

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ
TECHNIKY**



**NÁVRH SYSTÉMU DÁVKOVÁNÍ DRCENÉ
LIGNOCELULÓZOVÉ BIOMASY DO
LABORATORNÍHO NOŽOVÉHO MLÝNU**

2022

MICHAL VTÍPIL

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

..... Jméno a Příjmení

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vtipil** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **492470**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávatel katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh systému dávkování drcené lignocelulózové biomasy do laboratorního nožového mlýnu.

Název bakalářské práce anglicky:

Filling system of shredded lignocellulosic biomass for laboratory knife mill.

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte automatický dávkovací systém drcené lignocelulózové biomasy (dřevní štěpky, sláma, senáž), který bude využíván k plnění suroviny do laboratorního nožového mlýnu SM300.

- 1) Zpracujte literární a průmyslovou řešení možnosti dávkování lignocelulózové biomasy do drtičů a mlýnů.
- 2) Navrhněte ideová řešení dávkování lignocelulózové biomasy do laboratorního nožového mlýnu. Proveďte potřebné procesní výpočty.
- 3) Pro zvolenou koncepci prototypového dávkovače vypracujte výrobní dokumentaci (3D model pro 3D tisk, základní rozměrová skica). Model vytiskněte a sestavte.
- 4) Zprovozněte systém plnění, případně proveďte jeho konstrukční optimalizace s cílem hladkého chodu.
- 5) Vypracujte kótovanou sestavu finálního řešení dávkovacího systému s předpokladem, že funkční části budou vyrobeny z nerezové oceli.

Seznam doporučené literatury:

dle pokynů vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **18.09.2022**

doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis držitele

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Poděkování

Za vstřícnost, odborné vedení a směřování, pomoc při odzkoušení včetně závěrečného natočení videa i pomoc při zajišťování materiálu pro výrobu a mnohé cenné rady děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Lukášovi Krátkému, Ph.D.

Za vstřícnost, pomoc s 3D tiskem a výrobou a mnohé cenné rady týkající se modelování a výroby děkuji konzultantovi Ing. Stanislavovi Solnařovi, Ph.D.

Za přečtení a cenné připomínky k textu této práce děkuji všem kamarádům, kteří si alespoň část textu přečetli a zhodnotili.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora: Michal

Příjmení autora: Vtípil

Název práce česky: Návrh systému dávkování drcené lignocelulóзовé biomasy do laboratorního nožového mlýnu

Název práce anglicky: Filling system of shredded lignocellulosic biomass for laboratory knife mill

Rozsah práce: počet stran: 54

počet obrázků: 47

počet tabulek: 0

počet příloh: tištěných:1

elektronických: 1

Akademický rok: 2021/2022

Jazyk práce: Český

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.

Anotace česky:

Bakalářská práce se zabývá procesem mletí biomasy, je zaměřená především na kontinuální dávkování štěpky, slámy a senáže do nožového mlýna. Popisuje strukturu biomasy, způsoby jejího mletí, základní typy mlýnů a detailněji popisuje nožový mlýn Retsch SM 300, který se používá v laboratoři fakulty. Představuje možnosti dávkování biomasy do mlýnů a ukazuje konkrétní návrh systému kontinuálního plnění zmíněného mlýna. Výsledkem práce je kromě rešerše také vyrobený funkční prototyp dávkovače a teoretický návrh dávkovače s funkčními částmi z nerezové oceli určeného pro dlouhodobé používání.

Anotace anglicky:

The bachelor thesis deals with the process of grinding biomass, it is focused mainly on the continuous dosing of wood chips, straw and haylage into a knife mill. It describes the structure of biomass, methods of its grinding, basic types of mills and describes in more detail the Retsch SM 300 knife mill, which is used in the faculty laboratory. It presents the possibilities of dosing biomass into mills and shows a specific design of a system for continuous filling of the mill. In addition to the research, the result of the work is also a functional prototype of the dispenser and a theoretical design of the dispenser with functional parts made of stainless steel intended for long-term use.

Klíčová slova: biomasa, sláma, štěpka, senáž, mlýn, dávkovač, podavač, dopravník

Klíčová slova anglicky: biomass, straw, wood chips, haylage, mill, dispenser, feeder, conveyor

Obsah

1. Úvod	8
2. Teoretická část – biomasa a její vlastnosti, možnosti mletí	9
2.1 Proč se zabývat mletím biomasy?	9
2.2 Struktura biomasy	9
2.3 Přínos mletí.....	10
2.4 Mechanismy rozpojování biomasy	10
2.5 Typy mlýnů	11
2.5.1 Kulové mlýny	11
2.5.2 Vibrační kulové mlýny	11
2.5.3 Diskové mlýny.....	11
2.5.4 Válcové stolice	11
2.5.5 Koloidní mlýny	11
2.5.6 Extrudéry	11
2.5.7 Úderové mlýny	11
2.5.8 Nožové mlýny	12
2.6 Náš nožový mlýn Retsch SM 300.....	12
2.7 Energetická náročnost mletí.....	13
3 Teoretická část – dávkování biomasy	14
3.1 Parametry pro návrh plnění mlýna	14
3.2 Retsch DR 100.....	15
3.3 Průmyslově vyráběné dávkovače na sypké materiály.....	16
3.4 Turniketový podavač	17
3.5 Šnekový podavač.....	18
4. Praktická část.....	19
4.1 Vývoj vlastního dávkovače	19
4.2 Vibrační dopravníky.....	20
4.3 Pásové dopravníky.....	20
4.4 Vlastní turniketový podavač.....	21
4.4.1 Lopatkový rotor	22
4.4.2 Násypka	22
4.4.3 Tělo podavače	23
4.4.4 Úvahy nad procesními výpočty	24
4.4.6 Změna řešení	25
4.5 Výroba prvního prototypu a jeho zkoušení.....	27

4.5.1	Výroba	27
4.5.2	První zkoušení.....	28
4.5.3	První úprava k odstranění nedostatků	28
4.5.4	Druhé zkoušení.....	29
4.5.5	Oprava	29
4.5.6	Třetí zkoušení	30
4.6	Druhý prototyp rotoru.....	30
4.6.1	Návrh	30
4.6.2	Změna procesních výpočtů.....	31
4.6.3	Montáž a první zkoušení	31
4.6.4	Úprava pro odzkoušení s aku vrtačkou	31
4.6.5	Zkoušení s pohonem vrtačkou	32
4.6.6	Zkoušení s pohonem laboratorní míchačkou	32
4.7	Návrh zdokonaleného prototypu	33
4.7.1	Druhý prototyp statoru	33
4.7.2	Výroba statoru.....	33
4.7.3	Porovnání PLA a ABS plastu.....	33
4.7.4	Návrh třetího rotoru.....	33
4.7.5	Výroba rotoru	34
4.7.6	Změna procesních výpočtů.....	35
4.7.7	Zkoušení výsledného prototypu.....	35
4.7.8	Shrnutí zásad konstruování turniketového podavače.....	36
4.8	Návrh dávkovače s funkčními částmi z nerezové oceli	37
4.8.1	Úvod k návrhu	37
4.8.2	Rotor.....	37
4.8.3	Změna procesních výpočtů.....	38
4.8.4	Násypka	38
4.8.5	Stator	39
4.8.6	Hřídel	42
4.8.7	Deska na mlýn	43
4.8.8	Sestava.....	44
4.9	Návrh pohonu.....	46
4.9.1.	Možné varianty výběru motoru a jeho regulace	46
4.9.2	Konkrétní volba a potřebné výpočty	46
4.9.3	Možná koncepce sestavy pohonu	47
4.9.4	Pevnostní kontrola vybraných součástí a kontrola trvanlivosti ložisek.....	49
5.	Závěr	52

1. Úvod

V této práci se budu snažit navrhnout vhodný systém kontinuálního plnění laboratorního nožového mlýna SM 300, vyrobit jeho prototyp, popsat výrobu. Plnicí systém má sloužit k rovnoměrnému nadávkování slámy, štěpky a senáže do mlýna s regulací průtoku na optimální hodnotu. Plnicí systém má fungovat zejména při dávkování materiálu při měřeních energetické náročnosti mletí biomasy z jedné velikosti částic na jinou a má pomoci určit v pokusech měrnou rozpojovací energii suroviny při optimálních podmínkách mletí. Do budoucna mají na fakultě probíhat výzkumy s cílem zjistit měrnou rozpojovací energii slámy, štěpky a senáže a kontinuální plnění mlýna surovinou může do budoucna výzkumy velmi usnadnit. Dále budu prototyp zkoušet, upravovat a vylepšovat a pokusím se dojít k plně funkčnímu výrobku, na základě zjištěných poznatků o prototypu se potom pokusím navrhnout systém vhodný pro dlouhodobé používání, který bude mít funkční části z nerezové oceli.

Na následujících stranách bude teoretická část, kde budu popisovat důvody, proč se zabývat mletím biomasy a možné přínosy výzkumů v oblasti určování energetické náročnosti mletí, které by mohly být díky plnicímu systému výrazně usnadněny. Poté se budu zabývat strukturou a vlastnostmi mletých materiálů a z toho vyvodím, co by měl plnicí systém splňovat. Pak se pokusím představit jednotlivé technologie mletí a jednotlivé typy mlýnů, které se dají použít k mletí biomasy. Detailněji popíšu fungování našeho laboratorního nožového mlýna a jeho přesné parametry a požadavky pro plnění. Dále nastíním poznatky z dosavadních pokusů s určováním energetické náročnosti mletí a problémy vyplývající z nerovnoměrného plnění našeho mlýna. Pak bude následovat teoretický přehled vyráběných průmyslových dávkovačů na sypké materiály, které se používají na biomasu. Zároveň shrnu požadavky na plnicí systém a vypočítám potřebné objemové průtoky pro plnění našeho mlýna. V rámci přehledu možností dávkování a dopravy sypkých materiálů se zaměřením na mleté suroviny zhodnotím vhodnost jednotlivých strojů pro plnění našeho mlýna.

Následovat bude praktická část, kde bude popsán vlastní návrh, stanovím požadavky na vývoj vlastního plnicího systému, které vyústí v návrh turniketového podavače pro slámu, štěpku a senáž, který splní všechny požadované parametry. Dále popíšu návrh a výrobu prvního prototypu a jeho zkoušení, dále první úpravu, po které opět následovalo testování a první poškození prototypu při používání a následnou opravu a důvody neúspěchu při testování. Poté ukážu návrh druhého prototypu rotoru a hřídele podavače jejich výrobu a odzkoušení podavače spolu s popisem nevýhod, jejichž nápravu pak měl přinést třetí prototyp turniketového podavače. Poté představím výrobu třetího prototypu a jeho úspěšné odzkoušení. Dále se budu tím, jak by měl vypadat plnicí systém pro dlouhodobé použití, který nebude fungovat jen jako prototyp pro krátké laboratorní pokusy. Nastíním, jak by mohl fungovat pohon dávkovače. Na závěr shrnu výsledky práce.

2. Teoretická část – biomasa a její vlastnosti, možnosti mletí

2.1 Proč se zabývat mletím biomasy?

Na světě stále roste spotřeba energie a klesají zásoby fosilních paliv, pro budoucnost lidstva je tedy nutné snižovat energetickou závislost na fosilních palivech. Cestou k tomuto snížení energetické závislosti je používání obnovitelných zdrojů energie. V našich českých podmínkách máme jako zdroje vodu, vítr, slunce a biomasu. Vodní elektrárny jsou už postavené na všech důležitých místech, kde to má ekonomický smysl a nelze je už výrazně rozšiřovat. Pro větrné elektrárny jsou u nás nevhodné podmínky, a tak se používají pouze ve velmi omezené míře a na místech, kde ještě nejsou, se je vůbec nevyplatí budovat. Pro sluneční elektrárny u nás také nejsou zrovna nejvhodnější podmínky, přesto by se je na některých vhodnějších místech vyplatilo rozšiřovat zejména využitím jinak nepoužitelných ploch na zastavení solárními kolektory nebo fotovoltaickými články. Velký potenciál má v našich podmínkách biomasa, používáme ji stále málo a mohli bychom ji používat mnohem více. [1]

Biomasu lze používat buď přímo ke spalování k produkci tepla nebo elektřiny, a to spalováním štěpky nebo pelet a briket. Při výrobě pelet a briket je třeba biomasu rozmělnit, takže v tomto procesu je nutnou součástí mechanické rozpojování materiálu. Dále lze biomasu zpracovávat na další paliva, například bioplyn, bioetanol nebo metylester. Při těchto procesech je často nedílnou součástí mletí. V současné době se často používají biopaliva první generace, tedy biomasa, která by se jinak mohla konkurenčně využít jako potravina nebo krmivo. Sem patří bioetanol vyrobený z obilí, cukrové řepy, cukrové třtiny, kukuřice, škrobu, metylester řepkového oleje, vyrobený z vylisované řepky olejné esterifikací, metylester mastných kyselin, vyrobený z vylisovaných olejnatých rostlin. Tato paliva už nemají velký potenciál na rozšiřování, protože jejich pěstováním se zabírá orná půda použitelná na pěstování potravin, což vede k tomu, že bude málo surovin pro potraviny a málo krmiv, takže by se potraviny neúnosně zdražovaly. Mnohem větší potenciál pro další rozšiřování mají biopaliva druhé generace, která se budou vyrábět z jinak nepoužitelných odpadů. Největší význam bude mít pravděpodobně rozšiřování výroby bioplynu z odpadů. Na skládky se dostává stále velké množství bioodpadu, který by se dal zpracovat a využít, ale protože nejsou dostatečně rozvinuté technologie jeho zpracování, tak na skládkách zbytečně překáží. Velkou část dostupných surovin pro výrobu biopaliv druhé generace tvoří lignocelulózové odpady. Jejich výhodou je velké množství suroviny, snadná dostupnost a nízká cena. Nevýhodou však je, že konverze těchto surovin na bioplyn je velice neefektivní a celý proces fermentace je velice zdoluhavý. Vhodným rozrušením struktury této suroviny by se proces fermentace mohl výrazně zkrátit a zefektivnit. [2] [1]

Právě zde nachází největší uplatnění mletí, a proto je důležité se zabývat jeho optimalizací, abychom do budoucna zvládali efektivně zpracovávat lignocelulózovou biomasu na biopaliva druhé generace a snížili tak energetickou závislost na ostatních zdrojích. Další důležitou oblastí, kde se uplatní mletí a předúprava lignocelulózové biomasy je chemický a farmaceutický průmysl. Rozemletá biomasa je důležitou vstupní surovinou při získávání různých cenných látek (oligosacharidů, furanů, vícesytných alkoholů, organických kyselin, přírodních oxidantů, esenciálních látek a olejů). Zároveň má uplatnění i při výrobě ekoinovativních materiálů (bioplastů, kompozitů s biosložkou). Dále se pokusím popsat strukturu biomasy, což je důležité pro pochopení procesu mletí i pro navrhování plnění mlýna. [2]

2.2 Struktura biomasy

Já se budu v této práci zabývat zejména strukturou slámy, senáže a dřeva (dřevěné štěpky), protože pro ně jsem konstruoval plnění mlýna a na nich se nejčastěji na fakultě zkouší energetická náročnost mletí. Biomasa rostlin je tvořena zesílenými stěnami buněk s kompozitní strukturou, dlouhé řetězce celulózy vytvářejí nosnou konstrukci lignocelulózové matrice. Celulózová vlákna jsou obtočená rozvětvenými řetězci hemicelulózy a celá struktura je zpevněná zesíťovanou výplní ligninu. Dalšími složkami jsou škroby, tuky, bílkoviny, popeloviny, organické kyseliny a další organické i anorganické látky. Celulóza vytváří v rostlinách lineární vlákna složená z makromolekul tvořených řetězci D-glukózy. Molekula celulózy je tvořena zhruba 1000 za sebou vázanými molekulami D-glukózy. Řetězce se navzájem propojují v počtu 20-

300 van der Walsovými silami, vodíkovými a kovalentními vazbami. Vlákna mají pravidelnou krystalickou i nepravidelnou amorfní část. Pravidelná krystalová mřížka celulózy se rozkládá mnohem hůře než amorfně uspořádané molekuly. Mletím se narušuje krystalická mřížka, dá se snížit krystalinita celulózy. Hemicelulózy mají amorfní strukturu a rozkládají se poměrně snadno. Jsou tvořené složitými heteropolysacharidy. Lignin je nejhůře rozložitelnou složkou biomasy, je to aromatický heteropolymer fenolického typu. Je hydrofobní, takže kvůli němu je biomasa odolná vodě. V rostlinách působí jako pojivo a zajišťuje jejich pružnost a pevnost. [2]

Společnou vlastností rostlinné biomasy je hygroskopičnost pro vnější vlhkost. Obsah vody v biomase je silně ovlivněn vlhkostí okolního prostředí a mechanické vlastnosti biomasy, které je třeba znát, pro návrh technologie plnění i mletí silně závisí na obsahu vody v biomase. Suchá biomasa je mnohem křehčí, a tím je výhodná pro mletí, protože se snadno rozpadá. Složení slámy je 29-35 % celulózy, 26-32 % hemicelulózy a 16-21 % ligninu. Senáž má složení velmi podobné slámě, má ale větší obsah škrobů a bílkovin. Tvrdé dřevo obsahuje 40-55 % celulózy, 24-40 % hemicelulózy a 18-25 % ligninu, měkké dřevo obsahuje 45-50 % celulózy, 25-35 % hemicelulózy a 25-35 % ligninu. Zbytek složení tvoří hlavně bílkoviny a popeloviny. [1]

Mezi další suroviny, u kterých má smysl mletí, ale jejichž plněním do mlýna se nezabýváme, patří: kukuřičná siláž, tráva, papír, listí a různé kuchyňské zbytky. Nyní se podívám na makroskopické vlastnosti slámy, senáže a dřeva (štěpky). Sláma je tvořena dutými stébly tvořenými internodiemi a uzlinkami. Sláma je výrazně měkčí, pružnější a ohebnější než dřevěná štěpka, nebude mít tedy sklon ucpávat systém plnění vzpříčením částic. Má také mnohem nižší hustotu, takže celkově bude mnohem méně náročná na sílu případného dopravníku nebo dávkovače. Senáž je tvořena jak stébly travin, tak lodyhami a lístky dvouděložných rostlin. Lodyhy dvouděložných rostlin obvykle nejsou duté jako stébla slámy a jsou pevnější, stále však jsou poměrně snadno poddajné. Struktura dřeva (štěpky) je podstatně hutnější, pevnější a tvrdší, částice štěpky nebudou tak snadno přizpůsobovat tvar dávkovači a budou mít sklon k tomu se vzpříčit a ucpávat dávkovač. Mají také mnohem větší hustotu než sláma, dávkování štěpky bude tedy mnohem náročnější na sílu dopravníku a dávkovače. Pokud budu dále dimenzovat plnění mlýna, tak budu uvažovat plnění štěpkou, pokud systém plnění zvládne pracovat se štěpkou, tak se slámou i se senáží to půjde mnohem snáze, jenom budu muset pohlídat, abych dosáhl potřebných průtoků pro mletí slámy. Všechny 3 materiály jsou sypké a já budu uvažovat o práci se surovinou o velikosti částic do 20 mm, bude to surovina předupravená drtičem na vhodnou velikost pro mlýn. Přesýpání částic nejde bez odporu, vždy se musí překonávat určitou silou tečné napětí mezi částicemi. Štěpka bude klást plnicímu systému při přesýpání výrazně větší odpor než senáž a sláma. Částice jsou nasypané náhodně a jsou různě prostorově orientované, mezi nimi jsou vzduchové mezery. Nemají také nijak pravidelný tvar a mohou mít velký rozptyl ve velikosti mezi největší a nejmenší částicemi. Plnicím systémem musí projít všechny částice bez ohledu na orientaci, musí splnit požadavek na rovnoměrný tok materiálu a plynule regulovatelný průtok v rozsahu potřebném pro mletí.

2.3 Přínos mletí

Při mletí na jemné částice výrazně zlepšujeme přenos tepla a hmoty během procesů, výrazně zvyšujeme konverzi suroviny na palivo a zrychlujeme celý proces. Abychom zvýšili biologickou rozložitelnost biomasy a skutečně výrazně konverzi suroviny v požadovaný produkt, potřebujeme dosahovat většinou velikosti částic 1-10 mm. Pro mletí biomasy lze použít mnoho různých technologií, jejich energetická náročnost a celková výhodnost se velmi liší. Mletí je mnohem snadnější u suché biomasy s vlhkostí do 15 %, právě ze zmiňovaného důvodu křehkosti. [2]

2.4 Mechanismy rozpojování biomasy

Obecně lze biomasu rozpojovat smýkáním, drcením nebo otěrem. Smýkání se využívá u diskových a válcových mlýnů. V nožových a úderových mlýnech dochází k rozmělnění suroviny drcením. Způsob rozmělnění otěrem se používá v koloidních mlýnech a extrudérech. Kombinace otírání a drcení se využívá

v kulových a vibračních kulových mlýnech. K hrubému rozmělnění suroviny se používají drtiče. Jsou schopny zpracovat biomasu o velkých vstupních rozměrech a výstupní velikost částic může být okolo 10 mm. Mlýny by k jemnému zpracování vstupní suroviny o velkých rozměrech potřebovaly velkou dobu zdržení, proto je výhodnější, aby do mlýnů vstupovala částečně rozmělněná surovina s velikostí částic okolo 10 mm. Já při svém návrhu plnění také budu předpokládat částečně rozmělněnou vstupní surovinu z drtiče. Drtiče mohou být čelistové, šnekové, úderové, nožové nebo válcové. Pro zpracování lignocelulóзовých odpadů se používají drtiče úderové, šnekové a nožové nebo se vzájemně kombinují. [2]

2.5 Typy mlýnů

2.5.1 Kulové mlýny

Obsahují volně uložená mlecí tělesa nejčastěji nerezové koule. Ve válcové části mlýnu vyložené otěruvzdorným materiálem se při otáčení pohybují mlecí tělesa, která při pádu drtí a rozpojují materiál. Materiál je zároveň rozpojován i při vzájemném otírání mlecích částic a při otírání o vyložení pláště. Nejmenší účinnost mají pro tvrdé odpady, například pro štěpku z tvrdého dřeva. Dokáží pracovat i s vlhkým materiálem, ale přesto je výhodnější mlít biomasu s vlhkostí do 15%. [2]

2.5.2 Vibrační kulové mlýny

Fungují podobně jako běžné kulové mlýny, díky vibracím je výrazně lépe promícháván materiál, a proto je mnohem vyšší účinnost rozmělnění částic. [2]

2.5.3 Diskové mlýny

Skládají se z jednoho nebo dvou rotujících kotoučů s různě profilovaným ostřím nože. Materiál je osově přiváděn ke středu disku, tam je usmýkáván ostřím nože a vlivem působících odstředivých sil je odváděn z pracovního prostoru. Velkou výhodou je, že se v nich nehromadí materiál tolik jako v nožových nebo úderových mlýnech, takže mají menší sklon k ucpávání se. Nevýhodou je, že se velká část energie spotřebuje na teplo a dochází k přehřívání mleté biomasy a jejímu znehodnocení. Hodí se pro mletí tvrdé biomasy o vlhkosti méně než 15 %. Tyto mlýny mají poměrně velkou energetickou náročnost. [2]

2.5.4 Válcové stolice

Dají se používat i pro vlhké materiály. Mlecí komora je tvořena dvěma válci s nastavitelnou mezerou. Válce se otáčejí s různou frekvencí a mezi ně je přiváděn ze zásobníku materiál, který je rozpojován smykem. Při velké vlhkosti může docházet k nalepování materiálu na válce. Výhodou je krátká doba zdržení suroviny a zároveň nízká energetická účinnost. Nevýhodou může být, že někdy dochází ke zmenšení specifického povrchu částic kvůli zborcení struktury. Mezi válci také nedochází k dostatečnému rozvláknění rostlinné struktury. [2]

2.5.5 Koloidní mlýny

Používají se pro biomasu s vlhkostí nad 15 % hmotnosti. Materiál je přiváděn ve formě suspenze do mlecí komory a při průchodu úzkou štěrbinou mezi kotouči je vystaven velkým smykovým účinkům, dochází tedy k mletí otěrem. Suspenze je přiváděna a odváděna šnekovým dopravníkem, vřetenovým nebo zubovým čerpadlem. [2]

2.5.6 Extrudéry

Dají se použít pro vlhkou biomasu. Rozpojování je založené na otěru mezi šnekem a válcem, používá se jednoduchý, nebo zdvojený šnek. [2]

