



**FAKULTA
ŠROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Úprava konstrukce vysokokapacitní
loupačky semen olejnin**

**Modification of the design of the high-
capacity oil seed huller**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2024

Bc. Stanislav KYSELO

Studijní program: NDTT Dopravní a transportní technika

Studijní obor: N0716A270001 Transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Jan Hoidekr, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kyselo** Jméno: **Stanislav** Osobní číslo: **493574**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**
Specializace: **Transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Úprava konstrukce vysokokapacitní loupáčky semen olejin

Název diplomové práce anglicky:

Modification of the design of the high-capacity oil seed huller

Pokyny pro vypracování:

- 1) Na základě zadaných výrobních možností a možných nákladů upravte návrh konstrukce vysokokapacitní loupáčky semen olejin
- 2) Navrhněte měřicí stanoviště pro měření vlastností sypkého materiálu potřebných k DEM simulaci (Discrete Element Method)
- 3) Proveďte DEM simulaci provozu stroje ve vhodném softwaru a porovnejte výsledky s výpočty použitých při návrhu stroje
- 4) Na základě výsledků simulace navrhněte další vhodné konstrukční úpravy
- 5) Navrhněte zkušební stanoviště pro verifikaci DEM simulace

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Hoidekr, Ph.D. ústav konstruování a částí strojů FS

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

Datum zadání diplomové práce: **09.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.08.2024**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jan Hoidekr, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Úprava konstrukce vysokokapacitní loupačky semen olejnin“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Hoidekra, Ph. D., s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 31.5.2024

.....
Bc. Stanislav Kyselo

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Janu Hoidekrovi, Ph.D. za odborné vedení, potřebné rady a připomínky při vypracování diplomové práce. Mé poděkování též patří firmě Farnet a.s., jmenovitě Pavlu Mackovi a Ing. Martinu Dostálovi za odborné rady při úpravě konstrukce stroje. Své rodině děkuji za podporu a umožnění studia.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora: Bc. Stanislav KYSELO
Název DP: Úprava konstrukce vysokokapacitní loupačky semen olejnin
Anglický název: Modification of the design of the high-capacity oil seed huller
Rok: 2024
Studijní program: NDTT Dopravní a transportní technika
Obor studia: N0716A270001 Transportní technika
Ústav: Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí BP: Ing. Jan Hoidekr, Ph.D.

Bibliografické údaje: počet stran 72
počet obrázků 104
počet tabulek 4

Klíčová slova: Semena olejnin, slunečnicové semeno, loupání, loupačka, impaktní metoda, nárazová energie, ztrátový výkon, metoda diskretních prvků (DEM), CFD výpočet

Keywords: Hemp seed, sunflower seed, dehulling, dehuller, impact method, impact energy, power loss, discrete element method (DEM), CFD simulation

Anotace:

Diplomová práce se zabývá úpravou konstrukce vysokokapacitní loupačky semen olejnin. Na základě simulací provozu stroje jsou navrženy vhodné konstrukční úpravy.

Abstract:

The thesis deals with the modification of the construction of a high-capacity oil seed peeler. Based on machine operation simulations, suitable structural modifications are proposed.

