



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Optimalizace drah pro generování G-kódu
3D tiskárny stavebních směsí**

**Path Optimization for G-code Generation of
a Concrete 3D Printer**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

Dominik Staněk

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 3901R051 Konstruování podporované počítačem

Vedoucí práce: Ing. Josef kamenický

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Staněk** Jméno: **Dominik** Osobní číslo: **483983**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Optimalizace drah pro generování G-kódu 3D tiskárny stavebních směsí

Název bakalářské práce anglicky:

Path Optimization for G-code Generation of a Concrete 3D Printer

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte analýzu vhodnosti použití rotačního ramene trysky použité pro 3D tisk z betonových směsí. Práce bude obsahovat rešerši metod 3D tisku, používaných typů tiskáren pro tisk budov a přípravy pro generování G-kódu. Dále bude práce obsahovat matematický popis vztahu délky ramene, šířky tištěné stěny a úhlu šikmé výplně. Dále bude obsahovat vyjádření kinematické závislosti pohybů os tiskárny pro tisk výplně se zaměřením na minimální energetickou náročnost pohonů. Vypracujte 2D výkres svařence ramene.

Seznam doporučené literatury:

Dle vlastní rešerše

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Josef Kamenický ústav přístrojové a řídicí techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **05.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Josef Kamenický
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. František Lopot, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne 30.5.2022

Podpis

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Josefu Kamenickému, za odborné rady a pomoc při vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za velikou podporu při psaní práce a všem svým přátelům.

Anotační list

<i>Jméno autora:</i>	<i>Dominik Staněk</i>	
<i>Název BP:</i>	<i>Optimalizace drah pro generování G- *kódu 3D tiskárny stavebních směsí</i>	
<i>Anglický název:</i>	<i>Path Optimization for G-code Generation of Concrete 3D Printer</i>	
<i>Rok:</i>	<i>2022</i>	
<i>Studijní program:</i>	<i>Strojírenství</i>	
<i>Studijní obor:</i>	<i>Konstruování podporované počítačem</i>	
<i>Ústav:</i>	<i>Ústav konstruování a části strojů</i>	
<i>Vedoucí práce:</i>	<i>Ing. Josef Kamenický</i>	
<i>Bibliografické údaje:</i>	<i>Počet stran</i>	<i>32</i>
	<i>Počet obrázků</i>	<i>20</i>
	<i>Počet tabulek</i>	<i>1</i>
	<i>Počet grafů</i>	<i>6</i>
	<i>Počet příloh</i>	<i>4</i>

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá energetickou optimalizací pohybů portálové 3D tiskárny s rotačním ramenem a porovnáním s klasickou portálovou 3D tiskárnou bez ramene. Hodnocení zahrnuje energetickou náročnost pohonů tiskáren. Teoretická část se zabývá způsoby 3D tisku, způsoby 3D tisku budov, konstrukčními provedeními 3D tiskáren a cestou zkompletování hrubé stavby domu. Praktická část se zabývá matematickým ověřením realizovatelného a kritického sklonu výplně stěny v případě určitých proměnných parametrů stěny. Dále simulací pohybů portálové 3D tiskárny a portálové 3D tiskárny s ramenem, se zaměřením na následný výpočet kinetických energií těchto tiskáren. K tiskárně s ramenem je v práci navrženo rameno a jeho provedení je uvedeno v sestavném výkresu.

Klíčová Slova

3D tisk betonových směsí, 3D tisk, optimalizace energie 3D tiskárny

Abstract

This bachelor's thesis focuses on energy optimization of movements of portal 3D printer with a movable arm in comparison with classic portal 3D printer without the arm. The assessment includes the energy performance of printer drives. The theoretical part contains methods of 3D printing, methods of 3D printing concrete structures, design of 3D printers and the way of assembling the rough constructions of house. The practical part contains the calculations of ability to print wall depending on angle of wall and certain variable wall parameters, simulation of movements of portal 3D printer with the arm and subsequent calculation of kinetic energies of these printers. The arm and its design in the assembly drawing were designed for the printer with the arm.

Keywords

3D printing of concrete mixtures, 3D printing, energy optimization of 3D printers

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Teoretická část	2
2.1. Co je to 3D tisk.....	2
2.2. Historie 3D tisku	2
2.3. Cementová malta.....	3
2.4. Způsoby 3D tisku cementových objektů:	3
2.4.1. 3D tisk vytlačování cementové malty	3
2.4.2. Tisknutí metodou práškového spojování.....	4
2.5. Části 3D tiskáren na vytlačování cementové malty.....	5
2.6. Konstrukční provedení 3D tiskáren na vytlačování cementové malty.....	5
2.6.1. Portálová 3D tiskárna	6
2.6.2. 3D tiskárny s robotickou rukou	7
2.6.3. Provedení WASP.....	9
2.6.4. Mobilní 3D tiskárny	10
2.7. Postproces.....	11
2.7.1. Pojmy vázané k postprocesu	11
2.7.2. Postproces.....	12
3. Praktická část.....	13
3.1. Popis soustavy	13
3.2. Výpočet souřadnice y1 koncového bodu ramene a úhlu natočení ϕ	14
3.2.1. Navrhnutí podmínek.....	14
3.2.2. Výpočet úhlu ramena v závislosti na souřadnicích bodu A.....	14
3.3. Ověření a nalezení parametrů, tak aby pohon v ose X jel pouze vkladným směru po přímce $x=0$ bez reverzace.....	15
3.3.1. Matematické stanovení parametrů.....	15
3.3.2. Výpočet bodů šikmé výplně stěny je.....	16
3.3.3. Rovnice pro polohu koncového bodu trysky tiskárny s ramenem.....	16
3.3.4. Úprava rovnic (2), (3) a (4)	16
3.4. Vyjádření závislostí pohybů os tiskárny.....	20
3.4.1. Rovnice pro polohu	20
3.4.2. Rovnice pro rychlost.....	21
3.4.3. Rovnice pro zrychlení.....	21
3.4.4. Navržení sinusového průběhu v souřadnicích x a y	21
3.4.5. Rovnice pro rychlost sinusoidy	22
3.4.6. Rovnice pro polohu a zrychlení při pohybu po sinusoidě	23

3.4.7.	Návrh programu v Matlabu pro 3D tiskárnu s ramenem.....	24
3.4.8.	Výpočet kinetických energií soustavy 3D tiskárny s ramenem.....	25
3.4.9.	Návrh programu v Matlabu pro 3D tiskárnu bez ramena.....	27
3.4.10.	Výpočet kinetických energií soustavy 3D tiskárny bez ramena.....	28
3.4.11.	Porovnání průběhů kinetické energie portálové 3D tiskárny bez ramena a s ramenem ..	30
3.5.	Návrh svařence ramena	31
4.	Závěr:	32



1. Úvod

Tato bakalářská práce se specializuje na tematiku 3D tisku cementových struktur a její optimalizaci. Konkrétně se jedná o analýzu podmínek pro využití ramene na portálové 3D tiskárně cementových směsí a ověření přínosu tohoto návrhu v rámci úspory energie u 3D tisku stěn budov.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí, teoretické a praktické. V první části jsou uvedeny metody 3D tisku, konstrukční řešení tiskáren, které se aktuálně využívají ve světě pro tisk budov a cesta k naprogramování 3D tiskárny na budovy. V praktické části je řešena problematika omezení pohonu v závislosti na šířce stěny, délce ramena a úhlu šikmé výplně. Dále je uvedena analýza kinematické závislosti pohybů 3D tiskárny s rotačním ramenem a provedena simulace 3D tiskárny s ramenem a bez ramena. Součástí práce je výkres svařence ramene.

Cílem této práce je porovnat energetickou náročnost pohonů a určit, zdali se vyplatí využívat v praxi portálovou 3D tiskárnu s ramenem namísto klasické portálové 3D tiskárny. Toho je v práci docíleno pomocí vyhodnocených grafů z výpočtů provedených v aplikaci v Matlab.

2. Teoretická část

2.1. Co je to 3D tisk

3D tisk je technologie, která slouží k přenášení objektů z digitálního prostředí do reálného světa. Tato technologie je aditivní, to znamená že objekt je tvořen postupným přidáváním materiálu na sebe, na rozdíl od technologie obrábění, kdy je z polotovaru materiál postupně ubírán na výsledný produkt. [1]

2.2. Historie 3D tisku

Jako první se o tisku z digitálních 3D modelů a dat objevily v 80. letech 20. století. První myšlenka tisku byla taková, že se využíval foto-polymerní materiál vytvrzovaný UV zářením. Tuto metodu si nechal patentovat Charles Hull v roce 1984 a nazval stereografií. Založil vlastní firmu 3D Systems a v roce 1987 vyprojetovali první 3D komerční 3D tiskárnu SLA-1 viz obrázek 1. Poté následovaly další typy tohoto přístroje, například typ SLA 250, který už byl dostupný pro širší veřejnost a začaly se také objevovat konkurenční firmy. V roce 1987 vyvinul technologii SLS (Selective Laser Sintering) Carl Deckard. V roce 1989 Scott Crump vynalezl techniku FDM (Fused Deposition modeling). Až v druhé polovině 90. let 20. století se začal objevovat pojem 3D tiskárna. V roce 1990 se poprvé povedlo vytisknout na 3D tiskárně močový měchýř, který tělo pacienta neodmítlo. Největší rozkvět 3D tisku začal cca po roce 2007, kdy 3D tisk začínal být více známý. V lednu roku 2009 byla poprvé dostupná 3D tiskárna ke komerčnímu prodeji ve formě kitu. Tato tiskárna se jmenovala BFRapMan 3D. Následně se začaly objevovat další 3D tiskárny dostupné ke koupi. Dále byl vytvořen web Thingiverse, kde si lidé mohou stahovat a sdílet své vytvořené modely. V roce 2011 inženýři z University of South Hampton vytiskli pomocí 3D tisku letadlo, které je na obrázku 2. [2]



Obrázek 1 | Stereografní aparát SLA-1 [16]



Obrázek 2 | Letadlo z univerzity South Hampton [17]

2.3. Cementová malta

Cementová malta je směs, která obsahuje mikrosilika, křemičitý úlet, popílek, urychlovače, plastifikátory a nízký obsah vody. Cementové malty jsou popularizovány spíše jako beton, ale beton to není, protože směs musí mít specifické vlastnosti, které beton nemá. Těmito vlastnostmi jsou: rychlé tuhnutí kvůli schopnosti vrstvy unášet vrstvy nad ní bez toho, aniž by vznikaly deformace a malá velikost maximálního zrna, která by neměla překračovat velikost více než 4 mm, a to z důvodu, aby snadno směs procházela vedením v 3D tiskárně. [3]

2.4. Způsoby 3D tisku cementových objektů

Tyto způsoby se liší většinou v použité směsi a v použitém pojivu. Z tohoto důvodu jsou vytvořené různé konstrukční provedení tiskáren.

