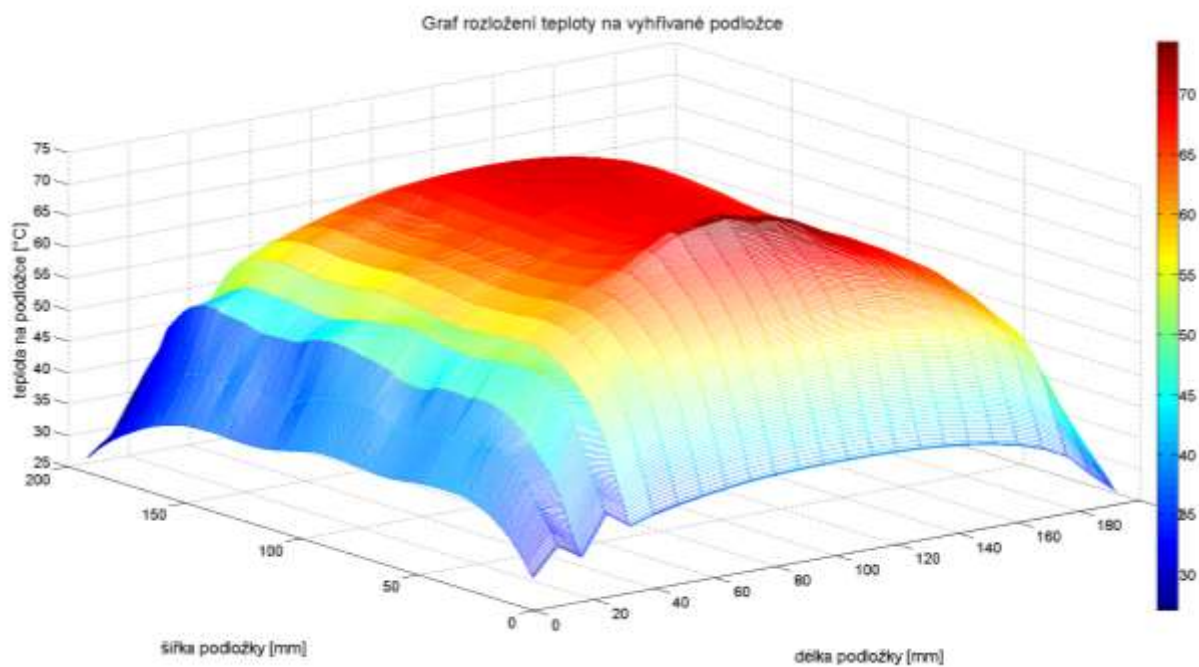
Obr. 36: Rozdělení modelu hot bed metodou konečných objemů (mesh).



Obr. 37: Motiv topného meandru.



Obr. 38: Teplotní profil hot bed vyhřívané plošným spojem.

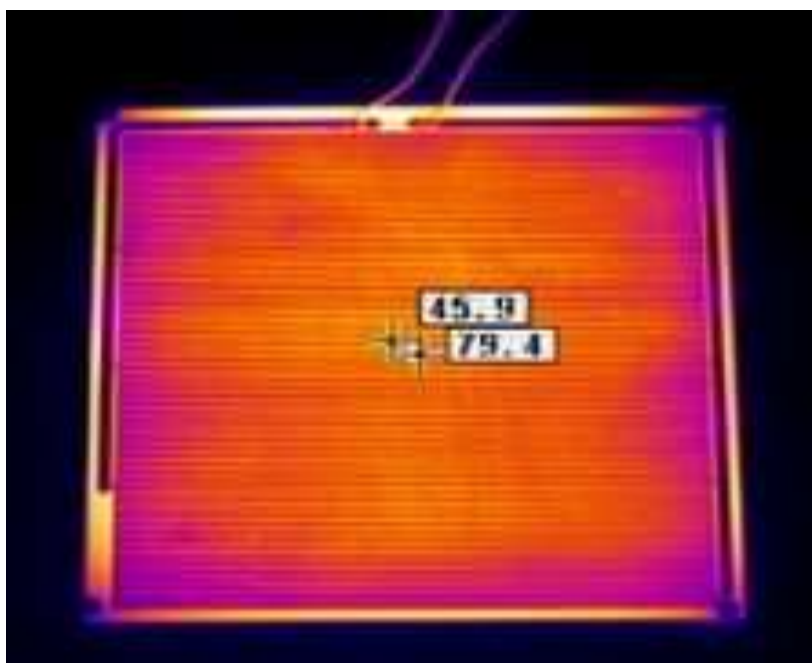


Obr. 39: 3D teplotní profil hot bed vyhřívané plošným spojem.

Vyhřívání podložky byla fyzicky realizována a pomocí termokamery EASIR – 9 bylo provedeno několik měření pro získání reálného zobrazení teplotního rozložení na vyhřívané podložce. Deska byla vyrobena z materiálu FR4 s tloušťkou Cu 35 μ m.

Vyhřívání podložky byla podložena distančními podložkami, aby došlo k omezení úniku tepla do okolí a sériově připojena k ampérmetru a ke zdroji s napětím 12V. Počáteční proud byl 4,29A a v průběhu zahřívání podložky klesl na 3,62A vlivem rostoucí teploty.

Výstupem měření termokamerou bylo grafické zobrazení rozložení teploty. Z obrázku obr. 38 uvedeného níže je patrné, že nejvyšší teplota je ve středu desky a postupem k okrajům teplota klesá. Křížek na obrázku uvádí nejvyšší teplotu 79,4 °C a hodnota 45,9 °C označuje nejnižší teplotu desky.



Obr. 40: Teplotní profil hot bed zachycený termokamerou.

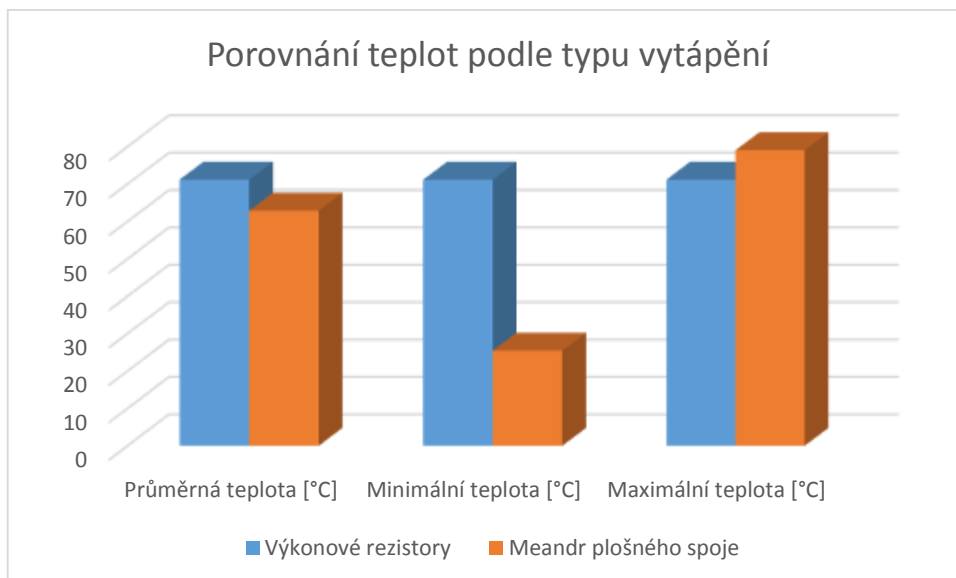
Výsledky měření termokamerou byly potvrzeny teoretické předpoklady o teplotním profilu podložky vyhřívané plošným spojem. Teploty a teplotní rozložení přibližně korespondují s teplotními výsledky na modelu vytvořeném v SolidWorks. Vytápění plošným spojem je elegantní, spolehlivé a podložka je komerčně dostupná.

Porovnání výsledků simulace vyhřívání podložek

V následující tabulce jsou zobrazeny minimální, maximální a průměrné teploty vyhřívání podložek podle typu vytápění.

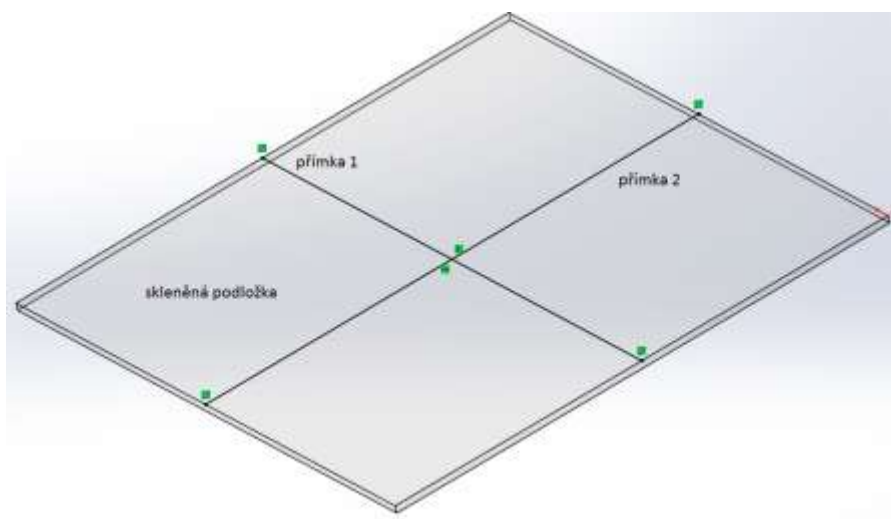
Tab. 5: Porovnání teplot podle typu vytápění

Typ vytápění podložky	Průměrná teplota [°C]	Minimální teplota [°C]	Maximální teplota [°C]
Výkonové rezistory	71,17	71,16	71,17
Meандр plošného spoje	62,89	25,41	79,07

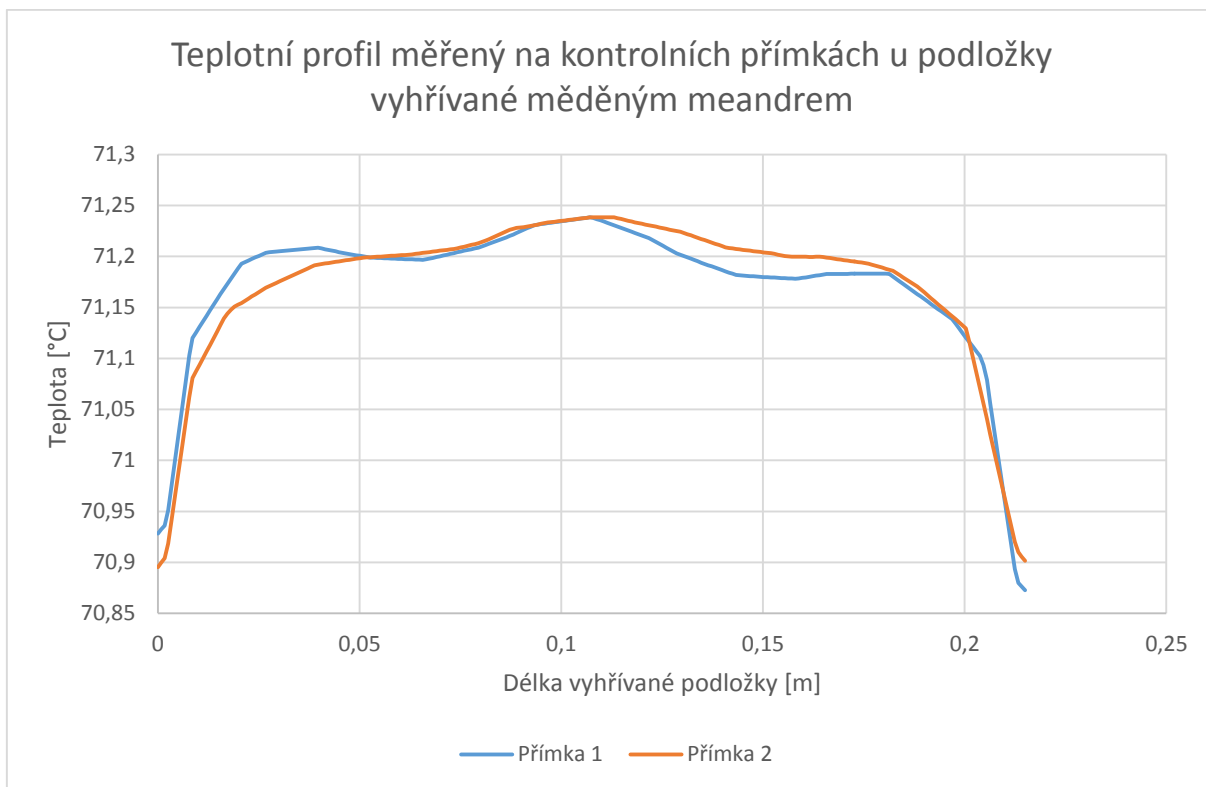


Obr. 41: Porovnání teplot podle typu vytápění.

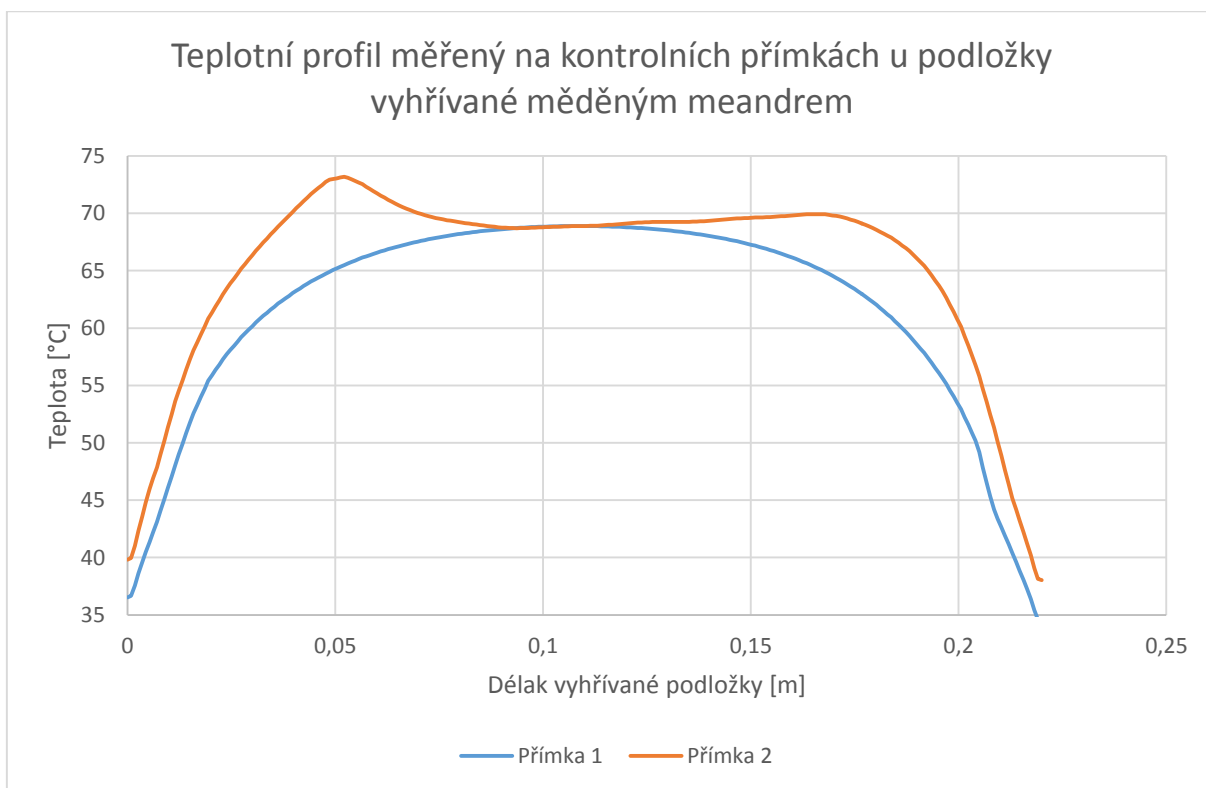
Dále jsou v následujících grafech zobrazeny teplotní profily podložek zaznamenané na kontrolních přímkách vždy mezi dvěma středy protilehlých stran. Z výsledků simulací je patrné, že teploty obou variant vyhřívání jsou dostatečné. U vyhřívání výkonovými rezistory je patrný prudký nárůst teploty od okrajů podložky oproti vyhřívání meandrem. Teplotní rozložení v oblasti tisku kde dochází k extrudování plastu, je rovnoměrné a dostačující v obou případech.



Obr. 42: Přímký definované pro zobrazení teplotního profilu.



Obr. 43: Teplotní profil měřený na kontrolních přímkách u podložky vyhřívané výkonovými rezistory.



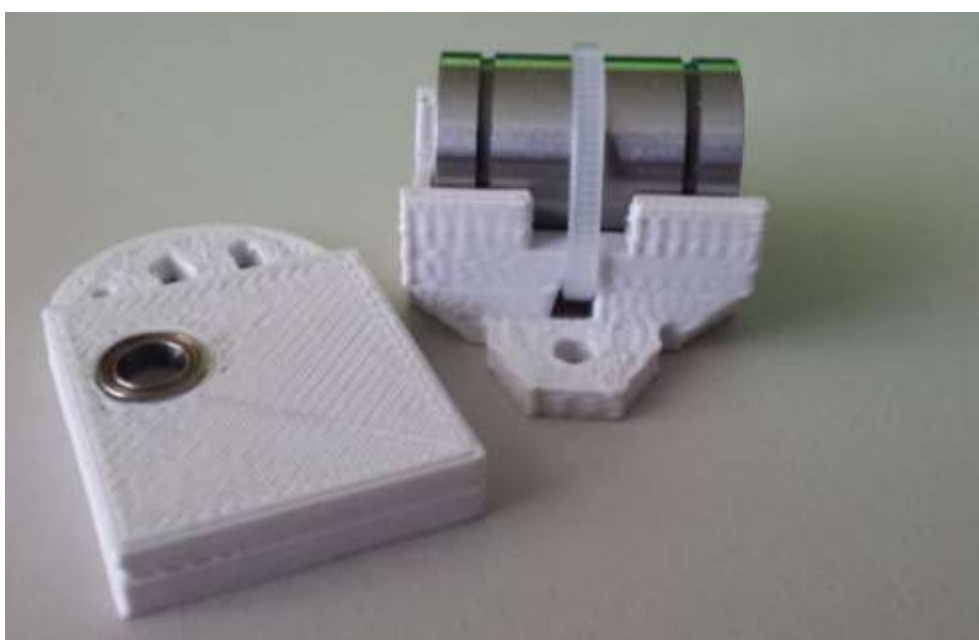
Obr. 44: Teplotní profil měřený na kontrolních přímkách u podložky vyhřívané měděným meandrem.

Z tabulky tab. 5 a závislostí obr. 43 je patrné, že u řešení s výkonovými rezistory jsou hodnoty teploty po celé délce desky v podstatě konstantní oproti variantě s motivem na DPS, která se postupně prohřívá od středu do krajů desky, a jako řešení pro realizaci vyhřívané podložky by se jevilo jako ideální. Nicméně pro výše uvedené konstrukční problémy a nedostatky bylo zvoleno vyhřívání s realizací motivu na DPS.

Na obrázcích obr. 45 a obr. 46 jsou vytisknuté modely na podložce vyhřívané meandrem. Lze pozorovat, že použitím vyhřívané podložky nedošlo k defektům během tisku, například k posunu nebo odloupení prvních vrstev při tisku.



Obr. 45. Příklad vytisknutého modelu doplněného matkami.



Obr. 46: Příklad vytisknutého modelu doplněného o ložisko.

3.4 Wade extruder, tiskací tryska (hot end)

Extruder je zařízení, které tlačí strunu (plast) do trysky a určuje, tak kolik plastu se vytlačí. Kvalita Extruderu a Hot-end je hlavním faktorem pro kvalitní tisk.

RepRap Prusa Mendel je obvykle vybaven převodovaným lisem Wade, standardně se tedy používá Wade Extruder. Tento extruder se skládá ze dvou částí. První je studená vrchní část, která podává plastovou strunu, tuto část je nutné chladit ventilátorem k zabránění nežádoucího tavení plastu, možnosti vývěru roztaveného plastu, nadměrnému zahřívání mechanismu tiskové hlavy a druhá teplá spodní část, která roztaví a vytlačuje plast. Tyto dvě části se běžně ve Wade extruderu nazývají cold end (studená část) a hot-end (teplá část).

