

Konstrukce vertikální hybridní větrné elektrárny s využitím 3D tisku

Bc. Marek Opravil

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Marek Opravil
Osobní číslo:	T23495
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Konstrukce vertikální hybridní větrné elektrárny s využitím 3D tisku

Zásady pro vypracování

- Vypracujte podrobnou literární rešerši na zadané téma.
- Zhodnoťte dosavadní stav v oblasti vertikálních větrných elektráren.
- Na základě vypracované literární rešerše vymodelujte v CAD Softwaru součásti vertikální větrné elektrárny a připravte model vhodný pro převod do STL formátu.
- Vyberte vhodné polymerní materiály pro výrobu lopatek turbíny a zhotovte experimentální díly pomocí 3D tisku.
- Zhotovené díly opatřete fotovoltaickými články a tyto připravené díly spojte s generátorem elektřiny.
- U připravených komponent experimentálně změřte mechanické vlastnosti a charakterizujte je pomocí SEM.
- Provedte experimentální měření výkonu elektrárny.
- Vyhodnoťte naměřená data, dostatečně popište provedená měření a veškeré výsledky interpretujte pomocí obrázků, grafů, tabulek a textového zápisu.
- Vzniklé závěry dostatečně popište a diskutujte.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Anderson, C. (2020). Wind turbines: Theory and practice. Cambridge University Press.
2. Ghelani, S. D., Gopani, M. N., & Jivani, C. D. (n.d.). VERTICAL AXIS WIND TURBINE: Vertical Axis Wind Turbine.
3. Horvath, J., & Cameron, R. (2020). Mastering 3D printing: A guide to modeling, printing, and prototyping (2nd ed.). APress.
4. Kaviti, A. K., & Shukla, V. (2020). Design, analysis and optimisation of vertical axis wind turbine blade. LAP Lambert Academic Publishing.
5. Li, J. (2019). Design and application of modern synchronous generator excitation systems. Wiley-IEEE Press.
6. Shi, Y., Yan, C., Zhou, Y., Wu, J., Wang, Y., Yu, S., & Ying, C. (2021). Materials for additive manufacturing. Academic Press.
7. Zidane, I., & Saqr, K. (n.d.). Vertical wind: Technology, R&D, and market of vertical axis wind turbines.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Matyáš, Ph.D.**
Centrum polymerních systémů

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 3. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval; v případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....

podpis autora

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o konstrukci vertikální větrné elektrárny se zakomponováním fotovoltaických článků do jejích lopatek. Tato hybridní vertikální větrná elektrárna je v této diplomové práci konstruována ve dvou variantách, a to v odporové a vztlakové. Dalším cílem této práce je zhotovit některé části zmíněných elektráren pomocí FDM 3D tisku.

Klíčová slova: větrná elektrárna, 3D tisk, FDM, fotovoltaika, solární panel, hybridní, elektrárna

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design of vertical wind turbine with the incorporation of solar panels into its blades. This hybrid vertical wind turbine is constructed in two variants in this thesis, namely drag and lift. Another point of this thesis is to manufacture some parts of the mentioned power plants using FDM 3D printing.

Keywords: wind turbine, 3D printing, FDM, photovoltaics, solar panel, hybrid, power plant

Děkuji především mému vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Matyášovi, Ph.D. za jeho vstřícnost a racionální vedení. Také děkuji své přítelkyni za neustálou mentální podporu při tvorbě diplomové práce a její pomoc s pořizováním snímků z výroby turbín. V neposlední řadě děkuji svým rodičům a prarodičům za finanční podporu, díky které jsem mohl výrobu hybridních větrných elektráren realizovat.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 3D TISK.....	13
1.1 TYPY 3D TISKU	13
1.1.1 Fused Deposition Modeling	13
1.1.2 Stereolitografie	16
1.1.3 Selektivní laserové slinování.....	17
1.1.4 Slinování kovového prášku laserem.....	17
1.2 VÝVOJ A TYPY FDM 3D TISKÁREN	18
1.2.1 Bedslinger	20
1.2.2 Core XY	22
1.2.3 Delta	23
1.2.4 Multimateriálové systémy	24
1.3 TYPY TISKOVÝCH STRUN	26
1.4 HIGH-TECH FILAMENTY	28
1.4.1 ASA.....	28
1.4.2 PC-ABS.....	29
1.4.3 PA6-CF	29
1.4.4 PPS-CF	30
1.4.5 PEEK.....	31
1.5 DRUHY DEFEKTŮ VZNIKAJÍCÍCH PŘI 3D TISKU.....	31
1.5.1 Warping.....	32
1.5.2 Ghosting	33
1.5.3 Stringing.....	33
1.5.4 Layer-shift	34
1.5.5 Oozing	34
1.5.6 Rozdílné odstíny lesku stěny	35
2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY A JEJICH ROZDĚLENÍ.....	36
2.1 VERTIKÁLNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY VAWT	36
2.1.1 Odporové turbíny	36
2.1.2 Vztlakové turbíny	37
2.2 HORIZONTÁLNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY HAWT.....	39
2.3 FOTOVOLTAIKA A FV ELEKTRÁRNY	42
2.3.1 Princip funkce FV článků a jejich recyklace.....	42
2.3.2 Diferenciace FV panelů dle využívaných materiálů	44
2.3.3 Flexibilní FV panely	46
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	48
3 ODPOROVÁ VERTIKÁLNÍ HYBRIDNÍ VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA	49
3.1 PRIMÁRNÍ ZPŮSOB GENEROVÁNÍ ELEKTRINY	49

3.2	SEKUNDÁRNÍ ZPŮSOB GENEROVÁNÍ ELEKTŘINY	50
3.3	3D TIŠTĚNÉ SOUČÁSTI	51
3.4	NETIŠTĚNÉ FUNKČNÍ DÍLY	54
3.4.1	Hřidel.....	54
3.4.2	Ložiska	54
3.4.3	Magnety.....	55
3.4.4	Kluzný kroužek	55
3.4.5	Usměrňovač střídavého proudu.....	56
3.5	PRŮBĚH MĚŘENÍ NAPĚTÍ NA VINUTÍ	57
3.6	PRŮBĚH MĚŘENÍ NAPĚTÍ Z FOTOVOLTAIKY	58
4	VZTLAKOVÁ VERTIKÁLNÍ HYBRIDNÍ VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA	60
4.1	KONSTRUKCE LOPATEK A UCHYCENÍ.....	60
4.2	FOTOVOLTAIKA VZTLAKOVÉ VAWT	62
4.3	PRŮBĚH MĚŘENÍ NAPĚTÍ NA VINUTÍ	65
4.4	PRŮBĚH MĚŘENÍ NAPĚTÍ Z FOTOVOLTAIKY	66
5.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA PLA	69
5.2	TAHOVÁ ZKOUŠKA ASA	70
5.3	TAHOVÁ ZKOUŠKA PET-G HF	73
5.4	SNÍMKY Z ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU	75
5.4.1	Diskuze k SEM mikroskopii.....	79
	ZÁVĚR.....	80
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	83
	SEZNAM OBRÁZKŮ	91
	SEZNAM TABULEK.....	94
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	95
	SEZNAM PŘÍLOH.....	98

ÚVOD

Tato diplomová práce nepřímo navazuje na bakalářskou práci s názvem Výroba komponent bezkartáčového DC (stejnoseměrného) motoru s využitím 3D tisku. Některé elektromotory lze totiž použít i reverzně jako generátory elektřiny. V tomto případě se bude jednat o alternátory. Tato diplomová práce se zaměří na možnost generování elektřiny za použití 3D tištěného alternátoru poháněného větrnou turbínou. Konstrukce použitého alternátoru je velmi podobná bezkartáčovým DC motorům, které byly popsány ve zmíněné bakalářské práci.

V první části této diplomové práce budou podrobně popsány principy 3D tisku, tiskové materiály, modernizace 3D tiskáren včetně jejich automatizace a tisku více materiálů. Druhá polovina teoretické části se zabývá energetikou – především vertikálními a horizontálními větrnými elektrárnami, jejich konstrukcí a principem funkce. V závěru teoretické části je věnována pozornost fotovoltaickým panelům, jak konvenčním, tak i speciálním a flexibilním typům.

Pro funkčnost generátoru bylo nutno vymyslet způsob, jakým bude přeměňovat určitý typ energie na energii elektrickou. Z názvu tématu této diplomové práce vyplývá, že bude pro generování elektřiny využíváno větrné energie. Experimentálně budou vymodelovány v modelovacím 3D programu lopatky dvou typů větrných turbín. Nejprve bude konstruována jednodušší hybridní vertikální větrná elektrárna – odporová. Jako druhá bude zkonstruována vztlaková hybridní vertikální větrná elektrárna. U vztlakové je náročnější modelování i výroba lopatek. Nutno podotknout, že u obou typů elektráren budou lopatky zhotoveny za pomoci 3D tiskárny z adekvátních polymerů. Pro zvýšení efektivity těchto větrných elektráren budou do jednotlivých lopatek zakomponovány flexibilní fotovoltaické panely – z toho důvodu je v názvu obou elektráren „hybridní“.

S postupem času dochází k velkému rozvoji technologií a průmyslu. Díky cenové dostupnosti 3D tiskáren lze dnes snadno v domácích podmínkách s pomocí 3D modelovacích programů přenést virtuální modely do reálné podoby právě za pomoci 3D tiskárny. S rozvojem průmyslu se bohužel nesou i negativní dopady na životní prostředí, především kvůli jeho znečišťování, ať už nerecyklovatelnými odpady či samotnými emisemi spalin do ovzduší. Proto se tato diplomová práce zaměřuje na efektivní využívání obnovitelných zdrojů v podobě větrné a solární energie.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 3D TISK

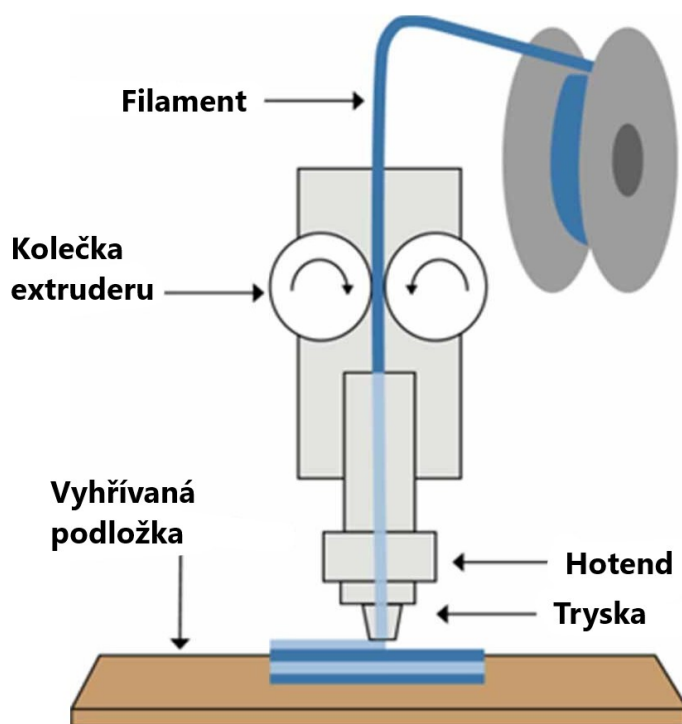
3D tisk je v současnosti velmi pokročilou a rozšířenou výrobní technologií. Jedná se o opak konvenčního obrábění, a to z důvodu, že se v tomto případě materiál přidává – 3D tisk spadá do tzv. AM (additive manufacturing). Nejčastěji funguje na principu vrstvení materiálu, ať už kontinuálně po obvodu nebo po celé ploše vrstvy. Je zde také velká variace materiálů, jenž mohou být na 3D tisk použity. Od betonu, přes polymery či fotopolymery, až po jedlé potraviny, jako je čokoláda či maso. V této diplomové práci bude dopodrobna probrán a využíván pouze 3D tisk polymerů.

1.1 Typy 3D tisku

Rozdělení typů 3D tisku spočívá v technologiích využívaných pro vrstvení materiálu. Ve většině případech se každá technologie od té druhé diferenciuje na základě používaného materiálu pro výsledný výtisk. V následujících čtyřech kapitolách budou popsány některé z nejpoužívanějších a nejdůležitějších technologií 3D tisku v průmyslu.

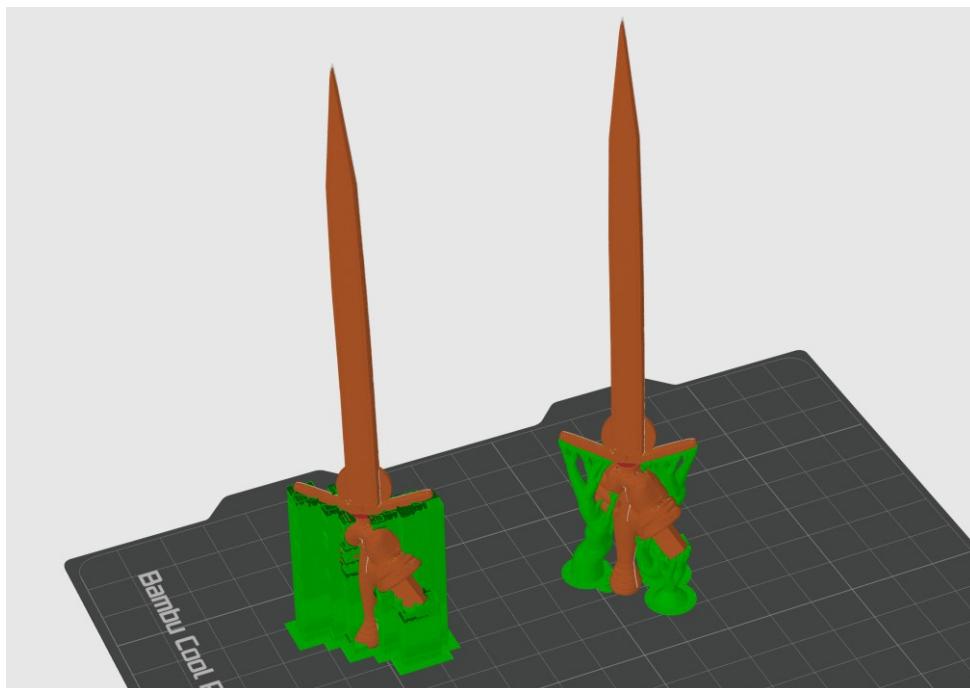
1.1.1 Fused Deposition Modeling

Fused Deposition Modeling neboli FDM v doslovném překladu znamená „modelování tavené depozice“. V praxi se jedná o tavení polymerního materiálu ve formě struny s jednotným průřezem, přes trysku zahřátou nad teplotu tání daného polymeru. Pomocí ozubených koleček extruderu je posléze tato polymerní struna vtlačena do hotendu, jenž vyúsťuje právě tryskou.



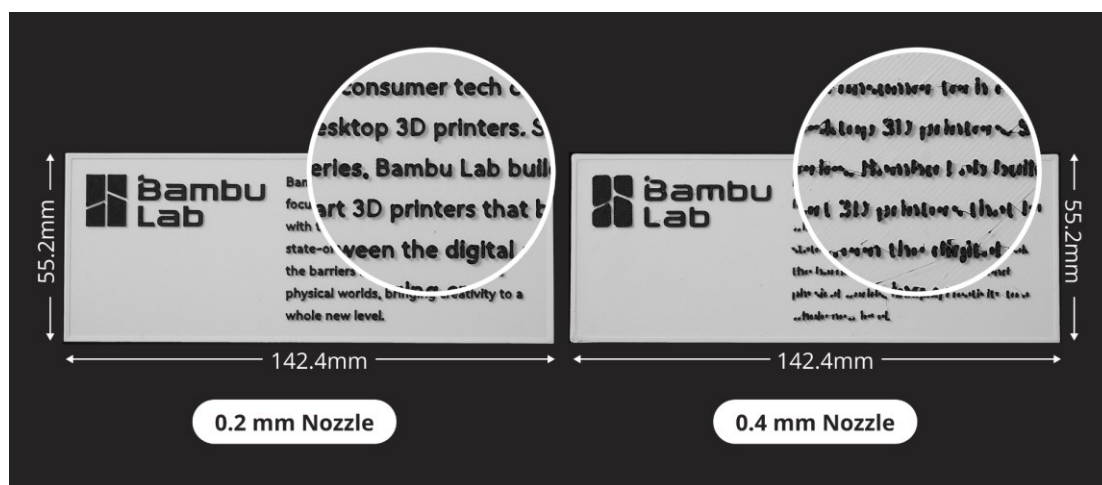
Obrázek 1 Princip FDM [12] (převzato a upraveno)

Tisková hlava musí být schopna pohybu po souřadnicích X Y a Z, proto je možné konstatovat, že 3D tiskárna typu FDM je tříosý NC (číslicově řízený) stroj. Ze zkratky NC vyplývá, že tyto stroje pro svou funkčnost potřebují nějaký g-kód, což je soubor příkazů o teplotách, pohybech a ostatních netiskových úkonech. G-kód je výstupem ze sliceru, což je program – preprocessor, do kterého je nahrán 3D model, jenž chceme, aby 3D tiskárna vytiskla. Ve sliceru se nejčastěji nastavuje výška vrstev, ze kterých bude výtisk složen. Obecně platí, že čím je menší výška vrstvy, tím kvalitněji se bude výtisk jevit, ale zároveň se tím zvýší doba tisku. Dále je zde možné nadefinovat tisk podpěr, které jsou nutností pro tisk modelů s převisy – nelze tisknout „do vzduchu“, výtisk musí být vždy podepřen buďto podložkou, předchozí vrstvou nebo právě podpěrami. V roce 2017 byly ve sliceru Ultimaker Cura zavedeny tzv. stromové podpěry, které oproti klasickým podpěrám vykazují lepší výškovou stabilitu, tisknutelnost a můžou ušetřit materiál i tiskový čas. [1, 2, 4, 5, 9]



Obrázek 2 Porovnání normálních a stromových podpěr ve sliceru BambuStudio [foto autora]

U FDM 3D tisku je také možné používat různé průměry trysek. Pro komerční tiskárny, které tisknou nejčastěji z filamentu o průměru 1,75 mm je nejrozšířenější tryska s výstupním průměrem 0,4 mm, avšak pro speciální aplikace můžeme průměr trysky snížit až na 0,2 mm (vysoce detailní tisk, možnost tisku malých písmenek – menší průměr trysky otevírá možnost tisku tenčích linek). S takovou tryskou je potřeba počítat s delší dobou tisku, nižší strukturální pevností výtisku a s větším rizikem ucpání trysky. Je nutné použít neplněný filament s dobrými tokovými vlastnostmi.



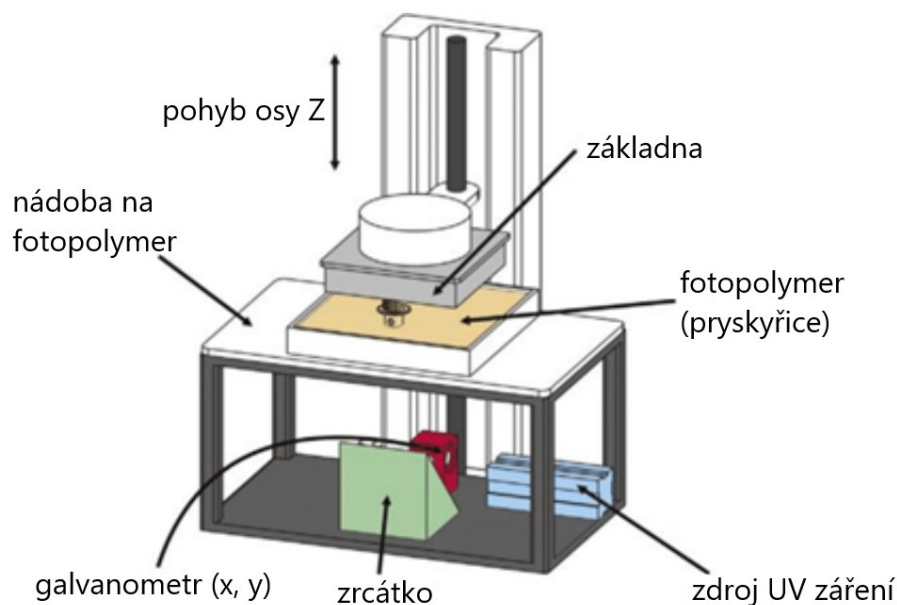
Obrázek 3 Tisk 0,2 mm tryskou (vlevo) v porovnání s tiskem stejného modelu 0,4 mm tryskou (vpravo) [13] (převzato a upraveno)

Chceme-li naopak zvětšit pevnost výtisku a zároveň zkrátit čas tisku, je vhodné použít trysku s průměrem 0,6 mm, 0,8 mm nebo dokonce 1 mm. Tyto trysky se hodí především pro větší výtisky, kde je spíše kladen důraz na funkčnost než na vzhled. Výška vrstvy (kvalita tisku) je ovlivněna velikostí trysky, přičemž větší tryska obvykle znamená vyšší výšku vrstvy a rychlejší tisk, ale nižší úroveň detailu. Zároveň platí, že čím větší bude použita tryska, tím vyšší bude spotřeba tiskového materiálu.

Trysky s průměrem větším, než je standartní 0,4 mm tryska jsou také vhodné k tisku filamentů s plnivý jako jsou skelná vlákna, uhlíková vlákna, dřevěné či kovové prášky, či stroncium-aluminát používaný ve fosforeskujících filamentech, a to z důvodu menšího rizika ucpání trysky. Všechna tato zmíněná plniva zároveň činí tiskové struny více abrazivními, oproti neplněným strunám, proto je nutno počítat s větším opotřebením trysky. Ideální je ji vyměnit za tvrzenou trysku, případně za trysku s rubínovou špičkou, která oproti ocelovým tryskám vykazuje téměř nulové opotřebenění i po dlouhodobém tisku s abrazivními materiály. [2, 4, 5, 13, 15]

1.1.2 Stereolitografie

SLA, tedy stereolitografie, je vůbec první technologie 3D tisku, která byla vyvinuta. Tato metoda je známá svou vysokou přesností, což ji činí ideální pro výrobu detailních prototypů, například v stomatologii, kde se využívá k tisku modelů chrupu. Výška vrstvy se pohybuje mezi 0,015 mm a 0,1 mm, což zaručuje jemné detaily. Princip tisku spočívá ve vytvrzování fotosenzitivní pryskyřice pomocí UV laseru. Tisková hlava, která obsahuje galvanometr, selektivně ozařuje místa, kde je potřeba pryskyřici vytvrdit. Galvanometr přesně řídí pohyb zrcadel, která směřují laserový paprsek na požadované oblasti, což umožňuje správné vytvrzení každé vrstvy. Jakmile je jedna vrstva hotová, tisková plocha se posune o jednu vrstvu níže (nebo výše) a proces vytvrzování se opakuje. Tento cyklus se opakuje, dokud není celý objekt vytvořen vrstvu po vrstvě. [9, 10]



Obrázek 4 Princip 3D tisku metodou SLA [16] (převzato a upraveno)

1.1.3 Selektivní laserové slinování

SLS neboli selektivní laserové slinování je metoda aditivní výroby, která využívá výkonný laser (např. CO₂ laser) k tavení a spojování jemného práškového materiálu, jako je PA, PAEK, PS, TPE nebo PC. Laser selektivně ozařuje místa podle digitálního 3D modelu a vytváří tak pevnou strukturu. Aby byl proces efektivnější, je prášek předehříván topnými články na teplotu blízkou bodu tání, což usnadňuje jeho slinování.

Jednou z hlavních výhod SLS je, že nevyžaduje podpurné struktury – neztavený prášek slouží jako opora pro tisknutý objekt. Výroba probíhá postupným nanášením a tavením jednotlivých vrstev, dokud není celý díl hotový. Tato technologie je ideální pro složité a mechanicky odolné součásti a hojně se využívá v malosériové výrobě.

K výrobě stačí pouze prášek a laser, nejsou potřeba žádná pojiva ani příměsi. Nicméně metoda má i své limity – nelze jí vytvořit uzavřené duté objekty, protože uvnitř by zůstal nezpracovaný prášek. Další nevýhodou je vysoká energetická náročnost. Prášek musí být neustále předehříván a výrobek udržován při stabilní teplotě, přičemž nejvíce energie spotřebovává samotný laser. Proto mají SLS tiskárny běžný příkon okolo 5 kW. [3, 4, 5]

1.1.4 Slinování kovového prášku laserem

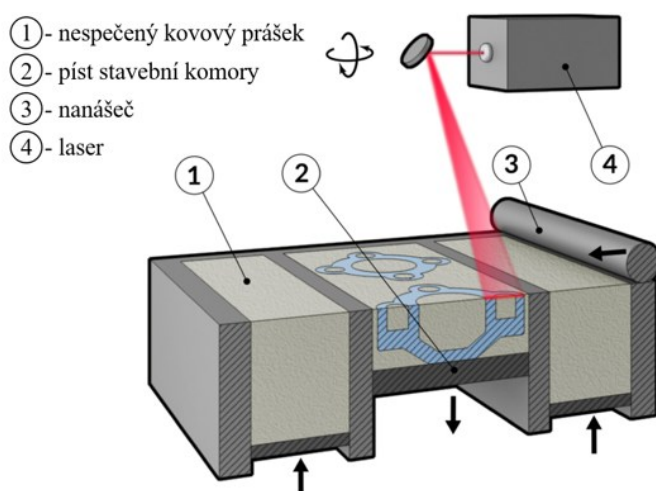
Direct Metal Laser Sintering (DMLS), v překladu slinování kovového prášku laserem, známé také jako Selective Laser Melting (SLM), je pokročilá technologie 3D tisku kovů. Na rozdíl od selektivního laserového slinování (SLS), kde dochází pouze ke spékání práškového

materiálu, při DMLS/SLM dochází k jeho úplnému roztavení. Výsledkem je homogenní kovová struktura s vynikajícími mechanickými vlastnostmi.

Tato metoda využívá kovové prášky, jako jsou hliník, měď, kobalt, chrom, titan, platina, wolfram nebo různé slitiny. Jelikož dochází k tavení kovů, tisk probíhá v ochranné atmosféře inertních plynů, například argonu či dusíku, aby se zabránilo oxidaci materiálu.

Jedním z hlavních rozdílů oproti SLS je nutnost použití podpurných struktur při tisku částí s převýšením nad 45°. Velké teplotní rozdíly mezi roztaveným kovem a okolním materiálem mohou vést ke vzniku vnitřního pnutí, deformacím a ohýbání součástí. Podpory pomáhají odvádět přebytečné teplo a stabilizovat díl během tisku.

Mezi hlavní výhody SLM patří možnost výroby složitých geometrií, které by tradičními metodami nebyly realizovatelné, minimalizace odpadu oproti obrábění a široká škála použitelných materiálů. Nevýhody zahrnují vysokou pořizovací cenu tiskáren, vysokou spotřebu energie laseru a nutnost dodatečných úprav – odstranění podpěr, broušení ostrých hran či čištění od zbytkového prášku. [5, 6, 15]



Obrázek 5 Princip 3D tisku metodou DMLS [17]

1.2 Vývoj a typy FDM 3D tiskáren

Postupem času se 3D tiskárny zdokonalují v mnoha ohledech. Ať už se jedná o hardware, kde můžeme vidět použití kvalitnějších materiálů např. na pojezdy, vodící tyče, robustnější konstrukce, kvalitnější oceli pro hotend, extruder atp., tak i v software těchto NC strojů. Na následujícím obrázku můžeme vidět dvě 3D tiskárny od stejné značky, avšak model je stejný. Jedná se o 3D tiskárnu Ender 3 z roku 2018 (vlevo) a Ender 3 V3 z roku 2023. Starší model má konstrukci z extrudovaných hliníkových profilů, přičemž pojezdy os jsou řešeny

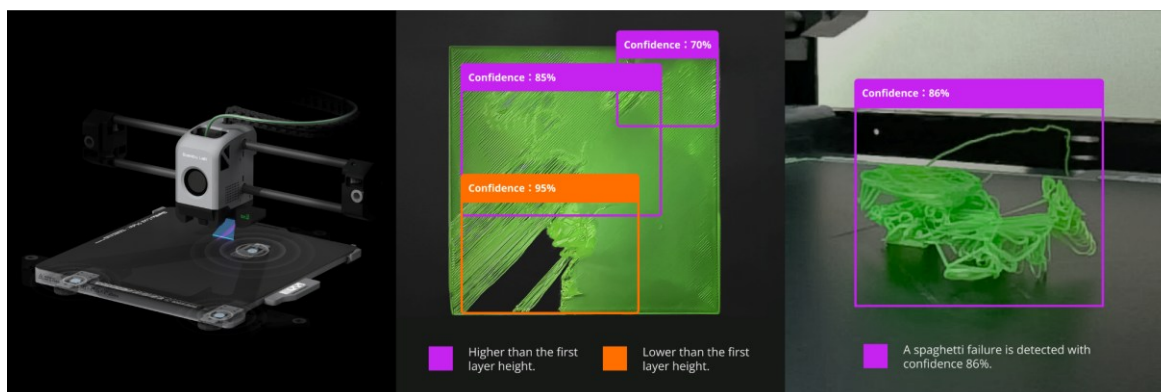
POM kolečky na ložiskách, což často vedlo k rychlému opotřebení pojezdů. Verze 3 z roku 2023 má naopak robustnější ocelovou konstrukci, pojezdy již tvoří ocelové hlazené tyče, po kterých se pohybují lineární ložiska, která mají oproti POM kolečkům mnohem vyšší životnost. V neposlední řadě je nutno zmínit, že většina dnešních 3D tiskáren je již vybavena automatickým vyrovnáváním tiskové podložky. U staršího modelu Ender 3 bylo nutno podložku vyrovnat před uvedením tiskárny do provozu manuálně, což mohlo být pro některé uživatele zdoluhavé či náročné. Pro usnadnění jsou dnes 3D tiskárny vybaveny různými mechanickými či piezoelektrickými senzory, které automaticky před započetím tisku nasnímají rovinnost tiskové podložky. [14, 18, 40]



Obrázek 6 Porovnání 3D tiskáren Ender 3 – první a třetí generace [19, 20] (převzato a upraveno)

Do zlepšení software 3D tiskáren můžeme zařadit např. input shaping. Jedná se o funkci, která zjednodušeně umožňuje 3D tiskárně kompenzovat vibrace vzniklé rapidními pohyby tiskové hlavy v kombinaci s vysokými akceleracemi. Bez input shapingu by docházelo k vychylování trysky od její požadované polohy právě kvůli velkým akceleracím tiskové hlavy. Velké akcelerace (zrychlování a zpomalování tiskové hlavy), vedou k setrvačným silám, které způsobují vibrace tiskárny, což negativně ovlivňuje kvalitu tisku. Input shaping dokáže tyto vibrace částečně kompenzovat a tím zlepšit kvalitu tisku. Input shaping funguje tak, že modifikuje řídicí signály krokových motorů, aby minimalizoval rezonance konstrukce tiskárny. Výsledkem je plynulejší a přesnější pohyb trysky, což vede ke zvýšení kvality tisku i možnosti tisku při vyšších rychlostech bez ztráty přesnosti.