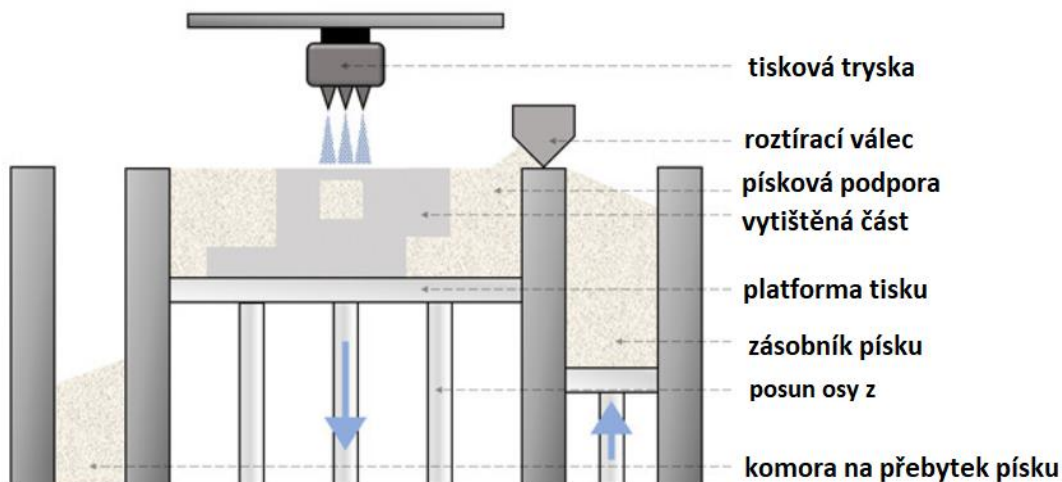
2.4.1. 3D tisk vytlačování cementové malty

Jako nejčastější princip tisku ve stavebnictví se využívá podobný princip jako při tisknutí 3D objektů z plastu metodou FDM (Fused Deposition modeling). Jako materiál se využívá cementová malta. Metoda je taková, že tryska nanáší po vrstvách materiál v definovaných drahách. Nejdůležitějším aspektem je rychlý náběh tuhnutí materiálu, aby vrstvy unesly následně tištěné vrstvy. Tento problém je řešen řízeným upravováním směsi cementové malty anebo tak, že tiskárna tiskne jinou část a vrátí se k tuhnoucí vrstvě později, další variantou je vyčkání, než vrstva ztuhne. Největší problém této technologie je s převisem, v případě FDM metody se určité vzdálenosti dají vytisknout bez podpor anebo s podporami, u této technologie se tento postup uplatnit nedá. V případě převisů nad dveřmi a okny se dají dráhy G-kódu naprogramovat tak, aby se zde vytvořila mezera na překlad a tiskárna buď setrvala nebo v rámci vkládání překladu tiskla něco jiného. Dalším velkým problémem je, že stěny nemohou být tištěny bez podpor pod větším úhlem. Na obrázku 3 je vidět vytlačování cementové směsi z tiskové hlavy a jsou zde vidět i nanášené vrstvy. [3]



Obrázek 3|Tisk stěny[13]

2.4.2. Tisknutí metodou práškového spojování

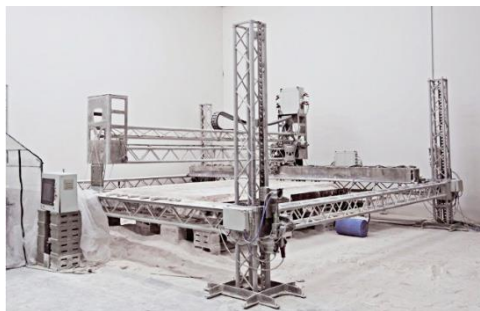


Obrázek 4|Tisk metodou práškového spojování [4]

Popis metody náleží k obrázku 4. Práškový materiál je vyzvednut ze zásobníku písku a nanáší se v tenké, rovnoměrné vrstvě na tiskovou platformu pomocí práškového válečku/přetahovače. Inkoustová tisková hlava vede pohyby podle G-kódu ve směrech XY a selektivně aplikuje sprej pojivového lepidla na prášek. Jakmile tato první vrstva ztuhne, stavební platforma provede zdvih dolů (na ose Z) a zásobník se opět zvedne, aby přetahovač mohl nanést další vrstvu prášku. Tento proces se opakuje, dokud není vytištěna každá vrstva a výsledná součást je kompletně vytištěná v práškovém loži.

Díl se nechá zcela ztuhnout a poté se vyjme z prášku a očistí od přebytečného materiálu. Jakýkoli zbylý sypký prášek lze získat zpět pro budoucí tisk, i když část prášku se v procesu tisku vyplývá a musí být zlikvidována. [4]

Nejpropracovaněji má tuto technologii ve stavebním průmyslu provedenou firma D-shape, která vytvořila tiskárnu se stejnojmenným názvem. Tiskárna je vidět na obrázku 5. Touto tiskárnou je schopna vytvořit dokonce jednopatrový dům. Tato technologie je výhodná v tom, že zvládá vytvářet i úzké prostory pro trubky. Nepotřebuje při tisku podpory. [5]



Obrázek 5|D-shape tiskárna [5]

2.5. Části 3D tiskáren na vytlačování cementové malty

3D tiskárny se skládají z tiskové hlavy, která má v sobě zabudovaný zásobník s tiskovým materiálem a šroubovým podavačem a tryskou. Do tiskové hlavy je přiveden materiál trubkou. Trubka je spojená s čerpadlem. Před čerpadlem je zásobník, ze kterého si čerpadlo bere materiál a pumpuje hotovou směs přímo do tiskové hlavy. V tiskové hlavě je směs natlačena v zásobníku a tato směs se pomocí podávacího šroubu pohybuje tryskou na tištěnou stěnu. Obrázek 6 popisuje tiskovou hlavu. [6]



Obrázek 6| Tisková hlava[6]

2.6. Konstrukční provedení 3D tiskáren na vytlačování cementové malty

Nejdůležitější část 3D tiskárny je tisková hlava se zabudovanou tryskou, kterou nese konstrukce tiskárny. Konstrukce 3D tiskárny se skládá z pohyblivých členů a pohonných jednotek. Každé konstrukční provedení 3D tiskárny poté používá jiné souřadnicové soustavy (kartézské, polární) na přepočítávání pohybů pohonů a koncového pohybu tiskové hlavy. Parametrové rozdíly 3D tiskáren na cementové malty jsou tiskový prostor a velikost tiskárny. Ideální tiskárna by měla mít co největší tiskový prostor, být přesná a být v případě zájmu tisku velkých budov schopna snadného převozu a mít malé rozměry. Aktuálně jsou nejznámější tyto 3 typy konstrukčních řešení. [3]



2.6.1. Portálová 3D tiskárna

Provedení portálové 3D tiskárny je tvořeno třemi osami, po kterých se pohybuje tisková hlava v kartézských souřadnicích. Jeden pohon pohybuje tiskovou hlavou na hlavním nosníku mezi dvěma sloupy v ose y. Nosník je oboustranně připevněn ke dvěma sloupům. Druhý pohon pohybuje nosníkem v souřadnici z a sloupy jsou připevněné nejčastěji ke kolejnicím, po kterých třetí pohon pohybuje sloupy v souřadnicích x. Tiskový prostor portálových tiskáren má tvar kvádrů.

Výhody jsou takové, že pokud by měla tiskárna dostatečně vysoké sloupy, mohla by tisknout i vícepatrové budovy. Dále je možné vyrobit dostatečně dlouhé koleje tak, že tiskárna nemusí být stále rozebíraná a může mít nekonečně dlouhý tiskový prostor v ose x. Tímto způsobem by mohl být vytištěn most nebo popřípadě dlouhá řada domů. Další výhodou těchto tiskáren je vysoká nosnost a vyšší tuhost. U portálového provedení je vysoká přesnost tisku, která je také daná nejmenším krokem pohybu motoru.

Nevýhodou při tisku budov jsou velké rozměry tiskárny. Tiskárnu je proto náročnější a dražší složit a převézt na další místo tisku. V případě hodně členitého pozemku se tyto tiskárny dají použít velice těžko, protože mají požadavek na rovný povrch. Často se používají na výrobu prefabrikátů, ze kterých se poté skládají hotové stavby. [3]

2.6.2. 3D tiskárny s robotickou rukou

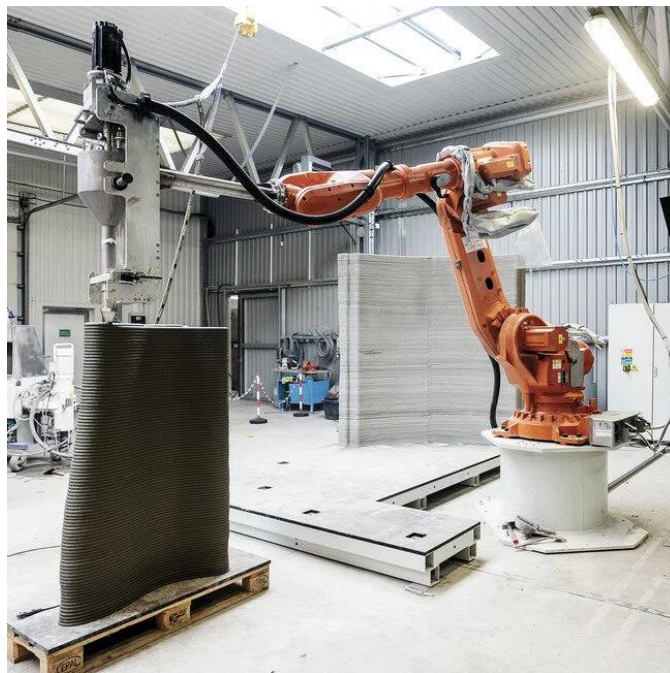
2.6.2.1. Průmyslová ramena

Průmyslová ramena s tiskovou hlavou vychází z průmyslových robotů, jak je vidět na obrázku 7. Jsou to ramena s nejčastěji šesti osami otáčení. Jsou pevně zakotvená k zemi a tiskový prostor, vzniká z délky ramen a možností rotace kloubů. Tiskový prostor tedy nejčastěji obepíná polokouli v jejíž středu se nachází základna průmyslového robota. Tento robot pro svůj chod využívá polární souřadnice.

Průmyslová ramena se dají využívat na výrobu prefabrikovaných materiálů, mobiliářů a jednostranných bednění. Jednostranných bednění, protože tiskárna umožňuje pouze tisk z jedné strany. V případě tisku nějaké větší budovy by bylo potřeba tisknout se dvěma tiskárnami jednu větší stěnu nebo první tiskárnu přendat na pozici druhé.

Výhodou průmyslových robotů s robotickou rukou jsou malé rozměry, nízká hmotnost, menší pořizovací cena než u portálového provedení 3D tiskárny a lehká manipulace s přemísťováním tiskárny. U této tiskárny je jednodušší zprovoznění na pracovišti a může bez velkých omezení operovat uvnitř domu, a to v případě, že by byla potřeba vytisknout například vnitřní dekorace nebo barový pult.