Wade extruder se skládá z velkého ozubeného kola poháněného krokovým motorem. Tato zařízení pohání šroub, který táhne plastovou strunu a tlačí ji do trysky (hot-end), kde dochází k tavení plastu. Hot-end je obvykle mosazný šroub s otvorem umístěný ve svislé ose tiskárny. Použit můžeme struny o průměru 1,75 mm a 3 mm. Je důležité, aby se průměr otvoru šroubu shodoval s průměrem struny. Hrot trysky, kterým je nanášen materiál na tiskovou plochu, je zúžen na průměr menší než 1 mm (obvykle 0,5mm).

Nejjednodušším a nejběžnějším způsobem, jak vytopit kovovou trysku je vytápění rezistorem (zejména drátový rezistor). Drátový rezistor vytváří dostatečné teplo a výhodou je jeho nízký odpor, který je důležitý, protože čím více proudu teče odporem, tím více tepla se vytváří. Rezistor je obvykle vložen do hliníkového nebo mosazného topného bloku.

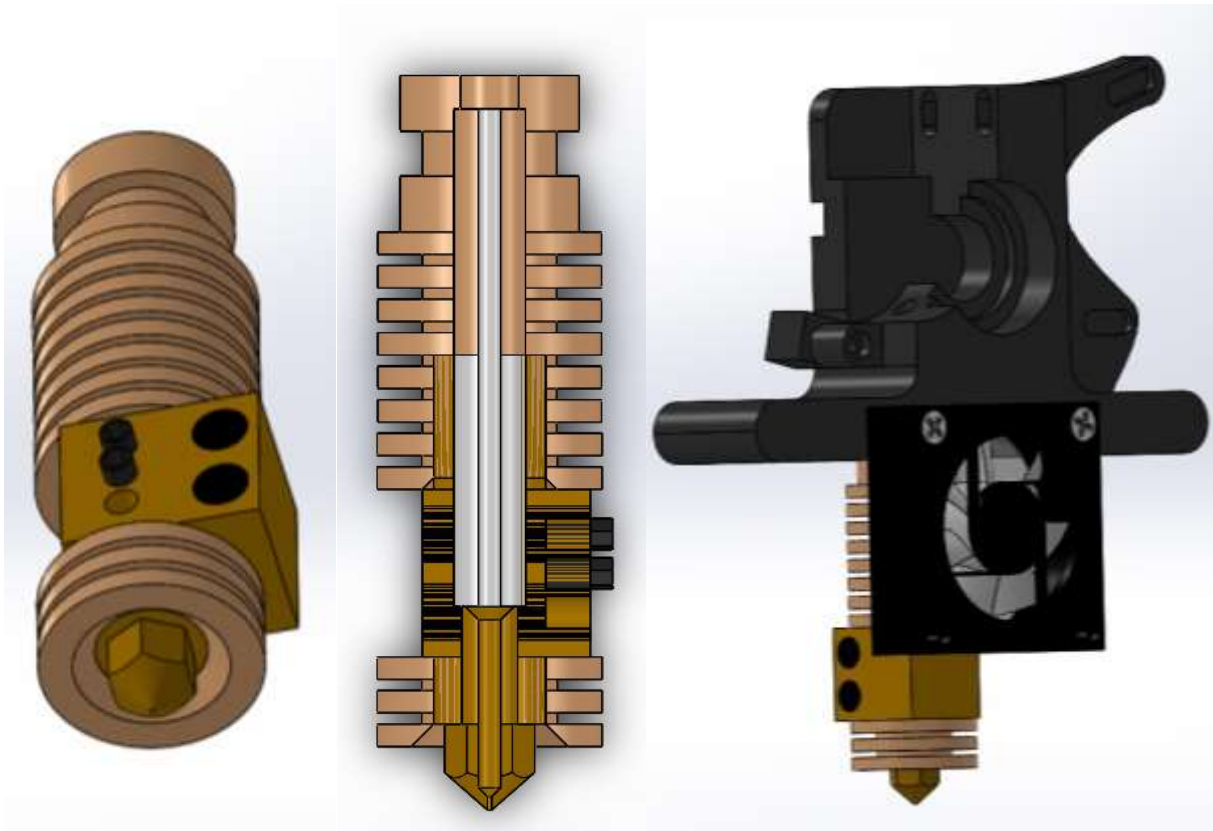
Termistor a rezistor je připojen k desce elektroniky Arduino a umožňuje měřit a regulovat teplotu topného tělesa trysky. Pomocí rezistoru a měřením teploty termistorem lze tedy trysku vyhřát na požadovanou teplotu a udržovat ji. Požadované teplo je řádově 20 W s teplotami okolo 150 °C až 250 °C.

Hot-end se skládá ze tří komponent, termistoru pro měření teploty, tepelné bariéry pro oddělení studené a horké části a trysky pro nanášení roztaveného plastu. Tryska je nejdůležitější částí hot-end, slouží pro extrudování roztaveného plastu a musí mít dostatečně ostrý hrot se středovým otvorem o průměru 0,5 mm.

Geometrie a simulace teplotní analýzy

Pomocí programu SolidWorks byly vytvořeny jednotlivé trojrozměrné díly extruderu, ze kterých byla následně vytvořena finální sestava trojrozměrného modelu extruderu připravená k teplotní analýze v programu SolidWorks Flow Simulation.

Protože výpočet tepla probíhá v otevřeném prostoru, byla zvolena externí analýza (Analysis type – External) se zvážením uzavřených dutin a zvolením funkce vedení tepla v tuhých látkách. Dále byl zvolen jako proudící plyn vzduch s laminárním a turbulentním typem průtoku. Všem objemovým tělesům byl přiřazen vhodný materiál.



Obr. 47: Na obrázku zleva model tiskací trysky, řez tiskací trysky a tiskací tryska připevněná k tělu extruderu s chlazením studené části trysky.

Nastavení vstupních podmínek (Boundary Conditions)

Na stěnách je nastaven termodynamický tlak 1013,25 hPa a počáteční teplota okolí 20,05°C. Ostatní hodnoty zůstanou ponechány v základním nastavení.

Přiřazení materiálů (Solid Materials)

Všechny použité materiály jsou vybrány z knihovny SolidWorks. Defaultně byl přiřazen celému modelu materiál mosaz. Dále byly postupně přiřazeny jednotlivým dílům modelu vhodné materiály, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 6: Použité materiály pro model extruderu

Díl	Přiřazený materiál	Měrné teplo [J·Kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Tělo trysky, hrot	Mosaz	390	110
Tělo extruderu	ABS PC	1900	0,2918
Ventilátor	Pevné PVC	1355	0,147
Výkonové rezistory	Alumina	850	30
Trubička pro přívod filamentu, horní a dolní žebrovaný díl	Teflon	220,65 (při 80 K)	0,234 (při 80 K)

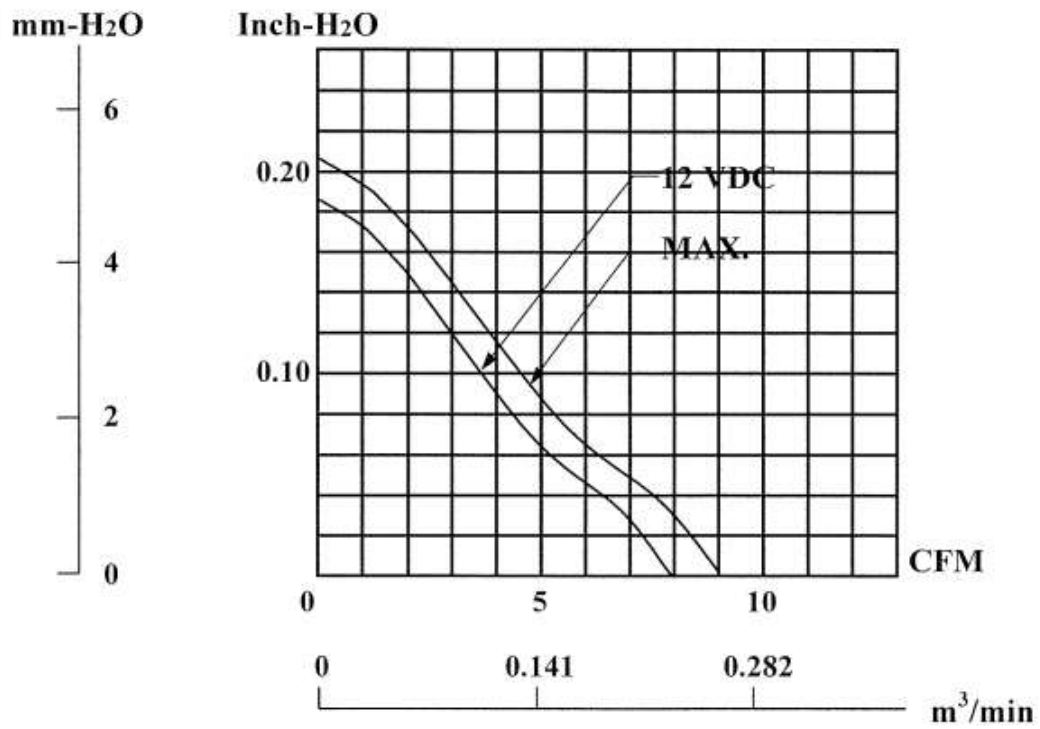
Oblast výpočtu (Computational Domain)

Následně byla vybrána a nastavena výpočtová doména, tzn. část kontinua, která je podrobena numerickému řešení. Zde je třeba volit doménu rozumně z hlediska velikosti, aby nedošlo například ke zkreslení vypočítaných hodnot. Ne však moc velkou, abychom zbytečně neprodlužovali výpočtový čas.

Nastavení zdroje tepla a ventilátoru

Zdroj tepla tvoří dvojice výkonových rezistorů, o teplotě 235°C. Protože v simulaci uvažujeme použití ventilátoru pro chlazení studené části tiskací trysky, je potřeba zahrnout působení ventilátoru. Jako typ ventilátoru byl zvolen vnitřní axiální ventilátor. Pro simulaci je vybrán ventilátor Sunon axial KDE1204PFV1.11 z knihovny SolidWorks, který svými parametry splňuje požadavky.

STATIC PRESSURE



Obr. 48: P-V křivka použitého ventilátoru Sunon KDE1204PFV1.11. [35]

Parametry konečného výsledku simulace

Kapalné buňky (Fluid cells)	13 357
Pevné buňky (Solid cells)	2320
Dílčí buňky (Partial cells)	8176
Opakování (Iterations)	88

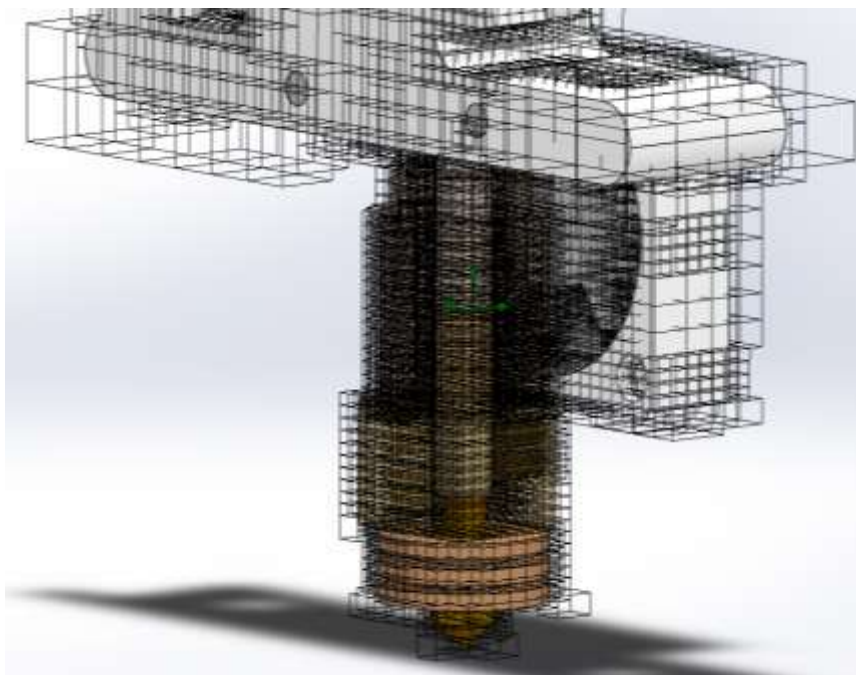
Na obrázcích obr. 49 a obr. 50 jsou zobrazeny výpočtové sítě metodou konečných objemů, kde v místech složitější struktury modelu je jeden konečný objem rozdělen na čtyři menší objemy pro přesnější výpočet a zobrazení výsledků v této oblasti.

Rozměry výpočtové oblasti jsou v ose X: 148 mm

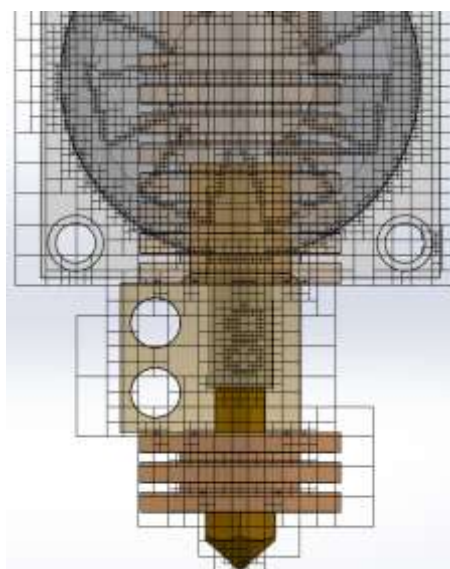
Y: 170 mm

Z: 128 mm

Průměrná velikost jedné výpočtové buňky je $4,49 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$.



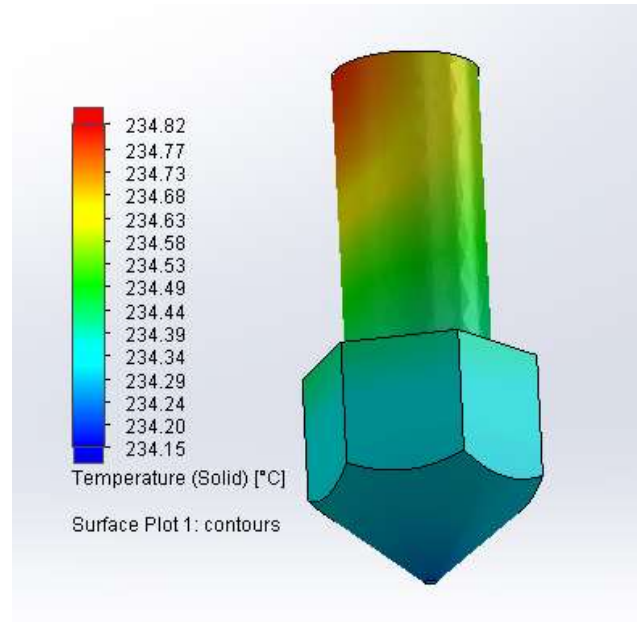
Obr. 49: Rozdělení modelu extruderu na výpočtovou síť metodou konečných objemů (mesh).



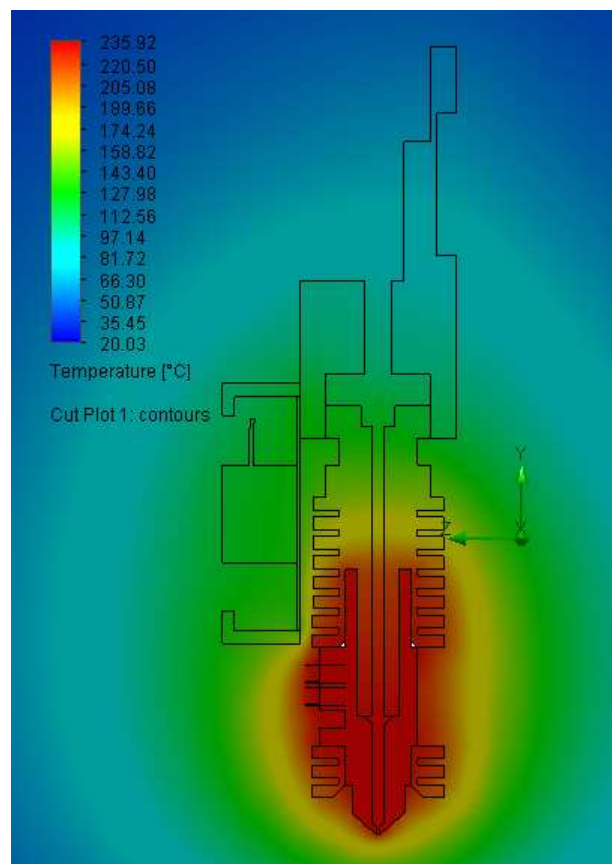
Obr. 50: Detail výpočtové sítě.

Výsledek simulace bez použití ventilátoru

Simulace teplotního profilu byla provedena s potlačením vlivu ventilátoru na chlazení studené části trysky ventilátorem. Grafické výsledky simulace teplotních profilů jsou zobrazeny na obrázcích níže.



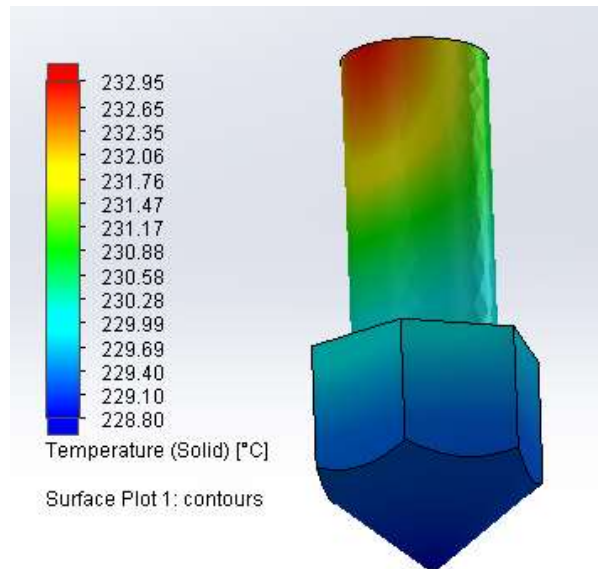
Obr. 51: Teplotní rozložení na hrotu tiskací trysky.



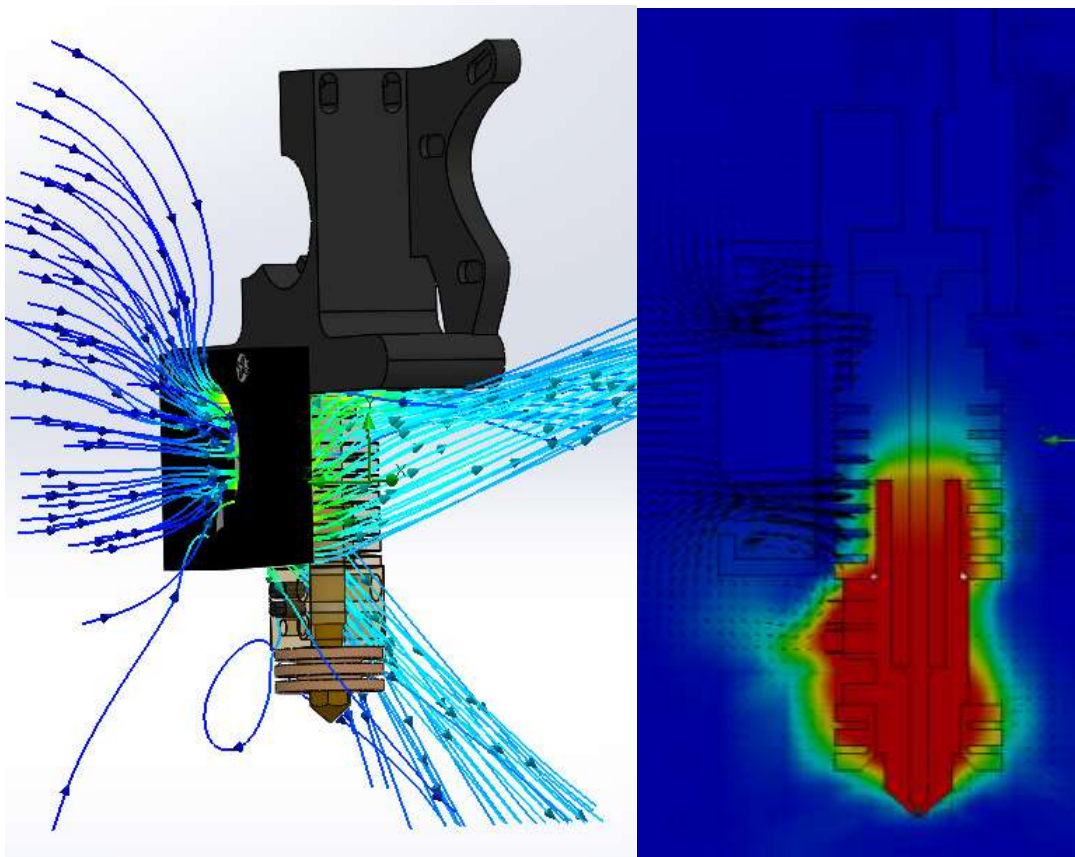
Obr. 52: Teplotní profil tiskací trysky v řezu.