S postupem času, kdy se stále více využívá umělá inteligence pro usnadnění lidské práce se určité prvky AI začínají objevovat i ve spojitosti s 3D tiskem. Umělá inteligence je hojně využívána na design některých 3D modelů, kde jsou kladeny požadavky na nízkou hmotnost a strukturální pevnost, jako je tomu např. u držáků polic na zeď. Kromě designu a optimalizace 3D modelů může být umělá inteligence obsažena přímo v software některých 3D tiskáren v podobě AI LiDARu. AI LiDAR (Light Detection and Ranging) je technologie využívající laserový paprsek k měření vzdálenosti a analýze povrchu s využitím umělé inteligence pro posouzení chybovosti tisku. 3D tiskárny s touto technologií můžou automaticky zastavit tisk, pokud je detekována špatná adheze první vrstvy výtisku k podložce. Tisk může být také zastaven, když LiDAR zpozoruje zborcení výtisku z podložky, jelikož pak tryska extruduje do vzduchu chomáč polymeru, který není žádoucí. Zároveň LiDAR pomáhá k lepšímu vyrovnaní tiskové podložky. Tiskárny bez AI LiDARu vybavené automatickým vyrovnáváním tiskové podložky spoléhají pouze na mechanický dotyk trysky na podložku. Tiskárny s LiDAREm navíc spoléhají právě na snímanou vzdálenost, tudíž je podložka vyrovnána dokonaleji. [18, 21]

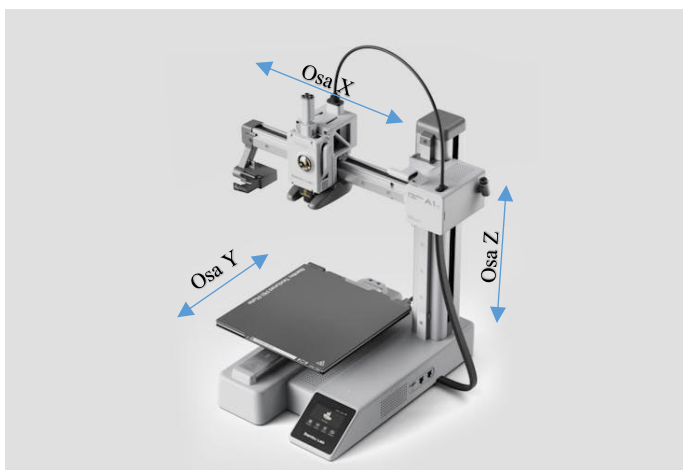


Obrázek 7 Vizualizace funkce AI LiDARu u 3D tiskárny Bambulab X1C [21]

1.2.1 Bedslinger

Bedslinger je typ 3D tiskárny s kartézským souřadným systémem, kde se tisková hlava pohybuje podél osy X a tisková podložka se pohybuje na ose Y. Tento design je populární zejména u modelů, jako jsou Prusa MK4, Creality Ender 3 nebo Bambulab A1, a je oblíbený díky své jednoduchosti, dostupnosti a širokému spektru uživatelů. Konstrukce umožňuje snadnou údržbu a relativně nízké pořizovací náklady, avšak pohybující se podložka může při vyšších rychlostech způsobovat vibrace, které mohou ovlivnit kvalitu tisku, zejména u větších modelů. U bedslingerů je nutné tisknout menšími rychlostmi než na 3D tiskárnách se stabilnější konstrukcí, jako např. core XY, jelikož pohyb celé vyhřívané podložky vpřed

a vzad může mít za následek tzv. layer-shift, což je v překladu přeskočení vrstvy. Tato tisková chyba se může stát, když krokový motor nezvládne udržet pozici, kvůli náporu velké setrvačné síly. Tento typ 3D tiskáren zároveň zabírá více prostoru než např. core XY tiskárny se stejně velkou tiskovou plochou, protože pohyb podložky vpřed a vzad vyžaduje přítomnost pojezdů v ose Y, což tiskárnu činí dlouhou právě ve směru Y. [8]



Obrázek 8 Obrázkový popis os u 3D tiskárny typu bedslinger [22] (převzato a upraveno)

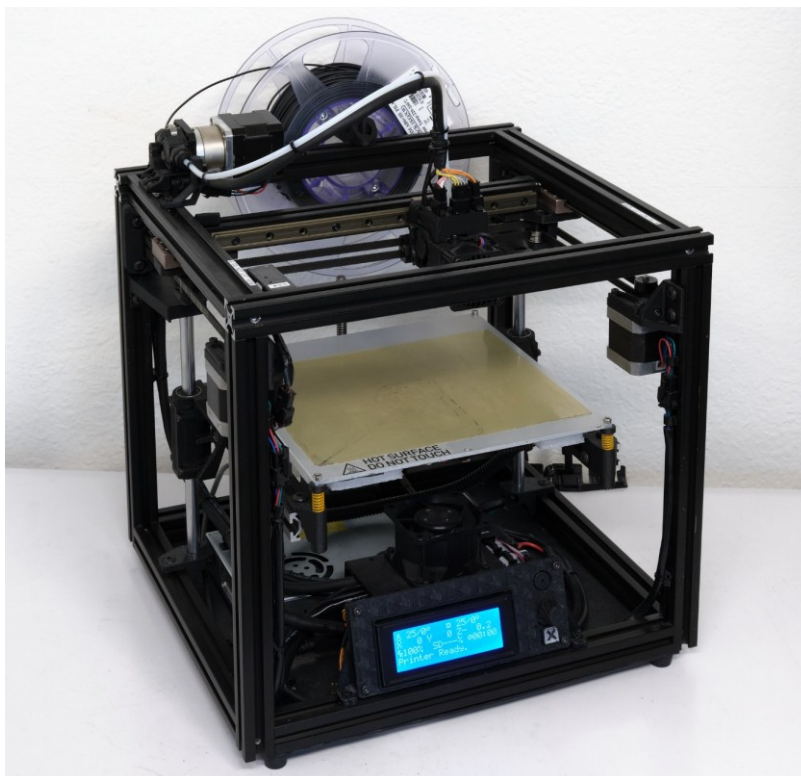
Některé 3D tiskárny typu bedslinger mají díky své velké komunitě enormní výhodu oproti core XY tiskárnám, a to je možnost jednoduché automatizace. Zatímco core XY tiskárny jsou většinou boxy s uzavřenou konstrukcí a pro výměnu plátů potřebují externího operátora či velmi nákladná robotická ramena, u tiskáren značky Bambulab A1 a A1 mini je díky německému výrobcí Swap Systems možnost zakoupit rozšíření pro kontinuální tisk až na deset magnetických tiskových plátů bez nutnosti zásahu lidského operátora. Tato úprava zvaná Swapmod funguje na principu upraveného g-kódu, který zajistí správný pohyb podložky a tiskové hlavy po dokončení tisku. Tyto předdefinované pohyby aktivují přes přimontovaný mechanismus pneumatický píst, který dopomůže tiskárně k automatické výměně magnetického tiskového plátu. [23]



Obrázek 9 Vizualizace možnosti automatizace 3D tiskárny typu bedslinger [23]

1.2.2 Core XY

Core XY tiskárny se od bedslingerů liší především způsobem pohybu a rozložením hmotnosti, což má zásadní dopad na rychlost, stabilitu a kvalitu tisku. Zatímco u bedslingerů se tisková hlava pohybuje pouze v ose X a podložka v ose Y, u core XY se tisková hlava pohybuje v obou osách, tj. v X a Y pomocí dvou klínových řemenů. Podložka se pohybuje samostatně pouze ve směru osy Z (nahoru a dolů dle výšky vrstvy). Díky tomu nedochází k rychlým pohybům těžké podložky vpřed a vzad, což u bedslingerů způsobuje vibrace a omezuje maximální rychlost tisku. Core XY konstrukce umožňuje nejen vyšší rychlosti a lepší přesnost, ale také kompaktnější rozměry, protože podložka nepotřebuje tolik prostoru k pohybu. Na druhou stranu je tento systém konstrukčně složitější, vyžaduje preciznější sestavení a správné napnutí řemenů, což může být pro některé uživatele náročnější na údržbu. Core XY je preferovanou volbou pro pokročilejší uživatele, kteří hledají vyšší stabilitu a rychlost tisku bez kompromisů na kvalitě. Výběr mezi těmito dvěma typy 3D tiskáren závisí především na požadavcích na tisk, dostupném rozpočtu a zkušenostech uživatele. Jedna z největších výhod tohoto typu 3D tiskáren je možnost uzavřené konstrukce. Díky tomu, že je podložka během tisku v ose Y stacionární, je možné okolo těchto 3D tiskáren snadno zkonstruovat kryt, který umožní tisk náročně tisknutelných materiálů více náchylných na objemové smrštění při chladnutí. Některé materiály, jejichž příklady budou popsány níže, dokonce vyžadují tisk v temperované komoře, jinak by během tisku došlo k odtrhnutí výtisku z podložky v důsledku objemového smršťování materiálu. [8, 24]



Obrázek 10 Vizualizace konstrukce 3D tiskárny typu core XY [24]

1.2.3 Delta

Delta tiskárny se od běžných kartézských systémů, jako jsou bedslingery a core XY, liší svým unikátním pohybovým mechanismem, kde tisková hlava je zavěšena na třech ramenech, která se pohybují vertikálně pomocí tří krokových motorů. Tento design umožňuje extrémně rychlé pohyby s vysokými akceleracemi, protože tisková hlava je relativně lehká a její pohyb není omezován těžkým lineárním vedením či posuvnou podložkou. Díky tomu mohou delta tiskárny dosahovat vysokých tiskových rychlostí bez výrazného poklesu kvality, což je výhodné zejména pro tisk velkých objektů nebo malosériovou výrobu.

Typickým rysem delta tiskáren je také kruhová tisková plocha, přičemž jejich konstrukce umožňuje tisk vyšších modelů než u většiny bedslingerů a core XY systémů. Přesnost a kvalita tisku však může být ovlivněna složitější kinematikou a nutností precizní kalibrace, zejména co se týče vyrovnaní tiskové podložky a správné konfigurace krokových motorů. Delta tiskárny jsou proto ideální pro ty, kteří chtějí rychlý a efektivní tisk vyšších modelů. Stejně jako u core XY je zde možnost uzavřené konstrukce pro tisk náročnějších materiálů s tendencí zvedat se z podložky. [8, 25, 30]



Obrázek 11 Vizualizace 3D tiskárny typu delta [25]

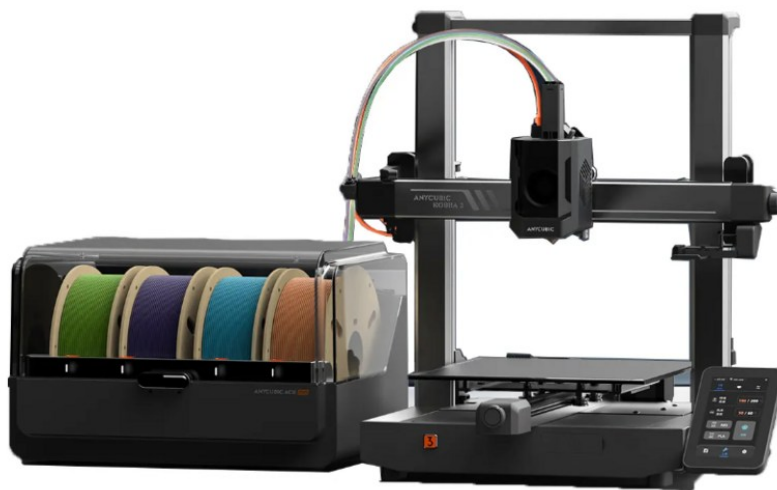
1.2.4 Multimateriálové systémy

Tisk z vícero materiálů či barev na jednom stroji je v dnešní době již velmi dostupný a spolehlivý. Vícebarevný 3D tisk je žádoucí především pro tisk různých hraček či maket. Tisk vícero materiálů najednou je využíván především pro tisk podpůrných materiálů. Využívá se zde rozdílného chemického složení polymerů, což může vést k nespojení určitých materiálů. Zjednodušeně řečeno, při tisku podpěr je nutné, aby byly podpěry co nejblíže tisknutému objektu, ale zároveň aby nedošlo k sjednocení podpěry s výtiskem. Z tohoto důvodu se často tisknou podpěry z PET-G, pokud je výtisk tištěn z PLA nebo naopak. PLA a PET-G jsou právě těmi nejhojněji využívanými materiály u FDM 3D tisku. Jejich chemické složení umožňuje to, že mezi nimi nelze docílit velké adheze mezi vrstvami. Proto jsou ideální dvojicí pro tisk modelu a podpěr. Dalším příkladem využití multimateriálu může být kombinace konvenčních tvrdých polymerů s těmi pružnými. Tím lze docílit mnohem delší životnosti např. tištěných pantů, pokud jsou zhotoveny z pružného materiálu jako je TPU. V neposlední řadě je tisk více materiálů možno realizovat s elektricky vodivými filamenti, což může mít přínos při vývoji různých elektrických senzorů.

Multimateriálové systémy čínských 3D tiskáren značky Bambulab, Anycubic, Creality atp. jsou nejčastěji prodávány spolu s tiskárnou a často filaments chrání proti okolní vlhkosti, či je dokonce vysouší. Jsou obvykle nazývány AMS – Automatic Material System. Tyto multimateriálové systémy jsou nejčastěji určeny pro 4 cívky najednou, avšak v některých případech je lze násobit a docílit tak tisk až 16 barvami (materiály) najednou.

Jedna z dalších výhod těchto multimateriálových systémů je možnost automatického doplnění materiálu. Jedná se o to, že pokud dojde materiál v prvním slotu, tisk pak může automaticky pokračovat na další slot se stejným materiálem.

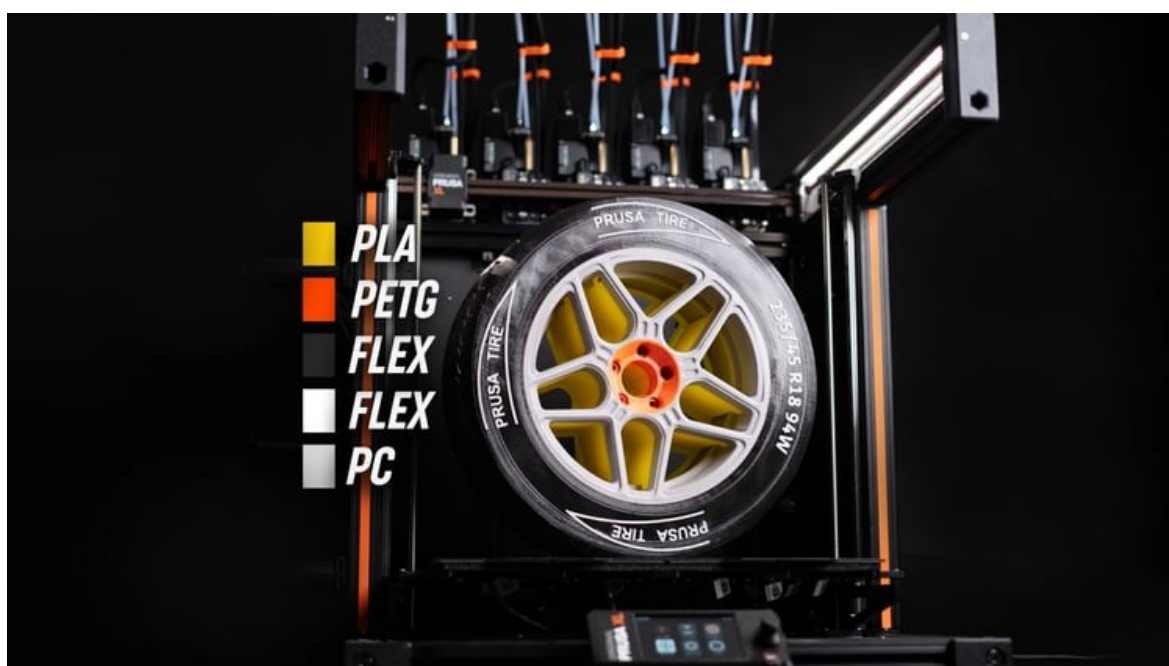
Velkou nevýhodou čínských multimateriálových systémů je časová náročnost tisku a také velké množství odpadního materiálu, který musí být přes trysku protlačen, aby se vyčistila předchozí barva. Pokud je nutno materiál několikrát změnit v každé vrstvě modelu, můžou se tiskové časy vícebarevných modelů pohybovat v rozmezí desítek až stovek hodin. Zároveň může být celková spotřeba materiálu až několik kg, přičemž většina spotřebovaného materiálu je právě na čištění trysky od předchozí barvy. Tyto kvalifikované odhady jsou dány pro komerční 3D tiskárny s tiskovým objemem okolo 250 mm³. [2, 27, 31, 32]



Obrázek 12 Příklad čínského multimateriálu s uzavřenou konstrukcí [27]

Některé z nevýhod výše zmíněných multimateriálových systémů řeší složitější a nákladnější typ multimateriálového tisku od českého výrobce Josefa Průši. Konkrétně jeho 3D tiskárna Prusa XL, která je vybavena tzv. tool-changerem, tedy systémem, který v průběhu tisku dokáže vyměnit jednu tiskovou hlavu za druhou. Může být vybavena až

5 tiskovými hlavami. Tyto vyměnitelné tiskové hlavy v kombinaci s multimateriálovým tiskem z velké části eliminují množství tiskového odpadu. V každé z hlav totiž zůstane jen ten materiál, který byl právě tisknut naposled. Tato 3D tiskárna je s pěti tiskovými hlavami velmi nákladná, a i přesto nenabízí kryt pro používané materiály. Pro někoho avšak může tato tiskárna být výhodná nejen z důvodu ekologického řešení tisku vícero materiálu, ale i kvůli jejímu velkému tiskovému objemu a segmentově vyhřívané podložce. Díky tomuto řešení multimateriálového tisku je také vícebarevný tisk mnohem rychlejší oproti čínským alternativám, a to právě proto, že není nutné čistit trysku od předchozího tištěného materiálu. [33, 34, 35]



Obrázek 13 Příklad multimateriálového výtisku z české 3D tiskárny Prusa XL [28]

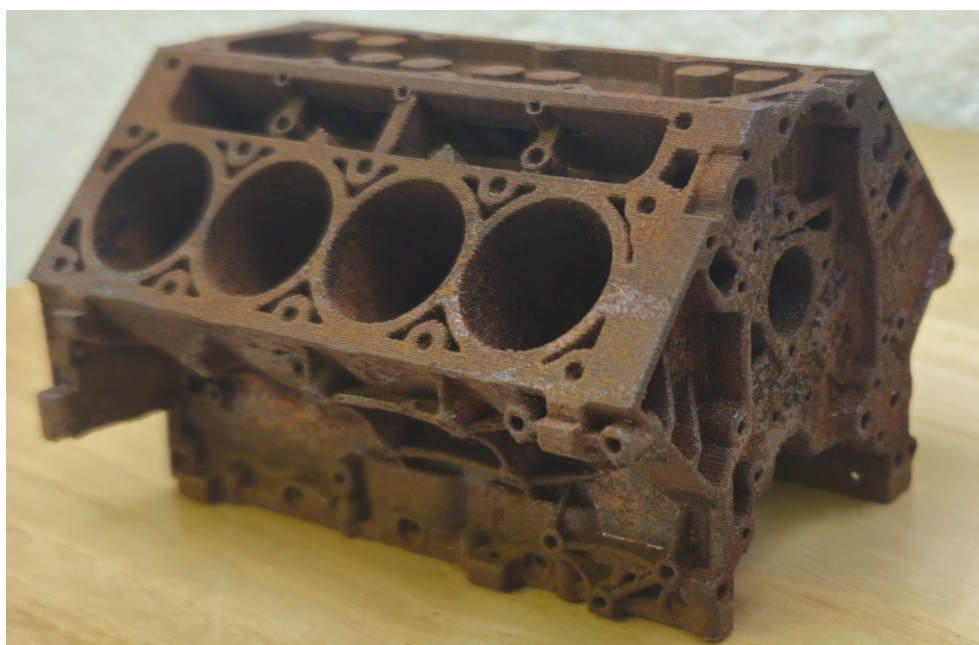
1.3 Typy tiskových strun

Tiskové struny se vyrábí nejčastěji v průměru 1,75 mm. Některé industriální 3D tiskárny vyžadují struny o průměru 2,85 mm. Tento větší průměr struny je méně běžný, používaný především ve velkoformátových tiskárnách, kde není kladen důraz na rozlišení (kvalitu) výtisku a je zde přednější vyšší průtok polymeru přes trysku, což má za následek urychlení tisku. Zároveň je s větším průměrem filamentu menší šance na ucpání trysky a taktéž menší šance na zlomení filamentu např. z důvodu degradace tiskové struny.

Většina komerčních tiskáren má ale extruder uzpůsobený k průměru 1,75 mm. Tiskové struny jsou vyráběny extruzí polymerního materiálu přes vytlačovací hlavu s kruhovým průřezem. Nejčastěji jsou vyráběny z virgin granulátu tedy z nezrecyklovaného

čistého polymeru, který je taven ve válci. Nejčastější příměsí k těmto granulátům jsou pigmenty, které tiskovým strunám dodají požadovaný vzhled, aniž by nějak významně narušovaly mechanické a fyzikální vlastnosti strun.

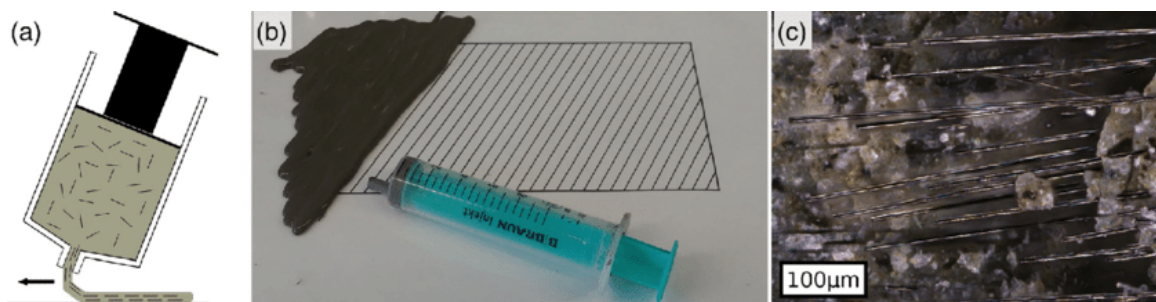
Tiskové struny mohou obsahovat i abrazivní příměsí. Zde je nutné rozlišit, zda se jedná o příměsí ke zlepšení mechanických vlastností filamentu či pouze estetickou úpravu filamentu. Některé filamenty mohou obsahovat kovové prášky, což při tisku imituje kovový vzhled výtisku. Filamenty s příměsí měďného či železného prachu mohou po vystavení určitým chemikáliím korodovat či oxidovat, což dodá výtisku unikátní vzhled. Stejně tak jsou vyráběny filamenty s příměsí dřevěného prachu pro výslednou imitaci dřevěného výtisku. [3, 6, 26, 29]



Obrázek 14 Demonstrace koroze na výtisku z PLA plněného železným prachem [29]

Funkční plniva přidávané za účelem zlepšení mechanických vlastností jsou nejčastěji uhlíková, skelná či aramidová vlákna. Tato plniva v podobě vláken mají nejčastěji průměr od 5 do 20 μm a délku v rozmezí 1–10 mm. V polymerní matrici působí jako výztuž, tudíž zlepšují mechanické vlastnosti. Stejně jako filamenty plněné kovovými prášky jsou tyto filamenty abrazivní. Proto je nutno brát v potaz větší opotřebení trysky i koleček extruderu a ideálně používat kalené varianty těchto komponent. Procentuální podíl těchto vláken ve filamentech se liší v závislosti použité matrice, avšak obecně platí, že se pohybuje mezi 5 a 30 % hmotnostního podílu vláken v matrici. Nejčastěji jsou vyztužovány polyamidy, ABS, PC, PET-G atp. Méně častými matricemi jsou PLA a TPU, jelikož se jedná o polymery s nevhodnými vlastnostmi k vyztužování. PLA je sám o sobě křehký a tvrdý polymer se

špatnou tepelnou odolností, zatímco u TPU je žádoucí právě pružnost, která by byla plnivem snížena.



Obrázek 15 Vizualizace orientace vláken v matrici při průchodu úzkou štěrbinou [36]

Dalším typem abrazivní příměsi v tiskových strunách může být hlinitan strontnatý (SrAl_2O_4), který se používá pro výrobu filamentů svítících ve tmě. Dalšími významnými plnivy tiskových strun jsou aditiva pro zvýšení elektrické vodivosti filamentů. Jedná se nejčastěji o uhlíkové nanotrubičky, grafen či jemné kovové prášky např. měď, stříbro či nikl. Tyto filamenty by měly mít rezistivitu menší než $1000 \Omega \cdot \text{cm}$, avšak záleží na podmínkách tisku, obsahu plniva a přesnosti měření. Elektricky vodivé filamenty se dají využít na 3D tisk jednoduchých elektrických obvodů (pro nízký proud), senzorů či pro stínění různých typů elektromagnetického vlnění, které není žádoucí. [6, 26, 36]

1.4 High-tech filamenty

High-tech filamenty jsou pokročilé materiály určené pro 3D tisk. Mají unikátní vlastnosti, což je činí vhodnými pro náročné aplikace. Tyto filamenty často kombinují high-tech polymery s pokročilými kompozity, nanomateriály nebo speciálními přísadami, aby se zlepšily jejich vlastnosti, jako jsou pevnost, ořezuvzdornost, teplotní stabilita, UV stabilita atp. [6]

1.4.1 ASA

Akrylonitrilstyrenakrylát je termoplastický materiál hojně využívaný v 3D tisku, známý pro svou vysokou odolnost vůči UV záření a vnějším vlivům, což ho činí ideálním pro venkovní aplikace. Má také nadprůměrnou odolnost proti teplu a chemickým látkám, což z něj dělá vhodnou volbu pro technické a automobilové díly. ASA je podobný materiálu ABS, ale nabízí lepší odolnost proti povětrnostním. Stejně jako ABS je možné materiál ASA leptat acetonem, což je vhodné pro eliminaci tiskových vrstev, které jsou přítomny u každého výtisku.

Při tisku vyžaduje vyhřívanou podložku (80–100 °C) a vyšší teplotu trysky (250 až 280 °C). Zároveň se doporučuje tisknout v uzavřené komoře, aby se zabránilo deformacím. Pro tiskárny s otevřenou konstrukcí existuje varianta tohoto materiálu s označením ASA 275, která má nepatrně horší mechanické vlastnosti, ale nabízí vylepšenou tisknutelnost i bez uzavřené komory. [11]

1.4.2 PC-ABS

PC-ABS je kompozitní materiál kombinující polykarbonát (PC) a akrylonitrilbutadienstyren (ABS), díky čemuž kombinuje vlastnosti obou materiálů. Patří mezi ně vysoká pevnost, odolnost vůči nárazům a dobrá teplotní odolnost.

Tiskne se v teplotním rozmezí 270–290 °C a vyžaduje vyhřívanou podložku (90 až 110 °C). PC-ABS je ideální pro technické aplikace, včetně výroby prototypů, vstřikovaných automobilových dílů (např. kryty, držáky nebo vnitřní komponenty) a elektronických součástek, kde je kladen důraz na pevnost, odolnost proti teplu a chemikáliím. [46]

1.4.3 PA6-CF

Polyamid 6 plněný uhlíkovými vlákny (Carbon Fibre) je vysokoteplotní konstrukční polymer vhodný pro náročnější aplikace kde je požadována vysoká houževnatost materiálu nebo kde je potřeba dílec z teplotně odolného materiálu. PA6-CF odolává teplotám až do 180 °C. Tento materiál má obvykle za „CF“ číslo, které značí procentuální zastoupení uhlíkových vláken v nylonové matici, obvykle 5 až 30 %. Jeho další kladnou vlastností je pocitově nízká hmotnost, jelikož uhlíková vlákna snižují celkovou hustotu tohoto polymeru. Jak je známo, nylony jsou velmi hygroskopické polymery, tudíž je nutno filamenty na bázi polyamidů před tiskem sušit. V některých případech se tak razantně zlepší tisknutelnost.