Obsah

1. Úvod	1
1.1. Loupačka semen olejnin	1
1.2. Konstrukce vysokokapacitní loupačky	2
2. Teoretické podklady pro praktickou část práce	3
2.1. Metoda diskretních prvků (DEM)	3
2.1.1. DEM softwary	4
2.1.2. Ansys Rocky.....	4
2.2. Sypný úhel	5
2.2.1. Měření úhlu nasypání	6
2.2.2. Měření úhlu navrstvení.....	6
2.2.3. Rotující válec	7
2.3. Cíle práce	8
3. Konstrukční úpravy návrhu vysokokapacitní loupačky semen olejnin	9
3.1. Původní návrh loupačky	9
3.2. Změna způsobu separace kovových nečistot	11
3.3. Změna dávkovacího mechanismu	14
3.4. Konstrukční změny rámu	16
3.5. Konstrukční změny násypky	18
3.6. Konstrukční změny statoru	19
3.7. Posuv statoru	21
3.8. Uložení ložiska statoru	22
3.9. Uložení řemenic na rotoru a elektromotoru	23
3.10. Utěsnění rotorového prostoru	24
4. Měření sypného úhlu	26
4.1. Stand na měření statického dynamického úhlu	26
4.2. Stand na měření dynamického sypného úhlu	29
4.3. Měření sypného úhlu	31
4.3.1. Měření statického sypného úhlu	31
4.3.2. Měření dynamického sypného úhlu	34
5. Simulace loupání	36
5.1. Návrh otáček rotoru	36
5.2. Návrh výšky lopatky rotoru	37
5.3. Příprava modelu	38
5.4. Volba výpočetních modulů	39
5.5. Vyhodnocení simulace	40
6. Výpočet potřebného výkonu elektromotoru	42
6.1. CFD výpočet	43
6.1.1. Model k- ϵ	43
6.1.2. Model k- ω	43
6.2. Ověření výpočtu pro jednu lopatku	43
6.2.1. Síťování modelu	44

6.2.2. Nastavení simulace	45
6.2.3. Vyhodnocení simulace	45
6.3. Vliv počtu lopatek	45
6.3.1. Model a síť modelu	45
6.3.1. Nastavení simulace	46
6.3.2. Vyhodnocení simulace	46
6.4. Vliv délky lopatek	47
6.4.1. Model a síť modelu	47
6.4.2. Nastavení simulace	47
6.4.3. Vyhodnocení simulace	48
6.5. Výpočet ztrátového výkonu	48
6.5.1. Model a síť modelu	48
6.5.2. Nastavení simulace	50
6.5.3. Vyhodnocení simulace	50
6.6. Potřebný výkon elektromotoru	51
7. Návrh standu pro verifikaci CFD a DEM výpočtů	53
7.1. Konstrukce standu	53
7.1.1. Část loupáčky standu	54
7.1.2. Násypka	60
7.1.3. Podstavec	62
7.2. Verifikace simulace ztrátového výkonu	63
7.2.1. Měření výkonu elektromotoru	63
7.2.2. Porovnání naměřených hodnot a výsledků simulace	64
8. Závěr	65
Použitá literatura	67
Seznam obrázků	70
Seznam tabulek	72

Seznam použitých zkratek a symbolů

ZKRATKA

ČSN	Česká technická norma
EN	evropská norma
OSB	dřevotřísková deska (Oriented strand board)
HTEM	odpadní trubka s hrdlem
KGEM	systém trubek a tvarovek z polyvinylchloridu
DEM	metoda diskretních prvků (Discrete element method)
Stl.	typ 3D modelu
CFD	teoretický výpočet proudění
k- ϵ	turbulentní model proudění
k- ω	turbulentní model proudění

SYMBOL JEDNOTKA POPIS

C_d	[-]	činitel odporu desky
D	[m]	průměr rotoru
d_k	[mm]	průměr kužele
$\overline{d_{Kp}}$	[mm]	průměrná hodnota průměru kužele
d_T	[mm]	průměr trubky
E_s	[mJ]	kinetická energie semínka
F	[N]	aerodynamická odporová síla
h	[m]	výška lopatky
h_K	[mm]	výška kužele
k	[m ² /s ²]	turbulentní kinetická energie
l	[m]	délka lopatky
m_s	[kg/s]	hmotnost semínka
M	[Nm]	moment
\dot{m}_s	[g]	hmotnostní tok semen
M_z	[Nm]	ztrátový krouticí moment
n_R	[min ⁻¹]	provozní otáčky rotoru
n_{Rmin}	[min ⁻¹]	minimální otáčky rotoru
P_l	[W]	výkon potřebný k loupání
P_z	[kW]	ztrátový výkon
r	[m]	poloměr rotoru
S_y	[m ²]	obsah desky
v_s	[m/s]	dopadová rychlost semínka
v_u	[m/s]	unášivá rychlost
ϵ	[m ² /s ³]	turbulentní disipace
$\eta_{lož}$	[-]	účinnost ložiska
$\eta_{řem}$	[-]	účinnost řemenu
θ	[°]	sypný úhel
θ_D	[°]	dynamický sypný úhel
θ_{Dteor}	[°]	teoretický dynamický sypný úhel
θ_s	[°]	statický sypný úhel
μ_D	[-]	dynamický sypný úhel