Výsledek simulace s použitím ventilátoru

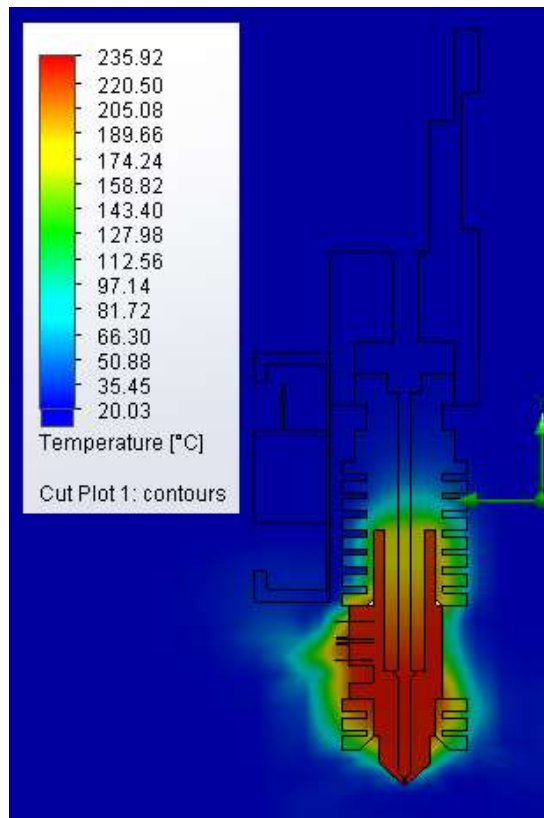
Simulace teplotního profilu byla provedena s aktivním ventilátorem. Ventilátor přivádí vzduch k chlazení studené části (cold end) tiskací trysky k zabránění tavení přiváděného plastu v horní části trysky a tím ke zlepšení transportu filamentu do horké části trysky (hot end). Dále pomocí ventilátoru dosáhneme lepší regulace teploty trysky.



Obr. 53: Teplotní rozložení na hrotu tiskací trysky.



Obr. 54: Zobrazení proudění vzduchu kolem tiskací trysky.



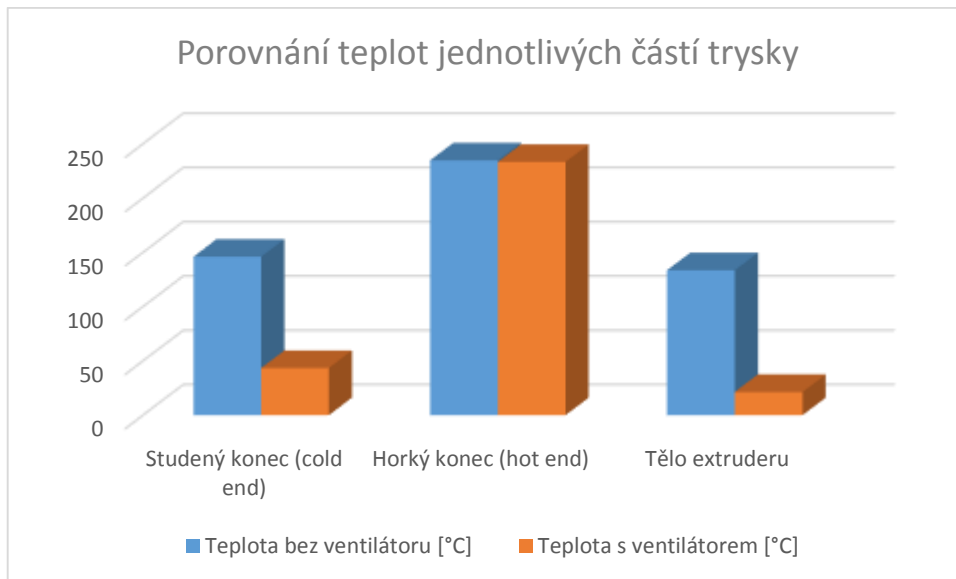
Obr. 55: Teplotní profil tiskací trysky v řezu.

Porovnání výsledků simulace modelu s ventilátorem a bez ventilátoru

V následující tabulce jsou shrnuty teploty jednotlivých částí trysky. Použitím ventilátoru k chlazení horní části trysky je dosaženo snížení teploty až o 100 °C.

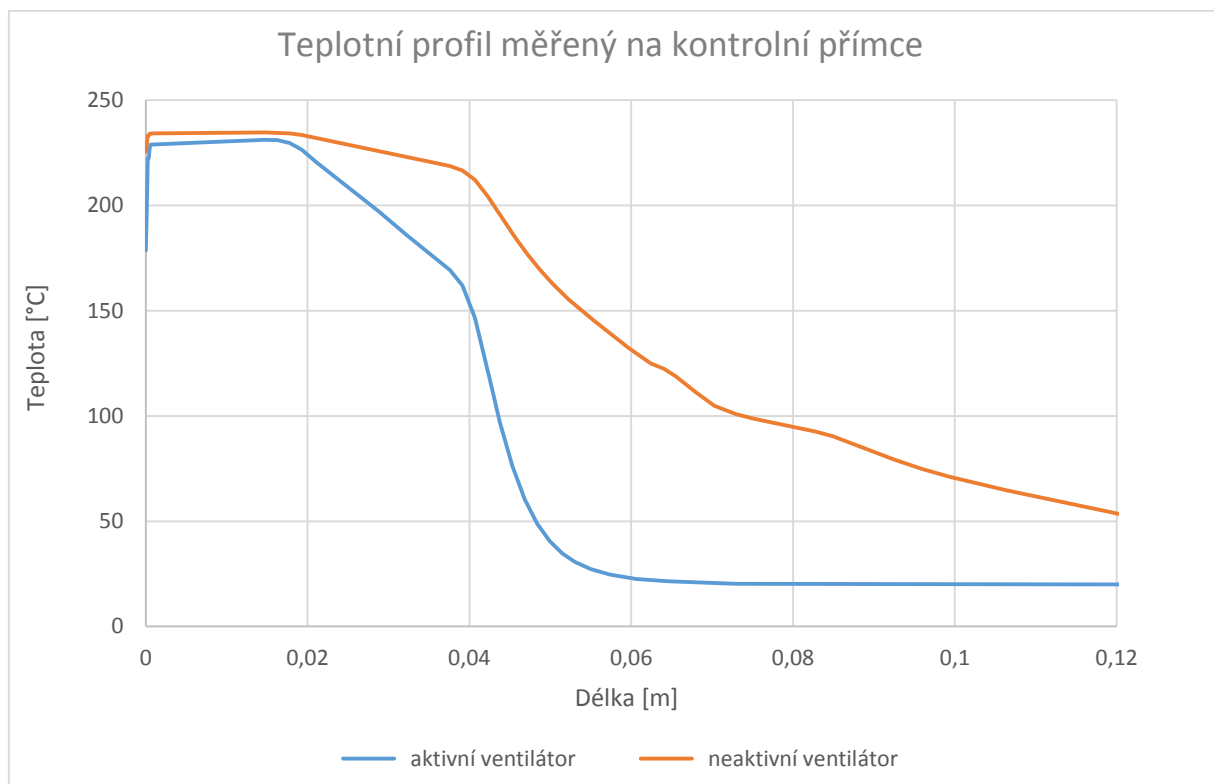
Tab. 7: Porovnání teplot jednotlivých částí trysky

	Teplota bez ventilátoru [°C]	Teplota s ventilátorem [°C]
Studený konec (cold end)	146,15	43,47
Horký konec (hot end)	234,85	233,41
Tělo extruderu	133,56	21,41



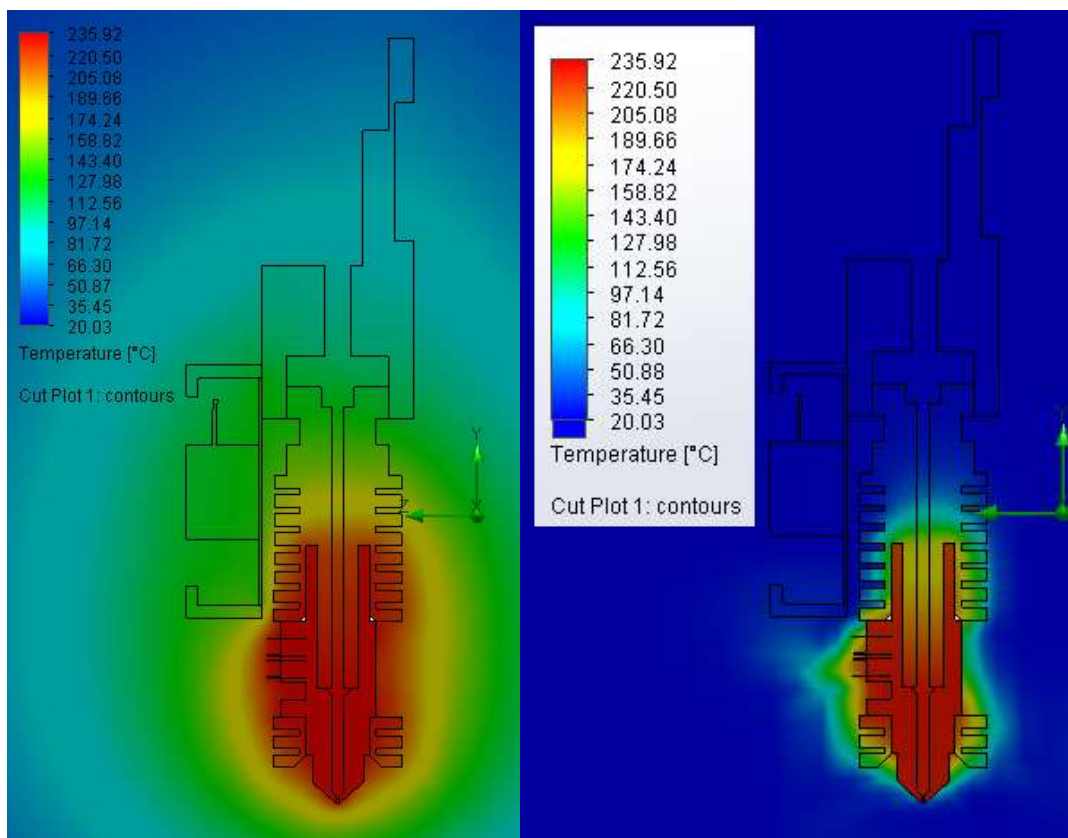
Obr. 56: Porovnání teplot jednotlivých částí trysky.

Na obrázku níže obr. 54 jsou zobrazeny teplotní profily na přímce vedené otvorem pro filament plastu. Přímka je vedena od tiskacího hrotu trysky. Z grafu je patrné, že použitím ventilátoru k chlazení studené části trysky (cold end) dosáhneme znatelně vysokého teplotního rozdílu oproti řešení bez ventilátoru, a požadovaná teplota okolo 230 °C je pouze v naší požadované oblasti horkého konce (hot end) kde dochází k přetavení plastu. Postupně teplota klesá a nedochází k nežádoucímu tavení plastu v oblasti horní části trysky.



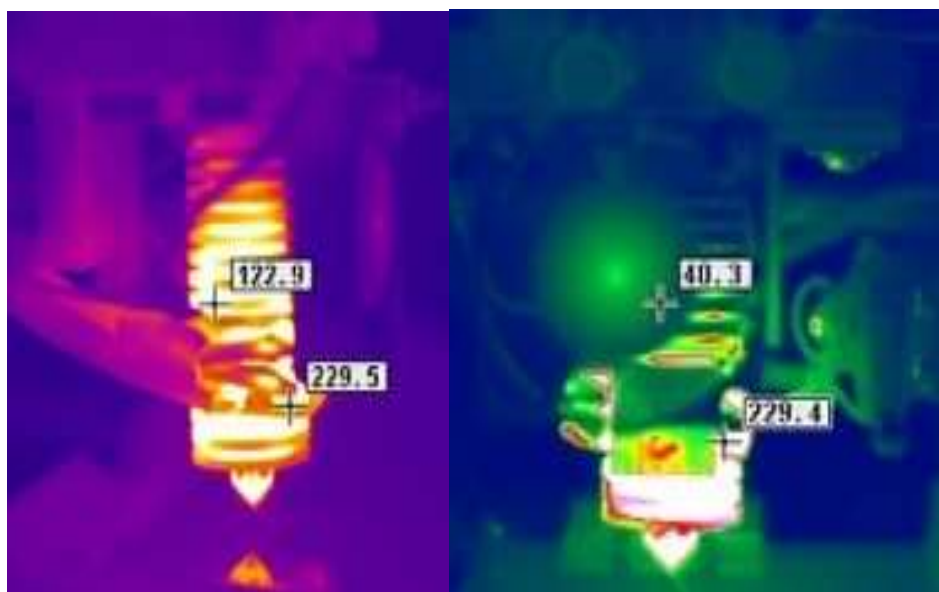
Obr. 57: Porovnání teplot na přímce vedené středem trysky (trasa pro filament).

Porovnání grafických výsledků simulace teplotních profilu vykreslené v rovině řezu vedené středem modelu.



Obr. 58: Teplotní profil modelu bez použití ventilátoru a profil s ventilátorem.

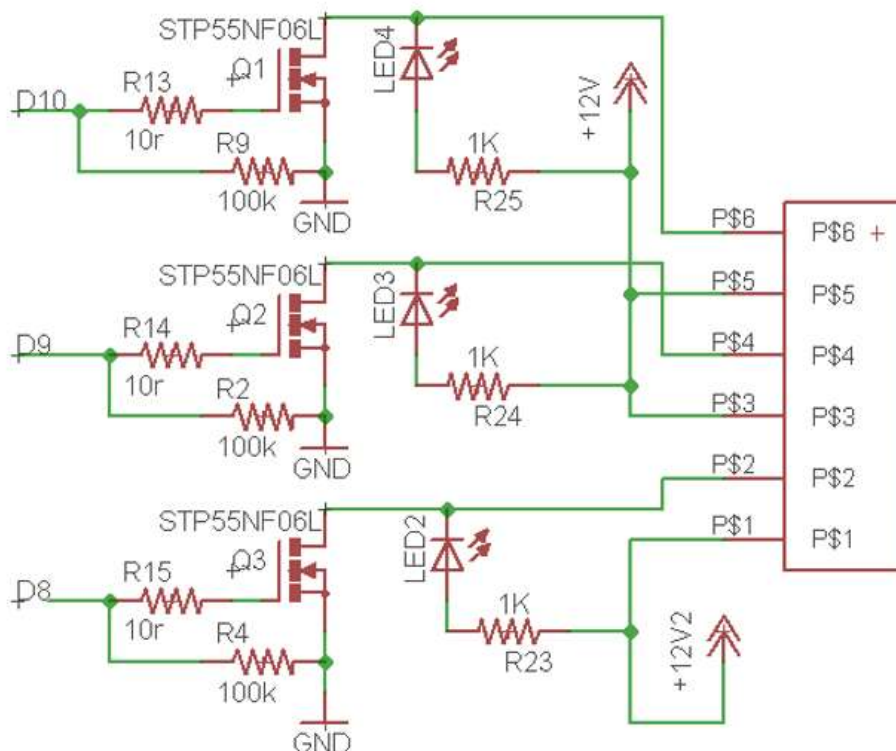
Na obrázcích obr. 55 níže jsou teplotní profily zachycené termokamerou. Zleva profil bez použití ventilátoru, kde teplota horké části je 229,5 °C a studené části 122,9 °C. Vpravo je profil s použitím ventilátoru, kde teplota horké části je 229,4 °C a studená část je ochlazená na teplotu 40,3 °C.



Obr. 59: Teplotní profil trysky zachycený termokamerou bez použití ventilátoru a profil s ventilátorem.

Návrh proudového posílení – PWM driver

Jelikož takto navržené topné části 3D tiskárny nelze, z důvodů vysokého odebíraného proudu obou zařízení a následně i přidaného chladicího ventilátoru, přímo napojit na ovládací desku Arduino Mega 2560, byl za tímto účelem navržen obvod proudového posílení výstupů ovládací desky s transistory typu MOSFET STP55NF06L, které mají $I_D=55\text{ A}$, což s dostatečnou rezervou pokryje nároky na proudový odběr. Teplota je řízena pulsně šířkou modulací (PWM), která je popsána v teoretické části této práce. Dále slouží k připojení ventilátoru pro chlazení trysky.



Obr. 60: Schéma zapojení PWM driveru.

Vstupy D8 – D10 jsou připojeny k PWM digitálním výstupům na desce Arduino 2560, na kterých je realizováno PWM. Jelikož každý logický vstup vyžaduje definovanou logickou úroveň, v případě nezapojeného vstupu nebo vstupu, ke kterému je připojena vysoká impedance, může dojít k neočekávaným stavům. Rezistory R4, R2 a R9 slouží jako takzvané pull down (snižovací) rezistory, které slouží k udržení logické hodnoty „0“, díky hodnotě 100 k Ω do tohoto vstupu prakticky neteče žádný proud.

Jelikož při PWM řízení na hradle Gate mosfet tranzistoru, vlivem relativně velkého kmitočtu, vzniká parazitní kapacita, která je řádově v pF (viz datasheet) je nutné ji vybit, toto zajišťují rezistory R13 – R15 s hodnotou 10 Ω .

Celé zapojení je doplněno o indikační LED diody, které blikáním indikují vytápění (aktivaci ventilátoru). K diodám jsou připojeny příslušné rezistory.

$$U_R = U_Z - U_D \quad [V] \quad (3.13)$$

$$U_R = 12 - 2 = 10 \text{ V}$$

$$R = \frac{U_R}{I_D} \quad [\Omega] \quad (3.14)$$

$$R = \frac{10}{0,001} = 1000 \Omega$$

Kde U_R - napětí na rezistoru, I_R - proud protékající rezistorem, U_D - napětí na diodě, I_D - proud protékající diodou, U_Z - napětí zdroje.

Tranzistory STP55NF06L jsou v pouzdru TO 220 a jsou doplněny o přídatný chladič. Stykové plošky tranzistoru s chladičem jsou potřeny teplo vodivou pastou.