Polyamidy je potřeba tisknout pomalu (do 100 mm/s), aby došlo k co nejlepšímu přilnutí tištěných vrstev na sebe. Teplota trysky je obvykle v rozmezí 260–290 °C a teplota podložky až 100 °C. Jelikož se jedná o abrazivní filament, je vhodné používat tvrzenou trysku ideálně s průměrem 0,6 mm a výše pro minimalizaci šance k ucpání trysky během tisku. Cena těchto filamentů se pohybuje okolo 2000 Kč/kg. [26, 37]



Obrázek 16 Příklady výtisků z PA6-CF [37]

1.4.4 PPS-CF

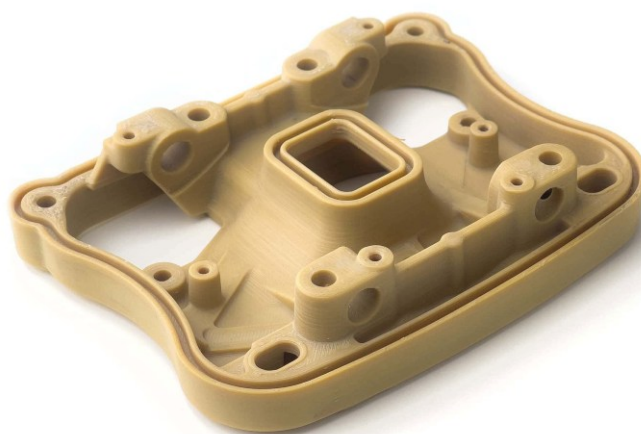
Polyfenylensulfid vyztužený uhlíkovými vlákny je jedním z nejvíce tepelně odolných materiálů určených k 3D tisku. Dokáže dlouhodobě odolávat teplotám přes 200 °C při mechanickém zatížení. Pod tlakem 0,45 MPa vykazuje teplotní odolnost až do 264 °C, což značně překonává teplotní odolnost ostatních uhlíkem vyztužených polymerů, jako např. nylonů. Tento materiál je sám o sobě samozhášivý, tudíž je vhodný i pro aplikace kde je nutný provoz za vysokých teplot. Modul pružnosti v ohybu tohoto materiálu je 7160 MPa, což jej činí jedním z nejpevnějších polymerů určených pro 3D tisk. Dalšími výhodami tohoto kompozitního high-tech materiálu jsou nízká hygroskopičnost a vysoká chemická odolnost. Mezi nevýhody patří vysoká cena (4550 Kč/kg) a obtížná tisknutelnost. Vyžaduje tisk v temperované komoře a teplotu trysky 310-340 °C a teplotu podložky až 120 °C. [38]



Obrázek 17 Příklady výtisků z PPS-CF [38]

1.4.5 PEEK

Jedním z nejobtížněji tisknutelným materiálem pro FDM 3D tisk je polyetheretherketon. Vyžaduje teplotu trysky 400 ± 30 °C a teplotu podložky i komory minimálně 120 °C. I přesto, že se jedná o nevyztužený polymer, udrží si své mechanické vlastnosti až do teploty 250 °C. Díky tomu, že v tomto materiálu není žádná přídavná výztuž, není tolik abrazivní, jako ostatní kompozitní filamenty. Dalším benefitem PEEK je výborná chemická odolnost a možnost styku s potravinami. PEEK se používá v leteckém průmyslu pro výrobu palivových trubiček, kde je potřebná chemická odolnost vůči kerosinu. Tento materiál je přirozeně UV rezistentní a samozhášivý. Výrobky z PEEK je tedy možné používat i tam, kde hrozí riziko vzplanutí. Nevýhodou je opět cena, která se pohybuje přes 12 000 Kč/kg. [39]



Obrázek 18 Příklad výtisku z materiálu PEEK [39]

1.5 Druhy defektů vznikajících při 3D tisku

3D tisk není jednoduchá činnost a vyžaduje znalost některých polymerů a principu extruze. Nese s sebou rizika v podobě defektů či neúspěchů. Zjednodušeně řečeno, výtisk nevypadá stejně, jako jeho předloha – 3D model. V následujících kapitolách bude stručně popsáno, proč tomu tak může být a co tyto defekty zapříčiňuje.

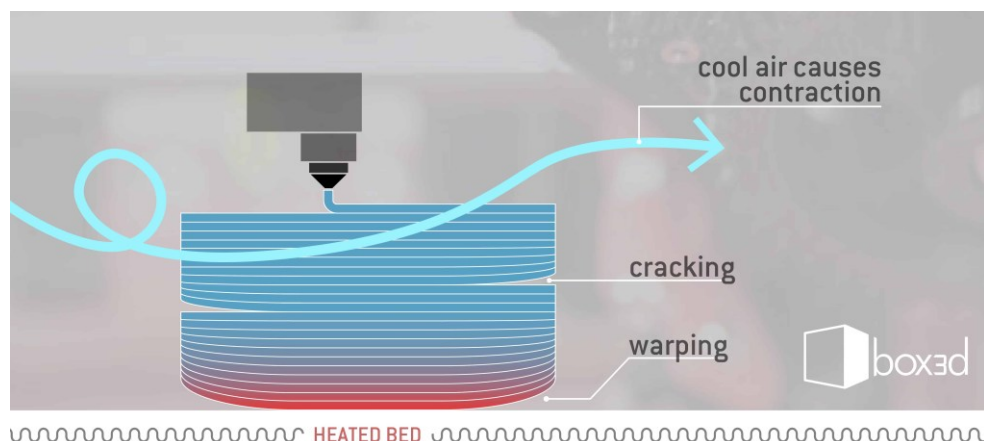
Jedním z nejčastějších faktorů negativně ovlivňujících kvalitu 3D tisku je použití nekvalitního nebo navlhčelého filamentu. Přítomnost vlhkosti ve filamentu může být eliminována sušením. Pokud však vlhkost zůstane v materiálu, může výrazně přispět k nežádoucím jevům, jako je stringing (tažení tenkých vláken), nedostatečná adheze mezi

vrstvami či vznik povrchových defektů, například bublinek způsobených odpařováním vody během tisku.

Pro dosažení kvalitního výsledku 3D tisku je zároveň nezbytná správná kalibrace tiskárny. Ta zahrnuje nejen vyrovnání tiskové plochy, ale také přesné nastavení extruderu, teplot a pohybu ve všech třech osách. [9, 15, 30, 44]

1.5.1 Warping

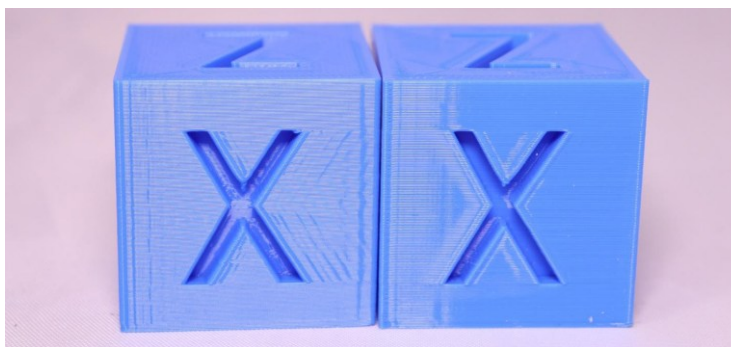
Tento pojem značí kroucení či zvedání. Dochází k tomu v důsledku chlazení polymeru. Každý polymer má jiný koeficient objemového smrštění při chladnutí. Při tisku dochází k vrstvení materiálu směrem od podložky vzhůru, tudíž materiál ve stejném směru chladne. Aby nedošlo k warpingu či k úplnému zvednutí výtisku z podložky v průběhu tisku, musíme zamezit nadměrnému ochlazování výtisku. Zároveň je nutné, aby byla podložka vyhřívaná na správnou teplotu. Warping je častým defektem u obtížně tisknutelných materiálů jako je ABS či ASA. Proto je nutné tyto materiály tisknout na 3D tiskárně s vyhřívanou komorou. Zároveň je kromě správné teploty podložky nutno zvolit takový povrch podložky, který bude s těmito materiály korespondovat. Adhezi výtisku na podložce může také přispět použití speciálních lepidel určených k 3D tisku či přidání límce okolo tisknutého objektu. Ten je přidán ve sliceru a slouží jako přídavná suknice, která zvětšuje styčnou plochu výtisku s podložkou. Po vytištění se tento pomocný límec od výtisku oddělí. Obecně také platí, že čím větší je výplň uvnitř výtisku, tím větší je šance k warpingu. Menší výplň = menší objem, což snižuje tendenci výtisku se z podložky zvedat v důsledku chladnutí. [30, 40]



Obrázek 19 Princip vzniku warpingu a praskání vrstev na výtisku [40]

1.5.2 Ghosting

Ghosting je defekt, který je nejčastěji způsoben příliš velkými akceleracemi tiskové hlavy. Jedná se o nerovnosti na povrchu výtisku způsobené vibracemi z předchozího pohybu tiskové hlavy. U tiskáren s input-shapingem je ghosting kompenzován, tudíž je možné tisknout bez ghostingu vyššími rychlostmi, běžně až 500 mm/s a akceleracemi až 20 m/s². U tiskáren bez input-shapingu se ghosting objevuje již při rychlostech nad 100 mm/s. Pokud není 3D tiskárna vybavena input-shapingem, je nutno tisknout pomaleji s akceleracemi do 1–2 m/s². Při konstruování tiskárny je klíčové, aby byly pohyblivé části lehké a zároveň tuhé. Tuhost a stabilita je nutná především u nosného rámu 3D tiskárny. Pokud nejsou tyto požadavky splněny, může se v důsledku setrvačných sil při tisku objevit ghosting. [41]



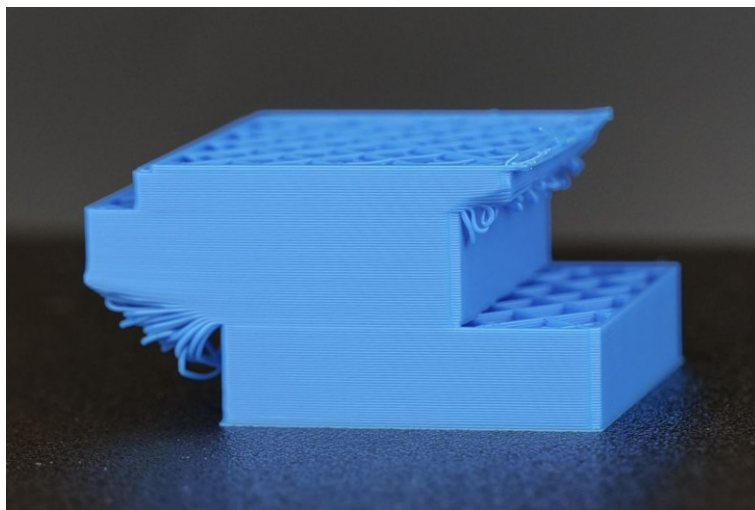
Obrázek 20 Vizualizace defektu v důsledku absence input-shapingu [41]

1.5.3 Stringing

Jak je již zmíněno v kapitole 1.5, stringing značí tažení vlákna mezi tisknutými částmi. Může k tomu docházet v důsledku navlhlého filamentu, ale i kvůli nesprávným parametrům retrakce filamentu. Při každém netiskovém pohybu trysky je nutno filament částečně zasunout zpět do hotendu, aby nedocházelo k jeho nekontrolovanému vytékání vlivem gravitace a zbytkového tlaku. Pokud je retrakce nedostatečná, dojde k nežádoucímu tažení vlákna, což bude muset být na výtisku dodatečně odstraněno. Každý typ polymeru má odlišnou tendenci ke stringingu, a proto je třeba přizpůsobit hodnoty retrakce konkrétnímu materiálu. Moderní slicery však často automaticky nastavují optimální hodnoty retrakce, čímž minimalizují riziko stringingu. Pokud se i přesto na výtisku objeví zbytková vlákna, lze je snadno odstranit tepelným rázem, například horkovzdušnou pistolí. Správné vysušení filamentu obvykle výrazně snižuje výskyt stringingu. [1, 5]

1.5.4 Layer-shift

Layer-shift znamená doslova „posun vrstvy“ a označuje nežádoucí jev v 3D tisku, kdy se jednotlivé vrstvy tisknutého objektu posunou vůči sobě. Tento problém obvykle nastává kvůli mechanickým chybám, například kvůli volným klínovým řemenům, přeskočení kroku motoru nebo špatné kalibraci krokových motorů. Přeskočení kroku v krokovém motoru je hlavní příčinou layer-shiftu. K tomu dochází, když motor dostane signál k pohybu, ale nemá dostatečný výkon na překonání odporu – například kvůli příliš vysoké rychlosti tisku, velkému zrychlení, zaseknutí osy nebo nadměrnému opotřebení vinutí či magnetů v motoru. Motor pak „přeskočí“ jeden nebo více kroků, což způsobí posunutí vrstev. Výsledkem je deformovaný výtisk s viditelnými posuny vrstev, které kazí přesnost a kvalitu tisku. Pokud má 3D tiskárna správně napnuté klínové řemeny, dostatečně výkonné krokové motory a dostatečný přítlak na ložiscích pojezdů, při tisku rychlostmi menšími, než je doporučená maximální rychlost dané 3D tiskárny, by nemělo dojít k layer-shiftu. U bedslingerů je navíc nutno brát v potaz, že při tisku objemnějších modelů se tisková podložka stává hmotnější, tudíž krokový motor posuvu podložky (osa Y) musí překovávat větší setrvačné síly a může dojít k layer-shiftu. Proto je u těchto typů 3D tiskáren vhodné tisknout menšími rychlostmi (např. 50 % obvyklé rychlosti), pokud je výtisk několikasetgramový. [4, 42]

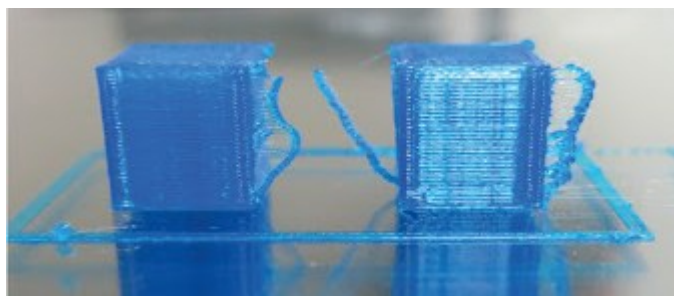


Obrázek 21 Výsledek přeskočení vrstvy během tisku např. v důsledku volného řemene [42]

1.5.5 Oozing

Oozing neboli vytékání opět vzniká v důsledku nesprávně nastavených parametrů retrakce. Může se jednat o příliš malou vzdálenost retrakce v kombinaci s příliš vysokou teplotou trysky. Materiál je i přes zpětné zasunutí do hotendu gravitací vytahován z trysky a zanechává okolo výtisku typické kapičky na trajektoriích rychloposuvu. Oozing je

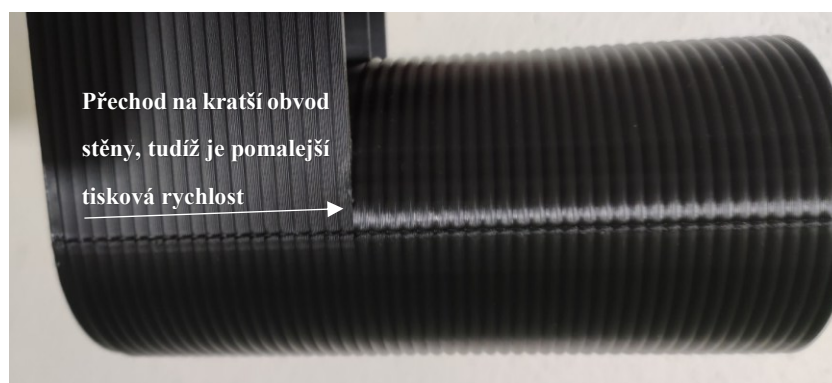
z popisu podobný, jako stringing, avšak je těžší jej z výtisku následně odstranit – nestačí horkovzdušná pistole, kapičky je nutno odtrhnout. Přítomnost oozingu okolo výtisku může negativně ovlivnit povrch výtisku, tudíž je vhodné ho eliminovat snížením teploty trysky či upravením parametrů retrakce. [43]



Obrázek 22 Vizualizace defektu zvaného oozing [43]

1.5.6 Rozdílné odstíny lesku stěny

Pokud jsou na výtisku jasně zřetelné rozdíly v lesku, bývá to nejčastěji způsobeno rozdílnými rychlostmi tisku. Slicery obvykle automaticky zpomalují rychlost tisku, pokud je obvod tištěné stěny příliš malý (menší obvod potřebuje delší čas k zatuhnutí). Pokud je obvod dostatečně velký, tiskárna jej tiskne maximální nastavenou rychlostí. U některých dnešních 3D tiskáren jsou tyto rychlosti natolik vysoké, že povrch výtisku bude matný i přesto, že tisková struna má povrch lesklý. Dochází k tomu v důsledku příliš rychlé extruze, kterou následuje rapidní chlazení extrudovaného polymeru. Pokud jsou semikrystalické polymery jako např. PLA, PET-G, Nylon či PP extrudovány a ochlazovány příliš rychle, nestihne se v tuhnoucí tavenině vytvořit dostatečné množství krystalické fáze, což vede k převládající amorfní struktuře. Amorfní oblasti rozptylují světlo nerovnoměrně, což způsobuje matný vzhled povrchu. [2, 5]



Obrázek 23 Rozdílnost lesku povrchu výtisku v důsledku změny tiskové rychlosti
[foto autora]

2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY A JEJICH ROZDĚLENÍ

Větrné elektrárny představují jednu z klíčových technologií pro výrobu obnovitelné energie, která využívá kinetickou energii větru k výrobě elektřiny. V následujících kapitolách jsou popsány různé typy větrných elektráren, které se liší jak svou konstrukcí, tak i principem funkčnosti. Rozdělení větrných elektráren podle orientace rotoru na vertikální a horizontální typy je považováno za základní klasifikaci, která je dále detailně popsána. Také je věnována pozornost výhodám a nevýhodám obou konstrukcí, aerodynamickým principům jejich fungování a potenciálu pro kombinování větrné energie s dalšími obnovitelnými zdroji, jako je fotovoltaika, v hybridním spojení s větrnými elektrárnami. [48, 50, 53]

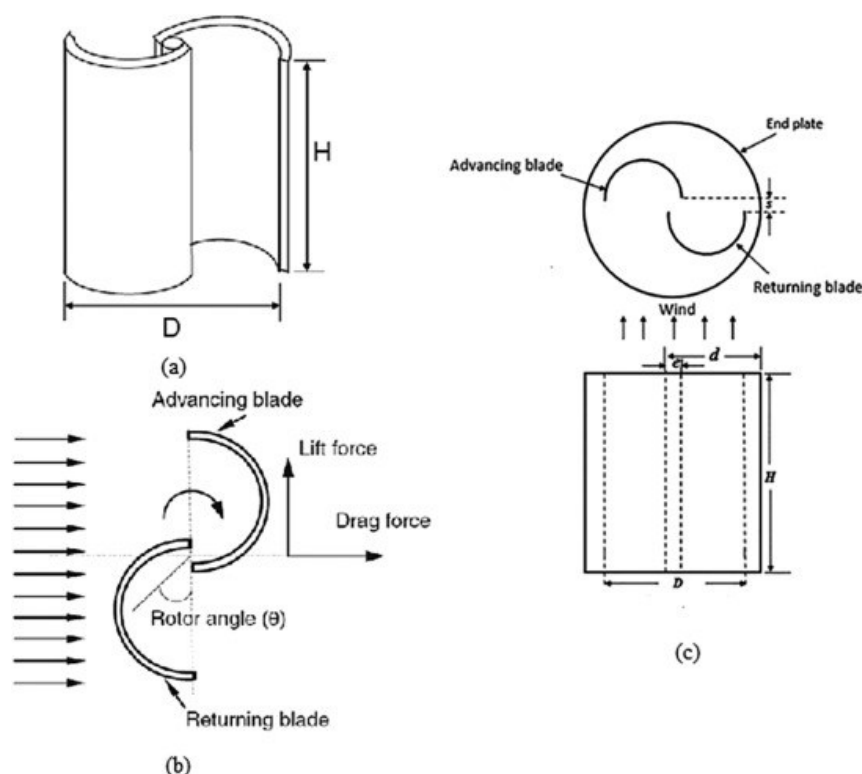
2.1 Vertikální větrné elektrárny VAWT

VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) je typ větrných elektráren, které mají vertikálně orientovanou osu rotace. Tato konstrukce umožňuje turbínám pracovat i při náhlých změnách směru větru, což je činí flexibilními pro různá prostředí. Hlavní výhodou VAWT je jednodušší konstrukce a možnost instalace v městských oblastech. Nevýhodou je, že mají většinou nižší účinnost než horizontální turbíny. [48]

2.1.1 Odporové turbíny

Odporové větrné elektrárny pracují na principu aerodynamického odporu, kdy vítr působí přímo na lopatky a tlačí je ve směru rotace. Tento typ turbín je charakteristický svou jednoduchou konstrukcí a schopností fungovat i při nízkých rychlostech větru. Kvůli tomu však dosahují nižší účinnosti než turbíny využívající aerodynamický vztlak, protože odporová síla je méně efektivní při přeměně větrné energie na mechanickou práci.

Nejznámějším zástupcem odporových větrných turbín je Savoniova turbína, která se skládá z lopatek ve tvaru půlválců, uspořádaných symetricky kolem svislé osy. Vítr působí na vnitřní stranu lopatek větší silou než na vnější, čímž generuje moment síly vedoucí k ose rotace turbíny. Díky této konstrukci mají Savoniovy turbíny velmi stabilní chod a nepotřebují složité převodové či brzděné mechanismy. Větrné elektrárny s tímto typem turbíny mají nízký maximální koeficient výkonu, což značí, že jsou méně efektivní v přeměně větrné energie na elektřinu oproti ostatním druhům větrných turbín. [47, 51, 56]



Obrázek 24 Schéma a princip funkčnosti Savoniovy turbíny [51]

Další variantou odporových turbín jsou modifikované konstrukce se složitějším tvarem lopatek, které umožňují lepší využití větru a zlepšení účinnosti. Například spirálovitě uspořádané lopatky můžou zajistit rovnoměrnější přenos síly a snížit pulzace (náhlé změny) točivého momentu. Přesto však odporové turbíny zůstávají vhodnější spíše pro menší instalace, například ve městech, kde jsou nízké rychlosti větru a kde je více žádaná jednoduchost a spolehlivost nad velkou účinností.

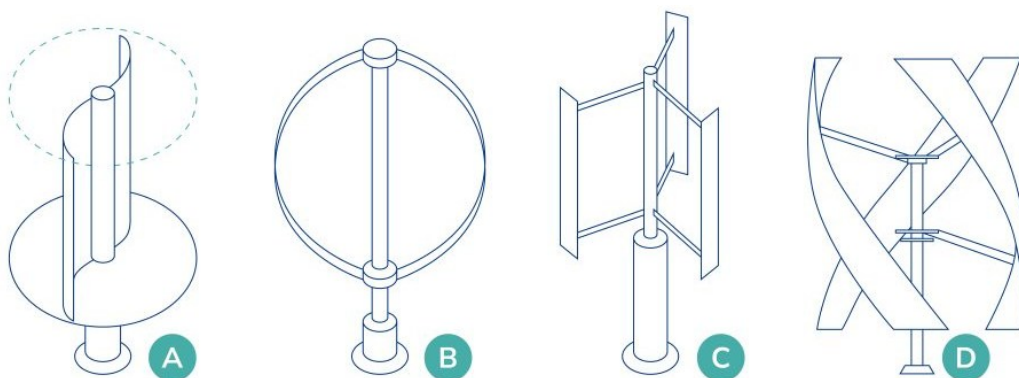
Hlavní výhodou odporových turbín je jejich schopnost spolehlivě fungovat bez ohledu na směr větru, což zjednodušuje jejich provoz a údržbu. Na rozdíl od horizontálních turbín nepotřebují aktivní mechanismus pro natáčení podle směru větru. Navíc díky relativně nízkým otáčkám a robustní konstrukci mají delší životnost a vyžadují méně údržby než vztlakové větrné elektrárny. [49, 51]

2.1.2 Vztlakové turbíny

Vztlakové větrné turbíny fungují na principu aerodynamického vztlaku, který vzniká díky speciálně tvarovaným lopatkám a profilům podobným křídům letadla. Namísto toho, aby vítr lopatky přímo tlačil, generuje na jejich povrchu rozdíl tlaků, což vytváří sílu ve směru rotace. Tento princip umožňuje vztlakovým turbínám dosáhnout mnohem vyšší účinnosti

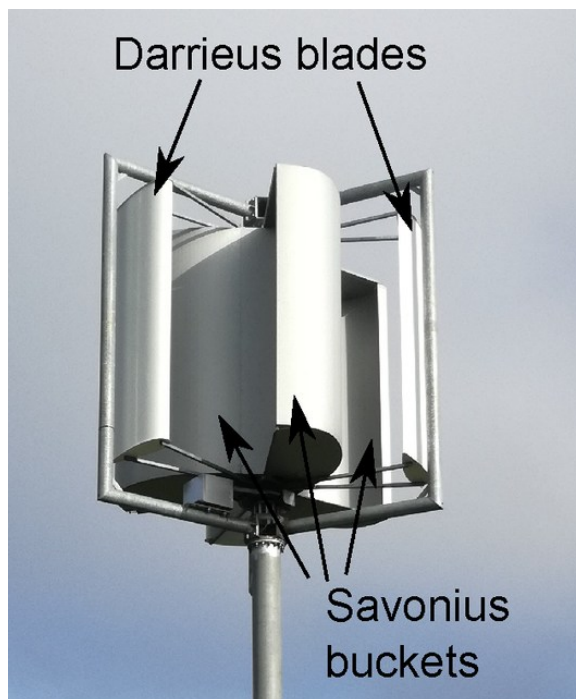
než odporové turbíny, protože vztlková síla je efektivnější při přeměně větrné energie na mechanickou práci.

Nejznámějším typem vztlkových turbín je Darrieova turbína, která se skládá ze zakřivených nebo rovných lopatek uspořádaných symetricky kolem svislé osy. Zakřivené lopatky lépe rozkládají síly a zajišťují plynulejší chod, zatímco turbíny s rovnými lopatkami (tzv. H-Darrieus) jsou konstrukčně jednodušší, ale náchylnější k vibracím a nerovnoměrnému zatížení. Výhodou těchto turbín je schopnost dosahovat vyšších otáček a zajistit lepší poměr mezi získanou energií a plochou lopatek ve srovnání s odporovými konstrukcemi. [48, 52, 58]



Obrázek 25 Typy vertikálních větrných turbín – a) Savoniova turbína; b) Darrieova turbína; c) H-Darrieus; d) Spirálová turbína [48]

Nevýhodou vztlkových turbín je jejich obtížnější start při nízkých rychlostech větru, protože aerodynamický vztlak nevzniká okamžitě a při malých otáčkách nemusí být dostatečný k překonání odporu ložisek a jiných ztrát. Z tohoto důvodu se někdy kombinují s odporovými prvky, jako jsou Savoniovy lopatky, které pomáhají rozběhu. Dalším řešením je použití pomocného elektromotoru, který turbínu při nízkých otáčkách urychlí na provozní rychlost. [56, 58]



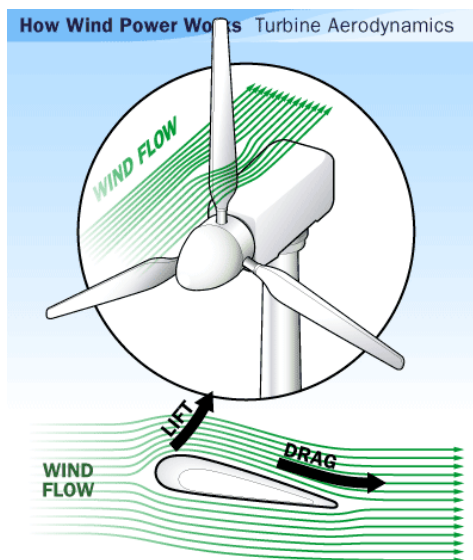
Obrázek 26 Hybridní VAWT – spojení kapkovitých profilů Darrieovy turbíny a Savoniových lopatek [49]

Díky své vyšší účinnosti jsou vztahové turbíny vhodnější pro větší energetické aplikace, například v průmyslových větrných parcích nebo jako zdroj energie pro větší budovy. Jejich hlavní předností je schopnost generovat více energie z menšího objemu vzduchu, což znamená, že při stejné velikosti a větrných podmínkách dokážou vyprodukovat vyšší výkon než odporové turbíny. Na druhou stranu je jejich konstrukce složitější, vyžadují kvalitnější materiály a pečlivější údržbu, zejména kvůli namáhání lopatek a ložisek. Přesto zůstávají jedním z nejefektivnějších řešení pro využití větrné energie v moderních aplikacích. [49, 56, 58]