2.5.7 Úderové mlýny

Hodí se pro mletí biomasy do 15 % vlhkosti, jsou velmi univerzální, lze v nich mlít téměř cokoliv. Lze v nich mlít téměř jakoukoliv dostatečně vyschlou biomasu, dále cihly, beton, keramiku, křehké kovy a křehké plasty. Tyto další materiály se mohou vyskytnout jako příměs v odpadní biomase a použití těchto mlýnů má výhodu, že mlýny se těmito příměsemi určitě nepoškodí. Fungují na principu mletí stříhem, který je

vyvoláván dynamickým účinkem tlakových sil na částici mezi mlecími segmenty. Nejčastěji jsou tvořené rotorem, který má uvnitř kladívka, ta se musí otáčet obvodovou rychlostí 76-117 m/s, Částice se postupně rozpadají na menší kousky a dostatečně malé vyletují otvory v sítu statoru. Tyto mlýny mají nízké provozní a pořizovací náklady a velmi nízkou energetickou náročnost, patří tedy mezi nejslibnější technologie pro mletí biomasy do budoucna. [2]

2.5.8 Nožové mlýny

Jsou velmi výhodné pro mletí vysušené biomasy do 15 % vlhkosti, na rozdíl od úderových mlýnů lze mlít i pružnější a houževnatější materiály a lze mlít i mírně vlhčí surovinu, ale potom není mletí úplně optimální. Hodí se pro mletí jakékoliv biomasy, konkrétně se dají použít pro: dřevo, slámu, traviny, pícniny, papír, kosti, textil krmivo pro zvířata, krmné pelety. Dále lze mlít: PET výlisky, hliníkovou strusku, lepenku, kabely, elektronické komponenty z měkkých kovů, fólie, kůže, polymery, barevné kovy, farmaceutické výrobky. Princip mletí materiálu je založen na stříhu, který je vyvolán statickým účinkem tlakových sil na částici mezi mlecími segmenty. Jsou tvořené rotorem s noži na hřídeli, které mají svoje protikusy na statoru okolo, stator je tvořený z velké části sítím, které je vyměnitelné a má velikost ok odpovídající tomu, jak velké výstupní částice potřebujeme. [2]

2.6 Naše nožový mlýn Retsch SM 300

Naše fakulta používá při pokusech experimentálního určování energetické náročnosti mletí tento nožový mlýn, ke kterému vyvíjí systém plnění. Mlýn je schopen pracovat s materiálem o velikosti částic až 60x80 mm, při pokusech na fakultě se běžně používá pro mletí slámy, vojtěškové senáže a štěpky o vstupní velikosti částic do 20 mm, konečná výstupní velikost částic závisí na namontovaném sítu a jeho otvorech. Používají se lichoběžníkové otvory o velikostech 0,25/0,50/0,75/1,00/1,50 mm a čtvercové otvory 2,00/4,00/6,00/8,00/10,00/20,00 mm. Velikost ok odpovídá výstupní velikosti částic. Pro sběr namleté hmoty se používá 5 l nádoba, nebo cyklono-sací kombinace (0,25 l až 30 l). Mlýn je poháněn trojfázovým asynchronním motorem s frekvenčním měničem, který může dosahovat otáček 100-3000/min a výkonu 3 kW. Průměr rotoru je 129,5 mm a na obvodu dosahuje rychlosti 4,7-20,3 m/s. Vyrábí se 3 typy rotorů, a to paralelní, 6-diskový a V-rotor. Materiál mlecích nástrojů může být nerezová ocel, ocel pro mletí bez kontaminace těžkými kovy, karbid wolframu. K mlýnu existují 2 násypky, a to univerzální a násypka pro dlouhé materiály. [3]

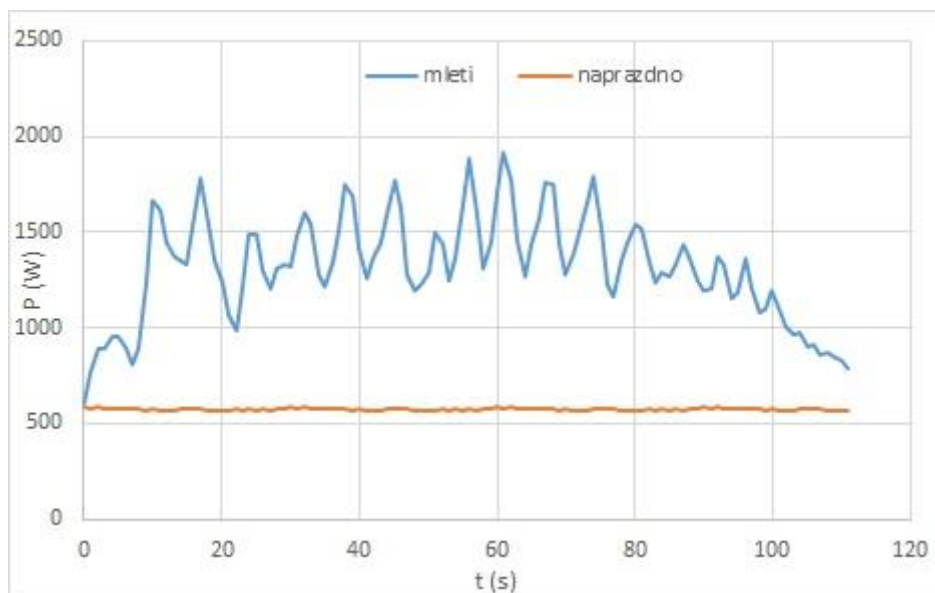


Obrázek 1 Mlýn Retsch SM 300 [3]

2.7 Energetická náročnost mletí

Na mlýnu popsaném v předešlém odstavci jsou na fakultě prováděny výzkumy na energetickou náročnost mletí. Čím menší částice požadujeme pro další zpracování, tím se musí vložit více energie do mletí při použití stejné mlecí technologie. Vždy je nutné zkoumat, kolik energie vkládáme do předúpravy suroviny, abychom věděli, zda se nám daná technologie vyplatí. Může se totiž stát, že energie vložená do mletí bude výrazně vyšší než zisk z následně vyrobeného produktu. Proto je potřeba optimalizovat předúpravu surovin mletím a hledat, jaké rozmělnění biomasy nám přinese největší užitek při nejmenší vložené energii do mletí, navrhnout vhodnou technologii mletí a určit, jak velké výstupní částice se nejvíce vyplatí, kdy nám energie vložená do mletí přinese největší zisk v podobě snadnějšího a efektivnějšího dalšího zpracování rozemleté suroviny.

Daná technologie se musí vždy vyzkoušet v laboratorním měřítku, než dojde k jejímu rozšíření do velkovýrobního průmyslu. Zjišťovat energetickou náročnost mletí můžeme dvojím způsobem, a to buď experimentálně měřením, nebo teoreticky pomocí matematického modelu. Experimentálně měřením můžeme zjišťovat měrnou rozpojovací energii při mletí suroviny z jedné velikosti částic na jinou a vztahovat ji na určitou hmotnost suroviny. Většinou měříme příkon elektromotoru daného mlýna při mletí suroviny a při chodu naprázdno. Když potom určíme rozdíl prvního a druhého zmíněného měření, vyjde nám, jakým výkonem meleme danou surovinu. Když tento výkon integrujeme podle času měření, tak nám vychází rozpojovací energie pro určitou surovinu, když ji podělíme hmotností, tak máme měrnou rozpojovací energii. Pokud surovina přichází do mlýna náhodně, tak je křivka příkonu velmi proměnlivá s prudkými nepravidelnými změnami. Mlýn chvíli běží téměř naprázdno a chvíli je ucpaný a brzděný přebytkem suroviny. Pokud máme matematicky s takovouto křivkou příkonu dále pracovat, tak je to velice obtížné a určení rozpojovací energie může být velmi nepřesné. [4] [5]



Obrázek 2 Příkon našeho mlýna [4]

Mnohem výhodnější by bylo mít hladkou pravidelnou křivku, která se co nejvíce blíží lineárnímu průběhu, potom se dá snadno a přesně určovat rozpojovací energie. Navíc, pokud bude mít mlýn vždy optimální množství suroviny, tak bude mlít s nejmenší vynaloženou energií. Pro rozšíření dané technologie mletí do velkovýrobního průmyslu se budou navrhovat také metody plnění pro dosažení optimálních podmínek pro mletí. Chod naprázdno vždy znamená zbytečnou ztrátu energie a při přebytku suroviny je také mnohem vyšší energetická náročnost mletí. Pokud by byl přívod suroviny do mlýna spojitý a plynulý

v optimálním množství, tak dokážeme zajistit mletí v optimálních podmínkách a zamezit nepravidelným výkyvům příkonu. Tím se přiblížíme k hladké pravidelné křivce, kterou dále potřebujeme pro zpracování naměřených údajů, takto můžeme poměrně přesně určovat rozpojovací energii měřením a následným zpracováním údajů.

Jedním z hlavních cílů této bakalářské práce je právě vyvinout systém plnění nožového mlýna, který nám toto zajistí a usnadní další výzkumy v oblasti měření rozpojovací energie. Matematické modelování energetické náročnosti mletí je velice obtížné. Vyžaduje dobrou znalost chování částic uvnitř mlýna a se současnými poznatky neumíme toto chování dostatečně přesně popsat. Pokud se budeme o nějaký popis snažit, tak je nutné náš model vždy ověřit experimentem a pokud se bude výrazně odchylovat od experimentu, tak musíme model upravit, aby byl přesnější. Například pro náš nožový mlýn by modelování rozpojovací energie vyžadovalo znalost meze pevnosti ve stříhu dané mleté biomasy (ta už byla měřena a dá se dohledat v různých tabulkách) a znalost střížné plochy pro danou průměrnou částici biomasy, dále potřebujeme znát průměrný počet částic vstupní velikosti v dané hmotnosti biomasy a k tomu je potřeba popsat, kolikrát se průměrná částice dostane mezi střížné nože, než je dostatečně malá na to, aby se dostala z rotoru ven. [5]

3 Teoretická část – dávkování biomasy

3.1 Parametry pro návrh plnění mlýna

Pro každý materiál potřebujeme znát potřebný hmotnostní průtok, který je pro každý materiál trochu jiný. Tento průtok je udáván výrobcem tak, aby mlýn zvládal plynule mlít za optimálních podmínek. Na základě průměrné hustoty určitého materiálu potom určíme potřebný objemový průtok, který se dá sledovat mnohem snadněji. Udávaný průtok pro štěpku je 30 kg/h, pro slámu mlýn zvládne 15 kg/h. Při hustotě štěpky 170 kg/m^3 to odpovídá $\frac{30}{170} = 0,18 \text{ m}^3$ a při hustotě slámy 20 kg/m^3 to bude $\frac{15}{20} = 0,75 \text{ m}^3$.

Můj dávkovací systém musí v každém případě zvládat průtoky mezi těmito dvěma hodnotami. Hustota senáže bývá mírně vyšší, než je hustota slámy, takže objemové průtoky senáže by měly být mírně menší, než jsou vypočtené průtoky slámy. Dalším důležitým parametrem systému plnění je, že by měl mít vlastní zásobník s dostatečnou kapacitou, aby obsluhující osoba nemusela neustále doplňovat surovinu a nevznikaly problémy způsobené nerovnoměrností dosypávání. Nádoba na namletý produkt má objem 5 l, násypka pro vstupní surovinu plnicího systému by měla mít také alespoň 5 l. Dále je třeba vyřešit, aby mohla surovina volně vstupovat do mlýna. První variantou je použít stávající násypku. Vstupní otvor z boku násypky mlýna má rozměr zhruba 125x100 mm a do něj by se musel vejít dopravník přivádějící surovinu do mlýna, aby ji uvnitř násypky vysypával dovnitř. Násypka mlýna je zároveň odmontovatelná, takže zbude otvor 85x88 mm, do něj se dá vrchem sypat surovina na namletí. Po odmontování násypky zůstane horní deska mlýna volná, takže se nad otvor snadno postaví součásti plnicího systému, které se navíc dají přichytit dvěma šrouby (viz obrázek desky po odmontování násypky).



Obrázek 3 Deska mlýna po odmontování násypky

Pokud mám parametry, které systém musí splňovat, tak mohu začít navrhovat vhodný systém plnění. Nejprve jsem hledal, zda existují průmyslově vyráběné systémy pro kontinuální plnění biomasou určené přímo pro mlýny, jako je ten náš. Zjistil jsem, že se běžně vyrábí, takže jednou z cest by bylo, kdybych použil průmyslově vyráběný podavač, který si fakulta koupí a já ho namontuji. Začal jsem tedy hledat vhodný podavač a našel jsem přímo u výrobce Retsch DR 100.

3.2 Retsch DR 100

Je laboratorní dávkovač určený pro rovnoměrné kontinuální podávání a přepravu tekutých sypkých materiálů a jemných prášků. Kromě slámy a štěpky se dá použít i pro cementářský slínek, chemikálie, hnojiva, kovové prášky, kávu, minerály, mouku, obilí, ořechy, plniva, prací prášek, písek, půdu, semena a stavební materiály. Má nastavitelný objemový průtok a vrstvu materiálu a digitálně nastavitelnou rychlost a nasazovací žlab se snadno čistí. Používají se 3 velikosti žlábků. První žlábek je široký 15 mm a hodí se pro částice do 2 mm, druhý je 40 mm a hodí se pro částice do 6 mm a třetí je 75 mm a hodí se pro částice do 12 mm. Pro moje použití bych vybral žlábek 75 mm. Šířce žlábků odpovídá i šířka propusti, tu bych vybral také 75 mm. Trychtýř se vyrábí buď 2,8 l, nebo 3,5 l, pro moje užití by byl lepší ten o objemu 3,5 l, což není sice ideální, ale obsluha snadno stihne doplňovat. Podavač se dá připojit do jednofázové zásuvky na 230 V. Jeho celkové rozměry jsou 260x420x280 mm a hmotnost 10 kg, takže by se dal umístit vedle mlýna, postavit na konstrukci vyrobenou z hliníkových profilů, které ho bez problému unesou. Ze žlabu by materiál padal do boku násypky mlýna. [6]



Obrázek 4 Dávkovač Retsch DR 100 [6]

Zdálo by se, že je to nejlepší řešení, které lze snadno realizovat a vše bude hotové. Jenže, když fakulta poptávala podavač, tak jsem se dozvěděl, že je pro nás cenově nedostupný. Všechny podavače určené pro laboratorní mletí budou podobně drahé, musím tedy hledat jinou cestu a použít něco levnějšího, co bude dostatečně dobře sloužit svému účelu.

3.3 Průmyslově vyráběné dávkovače na sypké materiály

Začal jsem tedy hledat, jaké existují dávkovače pro sypké materiály, které by zajistily rovnoměrné dávkování. Zjistil jsem, že pro balení sypkých hmot se vyrábí různé dávkovače. Mezi běžně používané typy patří objemové třecí dávkovače. Pokud bych za dávkovačem použil jakýkoliv horizontální dopravník, který mi surovinu dovede do plnicího otvoru z boku násypky mlýna, tak snadno vytvořím systém plnění. Dále se používají objemové klapkové dávkovače a šnekové dávkovače. [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13]



Obrázek 5 Objemový třecí dávkovač [9]



Obrázek 6 Objemový klapkový dávkovač [14]



Obrázek 7 Objemový šnekový dávkovač [13]

Všechny tři typy by zvládaly zpracovávat částice potřebné velikosti mojí vstupní suroviny, některé z nich jsou vhodné i pro žádané průtoky, ale cena opět nejsou cenově dostupné. Ještě existují odvažovací dávkovače, ale pokud se u objemových dávkovačů píše, že jsou cenově přijatelnější alternativou k odvažovacím dávkovačům, tak nemá smysl o odvažovacím dávkovači uvažovat. Poslední možností by byl turniketový podavač, je cenově přijatelnější než většina objemových třecích, klapkových nebo šnekových dávkovačů. Dokonce se někdy používá přímo na štěpku, mohl bych si tedy být jistý s tím, že systém plnění bude spolehlivě fungovat. Začal jsem se tedy podrobně zajímat o turniketové podavače.

3.4 Turniketový podavač

Podavač je tvořen statorem (tělem), ve kterém je umístěný lopatkový rotor uložený na hřídeli, která je uložena v ložiskách, jež jsou pevně spojena se statorem podavače. Nad stator se obvykle umísťuje násypka, (případně potrubí nebo jiný přívod materiálu), a pod stator buď stroj nebo zařízení, do kterého dávkujeme, nebo dopravník, který posouvá materiál dále. Průmyslově vyráběné podavače mají obvykle ve spodní části přírubu pro upevnění podavače a v horní části přírubu pro upevnění násypky nebo jiného přívodu materiálu. Lopatky rotoru tvoří zábranu, která vyplňuje prostor statoru. Rotory mají různé počty lopatek, vždy se to řídí velikostí a mechanickými vlastnostmi materiálu, pro který jsou konstruované. Mezi lopatkami jsou jednotlivé komory, které se nesmí materiálem ucpávat a materiál se do nich musí snadno sypat i z nich vysypat. Rotory mají obvykle na obou rovných koncích čela, která jsou kruhového průřezu o průměru odpovídajícímu průměru na koncích lopatek rotoru. Čela ohraničují zónu, kterou prochází dávkovaný materiál. Statory se obvykle vyrábí jako odlitky, pro větší a tvrdší částice materiálu se jejich tvar přizpůsobuje válcovému tvaru rotoru, aby byly uvnitř všude hladké přechody a nedocházelo ke vzpříčení částic a ucpávání podavače. Odlitky statoru se vyrábí jak pro čtvercový, tak pro kruhový vstupní a výstupní průřez, kterým prochází materiál. Ke zvýšení tuhosti mohou být vyztužené různými žebry.

Některé turniketové podavače jsou dokonce vyrobené jako prachotěsné, lopatky rotoru prachotěsně přiléhají ke statoru a mohou prachotěsně oddělit prostor před a za podavačem. Takové se používají pro dávkování při dopravě hořlavých prášků v prostředí s rizikem výbuchu. Jiné turniketové podavače mají mezi lopatkami rotoru a statorem mírnou vůli a nejsou zcela prachotěsné, takové by pro slámu i štěpku stačily. Pro štěpku se vyrábí i speciální podavače s HARDOX břitem u vstupu. Dávkování materiálu se docílí otáčením lopatkového rotoru. Při otáčení se postupně sype materiál z násypky do komor mezi lopatkami

a při pootočení rotoru se může materiál z komor postupně vysypat dolů pod podavač. Regulace průtoku se docílí regulací otáček, čím větší budou otáčky, tím více materiálu propadne. Obvykle se používají otáčky v řádu desítek za minutu. Pohon je zajištěn elektromotorem a převodovkou, pokud máme otáčky plynule regulovat, tak se musí asynchronní motor napájet přes frekvenční měnič a změnou frekvence napájecího napětí docílíme změny otáček motoru, a tím i celého stroje. [15] [16] [17]



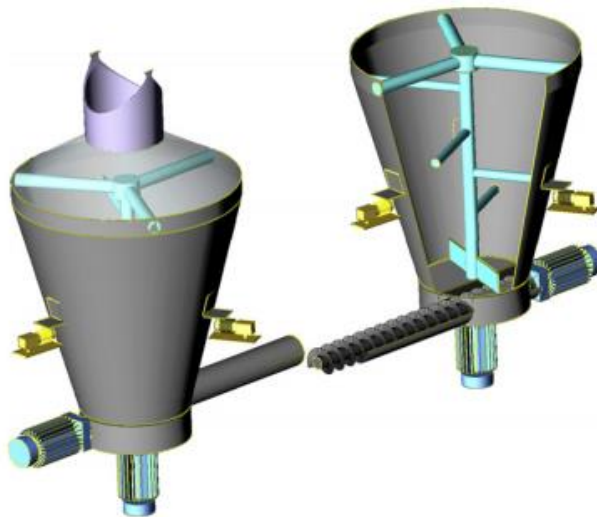
Obrázek 7 Turniketový podavač [17]

Na první pohled jsem ale viděl pouze turniketové podavače určené pro velké průtoky v řádu desítek m^3/h . Takové jsou pro moje použití nepoužitelné. Nejmenší, na který jsem narazil byl pro průtok $3,2 \text{ m}^3/\text{h}$, což bylo stejně příliš hodně, když potřebuji průtoky od $0,18$ do $0,75 \text{ m}^3/\text{h}$. Pokud by se dal sehnat dostatečně malý turniketový podavač, tak by to mohlo být skvělé řešení. Všechny průmyslové podavače jsou příliš velké, a tak jsem se rozhodl zjistit, zda existují ještě jiné dostatečně malé podavače, abych nemusel vyvíjet vlastní turniketový podavač. Další možností by byl šnekový podavač.

3.5 Šnekový podavač

Jako šnekový podavač se dá použít jakýkoliv šnekový dopravník na jehož začátek se umístí násypka. Šnekový dopravník je tvořený buďto žlabem, nebo trubkou, což je stator dopravníku a uvnitř je šneková šroubovice, což je rotor dopravníku. Funguje podobně jako vřetenové čerpadlo, otáčivým pohybem šroubovice se materiál čerpá dopředu. Průtok se dá poměrně přesně regulovat regulací otáček, čím rychleji se šnek otáčí, tím většího průtoku dopravník dosáhne. Pohon je opět zajištěn asynchronním elektromotorem s převodovkou. Pokud je požadována plynulá regulace otáček, musí se opět použít napájení motoru přes frekvenční měnič. Šnekové dopravníky se používají pro většinu běžných materiálů s tekutým chováním včetně materiálů sypkých a práškových. Zároveň by se tím vyřešila horizontální doprava přímo do bočního plnicího otvoru násypky. Šnekové dopravníky se průmyslově vyrábí v mnoha provedeních. Používají se běžně pro sypké materiály. Dopravuje se s nimi: obilí, luštěniny, krmné směsi, hnojiva, plastové a jiné granuláty, uhlí a téměř všechny další sypké materiály. Ty menší zvládají dopravu materiálů o velikosti částic do 10 mm , ty větší zvládají i větší částice. Vyrábí se i podavače, které mají vlastní násypku. [18] [19]

Pro plnění mlýnů a drtičů to může být jedno z nejvýhodnějších řešení. Šnekový dopravník už se používal při plnění laboratorního mlýnu, je o tom článek z Univerzity Zaragoza ve Španělsku, kde se zabývali mletím artičoku (*Cynara cardunculus L.*) a při plnění mlýna používali vlastní šnekový dávkovač, který měl navíc v kuželové násypce míchadlo, aby materiál rovnoměrněji propadával. Na následující obrázku je zmíněný dávkovač. [20]



Obrázek 8 Šnekový dávkovač z Univerzity Zaragoza [20]

Pokud by se dal sehnat dostatečně levný šnekový dopravník, který by se hodil pro naše průtoky, bylo by to jistě nejlepší řešení systému dávkování pro mlýn v provozních podmínkách, pokud by se neměřila energetická náročnost a neurčovala měrná rozpojovací energie. Měrnou rozpojovací energii určujeme vždy pro danou vstupní a výstupní velikost částic. Ve šnekovém dopravníku je vždy mnoho míst, kde může docházet ke vzpříčení částic a jejich následnému lámání a deformování vlivem smyku mezi šnekem a trubicí okolo. Velikost částic můžeme dobře sledovat pouze před dávkovačem. Sledovat ji až za ním, těsně před vstupem do mlýna, je velmi obtížné, až nemožné, takže by docházelo k chybám při určování měrné rozpojovací energie. Zároveň ve šneku je obvykle velký mrtvý objem k naplnění šnekového dopravníku, než začne materiál padat do mlýna. Pro měření při menších dávkách materiálu by to nemuselo být výhodné. Při použití šnekového dopravníku by se nad dopravník vyrobila násypka a dopravník by jistě spolehlivě dávkoval slámu, štěpku i senáž, když průmyslově vyráběné šnekové dopravníky jsou určeny pro podobné sypké materiály.

Když jsem hledal dopravník vhodné velikosti, nacházel jsem hlavně dopravníky určené pro průtoky v jednotkách až desítkách m^3/h a délkách od 3 do 11 m, což se ale nehodí pro laboratorní mlýn. Zároveň pokud mají tyto dopravníky elektromotor s příkonem od 2 kW výše, tak by mi připadalo nevhodné, aby dávkovací systém měl podobný příkon jako mlýn. Dávkování mělo spotřebovat mnohem méně energie než mletí. [19] [18]

Později jsem našel výrobce Rataj, který by nabízel i malé šnekové dopravníky pro naše průtoky. Pro mletí na našem mlýnu by se mi zdál vhodný dopravník RP 80. Nabízí průtoky 0,001-1 m^3/h . Vnější průměr šnekovnice má 76,2 mm. [21] Z výše zmíněných důvodů nevidím šnekový dávkovač jako nejvhodnější řešení laboratorního dávkování pro zkoumání měrné rozpojovací energie.