Tab. 8: Seznam součástek

Název	Označení	Počet kusů
STP55NF06L	Q1 – Q3	3
R 1206 10R	R13 – R15	3
R 1206 100k	R2, R4, R9	3
R 1206 1k	R23 – R25	3
LED 1206 GREEN	LED2 – LED4	3
Konektor šroubovací 6x	P\$1 - P\$6	1

3.5 Teplotní analýza sestavy 3D tiskárny

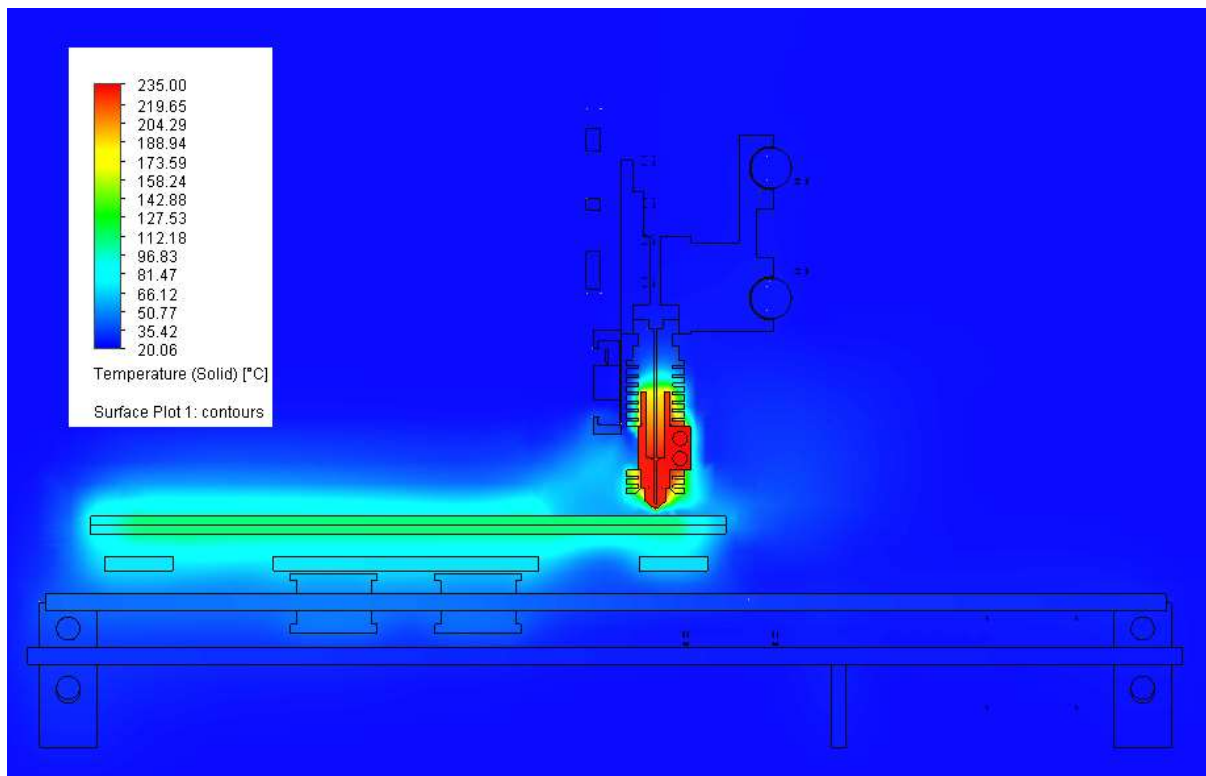
Na obrázcích níže je zobrazen fyzický model 3D tiskárny RepRap a model vytvořený v programu SolidWorks. 3D tiskárna je sestavena z nejlepších řešení zvolených na základě teplotních analýz z předchozích podkapitol práce.

Podložka vyhřívaná meandrem je připevněna k pohybuující se základně a tiskací tryska je již součástí tiskové hlavy (extruder) vybavené mechanismem pro přísun filamentu.

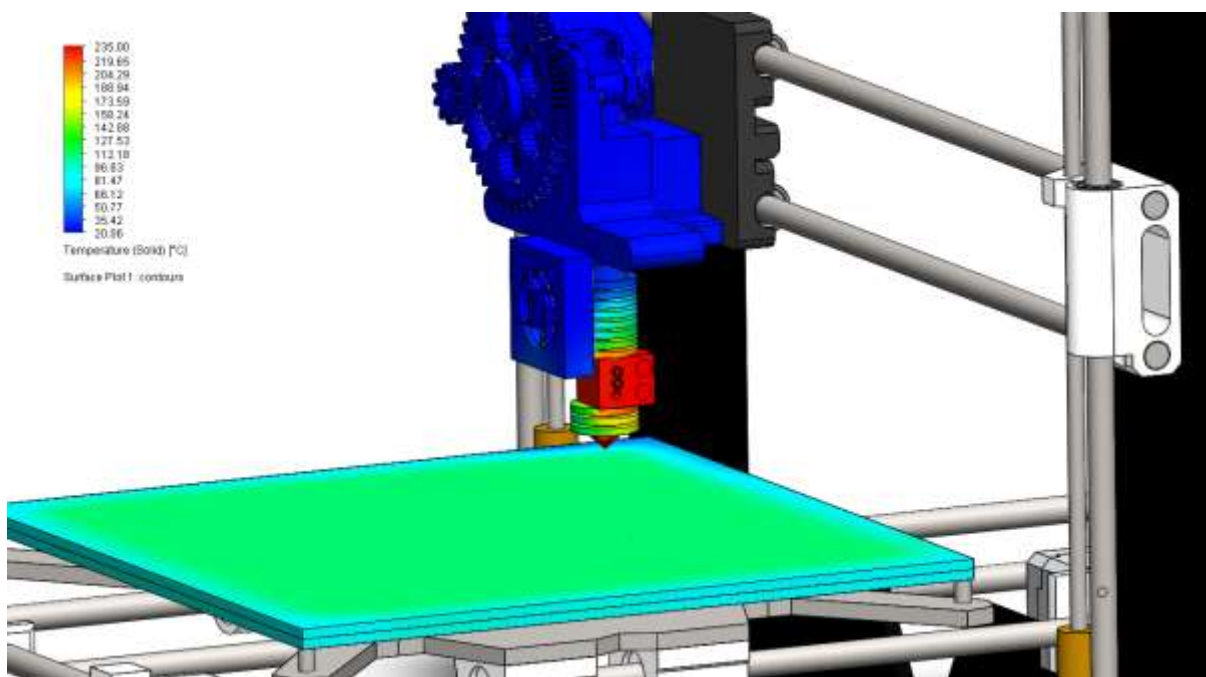


Obr. 61: Fyzický model 3D tiskárny RepRap a model vytvořený v SolidWorks.

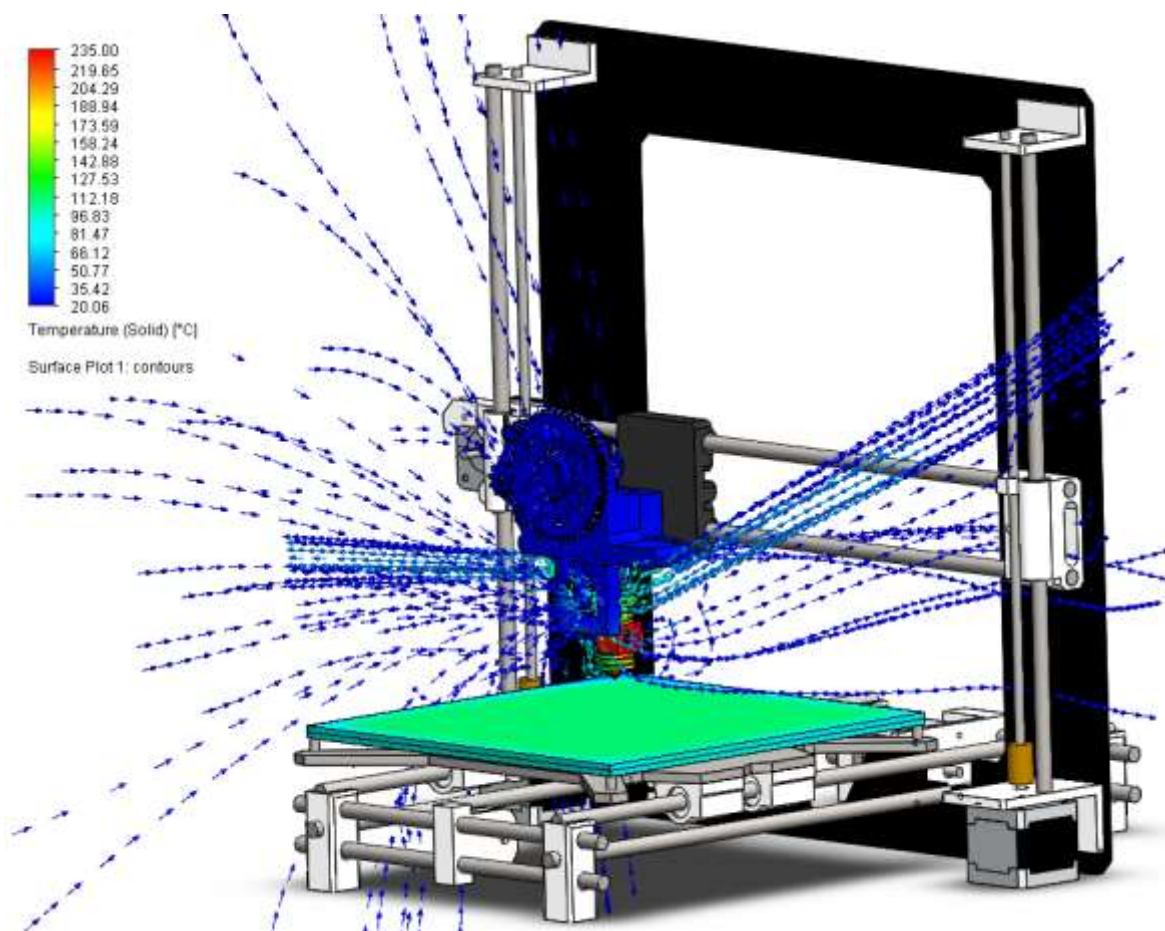
Na obrázcích obr. 57 a obr. 58 jsou výsledné teplotní profily ze simulací ve Flow Simulation. Teplota topných těles pro vyhřívání tiskací trysky je 235 °C a teplota meandru vyhřívané podložky je 110 °C. V příloze práce jsou uvedeny obrázky s nižší maximální teplotou ve stupnici pro přehlednější zobrazení teplot v oblasti hot bed a hot end.



Obr. 62: Teplotní profil 3D tiskárny zobrazený v řezu.



Obr. 63: Teplotní profil na povrchu hot bed a hot end.



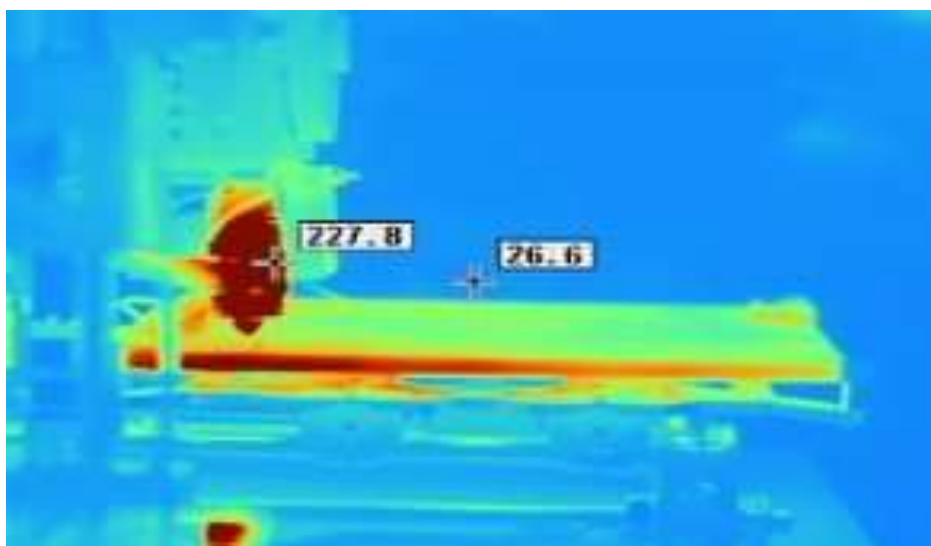
Obr. 64: Zobrazení proudění vzduchu tiskovou hlavou.

V následující tabulce jsou zaznamenány vypočtené hodnoty teplot jednotlivých částí 3D tiskárny získané z výsledků simulace teplotního profilu.

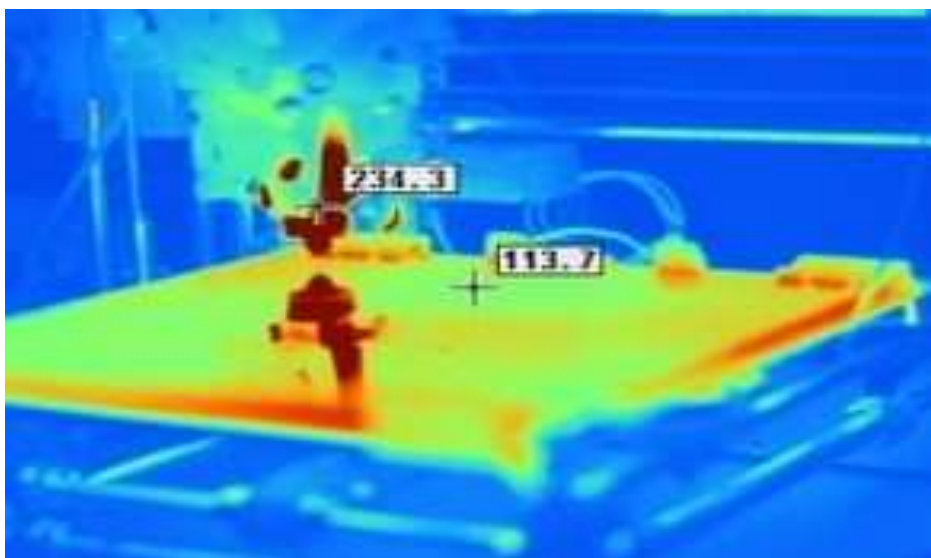
Tab. 9: Teploty jednotlivých částí 3D tiskárny

	Minimální teplota [°C]	Průměrná teplota [°C]	Maximální teplota [°C]
Vyhřívaná podložka (hot bed)	45,91	104,87	109,93
Tiskací tryska – horká část (hot end)	176,42	218,65	230,05
Hrot tiskací trysky	229,81	229,94	230,05
Tiskací tryska – studená část (cold end)	20,05	38,4	96,58

Na obrázcích obr. 65 a obr. 66 jsou zachyceny teplotní profily celé 3D tiskárny RepRap. Horká část (hot end) tiskací trysky je vyhřátá na teplotu 234,3 °C a teplota vyhřívané podložky je 113,7 °C.



Obr. 65: Teplotní profil celé 3D tiskárny zachycený termokamerou.



Obr. 66: Teplotní profil celé 3D tiskárny zachycený termokamerou.

4. Závěr

Tato práce se zabývá problematikou inovované nekomerční 3D tiskárny typu RepRap, která byla s výše uvedenými návrhy realizována na Ústavu elektrotechnologie FEKT VUT v Brně. Cílem práce bylo pomocí systémů CAE (Computer Aided Engineering) navrhnout a vytvořit matematicko fyzikální model vyhřívané podložky (hot bed) a tiskací trysky (hot end), které patří mezi nejdůležitější části tiskárny a jsou nezbytné pro kvalitní 3D tisk.

Úvodní kapitola práce popisuje jednotlivé části 3D tiskárny a jejich programové vybavení pro pochopení principu RepRap tiskárny. Dále jsou popsány a porovnány dva nejčastěji používané plastové materiály pro 3D tisk.

V kapitole teorie šíření tepla jsou popsány a matematicky vyjádřeny přenosy tepla vedením (kondukcí) a prouděním (konvekcí).

V praktické části se práce zabývá návrhem a řešením vyhřívané podložky a tiskací trysky. Jako nástroj pro prozkoumání dané problematiky byl použit program SolidWorks, který nabízí široké možnosti při vytváření 3D modelů a sestav, součástí je i doplněk SolidWorks Flow Simulation pro vytváření simulací přestupu tepla a proudění na základě metody konečných objemů.

V SolidWorks byla vytvořena podložka vytápěná výkonovými rezistory a podložka vytápěná motivem meandru na desce FR4. Následně byly podložky podrobeny teplotní analýze pro prozkoumání jejich teplotních profilů.

Z výsledků simulace (z tabulky tab. 5 a závislostí z obr. 41 v části porovnání výsledků simulace vyhřívaných podložek v kapitole 3.4) je patrné, že u řešení s výkonovými rezistory jsou hodnoty teploty po celé délce desky v podstatě konstantní oproti variantě s motivem na DPS, která se postupně prohřívá od středu do krajů desky, a jako řešení pro realizaci vyhřívané podložky by se jevílo jako ideální. Nicméně pro výše uvedené konstrukční problémy a nedostatky (plynování rezistorů, výška a váha celé sestavy) bylo zvoleno vyhřívání s realizací motivu na DPS.

Podložka s motivem meandru byla fyzicky realizována a podrobena měření termokamerou, výsledky měření potvrdili teoretické předpoklady a teplotní rozložení koresponduje s výsledkem simulace v SolidWorks.

Vlivem rozdílné teploty modelu a podložky dochází při chladnutí materiálu v modelu k vnitřnímu pnutí, které způsobuje mechanickou deformaci modelu. Použitím takto navržené podložky zabráníme mechanické deformaci tisknutého objektu, která se děje během tisku prvních několika vrstev modelu. Optimální teplota podložky pro ABS plast, který byl testován, je 105 – 115 °C, pro PLA materiál je tato teplota 50 – 60 °C.

Dále je proběhla analýza tiskací trysky (hot end). Tiskací tryska v základním provedení je pro aplikaci v tiskárně v podstatě nevyhovující, z důvodu pomalé odezvy na regulaci teploty a co je podstatnější, dochází k ucpávání trysky v důsledku tavení materiálu již ve studeném konci a tiskací plast pak vyvěrá z trysky ven.

Z toho důvodu byla tryska modifikována a doplněna o chladicí ventilátor, pomocí něhož zabráníme nežádoucímu tavení materiálu, vývěru roztaveného plastu a nadměrnému zahřívání mechanismu tiskové hlavy.

Porovnáním výsledků simulací obou řešení byl zjištěn teplotní rozdíl o více jak 100 °C v oblasti studeného konce, kde se teplota bez použití ventilátoru pohybuje okolo 140 °C. Chlazením trysky pomocí přídavného ventilátoru bylo dosaženo:

- Lepší regulace teploty trysky.
- Zabránění přetavení plastu v horní části trysky, což je důležité z hlediska transportu filamentu. Tělo extruderu 21 °C, studený konec 43 °C a horký konec 233 °C.