2.2 Horizontální větrné elektrárny HAWT

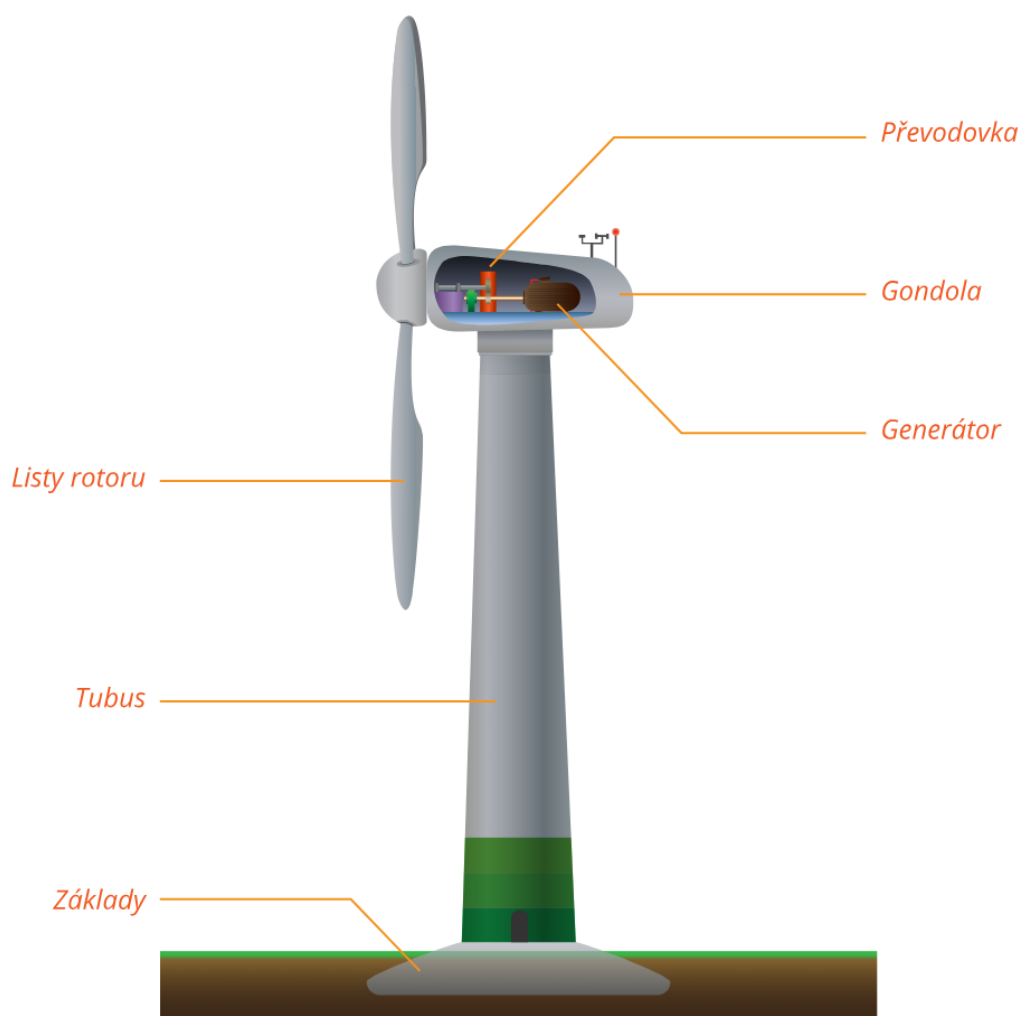
HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) neboli větrné turbíny s horizontální osou rotace patří mezi nejrozšířenější komerčně vyráběné větrné turbíny. Pracují na podobném principu jako Darrieova turbína, jelikož pro přeměnu větrné energie na kinetickou také využívají principu obtékání vzduchu okolo kapkovitého profilu. Kapkovitý profil lopatek větrných turbín generuje rotační sílu díky aerodynamickému účinku vznikajícímu rozdílem tlaků na různých stranách lopatky. Když vítr naráží na kapkovitý tvar lopatky, dochází k oddělení toku vzduchu na jejím předním okraji a jeho následnému zrychlení na vrchní straně lopatky. Vzduch na spodní straně se pohybuje pomaleji, což vytváří tlakový rozdíl mezi horní a

spodní částí lopatky. Tato aerodynamická síla, známá jako vztlak, působí v směru pohybu lopatky, což vede k její rotaci. Profil lopatek HAWT se zároveň vždy ztenčuje, jelikož u středu rotoru je obvodová rychlost nejnižší, ale je zde nutná největší síla pro rotaci. Proto je ve středu turbíny profil lopatky nejširší. Ztenčování profilu tedy kompenzuje rozdíl v obvodových rychlostech a pomáhá celkové aerodynamické účinnosti celé lopatky. [52, 57]



Obrázek 27 Princip tvorby aerodynamického vztlaku na profilu lopatky HAWT [52]

Obvykle mají tři lopatky, avšak existují i varianty se dvěma (méně nákladné) či dokonce s jednou lopatkou (experimentální). Standardně jsou lopatky orientovány proti směru větru. Tyto turbíny celosvětově produkují většinu elektřiny získané z větrné energie. Hlavní hřídel, rotor i generátor se nacházejí na vrcholu věže a musí být správně nasměrovány proti větru, což se zajišťuje různými technologiemi v závislosti na velikosti turbíny. U menších turbín se k nasměrování rotoru kolmo k proudění větru používá větrná lopatka, která funguje na podobném principu jako směrové kormidlo u letadla. Rotor se díky ní natočí kolmo ke směru větru. U velkých turbín se k tomuto účelu používají snímače směru větru a elektromotory s převodovkou, které řídí otočení vrcholu věže a rotoru proti větru. Turbíny s horizontální osou rotace se výrazně liší svou velikostí – zatímco nejmenší domácí turbíny mají průměr rotoru od 1 metru, největší dosahují až 310 metrů. Výkon se pohybuje od cca 1 kW u menších modelů až po 26 MW u největších turbín. [55, 57]



Obrázek 28 Popis HAWT [59]

Jak je vidět z obrázku výše, celá horní část horizontální větrné elektrárny se nazývá gondola. V níž je umístěna hlavní hřídel jdoucí z rotoru přes planetovou převodovku do generátoru. Převodovka má za úkol zvýšit otáčky rotoru. Účinnost planetové převodovky se pohybuje okolo 96 % a je nutno ji chladit. Sekundární hřídel, jenž spojuje převodovou skříň s generátorem má obvykle pracovní otáčky v rozsahu $1000\text{--}2000\text{ min}^{-1}$. Jak již bylo řečeno, listy rotoru i samotná gondola mají možnost natočení v závislosti na směru větru. Je-li rychlost větru příliš vysoká, lopatky jsou natočeny tak, že je vítr obtéká rovnoměrně. Není tudíž generován vztlak a rotor je v ideálním případě stacionární až do okamžiku kdy enormní vítr ustane. Na zadní části gondoly zvenčí si lze také povšimnout meteostanice, která snímá rychlost a směr větru. Snímače větru mohou být mechanické na principu Savoniových lopatek či ultrazvukové. Poblíž každé větrné elektrárny je také přítomen transformátor (opět

s nutností chlazení), který generované napětí transformuje. Generované napětí se pohybuje v rozsahu 400–1500 V a je obvykle transformováno na 22 kV. [48, 55]

2.3 Fotovoltaika a FV elektrárny

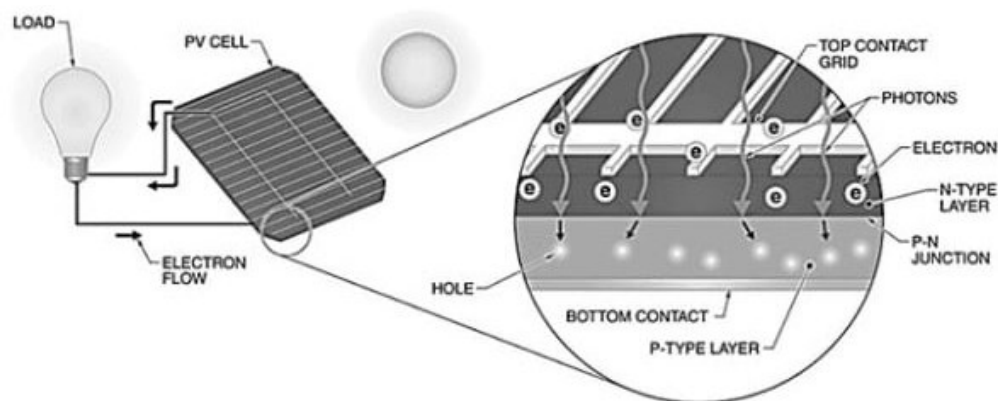
Fotovoltaika je velmi rozšířenou technologií, která využívá světlo (fotony) k vytváření elektrické energie. Hlavním prvkem, této přeměny je polovodičová součástka – fotovoltaický článek. Tyto součástky jsou většinou na bázi křemíku s hliníkovými či stříbrnými sběrači. Jakmile fotony dopadají na křemíkové polovodičové součástky, dochází k emisi volných elektronů křemíku. Ty jsou sbírány sběrači, které jsou propojené se sběrači ostatních článků, čímž dochází ke generování stejnosměrného proudu.

Fotovoltaické elektrárny jsou tvořeny z fotovoltaických panelů. Každý FV panel je tvořen mnoha FV články, které jsou obvykle spojeny do série, aby docházelo k násobení napětí generovaného jednotlivými články. Jednotlivý FV panel se skládá z 32, 36, 48, 60, 72 či 96 FV článků, přičemž jednotlivý FV panel dokáže generovat cca 0,5 V. Ku příkladu FV panel složený ze 72 FV článků by měl v ideálním případě generovat napětí 36 V. Fotovoltaické elektrárny mají své panely propojené paralelně, aby došlo ke zvýšení proudu generovaného napětí. Celkové výstupní napětí z FV elektrárny je nadále transformováno na napětí vhodné pro použití v domácnostech a pomocí střídače je proud stejnosměrný přetvořen na střídavý. [62, 66, 68]

2.3.1 Princip funkce FV článků a jejich recyklace

FV článek je křemíková destička, obvykle o rozměru 12×12 cm. Funguje na principu fotovoltaického jevu, což znamená, že při dopadu fotonů na rozhraní dvou materiálů vzniká elektrické napětí, které lze uzavřeným obvodem přeměnit na elektrický proud. Nejčastěji používaným materiálem pro výrobu FV článků je křemík – dokáže pohlcovat část slunečního záření a díky svým polovodičovým vlastnostem při osvětlení výrazně zvyšuje svoji vodivost.

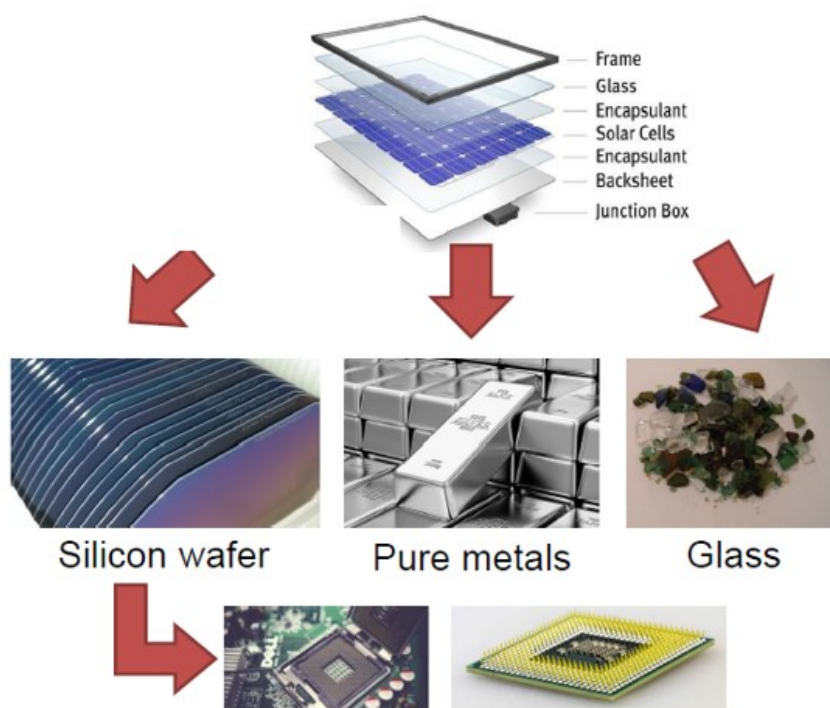
Existují dva hlavní typy FV článků: monokrystalické, které se vyrábějí pomalým tažením roztaveného křemíku a tvoří je jediný krystal s velikostí přes 10 cm, a polykrystalické, složené z menších krystalů o velikosti 1–100 mm s různou orientací. Zjednodušeně řečeno, fotony ze slunečního záření, které dopadají na křemíkové FV články, uvolňují elektrony z krystalické struktury křemíku. Tyto elektrony se pak stávají volnými a vytvářejí elektrický proud na kolektorech. [69]



Obrázek 29 Princip přeměny solární energie na energii elektrickou [66]

Fotovoltaické panely mají specifickou jednotku – Wattpeak (Wp), která udává jejich výkon při daných podmínkách – ozáření 1 kW/m^2 a teplotě 25°C . Je nutno podotknout, že účinnost FV panelů je pouze 14-17 % a jejich životnost je cca 30 let. Jednotlivé FV články jsou obvykle zalité epoxidovou pryskyřicí či podobným světlo propustným materiálem, který je částečně ochraňuje před degradací z UV záření. Z důvodu používání reaktoplastů jsou FV panely obtížně recyklovatelné, podobně jako jsou lopatky HAWT. [69, 72]

Současný průmyslový proces recyklace fotovoltaických panelů umožňuje dosáhnout přibližně 80 % recyklace, většinou obnovou jejich hliníkového rámu a krycích izolačních vrstev, přičemž zbývající sendvičové kompozitní struktury jsou často skládkovány. Chceme-li dosáhnout vyšší výtěžnosti a získat lepší ekonomickou hodnotu, je třeba se zaměřit na recyklaci funkční sendvičové struktury fotovoltaického modulu. To umožní regeneraci In, Si, Ag či Ga. Bohužel doposud nebyla vyvinuta žádná ekologicky šetrná technologie recyklace pro zpracování velkého množství odpadních fotovoltaických modulů, aby bylo zajištěno, že fotovoltaická technologie zůstane jasným „čistým zdrojem energie“. [72]



Obrázek 30 Ideální příklady materiálů recyklovatelných z FV panelů [72]

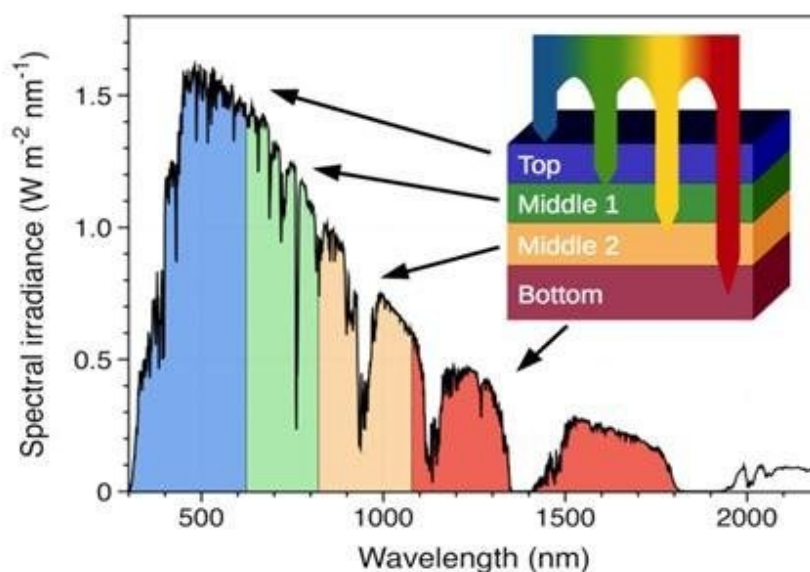
2.3.2 Diferenciace FV panelů dle využívaných materiálů

FV články mohou být vyrobeny z různých polovodičových materiálů i přesto, že krystalický křemík je zdaleka nejběžnější. Základní surovinou pro výrobu křemíkových článků je minimálně z 99,99 % čistý polykrystalický křemík rafinovaný z křemene a křemičitých písků. Při výrobě fotovoltaických článků lze použít různé druhy polykrystalického křemíku, od polovodičových až po metalurgické, což ovlivní kvalitu a účinnost vyráběných článků.

Ve srovnání s konkurenčními materiály nabízejí FV články z krystalického křemíku nejlepší poměr výkonu k ceně. Výzkum se však věnuje vývoji nových technologií s použitím odlišných materiálů pro výrobu fotovoltaických článků. Cílem je zlepšování výkonu, účinnosti a snižování nákladů stávajících technologií. Na následující tabulce je porovnání využívaných polovodičových materiálů a porovnání jejich komerční a laboratorní účinnosti. Multijunkční gallium arsenidové články (GaAs) jsou příklady článků, které mohou dosahovat velmi vysoké účinnosti, zejména v opticky koncentrovaných solárních systémech, díky využívání několika vrstev polovodičů z různých materiálů. [66, 69, 71]

Tabulka 1 Porovnání materiálů používaných pro výrobu FV článků a jejich účinností [66]

MATERIÁL	MAXIMÁLNÍ KOMERČNÍ ÚČINNOST MATERIÁLU [%]	MAXIMÁLNÍ LABORATORNÍ ÚČINNOST [%]
Multijunkční gallium arsenid (GaAs), opticky koncentrovaný FV panel	40	43,5
Multijunkční gallium arsenid (GaAs), běžný nekoncentrovaný FV panel	32	34,1
Monokrystalický křemík	18	27,6
Polykrystalický křemík	14	20,4
Měď-indium-gallium-selenid (CIGS)	14	20,3
Kadmium-telurid (CdTe)	11	17,3
Amorfní křemík (a-Si)	9	12,5
Barvivy senzibilizovaný (Gratzel)	10	11,8
Organické Polymery	4	10

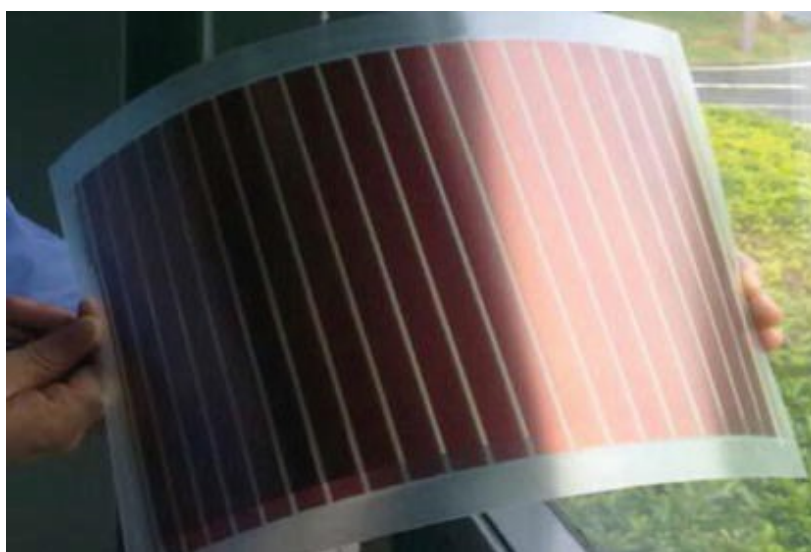


Obrázek 31 Graf popisující princip funkce multijunkčního FV článku [71]

Gallium arsenidové FV články jsou sice účinnější než články na bázi krystalického křemíku, avšak vysoká cena a toxicita při výrobě GaAs článků omezila jejich použití na vesmírné aplikace. Gallium je také možné legovat indiem, fosforem či hliníkem a vytvořit tak polovodiče, které reagují na různé vlnové délky elektromagnetického záření. Tato vlastnost se využívá k výrobě vícepřechodových (multijunkčních) článků, které tvoří vysoce účinné FV články pro náročné aplikace. Multijunkční článek je tedy článek, který maximalizuje účinnost použitím vícero vrstev jednotlivých článků, z nichž každý reaguje na různé vlnové délky slunečního záření. Horní vrstva zachycuje záření s nejkratší vlnovou délkou, zatímco složky s delší vlnovou délkou procházejí skrz a jsou absorbovány spodními vrstvami. [70, 71]

2.3.3 Flexibilní FV panely

Flexibilní fotovoltaické panely představují inovativní technologii pro nízkonákladovou výrobu elektřiny. Využívají tenké vrstvy organických, anorganických a hybridních materiálů nanesených na ohebné polymerní či kovové fólii pomocí speciálních nanášecích technologií. Díky své lehké konstrukci a vysokému měrnému výkonu přes 2 kW/kg nacházejí uplatnění v pozemních i vesmírných aplikacích, kde je klíčová nízká hmotnost a flexibilita. I přesto, že je měrný výkon díky absenci pevných podkladů pro fotovoltaické články značně vyšší než u konvenčních FV panelů, za běžných podmínek je současná účinnost flexibilních tenkovrstvých FV článků v rozmezí 3-15 %. [61, 63, 64]



Obrázek 32 Příklad flexibilního fotovoltaického panelu [67]

Pro náročnější aplikace, např. pro vesmírné účely, lze za použití sloučenin indium arsenidu (InAs) nebo indium galium arsenidu (InGaAs) vyrobit efektivnější polovodičové součástky pro tvorbu elektrické energie z fotonů. Tyto sloučeniny využívají tzv. kvantové tečky, které umožňují zachytit širší spektrum světla, vč. Infračerveného záření. Touto kombinací lze ve spojení s flexibilním podkladem pro fotovoltaické články dosáhnout účinnosti až 30 %. Současný cíl vědců v této oblasti je zlepšení účinnosti těchto FV článků a snížení výrobních nákladů, aby se tento účinnější a ekologičtější druh FV panelů mohl rozšířit i do komerční sféry průmyslu.

Oproti tradičním pevným FV panelům umožňují flexibilní FV panely snadnější integraci do různých povrchů, což otevírá nové možnosti v běžné spotřební elektronice i ve vesmírných satelitních systémech. Výzkum v oblasti těchto tenkých polovodičových součástek se zároveň zaměřuje na vývoj ekologicky šetrnějších materiálů s dlouhodobou životností, což činí flexibilní fotovoltaické panely perspektivním řešením pro budoucnost solární energetiky. [64, 65, 67]

V následující části této diplomové práce budou flexibilní fotovoltaické panely hrát signifikantní roli právě ve způsobu jejich implementace do lopatek vertikálních větrných turbín za účelem zhotovení hybridní vertikální větrné elektrárny.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 ODPOROVÁ VERTIKÁLNÍ HYBRIDNÍ VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA

Odporové větrné elektrárny mají jednodušší konstrukci lopatek díky absenci vztlakových aerodynamických profilů. Tato odporová vertikální větrná elektrárna (dále jen VAWT) je hybridní z důvodu dvojího způsobu generování elektřiny.

Primárně generuje el. proud konvenčním způsobem, tj. jako průmyslový generátor, a to otáčením permanentních magnetů nad vinutím, čímž se generuje střídavý elektrický proud. Výstupní proud je usměrněn přes externí usměrňovač.

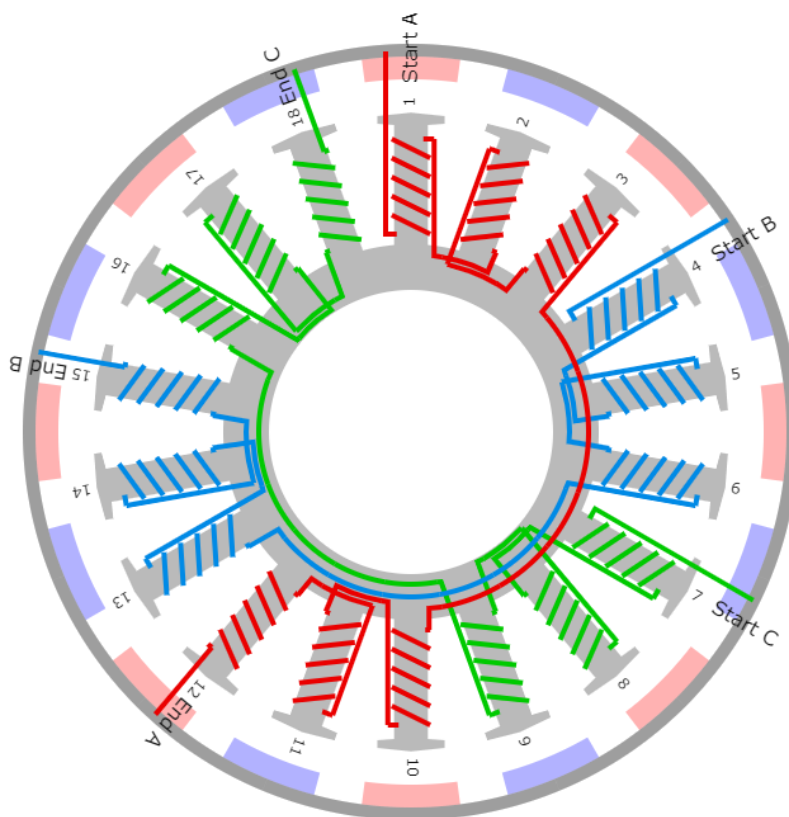
Sekundární způsob generování el. proudu zajišťuje přídavná fotovoltaika, která je zakomponována v lopatkách. Právě proto je tato VAWT hybridní – v případě bezvětří bude tato elektrárna během slunného dne generovat elektrický proud díky fotovoltaice. Zároveň je nutno zajistit přenos el. proudu ze solárních panelů na lopatkách, což je realizováno dráty vedoucími uvnitř duté hřídele napojenými na kluzný kroužek. Díky této jednoduché součástce je elektrárna schopna generovat proud oběma způsoby najednou – při rotaci lopatek je ve dne stále generováno napětí i na solárních panelech. Toto napětí je přes rotační kluzný přenašeč vyvedeno z těla elektrárny spolu s vývody třífázového napětí.

3.1 Primární způsob generování elektřiny

Jak již bylo zmíněno v odstavci výše, primárně je elektrický proud generován podobným způsobem, jako je tomu u horizontálních větrných turbín. Konvenční HAWT elektrárny mají avšak navíc převodovku, která přeměňuje obrovský kroutící moment a nízké otáčky hlavního rotoru na vysoké otáčky, které jsou klíčové pro efektivní generování střídavého proudu.

Z důvodu příliš malé velikosti vytištěných lopatek je v našem případě převod 1:1, tudíž je model bez převodovky. Otáčky lopatek jsou shodné s otáčkami rotoru s magnety. Magnety o velikosti 15 x 3 mm jsou vlisovány do 3D tištěného rotoru z PET-G HF. Vinutí je navinuto na nosných válečcích, které slouží jako stator. Válečky jsou vytisknuty ze železem plněného PLA. Železné plnivo v PLA mírně přispívá ke zlepšení efektivity vinutí z důvodu redukce tvorby vířivých proudů. Na každém statorovém válečku je 300 závitů měděného drátu o tloušťce 0,2 mm. Orientace závitů je řízena schématem vinutí, které bylo předem vygenerováno z internetových stránek Bavaria-direct. [75] Tyto stránky posloužily zároveň pro výpočet winding factoru, což je směrodatný údaj používaný v elektrotechnice pro znázornění efektivity zaplnění statoru vinutím. Závisí na počtu pólů statoru a na počtu

magnetů v rotoru. Kvůli absenci převodovky ve zhotoveném generátoru bylo nutno maximalizovat počet magnetů a pólů statoru s ohledem na velikost a tisknutelnost modelu. Čím více má generátor pólů a magnetů, tím lépe je schopen generovat napětí již při nízkých otáčkách.



Obrázek 33 Schéma vinutí primárního generátoru hybridních VAWT [75]

Ze schématu vinutí jsou patrné tři fáze vinutí – červená, modrá a zelená. Je z něj taky zřejmý počet magnetů a jejich alternující polarita, stejně jako tomu je u elektromotorů. Vinutí je jednoduše spájeno do hvězdy, aby bylo generované napětí co nejvyšší. Konkrétně jsou sletovány konce fází End A, End B a End C. Vývody střídavého proudu jsou tedy Start A, Start B a Start C.

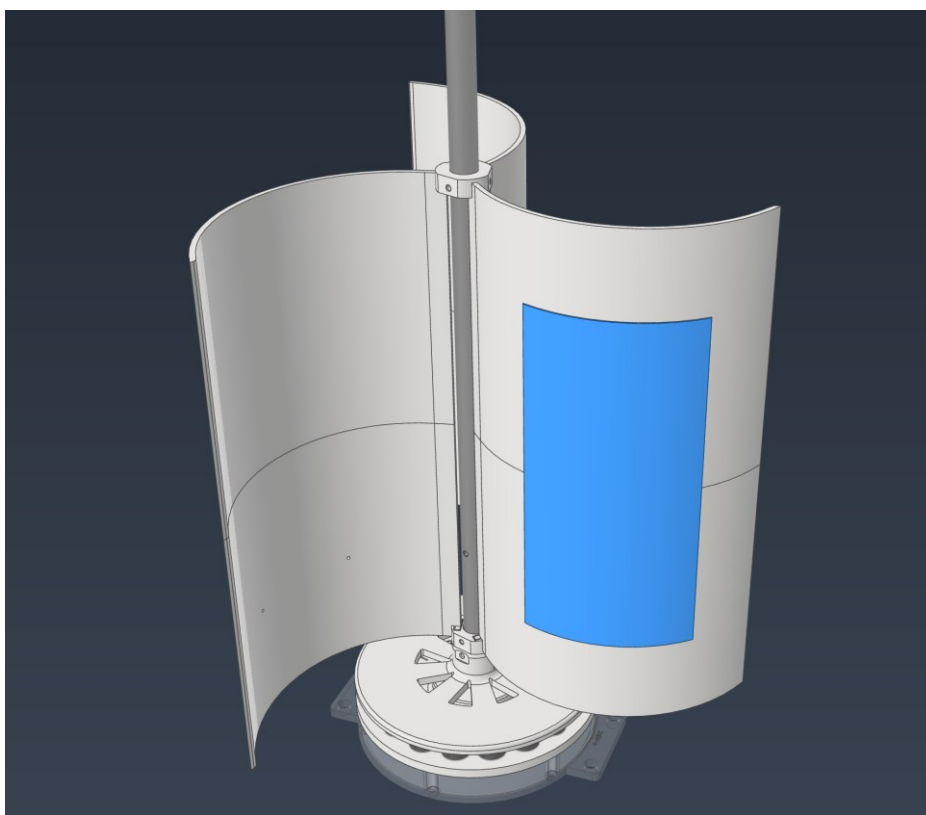
3.2 Sekundární způsob generování elektřiny

Aby byla tato větrná elektrárna hybridní, byly do lopatek zakomponované flexibilní solární panely. Díky tomu bude elektrárna generovat napětí dvěma způsoby. Z větrné energie a zároveň z fotovoltaiky. FV panely byly nalepeny na vnější straně lopatek dvousložkovou licí epoxidovou pryskyřicí. V případě odporové VAWT byly použity pouze 3 fotovoltaické

panely. Každý z nich dokáže generovat napětí až 6 V a má výkon 1 W. Po nalepení do rotoru turbíny byly panely spojeny paralelně, tudíž fotovoltaika může generovat maximálně 6 V s výkonem 3 W. Vývody z fotovoltaiky jsou uvnitř duté hliníkové hřídele spojeny konektorem s kluzným kroužkem, jenž zajišťuje přenos napětí i během rotace.

3.3 3D tištěné součásti

Některé díly této odporové VAWT byly vymodelovány v programu Autodesk Inventor Professional 2025 (studentské verze) a následně vytištěny metodou FDM 3D tisku z adekvátních materiálů.