Nevýhodou je menší tiskový prostor než u portálových tiskáren a nemožnost vytisknout stěnu z obou stran. [3]



Obrázek 7|Průmyslový robot [15]

2.6.2.2. Rameno Apis-Cor

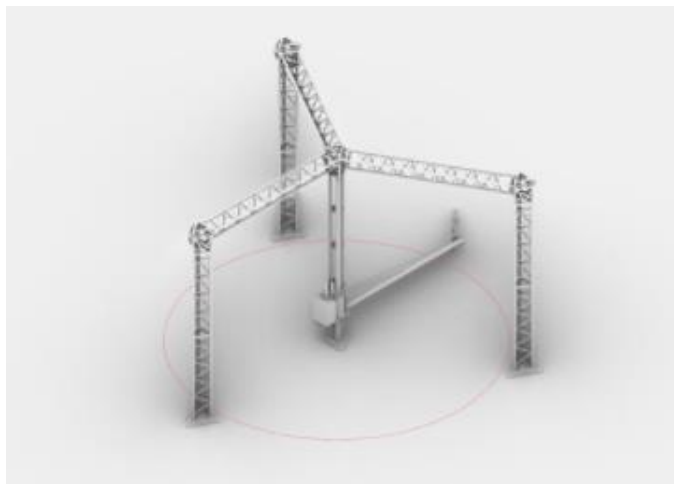
Rameno vytvořené společností Apis-Cor se skládá pouze z otočného sloupu, který se může pohybovat v rozmezí 1,6 metru do výšky, výsuvného nosníku s rozsahem od 4 do 8,5 metru do šířky, na konci nosníku je zachycená tisková hlavice. Touto tiskárnou dokázala společnost v -35°C vytisknout dům za jeden den. Konstrukční podobu tiskárny je vidět na obrázku 8. [7]



Obrázek 8| Konstrukční provedení 3D tiskárny [7]

2.6.3. Provedení WASP

Toto konstrukční řešení navrhla firma Delta WASP. Jedná se o tiskové rameno se 3 stupni volnosti, které se pohybuje po středovém sloupu v ose z až do 3 metrů a nadále kolem tohoto sloupu může rotovat. Tento sloup je připevněn k zemi a dále nahore zapírán dalšími 3 nosníky se sloupy viz obrázek. Tisková hlava je na konci ramene a může se na rameni pohybovat. Tiskový prostor je válcový a maximální vytištěná plocha je o průměru 6,6 metru a na výšku má 3 metry. Celá konstrukce je vidět na obrázku 9.[8]



Obrázek 9| Konstrukce Wasp provedení [8]

Tiskárnu lze sestavit v různých konfiguracích. Dále se dá tiskárna rozšířit o další traverzy a tisková ramena, viz obrázek 10. Dá se tedy nekonečně rozšiřovat a tím pádem lze tisknout více budov najednou. Výhodou je, že se tato tiskárna dá použít pro rychlou výstavbu malých domků. Tiskárna nabízí široké konstrukční možnosti oproti ostatním. Tyto tiskárny se používají zatím pro tisk budov ve vesnici Shamballa v Itálii. Příklady zapojení tiskáren jsou zobrazeny na obrázku 10. [8]



Obrázek 10| Sestavení vícero tiskáren [8]



2.6.4. Mobilní 3D tiskárny

Tyto tiskárny se především odlišují tím, že se dokážou přesouvat v průběhu procesu tisku, tím pádem nejsou pevně upevněné k zemi. Většinou jsou to tiskárny, které mají originální provedení nebo to mohou být průmyslová ramena s tiskovou hlavou a pásovým podvozkem. Obrovskou výhodou těchto tiskáren je neomezený plošný tiskový prostor na zemi. Omezení je pouze v ose Z, které je dané maximálním zdvihem tiskové hlavy. Další výhodou je, že tyto stroje se snadno transportují a může jich pracovat více zároveň na jednom výrobku. Nevýhodou bohužel je nízká nosnost tiskové hlavy. V případě použití robotických rojů je těžší je softwarově nakonfigurovat. [3]

Na univerzitě IAAC v Barceloně vytvořili 3 typy robotů z nichž každý má jinou funkci. Jako první byl vytvořen Základní robot, který má posouvací tiskovou hlavu v ose Z a tiskový pohyb vytvářejí pásy. V ose Z dokáže vytvořit jen pouze pár decimetrů zdi. Druhý robot je Grip robot, dokáže obepnout dvěma kolečky z každé strany již předem vytištěnou část stěny a dále tiskne na vrstvy původní stěny, po kterých se dál posouvá směrem výš. Tisková hlava se může pohybovat doprava a doleva a tím dokáže vytvářet sklon a tisknout stěnu pod určitým úhlem. Třetí robot je Vakuový má stejné vlastnosti jako první, navíc má speciální zařízení, které vytváří podtlak pod podvozkem a tím přidržuje robota na již vytištěné stěny. Díky tomuto řešení robot zvládne tisknout i na vertikální stěně. [9]

K těmto třem robotům byl ještě vytvořen jeden robot, který do nich přivádí materiál. Je vybavený dvěma zásobníky na materiál, dvou dílným extruderem, ovladačem, který koordinuje pohyby připojených robotů a sadou svých kol, která umožňuje jednotce se sama pohybovat s menšími roboty. Dále je k ní připojena soustava hadic a tyč pro uchycení hadic, aby nezasahovaly na robota. [10]

Firma Apis-Cor vytvořila mobilního robota Franka, který je vytvořen z jejich tiskového ramena a pásů, které mají jako jeřáby kotevní písky. Tímto ramenem lze vytisknout až dvoupatrový dům. K Frankovi vytvořili ještě míchací a čerpací jednotku Gary, která má za úkol správně dávkovat vodu do tiskové směsi a zajišťovat kvalitu materiálu. [11]



2.7. Postproces

2.7.1. Pojmy vázané k postprocesu

- Soubor BIM

BIM je zkratka z anglického spojení Building Information Modeling, do češtiny překládána jako Informační Model Budovy. BIM je soubor digitální dokumentace ke stavbě. Tento model zahrnuje veškerá stadia stavby, modely a další vlastnosti. [12] Při 3D tisku budovy jsou nejdůležitější informace z BIM souborů modely budovy. Nejdůležitější informací jsou pro postprocesor informace o geometrie budovy, především však o stěnách, oknech a dveřích, z důvodu převisů.

- soubor STL

Je to datový soubor, který je tvořen z trojúhelníkových sítí. Lze v něm ukládat 3D objekty skoro v jakémkoliv CAD systému. Soubor STL aproximuje objemové modely na seznam bodů s jejich 3D souřadnicemi, ty jsou poté využity k definování trojúhelníkových ploch. Tento soubor neobsahuje vlastnosti povrchu jako je textura a barva. V 3D tisku je hojně využíván, protože je univerzální. [13]

- G-kód

G-kód je programovací jazyk, díky kterému je programován obráběcí nebo aditivní stroj. Tento jazyk určuje instrukce, jaké činnosti bude stroj vykonávat. Způsob programování je společný pro většinu frézek, soustruhů a kartézských 3D tiskáren. Zápis G kódu je například u 3D tiskárny G01 X100 Y25 Z100 F500 E0.25. Kde první operace G01 určuje, že tryska se bude pohybovat po lineární interpolaci do bodu X100 Y25 Z100, rychlostí 500 jednotek a bude se vytlačovat 0,25 jednotek poживa za určitý čas. Jednotky jsou uvedeny z toho důvodu, že každý stroj může používat jiné jednotky míry. Nejčastěji se využívají milimetry. [14]

2.7.2. Postproces

Postprocesem je myšlena příprava dat k tisku 3D objektu na 3D tiskárně. Z hlediska tisku se jedná o preproces. Z hlediska navrhování objektu se jedná o postproces. Jeden ze způsobů, jak probíhá tento postupný proces znázorňuje schéma na obrázku 11. Na začátku postprocesu je BIM soubor, který nese informace o budově. Z tohoto souboru se vyexportuje model dat do STL formátu. Nadále se soubor STL načte do programu. V programu se vykreslí model. Model se proloží horizontálními rovinami, které mají mezi sebou definovanou mezeru (ta představuje výšku vrstvy). V plných částech se navrhnu trajektorie tak, aby vyplňovaly obsahem trysky celou výplň a navazovaly na předešlé trajektorie z předešlých ploch. Tyto trajektorie se převedou na G-kód. V postprocesoru se tento G-kód ještě ověří. Zkontrolují se dráhy 3D tiskárny, zda je tiskárna schopna teoreticky vytvořit správně objekty bez kolizí s vytištěnými objekty tiskové hlavy, které byly v BIM souboru uloženy. Poté se výsledný G-kód nahraje do 3D tiskárny, která vytiskne finální objekt [13]



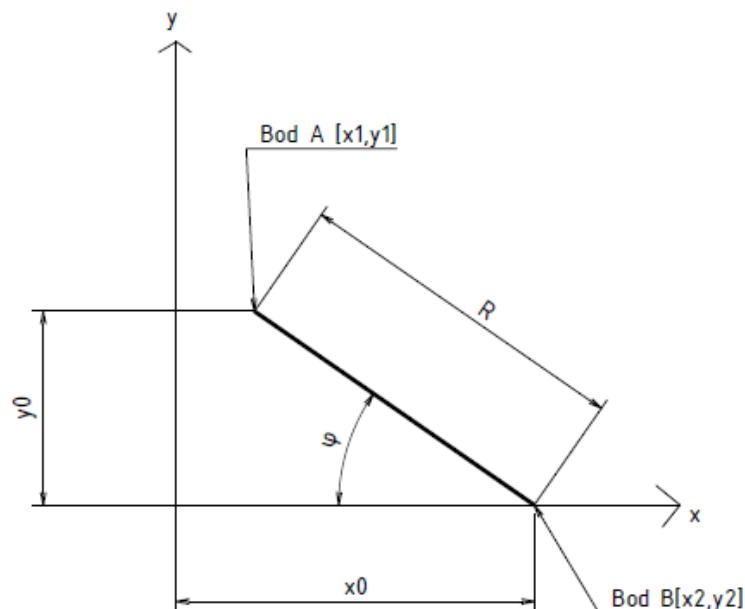
Obrázek 11| Schéma postprocesu

3. Praktická část

Praktická část obsahuje ověření dopředného pohybu pohonu v jedné ose a vytvoření tabulky s proměnlivými parametry v závislosti na fungování tohoto principu. Dále jsem provedl návrh kinematické závislosti tiskárny s ramenem a vypočetl rychlosti posuvů tiskárny s ramenem a tiskárny bez ramene. V závěru praktické části jsem provedl výpočet průběhů kinetických energií obou tiskáren a vytvořil výkres ramena tiskárny.

3.1. Popis soustavy

Soustava je dána otočným ramenem tiskové trysky. Cílem je dle zadaných parametrů (délka ramene, šířka tištěné stěny) vypočítat úhel natočení φ ramene 3D tiskárny cementových směsí ve vztahu k tvaru výplně stěny a pohybu podél osy stěny. Dále ověřit, zda 3D tiskárna bude schopná vytisknout vnitřní strukturu stěny budovy tak, aby se střed ramene B pohyboval pouze do kladného směru x a aby se výška y_2 bodu B neměnila a zůstala konstantní. Pro představu je schéma ukázáno na obrázku 12. Schéma znázorňuje horní pohled na rotační rameno trysky tiskové hlavy. Při uvažovaném směru stěny podél osy x se střed otáčení ramene pohybuje po středové čáře tištěné stěny. Rotační rameno zajišťuje pohyb výstupu trysky ve směru kolmém ke středové čáře stěny.



Obrázek 12|schéma tiskárny

3.2. Výpočet souřadnice y_1 koncového bodu ramene a úhlu natočení φ

Výpočet uvedený v této kapitole ukazuje, jak bude rameno natočeno při tisku stěny. Souřadnice s indexem 1 představují koncový bod ramene, tj. výstup směsi z trysky. Indexem 2 jsou značeny souřadnice středu otáčení trysky.