5. Seznam použitých zdrojů

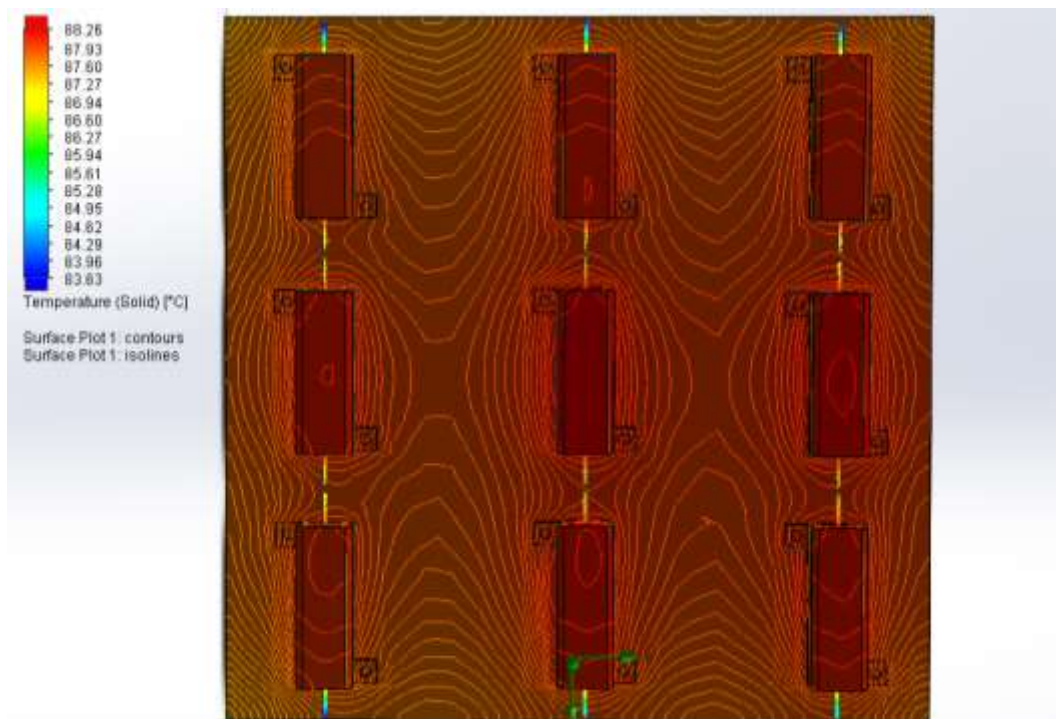
- [1] Rapid prototyping. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rapid_prototyping_worldwide_by_Zureks.png
- [2] EASYCNC. *Informace o technologiích 3D tisku* [online]. 2010 [cit. 2013-10-13]. Dostupné z: <http://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
- [3] *RepRap* [online]. 2012 [cit. 2013-10-15]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/File:FFF.png>
- [4] VOTOČEK, Ing. Jaroslav. *AUTOMATIZACE TECHNICKÉ PŘÍPRAVY VÝROBY: Rapid Prototyping – základní pojmy, oblasti použití*. 2011. Dostupné z: http://www.technomat.cz/data/katedry/kom/KOM_ATPT_PR_03_CZE_Votocek_Rapid_Prototyping.pdf
- [5] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *Nekonvenční technologie: Nekonvenční metody obrábění 10. díl*. [online]. 2008 [cit. 2013-10-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekoncenni-metody-obrabeni-10-dil.html>
- [6] *RepRap* [online]. 2012 [cit. 2014-5-19]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki>
- [7] 3D tiskárny RepRap: Open-source mašinky, které vám usnadní život. HRONČOK, Miroslav. *Linux expres* [online]. 2012 [cit. 2013-10-15]. Dostupné z: <http://www.linuxexpres.cz/hardware/3d-tisk>
- [8] Prusa i3 Rework Introduction. In: *RepRap* [online]. [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Prusa_i3_Rework_Introduction
- [9] Prusa i3 Single Plate Plastic Parts with Bowden Extruder. In: *Emaker* [online]. 2013 [cit. 2013-11-29]. Dostupné z: <http://www.emakershop.com/browse/listing?l=511>
- [10] *Arduino: Arduino Mega 2560* [online]. [cit. 2013-11-17]. Dostupné z: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>
- [11] Wade's geared Extruder. In: *Bcndynamics* [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-11-17]. Dostupné z: http://wiki-es.bcndynamics.com/wade_s_geared_extruder
- [12] Best hot end. In: *RepRap* [online]. 2012. vyd. [cit. 2013-11-17]. Dostupné z: <http://forums.reprap.org/read.php?1,138316,138350>
- [13] PEŠEK, Filip. *Pulzně šířková modulace (PWM)*. Dostupné z: http://lsd.spsejecna.net/web/beranek/I3B/Pe%20Filip_PWM.pdf
- [14] *Pulzně šířková modulace: Princip PWM*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-11-17]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzn%C4%9B_%20%C5%A1%C3%AD%C5%99kov%C3%A1_modulace

- [15] *CAD to STL* [online]. [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://www.redeyeondemand.com/CADtoSTL.aspx>
- [16] KNOPE, Ryan. Rapid Prototyping and STL. [online]. [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: *CAD to STL* [online]. [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://instatuts.com/featured/a-rapid-prototyping-and-stl-informative-guide/>
- [17] SEHNÁLEK, Stanislav. 3D tiskárna na bázi projektu RepRap: Krájení. [online]. 2013 [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=16065>
- [18] Mendel90 Lasercut - Calibration. In: [online]. [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://forum.reprapdiscount.com/threads/mendel90-lasercut-calibration.1060/>
- [19] HEATER, Brian. MakerBot Replicator impressions: the dawning of 3D printers in every home?. In: *Engadget* [online]. 2012. vyd. [cit. 2013-11-17]. Dostupné z: <http://www.engadget.com/2012/08/01/makerbot-replicator-hands-on-the-dawning-of-3d-printers-in-ever/>
- [20] ABS Thermoplast. *Plastic Systems s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2013-10-15]. Dostupné z: <http://tiefziehen.com/cz/ABS/>
- [21] Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Plastic. *UL IDES* [online]. [cit. 2013-10-15]. Dostupné z: <http://plastics.ides.com/generics/1/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs>
- [22] GLYNWED S.R.O., *Průmyslové potrubní systémy: Materiálový list ABS* [pdf]. [cit. 2014-5-19].
- [23] Polylactic Acid (PLA) Typical Properties. *UL IDES* [online]. [cit. 2013-10-15]. Dostupné z: <http://plastics.ides.com/generics/1/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs>
- [24] Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. JAMSHIDIAN, Majid. *Wiley Online Library* [online]. 2010 [cit. 2013-10-15]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x/full>
- [25] ABS/ PLA filaments 3d printer. *Ali express* [online]. [cit. 2013-10-15]. Dostupné z: http://i00.i.aliimg.com/wsphoto/v0/1066162222_1/New-arrive-Come-font-b-3D-b-font-font-b-3d-b-font-font-b-printers.jpg
- [26] KOCICH, Radim a Adéla MACHÁČKOVÁ. *SDÍLENÍ TEPLA A PROUDĚNÍ: učební text*. Ostrava, 2012. Dostupné z: http://www.person.vsb.cz/archived/FMMI/STP/STP_FINAL_LAST.pdf
- [27] *SolidVision: SolidWorks - 3D CAD navrhování* [online]. 2014 [cit. 2014-02-20]. Dostupné z: <http://www.solidvision.cz/solidworks/>
- [28] MAXA, J. *Analýza proudění plynů v zařízeních elektronového mikroskopu*. Vysoké učení technické v Brně, 2008. 182 stran.
- [29] KOZUBKOVÁ, Milada. *VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti* [online]. první, 2011. Ostrava, 2011 [cit. 2014-04-29]. ISBN 978-80-248-2491-8.

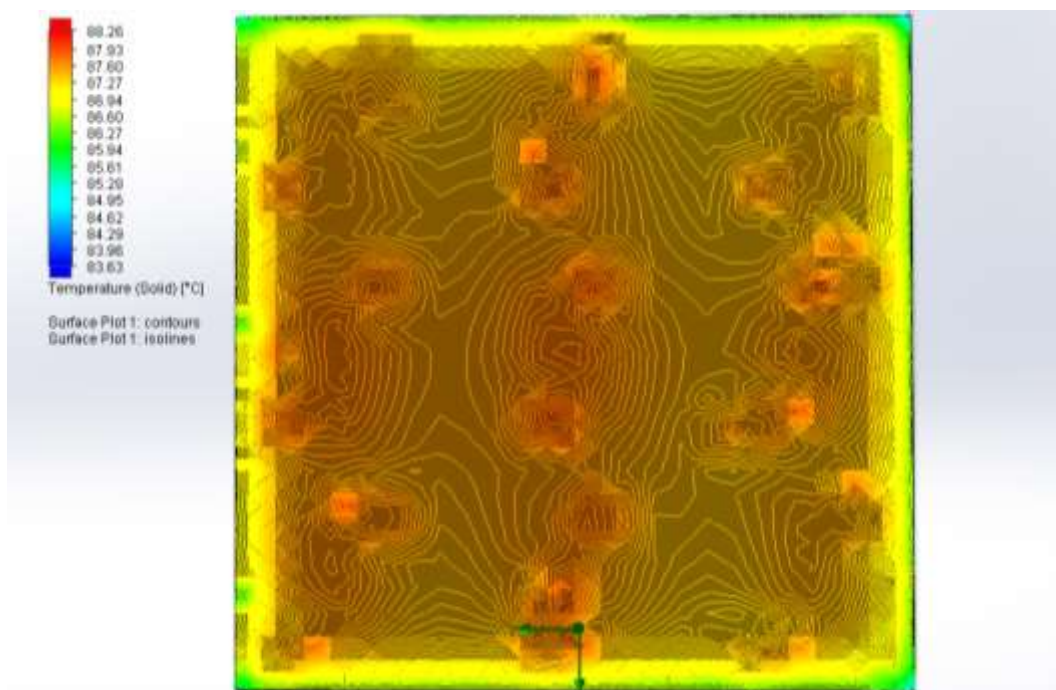
- [30] VSCHT. *Počítačová dynamika tekutin (CFD): Řešení rovnic*. Dostupné z: http://www.vscht.cz/uchi/ped/cfd/cfd.metoda_konecných_objemu.pdf
- [31] KOZUBKOVÁ, Milada. VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX. Ostrava, 2008. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>
- [32] Hot bed. In: *Ottersoft: Mechanics, baking and a little insanity* [online]. 2012 [cit. 2013-11-17]. Dostupné z: <https://ottersoft.ca/blog/?tag=hotbed>
- [33] Hot bed. In: *HydraRaptor* [online]. 2010 [cit. 2013-11-17]. Dostupné z: <http://hydraraptor.blogspot.cz/2010/01/hot-bed.html>
- [34] PCB Heatbed. In: [online]. 2013 [cit. 2013-11-17]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed
- [35] SUNON. *KDE1204PFV1.11: datasheet*. 2005, 11 s. [pdf]. [cit. 2014-5-19].

6. Příloha

Grafické výstupy z programu SolidWorks Flow Simulation pro podložku vyhřívanou výkonovými rezistory (hot bed)

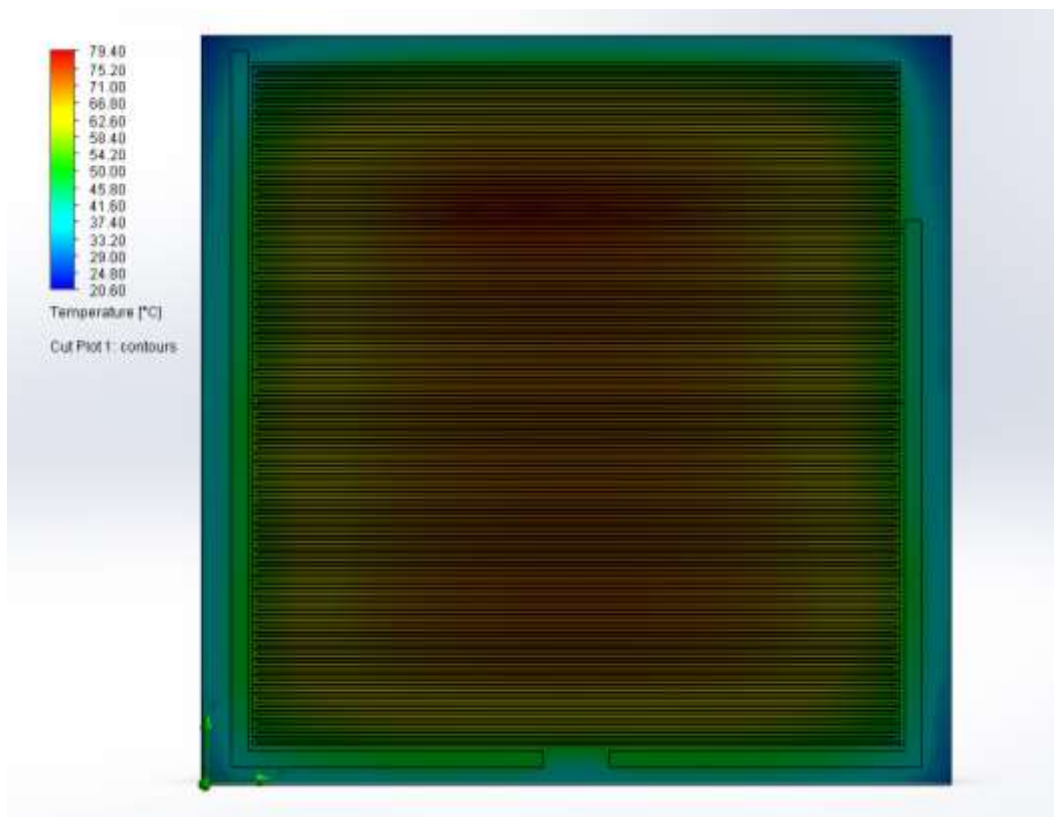


Obr. 67: Teplotní profil výkonovými rezistory vyhřívané podložky (hot bed).

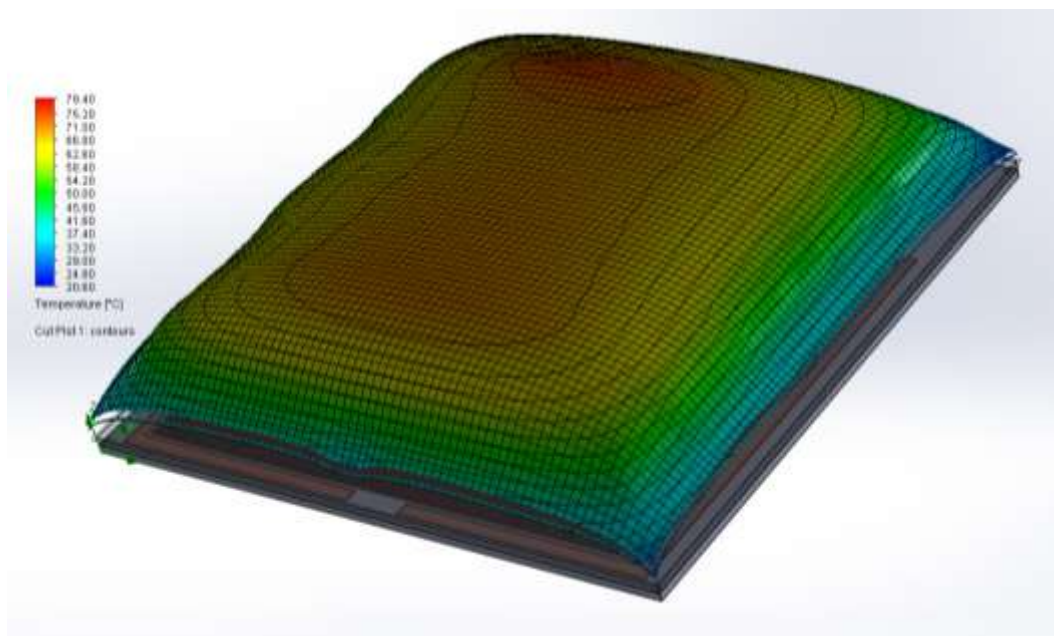


Obr. 68: Teplotní profil výkonovými rezistory vyhřívané podložky (hot bed).

Grafické výstupy z programu SolidWorks Flow Simulation pro podložku vyhřívanou meandrem (hot bed)



Obr. 69: Teplotní profil meandrem vyhřívané podložky (hot bed).



Obr. 70: 3D teplotní profil meandrem vyhřívané podložky (hot bed).

Textové výstupy z programu SolidWorks Flow Simulation pro vyhřívané podložky (hot bed) a tiskací trysku (hot end)

Podložka vyhřívaná výkonovými rezistory

Tab. 10: Teploty vypočítané programem SolidWorks (Goal Plots)

Goal Name	Part	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
GG Av Temp (Solid) 1		[°C]	87,82332279	89,48248941	87,13195087	101,3224148
SG Min Temp (Solid) 1	Sklo	[°C]	83,33452317	84,75343848	79,68093124	96,97965188
SG Av Temp (Solid) 1	Sklo	[°C]	87,60122097	89,26178575	86,90836004	101,109075
SG Max Temp (Solid) 1	Sklo	[°C]	88,1484746	89,81519894	87,45309013	101,7217545
SG Min Temp (Solid) 2	Rezistory	[°C]	83,61494865	85,14732196	82,96911527	96,10236909
SG Av Temp (Solid) 2	Rezistory	[°C]	88,06210489	89,71851478	87,37272395	101,538573
SG Max Temp (Solid) 2	Rezistory	[°C]	88,26185354	89,92736029	87,56720122	101,8209506
SG Min Temp (Solid) 3	Hliník	[°C]	87,42879884	89,06508453	86,75637583	100,7276311
SG Av Temp (Solid) 3	Hliník	[°C]	87,85531636	89,51335768	87,16514267	101,3467119
SG Max Temp (Solid) 3	Hliník	[°C]	88,1484746	89,81519894	87,45309013	101,7217545

Podložka vyhřívaná meandrem na DPS

Tab. 11: Teploty vypočítané programem SolidWorks (Goal Plots)

Goal Name	Part	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
GG Av Temp (Solid) 1		[°C]	58,6545489	58,7012568	58,6559631	58,7863528
SG Min Temp (Solid) 1	Sklo	[°C]	25,4426984	25,4720564	25,4115648	25,5716548
SG Av Temp (Solid) 1	Sklo	[°C]	58,7804998	58,8556489	58,7716515	58,9254694
SG Max Temp (Solid) 1	Sklo	[°C]	74,0889974	74,5021655	73,2056466	75,8715648
SG Av Electric Current Density 1	Meandr	[A/m ²]	4,7530e+007	4,7531e+007	4,7528e+007	4,7532e+007
SG Min Temp (Solid) 2	Meandr	[°C]	33,2654668	33,2878516	33,1865484	33,3964686
SG Av Temp (Solid) 2	Meandr	[°C]	63,1745646	63,2441654	63,1756416	63,3256464
SG Max Temp (Solid) 2	Meandr	[°C]	78,5783625	78,9016497	77,3656166	80,8445465

Tiskací tryska bez ventilátoru

Tab. 12: Teploty vypočítané programem SolidWorks (Goal Plots)

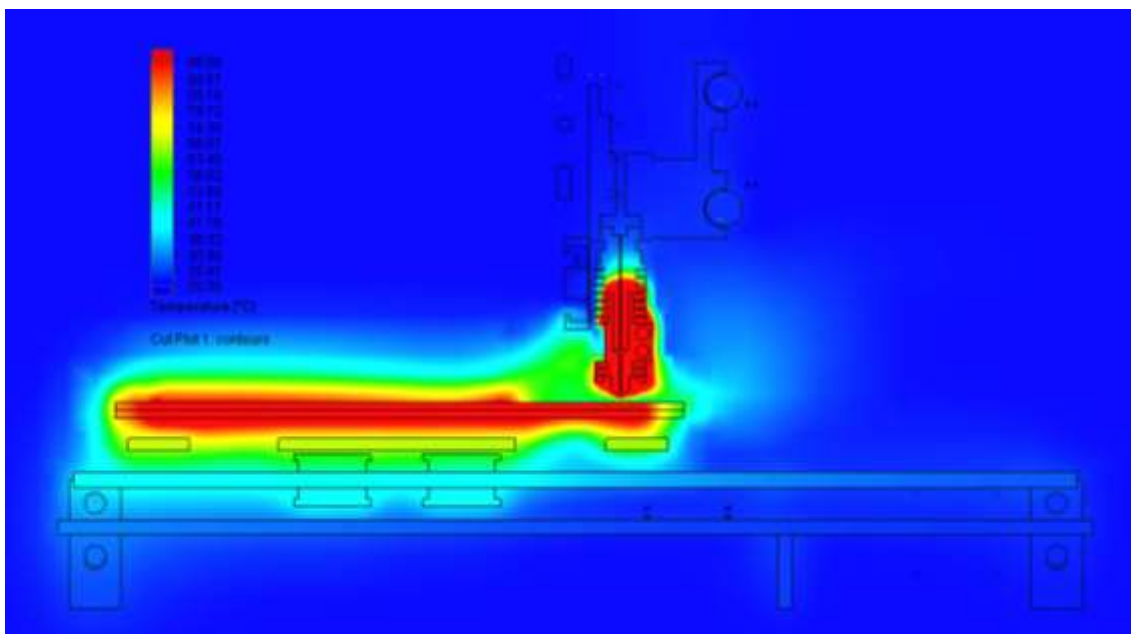
Goal Name	Part	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
GG Av Temp (Solid) 1		[°C]	111,1429	111,322	111,1429	111,4482
VG Min Temp (Solid) 1	Hrot	[°C]	234,326	234,3263	234,3252	234,3271
VG Av Temp (Solid) 1	Hrot	[°C]	234,4668	234,4669	234,4662	234,4675
VG Max Temp (Solid) 1	Hrot	[°C]	234,8536	234,8535	234,8532	234,8536
VG Min Temp (Solid) 2	Přivaděč struny	[°C]	121,8502	122,0976	121,8502	122,2783
VG Av Temp (Solid) 2	Přivaděč struny	[°C]	195,4504	195,5167	195,4504	195,5742
VG Max Temp (Solid) 2	Přivaděč struny	[°C]	234,3778	234,3786	234,3759	234,3797
VG Min Temp (Solid) 3	Tělo trysky	[°C]	232,9536	232,9453	232,939	232,955
VG Av Temp (Solid) 3	Tělo trysky	[°C]	234,5656			
VG Max Temp (Solid) 3	Tělo trysky	[°C]	234,9974	234,9974	234,9974	234,9974