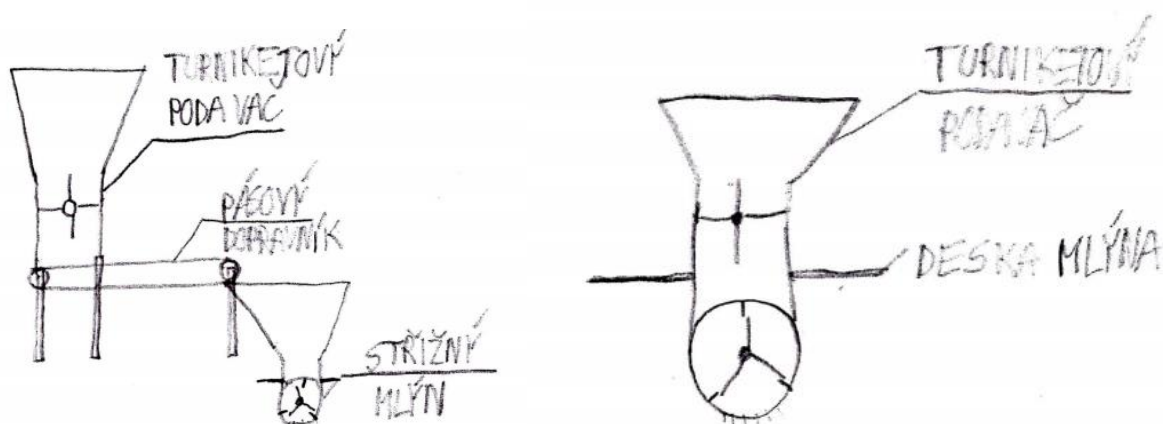
Lepší by bylo mít turniketový podavač. U něj se dá zajistit menší mrtvý objem, nehrozí takové lámání a deformace částic ještě před vstupem do mlýna. Navíc lze docílit menšího zástavbového prostoru a turniketový podavač se také dá snadněji připevnit k základové konstrukci. U turniketového podavače si mohu vyvíjet vlastní rotory a jejich tvar uzpůsobovat materiálu. Proto si myslím, že by bylo výhodné se pokusit o vývoj turniketového podavače.

4. Praktická část

4.1 Vývoj vlastního dávkovače

Nepodařilo se tedy najít vhodný dávkovač, který by zajistil potřebné průtoky materiálu, neměl takové riziko lámání a deformace částic jako šnekový dopravník a byl dostatečně levný. Zvažoval jsem, zda použít násypku mlýna a horizontální dopravník, nebo zda použít přímé plnění po odmontování násypky mlýna.

Obě možné koncepce znázorňuje následující schéma. Dopravník by ve skutečnosti procházel bočním otvorem v násypce.

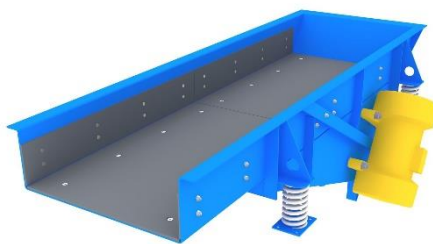


Obrázek 9 Schéma možných koncepcí plnění (vlevo přes dopravník, vpravo přímé plnění)

Nejprve jsem zvolil možnost použít horizontální dopravník, nad který bych umístil turniketový podavač. K horizontální dopravě bych použil průmyslově vyráběný dopravník s regulovatelnou rychlostí posuvu, což by zlepšilo regulaci toku suroviny do mlýna a pokud bych docílil optimální vrstvy na dopravníku, tak bych měl optimální množství suroviny vstupující do mlýna. Pro účely dopravy štěpky, senáže a slámy by se dal použít buď pásový, nebo vibrační dopravník.

4.2 Vibrační dopravníky

Nejdříve jsem uvažoval nad vibračním dopravníkem, když originální dávkovač také obsahuje vibrační dopravník. Vibrační dopravník zajišťuje poměrně přesnou regulaci posuvu. Je tvořený žlabem, který je rozkmitáván elektromagnetickým vibrátorem, vibrace se dají nastavovat frekvenčním měničem. Průmyslové dopravníky jsou uzpůsobené na sypké materiály a hodí se pro slámu i štěpku. Dle informací od výrobců se dopravníky běžně vyrábí až od šířky žlabu 130 mm, což neprojde vstupem do násypky. Pro dávkování do větších mlýnů by to bylo jistě výhodné řešení, ale pro náš mlýn to je nepoužitelné. [22] [23] [24]

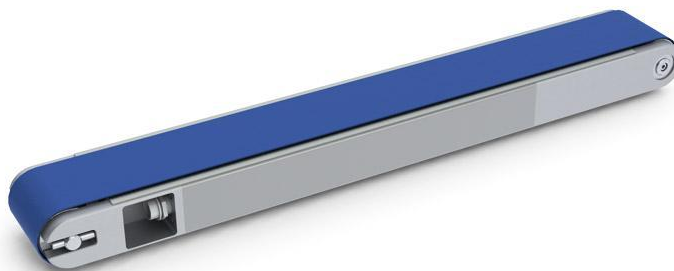


Obrázek 10 Vibrační dopravník [24]

4.3 Pásový dopravníky

Pásový dopravník by měly správnou šířku, vyrábí se i takové, které projdou 125 mm širokým vstupním otvorem násypky mlýna. Jsou tvořené válcovými bubny, přes které je napnutý pás. Bubny se otáčejí a napnutý pás se tím posouvá. Mají většinou elektromotor s regulovatelnými otáčkami pomocí

frekvenčního měniče, a tak se dá regulovat rychlost posunu dopravníku. Pro sypké materiály se používají ližiny, aby se materiál nerozsyपाल do stran a některé části se musí speciálně utěsnit proti prachu. Vzhledem k tomu, co nabízeli výrobci, jsem zjistil, že maximální aktivní šířka dopravníku může být 100 mm, aby se dopravník i s bubnem vešel do plnicího otvoru násypky. [25] [26] [27]



Obrázek 11 Pásový dopravník [27]

Když už jsem měl vybraný pásový dopravník správné velikosti, tak jsem začal přemýšlet o tom, jak zrovnoměrnit sypání materiálu z násypky na dopravník. Tím, že dopravník může mít aktivní šířku maximálně 100 mm, musím mít vysýpací otvor násypky, ze kterého bude materiál padat na pás, o šířce mírně menší než 100 mm, já jsem si zvolil maximální šířku 96 mm. Násypka by byla kuželového tvaru bez ostrých rohů, aby materiál padal, objem jsem zvolil zhruba 8 l, aby byla rezerva a aby materiál vrchem nepřepadával, pokud by se vše mírně rozkmitalo vibracemi od mlýna. Otvor pro plnění násypky by měl být zhruba 280 mm, aby se surovina snadno sypala dovnitř, i když se budou používat běžné kbelíky o objemu 10 l.

4.4 Vlastní turniketový podavač

Ke zrovnoměrnění toku materiálu z násypky na pásový dopravník jsem se rozhodl vyvinout vlastní turniketový podavač. Pokud by se měl použít lopatkový rotor, tak může být výstupní otvor buď čtvercový, nebo obdélníkový, rozhodl jsem se použít čtvercový otvor o velikosti 96x96 mm, do něj lopatkový rotor o průměru 95 mm a délce také 95 mm. Aby zvládl pojmout dostatečně velké částice biomasy (ideálně až 20x20 mm), tak jsem se rozhodl použít pouze 4 komory mezi 4 lopatkami. Podobně jako o průmyslových turniketových podavačích by měl být rotor opatřený čely o stejném průměru, jako je průměr lopatek.

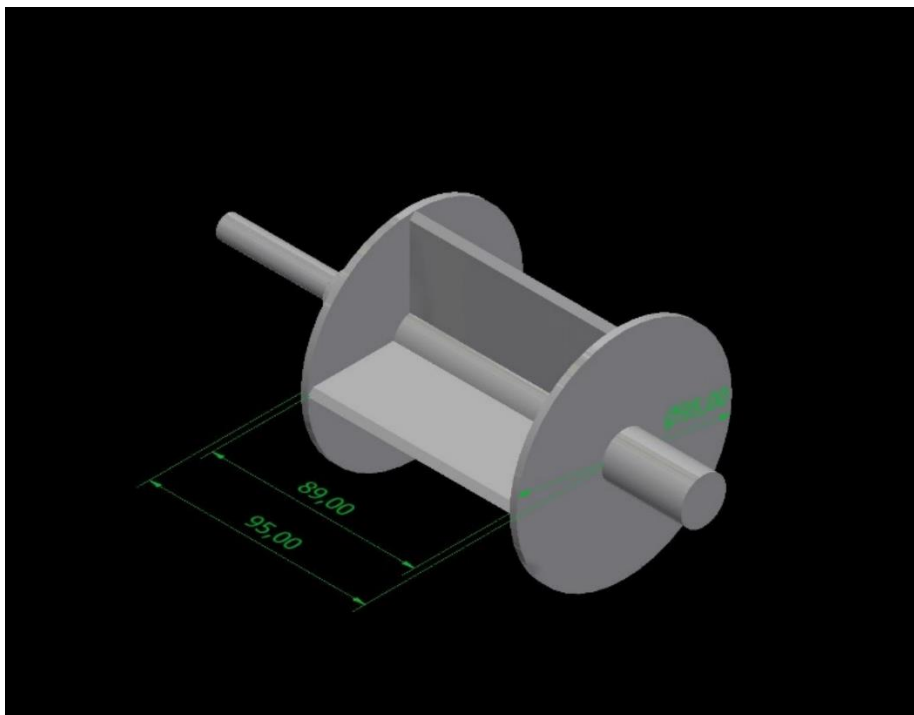
Ústav má možnost používat 3D tiskárnu pro tvorbu prototypů, nejčastěji se tiskne z PLA plastu. Rozhodl jsem se tedy využít 3D tisku při výrobě svého prototypu. Tomu jsem uzpůsobil návrh. Všechny velké tenké plochy jsem se rozhodl dělat z 5 mm silného materiálu. Menší, ale mechanicky hodně namáhané plochy jsem se rozhodl dělat také 5 mm silné a málo namáhané menší plochy mohou být z pouze 3 mm silného materiálu, zejména, pokud by tlustší stěny překážely. Hřídél jsem se rozhodl tisknout o průměru 20 mm. Toto dimenzování bylo provedeno na základě odhadu vzniklého z pozorování jiných součástí tisknutých z PLA plastu a jejich mechanických vlastností. Ze začátku jsem neměl k dispozici materiálový list s mechanickými vlastnostmi PLA plastu, takže jsem si nemohl nic ověřit pevnostním výpočtem, první prototyp tedy mohl být dimenzován pouze odhadem. Vlastnosti tisknutého plastu velmi výrazně závisí na struktuře, která se dá ovlivnit nastavením tiskárny.

Ze začátku jsem bohužel nevěděl, jaké možnosti nastavení má tiskárna, a tak se tisklo s nastavením odlehčeného materiálu, který byl plný pouze na povrchu a uvnitř byl dutý s vyztužovacími žebírky, což prototyp nepříznivě ovlivnilo. Obecnou vlastností 3D tisku je také, že nelze jednoduše vytisknout jakýkoliv tvar výrobku, vždy jsem nějak omezený. Zprvce tiskárna má rozsah os 210, 210 a 250 mm a větší výrobek nevytiskne, to znamená, že velké díly (například násypku) nelze tisknout vcelku, ale musí se poskládat z více malých částí lepených k sobě vhodným lepidlem. Části by měly mít pro snadné slepení různé zarážky

a zámky, aby se jednoznačně určila poloha při slepování, a také proto, aby se zvětšila slepovaná plocha a dosáhlo se pevnějšího spojení. Další vlastností tisknutých součástí je, že na desce tiskárny musí začínat tou největší plochou, nedá se začít úzkou základnou a potom vytisknout mnohem širší plochu. Pokud máme součásti, které jsou uprostřed výrazně širší než na okraji, tak je opět nemůžeme tisknout jako jednodílné, ale musíme je rozdělit na více částí tak, abychom mohli začínat tisk největší plochou. Nyní rozeberu, z jakých částí se skládá navržený prototyp. Základní rozměrové skici jsem nahradil kótováním nejdůležitějších rozměrů 3D modelů. S ohledem na technologii výroby nemělo smysl vytvářet skici, když tiskárna tiskne vždy na základě modelu ve formátu STEP.

4.4.1 Lopatkový rotor

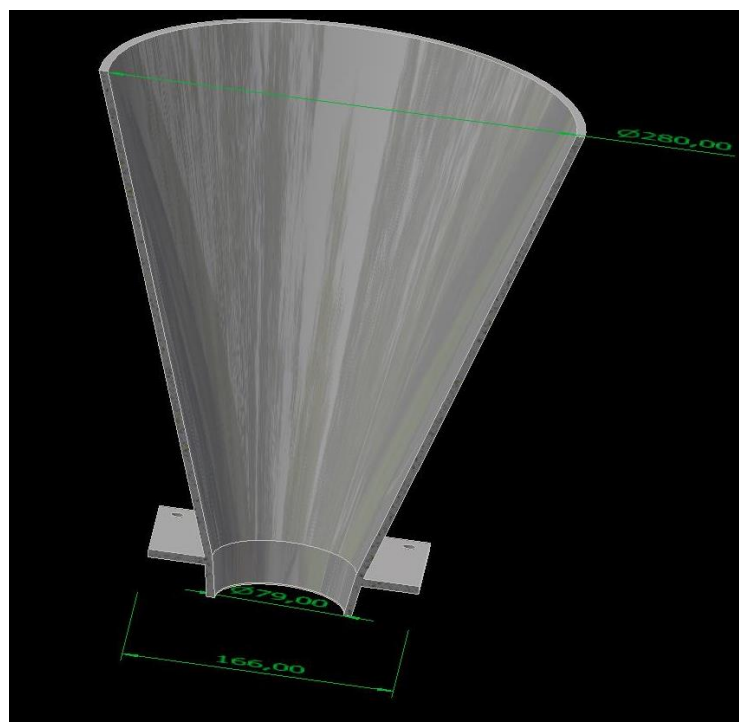
Měl průměr 95 mm, délku také 95 mm a čtyři lopatky o tloušťce 5 mm, čela měla tloušťku 3 mm. Hřídel byla součástí rotoru, na jednom konci byla zúžená na průměr 10 mm, aby se dal plnicí systém zkoušet s pohonem vrtačky, nebo laboratorní míchačky, hřídel by byla upnutá do 10 mm sklíčidla. Vzhledem ke tvaru se musel tisknout ze 3 částí, čela s konci lopatek se potom přilepila k části uprostřed.



Obrázek 12 Lopatkový rotor první prototyp

4.4.2 Násypka

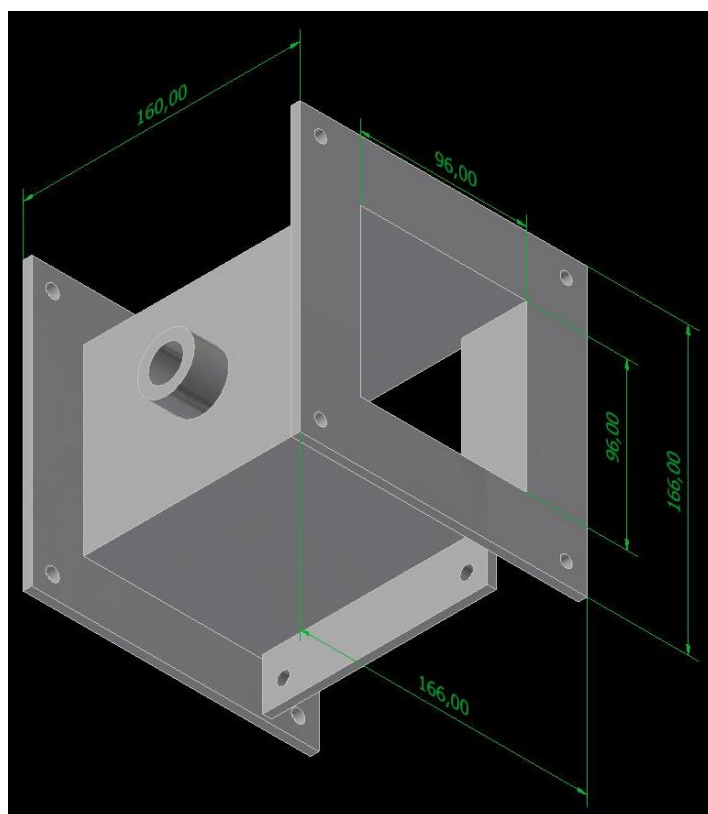
Násypka byla tvořena kuželovým trychtýřem, který byl slepovaný z 5 částí. Spodní část kužele se až do poloviny výšky dala vytisknout v celku. Vrchní část se musela dělit na čtvrtiny, aby se to vešlo na desku tiskárny. Jednotlivé části byly opatřeny zámky, aby se násypka dala slepit. Na násypku se jako šestá součást přilepila čtvercová příruba se 4 dírami pro šrouby M6 (díry průměru 7 mm), aby se násypka dala připevnit k tělu (statoru) podavače pomocí šroubů a matic. Příruba byla na druhé straně opatřena kuželovým nákrůžkem, který má sloužit k tomu, aby materiál padal pouze mezi čela lopatkového kola a podavač se příliš neucpával.



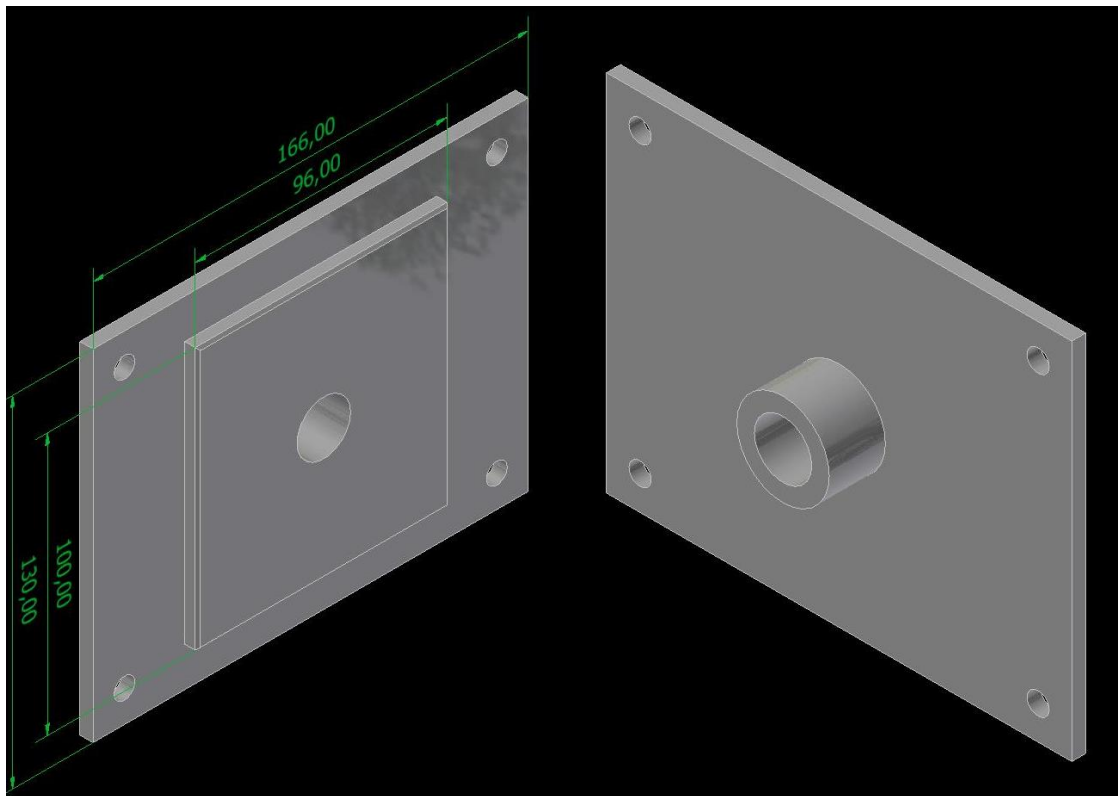
Obrázek 13 Násyпка prototyp

4.4.3 Tělo podavače

Tělo podavače mělo čtvercový průřez 96x96 mm. Ve směru osy lopatkového rotoru mělo na jedné straně víko, aby šel lopatkový rotor vložit dovnitř, víko bylo osazené, aby se snáze vycentrovalo a připevňovalo se pomocí 4 šroubů a matic M6. Tělo podavače bylo na straně víka opatřeno přírubou s dírami pro tyto šrouby. Ve víku a na protější straně byl otvor o průměru 20,5 mm pro hřídel lopatkového kola. Jak tělo podavače, tak víko mělo otvor opatřený nákrůžkem, aby hřídel dosedala větší plochou.



Obrázek 14 Stator podavače



Obrázek 15 Víko statoru podavače

4.4.4 Úvahy nad procesními výpočty

Z těchto součástí jsem chtěl smontovat turniketový podavač. Podavač jsem chtěl umístit nad dopravník, tělo přimontovat na rám, který bude o něco výše než dopravník, aby se mohla vrstva materiálu dopravovat pásovým dopravníkem z místa pod turniketovým podavačem do bočního otvoru násypky mlýna. Musel jsem zkontrolovat použitelnost předběžně navrženého systému plnění. Potřeboval jsem znát otáčky pro dopravu slámy i štěpky ve správném množství. Když bych znal otáčky, tak tím budu znát i obvodovou rychlost rotoru turniketového podavače. Rychlost posuvu dopravníku bych volil stejnou, jako obvodovou rychlost podavače, tím bych docílil nejrovnoměrnějšího toku materiálu. Musel jsem tedy ověřit, zda běžně vyráběné pásové dopravníky dosahují takových rychlostí posuvu, jaké jsem potřeboval. Pokud bych znal rychlost posuvu dopravníku a průtok materiálu, tak bych mohl vypočítat přesně, jaká vrstva materiálu bude na dopravníku. Z toho bych mohl určit, o kolik výše musí být spodek turniketového podavače nad dopravníkem, aby vrstva prošla a zároveň ze známé výšky vrstvy na dopravníku bych mohl určit potřebnou výšku ližin dopravníku.

Když bych potom měl vybraný konkrétní dopravník, tak bych mohl určit, jak by měl přesně vypadat rám pod dopravníkem i na jakém rámu musí stát turniketový podavač. Jako hlavní vstupní parametr použiji vypočtený objemový průtok z předchozích částí práce. Pro štěpku je tedy potřebný průtok $V'_s=0,18 \text{ m}^3/\text{h}$ a pro slámu $V'_s=0,75 \text{ m}^3/\text{h}$. Pokud bych vypočítal objem čtyř komor lopatkového rotoru a potřebný průtok vydělil tímto objemem, vyšel mi počet otáček za hodinu. Průměr lopatkového rotoru je 95 mm, vnitřní délka mezi čely je 89 mm. Objem takto ohraničeného válce bych musel ještě zmenšit o objem lopatek a objem hřídele uprostřed. Objem lopatky bude daný délkou a tloušťkou lopatky a šířkou lopatky. Tloušťka lopatky je 5 mm, délka je 89 mm a šířka je $47,5-10 = 37,5$ mm. Šířku jsem určil jako rozdíl poloměru rotoru a poloměru hřídele. Hřídel je uvnitř rotoru válec o průměru 20 mm a délce 89 mm. Celkový objem tedy bude:

$$V = V_v - V_h - 4 * V_l \quad (1)$$

V_v je objem válce ohraničeného rotorem, V_h je objem válce vyplněného hřídelí a V_l je objem lopatky.

$$V = \frac{\pi \cdot 95^2}{4} \cdot 89 - \frac{\pi \cdot 20^2}{4} \cdot 89 - 4 \cdot 5 \cdot 89 \cdot 37,5 = 535\,835 \text{ mm}^3 = 0,000535835 \text{ m}^3 \quad (2)$$

$$\text{Potřebné otáčky tedy budou: } n_s = \frac{V l_s}{V} = \frac{0,18}{0,000535835} 336 \text{ ot./h} = 5,6 \text{ ot./min} \quad (3)$$

$$n_s = \frac{V l_s}{V} = \frac{0,75}{0,000535835} 1400 \text{ ot./h} = 23,3 \text{ ot./min} \quad (4)$$

Když jsem znal potřebné otáčky rotoru, tak jsem mohl vypočítat obvodovou rychlost rotoru. Abych mohl dosáhnout co nejrovnoměrnějšího toku materiálu, tak jsem zvolil rychlost posuvu dopravníku stejnou, jako obvodovou rychlost rotoru. K výpočtu obvodové rychlosti rotoru potřebuji znát úhlovou rychlost rotoru. Když znám otáčky za minutu, mohu je vydělit 60 a vynásobit $2 \cdot \pi$ a budu mít úhlovou rychlost. Úhlovou rychlost potom vynásobím poloměrem rotoru v metrech. Pro menší otáčky to bude vypadat takto.

$$v_s = \frac{n_s}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{d}{2} = \frac{\pi \cdot d \cdot n_s}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,095 \cdot 5,6}{60} = 0,028 \text{ m/s} \quad (5)$$

Pro větší otáčky to bude vypadat takto.

$$v_s = \frac{\pi \cdot d \cdot n_s}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,095 \cdot 23,3}{60} = 0,116 \text{ m/s} \quad (6)$$

Dopravníky zvládají rychlosti 0,2-18 m/min, což odpovídá 0,003-0,3 m/s, což vyhovuje vypočítané potřebné rychlosti. Dále jsem mohl vypočítat, jaká bude vrstva na dopravníku. Znal jsem hodinový průtok a posuv dopravníku za sekundu. Když vydělím hodinový průtok 3600, mám průtok za sekundu. Pokud bude aktivní šířka dopravníku 0,1 m, znám plochu, na jakou se rozsype každou sekundu proteklé množství. Výšku vrstvy na dopravníku v metrech jsem potom mohl vypočítat takto.

$$h = \frac{V l_s}{3600 \cdot v_s \cdot 0,1} = \frac{0,18}{3600 \cdot 0,028 \cdot 0,1} = 0,018 \text{ m} \quad (7)$$

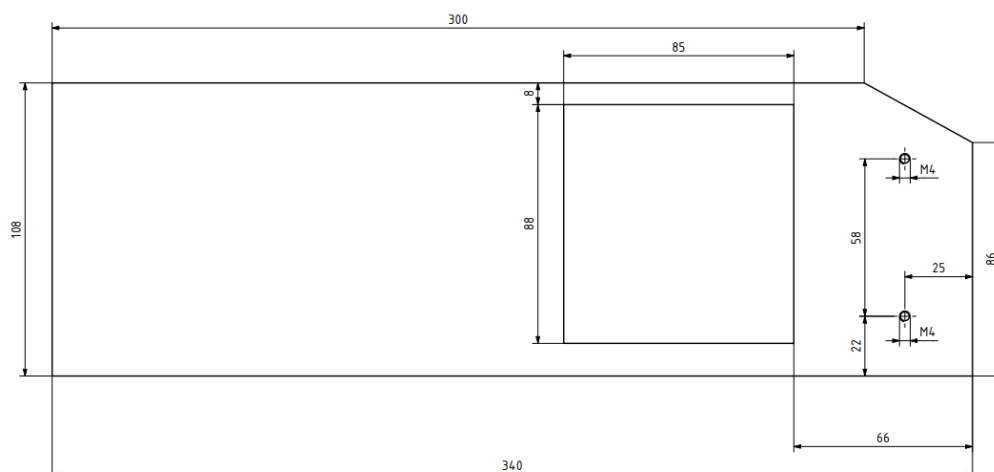
Z předchozích výpočtů vyplývá, že posuv dopravníku je přímo úměrný průtoku suroviny, proto pro slámu a větší otáčky a větší rychlost posuvu vyjde stejná výška vrstvy. Z toho plyne, že dopravník musí mít ližiny alespoň 18 mm vysoké.