μ_s	[-]	statický součinitel tření
ρ	[kg/m ³]	hustota vzduchu
ω	[m ² /s ³]	specifická ztráta
ω_R	[1/s]	úhlová rychlost rotoru

1. Úvod

Tato práce se zabývá simulací provozu a konstrukčními úpravami loupáčky slunečnicových semen z bakalářské práce: „Konstrukční návrh vysokokapacitní loupáčky semen olejnin“. Úvodní část práce se zabývá rešerší DEM softwarů, které jsou použité na simulaci provozu stroje a rešerší o vlastnostech materiálu, které je potřeba pro DEM výpočty znát a způsobů jejich měření.

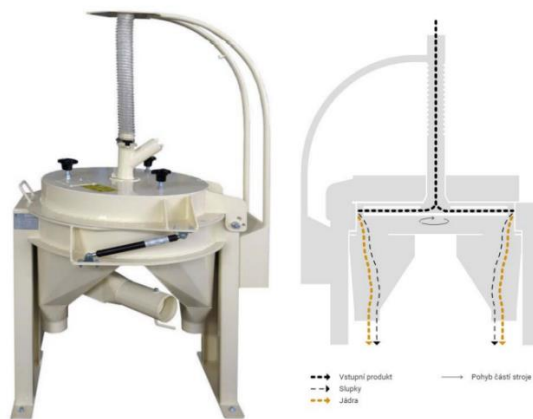
Po teoretické kapitole začíná praktická část práce, ve které jsou nejprve po konzultaci se spolupracující firmou Farmet a.s. provedeny konstrukční úpravy původního návrhu stroje dle jejich výrobních možností. Po úpravě konstrukce je simulován provoz stroje pomocí metody diskrétních prvků (DEM). Na základě výsledků simulace jsou provedené konstrukční úpravy, které zaručí optimální chod stroje.

1.1. Loupačka semen olejnin

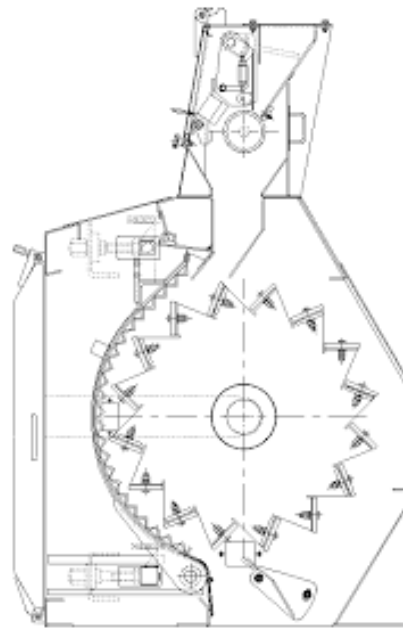
Loupačka semen olejnin je založena na principu impaktního loupání semen. Při impaktním loupání dochází k porušení slupky semena nárazem na nárazovou desku. Slupka se po nárazu oddělí od semene ve formě více úlomků.

Základem konstrukce impaktního stroje je rotor, který udává semenům potřebnou energii, nárazová deska (stator), na kterou dopadají semena urychlená rotorem na požadovanou rychlost a dochází k porušení integrity jejich slupky a rámu stroje, ve kterém jsou uloženy další dílčí prvky loupáčky. Z důvodu velkého abrazivního opotřebení součástí, které přichází do kontaktu se semeny je potřebné navrhnout konstrukci tak, aby byla výměna těchto součástí co nejjednodušší.