Tiskací tryska s ventilátorem

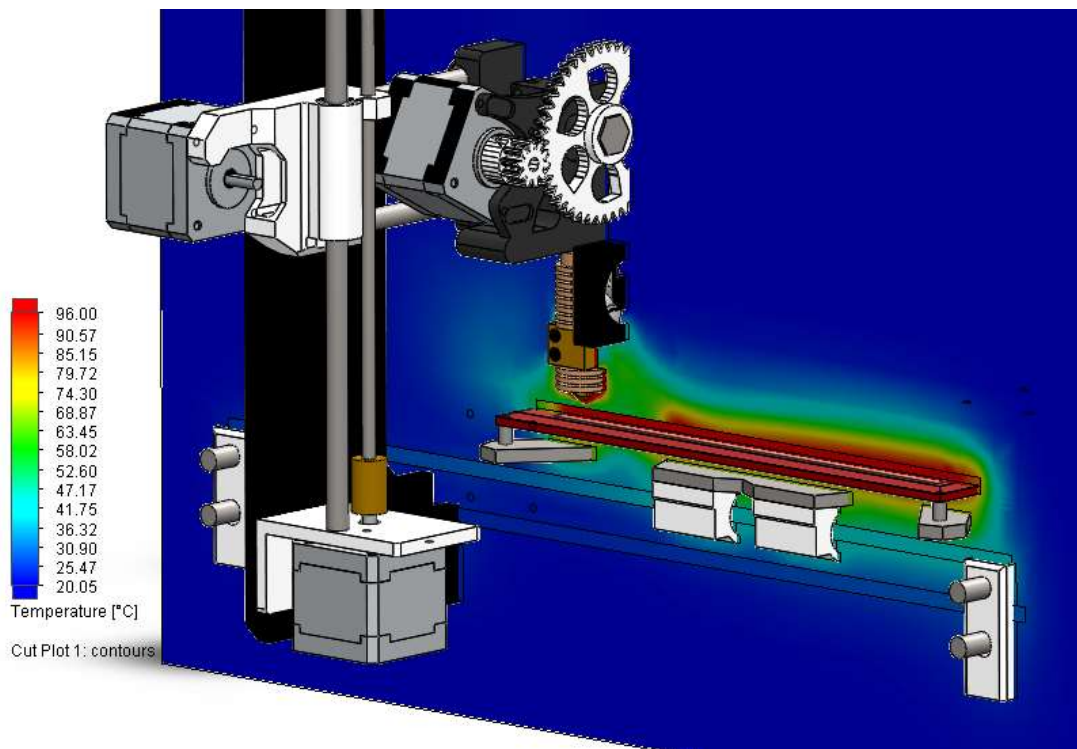
Tab. 13: Teploty vypočítané programem SolidWorks (Goal Plots)

Goal Name	Part	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
GG Av Temp (Solid) 1		[°C]	43,47891	43,46825	43,43377	43,49074
VG Min Temp (Solid) 1	Hrot	[°C]	229,5905	229,6405	229,5816	229,6843
VG Av Temp (Solid) 1	Hrot	[°C]	230,2905	230,3332	230,2776	230,3829
VG Max Temp (Solid) 1	Hrot	[°C]	233,4125	233,4176	233,4054	233,428
VG Min Temp (Solid) 2	Přivaděč struny	[°C]	21,90992	21,91368	21,89599	21,94535
VG Av Temp (Solid) 2	Přivaděč struny	[°C]	124,9009	124,9234	124,8659	124,9912
VG Max Temp (Solid) 2	Přivaděč struny	[°C]	231,0013	231,0066	230,9918	231,0221
VG Min Temp (Solid) 3	Tělo trysky	[°C]	217,2034	217,1946	217,178	217,2219
VG Av Temp (Solid) 3	Tělo trysky	[°C]	230,1893			
VG Max Temp (Solid) 3	Tělo trysky	[°C]	234,9808	234,9808	234,9807	234,981

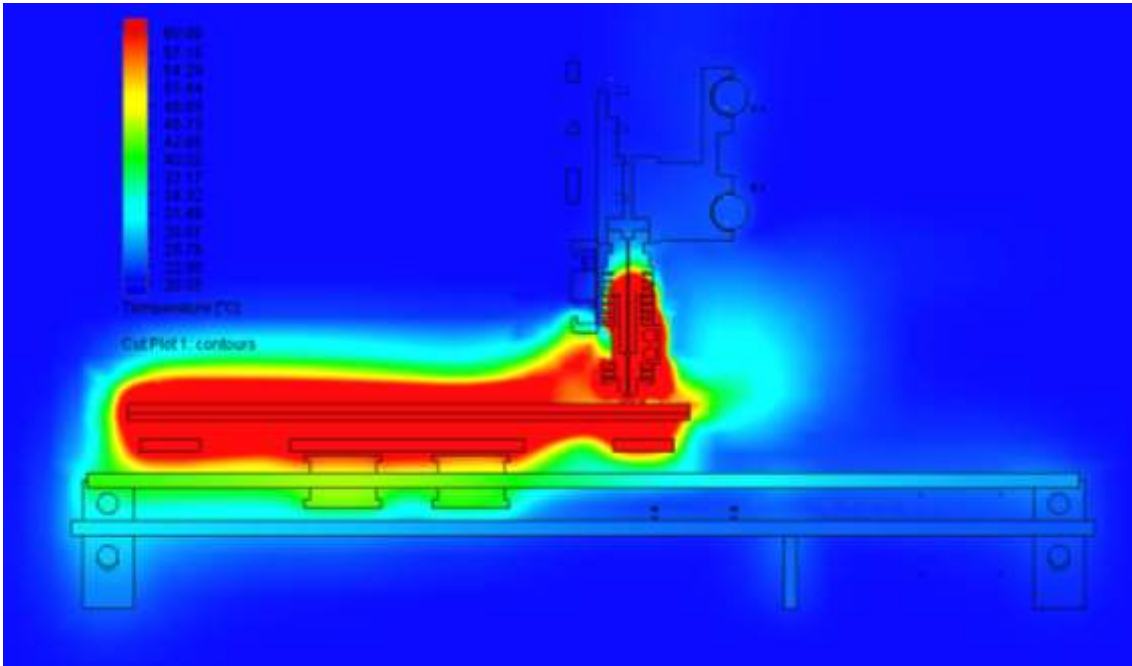
Grafické výstupy z programu SolidWorks Flow Simulation pro sestavu 3D tiskárny RepRap



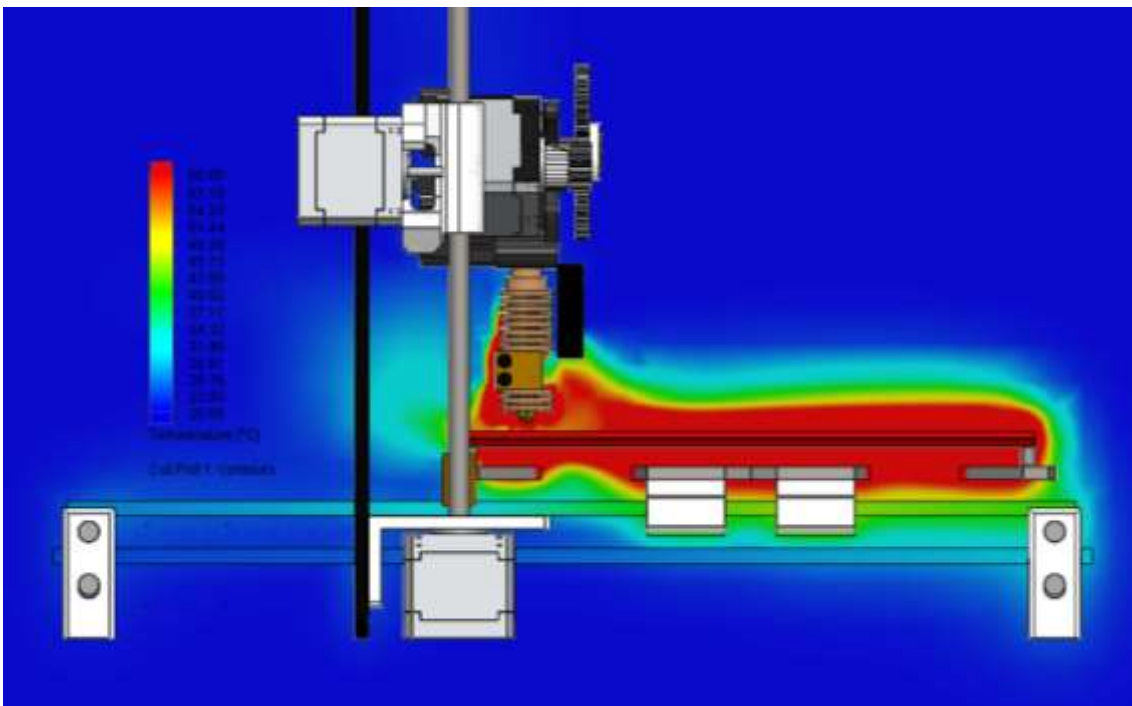
Obr. 71: Teplotní profil 3D tiskárny zobrazený v řezu (maximální teplota stupnice: 96 °C).



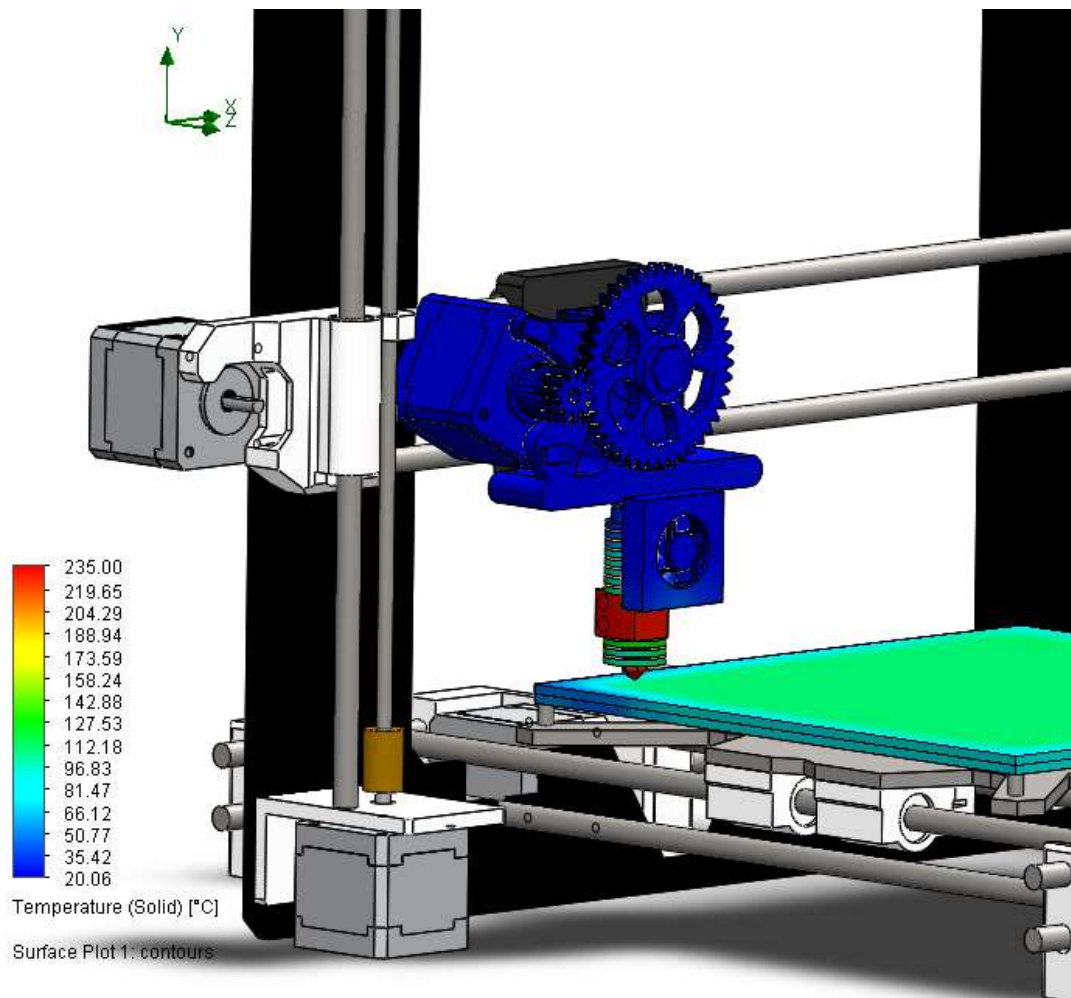
Obr. 72: Teplotní profil 3D tiskárny zobrazený v řezu (maximální teplota stupnice: 96 °C).



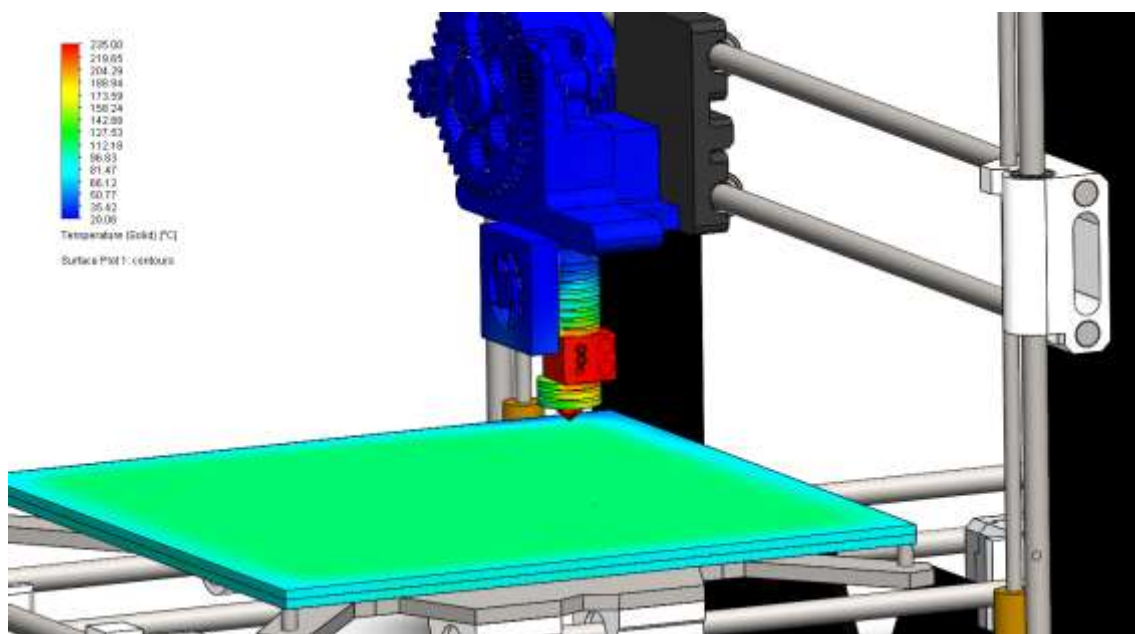
Obr. 73: Teplotní profil 3D tiskárny zobrazený v řezu (maximální teplota stupnice: 60 °C).



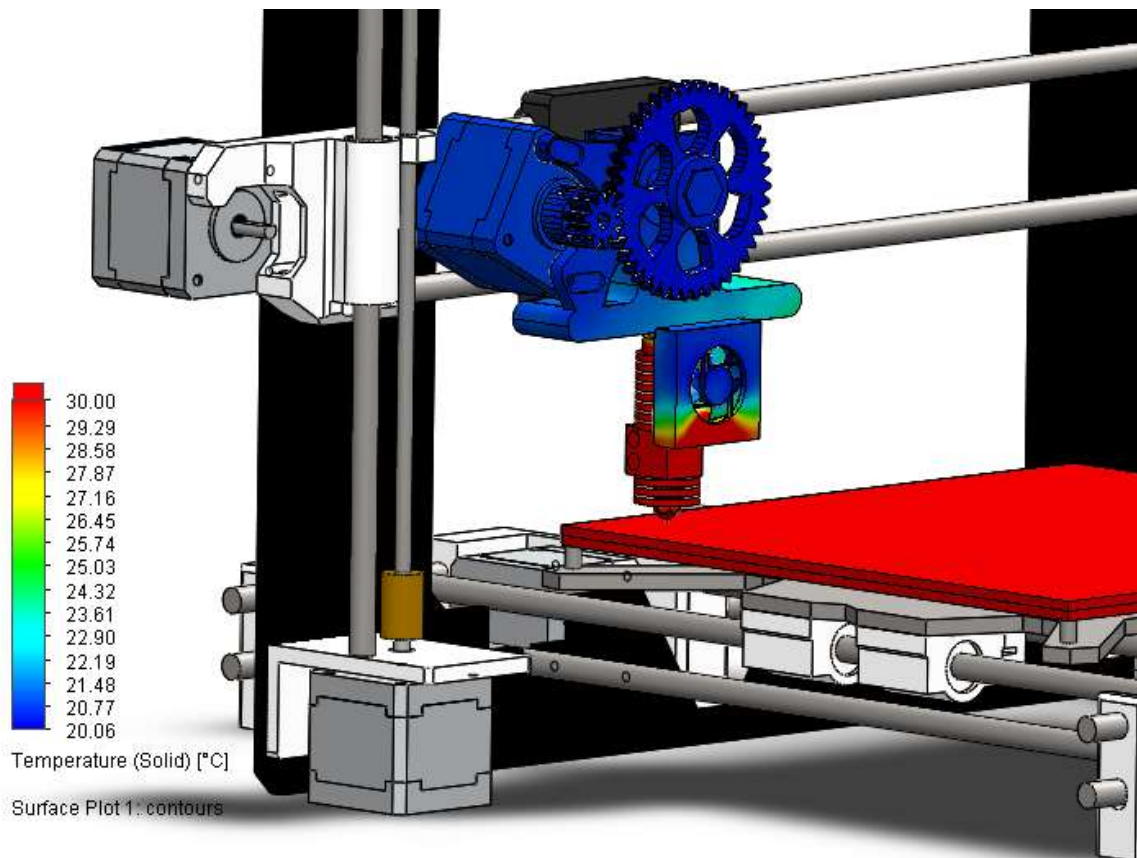
Obr. 74: Teplotní profil 3D tiskárny zobrazený v řezu (maximální teplota stupnice: 60 °C).



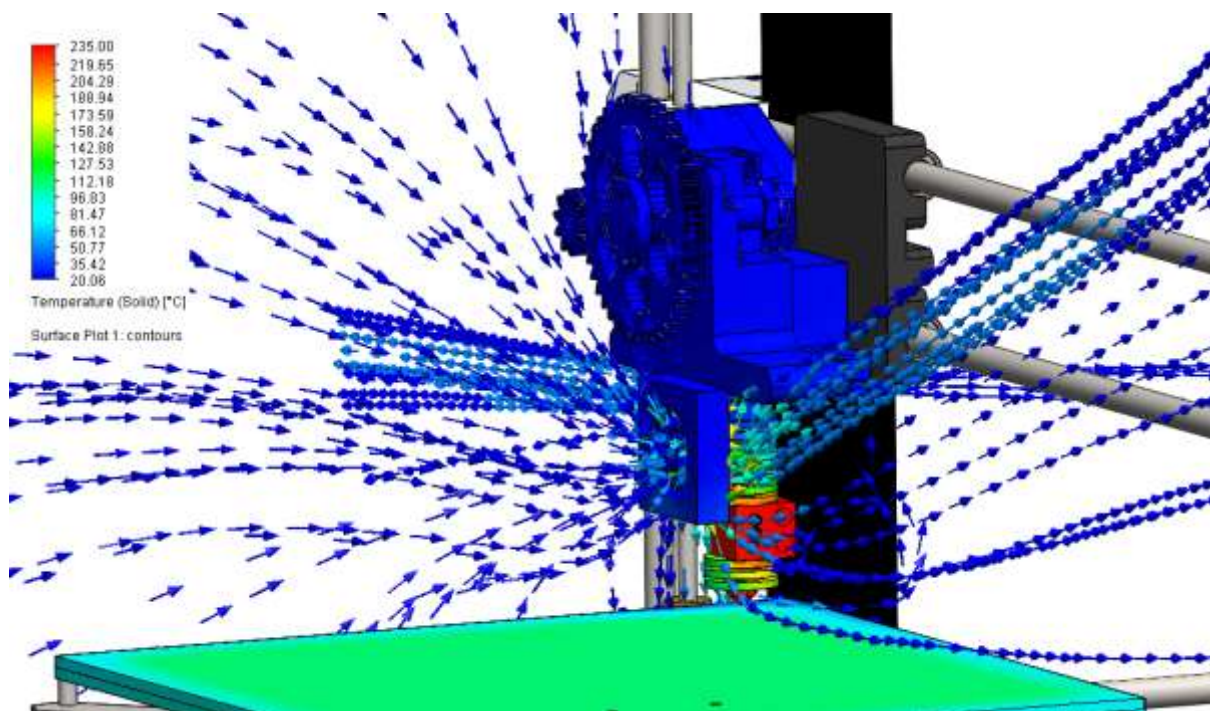
Obr. 75: Teplotní profil 3D tiskárny na povrchu hot bed a hot end (maximální teplota stupnice: 235 °C).