Nyní už jsem měl všechny parametry potřebné pro poptání dopravníku. Řešení pásovým dopravníkem vypadalo velice nadějně, poptali jsme proto pro fakultu dopravníky s aktivní šířkou 100 mm, aby neměly buben širší než 120 mm. Poptané dopravníky by měly zvládat sypké materiály a měly by k tomu mít ližiny do výšky 18 mm. Měly by zvládat rychlost posuvu zhruba od 0,02 do 0,12 m/s Dopravníky jsme poptali u firem Haberkorn, ATC Drašar a DAS. Všechny tři firmy nabízejí i takto malé pásové dopravníky a na první pohled se nám zdálo, že budou vyhovovat a vybereme z nich ten nejlevnější. [25] [26] [27]

4.4.6 Změna řešení

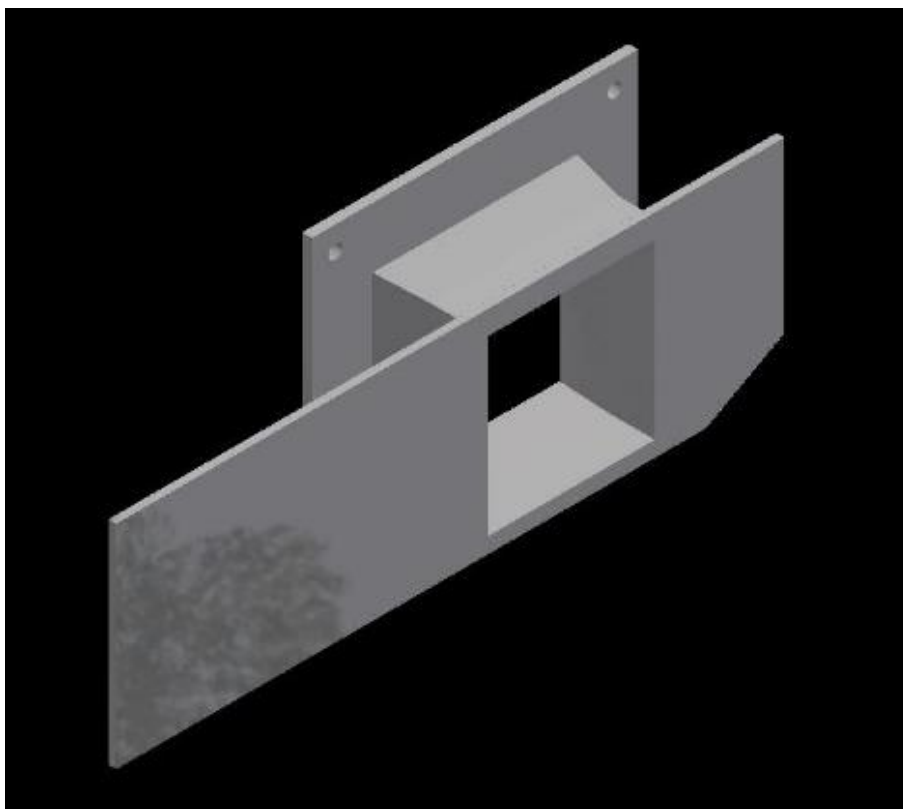
Bohužel jsem se dozvěděl, že výrobci počítají s použitím těchto dopravníků pro dopravu kusových součástek o velikosti několik cm a běžně nevyrábí v těchto velikostech dopravníky pro sypké materiály. Aby se jim vyplatilo dopravník upravovat pro sypké materiály, tak by museli mít větší zakázku, jeden speciální dopravník pro použití na sypké materiály pro naši fakultu nám žádný běžný výrobce nevyrobí. Tím se celá situace výrazně zkomplikovala, všechny dosavadní úvahy předpokládaly použití dopravníku, který ale nedokážeme sehnat. Stál jsem před rozhodnutím, zda v návrhu dále předpokládat použití dopravníku a snažit se vyvíjet k tomu účelu vlastní pásový dopravník, nebo zda se pokusit vytvořit úplně jiné řešení, které nebude závislé na použití dopravníku. Vývoj pásového dopravníku znamená spoustu práce navíc, rozhodl jsem se tedy, že nadále budu pokračovat v úvahách bez dopravníku. Pokud nebudu mít dopravník, tak nemohu používat násypku mlýna a boční plnicí otvor. Musel jsem tedy násypku odmontovat a prozkoumat, jak by vypadalo plnění mlýna bez násypky. Po odmontování násypky zůstane

rovná deska se dvěma dírami, kam se dají dát šrouby, změřil jsem přesnou polohu děr a polohu plnicího otvoru, který je obdélníkový a má rozměr 85x88 mm. Vše jsem zakreslil, výkres vypadá takto.



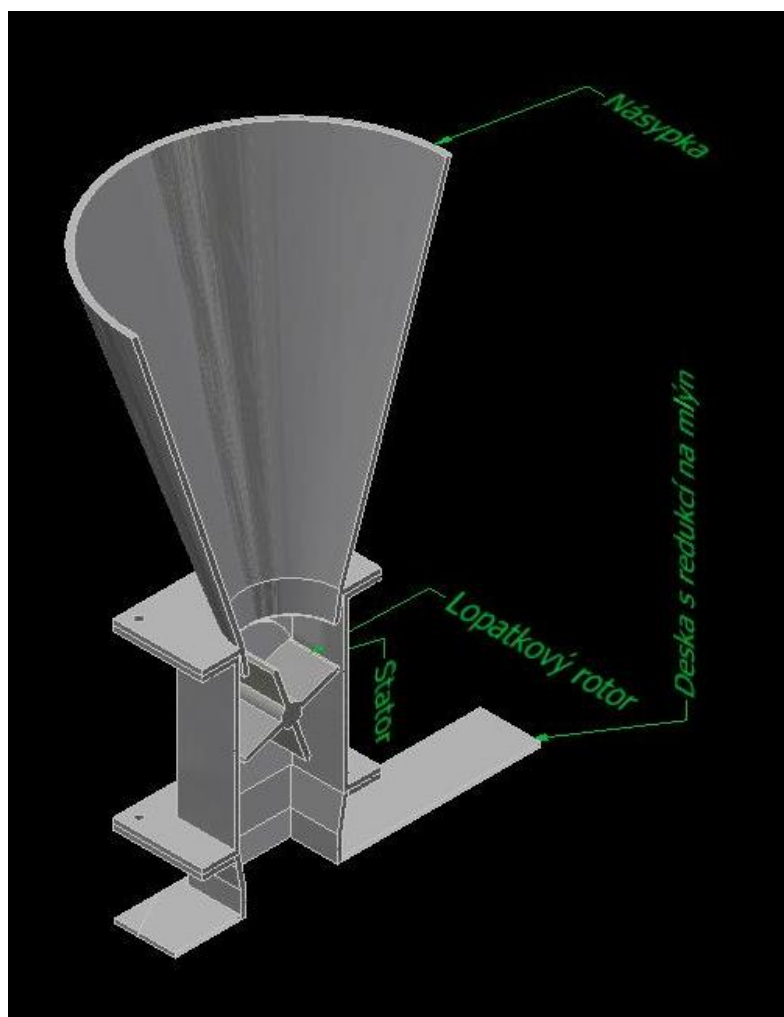
Obrázek 16 Náčrtes desky mlýna

Přemýšlel jsem, jak do tohoto otvoru plnit, došel jsem k tomu, že když vyrobím dostatečně přesně fungující turniketový podavač, tak mohu průtok regulovat pouze s ním. Turniketový podavač by mohl být nad plnicím otvorem v horní desce mlýna a materiál z podavače by padal přímo do plnicího otvoru. Můj navržený podavač měl výstupní otvor o průřezu 96x96 mm, což by bylo příliš. Abych nemusel předělávat navržený podavač, rozhodl jsem se udělat redukci ve tvaru jehlanového trychtýře, která se přimontuje na spodní přírubu podavače. Tato redukce by se potom přilepila k plastové desce, která by měla otvory podle desky mlýna, aby se dala našroubovat na mlýn. Otvory byly průměru 3,8 mm. Spojení desky a mlýna se mohlo zpevnit přesahem zavřeného předního plechového krytu mlýna. Tak jsem vytvořil přímé plnění mlýna bez použití dopravníku. Navržená deska i s redukcí vypadala takto.



Obrázek 17 Deska s redukcí na vstupní otvor mlýna

Jehlanový trychtýř se dal vytisknout s přírubou jako jeden díl a ten se přilepoval ke spodní desce, která byla slepena ze dvou vytisknutých polovin. Celá sestava vypadala takto.



Obrázek 18 Sestava prvního prototypu

4.5 Výroba prvního prototypu a jeho zkoušení

4.5.1 Výroba

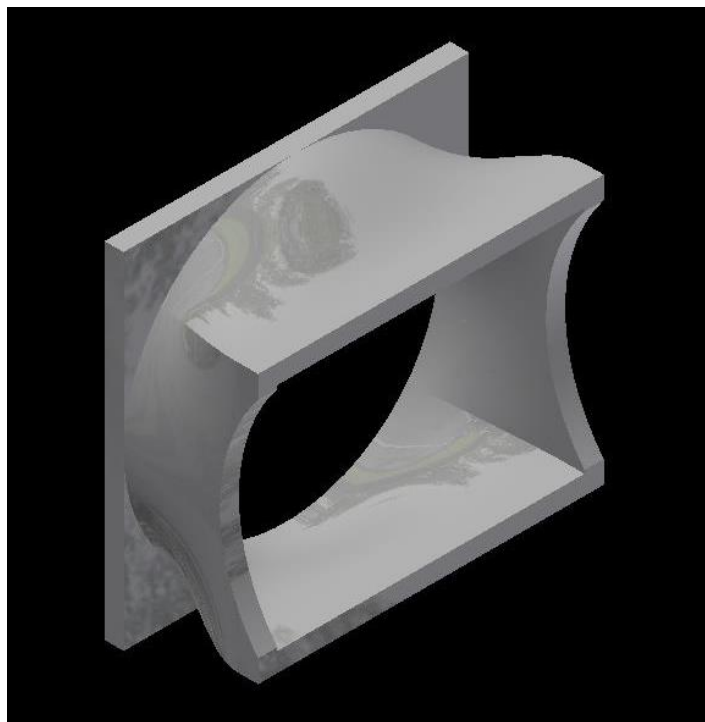
Svoje návrhy jednotlivých dílů jsem potom konzultoval s doktorem Solnařem. Řešili jsme vhodnost dílů k tisku. Výsledkem byla úprava některých prvků modelů dílů, aby šly snáze tisknout a dobře se po vytisknutí slepovaly. Po této úpravě jsme se dali do tisknutí jednotlivých dílů. Bylo použito aktuální nastavení, které sloužilo pro tisk odlehčených dílů, které měly tenkou souvislou vrstvu na povrchu a uvnitř byla struktura tvořená tenkými žebírky, mezi kterými byl vzduch. Toto nastavení bylo velice nevýhodné, protože neumožňovalo tisk pevných tuhých dílů, ale ze začátku jsem nevěděl, že jde tisknout i jinak. Díky výrazné pomoci doktora Solnaře se podařilo díly vytisknout. Následně byly sraženy otřepy dílů a zabroušeny výstupky na dosedacích plochách a zabroušeny díry, aby se do nich vešly šrouby. Potom mohly být díly slepeny, k lepení se použilo lepidlo na tvrdé plasty výrobce UHU. Lepené spoje se musely nechat vytvrdnout 24 hodin, než s nimi šlo dále pracovat. Po vytvrdnutí se mohly díly sešroubovat k sobě. Na sešroubování se použily šrouby M6x20 se šestihrannou hlavou a šestihranné matice. Tím byl hotový první prototyp podavače, který se dal po odmontování násypky připevnit pomocí šroubů M4 s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem, kterými se běžně přišroubovává originální násypka. Po sestavení mohlo začít zkoušení prototypu.

4.5.2 První zkoušení

Nejprve jsem zkoušel chod naprázdno s ručním pohonem hřídele. Zjistil jsem, že rotor není dokonale souosý a tím je hřídel brzděna výrazně větším třecím momentem, než bych chtěl a čekal. Pro výsledný podavač bude muset být navrhnutý rotor tak, aby se po slepení zajistila lepší souosost hřídele. Pro dávkování hodně jemných pilin (velikost do 2 mm) prototyp fungoval, stejně tak by fungoval i pro měkké ohebné materiály, jako například slámu do velikosti částic 20 mm. Tím, že materiál dopadal i do tenké spáry mezi tělem podavače a lopatkami a obklopoval celou polovinu rotoru, docházelo snadno ke vzpříčení částic a značnému brzdění rotoru. Vzpříčování částic ještě pomáhalo to, že nákrůžek pod kuželovou násypkou byl několik cm od rotoru a mezi nákrůžkem a lopatkami se opět vzpříčovaly částice. Pro tvrdé materiály o větší velikosti částic (nad 2 mm), například pro dřevěnou štěpku, byl podavač naprosto nepoužitelný, protože i když jsem sypal štěpku pomalu do kuželové násypky za chodu podavače, tak se podavač neustále ucpával a zasekával. Pokud se násypka nejprve naplnila štěpkou, tak se mi potom nikdy nepovedlo rotor roztočit, protože vzpříčené tvrdé částice zcela bránily otáčení. Tento prototyp tedy na štěpku nevyhověl a musel jsem ve vývoji pokračovat dále.

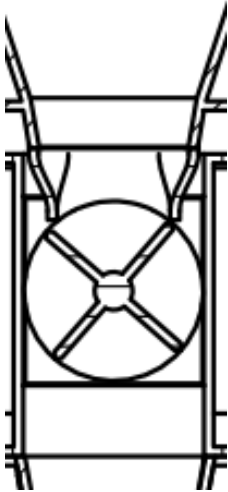
4.5.3 První úprava k odstranění nedostatků

Odpor proti otáčení jsem se snažil snížit tím, že materiál bude padat pouze na čtvrtinu lopatkového rotoru. Dále bylo třeba zajistit, aby se materiál nevzpříčil mezi nákrůžkem a rotorem. Rozhodl jsem se tedy vymyslet hladkou přechodovou plochu mezi kruhovým nákrůžkem kuželové násypky a rotorem, tak aby měla u rotoru otvor velký pouze jako čtvrtina lopatkového rotoru a zároveň byla minimální mezera mezi spodní částí plochy a rotorem, zvolil jsem vůli 1 mm. Přechod z kruhu na obdélník by se mohl přilepit zespoda k nákrůžku kuželové násypky. Vytisknout se dal z jednoho kusu.

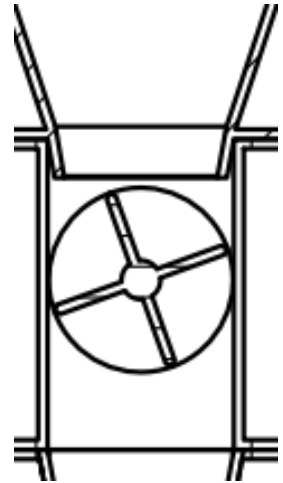


Obrázek 19 Přechod kruh obdélník

Přechod se bohužel nedal vytvořit tak, aby se vešel pod nákrůžek do mezery mezi nákrůžkem a rotorem, poloha spodní příruby kuželové násypky musela být zvýšena, aby se přechodová plocha vešla. Byly použity dlouhé šrouby M6x50, mezi vrchní přírubu těla podavače a spodní přírubu kuželové násypky jsem vložil 2 matice M6 pro provizorní zajištění dostatečné mezery. Tak mohl být podavač po přilepení přechodové plochy znovu odzkoušen. Na následujícím obrázku je vidět porovnání nové (vlevo) a původní (vpravo) geometrie řešení přechodu mezi násypkou a podavačem.



Obrázek 21 Nové řešení geometrie



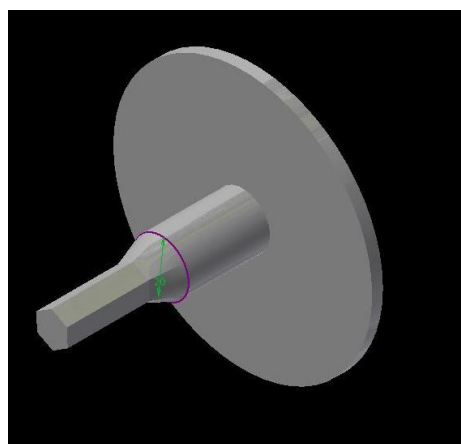
Obrázek 20 Původní řešení geometrie

4.5.4 Druhé zkoušení

Po vytvrzení lepidla jsem zkoušel podavač nejdříve při postupném sypání štěpky za chodu podavače, vylepšení přechodovým dílem pomohlo, podavač se takto zasekával méně, ale stále nefungoval bezchybně. Zkoušel jsem jak ruční pohon, tak pohon pomocí aku vrtačky, která měla katalogový krouticí moment až 54 Nm. Ve skutečnosti byl při velmi malých otáčkách krouticí moment nižší. Potom jsem chtěl vyzkoušet, jak se chová podavač při rozběhu s plnou násypkou, jenže při tomto pokusu praskla hřídel v místě zúžení. Projevily se nevýhody odlehčeného materiálu a také příliš tenké hřídele. Zároveň jsem nedržel vrtačku tak, aby bylo sklíčidlo dokonale souosé s hřídelí, což ještě zhoršilo namáhání hřídele přidavným ohybovým momentem.

4.5.5 Oprava

Tehdy jsem si uvědomil, že bude nutné nastavit tiskárnu jinak a výrazně namáhané díly tisknout z hutného plného materiálu, aby měly co nejvyšší pevnost. Abych nemusel dělat celý nový rotor, rozhodl jsem se odříznout čelo na straně prasklé hřídele, plochu zabrousit a vytisknout z plného materiálu nové čelo s hřídelí, která bude zúžená na šestihran vepsaný do 13 mm válce.



Obrázek 22 Čelo s hřídelí pevnější

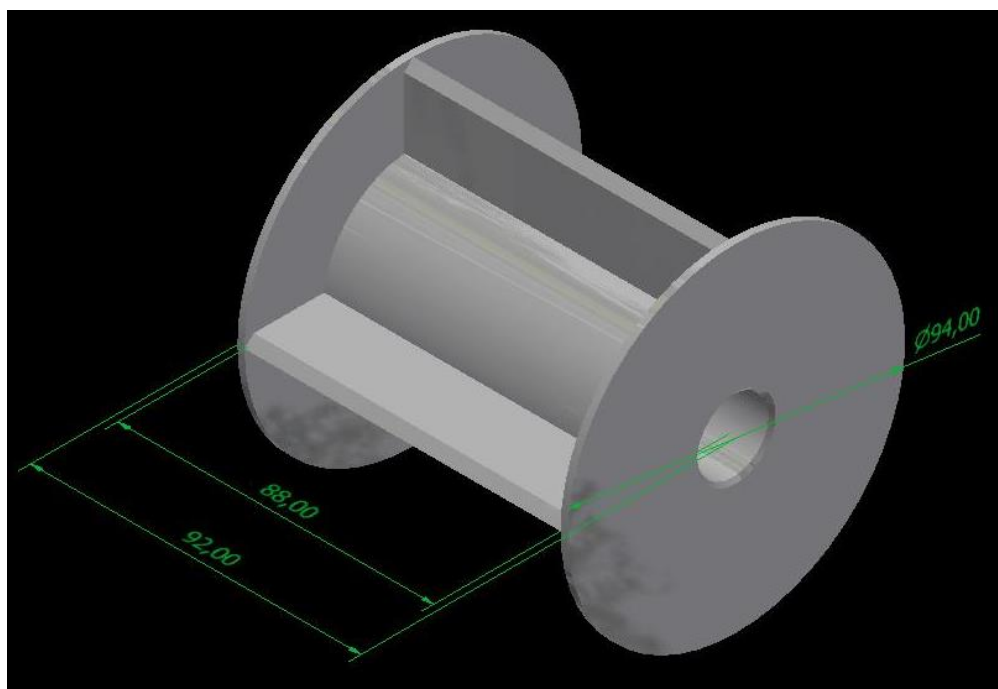
4.5.6 Třetí zkoušení

Po slepení a vytvrzení jsem pokračoval ve zkoušení. Nejdříve jsem zjistil, že se ještě více zhoršila nesouosost rotoru a rotor mnohem více drhne při chodu naprázdno. Hřídel ale byla silnější a už se tolik nekroutila a neprohýbala. Při zkouškách dávkování za postupného sypání podavač fungoval spolehlivě, pokud jsme používali štěpku do 10 mm velikosti částic, u rozběhu za plné násypky stále docházelo k ucpávání podavače. Zjistil jsem, že rotor musí mít nutně vymezenou axiální vůli alespoň pomocí provizorního axiálního ložiska. V závislosti na tom, jak jsem tlačil na vrtačku, se totiž pohyboval v ose a občas se stávalo, že začal plochou čela dřít o stator. Tyto nevýhody mě přesvědčily o tom, že je nutné rotor předělat a vyrábět ho úplně jinak.

4.6 Druhý prototyp rotoru

4.6.1 Návrh

Pro zdokonalení souososti rotoru jsem se rozhodl navlékat (nalisovávat) rotor na dlouhou jednoduchou hřídel. Hřídel musí být pevná, po poradě s doktorem Solnařem jsem se jí rozhodl netisknout z plastu, ale vyrobit ji z pevnějšího materiálu. Uvažoval jsem o použití trubky (buď ocelové, nebo hliníkové) o průměru 20 mm. Potřebná tyčovina ani trubka nebyla dostupná, a tak jsem jako náhradu použil dřevěnou kulatou tyčovinu správného průměru. Byla z tvrdého dřeva, takže měla vhodné mechanické vlastnosti. Když jsem ji v místech uložení do statoru jemně zbrousil, tak měla díky snížené drsnosti povrchu i poměrně dobré kluzné vlastnosti. Rotor navlékaný na tuto hřídel byl dvoudílný a díky středovému otvoru v obou částech se při navlékání na hřídel vystředil. Rotor jsem zmenšil na průměr pouze 94 mm, abych dosáhl větší radiální vůle. Dále jsem řešil axiální vymezení polohy rotoru vůči statoru. Ideálními kluznými axiálními ložisky by byly teflonové podložky navléknuté na hřídel po obou stranách rotoru. Rotor jsem v návrhu mírně zkrátil, aby se podložky spolu s ním do statoru vešly. Bohužel podložky nebyly dostupné, tak jsem použil jako náhradu pryžové O-kroužky o tloušťce 2 mm, které se přilepily z vnější strany na obě čela rotoru. Měly sice horší kluzné vlastnosti než teflonové podložky, ale zase výrazně lepší než tisknutý PLA plast. Na ústavu je to běžně dostupná součást. Lepit se daly stejným lepidlem na tvrdé plasty, jako používám. Zkrátil jsem tedy rotor na 92 mm, čela jsem navrhl pouze 2 mm silná. Průměr náboje na rotoru jsem zvolil 50 mm. Rotor se dal vytisknout jako 2 části, které by se potom slepily. Jedno čelo se vytisklo samostatně a druhou částí byl zbytek rotoru. Rotor se tiskl z plného hutného materiálu, aby byl dostatečně pevný. Nový rotor je na následujícím obrázku.