3.2.1 Navrhnutí podmínek

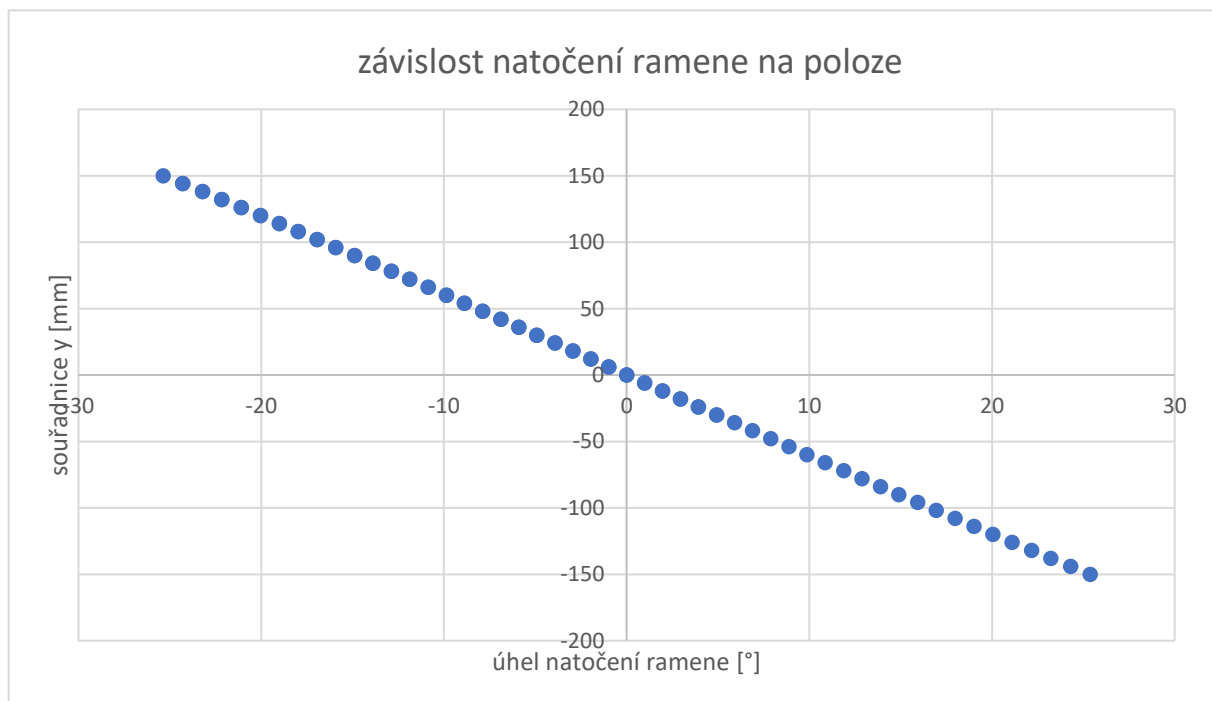
Ve výpočtech je rameno omezena pohyblivost tak, aby pohon pohyboval ramenem pouze v určitém rozsahu. S tím, že rameno ve $\varphi = 0^\circ$ je orientováno podél osy x a směřuje do mínusu osy x (vlečené rameno) φ nabývá hodnot od -90 do 90 stupňů viz rovnice (26).

$$\varphi = \langle -90^\circ, 90^\circ \rangle \quad (26)$$

3.2.2. Výpočet úhlu ramena v závislosti na souřadnicích bodu A

-90° je v rovnici (1) dodáno proto, aby bylo rameno zároveň s osou x při natočení 0° . V grafu 1 jsou vykresleny hodnoty úhlu natočení pro $R = 350$ mm a pro $y_1 = \langle 150$ mm, 150 mm \rangle , závislost je vykreslena pro zvolený krok 6 mm pro y_1 .

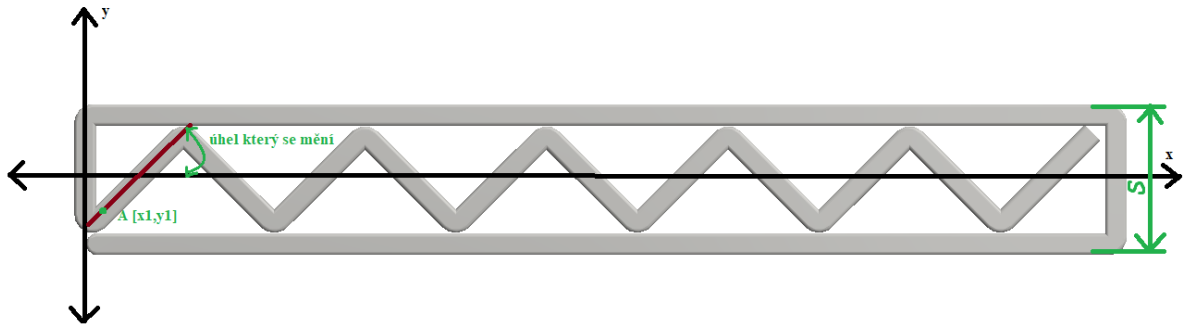
$$\left(\frac{y_1}{R}\right) \arccos -90^\circ = \varphi [^\circ] \quad (1)$$



Graf 1| závislost natočení ramene na poloze

3.3. Ověření a nalezení parametrů, tak aby pohon v ose X jel pouze vkladným směru po přímce $x=0$ bez reverzace

Tento výpočet je závislý na šířce tištěné stěny, délce ramena a úhlu výplně stěny. Úhel výplně stěny byl z parametrizován od 0 do 90 stupňů viz obrázek 13 a šířka byla volena od 0 do 500 mm. Rameno bylo voleno od délky 250 do délky 600 mm.



Obrázek 13|Schéma stěny

3.3.1. Matematické stanovení parametrů

U stanovených parametrů (22), (23), (24) a (25) jsem zvolil délky a omezil vstupní parametry. y_1 je vzdálenost bodu A od nuly v ypsilonové souřadnici. s je šířka stěny a α je úhel natočení výplně stěny podle obrázku 13 je tento úhel zvýrazněn zeleně. R jsou stanovené délky ramene.

$$y_1 \in \left\langle -\frac{s}{2}; \frac{s}{2} \right\rangle \quad (22)$$

$$s \in \langle 0; 500 \rangle \quad (23)$$

$$\alpha \in \langle 0; 90^\circ \rangle \quad (24)$$

$$R \in \{250; 300; 350; 400; 450; 500; 550; 600; 650\} \quad (25)$$



3.3.2. Výpočet bodů šikmé výplně stěny

Výpočet bodů stěny byl proveden podle vzorce $y = k \cdot x$ s tím, že k je funkce tangens úhlu alfa, která definuje její rychlost růstu, viz vztah (2).

$$y_1 = \operatorname{tg}(\alpha) \cdot x_1 \quad (2)$$

3.3.3. Rovnice pro polohu koncového bodu trysky tiskárny s ramenem

Souřadnice bodu A musíme nejdříve spočítat pro polohu v ose x a poté pro polohu v ose y . Z tohoto důvodu byla vytvořena rovnice (3), která vzdálenost x_1 stanovuje jako základní polohu na ose x a k té se přičítá vzdálenost ramene v ose x . V rovnici (4) určuje polohu bodu A v ose y pouze vzdálenost ramene a samozřejmě úhel natočení φ .

$$x_1 = x_0 + R \cdot \cos\varphi \quad (3)$$

$$y_1 = R \cdot \sin\varphi \quad (4)$$

3.3.4. Úprava rovnic (2), (3) a (4)

Po úpravách těchto rovnic byla vytvořena rovnice (5) pro výpočet polohy x_0 což je aktuální poloha pohonu.

$$x_0 = \frac{y_1}{\operatorname{tg}\alpha} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{y_1}{R}\right) \quad (5)$$

Numerickou metodou z rovnice (5) byly postupně počítány polohy pohonu s tím, že předchozí vypočítané hodnoty musely být vždy menší než ty následující, to znamená, že se motor pohyboval pouze dopředu. Z těchto výpočtů se daly následně najít kritické úhly pro různá nastavení tiskárny v závislostech na velikosti úhlu alfa tištěné stěny, délky tisknoucího ramene R a šířky stěny s . Předvedený výpočet je níže proveden pro stěnu širokou 500 mm, délku ramene 500 mm a alfu stěny 60° a 61° , protože mezi těmito dvěma hodnotami lze názorně předvést výpočet kritického úhlu stěny.

**3.3.4.1. Výpočet pro $\alpha=60^\circ$**

$$x0_0 = \frac{y1_0}{tg\alpha} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{y1_0}{R}\right) \quad (27)$$

$$x0_0 = \frac{-250}{tg60^\circ} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{-250}{500}\right) = -577,35 \text{ mm} \quad (28)$$

$$x0_1 = \frac{y1_1}{tg\alpha} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{y1_1}{R}\right) \quad (29)$$

$$x0_1 = \frac{-244,44}{tg60^\circ} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{-244,44}{500}\right) = -577,3 \text{ mm} \quad (30)$$

$$x0_2 = \frac{y1_2}{tg\alpha} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{y1_2}{R}\right) \quad (31)$$

$$x0_2 = \frac{-238,88}{tg60^\circ} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{-238,88}{500}\right) = -577,16 \text{ mm} \quad (32)$$

$$x0_3 = \frac{y1_3}{tg\alpha} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{y1_3}{R}\right) \quad (33)$$

$$x0_3 = \frac{-233,33}{tg60^\circ} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{-233,33}{500}\right) = -576,93 \text{ mm} \quad (34)$$

Stejným principem jako je uvedeno v rovnicích (27) až (34) byly provedeny následující výpočty v programu excel. Celý výpočet je uveden v příloze 1 k bakalářské práci. Stěnu je schopné tisknout za těchto stanovených podmínek, protože výsledky rovnic vycházejí menší než ty následující viz rovnice (35)

$$x0_0 < x0_1 < x0_2 < x0_3 \quad (35)$$

**3.3.4.2. Výpočet pro $\alpha=61^\circ$**

$$x0_0 = \frac{y1_0}{tg\alpha} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{y1_0}{R}\right) \quad (36)$$

$$x0_0 = \frac{-250}{tg61^\circ} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{-250}{500}\right) = -571,59 \text{ mm} \quad (37)$$

$$x0_1 = \frac{y1_1}{tg\alpha} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{y1_1}{R}\right) \quad (38)$$

$$x0_1 = \frac{-244,44}{tg61^\circ} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{-244,44}{500}\right) = -571,67 \text{ mm} \quad (39)$$

$$x0_2 = \frac{y1_2}{tg\alpha} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{y1_2}{R}\right) \quad (40)$$

$$x0_2 = \frac{-238,88}{tg61^\circ} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{-238,88}{500}\right) = -571,66 \text{ mm} \quad (41)$$

$$x0_3 = \frac{y1_3}{tg\alpha} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{y1_3}{R}\right) \quad (42)$$