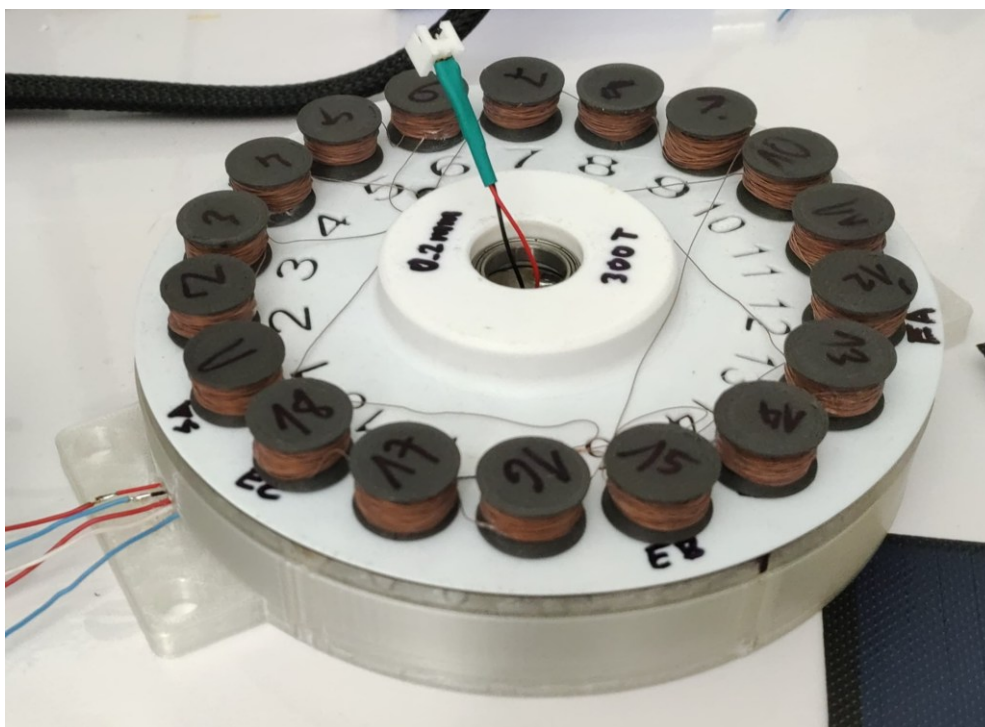


Obrázek 34 Sestava odporové VAWT – 3D model

Pro obaly a kryty těla generátoru bylo použito PLA, lopatky byly zhotoveny z ASA kvůli lepší pevnosti a UV stabilitě (v případě vztlakové VAWT). Mechanicky namáhané díly jako jsou hřídelové spojky a rotor byly vytisknuty z PET-G HF. Jedná se o materiál PET-G s rychlejší tisknutelností, což ho činí vhodným k prototypování stejně jako PLA, avšak vyznačuje se vyšší houževnatostí a tepelnou stabilitou. PET-G se také vyznačuje dobrou odolností vůči UV záření.

Jak již bylo řečeno v kapitole o primárním způsobu generování elektřiny, stator tvoří 18 stejných válečků z PLA plněného železem. Tyto válečky jsou vlepeny do těla generátoru

pomocí kyanoakrylátového lepidla. Nejstěžejnější informace je, že obě varianty VAWT (odporová i vztaková) sdílí stejné tělo generátoru.



Obrázek 35 Tělo generátoru s 18 válečky a měděným vinutím

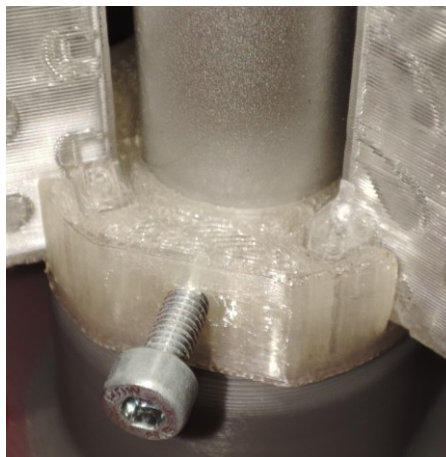
Hlavní komponentou větrných elektráren jsou lopatky. Bez nich by nedocházelo k přeměně větrné energie na energii rotační a následně elektrickou. Lopatky této odporové VAWT byly vytisknuty na dvě části, které byly následně slepeny dohromady. Každá z lopatek má tloušťku 3 mm a výšku 300 mm. Všechny tři lopatky tvoří rotor větrné elektrárny s průměrem 330 mm. Každá z lopatek byla tištěna 0,4 mm tryskou s pouze jedním obvodovým perimetrem a výplní gyroid. I přesto, že byly tisknuty s nestandardně nízkou výplní, všechny tři lopatky váží cca 450 g.



Obrázek 36 Lopatka odporové VAWT s flexibilním FV panelem

Jak již bylo řečeno, lopatky tvoří dvě části – spodní a horní polovina. Spodní polovina se liší pouze v tom, že má otvory pro vývody vodičů z fotovoltaických panelů. Pro slepení polovin lopatek bylo použito kyanoakrylátové lepidlo, které je pro lepení PLA více než dostatečné a pevnost spoje je často pevnější než samotné PLA mezi tiskovými vrstvami. Lopatky zároveň obsahují vybrání pro fotovoltaické panely. Do těchto vybrání byly flexibilní fotovoltaické panely pečlivě zalepeny pomocí dvousložkového epoxidového lepidla.

Pro uchycení lopatek na hřídel byly vymodelovány jednoduché hřídelové spojky s dírami pro stavěcí šrouby a s drážkami pro lopatky. Každá z lopatek je v úchytném bodě opatřena výstupky ve tvaru písmene T, jenž se pevně zasunou do protikusu – hřídelové spojky.



Obrázek 37 Hřídelová spojka lopatek vztlakové VAWT (vlevo); Hřídelová spojka lopatek odporové VAWT (vpravo)

3.4 Netištěné funkční díly

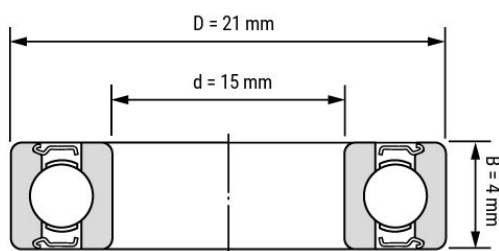
Ne všechny součásti je adekvátní vyrábět 3D tiskem, a to nejčastěji z důvodu nižší pevnosti a životnosti. Proto byly některé součásti tohoto modelu větrné elektrárny zakoupeny jakožto konvenčně vyrobené produkty. Mezi tyto součásti patří hřídel, ložiska, ale také prvky generující elektřinu. Magnety, měděné vinutí, flexibilní solární panely a další elektrotechnické komponenty, které budou detailněji popsány v následujících kapitolách.

3.4.1 Hřídel

Eloxovaný hliníkový profil – mezikruží s vnějším průměrem 15 mm a vnitřním průměrem 13 mm. Byly do něj vyvrtány 3 díry pro vedení vodičů od solárních panelů skrze hřídel. Aby nedocházelo k poškození izolace vodičů o ostré hrany vrtaných děr, bylo nutné okraje děr zaoblit. Zaoblení hran děr bylo provedeno smirkovým papírem a pro zvýšenou ochranu izolace drátů bylo na hrany děr nanесeno dvousložkové lepidlo.

3.4.2 Ložiska

Plynulé otáčení rotoru zajišťují dvě ocelová jednořadá kuličková ložiska typu 6702 ZZ. Jelikož je nutno předejít házení hřídele, jsou osazeny dvě tato ložiska nad sebou. Vrchní uložení hřídele nebylo z důvodu úspory materiálu realizováno, avšak pro ideální funkčnost a předejití házení hřídele by v praxi bylo nutné. Bylo také zvažováno použití axiálního ložiska, což by zvýšilo životnost a snížilo odpor otáčení hřídele. Jelikož jsou ale rotory zhotovených VAWT relativně lehké, byla použita ložiska radiální.



Obrázek 38 Schéma použitých ložisek 6702 ZZ [77]

3.4.3 Magnety

Do rotorů zhotovených VAWT byly použity magnety o průměru 15 mm s magnetizací N38. Rotor vztlakové VAWT byl osazen magnety o 1 mm tenčími, než tomu bylo u odporové VAWT, a to z důvodu redukce síly magnetů. U odporové VAWT totiž docházelo k vychylování hřídele kvůli příliš velké síle magnetů, které byly přitahovány ke statorovým válečkům plněným železem. Toto nežádoucí vychylování hřídele bylo použitím tenčích magnetů eliminováno. V následující tabulce je srovnání použitých magnetů. Každý rotor obsahoval 16 magnetů, kdy musely být lisovány s alternující polaritou, aby byla zajištěna funkčnost generátoru.

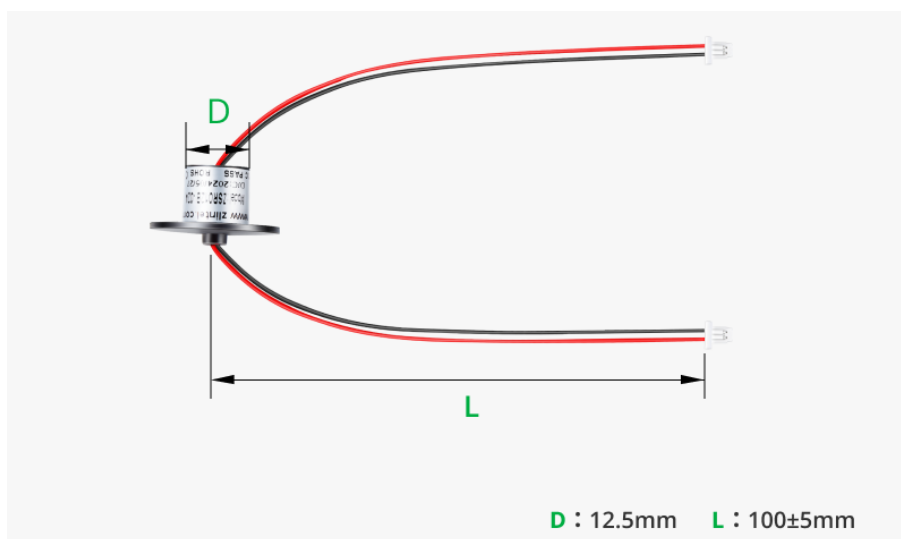
Tabulka 2 Porovnání parametrů magnetů v rotoru vztlakové turbíny a odporové

Parametr	Magnet 1: Ø15×2 mm	Magnet 2: Ø15×3 mm
Magnetická síla	cca 1,85 kg	cca 2,9 kg
Hmotnost	2,67 g	4 g
Magnetizace	N38	N38
Povrchová úprava	Niklováno (Ni-Cu-Ni)	Niklováno (Ni-Cu-Ni)
Max. pracovní teplota	80 °C	80 °C
Materiál	NdFeB	NdFeB
Cena s DPH	9,00 Kč	12,00 Kč

3.4.4 Kluzný kroužek

Tato komponenta, jenž nemá přesný odborný název zajišťuje přenos elektrického proudu při rotaci. Obsahuje dva vstupní vodiče a dva výstupní vodiče. Vstupní vodiče byly v našem případě spojeny s vývody ze solárních panelů uvnitř hřídele. Díky tomu, že se mohou vstupní vodiče volně otáčet okolo osy kluzného kroužku, nemělo použití této komponenty žádný razantní vliv na otáčení rotoru turbíny. Uvnitř této komponenty jsou kluzné kartáče, které

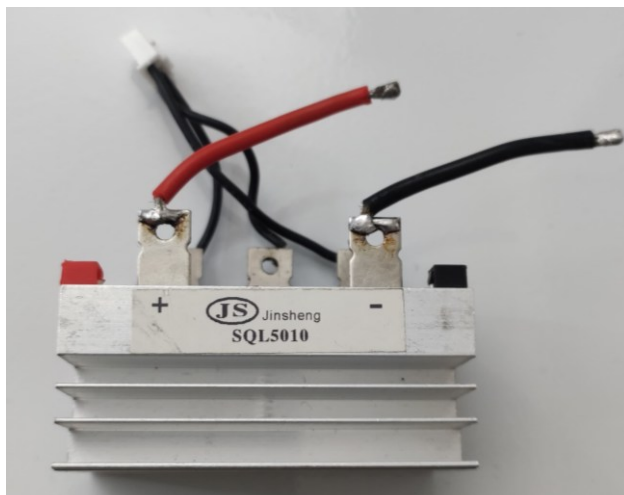
jsou neustále v kontaktu se sběračem. Sběrač je spojený s výstupními vodiči, na kterých bylo v následujících kapitolách provedeno měření napětí z fotovoltaických panelů.



Obrázek 39 Kluzný kroužek pro přenos el. proudu během rotace [73]

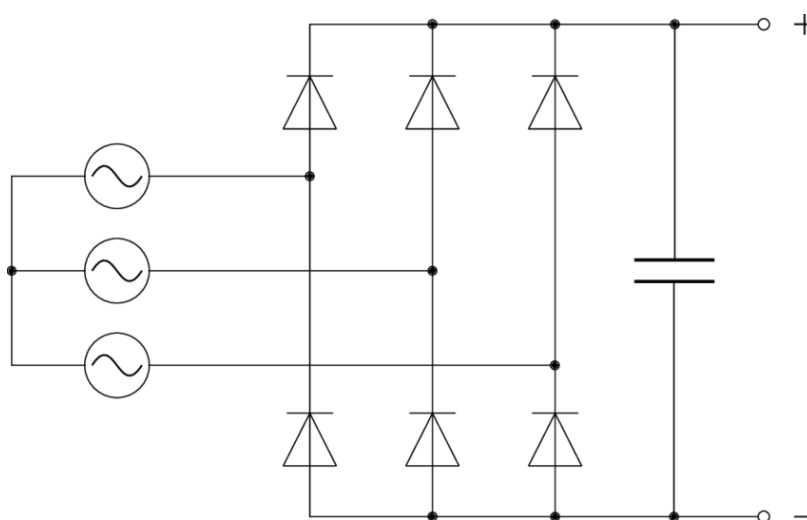
3.4.5 Usměrňovač střídavého proudu

Třífázový usměrňovač střídavého proudu se skládá z šesti výkonových diod zapojených do Graetzova můstku. V každém časovém okamžiku, kdy je generován střídavý proud, je na výstup usměrňovače připojena dvojice diod, která spojuje fázi s nejvyšší hodnotou okamžitého napětí na kladný pól stejnosměrného výstupu a fázi s nejnižší hodnotou na pól záporný. Díky fázovému posunu mezi jednotlivými sinusovými průběhy střídavého napětí je zajištěno, že se proud mezi fázemi periodicky přepíná, a na výstupu vzniká téměř spojitý tok proudu s konstantní polaritou. Díky tomu vzniká na výstupu stejnosměrné napětí s relativně nízkou pulzací, protože tyto tři fáze se navzájem překrývají a zajišťují téměř spojitý tok proudu. Pro další vyhlazení tohoto napětí se obvykle používají filtrační kondenzátory nebo tlumivky, které redukují pulzaci a umožňují dosáhnout stabilní stejnosměrný výstup vhodný pro napájení elektronických zařízení či akumulátorů.



Obrázek 40 Usměrňovač střídavého proudu na stejnosměrný

Schéma usměrňovače je znázorněno na obrázku níže spolu s reálnou fotkou této součásti. Všechny elektronické komponenty jsou zapouzdřeny v černé pryskyřici, přičemž tělo tvoří hliníkové žebrování, pro dostatečné chlazení diod, avšak při naší aplikaci nebylo chlazení nutné. Vývody pro vstup a výstup jsou tvořeny pevnými poniklovanými kontakty, tudíž bylo velmi snadné pájet na usměrňovač vodiče.



Obrázek 41 Schéma usměrňovače střídavého proudu [76]

3.5 Průběh měření napětí na vinutí

Měření bylo provedeno dne 8. 4. 2025, kdy rychlost větru pohybovala v dané lokalitě okolo 14 km/h. Během otáčení rotoru odporové VAWT bylo pořízeno několik fotografických snímků, ze kterých bylo na multimetru zřetelné napětí. Toto napětí bylo měřeno na výstupech usměrněného napětí z usměrňovače. Následující tabulka shrnuje toto měření a odhalí průměrnou hodnotu napětí generovanou s tímto typem rotoru.

Tabulka 3 Průběh měření napětí na vinutí odporové VAWT

Vinutí odporové VAWT	
č. měření	U [V]
1	0,563
2	0,811
3	0,782
4	0,670
5	0,904
6	1,099
7	1,273
8	1,373
9	0,988
10	1,105
Průměr	0,957
Sm. Odch.	0,260

Z tabulky vyplývá, že průměrné napětí generované odporovou VAWT při rychlosti větru 14 km/h je $(1,0 \pm 0,3)$ V.

3.6 Průběh měření napětí z fotovoltaiky

Fotovoltaiku odporové VAWT tvoří tři výkonné flexibilní FV panely přilepené na vnějších stranách lopatek. Pro bezproblémové lepení bylo použito dvousložkového epoxidového lepidla. Každá z lopatek obsahuje jeden FV panel.

Tyto panely jsou uvnitř hřídele spojeny paralelně, tudíž se jejich napětí nezvyšuje, avšak jsou schopny generovat vyšší proud. Proto je celkový výkon fotovoltaiky této elektrárny trojnásobný. Dle parametrů prodejce těchto FV panelů by měl jeden tento panel v ideálním případě generovat 6 V při výkonu 1 W. Z výsledků měření je patrné, že jsou použité panely kvalitní, jelikož je průměrná naměřená hodnota vyšší než hodnota deklarovaná výrobcem.



Obrázek 42 Měření napětí z fotovoltaických panelů na hybridní odporové VAWT

Tabulka 4 Průběh měření napětí z fotovoltaiky odporové VAWT

Fotovoltaika odporové VAWT	
č. měření	napětí [V]
1	6,31
2	6,43
3	6,22
4	6,26
5	6,07
6	5,49
7	5,73
8	5,89
9	6,08
10	6,15
Průměr	6,06
Sm. Odch.	0,29

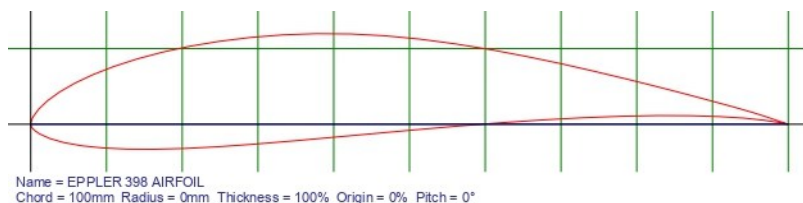
Průměrná naměřená hodnota napětí generovaného fotovoltaickými panely v odporové VAWT je $(6,0 \pm 0,3)$ V. Jelikož nebyl měřen proud generovaný FV panely, není možné spočítat celkový výkon, avšak můžeme jej odhadnout z daného výkonu a naměřeného napětí na 3,03 W.

4 VZTLAKOVÁ VERTIKÁLNÍ HYBRIDNÍ VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA

Jak bylo zmíněno výše, obě varianty vyrobených větrných elektráren používají stejný generátor. Tato vztlaková hybridní větrná elektrárna se liší pouze ve tvaru rotoru, ve způsobu uchycení lopatek k hřídeli a v použitých magnetech. Zároveň jsou namísto jednoho flexibilního FV panelu nalepeny tři FV panely na každou lopatku. Výkon jednoho instalovaného panelu má maximální výkon 0,5 W. Elektrárna obsahuje celkem 9 flexibilních FV panelů.

4.1 Konstrukce lopatek a uchycení

Pro výrobu lopatek byl zvolen aerodynamický profil s označením EPPLER 398, který se vyznačuje skvělými tokovými vlastnostmi vzduchu a je vhodný pro použití ve spojení s vertikální větrnou turbínou. Zároveň není příliš tenký, tudíž je zaručena bezproblémová tisknutelnost na FDM 3D tiskárně.



Obrázek 43 Aerodynamický profil EPPLER 398 z databáze airfoiltools.com [74]

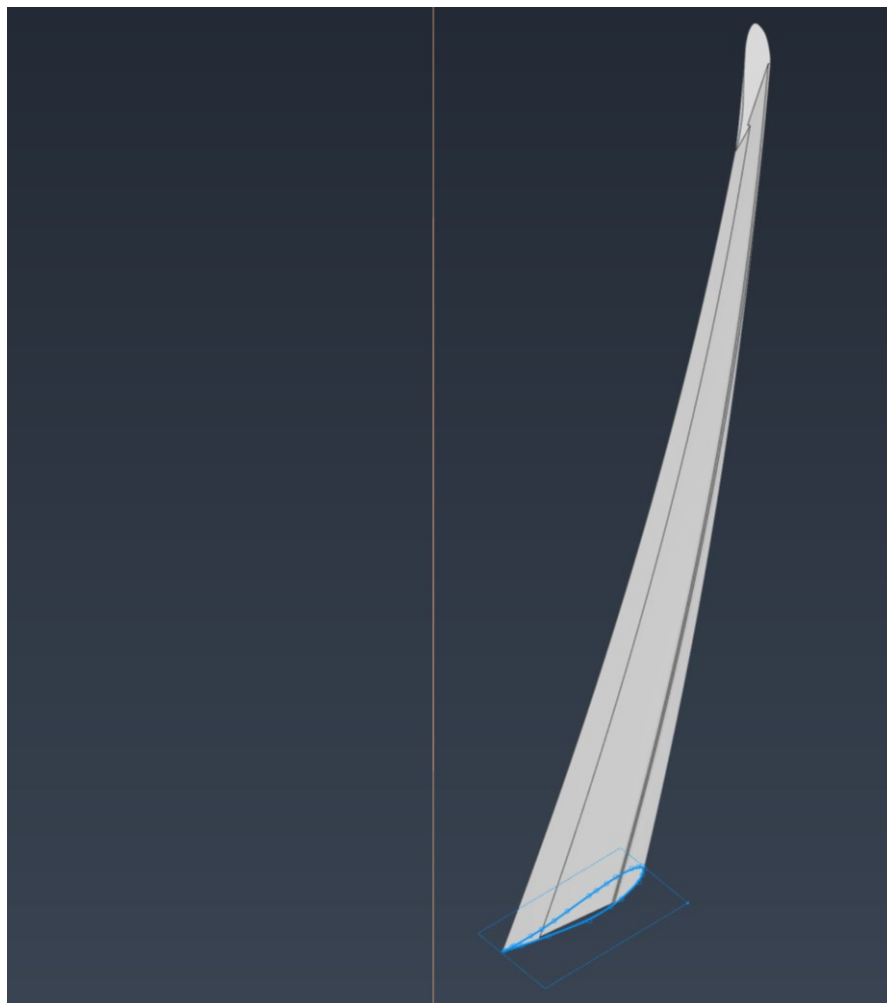
Z databáze aerodynamických profilů dostupné na adrese airfoiltools.com [74] byl vyhledán zvolený profil a vykreslen na obrázku výše. Tento profil byl posléze uložen jako obrázek, aby bylo možné z něj vytvořit 3D model.

Obrázek profilu EPPLER 398 byl vložen do programu Autodesk Inventor a obkreslen pomocí funkce Spline. Funkce Spline je matematicko-numerická metoda používaná pro interpolaci či aproximaci funkcí pomocí spojitě křivky, jenž prochází danými body (tzv. uzly).

Po vytvoření CAD náčrtu zvoleného profilu bylo možné vytvořit lopatku obyčejným tažením načrtnutého profilu. Vznikla by tak turbína typu H-Darrieus.

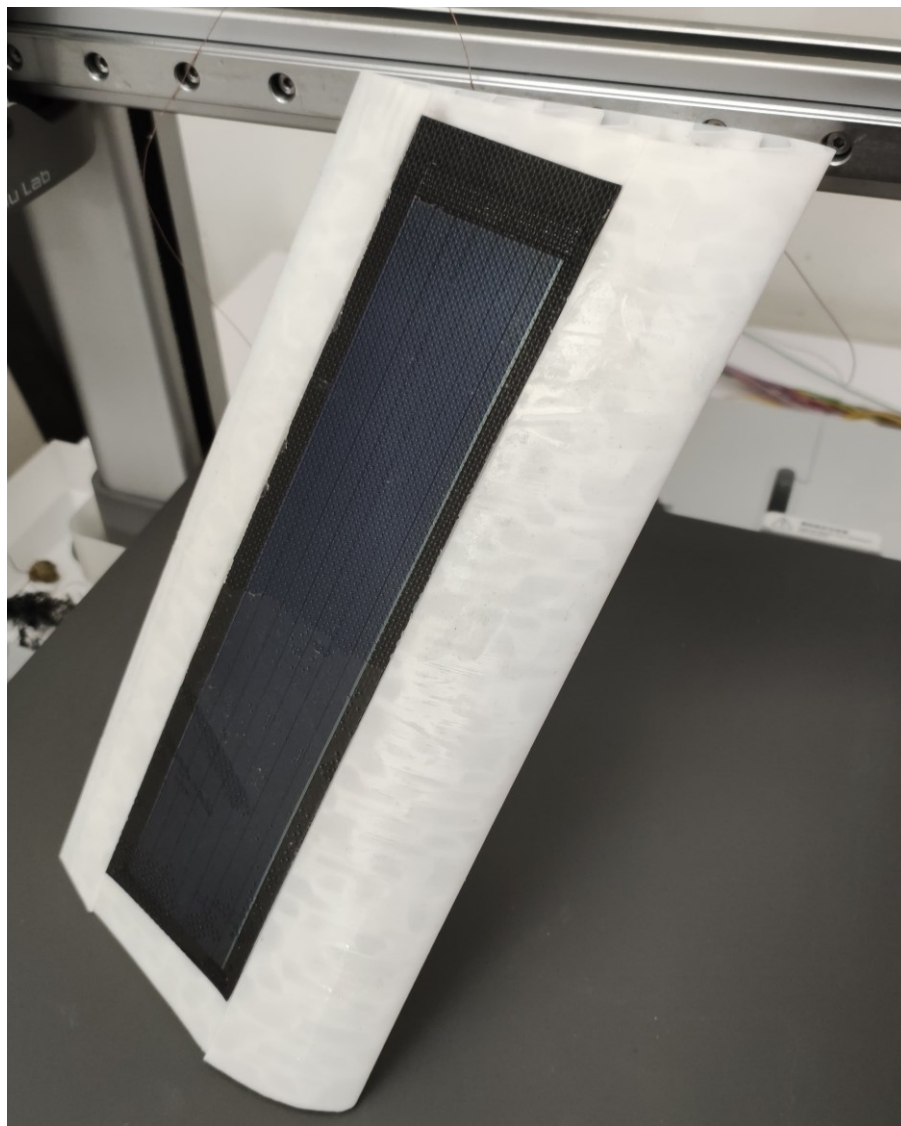
Kvůli zlepšení efektivity této vztlakové elektrárny byla lopatka vymodelována pomocí funkce spirála. Výška lopatky (a také spirály) byla 600 mm a její profil byl tažen pod úhlem 15°. Pro zjednodušení si modelování této lopatky můžeme představit jako tažení

načrtnutého profilu po křivce, která je spirálou s velmi nízkým počtem závitů ($n < 1$) a velkou vzdáleností závitů. Posléze byla stejným způsobem do lopatky vytvořena drážka pro fotovoltaické panely.



Obrázek 44 Vizualizace 3D modelu vztlakové lopatky

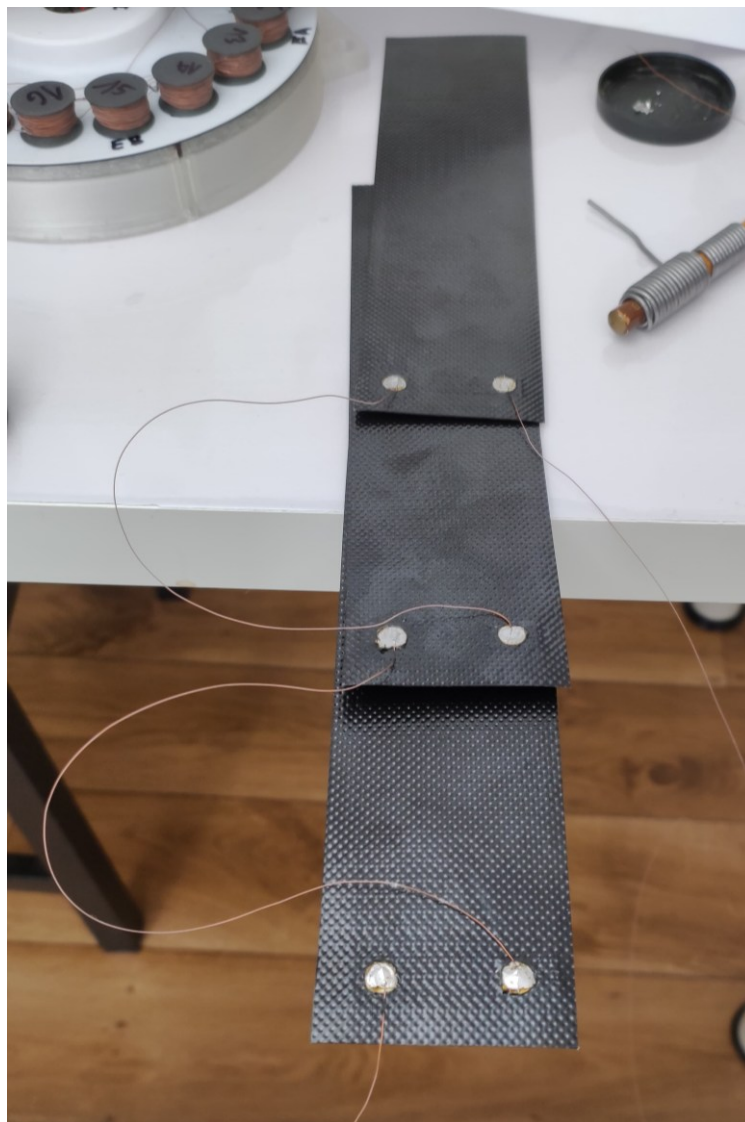
Kvůli tomu, že je lopatka vysoká 600 mm bylo nutno ji tisknout po částech a následně lepit. Hotový 3D model ve formátu STL byl ve sliceru BambuStudio rozřezán na třetiny s přidavkem spojovacích čepů pro snadnější lepení. Tisk jedné lopatky rozřezané na 3 části trval 10,5 h. Jednotlivé segmenty lopatek byly slepeny kyanoakrylátovým lepidlem, aby byl spoj co nejrychleji vytvrzený.