Obrázek 23 Druhý prototyp rotoru

4.6.2 Změna procesních výpočtů

Změnil jsem velikost rotoru, takže se zmenšil jeho objem, a tím bych musel dosahovat vyšších otáček při stejném průtoku, musel jsem tedy přepočítat procesní výpočty původního rotoru.

$$V = V_v - V_h - 4 * V_l \quad (8)$$

V_v je objem válce ohraničeného rotorem, V_h je objem válce vyplněného hřídelí a nábojem a V_l je objem lopatky. Lopatky jsou tentokrát široké $47-25 = 22$ mm

$$V = \frac{\pi * 94^2}{4} * 88 - \frac{\pi * 50^2}{4} * 88 - 4 * 5 * 88 * 22 = 398\,971 \text{ mm}^3 = 0,000398971 \text{ m}^3 \quad (9)$$

$$\text{Potřebné otáčky tedy budou: } n_s = \frac{V_{I_s}}{V} = \frac{0,18}{0,000398971} = 451 \text{ ot./h} = 7,5 \text{ ot./min} \quad (10)$$

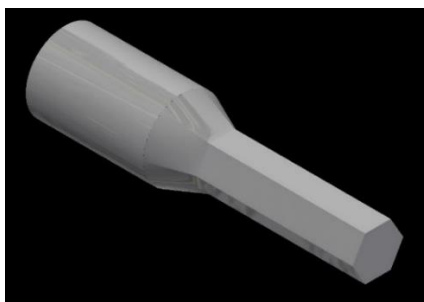
$$n_s = \frac{V_{I_s}}{V} = \frac{0,75}{0,000398971} = 1880 \text{ ot./h} = 31,3 \text{ ot./min} \quad (11)$$

4.6.3 Montáž a první zkoušení

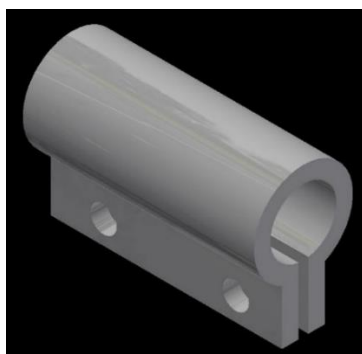
Rotor jsem s vynaložením velké síly navlékl na hřídel a ten díky přesahu seděl na hřídeli nehybně. Podavač jsem zkoušel nejprve naprázdno ručním otáčením hřídele. Jednodílná hřídeli velice pomohla, díky souososti se rotor otáčel mnohem hlaději. Při dokonalém utažení šroubů na víku jsem zjistil, že rotor drhne v místech O-kroužků více, než bych chtěl, ale přesto je to lepší než při dosedání celou plastovou plochou čela. Pokud bych rotor ještě zdokonaloval, udělal bych ho o milimetr kratší, aby byla větší axiální vůle a menší tření. Otáčel jsem s rotorem zatím pouze ručně, vrtačka má sklíčidlo do průměru 13 mm, takže se hřídel o průměru 20 mm do ní nevešla.

4.6.4 Úprava pro odzkoušení s aku vrtačkou

Řešil jsem, jak podavač vyzkoušet s aku vrtačkou. Vymyslel jsem si přechodku mezi válcem 20 mm průměru a šestihranem vepsaným do válce průměru 13 mm, který by se dal snadno upnout do vrtačky a určitě by neprokluzoval. Přechodku jsem se rozhodl spojit s válcem pomocí svěrné trubkové spojky s dvěma šrouby M6x20 a maticemi M6 (jedním šroubem a jednou maticí na každé straně). Přechodka i spojka by se daly vytisknout z plného hutného PLA plastu.

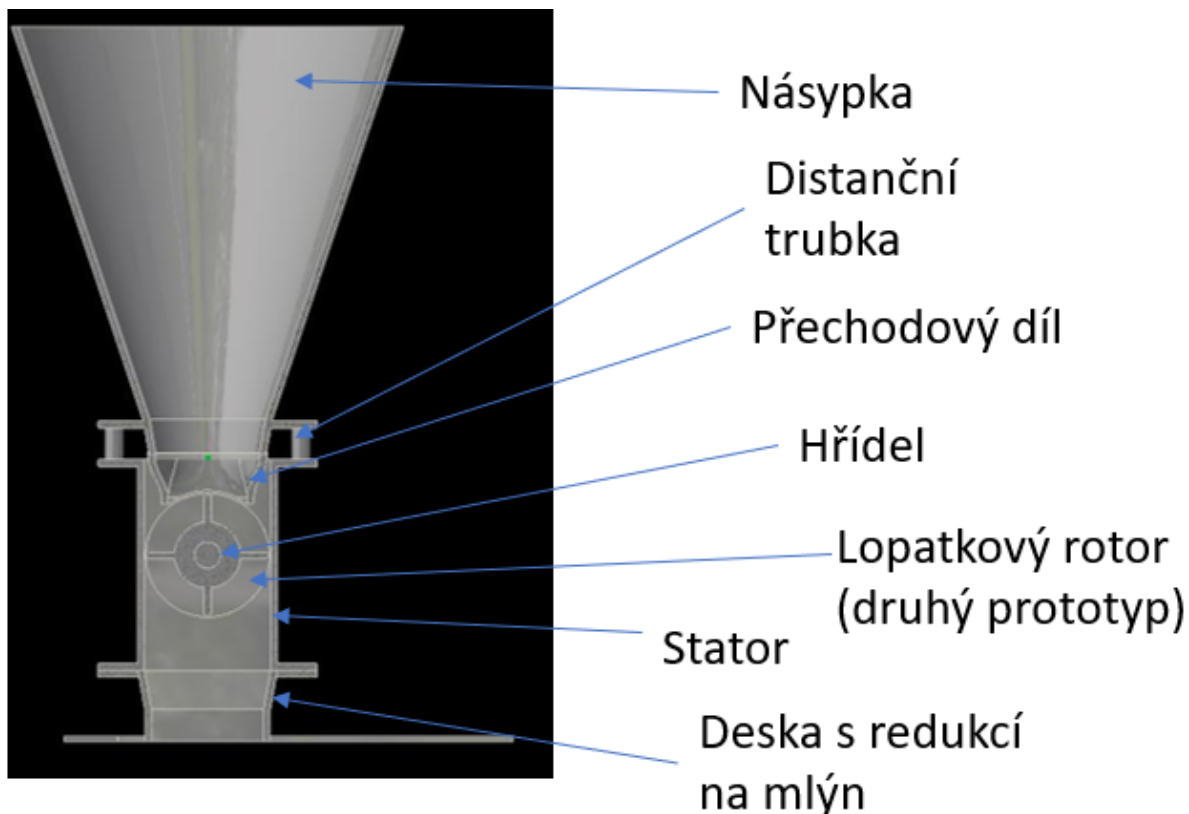


Obrázek 24 Přechodka



Obrázek 25 Spojka

Po vytisknutí a zabroušení jsem mohl spojku i přechodku namontovat na hřídel. Zároveň jsem si i vytiskl 4 distanční plastové trubky o délce 24,5 mm, které vymezovaly vzdálenost mezi násypkou a statorem, aby nemusel používat matice k vymezení vzdálenosti a hlídat, zda se mi nějak neposunou. Měly vnější průměr 18 mm a vnitřní průměr 8 mm. Zdokonalená sestava je na následujícím obrázku.



Obrázek 26 Sestava druhého prototypu

4.6.5 Zkoušení s pohonem vrtačkou

Druhý prototyp už bylo možné odzkoušet s rozběhem při plné násypce. Pokud jsem používal štěpku o velikosti částic do 10 mm, nebyl většinou problém s rozběhem, rotor se vrtačkou roztočil a štěpka prošla, problém začal být při velikosti částic štěpky nad 10 mm. To se podavač často zasekával a stále nefungoval. Zjistil jsem také, že se stator při velkém zatížení rotoru vzpříčenými částicemi tvrdé štěpky kroutí více, než by bylo vhodné a nákrůžky na obou stranách statoru, které sloužily jako provizorní kluzná ložiska, potom ztrácí souosost a hřídel příliš drhla.

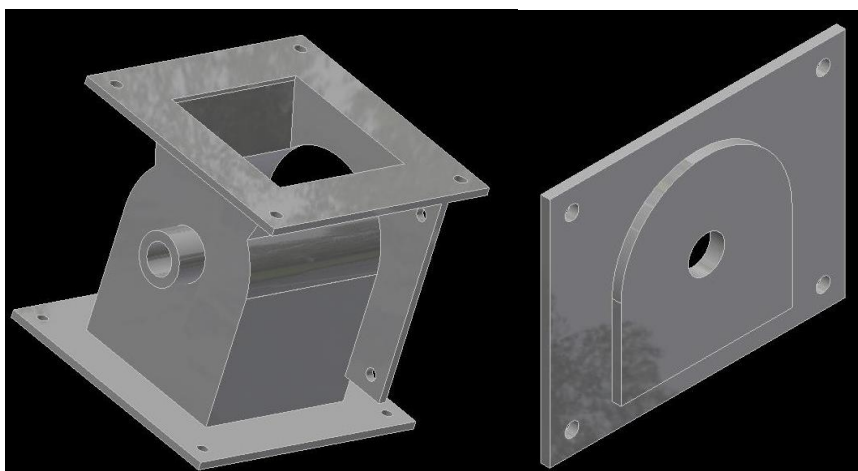
4.6.6 Zkoušení s pohonem laboratorní míchačkou

Ještě jsem zkoušel pro pohon použít místo vrtačky hřídelovou laboratorní míchačku Heidolph Hei-Torque Value. Zjistil jsem, že do sklíčidla se mi neupne průměr 13 mm a musel jsem si vyrobit přechodku, která se do sklíčidla míchačky vejde. Navrhl jsem podobnou přechodku z 20 mm průměru válce na šestihran vepsaný do válce průměru 10 mm. Po vytisknutí z plného hutného materiálu jsem zabrousil hrany a smontoval. Při zkoušení jsem zjistil, že laboratorní míchačky nejsou určeny pro velký krouticí moment a nevyvinou takový krouticí moment, jako silnější aku vrtačka. S míchačkou se podavač neustále zasekával a při rozběhu s plnou násypkou se rotor vůbec neroztočil. Pokus o dosažení rovnoměrných otáček pomocí míchačky tedy skončil neúspěšně. Navíc míchačka má otáčky nastavitelné až od 20/min výše. Pro štěpku by to při mletí bylo příliš rychlé. Zkoušení se tedy nadále mohlo realizovat pouze s pohonem aku vrtačkou a regulací otáček rukou, i když otáčky nemohly být úplně rovnoměrné a nemohl jsem předem nastavit počet otáček za minutu.

4.7 Návrh zdokonaleného prototypu

4.7.1 Druhý prototyp statoru

Pro další pokusy s pohonem aku vrtačkou jsem se rozhodl ještě upravit stator a vytisknout ho z plného hutného materiálu. Stator by se dal zároveň optimalizovat, aby se minimalizovalo riziko vzpříčení částic štěpky a následného ucpání nebo zaseknutí podavače. V části nad osou uložení rotoru jsem se rozhodl tvar statoru co nejvíce přizpůsobit válcovému tvaru rotoru, aby se minimalizoval prostor, kde se mohou vzpříčit částice a ucpat podavač. Stator podavače najednou nebyl vhodný pro použití s původním víkem, v horní části byl pro víko příliš úzký. Staré víko stejně nebylo moc tuhé a kroutilo se a zhoršovalo nesouosost uložení hřídele, tak jsem se rozhodl zkonstruovat víko nové, které bude z plného hutného materiálu a zároveň bude tvarově přizpůsobené zakulacenému tvaru vrchní části statoru. Na následujícím obrázku jsou nový stator a nové víko. Víko bylo opět slepené ze dvou dílů (nákrůžek musel být tisknut zvlášť. Stator musel být také slepený ze dvou dílů (spodní příruba byla tisknutá zvlášť).



Obrázek 27 Nový stator a víko

4.7.2 Výroba statoru

Před tiskem jsem ještě konzultoval možnosti tiskárny s doktorem Solnařem. Dozvěděl jsem se, že tiskárna zvládne tisknout i z ABS plastu, který je mnohem pevnější, jenom se to tiskne složitěji a pomaleji. Rozhodl jsem se tedy, že nejlepší bude vytisknout stator i víko z plného hutného ABS plastu, dosáhnou tím mnohem lepší tuhosti. Vylepšený stator ale stále nezaručoval, že se při velikosti částic nad 10 mm nebude dávkovač při rozběhu s plnou násypkou ucpávat a zasekávat a že nebude problém se vzpříčenými částicemi.

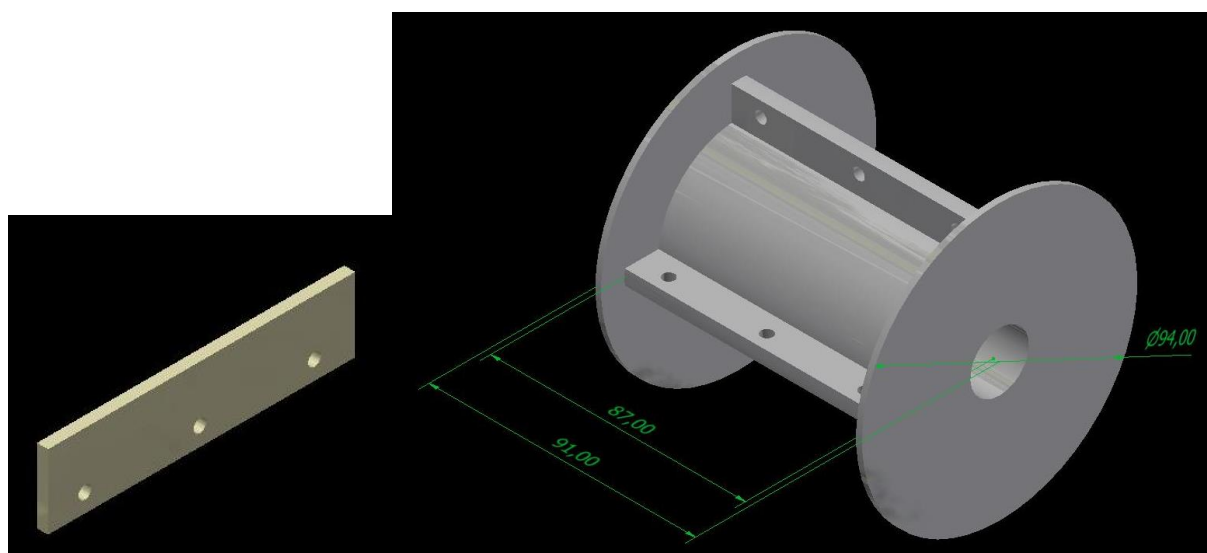
4.7.3 Porovnání PLA a ABS plastu

PLA je mnohem snáze zpracovatelný pro 3D tiskárnu, tisk z něj je výrazně jednodušší a při tuhnutí jsou tisknuté výrobky méně náchylné ke tvorbě trhlin a nežádoucích deformací. V mechanických vlastnostech se nejvíce tyto plasty liší v teplotě měknutí. PLA měkne už při 57 °C, ABS až při 100 °C. Při nedokonalém uložení hřídele a použití kluzných pouzder se materiál poměrně hodně zahřívá a někdy se může dosáhnout i více než 60 °C. Při vyšších teplotách je ABS mnohem pevnější, takže proto jsem pro tisknutí posledních plastových součástí zvolil ABS. Oba materiály se dají lepit lepidlem na tvrdé plasty od výrobce UHU, takže se z nich dají vytvářet větší slepované díly. [28]

4.7.4 Návrh třetího rotoru

Problém se vzpříčením částic by se dal překonat dvěma cestami. První cesta je použít hodně tuhý stator i rotor a velký krouticí moment pohonu a vzpříčené částice velkou silou zlomit. Takto fungují některé průmyslové podavače na štěpku. Ke zlepšení lámání částic se používá HARDOX břit u vstupu. Ten je schopen rezat vzpříčené částice. Tato cesta je energeticky náročnější a vyžaduje také bytelnější

dimenzování podavače. Konstrukce podavače z plastu by tak nevyhověla. Navíc cílem navrhovaného dávkovače je zjednodušit výzkumy měrné rozpojovací energie částic při použití mlýna. Pro toto měření sledujeme vstupní velikost částic před dávkovačem. Pokud by se v dávkovači lámaly nebo deformovaly částice, tak by docházelo k chybám při určování měrné rozpojovací energie. Sledovat velikost částic až za dávkovačem je velmi obtížné, až téměř nemožné. Druhá cesta je použít tuhý stator (aby byla dobře uložená hřídel) a poddajný rotor. Poddajný rotor by se při vzpříčení částice pod částicí ohnul, nechal ji projít, a tak by se podavač nemohl zasekávat a ucpávat. Tato cesta vyžaduje mnohem menší krouticí moment pohonu, je tedy méně náročná na energii a podavač nemusí být tak bytelně dimenzován, takže se ušetří náklady za materiál. Navíc takto by byla použitelná konstrukce z plastu a částice biomasy nebudou tolik zdeformované a nebudou se vůbec lámat. Začal jsem tedy vyvíjet rotor s poddajnými lopatkami, jako materiál poddajných konců lopatek jsem zvolil otěruvzdornou pryž A160 tloušťky 3 mm výrobce Gumex. [29] Nový rotor jsem se rozhodl tisknout stejně jako předešlý ze dvou dílů, které se potom navléknou na hřídel a slepí, na obě čela jsem chtěl opět přilepit O-kroužky jako provizorní axiální ložiska. Rozhodl jsem se použít ABS plast, aby byl rotor dostatečně pevný. Hřídel jsem ponechal stejnou, opět kulatou tyčovinu z tvrdého dřeva, protože se předtím osvědčila. Průměr náboje rotoru jsem zvětšil na 55 mm, tím došlo ke zmenšení komory mezi lopatkami, což je pro mě výhodné, abych nemusel vymýšlet pohon pro tak malé otáčky. Zároveň jsem rotor zkrátil o 1 mm, aby byla větší axiální vůle a O-kroužky tolik nedrhly o stator. Pevné plastové části lopatek jsem navrhl o 8 mm kratší. Na následujícím obrázku je plastová část rotoru, jsou tam naznačeny i díry pro šrouby, které jsem vrtal teprve dodatečně, vedle je pryžový pásek.



Obrázek 28 Pryžový pásek a třetí prototyp rotoru

4.7.5 Výroba rotoru

Po vytisknutí a zabroušení hran jsem rotor slepil a z pryže jsem si nastříhal pružné konce lopatek. Snažil jsem se o rozměr zhruba 87x20 mm. Do pevných plastových lopatek jsem vyvrtal otvory průměru 3,5 mm, tři do každé lopatky. Stejně vzdálené 3 otvory jsem vyvrtal i do pryžových pružných konců lopatek tak, aby se po smontování překrývaly o zhruba 10 mm. Pružné konce lopatek jsem potom přimontoval pomocí šroubů M3x14, podložek velikosti 3 a matic M3. Použil jsem tři šrouby na každou lopatku a na straně pryže jsem dal podložku. Pryž jsem montoval z té strany, kam se má otáčet rotor. Tím, že pryž byla hodně měkká a během vrtání a stříhání měnila v ruce výrazně svůj tvar, nejsou konce lopatek dokonale přesně rovné. Nicméně protože jsou pružné a poněvadž nevyžadují dokonalou prachotěsnost, uznal jsem, že nepřesnost ničemu nevádí. Zabrousil jsem a slepil i nový vytisknutý stator s víkem. Přilepil jsem také O-kroužky na obě čela. Po vytvrdnutí jsem stator přimontoval na desku s redukcí a velikost plnicího otvoru mlýna, dovnitř

jsem uložil hřídel s navlečeným rotorem a poté jsem přimontoval kuželovou násypku i s přechodovým dílem. Na konec hřídele jsem opět přimontoval spojku a přechodku pro upnutí do sklíčidla aku vrtačky.

4.7.6 Změna procesních výpočtů

Pro nový rotor bych měl přepočítat objem a průtok, abych znal potřebné otáčky.

$$V = V_v - V_h - 4 * V_l \quad (12)$$

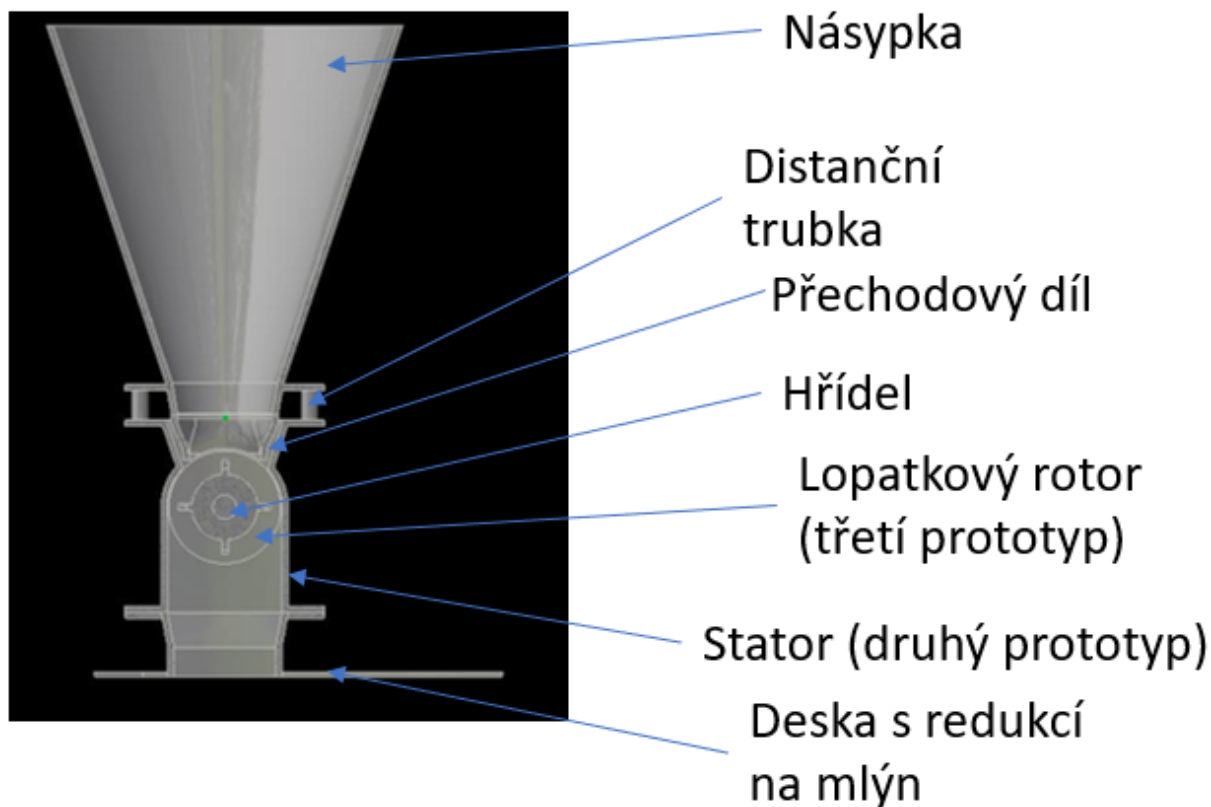
V_v je objem válce ohraničeného rotorem, V_h je objem válce vyplněného hřídelí a nábojem a V_l je objem lopatky. Lopatky jsou stále široké $47-25 = 22$ mm. Změnu tloušťky lopatky mezi pružnou a nepružnou částí zanedbávám, sypaný materiál by se změně tloušťky stejně dokonale přesně nepřizpůsobil.

$$V = \frac{\pi * 94^2}{4} * 87 - \frac{\pi * 55^2}{4} * 87 - 4 * 5 * 87 * 22 = 358\,582 \text{ mm}^3 = 0,000358582 \text{ m}^3 \quad (13)$$

$$\text{Potřebné otáčky tedy budou: } n_s = \frac{V_{I_s}}{V} = \frac{0,18}{0,000358582} = 502 \text{ ot./h} = 8,4 \text{ ot./min} \quad (14)$$

$$n_s = \frac{V_{I_s}}{V} = \frac{0,75}{0,000358582} = 1880 \text{ ot./h} = 34,9 \text{ ot./min} \quad (15)$$

Výsledný dávkovač je na následujícím obrázku, chybí tam vyznačené pryžové pásky na koncích lopatek.