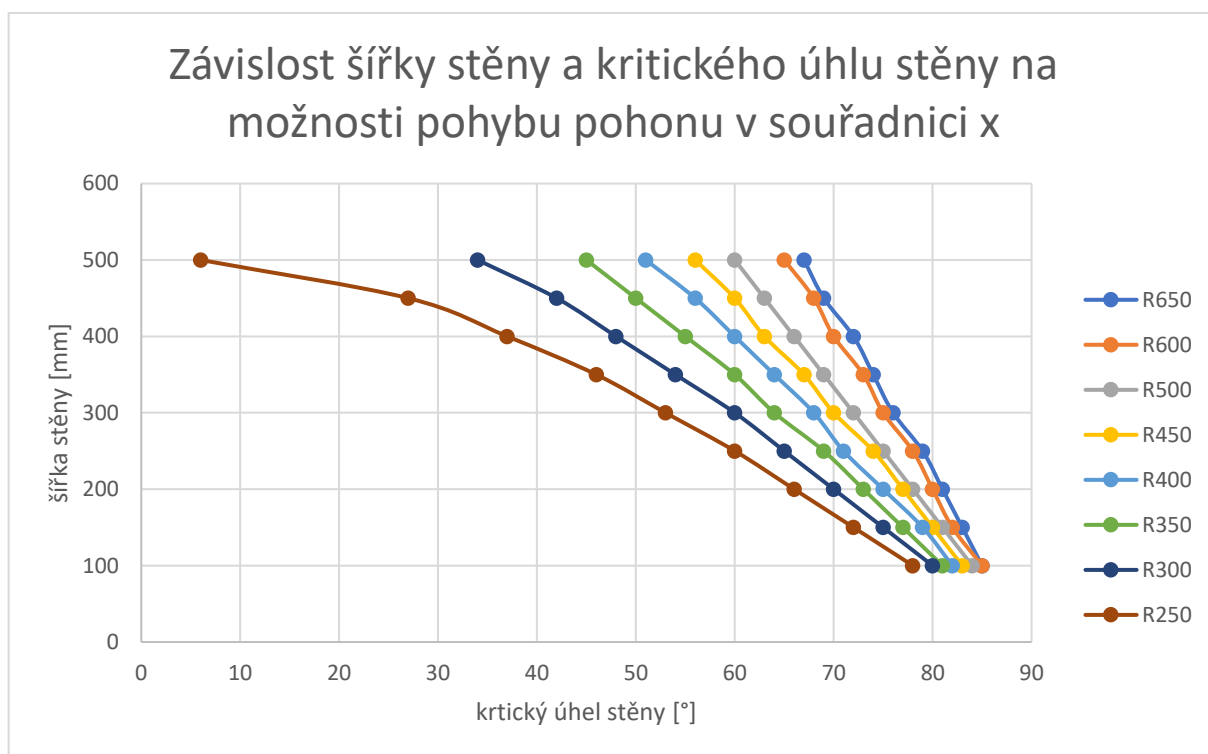
$$x0_3 = \frac{-233,33}{tg61^\circ} - R \cdot \cos\left(\arcsin\frac{-233,33}{500}\right) = -571,56 \text{ mm} \quad (43)$$

Dle uvedených výpočtů v rovnicích (36) až (43) a výpočtům v příloze 1. Z geometrických závislostí délky ramena, šířky stěny a úhlu výplně vyplývá, že nelze vytisknout výplň pod úhlem 61 stupňů, protože některé vypočítané předchozí hodnoty nejsou menší než následující viz rovnice (44). Mezi těmato dvěma úhly se tedy nachází kritický úhel tisku. Přesnější hodnoty bych dosáhl zvolením menšího kroku zadávání souřadnice $y1$ a zvolení menšího kroku u natočení α . Výsledné výpočty jsou zobrazeny v tabulce 1. V té jsou vypsány výsledné kritické úhly výplně stěny pro jednotlivé délky ramene a šířky stěny šířky stěny. Z hodnot v tabulce 1 byl vytvořen graf 2, z něho se dá poté jednoduše odčítat a určovat vhodnou délku ramene pro zvolený úhel výplně stěny. Pokud je např. zadaná stěna s úhlem výplně 65° a šířkou 300 mm, tak lze využít výsledné délky ramen takové, jejichž křivky jsou nad zadaným bodem.

$$x0_0 > x0_1 < x0_2 < x0_3 \quad (44)$$

R650									
kritický úhel přímky [stupně]	67	69	72	74	76	79	81	83	85
šířka stěny [mm]	500	450	400	350	300	250	200	150	100
R600									
kritický úhel přímky [stupně]	65	68	70	73	75	78	80	82	85
šířka stěny [mm]	500	450	400	350	300	250	200	150	100
R550									
kritický úhel přímky [stupně]	63	66	68	71	74	77	79	82	84
šířka stěny [mm]	500	450	400	350	300	250	200	150	100
R500									
kritický úhel přímky [stupně]	60	63	66	69	72	75	78	81	84
šířka stěny [mm]	500	450	400	350	300	250	200	150	100
R450									
kritický úhel přímky [stupně]	56	60	63	67	70	74	77	80	83
šířka stěny [mm]	500	450	400	350	300	250	200	150	100
R400									
kritický úhel přímky [stupně]	51	56	60	64	68	71	75	79	82
šířka stěny [mm]	500	450	400	350	300	250	200	150	100
R350									
kritický úhel přímky [stupně]	45	50	55	60	64	69	73	77	81
šířka stěny [mm]	500	450	400	350	300	250	200	150	100
R300									
kritický úhel přímky [stupně]	34	42	48	54	60	65	70	75	80
šířka stěny [mm]	500	450	400	350	300	250	200	150	100
R250									
kritický úhel přímky [stupně]	6	27	37	46	53	60	66	72	78
šířka stěny [mm]	500	450	400	350	300	250	200	150	100

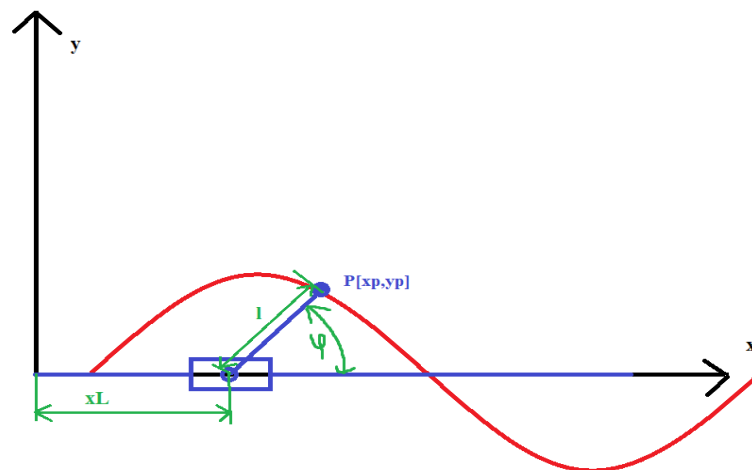
Tabulka 1|charakteristika délky ramen



Graf 2|Charakteristika ramen

3.4. Vyjádření závislostí pohybů os tiskárny

Byly vybrány souřadnice podle obrázku 14. Je zadáno, že maximální tisková rychlost trysky je $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a pohybuje se po červené trajektorii. Délka ramene l je 350 mm a trajektorie po které se pohybuje bod P (tryska) je libovolně zvolená sinusoida, kterou je možné vytisknout, tak aby se motor ve směru tisku pohyboval pouze dopředným posuvem. Podle zadaných údajů je nutné spočítat kinematickou inverzní úlohu.



Obrázek 14|Popis soustavy

3.4.1. Rovnice pro polohu:

Pro popis polohy bodu P je zapotřebí dvou rovnic, protože se pohybujeme ve dvoudimenzionálním prostoru, tedy v rovině, která je určena dvěma na sebe kolmými osami X a Y. Koncová poloha ramene v ose x je určena jako aktuální poloha středu otáčení ramene x_L plus délka ramene v x-ové souřadnici, viz rovnice (6). Koncová poloha ramene v ose y je určena jako délka ramene v y ose, viz rovnice (7).

$$x_p = x_L + l \cdot \cos \varphi \quad (6)$$

$$y_p = l \cdot \sin \varphi \quad (7)$$



3.4.2. Rovnice pro rychlost

Rovnice pro počítám tak, že všechny parametry proměnné v čase v rovnici (6) derivuji podle času. Tím získám rychlosti v rovnici číslo (8). Stejným principem se derivují rovnici (7) a z té vypočítávám rovnici (9).

$$\dot{x}_p = \dot{x}_L - l \cdot \sin\varphi \cdot \dot{\varphi} \quad (8)$$

$$\dot{y}_p = l \cdot \cos\varphi \cdot \dot{\varphi} \quad (9)$$

3.4.3. Rovnice pro zrychlení

Rovnici pro zrychlení počítám tak, že se vezmu rovnici (6) a všechny parametry proměnné v čase dvakrát derivuji podle času. Tím získávám vztah pro zrychlení, rovnice (10), stejného výsledku je možné dosáhnout derivací z rovnic pro výpočet rychlostí. S využitím stejných principů vychází rovnice (11) z rovnice (7).

$$\ddot{x}_p = \ddot{x}_L - l \cdot \cos\varphi \cdot \dot{\varphi}^2 - \sin\varphi \cdot \ddot{\varphi} \quad (10)$$

$$\ddot{y}_p = -l \cdot \sin\varphi \cdot \dot{\varphi}^2 + l \cdot \cos\varphi \cdot \ddot{\varphi} \quad (11)$$

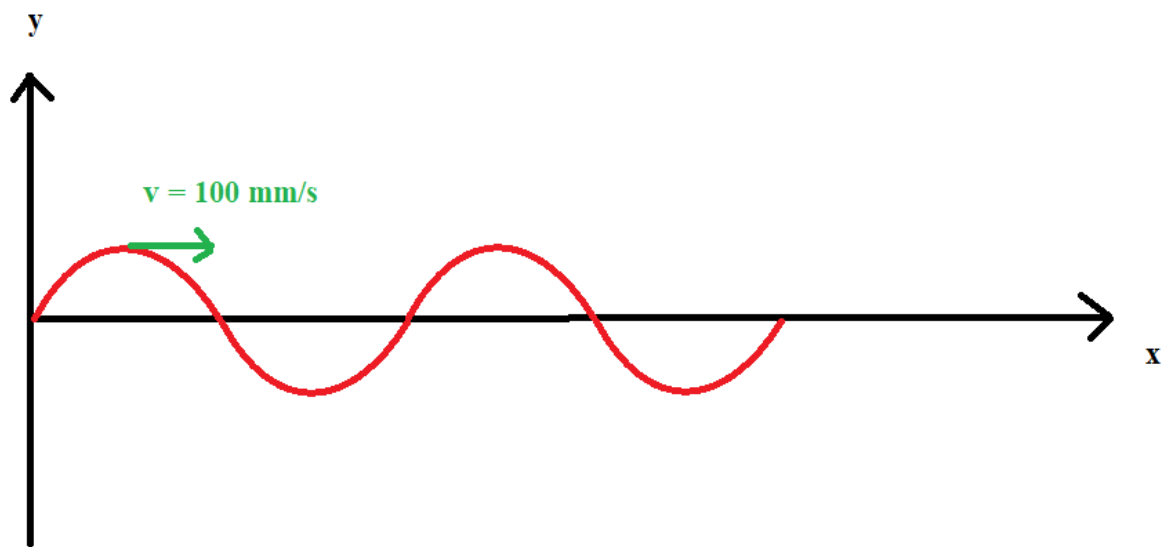
3.4.4. Navržení sinusového průběhu v souřadnicích x a y

Tento průběh je důležitý, protože bude zadán do algoritmu v programu Matlab jako vodící funkce koncového bodu 3D tiskáren. Výpočtem v rovnici (12) se spočítá úhlová rychlost v sinusovém průběhu.

- s je šířka stěny, pro výpočet volím 0,3 m
- r je polovina šířky s stěny $r = 0,15$ m
- v je rychlost koncového bodu tiskárny $v = 0,1$ m·s⁻¹
- $\omega = \frac{v}{r} = 1,5$ rad·s⁻¹ (12)

3.4.5. Rovnice pro rychlost sinusoidy

Bylo zadáno, že rychlost koncového bodu ramene má být konstantní, a to $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Rovnice (13) znázorňuje velikost vektoru pro dosažení celkové rychlosti. Rovnicí (14) definují rychlost koncového bodu v ose y. Pro dosažení rychlosti v koncovém bodu v ose x z rovnice (13) vyjadřují rychlost koncového bodu v ose x a za rychlost koncového bodu v ose y dosazují rovnici (14), protože tyto hodnoty se rovnají. Výsledný pohyb by měl být podobný jako je červená křivka na obrázku 18.