Obr. 76: Teplotní profil 3D tiskárny na povrchu hot bed a hot end (maximální teplota stupnice: 235 °C).

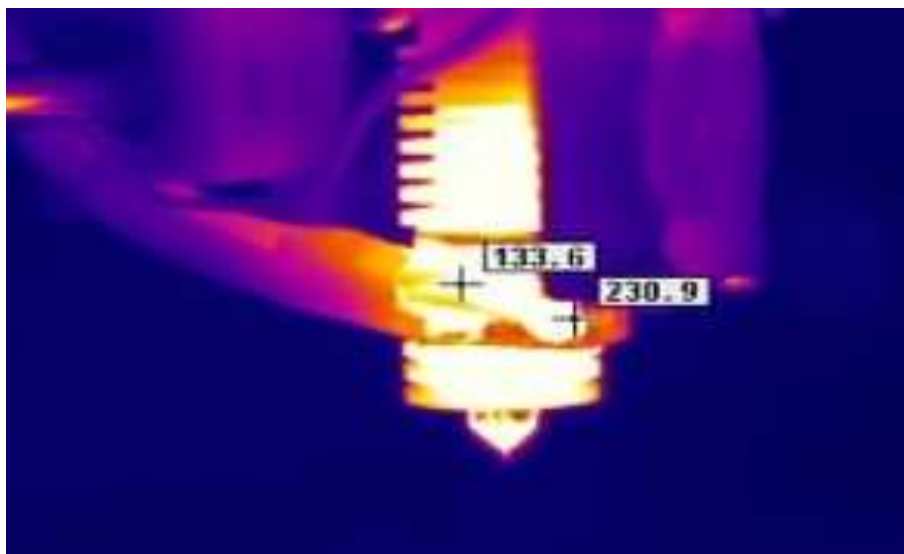


Obr. 77: Teplotní profil 3D tiskárny na povrchu hot bed a hot end (maximální teplota stupnice: 30 °C).

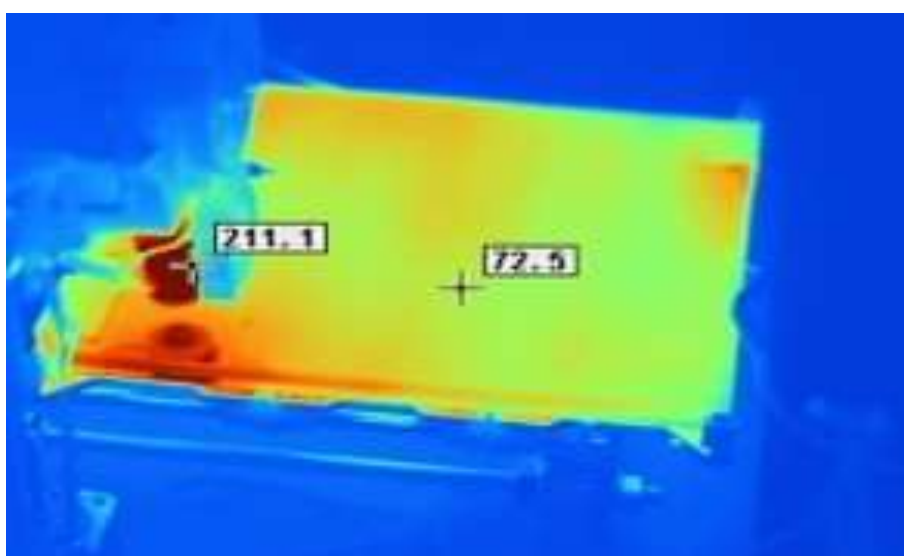


Obr. 78: Teplotní profil 3D tiskárny na povrchu hot bed a hot end se zobrazením proudění vzduchu studenou částí tiskací trysky (maximální teplota stupnice: 235 °C).

Snímky teplotních profilů zachycené termokamerou

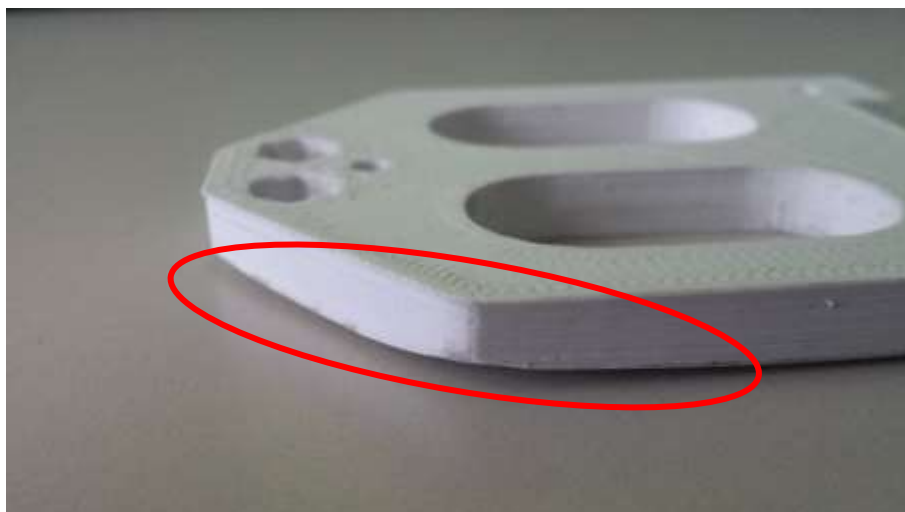


Obr. 79: Teplotní profil tiskací trysky zachycený termokamerou.



Obr. 80: Teplotní profil celé 3D tiskárny zachycený termokamerou.

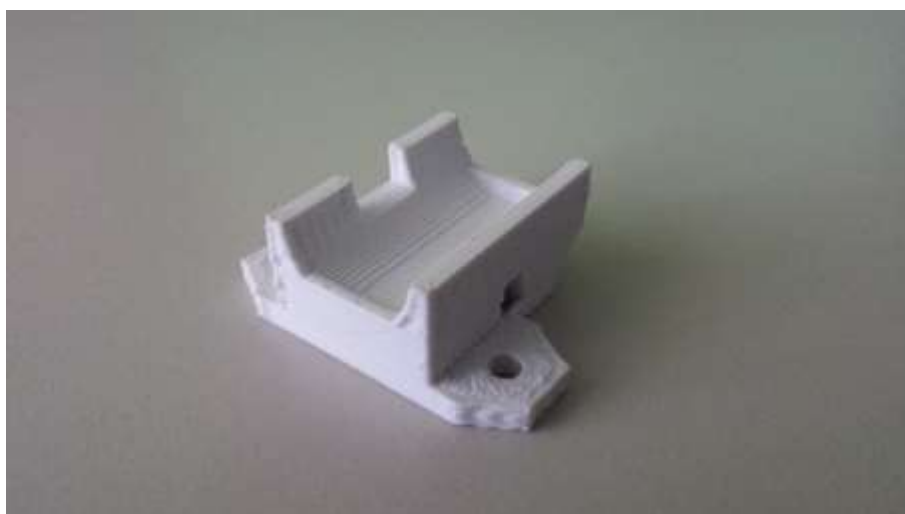
Příklad vytisknutých modelů



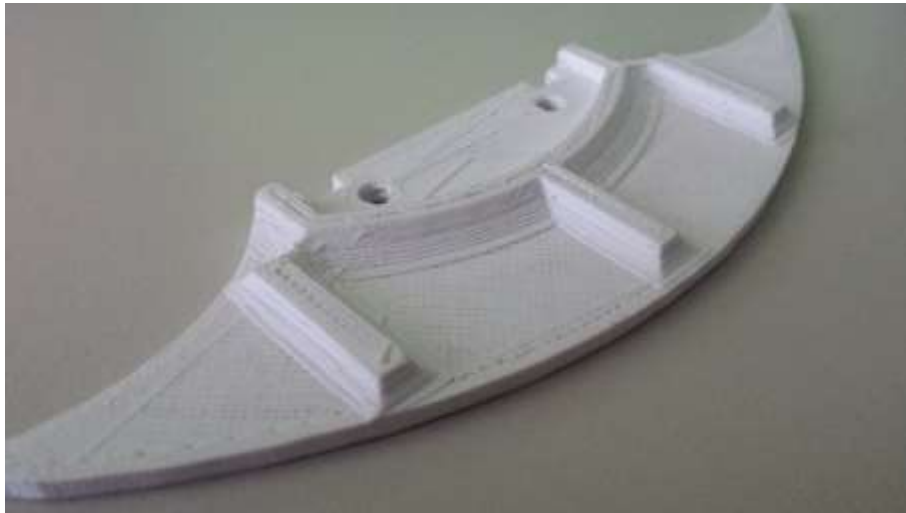
Obr. 81: Vytisknutý model obsahující defekt způsobený absencí vyhřívané podložky.



Obr. 82: Příklad vytisknutého modelu.

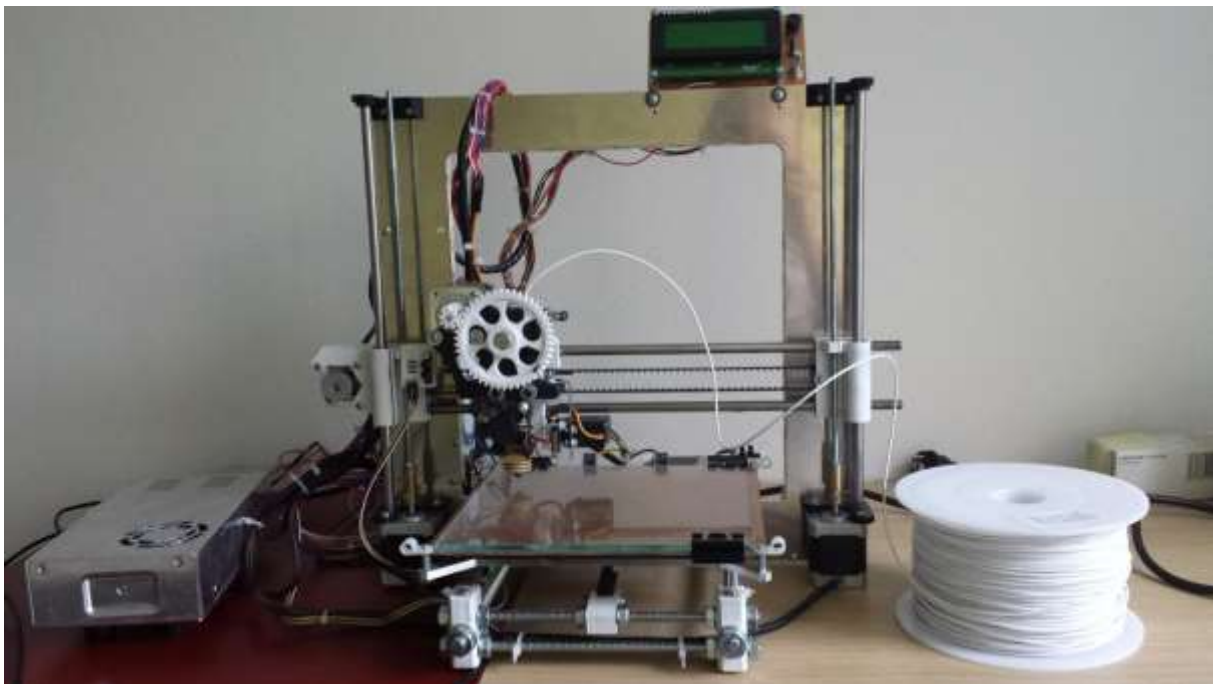


Obr. 83: Příklad vytisknutého modelu.



Obr. 84: Příklad vytisknutého modelu.

3D tiskárna RepRap (modifikace UETE FEKT)



Obr. 85: 3D tiskárna RepRap.

Datasheet – Výkonový rezistor

UB Series

Miniature Silicone Coated Power Resistors



- High Power Rating in a Small Package
- Excellent Pulse Handling
- High Temperature: -55°C to +250°C
- Resistances from 0.02 to 260kOhms
- Power Rating 1 to 15Watts
- Resistance Tolerances to $\pm 0.01\%$
- Low TCR: $\pm 20\text{ppm/K}$ Standard
- MIL-R-26 / MIL-R-39007 Power Ratings
- Non-Inductive Windings Available



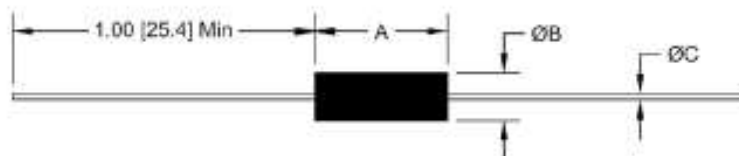
SPECIFICATIONS

Type	Wattage Rating (Watts)	Maximum Ohms ¹	Dimensions			Maximum Working Voltage	MIL-R-26 / MIL-R-39007 Style
			A $\pm 0.062^*$ [$\pm 1.6\text{mm}$]	B $\pm 0.031^*$ [$\pm 0.8\text{mm}$]	C ¹ $\pm 0.002^*$ [$\pm 0.05\text{mm}$]		
UB-1	1	3.4k	0.250 [6.4]	0.085 [2.2]	0.020 [0.6] 0.025 [0.6]	33	RW-81 RWR-81
UB-2	1.5	7.5k	0.312 [7.9]	0.078 [2.0]	0.020 [0.6] 0.025 [0.6]	42	RWR-82
UB-3	2	10k	0.406 [10.3]	0.094 [2.4]	0.026 [0.8] 0.020 [0.5]	80	RW-80 RWR-80
UB-3C	3	12.5k	0.350 [8.9]	0.156 [4.0]	0.032 [0.8]	135	
UB-5	4	25k	0.560 [14.2]	0.187 [4.7]	0.032 [0.8]	162	
UB-5C	5	32k	0.500 [12.7]	0.218 [5.5]	0.040 [1.0]	194	
UB-6	6	50k	0.625 [15.9]	0.250 [6.4]	0.040 [1.0]	258	
UB-10	7	95k	0.875 [22.2]	0.312 [7.9]	0.040 [1.0]	425	RW-84
UB-12	10	150k	1.220 [31.0]	0.312 [7.9]	0.040 [1.0]	607	
UB-15	15	260k	1.780 [45.2]	0.375 [9.5]	0.040 [1.0]	1050	

¹ Lead Diameter: 18 AWG = 0.040" / 20 AWG = 0.032" / 22 AWG = 0.025" / 24 AWG = 0.020"

Where more than one lead is listed / the top value is Standard

² For non-inductive windings / divide maximum resistance by 2



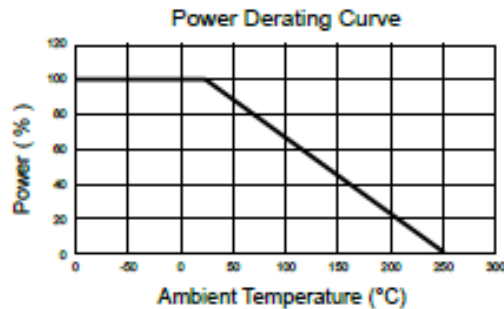
UB Series

Silicone Coated Power Resistors



SPECIFICATIONS (continued)

Specification	Value
Tolerances	$\pm 0.01\%$ to $\pm 10\%$ (1% Standard)
Temperature Coefficient	>10 Ω : ± 20 ppm/K 1 Ω to 10 Ω : ± 50 ppm/K <1 Ω : Call Factory
Temperature Range	-55°C to +250°C
Dielectric Strength	500 VAC : UB-1 / UB-2 / UB-3 1000 VAC : All Others
Construction	Centerless ground ceramic core Tinned copper or copperweld leads High temperature / trivalent / Inorganic Silicone coating All welded terminations
Environmental Performance (MIL-STD 202)	ΔR
Dielectric	$\pm 0.2\% + 0.05\Omega$
Load Life	To $\pm 1\%$ Depending on Size and Resistance Value
Storage	$\pm 0.2\% + 0.05\Omega$
Moisture Resistance	$\pm 0.2\% + 0.05\Omega$
Thermal Shock	$\pm 0.2\% + 0.05\Omega$
5X Overload (5s)	$\pm 0.2\% + 0.05\Omega$
Shock	$\pm 0.1\% + 0.05\Omega$
Vibration	$\pm 0.1\% + 0.05\Omega$



Ordering Information

For Non-Inductive Windings / insert the letter "N" (i.e. UBN-5)

Part Description: Part Type - Resistance - Tolerance - TCR (If not standard)

Example: UB-3 10 Ohm 1%

Riedon Inc.

300 Cypress Avenue

Alhambra CA 91801
www.riedon.com

☎ (626) 284-9901

☎ (626) 284-1704

Datasheet – Thermistor



Electronic Parts and Components

DATA SHEET NTC

G560/100k/+

Application

Temperature measurement for high temperature and short response times.

Version

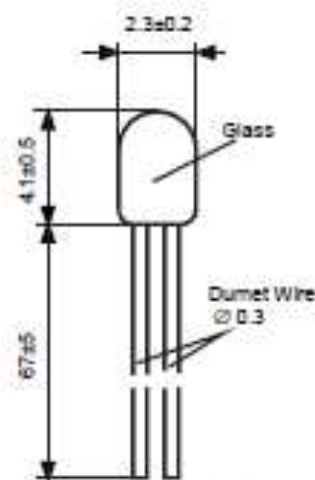
NTC-thermistor sealed in glass body.