Impaktní loupáčky lze rozdělit do dvou skupin podle způsobu urychlení loupáných semen a jejich vystřelení na nárazovou desku. První skupinu tvoří loupáčky s vertikální osou rotace. U těchto loupáček jsou semena přiváděna do středu rotoru, jsou urychlována odstředivou silou rotoru a jsou vystřelována na nárazovou desku po celém obvodu rotoru. Tyto stroje jsou vhodné ke zpracování maximálně 2 t/hod. Druhou skupinu tvoří loupáčky s horizontální osou rotace rotoru. U těchto loupáček jsou semena přiváděna na vnější část rotoru, jsou urychlena rázem při kontaktu s lopatkami rotoru a jsou vystřelována na nárazovou desku jen části obvodu rotoru. Loupačky s horizontální osou rotace jsou vhodné ke zpracování velkého toku materiálu (10 t/h a více), tyto stroje tedy lze nazývat vysokokapacitními loupáčkami. [1] [2] [3] [4]



Obr. 1: Schéma loupacího stroje JHI 05 s vertikální osou rotace [4]



Obr. 2: Schéma loupacího stroje Bühler Sunflower Impact Dehuller s horizontální osou rotace [2]

1.2. Konstrukce vysokokapacitní loupačky

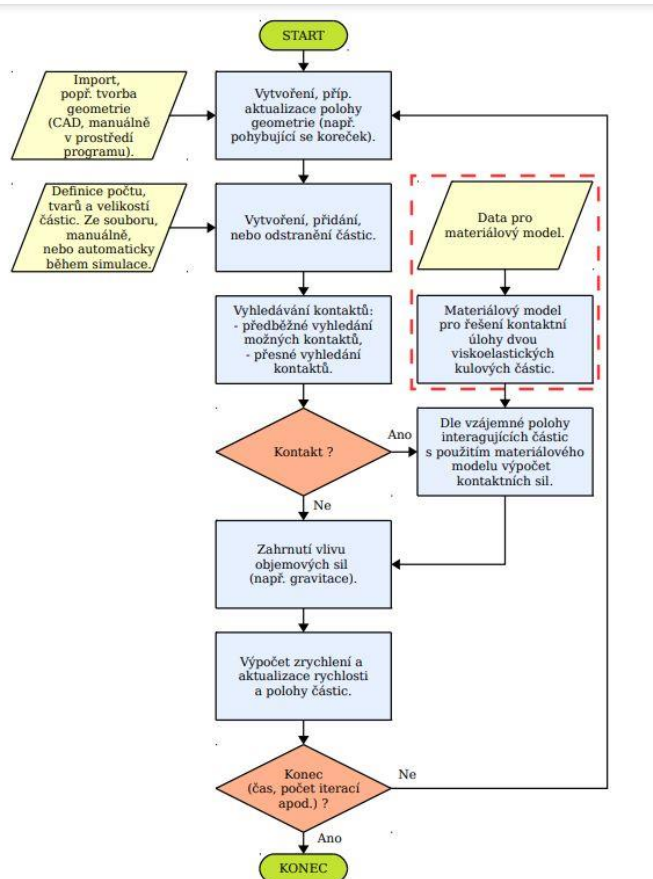
Základ konstrukce tvoří nárazová deska a rotor s lopatkami. Jako nárazová deska může být použita půlkruhová deska. Většinou je však použita složitější konstrukce desky pro maximální využití energie dopadajících semen. Nad rotorem se nachází násypka. Součástí násypky je dávkovací mechanismus k řízení toku materiálu na rotor. Mezi násypkou a rotorem je z pravidla magnetický separátor, který chrání ústrojí loupačky před možným poškozením od kovových nečistot. Rotor je poháněn elektromotorem s frekvenčním měničem, který umožňuje měnit otáčky. Mezi rotor a elektromotorem bývá z pravidla řemenový převod. [2] [3]

2. Teoretické podklady pro praktickou část práce

Tato kapitola se zabývá principem DEM výpočtu, který bude použitý na simulaci provozu stroje. Kapitola dále obsahuje vlastnosti materiálu, které je potřeba znát při DEM simulaci a metody jejich měření.