Obrázek 18| Průběh sinusoidy v souřadnicích X a Y

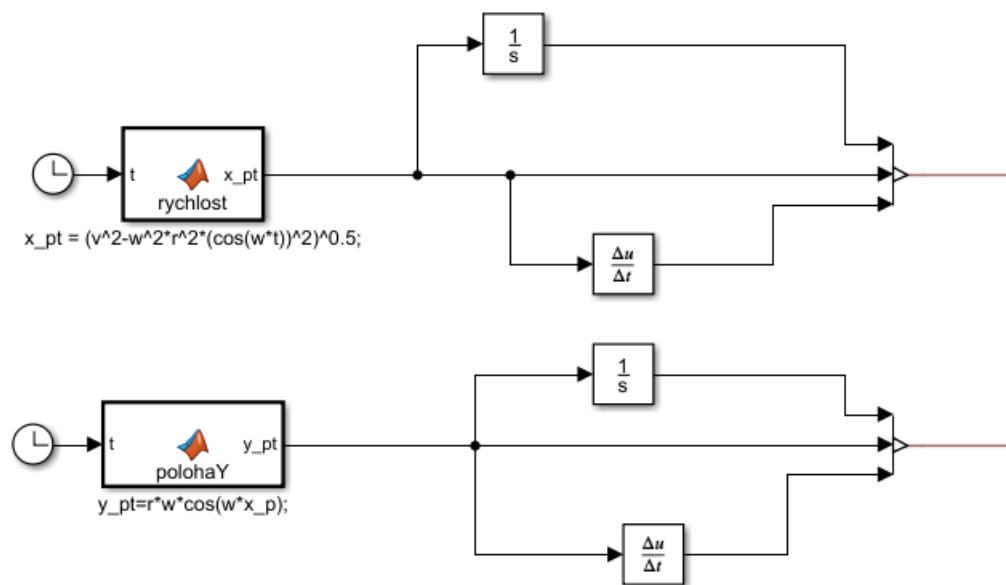
$$\sqrt{\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2} = v \quad (13)$$

$$\dot{y}_p = -r \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (14)$$

$$\dot{x}_p = \sqrt{v^2 - (-r \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t))^2} \quad (15)$$

3.4.6. Rovnice pro polohu a zrychlení při pohybu po sinusoidě

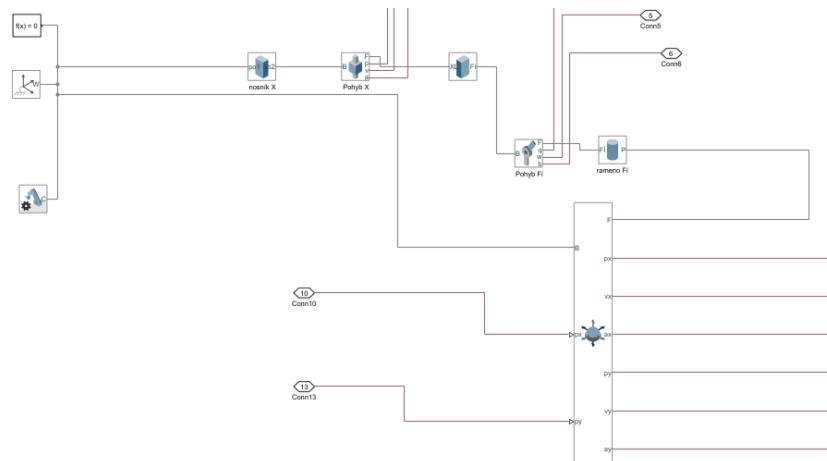
Rovnice byly získány výpočtem v programu Matlab, protože ruční derivování a ruční integrace by byla příliš náročná. Integrací rovnice (15) je získána poloha trysky v ose X a integrací rovnice (14) je získána poloha trysky v ose Y. Integrace je na obrázku 15 znázorněna jako blok, ve kterém je zapsáno $1/s$. Jako počáteční podmínky jsem zvolil polohu $[0;0]$. Zrychlení trysky v ose X jsem získal jako derivaci rovnice (15). Zrychlení trysky v ose Y jsem získal jako derivaci rovnice (14). V programu Matlab se derivace uvádí jako blok, ve kterém je $\Delta u/\Delta t$.



Obrázek 15| Výpočet polohy a zrychlení trysky

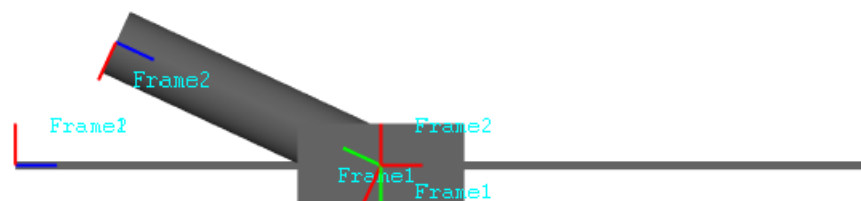
3.4.7. Návrh programu v Matlabu pro 3D tiskárnu s ramenem

První variantou pro porovnání energetické náročnosti je 3D tiskárna s rotačním ramenem. Navržené schéma v programu Simulink za použití nadstavby Simscape je uvedeno na obrázku 16.



Obrázek 16|Simulink tiskárny s ramenem

Pro vytvoření programu používám jednu posuvnou vazbu, která se pohybuje na kvádru a jednu kloubovou vazbu, která se otáčí kolem kvádru středu kvádru s posuvnou vazbou. Pro vytvoření požadovaných vlastností mechanismu dávám na konec ramene koncový bod. Tomuto bodu přiřazuji polohu, rychlost a zrychlení v souřadnici X a Y. Pro polohu nastavuji v programu integrované rovnice (14) a (15) a přiřazuji počáteční hodnoty rovny 0. Pro rychlost přiřazuji rovnice (14) a (15) a pro zrychlení byly přiřazuji derivace rovnic (14) a (15). Rozměr Z v této úloze zanedbávám. Výsledné výpočty tedy probíhají pouze na ploše XY. Výpočty rychlostí probíhají v navrhnutém programu. Soustava je vidět na obrázku 19.



Obrázek 19| Soustava s ramenem

3.4.8. Výpočet kinetických energií soustavy 3D tiskárny s ramenem

Pro porovnání energetické náročnosti pro pohyb 3D tiskárny ve variantě s rotačním ramenem a ve variantě bez ramene je vhodné využít výpočtů kinetické energie. Ve výpočtech je zahrnuta hmotnost částí, se kterými musí pohony jednotlivých os pohybovat. Je uvažováno s ideálním přenosem výkonů, tedy 100 % účinností.

3.4.8.1. Parametry:

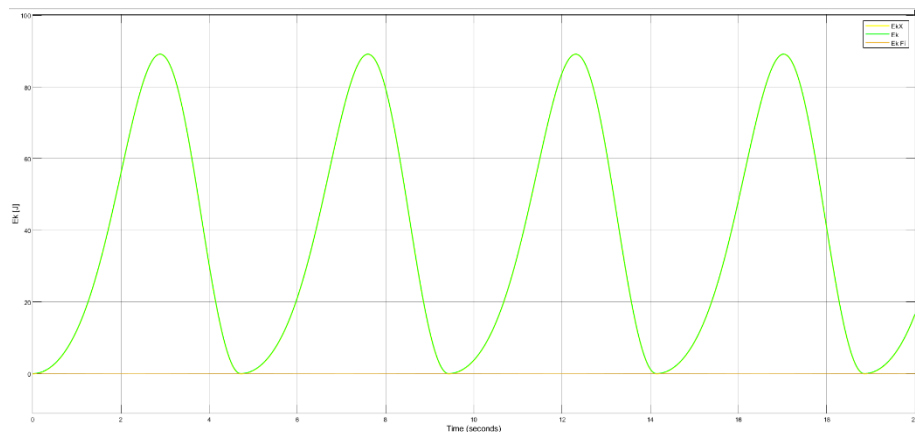
- m_3 = hmotnost tiskového ramene = 50 kg
- m_1 = hmotnost soustavy kterou pohybuje pohon v ose X = 15 t
- m_2 = hmotnost soustavy, kterou pohybuje pohon v ose Y = 200 kg
- v = rychlosti pohonů
- x_t = těžiště ramena tiskové hlavy
- $\dot{\varphi}$ = úhlová rychlost ramena

3.4.8.4. Výpočet kinetických energií pro tisk stěny výplně orientované ve směru X

V rovnici (16) pro tisk výplně orientované ve směru osy X je kinetická energie pohonu osy Y rovna 0, jak lze vidět v rovnici (17). Výsledná energie tedy vychází pouze z pohybů ramena a pohonu X. Maximální energie podle výsledného grafu 3 z programu Matlab vychází 89 J a minimální 0,063 J. V grafu 3 je zelenou čarou zobrazen průběh celkové kinetické energie, žlutou čarou je zobrazen průběh kinetické energie posuvné vazby, která se pohybuje ve směru osy X a oranžovou čarou je zobrazen průběh kinetické energie ramene.

$$E_k = E_{k\varphi} + E_{kx} + E_{ky} \quad (16)$$

$$E_k = \frac{m_3 \cdot x_t^2}{2} \dot{\varphi}^2 + \frac{m_1 v_{xL}^2}{2} + 0 \quad (17)$$



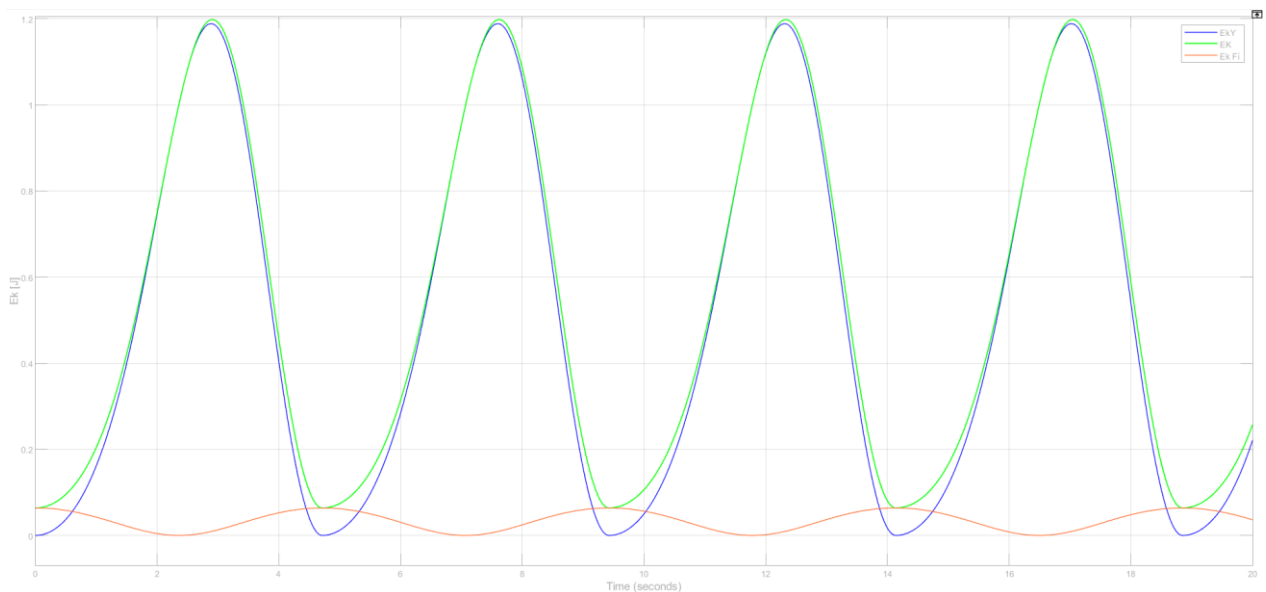
Graf 3 | E_k v čase ve směru X tiskárny s ramenem