Obrázek 29 Sestava třetího (výsledného) prototypu

4.7.7 Zkoušení výsledného prototypu

Následně jsme s docentem Krátkým zkoušeli funkčnost výsledného prototypu podavače. Zjistilo se, že pryž, která stírá stator zvyšuje poměrně výrazně tření rotoru, ale v nákručích se rotor otáčel hladce díky souososti, stejně jako O-kroužky na čelech hladce klouzaly po statoru. Vlastnosti při chodu naprázdno byly zatím nejlepší. Poté jsme zkoušeli postupné sypání štěrky za chodu podavače poháněného aku vrtačkou. Používala se štěrka až do velikosti částic zhruba 20 mm. Podavač fungoval naprosto bezproblémově,

nepodařilo se nám ho ucpat nebo zaseknout, tok materiálu byl rovnoměrný. Jen s vrtačkou se obtížně dosahuje konstantních otáček a většinou se nepodaří dosáhnout přesně otáčky, které bychom potřebovali pro mletí. Zkoušeli jsme tedy zatím dávkovat bez mletí. Při pokusu se opět projevily nevýhody odlehčeného žebírkovaného PLA plastu, spodní deska s redukčním zúžením se začala kroutit, ale nezhoršovalo to naštěstí funkčnost podavače. Poté jsme zkoušeli rozběh při plné násypce se stejnou štěpkou. Rotor se vždy bezproblémově roztočil, tok materiálu byl rovnoměrný a nedocházelo k zasekávání. Část těchto pokusů byla i zdokumentována natočením videí, které jsou jednou z příloh této bakalářské práce. Podařilo se tedy vytvořit plně funkční spolehlivý prototyp dávkovače na biomasu do našeho nožového mlýna. V případě, že dokážeme přesně regulovat otáčky rotoru, tak ho můžeme používat při mletí. Podavač splňuje svůj hlavní účel, zrovnoměrní tok materiálu do mlýna, a tím výrazně usnadní měření příkonu mlýna při mletí biomasy. Pro krátkodobá měření bude tento dávkovač dobře použitelný. Pokud by se měl používat dlouhodoběji, tak se projeví nevýhody celoplastové konstrukce a kluzného ničím nemazaného uložení hřídele. Některé části se mohou příliš kroutit (např. spodní deska s redukcí nebo stator v místě nákrůžků. Nákrůžky sloužící jako kluzná pouzdra se budou příliš zahřívat a vydírat. Použití O-kroužků jako axiálních ložisek také není ideální, bude rychle docházet k jejich opotřebení. Pokud by se použila osazená ocelová hřídel, bylo by její ukládání pomocí ložisek výrazně snadnější. V zadání je návrh dávkovače s funkčními částmi z nerezové oceli. Pokusil jsem se tedy zlepšit životnost při dlouhodobém provozu použitím nerezových součástí. Ještě před samotným návrhem shrnu svoje poznatky o konstruování turniketového podavače.

4.7.8 Shrnutí zásad konstruování turniketového podavače

Turniketový podavač vyžaduje pro fungování poměrně malé otáčky pohonu a zároveň poměrně velký krouticí moment, tomu je třeba uzpůsobit pohon, ne všechny pomaluběžné pohony mají dostatečný krouticí moment.

Lopatkový rotor musí mít dostatečně velké komory, aby se do nich mohl daný materiál sypat. Konstrukce rotoru pro práškové materiály vyžaduje menší komory, aby bylo dávkování rovnoměrnější, zatímco pro hrubší materiály musí být komory větší. Uložení rotoru musí být dostatečně souosé s hřídelí, aby nemohl drhnout. Jestliže používáme pevné tvrdé konce lopatek, musí mít rotor dostatečnou vůli ve statoru. Vůle závisí na kvalitě výroby statoru, hřídele i rotoru, při kvalitním souosém provedení stačí menší než při nepřesné výrobě. Při použití pružných měkkých konců lopatek nemusíme mít radiální vůli. Rotor by měl být nehybně axiálně uložený, s malou axiální vůlí. Rotor by měl mít dvě pevná čela. Pokud se dávkuje velké a tvrdé částice materiálu, dochází snadno ke vzpříčování částic. Pokud se nemají částice příliš deformovat nebo lámat, je výhodné použití pružných měkkých konců lopatek, které se ohnou přes vzpříčenou částici a rotor se nezasekne a neucpe. Nevadí-li deformace a lámání částic, tak se dají použít tvrdé konce lopatek a mezi a u vstupu do statoru umístit ocelový břit pro přeříznutí nebo zlomení vzpříčených částic, používají se HARDOX oceli.

Nad turniketový podavač musí být možné namontovat násypku, pro sypké materiály je nejlepší kuželová násypka, ale dá se použít i jehlanová. Násypka by měla být dostatečně objemná pro dávkování daného materiálu.

Stator by měl být dostatečně tuhý, aby nedocházelo k přílišnému kroucení a ohýbání při provozu podavače, a tím se nezhoršovalo uložení hřídele. Přechod z násypky do statoru musí být co nejhladší. Při dávkování jemných prášků nebo snadno ohebných měkkých materiálů nehrozí ucpání vzpříčením částic, takže není nevyhnutné sypat materiál jen na prostřední část rotoru. Při dávkování větších a tvrdších částic materiálu je nutné, aby přechod z násypky do statoru dovoloval materiálu padat pouze doprostřed rotoru, k tomu účelu je třeba vymyslet hladký přechod, aby se materiál nedostával přímým sypaním z násypky k okrajům rotoru, kde by se snadno vzpříčil. V části nad rotorem by měl stator co nejlépe kopírovat válcový tvar rotoru a ve vrchní části by měl být uprostřed vstup pro materiál z násypky. Vstup by měl mít nejlépe čtvercový nebo obdélníkový průřez. Část pod osou rotoru není náročná na geometrii.

Hřídel by měla být na obou koncích i v místě uložení rotoru souosá. Pokud by se podavač používal pro různé druhy materiály a měnily se k tomu účelu rotory pro konkrétní materiály, tak je třeba uložit rotor s radiální vůlí, pro přenos krouticího momentu se mi potom jeví jako vhodný tvarový spoj.

4.8 Návrh dávkovače s funkčními částmi z nerezové oceli

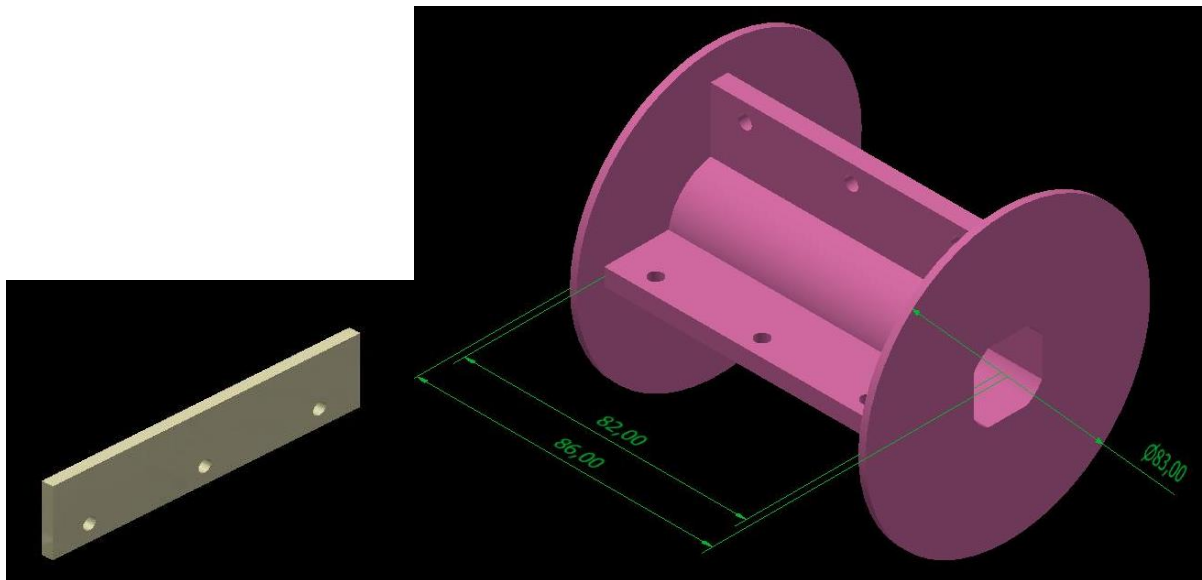
4.8.1 Úvod k návrhu

Při tomto návrhu jsem vycházel z toho, že vstupní otvor desky mlýna je obdélník 85x88 mm. Dávkovač jsem navrhoval už přímo na tuto velikost, protože jsem věděl, že použití plastové spodní desky s redukcí je nevýhodné a mnohem výhodnější by bylo tuto desku vyrobit ocelovou, výroba by byla poměrně snadná a tuhost by byla mnohem vyšší. Původní dávkovač byl přizpůsobený šířce zamýšleného pásového dopravníku a teprve potom jsem řešil redukcí na velikost vstupního otvoru desky mlýna. Tento dávkovač už bylo snadnější zkonstruovat přímo na vstupní otvor mlýna a na tuto desku přimontovávat stator podavače. Stator podavače jsem navrhoval s vnitřním obdélníkovým průřezem 85x88 mm, přičemž rozměr 88 mm byl v ose rotoru a rozměr 85 mm kolmo na ni. Tuto orientaci jsem zvolil, aby se na vrchní část mlýna snadno vešel motor s převodovkou, kterým se bude výsledný dávkovač pohánět. Stator by měl být tvarově podobný poslednímu plastovému statoru, tedy na od osy rotoru výše zaoblený podle válcového tvaru rotoru, ve vrchní části jsem navrhl přechodovou plochu z kruhového průřezu a obdélníkový odpovídající velikosti komory mezi lopatkami rotoru, tuto přechodovou plochu jsem tedy nenavrhol jako nalepovací na kuželovou násypku, ale jako nalepovací součást statoru. Stator je tvarově složitá součást, v sériové výrobě by se dal vyrábět jako odlitek z litiny, u některých průmyslových turniketových podavačů tomu tak je. Výroba pouze jednoho kusu ocelového nebo litinového statoru je velmi náročná. Rozhodl jsem se tedy použít opět technologii 3D tisku z ABS plastu. Části pro uložení hřídele bych však navrhl ocelové, aby se dosáhlo větší pevnosti a tuhosti. Ocelová část statoru by měla být připevněná k desce na mlýnu i k plastové části statoru. V ocelové části by byla uložená kuličková valivá ložiska. Použití valivých ložisek výrazně usnadní otáčení hřídele a nebude hrozit vydírání plastových kluzných pouzder a ani přehřívání plastu. Valivá ložiska se budou muset chránit před prachem pomocí hřídelových těsnících kroužků s prachovkou. Nyní bych popsal jednotlivé části detailněji.

4.8.2 Rotor

Rotor bych ponechal plastový, protože jeho poddajnost vůbec nevadí a na koncích lopatek by byly přišroubované pásky z ořezovací pryže. Tiskl bych z osvědčeného ABS plastu. Abych měl stejnou radiální vůli okolo rotoru ve statoru, použil bych průměr rotoru 83 mm, plastové části lopatek by opět končily 8 mm od vnějšího průměru rotoru, lopatky by byly opět 4 a průměr náboje bych volil 30 mm, abych zvětšil komoru a dosahoval podobných průtoků jako předtím. Rotor by měl opět 2 čela o tloušťce 2 mm, vnější délku rotoru bych volil 86 mm a vnitřní délka mezi čely by byla 82 mm. Na konce lopatek by se opět třemi šrouby M3x14 přišroubovaly pryžové pásky s ořezovací pryží Gumex A160 tloušťky 3 mm, pásky by měly rozměr 20x82 mm. Pásky by se provrtaly a přišroubovaly podobně jako předtím, aby se překrývaly s plastovými lopatkami rotoru zhruba o 10 mm. Z druhé strany by byla matice M3 a na straně pryže by byla podložka velikosti 3. Pryžové pásky by se montovaly z té strany, kam by se měl otáčet rotor. Rotor by byl tisknutý opět ze 2 částí, jedno čelo by muselo být tisknuto samostatně. Tyto 2 části rotoru by se vystředily po navléknutí na rotor a společně slepily lepidlem na tvrdé plasty výrobce UHU. Uložení na hřídeli bych dělal pomocí tvarového spoje, aby se přenášel krouticí moment. Tvarový spoj by byl na průřezu čtverce o straně 20 mm se zaoblenými hranami s poloměrem 11,5 mm a středem zaoblení ve středu čtverce. Uložení by bylo s vůlí, aby se daly vyměňovat různé rotory optimalizovaného tvaru pro daný materiál.

Plastová část rotoru je na následující obrázku, jsou tam naznačeny i díry, které by se vrtaly teprve po vytisknutí. Díry by se vrtaly vrtákem průměru 3,5, tomu by i přibližně odpovídal jejich průměr, vedle je pryžový pásek.



Obrázek 30 Pryžový pásek a ideální rotor

4.8.3 Změna procesních výpočtů

Překontroloval jsem ještě průtoky novým rotorem, provedl jsem to podobným způsobem jako předtím.

$$V = V_v - V_h - 4 * V_l \quad (16)$$

V_v je objem válce ohraničeného rotorem, V_h je objem válce vyplněného hřídelí a nábojem a V_l je objem lopatky. Lopatky jsou široké $41,5 - 15 = 26,5$ mm. Změnu tloušťky lopatky mezi pružnou a nepružnou částí zanedbávám, sypaný materiál by se změně tloušťky stejně dokonale přesně nepřizpůsobil.

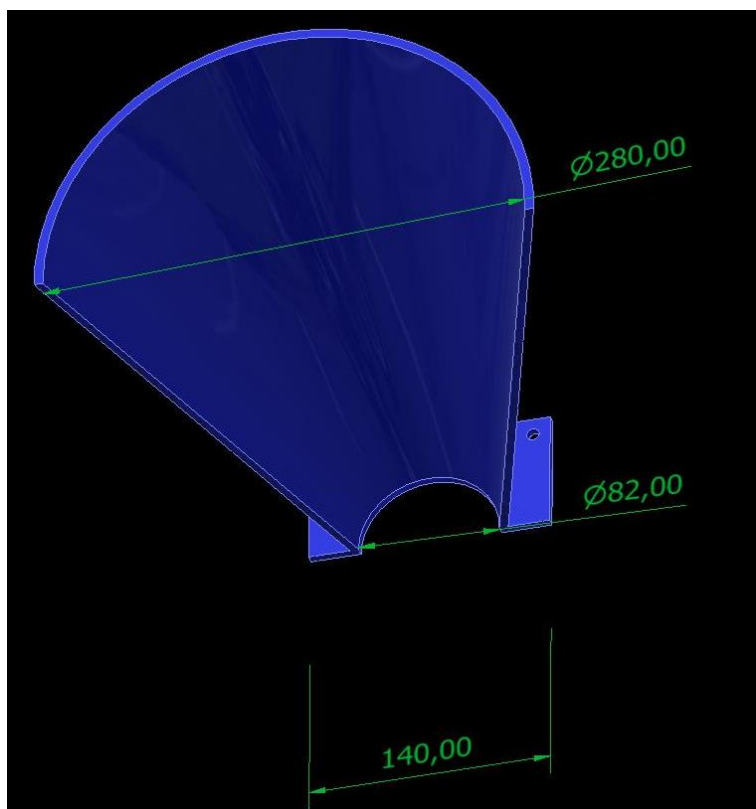
$$V = \frac{\pi * 83^2}{4} * 82 - \frac{\pi * 30^2}{4} * 82 - 4 * 5 * 82 * 26,5 = 342\,052 \text{ mm}^3 = 0,000342052 \text{ m}^3 \quad (17)$$

$$\text{Potřebné otáčky tedy budou: } n_s = \frac{V_{I_s}}{V} = \frac{0,18}{0,000342052} = 526 \text{ ot./h} = 8,8 \text{ ot./min} \quad (18)$$

$$n_s = \frac{V_{I_s}}{V} = \frac{0,75}{0,000342052} = 2192 \text{ ot./h} = 36,5 \text{ ot./min} \quad (19)$$

4.8.4 Násypka

Násypku bych navrhl z plného ABS plastu, zachoval bych stejný kuželový tvar, nedělal bych spodní nákrůžek a spodní přírubu bych zmenšil na čtvercový průřez o hraně 140 mm. Výstupní otvor násypky bych volil průměru 82 mm, aby velikostí odpovídal vnitřní vzdálenosti čel lopatkového rotoru, která by měla být také 82 mm. Násypka by se opět přišroubovala ke statoru čtyřmi šrouby se šestihrannou hlavou M6x20 a čtyřmi šestihrannými maticemi M6. Pro šrouby bych měl mít díry průměru 7 mm. Tloušťku stěn bych volil 5 mm. Tisknout by se musela na 4 části. Spodní (uzší) část kužele by se dala vytisknout jako jeden díl i s přírubou. Vrchní část se nevejde na desku tiskárny, musela by se tisknout rozdělená na čtvrtiny. Pro slepení by se musely na koncích lepených částí dílů vytvořit zámky.

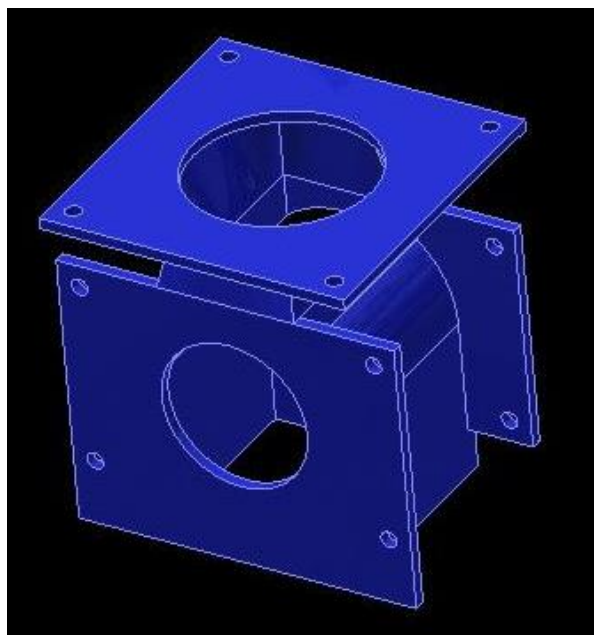


Obrázek 31 Ideální násypka

4.8.5 Stator

4.8.5.1 Plastová část

Nejprve bych popsal plastovou část statoru tisknutou z plného ABS plastu. Plastová část statoru by tedy měla mít vnitřní obdélníkový průřez 85x88 mm, část nad osou rotoru by měla být zakulacená podle válcového tvaru lopatkového rotoru tak, aby nad rotorem zbývala vůle 1 mm pro snadné otáčení. Vzhledem k velikosti lopatek by měl být průřez těsně nad lopatkovým rotorem 82x53 mm, tak aby opět materiál přicházel pouze na čtvrtinu lopatkového rotoru. Ve vrchní části statoru by tedy musela být hladká přechodová plocha mezi kruhem 82 mm průměru a obdélníkem 82x53 mm. Těsně nad rotorem by se musel rozměr ve směru osy rotoru rozšířit z 82 mm na 88 mm, aby se rotor dovnitř statoru vešel a mohl se otáčet s vůlí 1 mm na každé straně od čela. U vstupu statoru by musela být příruba čtvercového průřezu o hraně 140 mm s dírami pro šrouby M6x20, díry by měly průměr 7 mm. Stator by musel mít na straně, kde by bylo jedno z čel rotoru, otvor dostatečně velký na to, aby se dal rotor namontovat dovnitř, tento otvor bych volil kruhový o průměru 85 mm. Na straně druhého čela by měl být otvor, kterým projde ložiskový domek, ale nemusí projít rotor, stačí tedy kruhový průměr 67 mm. Z obou stran statoru by se přišroubovala víčka z nerezové oceli, která by zároveň sloužila jako domky pro radiální kuličková ložiska i hřídelové těsnící kroužky sloužící k ochraně ložisek před prachem. Tato ocelová víčka by musela být přišroubována přes příruby k tělu statoru. Pro spojení bych volil šrouby M6, pro které by se vrtaly otvory průměru 7,5 mm. Příruby na straně statoru by byly přímou součástí statoru tisknutou spolu se spodní částí statoru. Navrhl bych velikost 122x155 mm. V jednom rohu statoru by se musely spodní 2 cm vytisknuté od desky odříznout (viz obrázek), aby šel zavírat přední kryt nožového mlýna který vrchní částí mírně přesahuje přes horní desku mlýna, přesahující plech krytu by začínal ve výšce zhruba 6 nad deskou, proto spodní deska by při zavírání nevadila. Stator by se musel sletit ze dvou částí, spodní a vrchní, vrchní by měla mít zmíněnou přírubu čtvercového průřezu o hraně 140 mm. Na následujícím obrázku je stator.

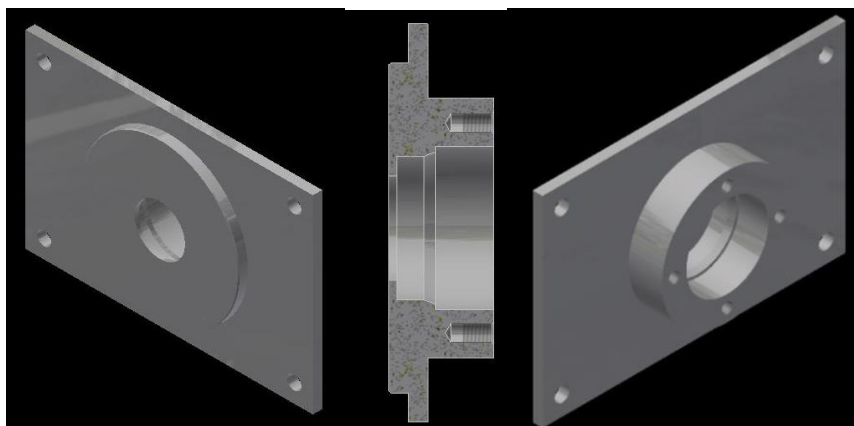


Obrázek 32 Ideální stator

Další části statoru už budou s nerezové oceli

4.8.5.2 Víko neprůchozí

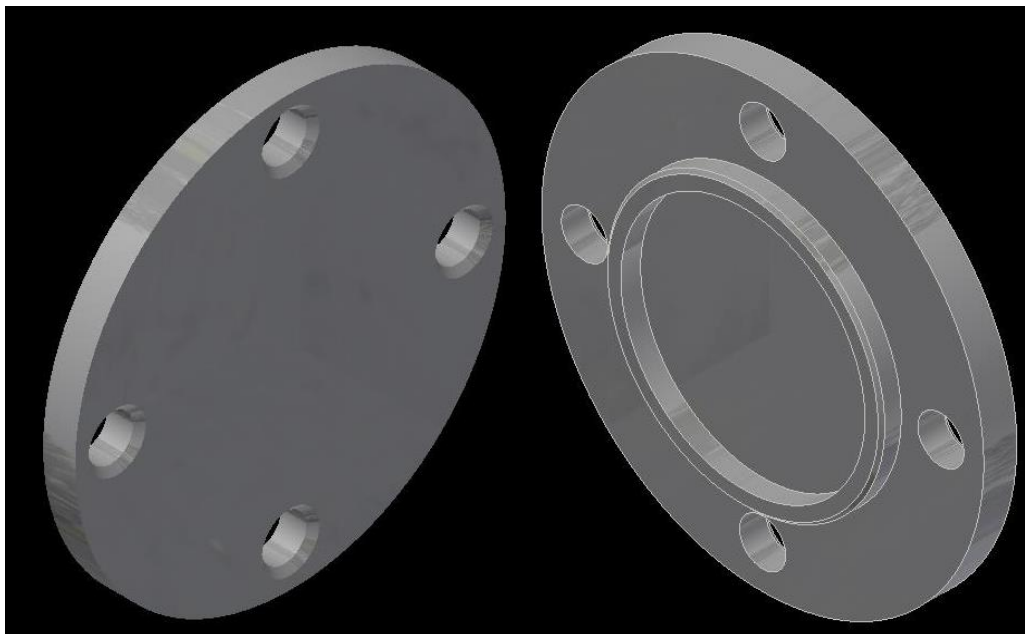
Neprůchozí víko bude na straně, kde hřídel nevystupuje ven z dávkovače. Mělo by sloužit jako domek pro uložení ložiska a hřídelového těsnícího kroužku a zároveň jako kryt otvoru pro montáž rotoru. Uvnitř by bylo uložené jednořadé kuličkové ložisko 6004 výrobce SKF a hřídelový těsnící kroužek 26x37x7 výrobce Rubena. [30] [31] Z vnitřní strany by mělo díru o průměru 27 mm, aby prošla hřídel. Mezi hřídelovým těsnícím kroužkem a plným čelem víčka by byl prostor pro mazivo, které by bylo chráněné před prachem. Mazivem by bylo promazávané ložisko. Víko by mělo být vysoustružené z tyčoviny kruhového průřezu a byla na něj přivařená 5 mm silná příruba vyrobená z plechu, která by byla rozměrově stejná jako plastová příruba statoru. Pro uzavření z vnější strany by se na toto víko přišroubovávalo ještě malé neprůchozí víčko, jednoduché víko by spolu s ložiskem a hřídelovým těsnícím kroužkem nebylo smontovatelné. Pro připevnění víčka by byly na vnější straně víka čtyři díry se závitem M6. Na následujícím obrázku je vidět neprůchozí víko v pohledu a v řezu.