Obrázek 45 Zkušební prototyp segmentu vztlakové lopatky pro ověření kompatibility s flexibilním FV panelem

4.2 Fotovoltaika vztlakové VAWT

Nejnáročnější výrobní operací bylo lepení flexibilních FV panelů do vztlakových lopatek, protože bylo nutné použít 3 panely na jednu lopatku. Zároveň byla tato operace obtížná kvůli komplexnímu tvaru lopatky, který zapříčiňoval to, že podstava tří spájených fotovoltaických panelů měla tendenci sklouzávat z drážky pro jejich lepení. Tento problém byl v průběhu lepení vyřešen použitím lepicí pásky pro dočasnou fixaci FV panelů v jím určené drážce. Každé tři panely byly spájeny sériově, aby bylo dosaženo vyššího generovaného napětí. Kvůli jejich spojení pomocí tenkého drátku, který byl zároveň použit pro tvorbu vinutí, bylo lepení této podstavy FV panelů velmi komplexní.



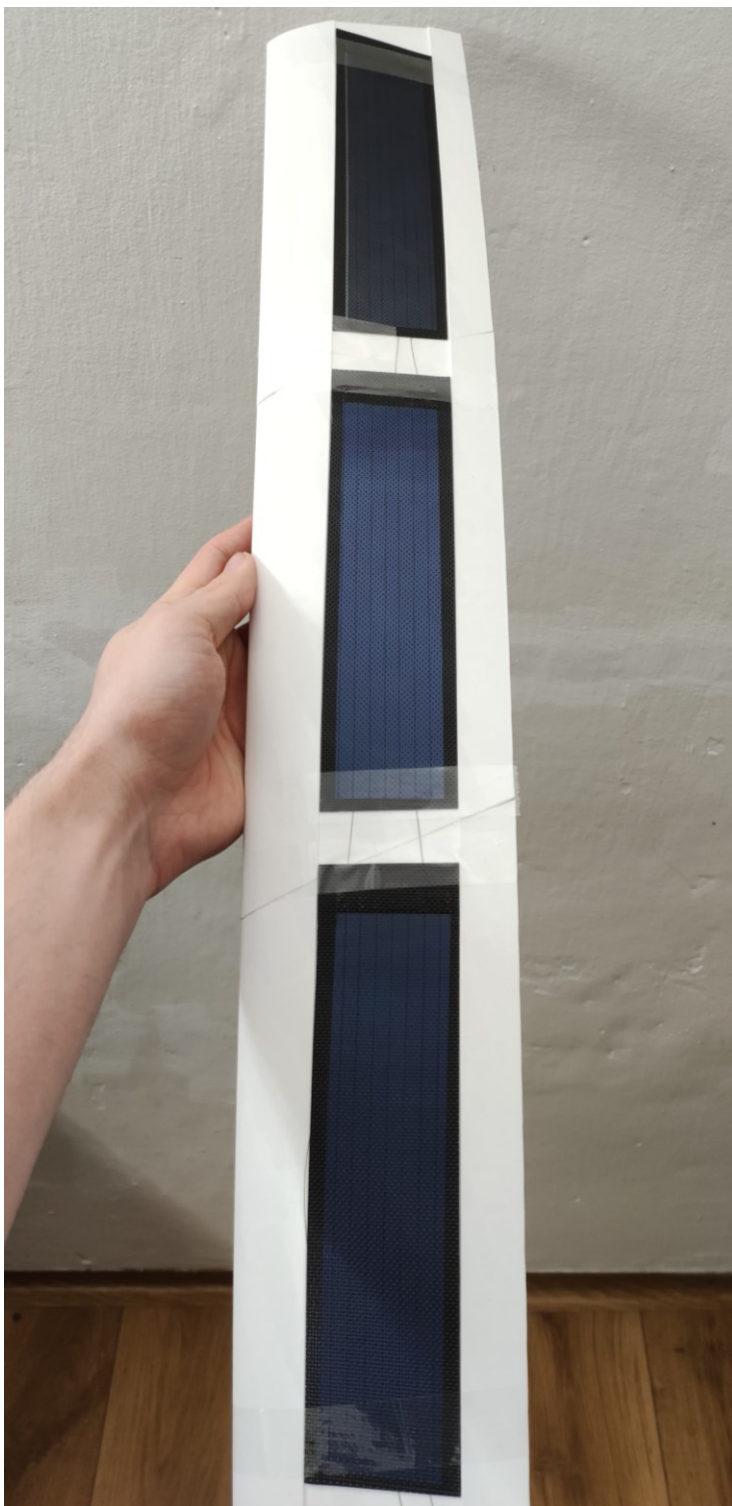
Obrázek 46 Sériové propojení tří FV panelů připravených k lepení do vztlakové lopatky

Vhodnost drátku pro spojení FV panelů byla před jeho použitím ověřena pomocí jednoduchého výpočtu, kde byl brán v potaz průřez drátu, jeho materiál a proud, který budou FV panely generovat. Bylo dohledáno, že proudová zatížitelnost měděného drátu je 6 A/mm^2 . Maximální proud, který by mohl jeden z použitých FV panelů generovat je 333 mA. Jelikož má námi použitý drát průměr 0,2 mm, je jeho maximální proudová zatížitelnost až 1,2 A. Maximální možný proud z jednoho FV panelu je menší než maximální proudová zatížitelnost drátu, tudíž je drát pro tuto aplikaci dostačující.

K lepení posloužila licí flexibilní pryskyřice s označením F-60, která je využívána pro výrobu flexibilních LED pásků. Zesíťování této epoxidové pryskyřice trvalo cca 48 h.

Po nalepení FV panelů do lopatek byla vymodelována uchycení lopatek ke hřídeli. Jelikož každá z lopatek bude ke hřídeli uchycena na dvou bodech, bylo nutno vymodelovat

dvě hřídelové spojky pro tuto aplikaci. Ke spojení hřídele s lopatkou byla použita hliníková trubička o průměru 6 mm.



Obrázek 47 Hotová vztlaková lopatka s flexibilními FV panely dočasně fixovanými pomocí lepící pásky

Vodiče z FV panelů byly z lopatek do hřídele vedeny právě těmito hliníkovými trubičkami napojenými na hřídel pomocí šroubů. Pro zjednodušení výroby byly jednotlivé vývody z lopatek spájeny paralelně. Výstupní napětí je tudíž rovno napětí z jedné lopatky, avšak výkon je tímto zvýšený.

4.3 Průběh měření napětí na vinutí

Kvůli použití tenčích magnetů v rotoru vztlakové VAWT bylo průměrné generované napětí nižší než v případě odporové VAWT. Důležité je, že došlo k samovolnému započetí rotace díky obtékání vzduchu okolo vztlakových profilů lopatek. Tento fakt potvrzuje to, že by tato hybridní vztlaková vertikální větrná elektrárna byla použitelná v praxi.

Tabulka 5 Průběh měření napětí z vinutí vztlakové VAWT

Vinutí vztlakové VAWT	
č. měření	napětí [V]
1	0,218
2	0,224
3	0,200
4	0,119
5	0,159
6	0,309
7	0,271
8	0,192
9	0,188
10	0,103
Průměr	0,198
Sm. Odch.	0,063

Výsledky měření odhalují, že vztlaková turbína dokázala vygenerovat v průměru pouze $(0,20 \pm 0,06)$ V, což je nižší hodnota než u odporové turbíny. Výsledky napětí z primárního vinutí budou diskutovány a odůvodněny v závěru této diplomové práce.



Obrázek 48 Měření napětí na hybridní vztlakové VAWT

4.4 Průběh měření napětí z fotovoltaiky

Jak již bylo řečeno v úvodních kapitolách pro vztlakovou turbínu, fotovoltaika je tomto případě o něco složitější než v případě odporové turbíny, jelikož bylo nutno použít více užších FV panelů, aby došlo k pokrytí celé lopatky. Do jedné lopatky byly zakomponovány 3 flexibilní FV panely a spojeny sériově. Jejich napětí se tudíž sčítá.

Výstupní vodiče z lopatek byly posléze spojeny paralelně, tudíž se násobí solární výkon jedné lopatky počtem lopatek. Díky tomu, že bylo celkem použito 9 FV panelů, z nichž byly vytvořeny tři podsestavy pro každou lopatku, je tato varianta VAWT ve fotovoltaiice výkonnější než odporová VAWT, která má celkem 3 FV panely. Měření odhalilo, že průměrné naměřené napětí je nepatrně nižší než u odporové turbíny. Avšak kdyby se všech 9 FV panelů vztlakové turbíny zapojilo sériově, bylo by výstupní napětí mnohem vyšší. Jejich sériové zapojení by bylo bohužel náročnější na provedení. Benefitem fotovoltaiiky ve vztlakové turbíně je vyšší výkon, tudíž i větší proud, který poteče vodiči z fotovoltaiiky.

Tabulka 6 Průběh měření napětí z fotovoltaiiky na vztlakové VAWT

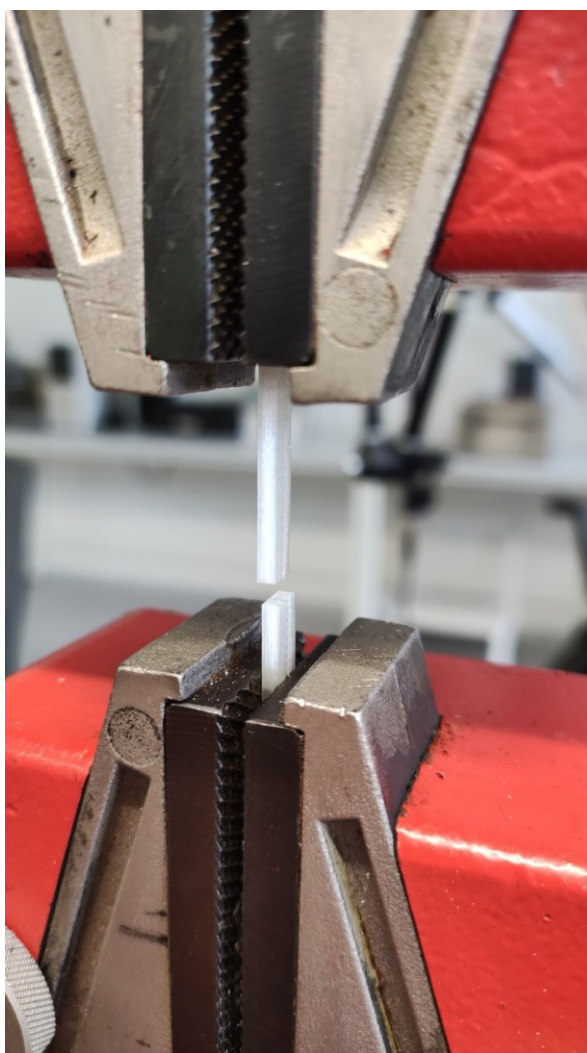
Fotovoltaiika vztlakové VAWT	
č. měření	napětí [V]
1	5,76
2	5,78
3	5,07
4	5,13
5	4,83
6	5,56
7	5,49
8	5,47
9	5,59
10	4,83
Průměr	5,35
Sm. Odch.	0,36

Během otáčení turbíny vztlakové VAWT byly naměřeny hodnoty v tabulce výše. Průměrná hodnota výstupního napětí z fotovoltaiiky vztlakové turbíny byla $(5,4 \pm 0,4)$ V.

5 ANALÝZA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

Použité materiály, které jsou v naší aplikaci nějakým způsobem mechanicky namáhány byly podrobeny tahové zkoušce pro ověření jejich mechanických vlastností v porovnání s jejich materiálovými listy. Bylo provedeno 8 měření pro každý testovaný materiál dle normy ČSN EN ISO 527-2. Testovací tělíska byla tisknuta standartní rychlostí s plnou výplní a čtyřmi perimetry na tiskárně Bambulab P1S.

Na trhacím přístroji byl použit silnější tenzometr pro měření vzorků až do síly přetržení 500 kg. Z první tabulky u materiálu PLA je patrné, že by vedlejší tenzometr, který byl dimenzován maximálně na 50 kg mohl být poškozen, jelikož maximální naměřená síla k přetržení byla až 587,4 N, což odpovídá cca 60 kg. Pro uchycení vzorků byly použity mechanické kleštiny, do kterých se testovací tělísko upínalo otáčením aretační matice, která otevírala či zavírala kleštiny.



Obrázek 49 Demonstrace přetrženého testovacího tělíska z PLA na mechanicky uzavíratelných kleštinách

Na závěr byly pořízeny mikroskopické snímky všech použitých materiálů pomocí elektronového mikroskopu.

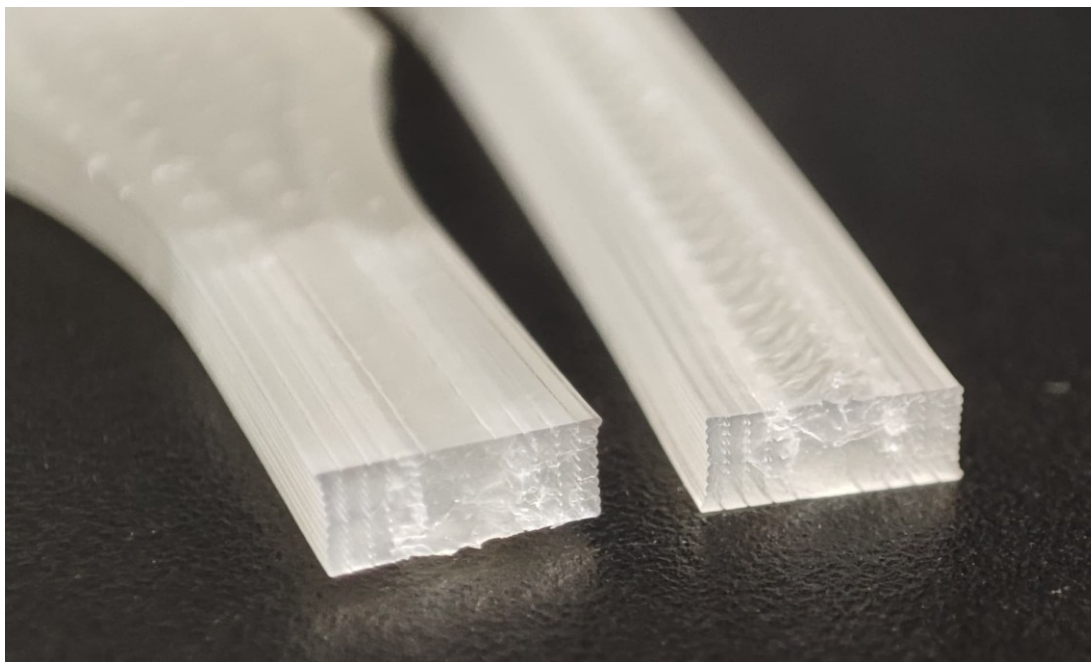
5.1 Tahová zkouška PLA

PLA neboli kyselina polylaktidová je polymer, který se vyznačuje perfektní tisknutelností metodou FDM a velmi nízkým koeficientem smrštění. Byl využit pro tisk těla statoru, jeho krytu a také pro výrobu lopatek odporové turbíny. Lopatky této turbíny i jejich hřídelová uchycení jsou zhotoveny z tohoto materiálu, tudíž nejsou vhodné pro venkovní použití, kvůli horší UV stabilitě materiálu. Lopatky turbíny nebyly tisknuty z odolnějších materiálů z důvodu časového presu a vzniku odpadu. Nevýhodou tohoto materiálu je velká křehkost, kterou můžeme vydedukovat z vysokých naměřených hodnot modulu pružnosti.

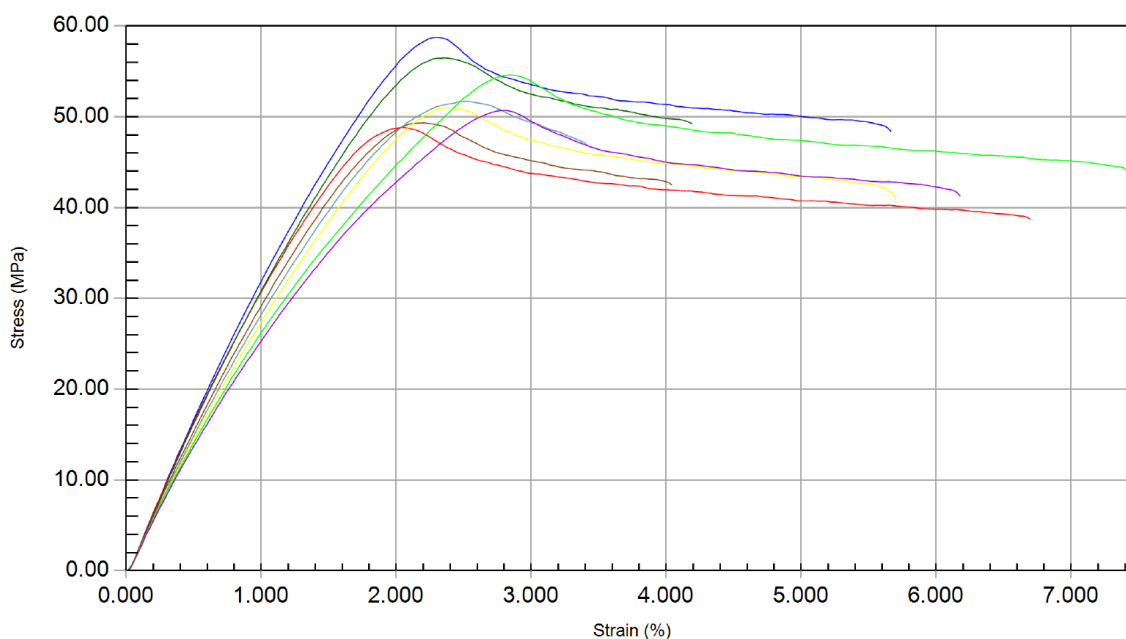
Tabulka 7 Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro PLA

Č. Měření	$F_{\max}$ [N]	A [%]	E [MPa]	σ_s [MPa]	σ_k [MPa]
1	587,40	5,67	3333,50	48,41	58,67
2	488,04	6,70	3313,27	38,73	48,77
3	564,70	4,19	3169,97	49,22	56,42
4	493,13	4,04	2921,19	42,48	49,29
5	517,00	3,42	2907,92	46,80	51,65
6	509,90	5,70	2797,30	40,91	50,97
7	546,00	7,42	2646,72	43,94	54,52
8	507,10	6,18	2575,90	41,29	50,66
Minimum	488,04	3,42	2575,90	38,73	48,77
Průměr	526,66	5,41	2958,22	43,97	52,62
Maximum	587,40	7,42	3333,50	49,22	58,67
Sm. odch.	35,62	1,40	289,02	3,81	3,55

Z tabulky můžeme vyčíst, že průměrný naměřený modul pružnosti PLA byl $(2958,2 \pm 289,0)$ MPa tedy téměř 3 GPa. Tato hodnota odpovídá materiálovým listům výrobců tiskových strun PLA, kteří uvádějí modul pružnosti neplněného a nepigmentovaného PLA až 3,5 GPa. Průměrné napětí v kluzu bylo $(52,6 \pm 3,6)$ MPa, což je vyšší hodnota, než je napětí při přetržení σ_s . Krček nedocházel



Obrázek 50 Detailní pohled na přetržené tělísko z PLA



Obrázek 51 Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro PLA

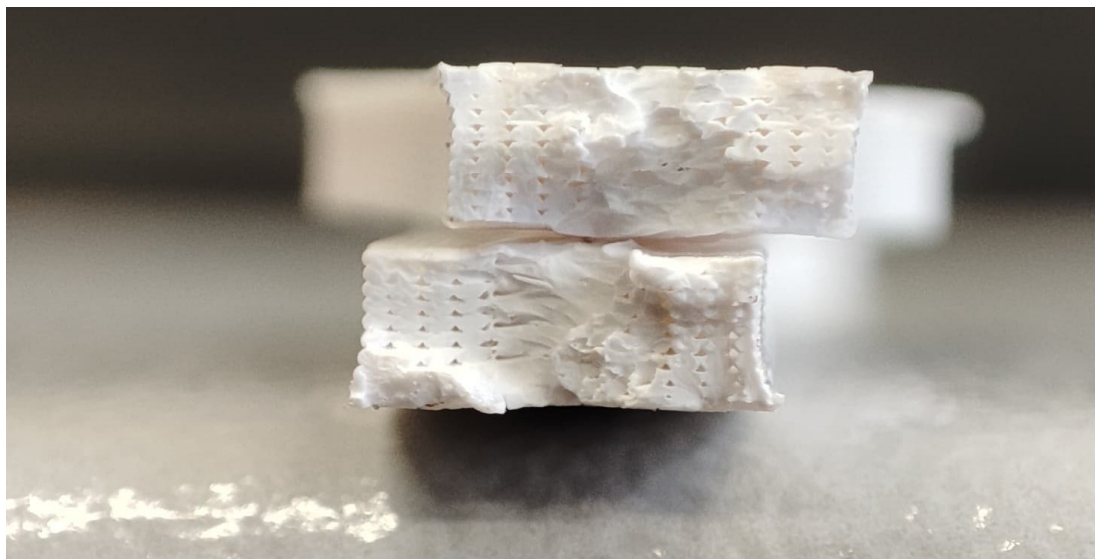
5.2 Tahová zkouška ASA

ASA neboli akrylonitrilstyrenakrylát je polymer hojně využívaný v automotive průmyslu pro jeho výjimečnou odolnost proti UV záření. Jeho tisknutelnost není jednoduchá, avšak při správném nastavení 3D tiskárny je tisk v komoře možný. Důležité je minimalizovat chlazení výtisku, které by mohlo způsobit nadměrné smršťování výtisku – praskliny mezi vrstvami či kompletní utržení od podložky. Testovací tělíska pro tahovou zkoušku musela

být tisknuta na hladkou PEI podložku předeřátou na maximální teplotu 100 °C a pro jistotu adheze k podložce byl použit límec, který byl před tahovou zkouškou z tělísek odstraněn. Pro jeho obtížnou tisknutelnost byly z tohoto materiálu vytisknuty pouze lopatky vztlakové VAWT, což je činí vhodnými pro dlouhodobé venkovní použití.



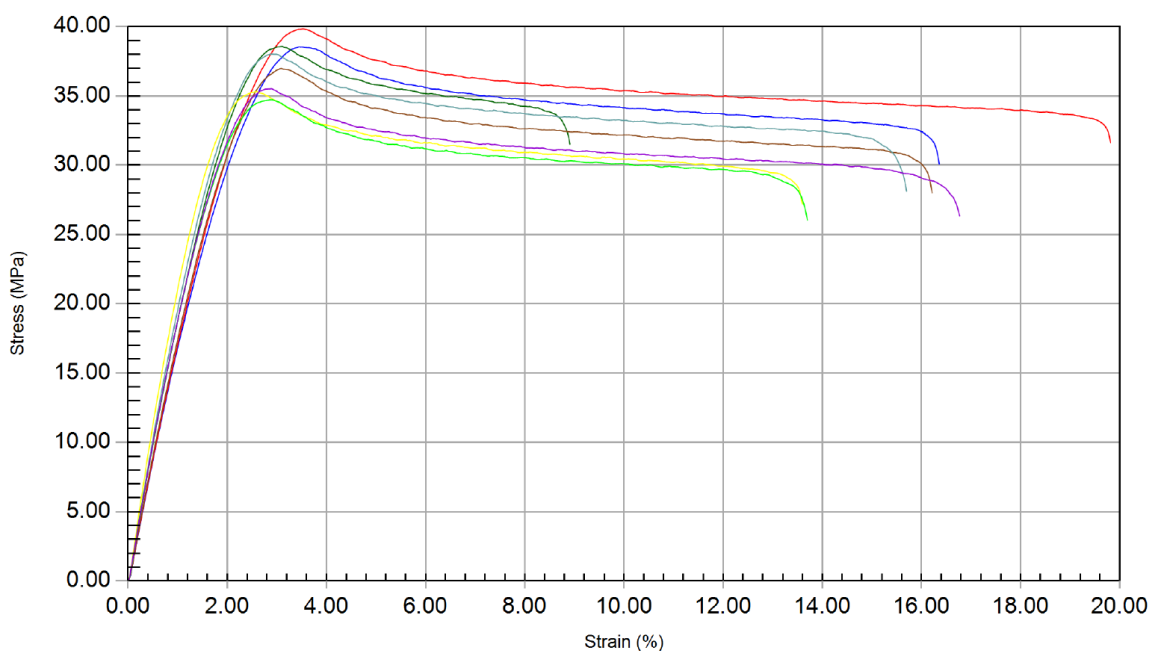
Obrázek 52 Ukázka testovacích tělísek z ASA tisknutých s límcem



Obrázek 53 Detailní pohled na přetržené testovací tělísko z ASA značky Elegoo

Tabulka 8 Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro ASA značky Elegoo

Č. Měření	F _{max} [N]	A [%]	E [MPa]	σ _s [Mpa]	σ _k [MPa]
1	385,41	16,36	1732,62	30,08	38,50
2	398,27	19,82	1737,98	31,61	39,80
3	385,82	8,91	1913,93	31,52	38,54
4	369,81	16,22	1763,40	27,99	36,96
5	380,14	15,70	2011,56	28,12	38,00
6	353,21	13,60	2234,35	27,18	35,29
7	347,25	13,70	1951,53	26,03	34,71
8	355,26	16,77	1915,57	26,34	35,51
Minimum	347,25	8,91	1732,62	26,03	34,71
Průměr	371,90	15,13	1907,62	28,61	37,16
Maximum	398,27	19,82	2234,35	31,61	39,80
Sm. odch.	18,43	3,18	168,94	2,21	1,84



Obrázek 54 Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro ASA zn. Elegoo

Z tabulky můžeme vyčíst, že průměrný naměřený modul pružnosti ASA byl $(1907,6 \pm 168,9)$ MPa. Tato hodnota velmi blízce odpovídá hodnotě z materiálového listu výrobce Elegoo, který uvádí modul pružnosti 1905 MPa. Z použitých materiálů má ASA největší tažnost, takže by se dalo říct, že je nejpružnější.

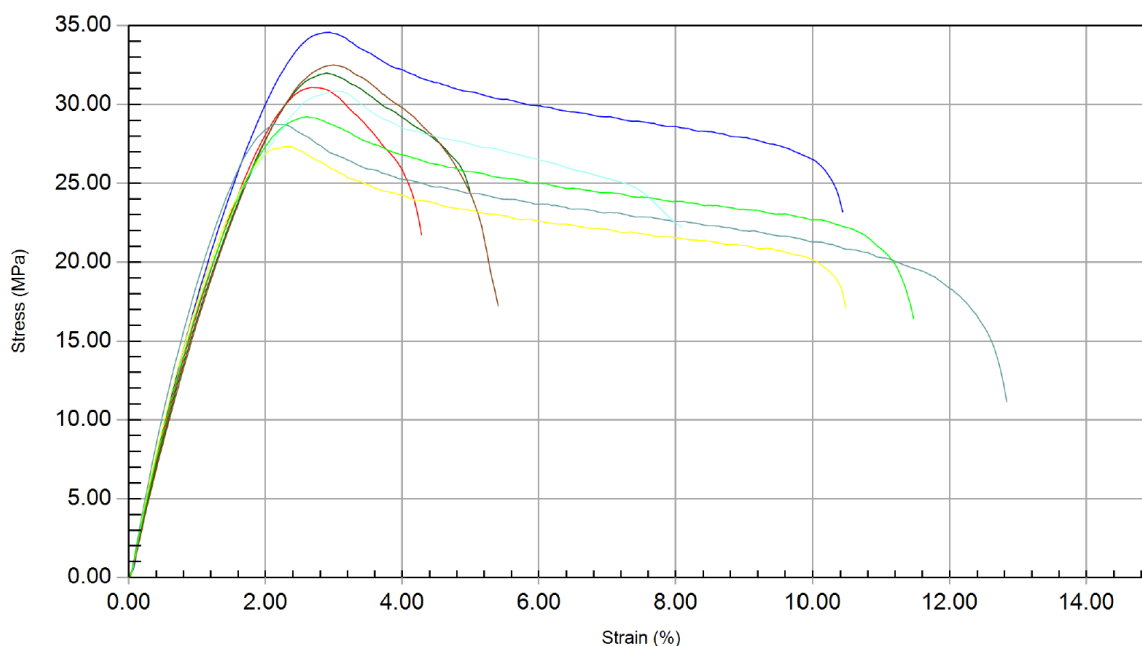
5.3 Tahová zkouška PET-G HF

Polyethylen tereftalát modifikovaný glykolem s označením HF je materiál značky Bambulab s příměsemi, které činí materiál méně viskózním při tavení. Nižší viskozita taveniny dovoluje tisknout tento materiál téměř stejně rychle, jako PLA. Zároveň si výtisk zachovává vlastnosti PET-G, tedy výbornou houževnatost, nárazuvzdornost, odolnost vůči povětrnostním podmínkám a dobrou tepelnou odolnost. Jeho nevýhodou je to, že je vysoce hygroskopický, tudíž je vhodné jej před použitím sušit a uchovávat jej v suchu. Tisk s materiálem, který absorboval vlhkost, bude vykazovat stringing a mít sníženou adhezi mezi vrstvami.

Tabulka 9 Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro PET-G HF Bambulab

Č. Měření	F _{max} [N]	A [%]	E [MPa]	σ _s [Mpa]	σ _k [MPa]
1	345,81	10,43	1854,80	23,19	34,57
2	310,93	4,28	1745,33	21,73	31,08
3	319,84	5,00	1665,07	24,31	31,95
4	325,00	5,41	1645,17	17,21	32,48
5	287,60	12,84	2003,27	11,13	28,65
6	273,34	10,48	1929,66	17,10	27,33
7	292,19	11,47	1917,34	16,41	29,21
8	312,65	6,80	1987,54	22,14	30,65
Minimum	273,34	4,28	1645,17	11,13	27,33
Průměr	308,42	8,34	1843,52	19,15	30,74
Maximum	345,81	12,84	2003,27	24,31	34,57
Sm. odch.	23,16	3,33	141,47	4,45	2,32

Z naměřených hodnot je zřejmé, že námi použité PET-G HF nebylo dostatečně vysušené, jelikož jsou hodnoty o něco nižší, než uvádí výrobce v materiálovém listu. Výrobce uváděný modul pružnosti je (2050 ± 120) MPa, námi změřený modul pružnosti je $(1843,5 \pm 141,5)$ MPa. Pevnost v tahu, kterou uvádí výrobce je (34 ± 4) MPa. Tato hodnota je bližší naměřené hodnotě $(30,7 \pm 2,3)$ MPa. Stejně tak i prodloužení při přetržení bylo velmi podobné hodnotě z materiálového listu, kde výrobce uvádí $(8,6 \pm 1,2)$ %, přičemž reálné změřené prodloužení bylo $(8,3 \pm 3,3)$ %.