3.4.8.4. Výpočet kinetických energií pro tisk výplně stěny orientované ve směru Y

V rovnici (16) pro tisk výplně orientované ve směru osy Y je kinetická energie pohonu osy X rovna 0, jak lze vidět v dosazení do rovnice (18). Výsledná energie tedy vychází pouze z pohybů ramena a pohonu Y. Maximální energie podle grafu vygenerovaného programem Matlab je pouze 1,2 J. Vypočítaná kinetická energie je nejvíce ovlivněna hmotností, se kterou se pohybuje. Na ose X se pohybovalo v ose tisku výplně X s hmotností 15 t, zatímco v rovnici (18) se pohybovalo pouze v ose Y hmotností 200 kg. Průběh celkové kinetické energie tisknutí výplně stěny v ose Y energie je vykreslen v grafu 4. V grafu 4 je modrou čarou zobrazen průběh kinetické energie posuvné vazby, která se pohybuje v ose Y. Oranžovou čarou je zobrazen průběh kinetické energie ramene a zelenou čarou je zobrazen průběh celkové kinetické energie.

$$E_k = E_{k\varphi} + E_{kx} + E_{ky} \quad (16)$$

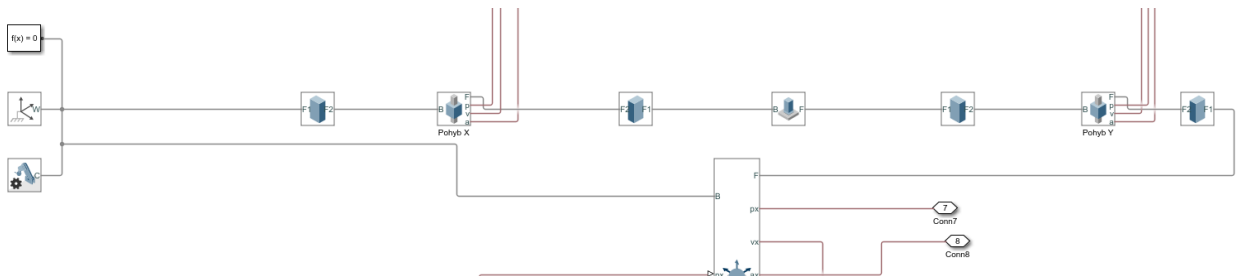
$$E_k = \frac{m_3 \cdot x_t^2 \cdot \varphi^2}{2} + 0 + \frac{m_1 v_{yL}^2}{2} \quad (18)$$



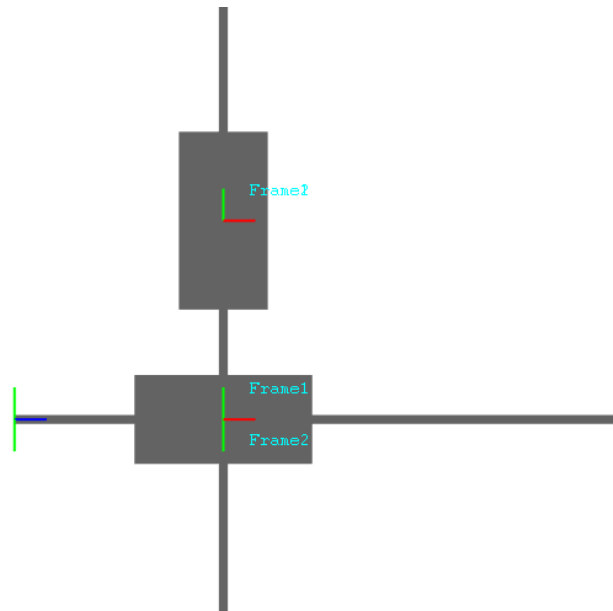
Graf 4| E_k v čase ve směru Y tiskárny s ramenem

3.4.9. Návrh programu v Matlabu pro 3D tiskárnu bez ramena

Vytvoření programu je podobné jako na obrázku 16. Na rám soustavy uchycuji kvádřové těleso s určitou délkou, na které přidělám posuvnou vazbu X. Na posuvnou vazbu připevním pevnou vazbu další kvádřové těleso. Na toto kvádřové těleso dále připevňuji další posuvnou vazbu, která simuluje pohyb v ose Y. Na závěr jsem přidávám koncový bod, podle kterého se budou pohybovat motory soustavy. Do tohoto bodu jsem definuji sinusový průběh jako při simulaci u 3D tiskárny s ramenem. Tento průběh má úplně stejné vlastnosti jako u tiskárny s ramenem, aby bylo možné výsledné pohyby a kinetické energie porovnávat. Tento pohyb probíhá pouze na ploše XY jako u tiskárny s ramenem. Rozměr Z je opět zanedbán, protože tento pohon neoptimalizujeme. Program je ukázán na obrázku 17 a soustava na obrázku 20.



Obrázek 17|Simulink klasické 3D tiskárny



Obrázek 20| Soustava klasické 3D tiskárny

3.4.10. Výpočet kinetických energií soustavy 3D tiskárny bez ramena

Zde jsem opět používám výpočet kinetické energie, první od tiskárny s ramenem se zde pohybují pouze 2 pohony místo tří. Tím pádem je v rovnici (19) kinetická energie vyjádřena pouze součtem kinetické energie v ohybu v ose X a v ohybu v ose Y.

3.4.10.1. Parametry

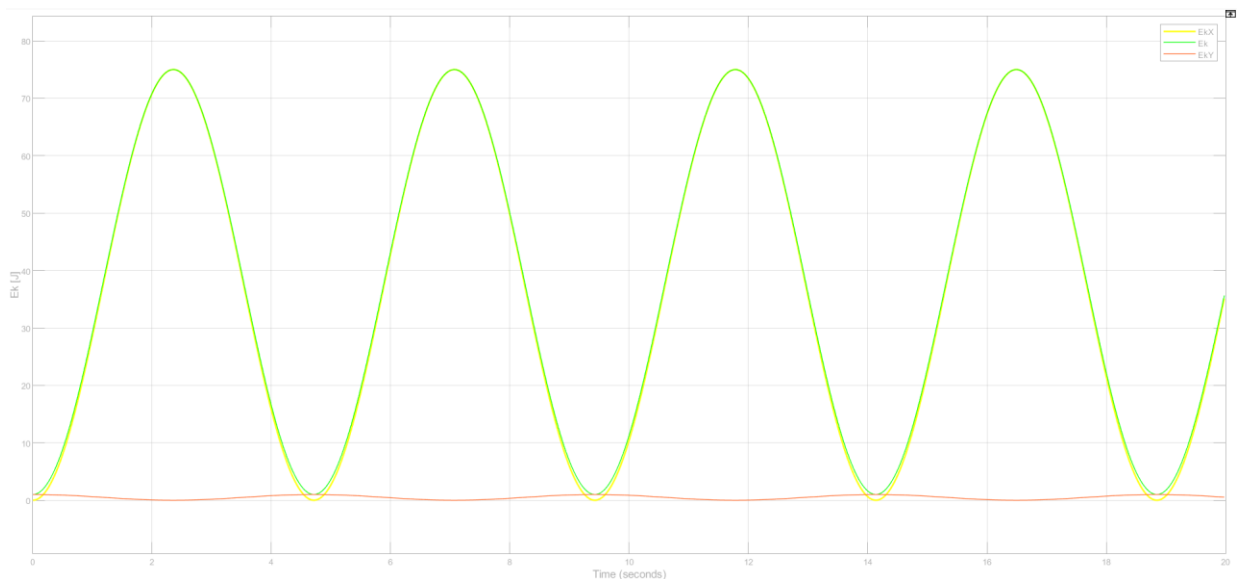
- m_4 = hmotnost soustavy, kterou pohybuje pohon v ose Y = 250 kg
- m_5 = hmotnost soustavy kterou pohybuje pohon v ose X = 15 t
- v = rychlosti pohonů

3.4.10.2. Výpočet kinetických energií pro tisk výplně stěny orientované ve směru X

V rovnici (20) je rozšířená rovnice (19). výsledné výpočty jsou zobrazené v grafu 5. V grafu 5 je zelenou čarou zobrazený průběh celkové kinetické energie, žlutou čarou je zobrazený průběh kinetické energie posuvné vazby X a červenou čarou je zobrazen průběh kinetické energie v ose Y.

$$E_k = E_{kx} + E_{ky} \quad (19)$$

$$E_k = \frac{m_4 v_{yL}^2}{2} + \frac{m_5 v_{xL}^2}{2} \quad (20)$$



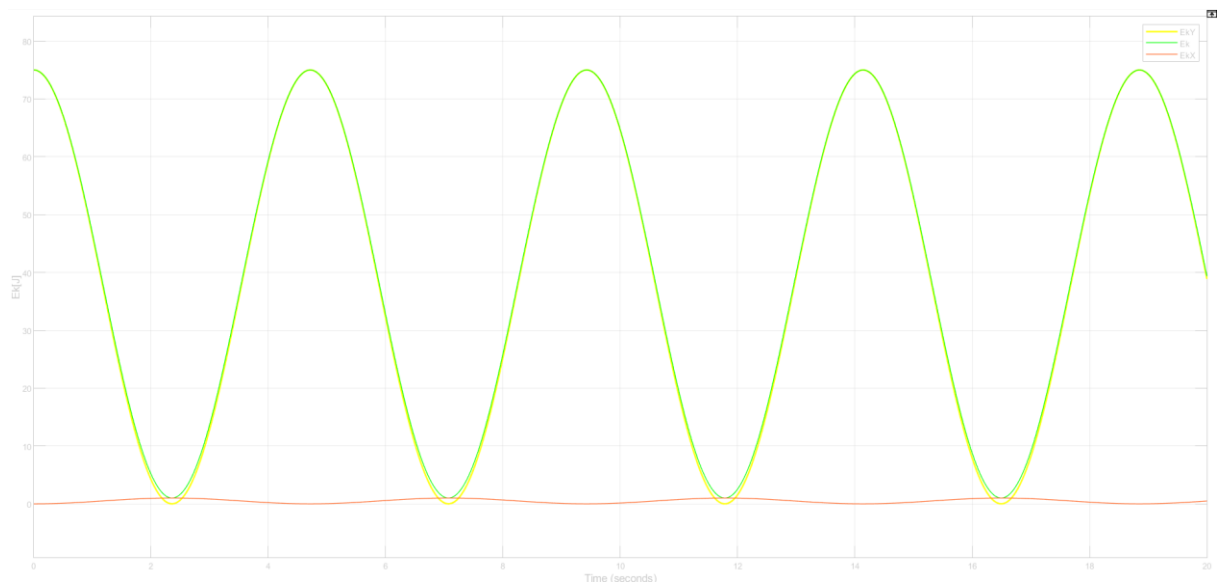
Graf 5 | E_k v čase a ve směru X pro tiskárnu bez ramena