Obrázek 33 Víko neprůchozí zleva, v řezu a zprava

4.8.5.3 Víčko neprůchozí

Víčko neprůchozí by uzavíralo neprůchozí víko na průměru 42 mm na vnější straně. Bylo by připevněné pomocí 4 šroubů M6x12 a pro tyto šrouby by mělo čtyři díry průměru 7 mm. Vystředěné by bylo pomocí 3 mm dlouhého osazení. Sloužilo by také k axiálnímu pojištění vnějšího kroužku ložiska. Víčko by se vysoustružilo z tyčoviny kruhového průřezu. Na následujícím obrázku je víčko.



Obrázek 34 Víčko neprůchozí

4.8.5.4 Víko průchozí

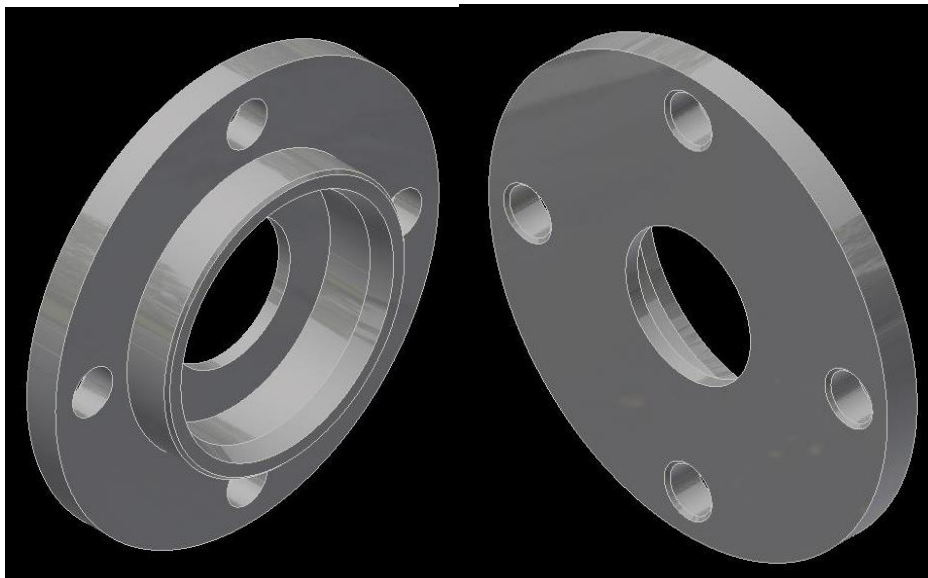
Průchozím víkem by procházela hřídel ven z dávkovače, průměr hřídele je 20 mm. Sloužilo by jako domek pro uložení ložiska a hřídelového těsnícího kroužku. Vnější průměr bych zvolil 67 mm. Bylo by v něm uloženo ložisko 6004 výrobce SKF a hřídelový těsnící kroužek, 26x37x7 výrobce Rubena. [30] [31] Z vnitřní strany by mělo otvor průměru 27 mm, aby prošla hřídel i s distančním kroužkem. Z vnější strany by bylo uzavřené průchozím víčkem, ve kterém by byl druhý hřídelový těsnící kroužek. Kvůli smontovatelnosti s oběma těsnícími kroužky a ložiskem nelze udělat jednodílné. Na vnější straně by mělo čtyři díry se závitem M6 pro připevnění víčka pomocí šroubů M6x12. V prostoru mezi těsnícími kroužky by mazivo, které by bylo chráněné před prachem. Mazivem by bylo promazané ložisko. Víko by se mělo vysoustružit z tyčoviny kruhového průřezu a k tomu by se vyrobila obdélníková příruba z plechu a následně přivařila. Víčko najdeme na následujícím obrázku.



Obrázek 35 Víčko průchozí zprava, zleva a v řezu

4.8.5.5 Víčko průchozí

Víčko průchozí by uzavíralo průchozí víko na vnější straně na průměru 42 mm. Pro připevnění pomocí šroubů by mělo čtyři otvory o průměru 7 mm. Vystředěné by bylo pomocí 3 mm dlouhého osazení. Sloužilo by také jako axiální pojištění vnějšího kroužku ložiska. Bylo by vysoustružené z tyčoviny kruhového průřezu. Byl by v něm uložený hřídelový těsnící kroužek 20x35x7 výrobce Rubena. [31] Víčko jsem zobrazil na následujícím obrázku.

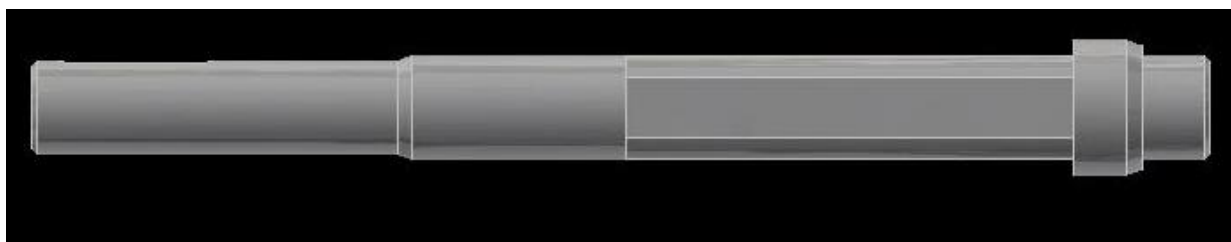


Obrázek 36 Víčko průchozí

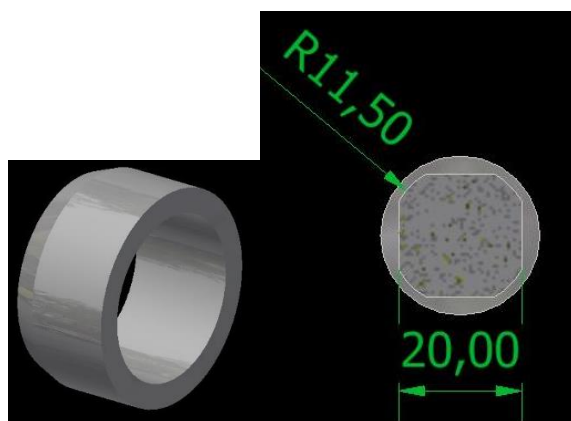
4.8.6 Hřídel

Hřídel bych navrhl vyrobenou z nerezové oceli, průměr pod rotorem by mohl být opět 20 mm. Průměr pod ložisky bych zvolil opět 20 mm. Na hřídeli by bylo osazení sloužící jako zarážka při navlékání rotoru, osazení by mělo průměr 26 mm a na osazení by byl hřídelový těsnící kroužek. Z druhé strany rotoru by byl

na hřídeli navléknutý distanční kroužek, který by byl opřený o ložisko a na distančním kroužku by byl navléknutý hřídelový těsnící kroužek. Na následujícím obrázku je hřídel a distanční kroužek. Pod rotorem by byl průřez hřídele čtvercový o straně 20 mm se zaoblenými hranami o poloměru 11,5 mm a středem zaoblení ve středu čtverce. Tím bych vytvořil tvarový spoj pro přenos krouticího momentu. Uložení rotoru na statoru by bylo s vůlí, aby se daly vytvářet různé rotory optimalizované na danou strukturu materiálu a snadno vyměňovat podle zrovna mletého materiálu. Hřídel by měla nejvyšším průměru 18 mm určeném pro zasunutí do převodovky normalizovanou drážku pro pero ČSN 02 2562 6x6x30. Při návrhu uložení hřídele do převodovky jsem vycházel z doporučení výrobce převodovek, jak je detailněji rozebráno v kapitole návrh pohonu. Na obrázku je hřídel, hřídel v řezu a distanční kroužek.



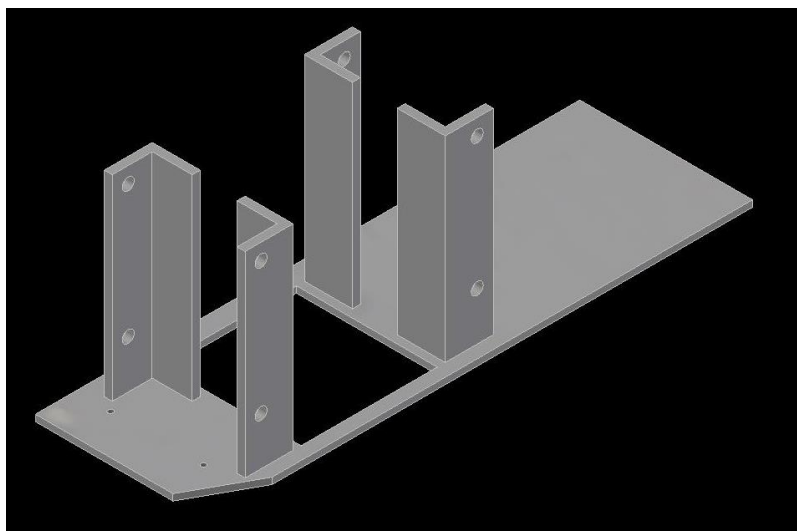
Obrázek 37 Hřídel nerezová



Obrázek 38 Distanční kroužek (vlevo) a hřídel v řezu (vpravo)

4.8.7 Deska na mlýn

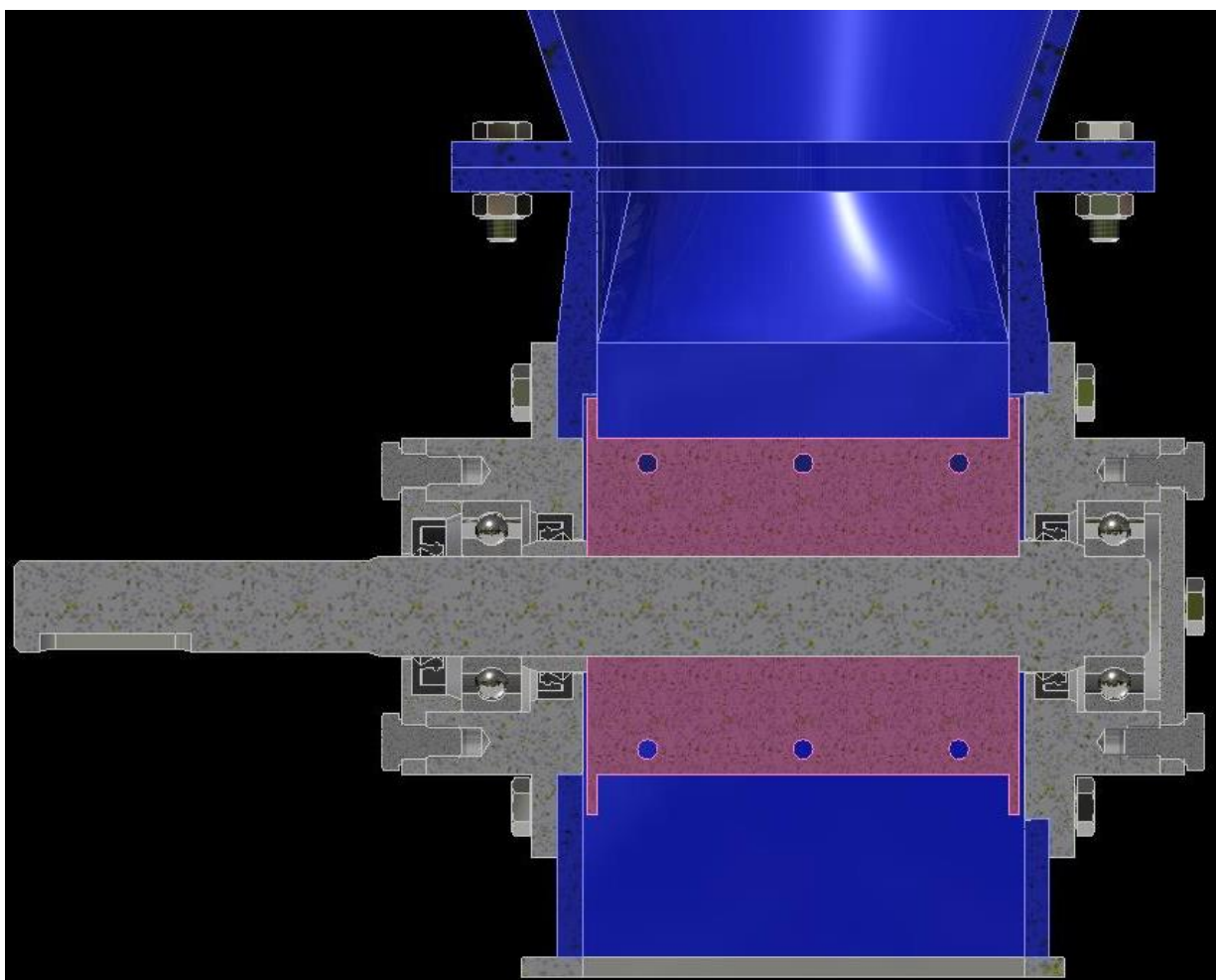
Desku na mlýn bych navrhoval vyrobenou ze 4 mm silného plechu, měla by čtvercový otvor 85x88 mm odpovídající vstupnímu otvoru mlýna, pro připevnění k mlýnu by sloužily dvě díry pro šrouby M4, měly by průměr 4,8 mm. Při přiklopení předního plechového krytu mlýna by se přesahem tohoto krytu zpevnilo spojení desky s mlýnem. Desku bych tím měl vyřešenou. Problém ale byl s připojením statoru k desce mlýna. Navíc plastové části statoru by mohly být zbytečně hodně namáhané, pokud by těžší ocelové části byly zavěšeny pouze na nich. Navíc víčka ocelová přišroubovaná na plastu nebudou v prostoru tak nehybná, jako by byla na ocelovém rámu, a tím by se mohla zhoršovat nesoucosť víček a uložení hřídele by nebylo tak kvalitní. Rozhodl jsem se tedy stator vyztužit čtyřmi svislými výztuhami z 5 mm silného plechu. Plech by byl ohnutý do L o velikosti ramena 30 mm. Tyto čtyři výztuhy by byly podél bočních přírub statoru a byly by sešroubované se státorem a víčkem jedním šroubem M6x25 a maticí M6. Druhé rameno každého L výztuhy by se opíralo o bok statoru. Výztuhy by byly vysoké jako boční příruby a byly by v nich otvory pro šrouby o průměru 7 mm ve stejném umístění jako na přírubách. Tyto výztuhy bych se rozhodl přivařit k plechové desce koutovým svarem o velikosti 3 mm. Svar by byl na 2 ramenech L, která jsou na opačné straně L, než je roh, který se namontuje do rohu mezi přírubou a vlastním tělem statoru. Desku s přivařenými výztuhami mám na následujícím obrázku.



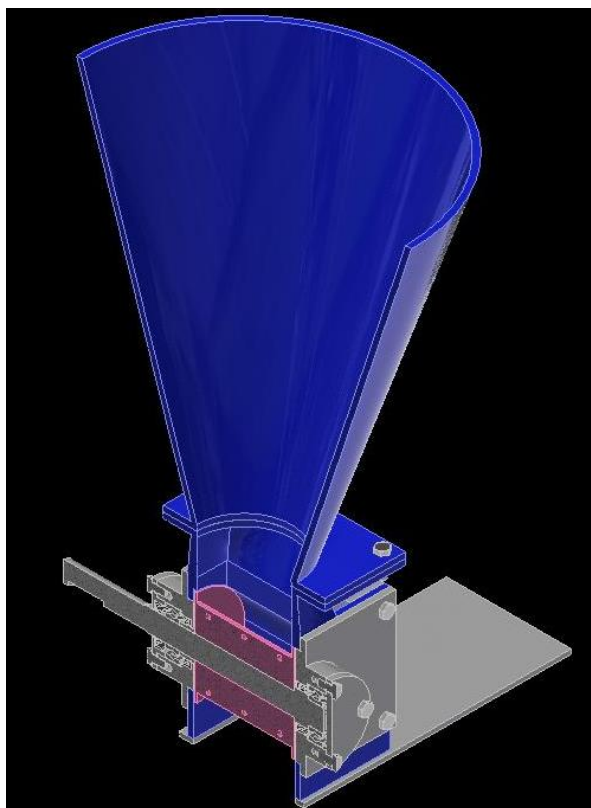
Obrázek 39 Deska na mlýn s výztuhami - svařenec

4.8.8 Sestava

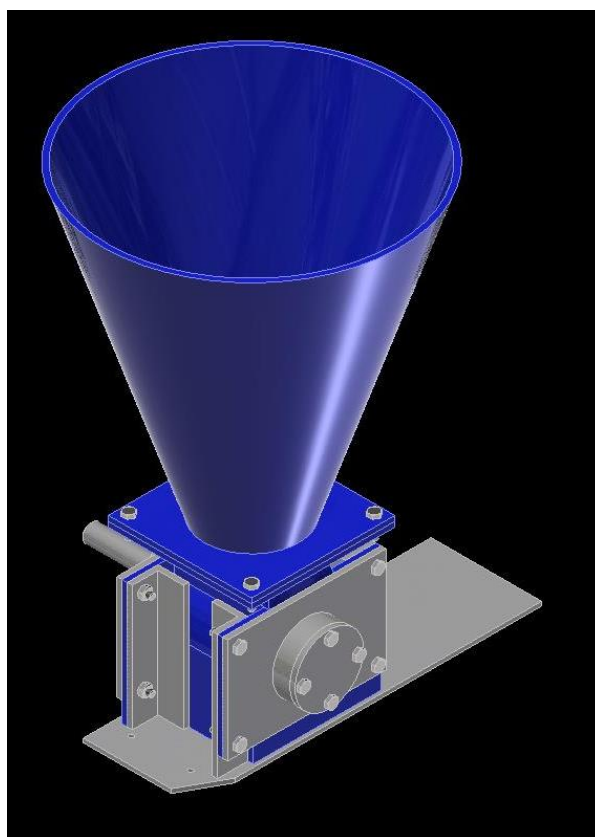
Sestava by se smontovala, prostor ložisek by se před utěsněním hřídelovými těsnícími kroužky promazal mazivem. Po smontování by sestava vypadala takto. Opět nemám znázorněné gumové pásky na konci lopatek. K sestavě jsem i vytvořil výkres, který je v příloze této práce.



Obrázek 40 Sestava ideální v řezu



Obrázek 41 Sestava ideální v řezu šikmý pohled



Obrázek 42 Sestava ideální v pohledu

4.9 Návrh pohonu

4.9.1. Možné varianty výběru motoru a jeho regulace

Dávkočep by měl být poháněn elektromotorem s převodovkou, která by byla přes pružnou spojku připojena ke hřídeli dávkočepu. Výsledné otáčky pohonu by se měly pohybovat od 8 do 35 ot./min, pokud bych používal celoplastovou verzi dávkočepu, kterou jsem vyrobil. Pro rotor použitý při návrhu s funkčními nerezovými částmi bych potřeboval maximální otáčky mírně vyšší (36,5/min). Převodovka za motorem by měla mít poměrně velký převodový poměr. Motor bych mohl použít buď stejnosměrný, nebo střídavý. Abych mohl plynule měnit otáčky pohonu, tak bych měl být schopen regulovat napájecí napětí elektromotoru. U stejnosměrných motorů se otáčky snadno regulují změnou velikosti napájecího napětí. Velikost napájecího napětí bych mohl regulovat potenciometrem, případně by se dalo využít pulzní řízení. Toto řešení je ale nevýhodné nízkou účinností, přes potenciometr bude mít motor poměrně vysoký příkon v poměru k mechanickému výkonu motoru. Druhou možností je použít asynchronní třífázový elektromotor napájený střídavým napětím. Tyto motory jsou levnější, konstrukčně jednodušší a mají vyšší účinnost. Jejich otáčky se dají regulovat změnou frekvence napájecího napětí frekvenčním měničem. Frekvenční měnič je sice dražší než potenciometr, ale při regulaci na malé otáčky motoru dosahuje podstatně vyšších účinností než potenciometr při dělení napětí. Při dělení napětí potenciometrem dochází při regulaci na nízké otáčky motoru k poměrně velkým ztrátám krouticího momentu. Pulzní řízení nám umožňuje menší ztráty než potenciometr, ale stejnosměrný motor nemá takovou účinnost jako asynchronní. V aplikaci pro dávkočep potřebujeme velký krouticí moment i při snižování otáček, takže zde je mnohem výhodnější použití frekvenčního měniče spolu s asynchronním motorem.

4.9.2 Konkrétní volba a potřebné výpočty

Dal bych přednost použití třífázového asynchronního elektromotoru s frekvenčním měničem, elektromotor by se dal zapojit do trojúhelníka na 3x230 V. Frekvenční měniče se běžně vyrábí s jednofázovým napájením 230 V a mohou vytvořit výstup 3x230 V. Jsou obvykle levnější než klasické třífázové měniče se vstupem 3x400 V a výstupem 3x400 V. Aby nemusela být převodovka s tak velkým převodovým poměrem, volil bych čtyřpólový motor. Malé čtyřpólové asynchronní elektromotory dosahují otáček okolo 1400/min. To znamená, že převodovka by musela mít poměr.

$$i = \frac{1400}{35} = 40 \quad (20)$$

Tohoto poměru se u běžných převodovek dosáhne nejnadhěji použitím šnekové převodovky za motorem. Převodovky s poměrem 40 se běžně vyrábí, pokud bych chtěl otáčky zvýšit z 35 na 36,5, tak bych toho mohl docílit mírným zvýšením frekvence napájecího napětí, což by běžné frekvenční měniče měly zvládnout bez zbytečně velkých ztrát krouticího momentu na motoru. Posledním důležitým parametrem pohonu je krouticí moment. Mohu se pokusit odhadnout, jaký třecí moment se překonává při klouzání vrstev štěpky po sobě při otáčení rotoru. Pro odhad třecího momentu mi poslouží měřené hodnoty napětí při klouzání vrstev štěpky po sobě v literatuře se setkáme s grafy tohoto napětí (shear stress) v závislosti na vlhkosti štěpky. Napětí τ nabývá hodnoty maximálně 60 kPa. Pokud mám počítat plochu v mm, převedu na 0,06 MPa. Třecí moment vždy vytváří plocha částic štěpky odpovídající čtvrtině plochy pláště válce vymezeného rotorem. [32]

$$\text{Tato plocha je } S = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{4} = \frac{3,14 \cdot 94 \cdot 87}{4} = 6420 \text{ mm}^2 \quad (21)$$

D je průměr válce a l je délka vnitřní části válce mezi čely.

$$\text{Výsledná třecí síla je } F = S \cdot \tau = 6420 \cdot 0,06 = 385,2 \text{ N} \quad (22)$$

T je napětí vyvolané klouzáním vrstev po sobě.

Výsledný moment bude $M = F * r = 385,2 * 0,047 = 18,1 \text{ Nm}$ (23)

Aby se překonalo tření v podavači, volím potřebný moment se rezervou 30 Nm.

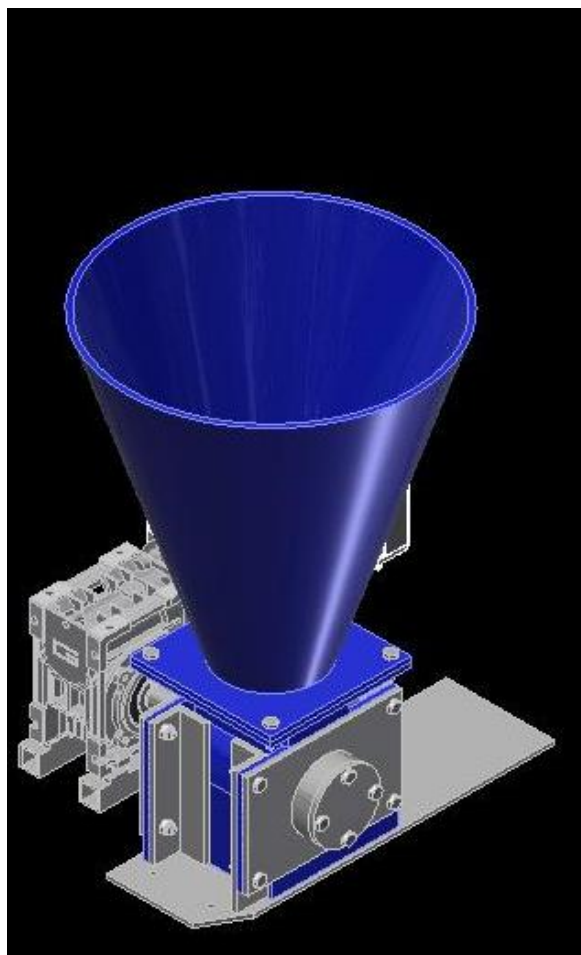
Pro rotor používaný u dvákovače s funkčními částmi z nerezové oceli mám mírně menší plochu pláště válce, tečné napětí mi tedy způsobí menší třecí sílu působící jako odpor proti otáčení. Třecí síla bude působit na mírně menším rameni, takže potřebný krouticí moment bude menší než u vyrobené verze, kde jsem stanovil potřebný moment na 30 Nm a zároveň bude menší odpor v uložení hřídele vlivem pevnějšího uložení a použití valivých kuličkových ložisek.