Obrázek 55 Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro PET-G HF značky Bambulab

Velká směrodatná odchylka u prodloužení je zřetelná z grafu výše, kde je zároveň patrné, že u testovaných vzorků se často velmi lišila hodnota prodloužení při přetržení. Toto mohlo být způsobeno nekonzistentní přídržnou silou na kleštinách trhačského přístroje, jelikož bylo každý vzorek nutno upnout manuálně. Opakované manuální upínání vyžadovalo pokaždé ručně utáhnout matici na kleštinách. Utahovací moment nebyl nijak měřen a jeho rozdílnost mohla způsobit tuto velkou odchylku v měření prodloužení při přetržení.



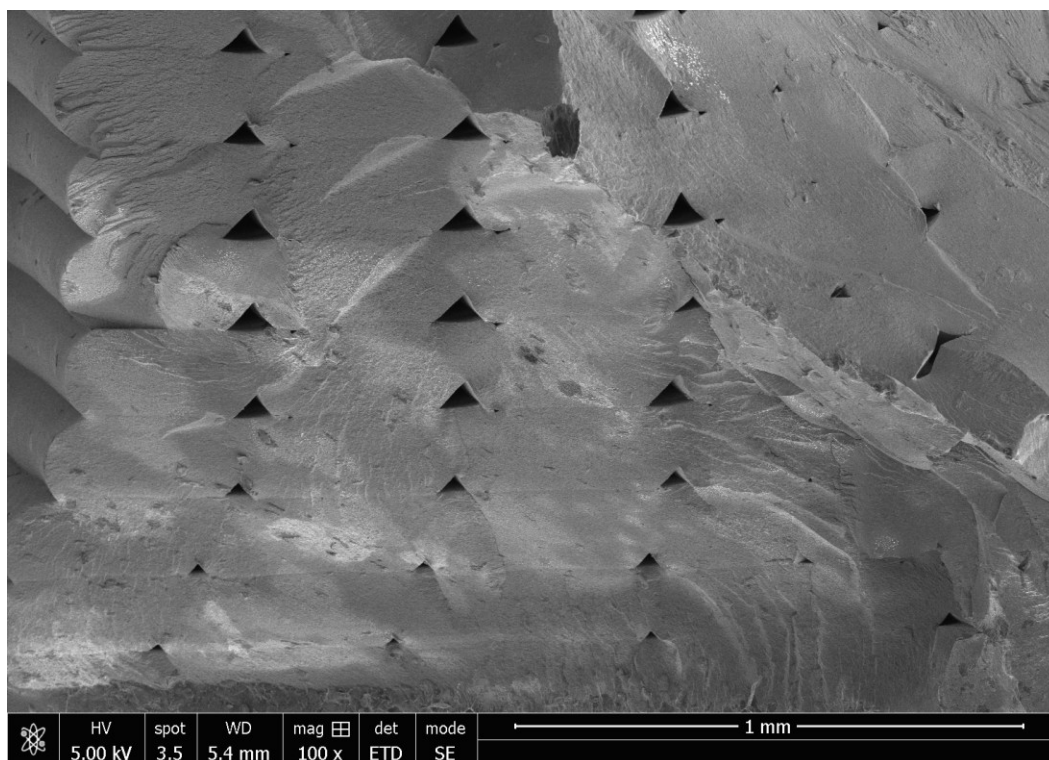
Obrázek 56 Detailní pohled na přetržené testovací tělísko z PET-G HF značky Bambulab

Kvůli tomu, že byl tento materiál použit spíše na prototypování součástí, jako jsou hřídelové kroužky, vymezovací válečky atp., byly výsledky tahové zkoušky uspokojivé. Nejdůležitější bylo zjištění, že byla dosažena dostatečná adheze materiálu mezi vrstvami. Při modelování hřídelových spojek byl brán ohled na dodržení dostatečné tloušťky stěn, pro udržení stavěcích šroubů, které drží spojky pevně na hřídeli.

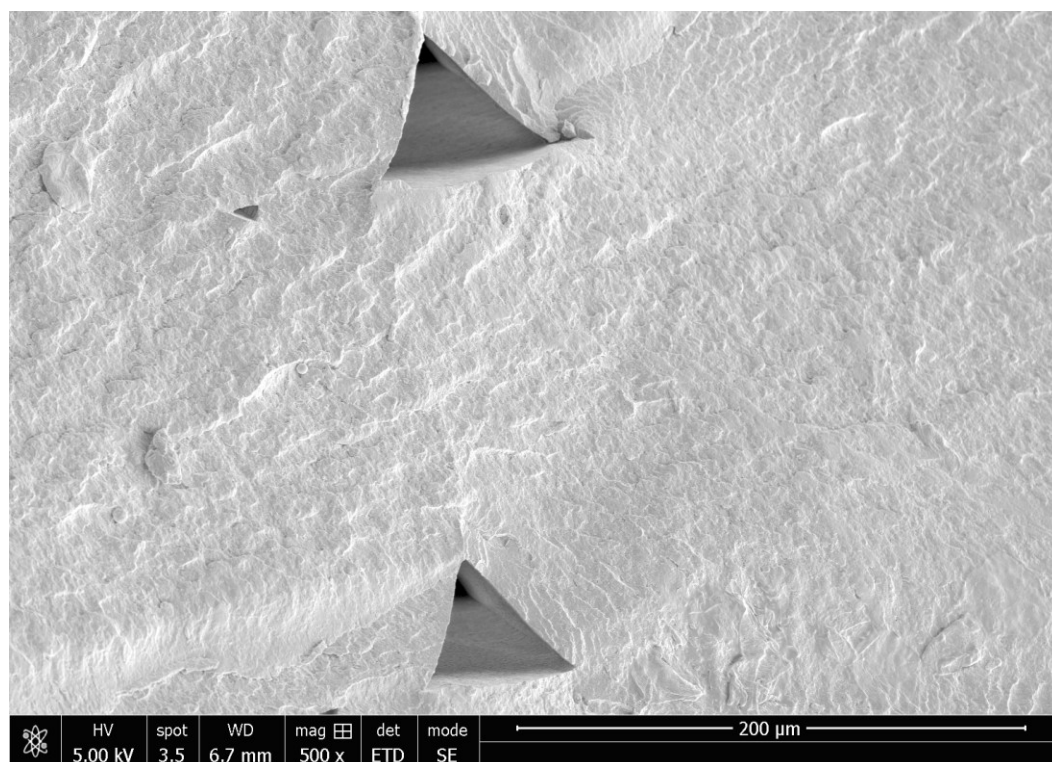
Ze všech materiálů testovaných na trhacím přístroji byl právě tento materiál tím, na kterém byl okem pozorovatelný krček před selháním materiálu. Toto je způsobeno právě výbornou houževnatostí a tažností materiálu.

5.4 Snímky z elektronového mikroskopu

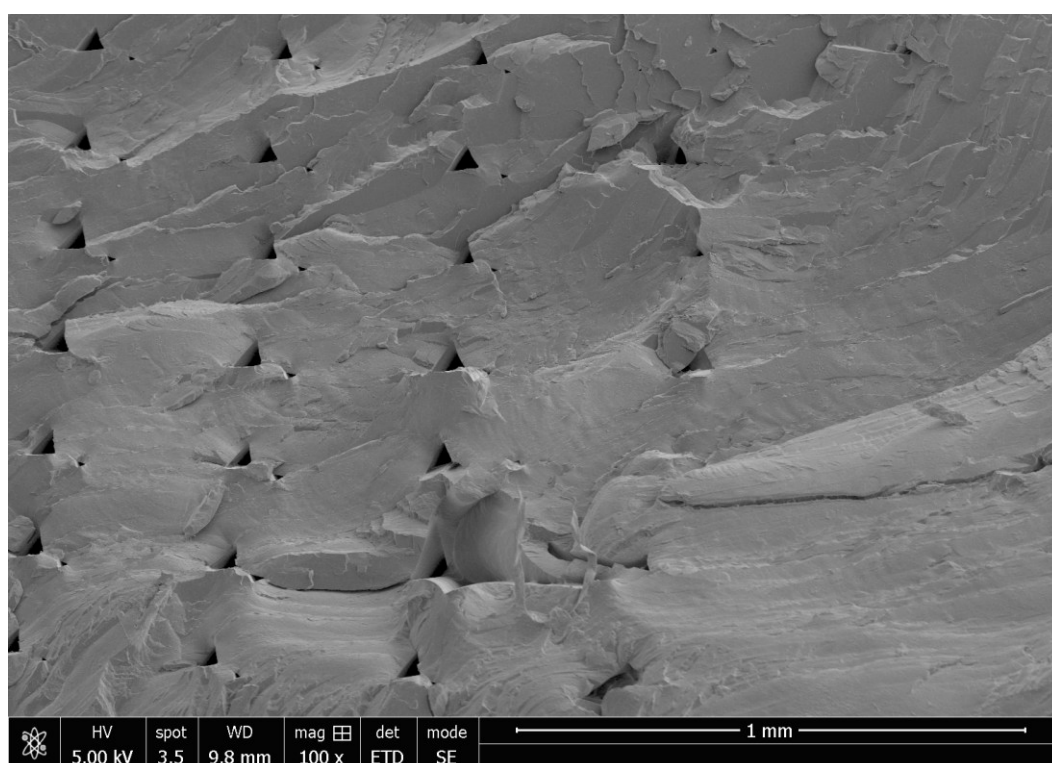
Skenovací elektronový mikroskop (SEM), konkrétně model Nova NanoSEM 450 (FEI) posloužil pro vytvoření mikroskopických snímků použitých materiálů. Od každého materiálu bylo vytištěno extra tělísko pro mikroskopii. Jednotlivá tělíska musela být hluboce podchlazena v tekutém dusíku, aby bylo možné na každém tělísku provést lom. Podchlazování polymerů pro mikroskopii se provádí za účelem vzniku křehkého lomu při stejných podmínkách ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), který je vhodný pro detailní pozorování vnitřní morfologie.



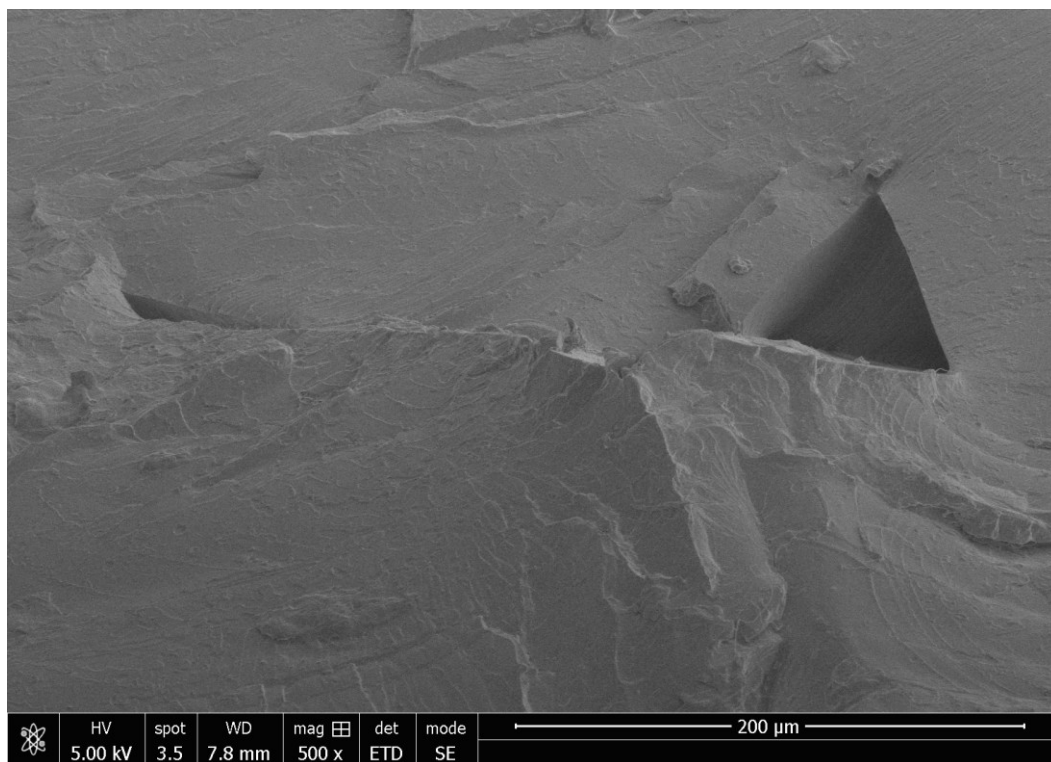
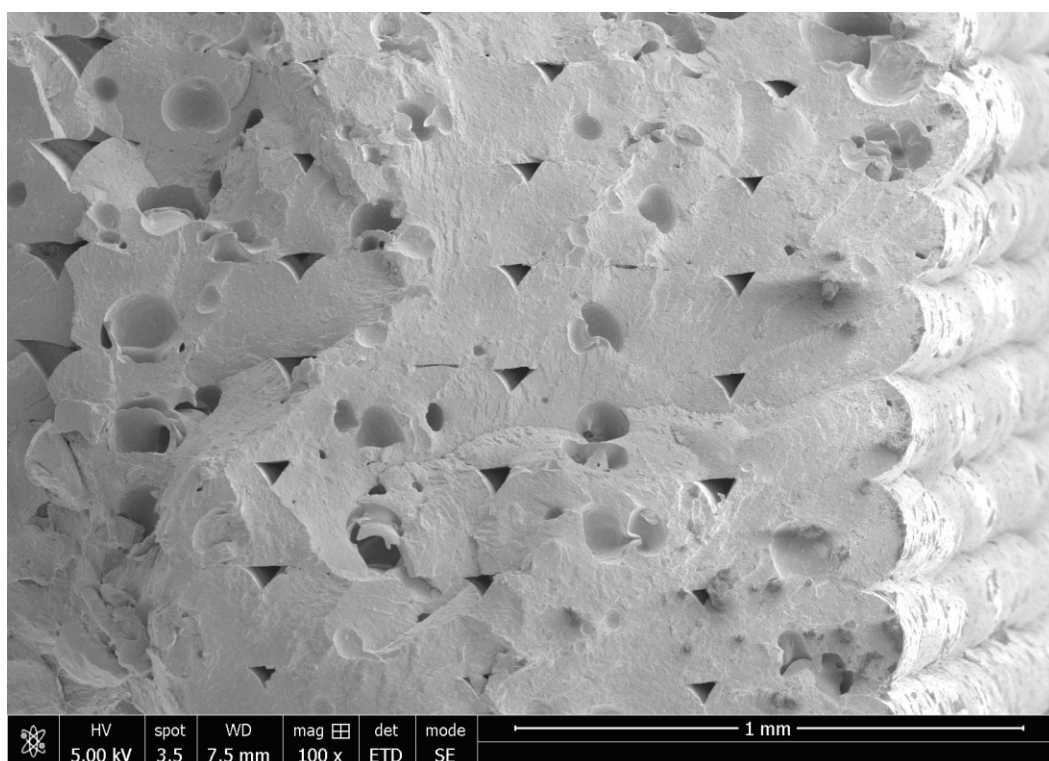
Obrázek 57 Lom ASA (měřítko 1 mm)



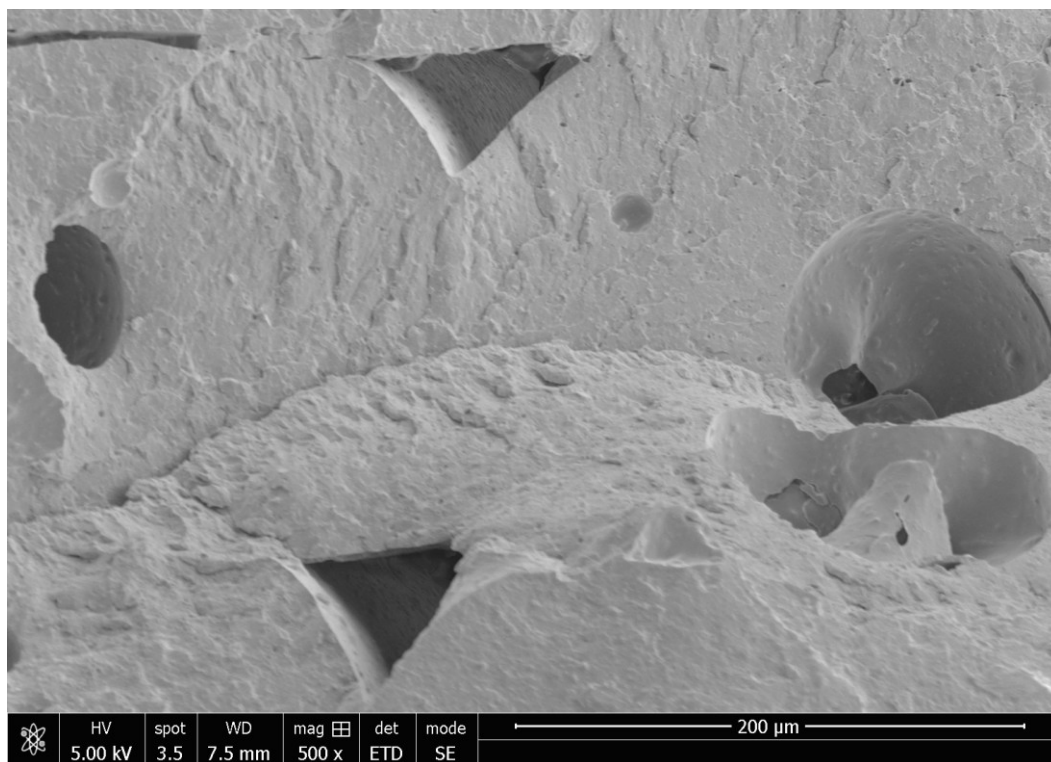
Obrázek 58 Lom ASA (měřítko 200 μm)



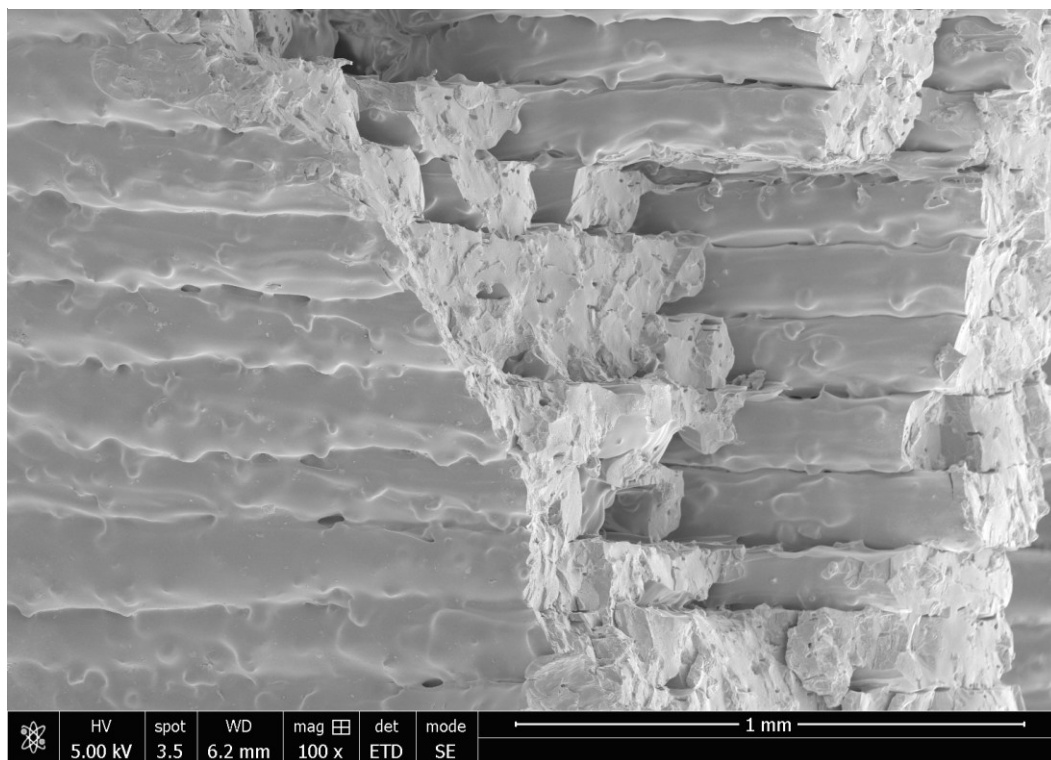
Obrázek 59 Lom PLA (měřítko 1 mm)

Obrázek 60 Lom PLA (měřítko 200 μm)

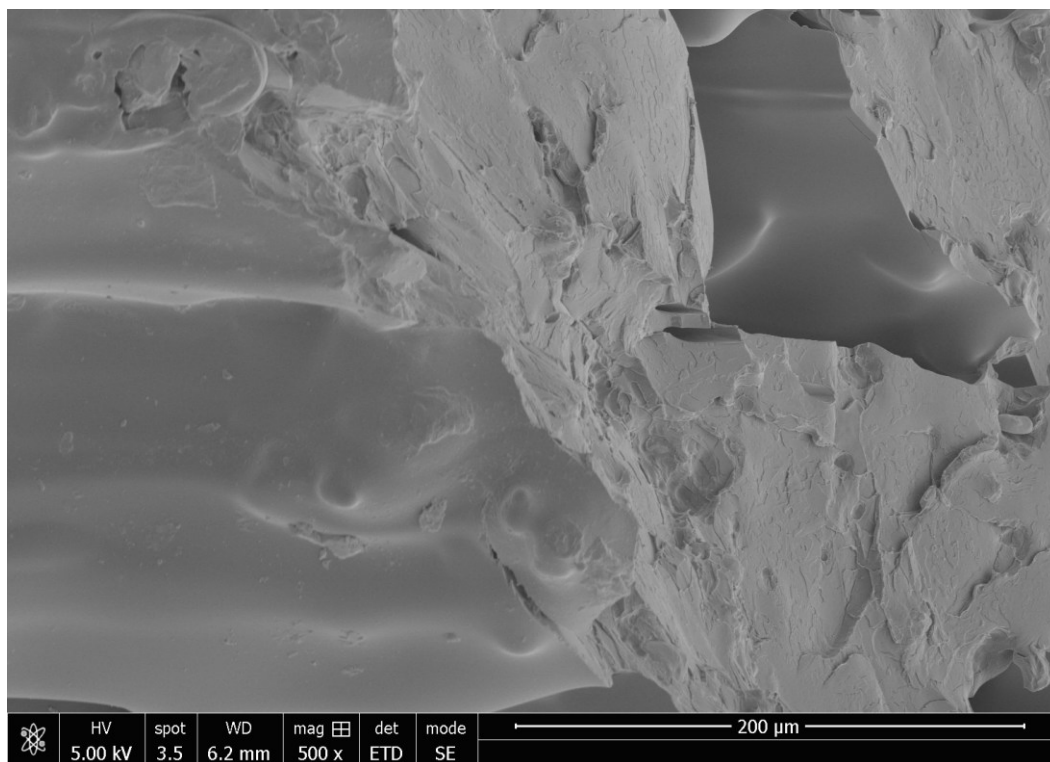
Obrázek 61 Lom PET-G HF (měřítko 1 mm)



Obrázek 62 Lom PET-G HF (měřítko 200 μm)



Obrázek 63 Lom Iron-PLA (měřítko 1 mm)



Obrázek 64 Lom Iron-PLA (měřítko 200 μm)

5.4.1 Diskuze k SEM mikroskopii

Pro každý materiál byly zhotoveny dva snímky lomu, a to v měřítku 1 mm a 0,2 mm. V případě neplněných materiálů (ASA a PLA) můžeme pozorovat relativně čisté lomy. Avšak lom u materiálu ASA se zdá být čistší. U všech materiálů jsou viditelné mezery mezi jednotlivými perimetry. Toto je způsobeno tím, že extrudovaný polymer má podobu válce. I přesto, že se polymer při tisku vrství, což jeho průřez zplošťuje spolu s působením gravitace, výtisky stále vykazují přítomnost vzduchových kapes. Tyto kapsy by mohly být eliminovány speciálním druhem tisku, kde se jednotlivé vrstvy prokládají podobně jako cihly ve zdech. Tento druh 3D tisku je avšak stále jen experimentální a je nutné jej implementovat do moderních slicerů. Bylo dokázáno, že 3D tisk prokládaných vrstev několikanásobně zvýší výslednou pevnost tisku. Došlo by totiž k eliminaci vzduchových kapes, které jsou viditelné téměř na všech SEM snímcích, které vznikají v důsledku standartního FDM 3D tisku, kde se jednotlivé vrstvy pouze vrství na sebe, aniž by se prokládaly. Výsledná pevnost výtisku tudíž závisí na způsobu nastavení tisku ve sliceru. K pevnosti může přispět zpomalení tisku, zvýšení teploty, zvětšení šířky extruze či prokládání tištěných vrstev. Zkoumaná tělíska na mikroskopii i tahovou zkoušku byla tisknuta se stejným nastavením, jako všechny 3D tištěné komponenty zhotovených hybridních VAWT elektráren.

ZÁVĚR

Závěrem této diplomové práce lze konstatovat, že byly zhotoveny dvě hybridní vertikální větrné elektrárny s použitím FDM 3D tisku. Bylo cíleno především na 3D tisk lopatek větrných turbín. Turbíny byly zhotoveny ve dvou variantách, a to v odporové a vztlakové. Do lopatek turbín byla vymodelována vybrání pro nalepení flexibilních fotovoltaických panelů. Pro lepení turbín bylo výhradně použito kyanoakrylátové lepidlo a pro lepení fotovoltaických panelů dvousložková lepidla. Napětí z fotovoltaických panelů bylo pomocí vodičů, vedenými uvnitř duté hřídele, vyvedeno ven z těla elektrárny pomocí elektrického kluzného kroužku, který umožňoval otáčení rotoru současně s přenosem napětí z panelů v lopatkách.

Primárně generují zmíněné elektrárny napětí konvenčním způsobem. S využitím permanentních neodymových magnetů, jimiž bylo otáčeno nad statorem s měděným vinutím, byl generován střídavý proud. Tento alternující třífázový proud byl usměrněn pomocí usměrňovače a měřen jako stejnosměrný. Dá se říci, že výstupem z obou variant VAWT jsou dvě stejnosměrná napětí. Jedno napětí generuje fotovoltaika a druhé alternátor. Obě tato napětí jsou proměnlivá v čase, jelikož sluneční svit a rychlost větru jsou také proměnlivé. Při měření napětí generovaného otáčením rotorů bylo zjištěno, že odporová větrná elektrárna vykazovala ve stejný den vyšší otáčky rotoru (při stejné rychlosti větru) než vztlaková elektrárna. Tudíž bylo průměrné naměřené napětí z vinutí odporové elektrárny vyšší než u vztlakové.

U vztlakové VAWT bylo použito tenčích magnetů pro lepší stabilitu rotoru bez horního uložení hřídele, což je dalším důvodem, proč bylo naměřené průměrné napětí při otáčení vztlakové turbíny nižší než u té odporové. Větší otáčky odporového rotoru byly způsobeny velkou styčnou plochou lopatky s větrem, který působil ve prospěch jejich rotace. Efektivita vztlakových lopatek by se dala zvýšit jejich zvětšením či zvýšením celkového počtu lopatek. Na rozdíl od napětí z fotovoltaiky, které bylo překvapivě vyšší, než uváděl výrobce, bylo generované napětí z alternátoru velmi nízké. Odporová VAWT generovala v maximálních otáčkách necelý 1 V a vztlaková pouze 0,2 V. Tato napětí by se při zachování velikostí a konstrukce rotorů dala zvýšit použitím kvalitnějšího statoru a zhuštěním vinutí. Stator byl tvořen 18 válečky vytisknutými z PLA plněného železem. Kdyby byly válečky celokovové, či vrstvené z plechů, jako jsou konvenční statory, docházelo by k efektivnějšímu generování napětí. Zvýšení generovaného napětí by také šlo docílit zhuštěním vinutí, což by v našem případě vyžadovalo upravit tvar statorových válečků či

zvýšení jejich počtu. Také by mohlo přispět použití tenčího drátu, jelikož by bylo možno navinout více závitů, což by bylo ještě pracnější. Tenčí drát by avšak znamenal nižší proud a vyšší tepelné ztráty.

Tato práce se nezaobírá optimalizací statoru pro maximalizaci jeho efektivity, nýbrž zkoumá funkčnost a možnost výroby větrných turbín pomocí 3D tisku. Použité materiály byly podrobeny tahové zkoušce, aby byly ověřeny jejich mechanické parametry. U materiálů, kde byl znám jejich původ byly naměřené hodnoty porovnány s tabulkovými hodnotami výrobců. Naměřené hodnoty byly velmi podobné těm na materiálových listech. Občas docházelo k nepřesnostem v měření v důsledku manuální chyby.