3.4.10.3. Výpočet kinetických energií pro tisk stěny orientované ve směru Y

Na výpočet těchto souřadnic byla využita opět rovnice (19) pouze s menší úpravou. Abych nemusel měnit směr sinusoidy v koncovém bodu do směru y a zachoval model, je v rovnici (20) zaměněna hmotnost. Díky tomu vyjde výsledek pro kinetické energie ve směru osy Y, viz rovnice (21). Vykreslení průběhu je v grafu 6. Maximální hodnota energie vyšla 75 J. Graf 6 je posunutý o půl periody oproti grafu 5. V grafu 6 je zelenou čarou zobrazen průběh celkové kinetické energie, žlutou čarou je zobrazen průběh kinetické energie posuvné vazby na ose Y a červenou čarou je zobrazen průběh kinetické energie v posuvné vazbě na ose X.

$$E_k = E_{kx} + E_{ky} \quad (19)$$

$$E_k = \frac{m_5 v_{yL}^2}{2} + \frac{m_4 v_{xL}^2}{2} \quad (21)$$



Graf 6 | E_k v čase a ve směru Y pro tiskárnu bez ramena



3.4.11. Porovnání průběhů kinetické energie portálové 3D tiskárny bez ramena a s ramenem

U 3D tiskárny bez ramena jsem z výsledků simulace v Simuliku odečetl maximální hodnotu v ose X kinetické energie 75 J a minimální hodnotu kinetické energie 1,25 J. U osy Y jsem odečetl maximální energii 75 J a minimální 1,25 J. Získané maximální a minimální hodnoty jsou stejné. Průběhy v osách X a Y jsou vůči sobě posunuté o polovinu periody a působí na ně stejná hmotnost, ale v jiném směru a v podobných rychlostech. U 3D tiskárny s ramenem jsem odečetl maximální hodnotu kinetické energie v ose X 89,1 J a minimální hodnotu 1,1 J. Při ohybu v ose Y jsem odečetl z grafu maximální hodnotu kinetické energie 1,2 J a minimální hodnotu 0,06 J. Nejdůležitějším parametrem jsou změny kinetické energie, které vykonávají pohony. Změna kinetické energie u klasické tiskárny s dvěma posuvnými vazbami je v tisku výplně stěny v X a Y směru stejná a podle rovnice (45) je rovna hodnotě 73,75 J. Změna kinetické energie u tiskárny s ramenem je rozdílná podle směru tisku. V tisku výplně stěny ve směru osy X je změna kinetické energie vyšší a její hodnota je 88 J viz rovnice (46). Hodnota změny kinetické energie při tisku výplně ve směru osy Y je výrazně nižší, podle rovnice (47) je tato hodnota rovna 1,14 J.

$$\Delta E_k = E_{k\max} - E_{k\min} = 75 - 1,25 = 73,75 \text{ J} \quad (45)$$

$$\Delta E_k = E_{k\max} - E_{k\min} = 89,1 - 1,1 = 88 \text{ J} \quad (46)$$

$$\Delta E_k = E_{k\max} - E_{k\min} = 1,2 - 0,06 = 1,14 \text{ J} \quad (47)$$

3.5. Návrh svařence ramena

Svařenec na obrázku 21 je vařen z 10 komponentů. Na vrchní části se nachází příruba, do které je vytvořeno šest děr pro šrouby M12 o průměru 1,5 mm s tolerancí H13, těmito šrouby se rameno bude montovat k tiskové hlavě s pohonem. Uvnitř velké trubky byla svařena příruba pro snazší nasazování trubky na trysku tiskové hlavy a aby se při manipulaci trubka neohýbala. Všechny svary zobrazené na výkrese jsou navrženy po celém obvodu svařovaných částí. Výkres svařence ramena se nachází v příloze 2.



Obrázek 21| 3D model svařence v polovičním řezu



4. Závěr

První část této bakalářské práce sloužila jako teoretický základ pro získání přehledu o 3D tisku k následující praktické úloze. Tato část se tedy soustředila především na konstrukční řešení 3D tiskáren cementových směsí a jejich použití v provozu.

Druhá část práce se soustředila na praktické řešení problematiky energetické optimalizace tisku za pomoci rozšíření portálové 3D tiskárny o rotační rameno a nalezením vhodných parametrů nastavení 3D tiskárny pro výtisk šikmé výplně s ěny.

V rámci této bakalářské práce jsem vytvořil graf, ze kterého se dá snadno vyčíst, jaké nastavení pro daný tisk musí tiskárna mít, aby výtisk stěny mohl být proveditelný, dále jsem navrhl rameno k portálové 3D tiskárně. Výsledky energetické optimalizace s ramenem vyšly zajímavé. Úspora energie nastává, pokud tiskárna s ramenem tiskne stěnu ve směru osy Y. Naopak zhoršení lze pozorovat při tisku v ose X.

Z tohoto důvodu bych doporučoval rameno na tiskárně mít zapojené a v případě tisku v ose X s ním nepohybovat a tisknout klasickou cestou se dvěma posuvnými pohony – X a Y.



Bibliografie:

- [1] FLEISNER, Miroslav. Co je 3D tiskárna a jak funguje?. In: Miroluk [online]. 2018, 14. 9. 2018 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.miroluk.cz/clanky-co-je-3d-tiskarna-a-jak-funguje.html>
- [2] První zmínky o 3D tisku. In: Miroluk [online]. 2019, 14. 10. 2019 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://3d-tiprvcnz/prvni-zminky-o-3d-tisku/>
- [3] KOVÁŘÍK, Michal, Petr ŠTEMBERK a Pavel SVOBODA. Technologie 3D tisku v architektuře a stavebnictví. Earch [online]. 2018, 3.8.2018 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.earch.cz/technologie/clanek/technologie-3d-tisku-v-architektuře-a-stavebnictví>
- [4] CAVALLO, Christian. All About Powder Bed and Inkjet Head (PBIH) 3D Printing. Thomasnet [online]. [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/powder-bed-and-inkjet-head-pbih-3d-printing/>
- [5] ZARUBIN, Dmitriy. Building a house with a 3D printer. Moohii [online]. [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://moohii.com/blog/d-shape>
- [6] ESSOP, Anas. POLISH RESEARCHERS EXPLORE AUTOMATION FOR 3D PRINTED BUILDING. 3D Printing Industry [online]. 2022 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/polish-researchers-explore-automation-for-3d-printed-building-170796/>
- [7] CLARKE, COREY. APIS COR 3D PRINTS A HOUSE IN ONE DAY. 3D Printing Industry [online]. 2017, 1.3.2017 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/apis-cor-3d-prints-house-one-day-106783/>
- [8] VIALVA, TIA. WASP RELEASES “INFINITY 3D PRINTER” FOR CONSTRUCTION. *3D printing industrz* [online]. 2018, 14.9.2018 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/wasp-releases-inifity-3d-printer-for-construction-139814/>
- [9] MINIBUILDERS: SMALL ROBOTS PRINTING LARGE-SCALE STRUCTURES. *Institute for advanced architecture of California* [online]. [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://iaac.net/project/minibuilders/>
- [10] JAKUPOVIC, Anes. *MINI BUIL–ERS PROJECT - REPORT* [online]. [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <http://www.3dprintetbyggeri.dk/pdf/bes%C3%B8gsrapporter/Minibuilders.pdf>
- [11] MEET FRANK AND HIS FAMILY. *Apis-Cor* [online]. 2022 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.apis-cor.com/3dprinter>



- [12] KUPSA, Tomáš. Co je BIM. *tzbinfo* [online]. 2022, 16.12.2019 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/bim-informacni-model-budovy/20007-co-je-bim#:~:text=BIM%20je%20zkratka%20anglick%C3%A9ho%20term%C3%ADnu,digit%C3%A1ln%C3%AD%20dvoj%C4%8De%20stavby>
- [13] KAMENICKÝ, Josef a Marek ŠTÁDLER. Návrh postprocesoru pro generování G-kódu 3D tiskárny budov z betonových směsí. *tzbinfo* [online]. 2021, 23.8.2021 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/hruba-stavba/22690-navrh-postprocesoru-pro-generovani-g-kodu-3d-tiskarny-budov-z-betonovych-s-esi>
- [14] K čemu slouží G kódy a M kódy? *Macmatic* [online]. 2016, 6.10.2016 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.macmatic.cz/component/content/article/40-technicke-clanky/66-k-cemu-slouzi-g-kody-a-m-kody>
- [15] HEISLER, Ivan. Aditivní výroba ve stavebnictví. *Mmspektrum* [online]. 2022, 9.3.2022 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aditivni-vyroba-ve-stavebnictvi>
- [16] HENN, Matthew. Three-dimensional printing to plan intracardiac operations. *Researchgate* [online]. 2021, 5. 2021 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Original-3D-printer-The-first-commercialized-3D-printer-the-SLA-1-in-1988-Reprinted_fig1_351034281
- [17] Southampton engineers 'ly the w,rld's frst 'printed' aircraft. *Universitz of Southampton* [online]. 2011, 28.7.2011 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://www.southampton.ac.uk/engineering/news/2011/07/28_southampt_on_engineers_fly_the_worlds_first_printed_aircraft.page



Obrázky:

Obrázek 1 Stereografní aparát SLA-1 [16]	2
Obrázek 2 Letadlo y univerzity South Hampton [17].....	2
Obrázek 3 Tisk stěny [13].....	3
Obrázek 4 Tisk metodou práškového spojování [4]	4
Obrázek 5 D-shape tiskárna [5]	4
Obrázek 6 Tisková hlava [6].....	5
Obrázek 7 Průmyslový robot [15].....	7
Obrázek 8 Konstrukční provedení 3D tiskárny [7].....	8
Obrázek 9 Konstrukce Wasp provedení [8].....	9
Obrázek 10 Sestavení vícero tiskáren [8]	9
Obrázek 11 Schéma postprocesu (vlastní tvorba).....	12
Obrázek 12 Schéma tiskárny (vlastní tvorba)	13
Obrázek 13 Schéma stěny (vlastní tvorba)	15
Obrázek 14 Popis soustavy (vlastní tvorba).....	20
Obrázek 15 Výpočet polohy a zrychlení trysky (vlastní tvorba)	23
Obrázek 16 Simulink tiskárny s ramenem (vlastní tvorba).....	24
Obrázek 17 Simulink klasické 3D tiskárny (vlastní tvorba)	27
Obrázek 18 Průběh sinusoidy v souřadnicích X a Y (vlastní tvorba).....	22
Obrázek 19 Soustava s ramenem (vlastní tvorba).....	24
Obrázek 20 Soustava klasické 3D tiskárny (vlastní tvorba)	27
Obrázek 21 3D model svařence v polovičním řezu (vlastní tvorba).....	31



Tabulky:

Tabulka 1 | charakteristika délky ramen (vlastní tvorba) 19

Grafy:

Graf 1 | Závislost natočení ramene na poloze (vlastní tvorba) 14
Graf 2 | Charakteristika ramen (vlastní tvorba) 19
Graf 3 | E_k v čase ve směru X tiskárny s ramenem (vlastní tvorba) 25
Graf 4 | E_k v čase ve směru Y tiskárny s ramenem (vlastní tvorba) 26
Graf 5 | E_k v čase a ve směru X pro tiskárnu bez ramena (vlastní tvorba) 28
Graf 6 | E_k v čase a ve směru Y pro tiskárnu bez ramena (vlastní tvorba) 29

Přílohy:

Příloha 1| Výpočet kritického úhlu (*vlastní tvorba*) CD
Příloha 2| Výkres svařence ramene (*vlastní tvorba*) CD
Příloha 3| Program na výpočet tiskárny s ramenem (*vlastní tvorba*) CD
Příloha 4| Program na výpočet tiskárny bez ramene (*vlastní tvorba*) CD