Dumet wires: $\varnothing 0.3$ mm

lead length: 67 ± 5 mm

head diameter: 2.3 ± 0.2 mm

head length: 4.1 ± 0.5 mm



Dimensions in [mm]

Data

Climatic Category (IEC 60068-1)

: 55/300/56

Lower category temperature

[°C]: -55

Upper category temperature

[°C]: 300

Rated resistance R_N // Tolerance $\Delta R/R$

R_N

[Ω // %]: 100 000 // \pm ¹⁾

Rated temperature

T_N

[°C]: 25

B-value : $B_{(0/100)}$ // Tolerance $\Delta B/B$

B_N

[K//%]: 4036 // \pm 1

R_{25}

[Ω]: 100 000

Dissipation factor (air)

δ_{th}

[mW/K]: approx. 1.3

Thermal time constant (air)

τ_c

[s]: approx. 15

Heat capacity

C_{th}

[mJ/K]: approx. 20

Ordering code

: B57560G104+

Remarks

- ¹⁾ +: F for $\Delta R/R_N = \pm 1\%$; standard dumet wires
 H for $\Delta R/R_N = \pm 3\%$; standard dumet wires
 F2 for $\Delta R/R_N = \pm 1\%$; dumet wires, Ni-plated
 H2 for $\Delta R/R_N = \pm 3\%$; dumet wires, Ni-plated

Resistance Temperature Characteristics

R at 25°C 100000 [Ω]
 B(0/100) 4036 [K] ± 1 [%]
 RN at 25 °C 100000 [Ω] ± 1 [%]

T [°C]	R_nom [Ω]	R_min [Ω]	R_max [Ω]	$\Delta R/R_N$ [±%]	ΔT [±°C]	α [%/K]
-55	10723236	10101868	11381685	6,1	0,8	7,7
-50	7366689	6968648	7786687	5,7	0,8	7,4
-45	5132757	4874705	5403929	5,3	0,7	7,1
-40	3624165	3455040	3801187	4,9	0,7	6,9
-35	2591304	2479373	2708016	4,5	0,7	6,6
-30	1874913	1800190	1952543	4,1	0,6	6,4
-25	1371886	1321623	1423918	3,8	0,6	6,2
-20	1014545	980519	1049646	3,5	0,6	5,9
-15	757881	734728	781685	3,1	0,5	5,8
-10	571590	555777	587794	2,8	0,5	5,6
-5	435026	424202	446081	2,5	0,5	5,4
0	333964	326553	341508	2,3	0,4	5,2
5	258497	253434	263636	2,0	0,4	5,1
10	201659	198216	205142	1,7	0,4	4,9
15	158499	156178	160838	1,5	0,3	4,8
20	125468	123927	127016	1,2	0,3	4,6
25	100000	99000	101000	1,0	0,2	4,5
30	80223	79243	81206	1,2	0,3	4,4
35	64759	63830	65695	1,4	0,3	4,2
40	52589	51727	53460	1,7	0,4	4,1
45	42951	42161	43751	1,9	0,5	4,0
50	35272	34556	36000	2,1	0,5	3,9
55	29119	28473	29776	2,3	0,6	3,8
60	24161	23581	24752	2,4	0,7	3,7
65	20144	19626	20674	2,6	0,7	3,6
70	16874	16411	17348	2,8	0,8	3,5
75	14198	13786	14622	3,0	0,9	3,4
80	11998	11631	12376	3,2	0,9	3,3
85	10181	9854	10519	3,3	1,0	3,2
90	8674	8382	8976	3,5	1,1	3,2
95	7419	7158	7688	3,6	1,2	3,1
100	6369	6136	6610	3,8	1,3	3,0
105	5487	5279	5703	3,9	1,3	2,9
110	4744	4557	4937	4,1	1,4	2,9
115	4115	3948	4288	4,2	1,5	2,8
120	3581	3431	3737	4,4	1,6	2,8
125	3126	2991	3266	4,5	1,7	2,7

Resistance Temperature Characteristics

R at 25°C 100000 [Ω]
 B(0/100) 4036 [K] ± 1 [%]
 RN at 25 °C 100000 [Ω] ± 1 [%]

T [°C]	R_nom [Ω]	R_min [Ω]	R_max [Ω]	ΔR/R _N [±%]	ΔT [±°C]	α [%/K]
130	2737	2616	2864	4,6	1,8	2,6
135	2404	2294	2518	4,8	1,8	2,6
140	2117	2018	2220	4,9	1,9	2,5
145	1869	1780	1963	5,0	2,0	2,5
150	1655	1574	1740	5,1	2,1	2,4
155	1469	1396	1546	5,2	2,2	2,4
160	1307	1241	1377	5,4	2,3	2,3
165	1166	1106	1230	5,5	2,4	2,3
170	1043	987,6	1101	5,6	2,5	2,2
175	934,5	884,1	987,5	5,7	2,6	2,2
180	839,3	793,3	887,8	5,8	2,7	2,1
185	755,4	713,3	799,9	5,9	2,8	2,1
190	681,3	642,8	722,2	6,0	2,9	2,0
195	615,8	580,4	653,3	6,1	3,0	2,0
200	557,6	525,1	592,1	6,2	3,1	2,0
205	505,9	476,0	537,7	6,3	3,3	1,9
210	459,9	432,3	489,2	6,4	3,4	1,9
215	418,8	393,3	445,8	6,5	3,5	1,9
220	382,0	358,5	407,0	6,6	3,6	1,8
225	349,1	327,3	372,2	6,6	3,7	1,8
230	319,5	299,3	341,0	6,7	3,8	1,8
235	292,9	274,2	312,9	6,8	4,0	1,7
240	269,0	251,6	287,5	6,9	4,1	1,7
245	247,3	231,2	264,6	7,0	4,2	1,7
250	227,8	212,8	243,9	7,1	4,3	1,6
255	210,1	196,1	225,1	7,1	4,5	1,6
260	194,1	181,0	208,1	7,2	4,6	1,6
265	179,5	167,3	192,6	7,3	4,7	1,5
270	166,3	154,9	178,5	7,4	4,8	1,5
275	154,2	143,5	165,7	7,4	5,0	1,5
280	143,2	133,2	154,0	7,5	5,1	1,5
285	133,2	123,8	143,2	7,6	5,2	1,4
290	124,0	115,2	133,4	7,6	5,4	1,4
295	115,5	107,3	124,5	7,7	5,5	1,4
300	107,8	100,0	116,2	7,8	5,7	1,4

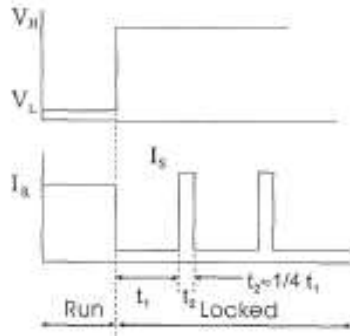
SPECIFICATIONS			
MODEL : KDE1204PFV1			
P/N : 11.MS.AF.GN			
1-1. Rated Voltage	:	12 VDC	
1-2. Operating Voltage Range	:	4.5~13.8 VDC	
1-3. Starting Voltage	:	4.5 VDC (25 deg. C POWER ON/OFF)	
1-4. Rated Speed	:	7000 RPM \pm 20%	
1-5. Air Delivery	:	8.0 CFM / MAX. 9.0 CFM	
1-6. Static Pressure	:	0.19 Inch-H ₂ O / MAX. 0.21 Inch-H ₂ O	
1-7. Rated Current	:	0.09 AMP	
1-8. Rated Power	:	1.1 WATTS	
1-9. Noise Level	:	32 dB(A) / MAX. 39 dB(A)	
1-10. Direction of Rotation	:	Counter-clockwise viewed from front of fan blade	
1-11. Operating Temperature	:	-10 to +70 deg. C	
1-12. Storage Temperature	:	-40 to +70 deg. C	
1-13. Bearing System	:	Vapo bearing system	
1-14. Weight	:	17 g	
1-15. Safety	:	UL/CUR/TUV/CE Approvals	
1-16. Vibration	:	Vibration of acceleration 1.5G and frequency 5~50~5Hz is applied in all 3 directions(X,Y,Z), in cycles of 1 minute each, for a total vibration time of 30 minutes.	
1-17. Locked Rotor Protection	:	Automatic Restart Capability Note: In a situation where the fan is locked by an external force while the electricity is on, an increase in coil temperature will be prevented by temporarily turning off the electrical power to the motor. The fan will automatically restart when the locked rotor condition is released.	
建準電機工業股份有限公司 SUNONWEALTH ELECTRIC MACHINE INDUSTRY CO., LTD.	SPEC.NO	D04039950G-00	REVISION D
	ISSUE DATE	04.12.2005	EDITION
	PAGE	3 OF 11	



FAN 3rd WIRE SIGNAL

Fan with driver IC:

- R Type (Rotation Detector)

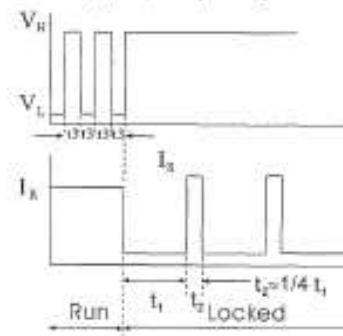


3rd wire signal :

Run : V_L
Locked : V_H

t₁: Locked protection by cut-off run current (I_R)
t₂: Auto-restart by sending starting current (I_S)

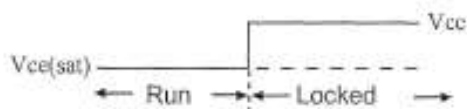
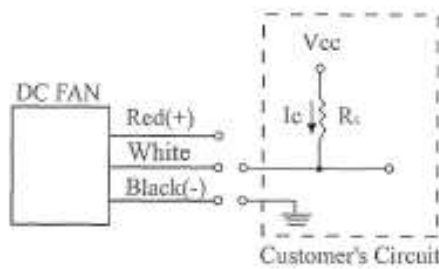
- F Type (Frequency Generator)



3rd wire signal :

Run : Square Wave
Locked : V_H

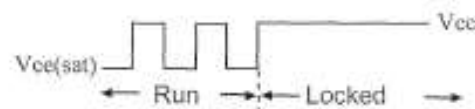
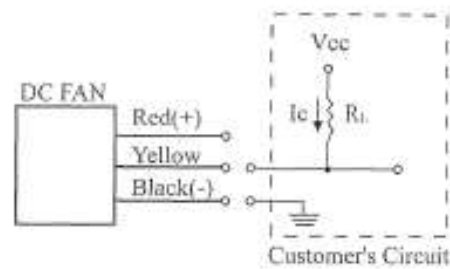
t₂: F Type has open collector circuit designed for rpm measurement.



$$V_{cc} = +30V \text{ max}$$

$$I_c = 10mA \text{ max}$$

$$I_c = \frac{V_{cc}}{R_i}$$



$$V_{cc} = +30V \text{ max}$$

$$I_c = 10mA \text{ max}$$

$$I_c = \frac{V_{cc}}{R_i}$$

建準電機工業股份有限公司
SUNONWEALTH ELECTRIC
MACHINE INDUSTRY CO., LTD.

SPEC.NO	D04039950G-00	REVISION	1.0
ISSUE DATE	04.12.2005	EDIT	
PAGE	7 OF 11		





STP55NF06L STB55NF06L - STB55NF06L-1

N-channel 60V - 0.014Ω - 55A TO-220/D²PAK/I²PAK
STripFET™ II Power MOSFET

General features

Type	V _{DSS}	R _{DS(on)}	I _D
STP55NF06L	60V	<0.018Ω	55A
STB55NF06L	60V	<0.018Ω	55A
STB55NF06L-1	60V	<0.018Ω	55A

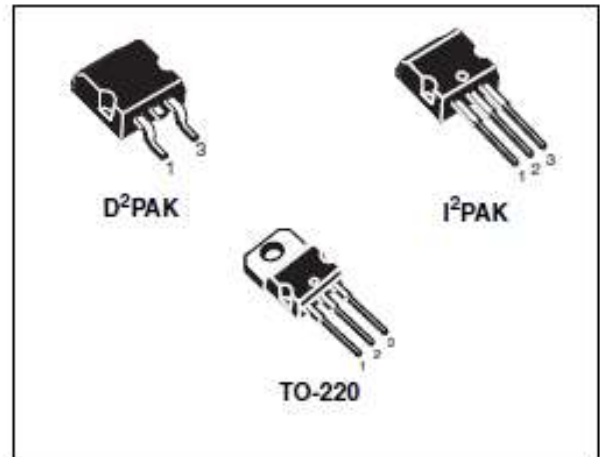
- Exceptional dv/dt capability
- 100% avalanche tested
- Application oriented characterization

Description

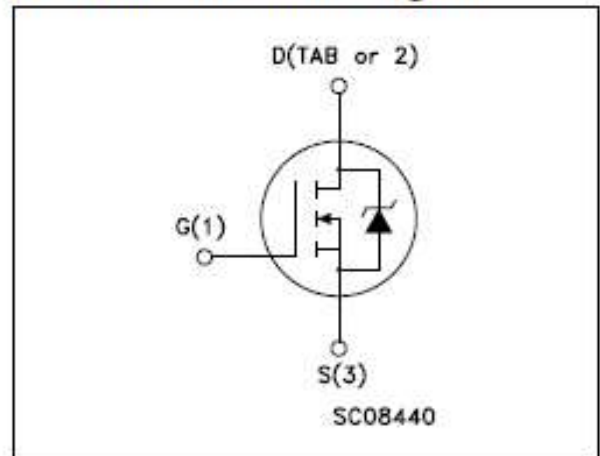
This Power MOSFET is the latest development of STMicroelectronics unique "Single Feature Size™" strip-based process. The resulting transistor shows extremely high packing density for low on-resistance, rugged avalanche characteristics and less critical alignment steps therefore a remarkable manufacturing reproducibility.

Applications

- Switching application



Internal schematic diagram



Order codes

Part number	Marking	Package	Packaging
STP55NF06L	P55NF06L	TO-220	Tube
STB55NF06LT4	B55NF06L	D ² PAK	Tape & reel
STB55NF06L-1	B55NF06L	I ² PAK	Tube

1 Electrical ratings

Table 1. Absolute maximum ratings

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{DS}	Drain-source voltage ($V_{GS} = 0$)	60	V
V_{GS}	Gate-source voltage	± 16	V
I_D	Drain current (continuous) at $T_C = 25^\circ\text{C}$	55	A
I_D	Drain current (continuous) at $T_C = 100^\circ\text{C}$	39	A
$I_{DM}^{(1)}$	Drain current (pulsed)	220	A
P_{TOT}	Total dissipation at $T_C = 25^\circ\text{C}$	95	W
	Derating factor	0.63	W/°C
$dv/dt^{(2)}$	Peak diode recovery voltage slope	20	V/ns
$E_{AS}^{(3)}$	Single pulse avalanche energy	300	mJ
T_J	Operating junction temperature	-55 to 175	°C
T_{stg}	Storage temperature		

1. Pulse width limited by safe operating area
2. $I_{SD} \leq 55\text{A}$, $di/dt \leq 200\text{A}/\mu\text{s}$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$, $T_J \leq T_{JMAX}$.
3. Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_D = 27.5\text{A}$, $V_{DD} = 30\text{V}$.

Table 2. Thermal data

$R_{thj-case}$	Thermal resistance junction-case max	1.58	°C/W
R_{thj-a}	Thermal resistance junction-ambient max	62.5	°C/W
T_l	Maximum lead temperature for soldering purpose	300	°C

2 Electrical characteristics

($T_{CASE}=25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise specified)

Table 3. On/off states

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{(BR)DSS}$	Drain-source breakdown voltage	$I_D = 250\mu\text{A}$, $V_{GS} = 0$	60			V
I_{DSS}	Zero gate voltage drain current ($V_{GS} = 0$)	$V_{DS} = \text{Max rating}$, $V_{DS} = \text{Max rating} @ 125^{\circ}\text{C}$			1 10	μA μA
I_{GSS}	Gate body leakage current ($V_{DS} = 0$)	$V_{GS} = \pm 16\text{V}$			± 100	nA
$V_{GS(th)}$	Gate threshold voltage	$V_{DS} = V_{GS}$, $I_D = 250\mu\text{A}$	1	1.7		V
$R_{DS(on)}$	Static drain-source on resistance	$V_{GS} = 5\text{V}$, $I_D = 27.5\text{A}$ $V_{GS} = 10\text{V}$, $I_D = 27.5\text{A}$		0.016 0.014	0.020 0.018	Ω Ω

Table 4. Dynamic

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$g_{fs}^{(1)}$	Forward transconductance	$V_{DS} = 15\text{V}$, $I_D = 27.5\text{A}$		30		S
C_{iss}	Input capacitance	$V_{DS} = 25\text{V}$, $f = 1\text{ MHz}$, $V_{GS} = 0$		1700		pF
C_{oss}	Output capacitance			300		pF
C_{rss}	Reverse transfer capacitance			105		pF
Q_g	Total gate charge	$V_{DD} = 48\text{V}$, $I_D = 55\text{A}$ $V_{GS} = 4.5\text{V}$		27	37	nC
Q_{gs}	Gate-source charge			7		nC
Q_{gd}	Gate-drain charge			10		nC

1. Pulsed: pulse duration=300 μs , duty cycle 1.5%

Table 5. Switching times

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$t_{d(on)}$ t_r	Turn-on delay time Rise time	$V_{DD} = 30\text{V}$, $I_D = 27.5\text{A}$, $R_G = 4.7\Omega$, $V_{GS} = 4.5\text{V}$ (see Figure 12)		20 100		ns ns
$t_{d(off)}$ t_f	Turn-off delay time Fall time	$V_{DD} = 30\text{V}$, $I_D = 27.5\text{A}$, $R_G = 4.7\Omega$, $V_{GS} = 4.5\text{V}$ (see Figure 12)		40 20		ns ns

Table 6. Source drain diode

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
I_{SD}	Source-drain current				12	A
$I_{SDM}^{(1)}$	Source-drain current (pulsed)				48	A
$V_{SD}^{(2)}$	Forward on voltage	$I_{SD} = 55\text{A}$, $V_{GS} = 0$			1.6	V
t_{rr} Q_{rr} I_{RRM}	Reverse recovery time Reverse recovery charge Reverse recovery current	$I_{SD} = 55\text{A}$, $di/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$, $V_{DD} = 30\text{V}$, $T_J = 150^{\circ}\text{C}$ (see Figure 14)		80 200 5		ns nC A

1. Pulse width limited by safe operating area

2. Pulsed: pulse duration=300 μs , duty cycle 1.5%

2.1 Electrical characteristics (curves)

Figure 1. Safe operating area

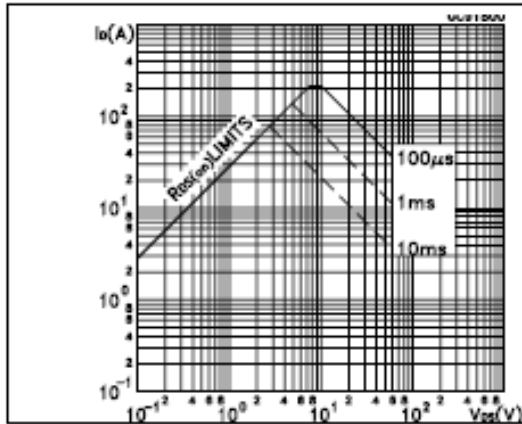


Figure 2. Thermal impedance

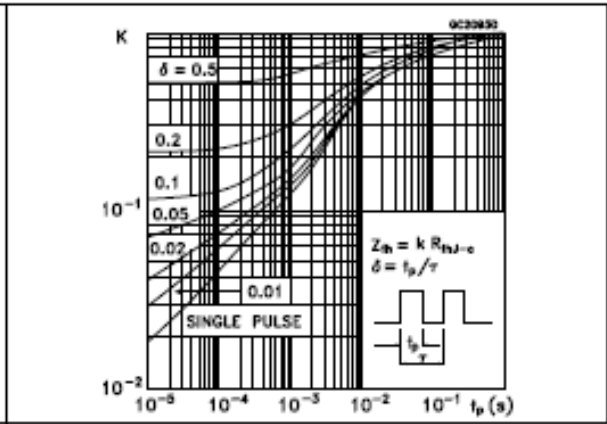


Figure 3. Output characteristics

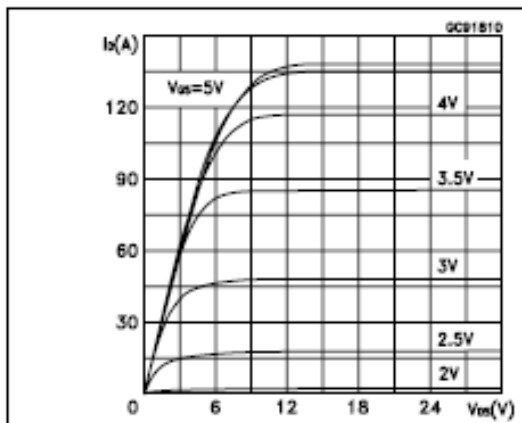


Figure 4. Transfer characteristics

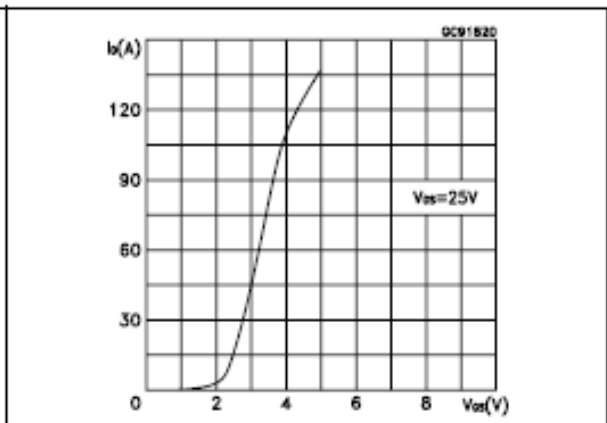


Figure 5. Transconductance

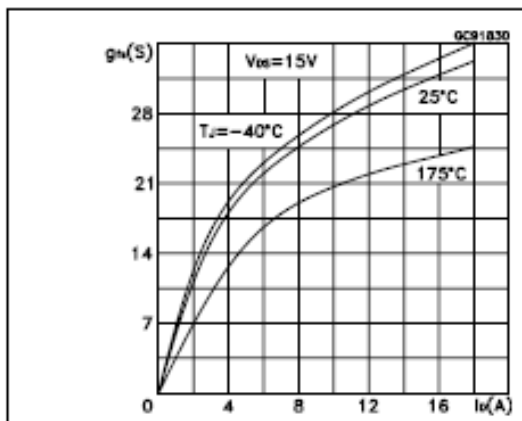


Figure 6. Static drain-source on resistance