Podle těchto parametrů už mohu hledat vhodný pohon. Zjistil jsem, že motory i převodovky požadovaných vlastností se běžně vyrábí. Například dodavatel Raveo nabízí asynchronní čtyřpólový motor Transtecno SMT 5644 s příkonem 180 W, za kterým je šneková převodovka CM 040 s poměrem $i = 40$. Za převodovkou tento pohon dosahuje otáček 35/min a momentu 32 Nm, což by vyhovovalo. Stačilo by tedy poptat i u jiných dodavatelů motory a převodovky podobných parametrů a potom pro fakultu koupit pohon od nejlevnějšího dodavatele. [33]

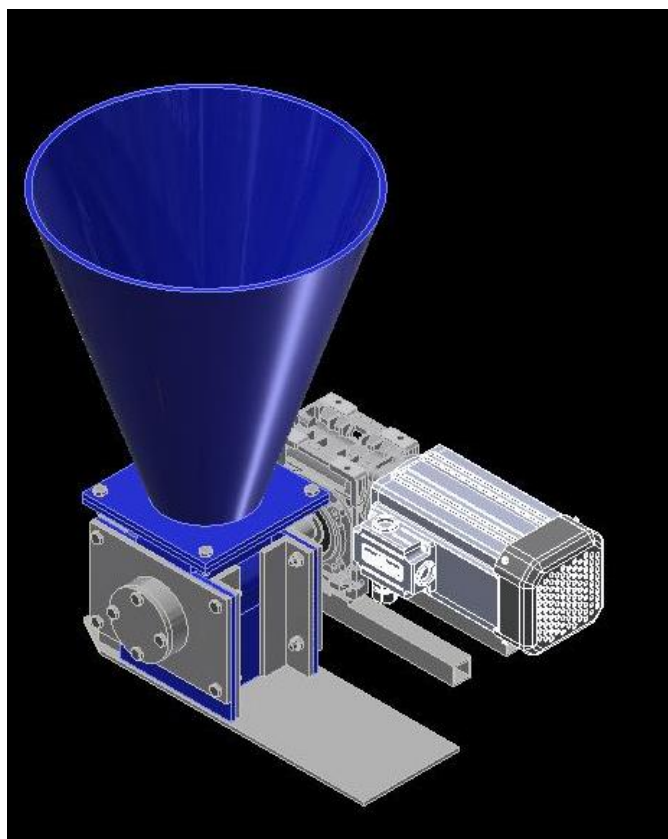
Dále určím potřebné frekvence, jaké by měl umožňovat frekvenční měnič. Při napětí o frekvenci 50 Hz má pohon za převodovkou 35 otáček. Pro 8 otáček za minutu potřebuji frekvenci $\frac{8}{35} * 50 = 11,42 \text{ Hz}$. Pro 36,5 otáček za minutu potřebuji frekvenci $\frac{36,5}{35} * 50 = 52,14 \text{ Hz}$. Vzhledem k těmto výsledkům bych stanovil minimální potřebnou frekvenci výstupu z měniče 10 Hz a maximální potřebnou 55 Hz. Motor by se napájel přes jakýkoliv frekvenční měnič s nednofázovým vstupem 230 V a s výstupem 3x230 V, který by umožňoval frekvence od 10 do 55 Hz odpovídající našim otáčkám a zvládl přenášet výkon 180 W. Aku vrtačka při hodně malých otáčkách nedosahuje svého katalogového momentu 54 Nm a má krouticí moment mnohem menší. Pokud tedy dávkovač fungoval s provizorním pohonem vrtačkou, tak musí fungovat i s lepším pohonem, který dosáhne stabilních otáček i stabilního krouticího momentu.

4.9.3 Možná koncepce sestavy pohonu

Pokud by se používal dávkovač s funkčními částmi z nerezové oceli, tak by se dala hřídel dávkovače přímo připevnit do převodovky pomocí těsného pera 6x6x30 dle ČSN 02 2562. Pružná spojka by nebyla nutná, v případě poruchy by došlo dříve ke zničení plastových součástí dávkovače, nebo k vypojení napájení pomocí nadproudové ochrany frekvenčního měniče, než by mohlo dojít k poškození pohonu. Motor i s převodovkou by se dal přišroubovat na rám a postavit na horní část mlýna (viz obrázek). Axiální zajištění hřídele dávkovače v převodovce by nebylo nutné protože zde nepůsobí axiální síly. Pro použití se stávajícím dávkovačem by bylo třeba mít převodovku s výstupní hřídelí a tu přes spojku připojit k dávkovači.

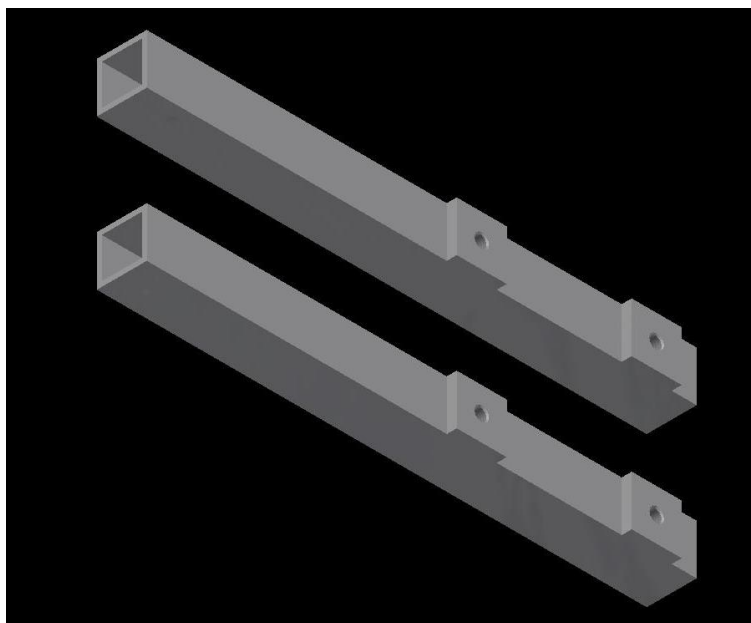


Obrázek 43 Sestava ideálního dávkovače s pohonem



Obrázek 44 Sestava ideálního dávkovače s pohonem druhý pohled

Rám pod převodovku by mohl být vytvořen ze dvou jechlů 15x15x1,5. Díry pro šrouby ve skříni převodovky CM 040 tvoří v půdorysu obdélník 70x60 mm. K rámu by se převodovka připevnila šrouby M6x16. V místech šroubů by se na ječky navařily čtvercové podložky vyrobené z plechu o straně 15 mm tak, aby rám měl na výšku 20 mm. Převodovku totiž bude nutné podložit o 20 mm, aby měla vstup pro hřídel stejně vysoko, jako hřídel dávkovače. Do těchto plechových podložek i do jechlů by se vytvořily díry se závitem M6 a do těchto děr by se našroubovaly šrouby. Rám je na následujícím obrázku.



Obrázek 45 Rám pod převodovku

4.9.4 Pevnostní kontrola vybraných součástí a kontrola trvanlivosti ložisek

Provedu pevnostní kontrolu hřídele z hlediska namáhání v krutu a v ohybu, pevnostní kontrolu spojení hřídele s převodovkou perem a stanovím trvanlivost ložisek. Mohu také zkontrolovat na otláčení tvarový spoj náboje a hřídele.

Znám maximální krouticí moment na hřídeli, znám průměr hřídele a dovolené smykové napětí materiálu (oceli X5CrNi1810), ze které bude vyrobená hřídel.

$$\tau_{kD} = \frac{\sigma_k}{k \cdot \alpha} \quad (24)$$

Podle hypotézy τ_{\max} to při uvažování bezpečnosti 1,5 bude:

$$\tau_{kD} = \frac{190}{1,5 \cdot \sqrt{3}} = 73 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad [34] \quad (24)$$

$$d' = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot \tau_{kD}}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 32 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 73}} = 13,1 \text{ mm} \quad (25)$$

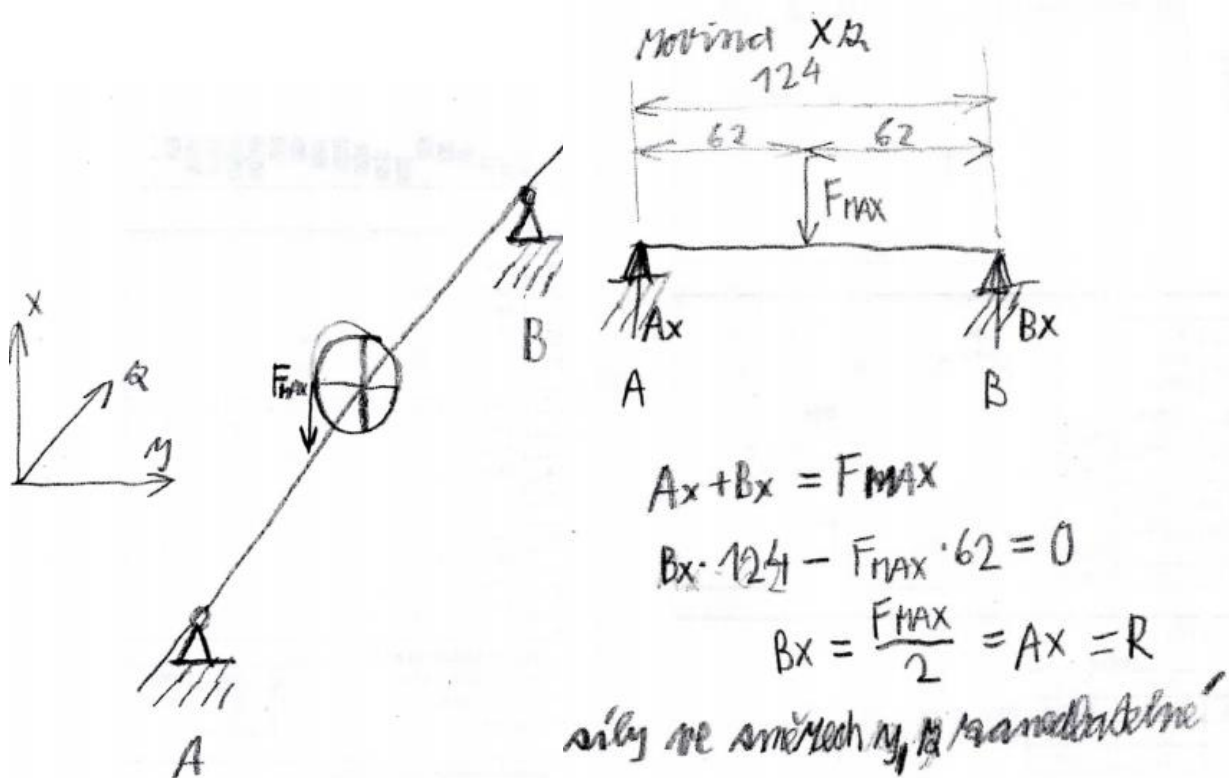
Minimální průměr hřídele z pohledu krutu je 18 mm, pokud bych uvažoval drážku pro pero hlubokou 3,1 mm, tak je minimální průměr $D=14,9$ mm. Hřídel tedy z pohledu krutu vyhovuje. Skutečné maximální napětí v krutu bude u hřídele:

$$\tau = \frac{M_k}{W_k} = \frac{M_k}{\frac{\pi \cdot D^3}{16}} = \frac{32 \cdot 10^3}{\frac{3,14 \cdot 14,9^3}{16}} = 49,3 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (26)$$

Na obvodu rotoru vzniká síla, která zatěžuje hřídel ohybovým momentem. Velikost této síly budu muset znát pro určení reakcí v ložiskách. Maximální zatěžující síla na hřídeli bude odpovídat síle při zablokování rotoru. Tato síla bude dána krouticím momentem pohonu a průměrem, na kterém se může rotor zablokovat. K zablokování rotoru může dojít na průměru který bude roven průměru pevné plastové části zvětšenému a tloušťku ohnutého pryžového konce na obou stranách. Ohnutý pryžový konec lopatky má tloušťku 3 mm a průměr na koncích plastové části lopatek je 67 mm. Celkem tedy bude průměr pro zablokování $D = 67+6 = 73$ mm.

$$F_{max} = \frac{2 \cdot M_k}{D} = \frac{2 \cdot 32}{0,073} = 877 \text{ N} \quad (27)$$

Výpočet reakcí je naznačený na následujícím obrázku.



Obrázek 46 Výpočtový model pro reakce

Maximální ohybový moment bude uprostřed mezi ložisky. Hřídel mezi ložisky má minimální průměr $D = 20$ mm.

$$\text{Reakce } R \text{ bude rovna: } R = \frac{877}{2} = 438,5 \text{ N} \quad (28)$$

$$\text{Skutečné maximální napětí v ohybu bude: } \sigma = \frac{M_o}{W_o} = \frac{R \cdot 62}{\frac{\pi \cdot D^3}{32}} = \frac{438,5 \cdot 62}{\frac{3,14 \cdot 20^3}{32}} = 34,6 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (29)$$

Maximální redukované napětí vypočítám ze vztahu:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + \alpha^2 \cdot \tau^2} = \sqrt{34,6^2 + 3 \cdot 49,3^2} = 92,1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (30)$$

Hřídel vyhovuje s dostatečnou bezpečností, mez kluzu je $190 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$.

Hřídel má být spojena s převodovkou vložením hřídele, kde bude přes těsné pero 6x6x30 dle ČSN 02 2562 přenášen krouticím moment. Pero mohu zkontrolovat na otláčení a na stříh.

$$b = 6 \text{ mm}, h = 6 \text{ mm}, l_a = 24 \text{ mm}$$

kontrola na otláčení:

$$p = \frac{4 \cdot M_k}{d_H \cdot h \cdot l_a} \leq p_D \quad (31)$$

$$\text{Dovolené tlakové napětí } p_D = 100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$$p = \frac{4 \cdot 32 \cdot 10^3}{18 \cdot 6 \cdot 24} = 49,38 \leq 100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \Rightarrow \text{Vyhovuje} \quad (32)$$

kontrola na stříh:

Dovolené napětí ve stříhu pro mat. pera:

$$\tau_D = (60 \div 90) \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$$\tau = \frac{2 \cdot M_k}{d_H \cdot b \cdot l_a} \leq \tau_D \quad (33)$$

$$\tau = \frac{2 \cdot 32 \cdot 10^3}{18 \cdot 6 \cdot 24} = 24,69 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \leq \tau_D \Rightarrow \text{Vyhovuje} \quad (34)$$

Trvanlivost ložisek bude záviset na radiálním zatížení, které bude odpovídat ekvivalentnímu dynamickému zatížení. Axiální síly jsou zanedbatelné.

Základní dynamická únosnost ložiska je $C = 9950 \text{ N}$. [30]

$$P = R = 438,5 \text{ N} \quad (35)$$

Trvanlivost ložiska v hodinách vypočítám takto, uvažuji otáčky 36,5/min.

$$L_h = \left(\frac{C}{P}\right)^m * \frac{10^6}{60 \cdot n} = \left(\frac{9950}{438,5}\right)^3 * \frac{10^6}{60 \cdot 36,5} = 5\,334\,778 \text{ hod} \quad (36)$$

Ložiska tedy vyhovují.

Nejnebezpečnějším bude při přenosu krouticího momentu z hřídele na náboj otláčení plastového náboje. Otláčení bych počítal na jedné ze čtyř dosedacích ploch, k tomu potřebuji znát velikost síly a plochy. Určím dovolený tlak na plastovém náboji z porovnání s dovoleným tlakem oceli. Dovolený tlak u oceli bývá obvykle $100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$, dovolený tlak ABS plastu určím z porovnání meze pevnosti oceli a ABS. Poměr pevnosti oceli X5CrNi1810 a ABS plastu je zhruba:

$$x = \frac{700}{33} = 21 \quad [34] [28] \quad (37)$$

Dovolené tlakové napětí by potom mělo být:

$$p_D = \frac{100}{21} = 4,8 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (38)$$

$$\text{Síla se vypočte ze vztahu: } F_h = \frac{2 \cdot M_k}{a} = \frac{2 \cdot 32}{0,02} = 3200 \text{ N} \quad (39)$$

Velikost hrany čtvercového průřezu hřídele, na kterém je uložený rotor označím a , pro kruhový průřez by to byla velikost průměru.

Plocha se vypočte ze vztahu:

$$S = l \cdot c = 86 \cdot 11,36 = 977 \text{ mm}^2 \quad (40)$$

Délka l je 86 mm a šířka dosedací plochy c je 11,36 mm.

$$\text{tlakové napětí tedy bude: } p = \frac{F_{max}}{s} = \frac{3200}{977} = 3,3 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (41)$$

Spojení tedy vyhovuje z pohledu otláčení.

5. Závěr

Cílem této práce bylo prozkoumat možnosti plnění mlýnů biomasou a zaměřit se především na plnění našeho nožového mlýna Retsch SM 300. Podařilo se mi najít možnosti jak tento mlýn plnit. Dále jsem měl zvolit nejvhodnější systém plnění, který bude sloužit při měření energetické náročnosti biomasy, zpracovat návrh tohoto systému použitelný pro výrobu, vyrobit ho a odzkoušet. Tento cíl se podařilo splnit, vymyslel jsem a vyrobil funkční prototyp dávkovače, který by byl použitelný i pro krátkodobá měření energetické náročnosti, pokud by měl stabilní pohon. Odkoušel jsem ho s provizorním pohonem aku vrtačkou, až budeme mít k dispozici elektromotor, převodovku, pružnou spojku (v případě, že bychom používali stávající verzi) a frekvenční měnič, tak bude dávkovač spolehlivě fungovat při mletí. Pokud by měl dávkovač pracovat dlouhodobě, tak je možné vyrobit bytelnější a trvanlivější verzi s funkčními částmi z nerezové oceli, kterou jsem v této práci také navrhl, jenom jsem ji už nevyráběl a nezkoušel, ale jistě bude pracovat ještě lépe než prototyp. Díky dávkovači teď půjde snadno experimentálně určovat energetickou náročnost mletí a měrnou rozpojovací energii. Díky možnosti snadno experimentálně ověřit energetickou náročnost mletí, se teď budou moci zdokonalovat matematické modely pro určení měrné rozpojovací energie. To otvírá cestu novým výzkumům, které umožní vyvinout efektivní postupy mletí biomasy. Díky dalším výzkumům půjde výrazně zefektivnit používání lignocelulózových odpadů pro energetické využití, a tím se bude moci snižovat závislost lidstva na fosilních palivech a zkvalitňovat různé další postupy v chemickém průmyslu, které vyžadují použití rozemleté biomasy.

Seznam zdrojů a použité literatury

- [1] K. Murtinger a J. Beranovský, *Energie z biomasy*, Brno: Computer Press: EkoWATT, 2011, 2011.
- [2] T. Jirout a L. Krátký, *Moderní trendy předúprav biomasy*, Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2015.
- [3] „Retsch SM 300,“ [Online]. Available: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/strizne-mlyny/sm-300/funkce-a-charakteristiky/>. [Přístup získán 25 4 2022].
- [4] T. Jirout a L. Krátký, „Experimental Identification of Specific Energy Demand for Knife Milling of Beech Chips at Different Moistures,“ *Chemical engineering transactions*, č. 87, pp. 529-533, 2021.
- [5] L. Krátký a T. Jirout, „Modelling of particle size characteristics and specific energy demand for mechanical size reduction of wheat straw by knife mill,“ *Biosystems engineering*, č. 197, pp. 32-44, 2020.
- [6] „Retsch DR 100,“ [Online]. Available: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/asistence/vibracni-podavac/funkce-a-charakteristiky/>. [Přístup získán 25 4 2022].
- [7] „Astro objemové dávkovače,“ [Online]. Available: <https://www.balicistroje.cz/davkovace/objemove-davkovace>. [Přístup získán 27 4 2022].
- [8] „Objemový klapkový dávkovač DOK,“ [Online]. Available: <https://www.velteko.cz/balici-stroje/davkovace-balici-stroju/objemovy-klapkovy-davkovac-dok/>. [Přístup získán 27 4 2022].

- [9] „Objemový třecí dávkovač,“ [Online]. Available: <https://www.masek.cz/cs/objemovy-treci/>. [Přístup získán 28 4 2022].
- [10] „Objemový třecí dávkovač Velteko DOT,“ [Online]. Available: <https://www.velteko.cz/balici-stroje/davkovace-balici-stroju/objemovy-treci-davkovac-dot/>. [Přístup získán 28 4 2022].
- [11] „Šnekový objemový dávkovač Velteko DOS,“ [Online]. Available: <https://www.velteko.cz/balici-stroje/davkovace-balici-stroju/snekovy-davkovac-dos/>. [Přístup získán 28 4 2022].
- [12] „Šnekové dávkovače SD,“ [Online]. Available: <https://www.balicistroje.cz/davkovace/snekove-davkovace-sd/>. [Přístup získán 28 4 2022].
- [13] „Šnekový dávkovač,“ [Online]. Available: <https://www.masek.cz/cs/snekovy-davkovac/>. [Přístup získán 28 4 2022].
- [14] „Objemový klapkový,“ [Online]. Available: <https://www.masek.cz/cs/objemovy-klapkovy/>. [Přístup získán 28 4 2022].
- [15] „RWN - rotační podavač pro štěpku,“ [Online]. Available: <https://www.has.cz/produkty/odebirani-a-davkovani-sypkych-materialu/rwn-rotacni-podavac-pro-stepku>.
- [16] „Rotační podavač - turniket 260 a 360,“ [Online]. Available: <http://pelletia.cz/rotacni-podavace/>. [Přístup získán 29 4 2022].
- [17] „Rotační podavače typ NW,“ [Online]. Available: http://www.filtrzeos.cz/Web/CZ/produkty_TU_turnikety_NW.htm. [Přístup získán 29 4 2022].
- [18] „Lehký šnekový dopravník kanon a krtek,“ [Online]. Available: <https://www.kovonovak.cz/cs/lehku-snekovu-dopravnik-kanon-krtek>. [Přístup získán 30 4 2022].
- [19] „Šnekové dopravníky,“ [Online]. Available: <https://jkmont.cz/snekove-dopravniky>. [Přístup získán 30 4 2022].
- [20] M. Gil, I. Arauzo, E. Teruel a C. Bartolomé, „Milling and handling *Cynara Cardunculus* L. for use as a solid biofuel: Experimental Test,“ *Biomass and Bioenergy*, č. 41, pp. 145-156, 2012.
- [21] „Kompozitní šnekové dopravníky,“ [Online]. Available: <https://www.rataj.cz/vyrobniprogram/dopravniky-robustni/kompozitni-snekove-dopravniky>. [Přístup získán 3 5 2022].
- [22] „Vibrační dopravníky,“ [Online]. Available: <https://www.m-tec.cz/vyrobky/dopravni-a-davkovaci-systemy/vibracni-dopravniky/>. [Přístup získán 30 4 2022].
- [23] „Vibrační dopravníky,“ [Online]. Available: http://www.rox.cz/vyrobky0111-vibracni_zlabove_dopravniky-VZ.php. [Přístup získán 30 4 2022].
- [24] „Dopravníky a podavače,“ [Online]. Available: <https://www.vibros.cz/dopravniky-a-podavace>. [Přístup získán 30 4 2022].
- [25] „Pásové dopravníky mk,“ [Online]. Available: <https://www.drasar.cz/Dopravnikove-systemy/Pasove-dopravniky-mk>. [Přístup získán 2 5 2022].

- [26] „Pásový dopravník přímý,“ [Online]. Available: <https://www.dasfm.cz/cz/produkty/dopravniky/pasove-dopravniky/pasovy-dopravnik-primy/72.html>. [Přístup získán 2 5 2022].
- [27] „Pásové dopravníky přímé,“ [Online]. Available: <https://www.haberkorn.cz/pasove-dopravniky-prime/>. [Přístup získán 2 5 2022].
- [28] „MATERIALPRO 3D,“ [Online]. Available: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>. [Přístup získán 9 5 2022].
- [29] „Otěrúzdorná těsnicí pryž A160,“ [Online]. Available: <https://www.gumex.cz/h/oteruvzdorna-tesnici-pryz-a160-00400>. [Přístup získán 3 5 2022].
- [30] „SKF,“ [Online]. Available: <https://www.skf.com/cz/productinfo/productid-6004>. [Přístup získán 16 5 2022].
- [31] „Rubena,“ [Online]. Available: <https://eshop.rubena.cz/gufera/c-2211/>. [Přístup získán 15 5 2022].
- [32] M. Stasiak, M. Molenda, M. Banda a E. Gondek, „Mechanical properties of sawdust and woodchips,“ *Fuel*, č. 159, pp. 900-908, 2015.
- [33] „AC motor SM se šnekovou převodovkou CM/CMP,“ [Online]. Available: <https://www.raveo.cz/elektromotory/ac-motory/serie-cm-cmp>. [Přístup získán 10 5 2022].
- [34] „Deska z nerezové oceli,“ [Online]. Available: <http://cz.china-stainless-steels.com/stainless-steel-plate/din-en-1-4301-stainless-steel-x5crni18-10.html>. [Přístup získán 5 15 2022].