V závěrečné kapitole jsou použité polymerní materiály zobrazeny elektronovou skenovací mikroskopií (SEM). Na závěr lze konstatovat, že výroba funkční vertikální hybridní větrné elektrárny s dvojím způsobem generování elektřiny je s využitím FDM 3D tisku možná. Klíčové je použití polymerů odolných povětrnostním vlivům a UV záření. Zároveň je důležité nastavení 3D tisku namáhaných součástí ve sliceru, protože právě správné parametry tisku, vhodná tryska a kvalitní tisková struna jsou zde klíčem k dlouhodobé funkčnosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GEBHARDT, Andreas, Julia KESSLER and Laura THURN, 2018. *3D printing: Understanding additive manufacturing*. B.m.: Hanser Publications. ISBN 9781569907023.
- [2] ANDRE, Jean-Claude. From additive manufacturing to 3D/4D printing 2: Current techniques, improvements and their limitations. 1. ed. Standards Information Network, 2017. ISBN 9781119437369.
- [3] DASS, Adrita and Atieh MORIDI. State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. *Coatings*. 2019, vol. 9, no. 7, p. 418. ISSN 2079-6412. DOI: 10.3390/coatings9070418
- [4] KUMAR, L. Jyothish, Pulak M. PANDEY and David Ian WIMPENNY, eds. 3D printing and additive manufacturing technologies. 1. ed. Singapore, Singapore: Springer, 2018. ISBN 9789811303050.
- [5] REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER and Brian GARRET. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. 2018. ISBN 9789082748505.
- [6] SHAHRUBUDIN, N., T. C. LEE and R. RAMLAN. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia manufacturing*. 2019, vol. 35, pp. 1286–1296. ISSN 2351-9789. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.089
- [7] All3dp.com [online] [accessed 22.02.2025]. Available at: <https://all3dp.com/2/bed-slinger-3d-printing-simply-explained/>
- [8] Creality.com [online] [accessed 22.02.2025]. Available at: <https://store.creality.com/blog/corexy-vs-bed-slinger>
- [9] All3dp.com [online] [accessed 22.02.2025]. Available at: <https://all3dp.com/1/sls-3d-printing-the-ultimate-guide/>
- [10] All3dp.com [online] [accessed 22.02.2025]. Available at: <https://all3dp.com/2/vat-polymerization-what-are-sla-dlp-and-lcd/>
- [11] In: All3dp.com [online] [accessed 22.02.2025]. Available at: <https://all3dp.com/2/3d-printing-asa/>

- [12] Anon., [b.r.]. Researchgate.net [online] [accessed. 2025-02-19]. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-fused-deposition-modeling-FDM-3D-printer-consisting-of_fig2_379549737
- [13] Anon., [b.r.]. Bambu hotend - A1 series. Bambu Lab EU [online] [accessed. 2025a-02-19]. Available at: <https://eu.store.bambulab.com/en-cz/products/bambu-hotend-a1-series>
- [14] GUPTA, Ram K., ed., 2023. *3D printing: Fundamentals to emerging applications*. London, England: CRC Press. ISBN 9781032283999.
- [15] HORVATH, Joan and Rich CAMERON, 2020. *Mastering 3D printing: A guide to modeling, printing, and prototyping*. 2nd ed. Berlin, Germany: APress. ISBN 9781484258415.
- [16] Anon., [b.r.]. Researchgate.net [online] [accessed. 2025c-02-19]. Available at: https://www.researchgate.net/figure/The-principle-of-SLA-method-Biega-2013_fig2_321787962
- [17] Anon., [b.r.]. Vshcdn.net [online] [accessed. 2025d-02-19]. Available at: <https://www.fs.cvut.cz/content/images/pracoviste/12134/mapa3D/Obr.18.png>
- [18] KUMAR, Ajay, Parveen KUMAR, Naveen SHARMA and Ashish Kumar SRIVASTAVA, eds., 2024. *3D printing technologies: Digital manufacturing, artificial intelligence, industry 4.0*. Berlin, Germany: De Gruyter. ISBN 9783111214597.
- [19] Anon., [b.r.]. Botland.cz [online] [accessed. 2025b-02-19]. Available at: https://cdn2.botland.cz/97204-pdt_540/3d-tiskarna-creality-ender-3.jpg
- [20] Anon., [b.r.]. Media-amazon.com [online] [accessed. 2025c-02-19]. Available at: https://m.media-amazon.com/images/I/61bZabVhHCL._AC_SL1500_.jpg
- [21] Anon., [b.r.]. Bambu Lab X1C 3D Printer. Bambu Lab EU [online] [accessed. 2025b-02-19]. Available at: <https://eu.store.bambulab.com/en-cz/products/x1-carbon>
- [22] Anon., [b.r.]. Bambu Lab A1 mini 3D printer. Kingly Pte Ltd [online] [accessed. 2025b-02-19]. Available at: <https://www.kingly.sg/products/bambu-lab-a1-mini-3d-printer>

- [23] Anon., [b.r.]. swapmod A1m kit (PREORDER). Swap-systems.com [online] [accessed. 2025i-02-19]. Available at: <https://swap-systems.com/product/swapmod/>
- [24] Anon., [b.r.]. SmallXY. smallXY [online] [accessed. 2025i-02-19]. Available at: <https://jackw01.github.io/smallXY/>
- [25] Anon., [b.r.]. 3D tiskárna - Trilab DeltiQ 2. BOTLAND [online] [accessed. 2025a-02-19]. Available at: <https://botland.cz/stazene-produkty/21631-3d-tiskarna-trilab-deltiq-2.html>
- [26] SHI, Yusheng, Chunze YAN, Yan ZHOU, Jiamin WU, Yan WANG, Shengfu YU and Chen YING, 2021. *Materials for additive manufacturing*. San Diego, CA: Academic Press. ISBN 9780128193020.
- [27] Anon., [b.r.]. Anycubic Kobra 3 Combo. 3DRayan [online] [accessed. 2025b-02-19]. Available at: <https://3drayan.com/en/3d-printer/93-anycubic-kobra-3-combo.html>
- [28] Anon., [b.r.]. Prusa XL 3D printer - Stort volum, svært rask, svært bra! Fra 1 til 5 ekstrudere. FINN.no [online] [accessed. 2025h-02-19]. Available at: <https://www.finn.no/bap/webstore/ad.html?finnkode=216635124>
- [29] Anon., [b.r.]. Metallic 3D printing filament. MatterHackers [online] [accessed. 2025h-02-20]. Available at: <https://www.matterhackers.com/store/c/metallic-3d-printing-filament>
- [30] VANAEI, Hamid Reza, Sofiane KHELLADI and Abbas TCHARKHTCHI, eds., 2024. *Industrial strategies and solutions for 3D printing: Applications and optimization*. Nashville, TN: John Wiley & Sons. ISBN 9781394150304.
- [31] BOULAALA, Mohammed et al. Towards design of mechanical part and electronic control of multi-material/multicolor fused deposition modeling 3D printing. The international journal of advanced manufacturing technology. 2020, vol. 110, no. 1–2, pp. 45–55. ISSN 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-020-05847-0
- [32] DARAMWAR, V. and S. KADAM. Design and development of multi-material extrusion in fdm 3d printers. [online]. 2020 [accessed 22.02.2025]. Available at: <https://www.irjet.net/archives/V7/i3/IRJET-V7I3731.pdf>
- [33] RAFIEE, Mohammad, Rouhollah D. FARAHANI and Daniel THERRIAULT. Multi-material 3D and 4D printing: A survey. Advanced science

- (Weinheim, Baden-Württemberg, Germany). 2020, vol. 7, no. 12, p. 1902307. ISSN 2198-3844. DOI: 10.1002/advs.201902307
- [34] SONG, Haichuan et al. Colored fused filament fabrication. *ACM transactions on graphics*. 2019, vol. 38, no. 5, pp. 1–11. ISSN 0730-0301. DOI: 10.1145/3183793
- [35] Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa. In: *Prusa3D by Josef Prusa* [online] [accessed 22.02.2025]. Available at: <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-xl-assembled-5-toolhead-3d-printer/>
- [36] Anon., [b.r.]. Researchgate.net [online] [accessed. 2025i-02-19]. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-the-fiber-alignment-process-a-Extrusion-of-the-composite-material-through_fig1_349962084
- [37] Anon., [b.r.]. Pa6-cf. Bambu Lab EU [online] [accessed. 2025h-02-19]. Available at: <https://eu.store.bambulab.com/en-cz/products/pa6-cf?variant=47023571534172>
- [38] Anon., [b.r.]. Pps-cf. Bambu Lab EU [online] [accessed. 2025i-02-19]. Available at: <https://eu.store.bambulab.com/en-cz/products/pps-cf>
- [39] Anon., [b.r.]. PEEK. Weerg.com [online] [accessed. 2025i-02-19]. Available at: <https://www.weerg.com/3d-printing-materials/peek/peek>
- [40] VAN UNEN, Arjan, 2017. Warping and cracking with Closed Environment FDM 3D Printers. *Box3d* [online] [accessed. 2025-02-19]. Available at: <https://www.box3d.eu/warping-cracking-closed-environment-3d-printers/>
- [41] ARANDA, Sean, 2024. Ghosting (echo/ringing effect). *Polymaker US* [online] [accessed. 2025-02-19]. Available at: <https://us.polymaker.com/blogs/3d-printing-tips/ghosting-echo-ringing-effect>
- [42] Anon., [b.r.]. Layer shift: Causes and solutions. *Bambu Lab Wiki* [online] [accessed. 2025g-02-19]. Available at: <https://wiki.bambulab.com/en/knowledge-sharing/layer-shifts>
- [43] LANDRY, Taylor, [b.r.]. Retraction: Just say “No” to oozing. *MatterHackers* [online] [accessed. 2025-02-19]. Available at: <https://www.matterhackers.com/articles/retraction-just-say-no-to-oozing>

- [44] ZAKARIA, S. and P. MATIVENGA, 2024. A scientific base for optimising energy consumption and performance in 3D printing. *Journal of cleaner production* [online]. 482(144227), 144227. ISSN 0959-6526. Available at: doi:10.1016/j.jclepro.2024.144227
- [45] Creality Ender 3 V3. In: 3DJake Česká republika [online] [accessed 22.02.2025]. Available at: https://www.3djake.cz/3d-tiskarny-nahradni-dily-creality/ender-3-v3?utm_source=chatgpt.com
- [46] In: Researchgate.net [online] [accessed 22.02.2025]. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Mechanical-properties-of-PC-ABS-and-PC-ABS-7_fig2_337079222
- [47] ALAM, Firoz and Yingai JIN. The utilisation of small wind turbines in built-up areas: Prospects and challenges. *Wind*. 2023, vol. 3, no. 4, pp. 418–439. ISSN 2674-032X. DOI: 10.3390/wind3040024
- [48] BENN, Travis. Different types of wind turbines you should know. In: Lumify Energy [online]. 26. 7. 2024 [accessed 22.02.2025]. Available at: <https://lumifyenergy.com/blog/different-types-of-wind-turbines/>
- [49] CASTELLANI, Francesco et al. Experimental vibration analysis of a small scale vertical wind energy system for residential use. *Machines*. 2019, vol. 7, no. 2, p. 35. ISSN 2075-1702. DOI: 10.3390/machines7020035
- [50] CAZZARO, Davide, Gabriele BEDON and David PISINGER. Vertical axis wind turbine layout optimization. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 6, p. 2697. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390/en16062697
- [51] DEWAN, Anupam, Adesh GAUTAM and Rahul GOYAL. Savonius wind turbines: A review of recent advances in design and performance enhancements. *Materials today: proceedings*. 2021, vol. 47, pp. 2976–2983. ISSN 2214-7853. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.205
- [52] FAIZAN, Ahmad. Wind turbine blade aerodynamics. In: Electrical Academia [online]. 1. 8. 2018 [accessed 22.02.2025]. Available at: <https://electricalacademia.com/renewable-energy/wind-turbine-blade-aerodynamics/>

- [53] KAMRAN, Muhammad. Fundamentals of smart grid systems. San Diego, CA: Academic Press, 2022. ISBN 9780323995603.
- [54] KAMRAN, Muhammad. Planning and modeling of wind energy systems. In: Fundamentals of Smart Grid Systems. Elsevier, 2023, pp. 271–298. ISBN 9780323995603.
- [55] LETCHER, Trevor M. Wind energy engineering: A handbook for onshore and offshore wind turbines. Trevor LETCHER, ed.. 2. ed. San Diego, CA: Academic Press, 2023. ISBN 9780323993531.
- [56] MOHAN KUMAR, Palanisamy et al. Strategies for enhancing the low wind speed performance of H-Darrieus wind turbine—part 1. Clean technologies. 2019, vol. 1, no. 1, pp. 185–204. ISSN 2571-8797. DOI: 10.3390/cleantechnol1010013
- [57] SCHMITZ, Sven. Aerodynamics of wind turbines: A physical basis for analysis and design. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2019. ISBN 9781119405610.
- [58] ZAMANI, Mahdi et al. Three dimensional simulation of J-shaped Darrieus vertical axis wind turbine. Energy (Oxford, England). 2016, vol. 116, pp. 1243–1255. ISSN 0360-5442. DOI: 10.1016/j.energy.2016.10.031
- [59] In: Cbaul-cdnwnd.com [online] [accessed 22.02.2025]. Available at: <https://7944bbdac0.cbaul-cdnwnd.com/35f65e27d6a86cd3a75c6cf07b7ea2b3/200000021-869b3869b6/vetrna-elektrarna-popis.svg?ph=7944bbdac0>
- [60] ELSEMAN, Ahmed Mourtada, ed. *Solar cells: Theory, materials and recent advances*. London, England: IntechOpen, 2021. ISBN 9781838810160.
- [61] GUPTA, R. K. and T. A. NGUYEN. *Smart and flexible energy devices*. Ram K. GUPTA and Tuan Anh NGUYEN, eds. [online]. Ram K. GUPTA and Tuan Anh NGUYEN, eds. London, England: CRC Press, 2024. ISBN 9781000543797. Available at: <https://books.google.at/books?id=Y6RcEAAAQBAJ>
- [62] INAMUDDIN, I. *Fundamentals of solar cell design*. INAMUDDIN et al., eds. [online]. INAMUDDIN et al., eds. Wiley-Scrivener, 2021. ISBN 9781119725046. Available at: <https://books.google.at/books?id=awU7EAAAQBAJ>

- [63] LESTER, Luke F. et al. *Flexible solar cells for micro-autonomous systems technology*. SPIE, 2010.
- [64] MENG, H. and W. HUANG. *Flexible electronic packaging and encapsulation technology*. Hong MENG and Wei HUANG, eds. [online]. Hong MENG and Wei HUANG, eds. Berlin, Germany: Blackwell Verlag, 2024. ISBN 9783527845712. Available at: <https://books.google.at/books?id=-j79EAAAQBAJ>
- [65] PAGLIARO, Mario, Giovanni PALMISANO and Rosaria CIRIMINNA. *Flexible Solar Cells* [online]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag, 2008. ISBN 9783527623792. Available at: <https://books.google.at/books?id=0PxDqutcaVMC>
- [66] RODERICK, Alex. Understanding the Composition of a Solar Cell. In: *Eepower.com* [online]. 1. 6. 2021 [accessed 26.02.2025]. Available at: <https://eepower.com/technical-articles/understanding-the-composition-of-a-solar-cell>
- [67] SALMAN MUHAMMED, Ghaida. Mechanism for flexible solar cells. In: *Solar Cells - Theory, Materials and Recent Advances*. IntechOpen, 2021. ISBN 9781838810160.
- [68] SMIL, Vaclav. *Energie: Průvodce pro začátečníky*. Kniha Zlín, 2018. ISBN 9788074736513.
- [69] VLADO. Princip fungování fotovoltaických elektráren. In: *Elektroturek.cz* [online] [accessed 26.02.2025]. Available at: <https://www.elektroturek.cz/fotovoltaika-menu/fotovoltaika-princip>
- [70] WANG, X. and Z. M. WANG. *High-efficiency solar cells: Physics, materials, and devices*. Xiaodong WANG and Zhiming M. WANG, eds. [online]. Xiaodong WANG and Zhiming M. WANG, eds. 2014. ed. Basel, Switzerland: Springer International Publishing, 2013. ISBN 9783319019888. Available at: <https://books.google.at/books?id=qoO9BAAAQBAJ>
- [71] *Investigation Of Optical Characteristics Of Semiconductor Quantum Dots For Multi Junction Solar Cells Applications*
- [72] Recycling of silicon solar panels. In: *Singapore-CEA Alliance for Research in Circular Economy (SCARCE)* [online] [accessed 26.02.2025]. Available at: <https://www.ntu.edu.sg/scarce/research-focus/recycling-of-silicon-solar-panels>

- [73] Anon., [b.r.]. 1 Wire Slip Ring 12.5mm with SH1.0 connector. *Bambu Lab EU* [online] [accessed. 2025a-04-24]. Available at: https://eu.store.bambulab.com/en-cz/products/1-wire-slip-ring-12-5mm-with-sh1-0-connector?_pos=1&_sid=88b38d5a8&_ss=r
- [74] Anon., [b.r.]. Airfoil tools. *Airfoiltools.com* [online] [accessed. 2025b-04-24]. Available at: <http://airfoiltools.com>
- [75] Anon., [b.r.]. bavaria-direct.co.za. *Bavaria-direct.co.za* [online] [accessed. 2025c-04-24]. Available at: <https://www.bavaria-direct.co.za/scheme/calculator/>
- [76] Anon., [b.r.]. *Researchgate.net* [online] [accessed. 2025d-04-24]. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/354681831/figure/fig3/AS:1069408789225472@1631978332472/Schematic-of-Three-Phase-Uncontrolled-Rectifier.png>
- [77] Anon., [b.r.]. Thin Section Bearing 6702-ZZ >>> Buy online! *Thin Section Bearing 6702-ZZ >>> Buy online!* [online] [accessed. 2025e-04-24]. Available at: <https://www.kugellager-express.de/deep-groove-ball-bearing-6702-61702-zz-2z-15x21x4-mm>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Princip FDM [12] (převzato a upraveno).....	14
Obrázek 2 Porovnání normálních a stromových podpěr ve sliceru BambuStudio [foto autora]	15
Obrázek 3 Tisk 0,2 mm tryskou (vlevo) v porovnání s tiskem stejného modelu 0,4 mm tryskou (vpravo) [13] (převzato a upraveno).....	15
Obrázek 4 Princip 3D tisku metodou SLA [16] (převzato a upraveno)	17
Obrázek 5 Princip 3D tisku metodou DMLS [17].....	18
Obrázek 6 Porovnání 3D tiskáren Ender 3 – první a třetí generace [19, 20] (převzato a upraveno)	19
Obrázek 7 Vizualizace funkce AI LiDARu u 3D tiskárny Bambulab X1C [21]	20
Obrázek 8 Obrázkový popis os u 3D tiskárny typu bedslinger [22] (převzato a upraveno).....	21
Obrázek 9 Vizualizace možnosti automatizace 3D tiskárny typu bedslinger [23]	22
Obrázek 10 Vizualizace konstrukce 3D tiskárny typu core XY [24]	23
Obrázek 11 Vizualizace 3D tiskárny typu delta [25].....	24
Obrázek 12 Příklad čínského multimateriálu s uzavřenou konstrukcí [27].....	25
Obrázek 13 Příklad multimateriálového výtisku z české 3D tiskárny Prusa XL [28].....	26
Obrázek 14 Demonstrace koroze na výtisku z PLA plněného železným prachem [29].....	27
Obrázek 15 Vizualizace orientace vláken v matrici při průchodu úzkou štěrbinou [36].....	28
Obrázek 16 Příklady výtisků z PA6-CF [37].....	30
Obrázek 17 Příklady výtisků z PPS-CF [38]	30
Obrázek 18 Příklad výtisku z materiálu PEEK [39]	31
Obrázek 19 Princip vzniku warpingu a praskání vrstev na výtisku [40]	32
Obrázek 20 Vizualizace defektu v důsledku absence input-shapingu [41]	33
Obrázek 21 Výsledek přeskočení vrstvy během tisku např. v důsledku volného řemene [42]	34
Obrázek 22 Vizualizace defektu zvaného oozing [43]	35
Obrázek 23 Rozdílnost lesku povrchu výtisku v důsledku změny tiskové rychlosti [foto autora]	35
Obrázek 24 Schéma a princip funkčnosti Savoniovy turbíny [51]	37
Obrázek 25 Typy vertikálních větrných turbín – a) Savoniova turbína; b) Darrieova turbína; c) H-Darrieus; d) Spirálová turbína [48].....	38
Obrázek 26 Hybridní VAWT – spojení kapkovitých profilů Darrieovy turbíny a Savoniových lopatek [49]	39
Obrázek 27 Princip tvorby aerodynamického vztlaku na profilu lopatky HAWT [52]	40
Obrázek 28 Popis HAWT [59]	41
Obrázek 29 Princip přeměny solární energie na energii elektrickou [66]	43

Obrázek 30 Ideální příklady materiálů recyklovatelných z FV panelů [72].....	44
Obrázek 31 Graf popisující princip funkce multijunkčního FV článku [71].....	45
Obrázek 32 Příklad flexibilního fotovoltaického panelu [67]	46
Obrázek 33 Schéma vinutí primárního generátoru hybridních VAWT [75]	50
Obrázek 34 Sestava odporové VAWT – 3D model.....	51
Obrázek 35 Tělo generátoru s 18 válečky a měděným vinutím.....	52
Obrázek 36 Lopatka odporové VAWT s flexibilním FV panelem.....	53
Obrázek 37 Hřídelová spojka lopatek vztlakové VAWT (vlevo); Hřídelová spojka lopatek odporové VAWT (vpravo).....	54
Obrázek 38 Schéma použitých ložisek 6702 ZZ [77].....	55
Obrázek 39 Kluzný kroužek pro přenos el. proudu během rotace [73]	56
Obrázek 40 Usměrňovač střídavého proudu na stejnosměrný.....	57
Obrázek 41 Schéma usměrňovače střídavého proudu [76].....	57
Obrázek 42 Měření napětí z fotovoltaických panelů na hybridní odporové VAWT.....	59
Obrázek 43 Aerodynamický profil EPPLER 398 z databáze airfoiltools.com [74]	60
Obrázek 44 Vizualizace 3D modelu vztlakové lopatky.....	61
Obrázek 45 Zkušební prototyp segmentu vztlakové lopatky pro ověření kompatibility s flexibilním FV panelem.....	62
Obrázek 46 Sériové propojení tří FV panelů připravených k lepení do vztlakové lopatky.....	63
Obrázek 47 Hotová vztlaková lopatka s flexibilními FV panely dočasně fixovanými pomocí lepicí pásky	64
Obrázek 48 Měření napětí na hybridní vztlakové VAWT.....	66
Obrázek 49 Demonstrace přetrženého testovacího tělíska z PLA na mechanicky uzavíratelných kleštinách.....	68
Obrázek 50 Detailní pohled na přetržené tělísko z PLA.....	70
Obrázek 51 Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro PLA	70
Obrázek 52 Ukázka testovacích tělísek z ASA tisknutých s límcem	71
Obrázek 53 Detailní pohled na přetržené testovací tělísko z ASA značky Elegoo	71
Obrázek 54 Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro ASA zn. Elegoo	72
Obrázek 55 Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro PET-G HF značky Bambulab	74
Obrázek 56 Detailní pohled na přetržené testovací tělísko z PET-G HF značky Bambulab	74
Obrázek 57 Lom ASA (měřítko 1 mm)	75
Obrázek 58 Lom ASA (měřítko 200 μ m)	76
Obrázek 59 Lom PLA (měřítko 1 mm).....	76
Obrázek 60 Lom PLA (měřítko 200 μ m)	77

Obrázek 61 Lom PET-G HF (měřítko 1 mm).....	77
Obrázek 62 Lom PET-G HF (měřítko 200 μm)	78
Obrázek 63 Lom Iron-PLA (měřítko 1 mm)	78
Obrázek 64 Lom Iron-PLA (měřítko 200 μm)	79

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Porovnání materiálů používaných pro výrobu FV článků a jejich účinností [66]	45
Tabulka 2 Porovnání parametrů magnetů v rotoru vztlakové turbíny a odporové	55
Tabulka 3 Průběh měření napětí na vinutí odporové VAWT	58
Tabulka 4 Průběh měření napětí z fotovoltaiky odporové VAWT	59
Tabulka 5 Průběh měření napětí z vinutí vztlakové VAWT	65
Tabulka 6 Průběh měření napětí z fotovoltaiky na vztlakové VAWT	67
Tabulka 7 Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro PLA	69
Tabulka 8 Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro ASA značky Elegoo	72
Tabulka 9 Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro PET-G HF Bambulab	73

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

FDM	Fused Deposition Modeling
3D	Trojrozměrný
CAD	Computer Aided Design
AM	Additive Manufacturing
NC	Numerical Control
SLA	Stereolitography
UV	Ultra Violet
SLS	Selective Laser Sintering
PA	Polyamid
PAEK	Polyaryletherketon
PS	Polystyren
TPE	Termoplastický elastomer
PC	Polykarbonát
kW	Jednotka výkonu (kilowatt)
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
POM	Polyoxymethylen
AI	Artificial Intelligence
LiDAR	Light Detection and Ranging
PLA	Kyselina polylaktidová
PET-G	Polyethylentereftalát modifikovaný glykolem
TPU	Termoplastický polyuretan
AMS	Automatic Material System
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitrilstyrenakrylát
PC-ABS	Kompound polykarbonátu s akrylonitrilbutadienstyrenem

PA6-CF	Polyamid 6 plněný uhlíkovými vlákny
PPS-CF	Polyphenylensulfid plněný uhlíkovými vlákny
MPa	Jednotka napětí megapascal
PEEK	Polyetheretherketon
PP	Polypropylen
$\Omega \cdot \text{cm}$	Jednotka měrného odporu Ohm na centimetr
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
MW	Jednotka výkonu megawatt
V	Jednotka napětí Volt
FV	Fotovoltaický
Wp	Watt-peak
kW/m^2	Jednotka energetického toku
In	Indium
Si	Křemík
Ag	Stříbro
Ga	Gallium
GaAs	Gallium-arsenid
CIGS	Měď-indium-gallium-selenid
a-Si	Amorfní křemík
CdTe	Kadmium-tellurid
kW/kg	Měrný výkon
InGaAs	Indium-gallium-arsenid
InAs	Indium-arsenid
PET-G HF	Polyethylentereftalát glykol high-flow
W	Jednotka výkonu Watt

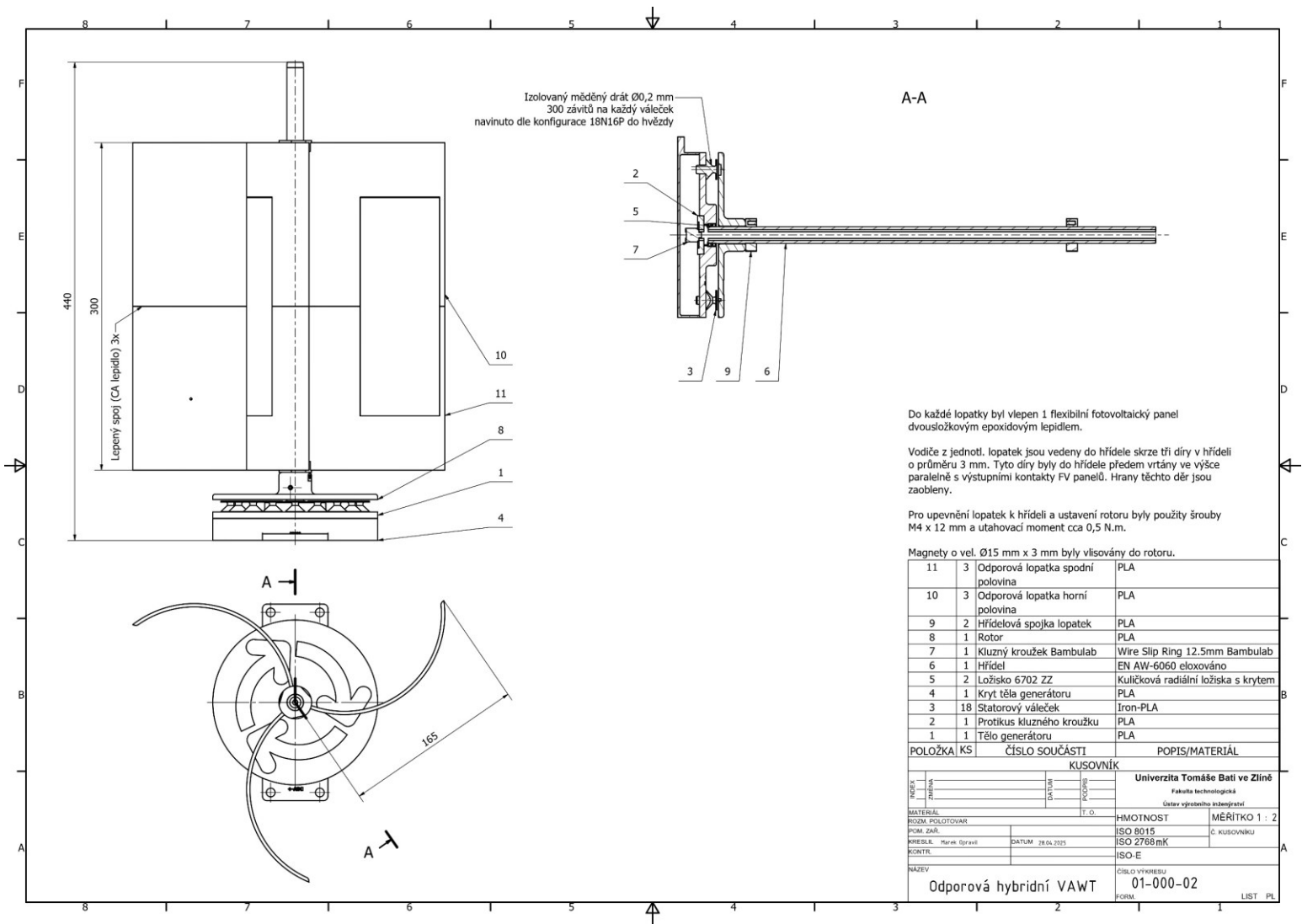
Ni	Nikl
NdFeB	Neodym-železo-bór
DPH	Daň z přidané hodnoty
km/h	Jednotka rychlosti kilometr za hodinu
U	Fyzikální veličina elektrického napětí
STL	Stereolitografie
N	Jednotka síly Newton
E	Youngův modul pružnosti
A	Tažnost
σ_s	Napětí při selhání
σ_k	Napětí v kluzu
$F_{\max}$	Maximální naměřená síla
GPa	Jednotka napětí gigapascal
°C	Jednotka teploty stupeň Celsia
PLA-Fe	Kyselina polylaktidová plněná železem
SEM	Skenovací elektronový mikroskop

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výkres sestavy odporové VAWT

Příloha P II: Výkres sestavy vztlakové VAWT

PŘÍLOHA P I: VÝKRES SESTAVY ODPOROVÉ VAWT



PŘÍLOHA P II: VÝKRES SESTAVY VZTLAKOVÉ VAWT