2.1. Metoda diskretních prvků (DEM)

Jedná se o numerickou metodu pro výpočet pohybů a vzájemného působení velkého množství částic. U této metody je každá částice modelována odděleně. Interakce mezi jednotlivými částicemi nebo mezi částicemi a tuhými tělesy (např. stěna násypky) jsou počítány v diskretních časových krocích. Pro každý časový krok je při výpočtu pro každou částici řešena pohybová a kontaktní úloha. Pro sypké hmoty se nejčastěji při výpočtu využívají Newtonovy pohybové zákony. U metody diskretních prvků se předpokládá, že deformace jednotlivých částic jsou v porovnání s deformacemi celé soustavy zanedbatelné. [5] [6] [7]



Obr. 3: Schéma výpočtu metody DEM [5]

Z Obr. 3 je patrné, že prvním krokem u metody DEM je importování geometrie do prostředí simulace a vytvoření částic, včetně inicializace materiálových modelů. Importovaná geometrie může být vytvořená přímo v simulačním prostředí nebo může být vytvořena v libovolném CAD softwaru. Z pravidla je lepší geometrii vytvořit v CAD softwaru

a následně ji importovat do DEM softwaru, jelikož v DEM softwarech je velmi obtížné vytvořit složitější geometrie. [5] [7]

V dalším kroku je spuštěn výpočetní cyklus, během kterého jsou hledány interakce mezi jednotlivými částicemi a mezi částicemi a importovanou geometrií. Pro všechny nalezené kontakty jsou řešeny kontaktní úlohy jejichž výsledky jsou momenty a kontaktní síly. Tyto momenty a síly jsou funkcí materiálového modelu a geometrií kolizního kontaktu, který určuje velikost a způsob deformace jednotlivých částic při srážce. [5] [7]

2.1.1. DEM softwary

V dnešní době je na trhu mnoho simulačních programů využívající metodu diskrétních prvků.

Mezi nejpoužívanější patří:

- *Ansys Rocky*
- *Altair® EDEM™*
- *Newton DEM*

Tyto programy umožňují simulovat téměř všechny procesy při práci se sypkými hmotami (např. doprava sypkých hmot, přenos tepla, opotřebením součástí při drcení, sušení atd.) Hlavní rozdíl těchto softwarů je systémové prostředí, ve kterém se nastavuje simulace, způsob zobrazení výsledků, výpočetní jádro a možnost propojení s jinými simulačními programy. [8] [9] [10]

Na trhu jsou také tzv. Open Source DEM Softwary, které jsou však většinou specializované na výpočet určitého typu procesu (např. pouze přenos tepla). [11]

Mezi tyto programy patří:

- *YadeDEM*
- *ESyS Particle*
- *Kratos Multiphysics*
- *LAMMPS*
- *LIGGGHTS*

Pro optimalizaci loupačky jsem zvolil software Ansys Rocky. Hlavní důvod této volby je možnost propojení ostatních programů od společnosti Ansys např. Ansys Fluent, který je vhodný na simulace proudění. Ansys také umožňuje snadné propojení s CAD programy a usnadňuje tak importování geometrie do systémového prostředí Ansysu.

2.1.2. Ansys Rocky

Ansys Rocky umožňuje vhléd do vnitřních procesů soustavy a tím i zrychlení vývoje a zdokonalení požadovaných procesů. Prostředí tohoto softwaru je jednoduché a intuitivní, lze definovat různé tvary částic, stochastické rozložení jejich rozměrů a libovolný pohyb vlastního zařízení. Do výpočtu je možné zahrnout také pokročilé modely porušení částic, adhezi a opotřebením zařízení. [8]

Příklady použití v praxi:

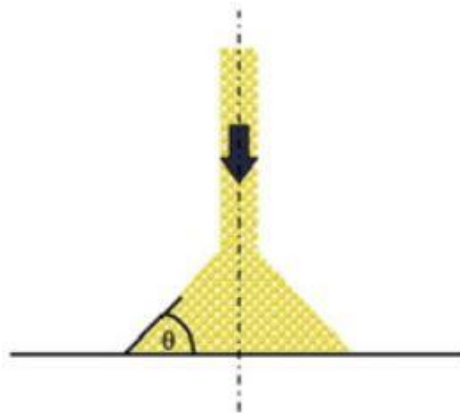
- doprava sypkého materiálu v těžebním a zpracovatelské průmyslu,
- míchání a lisování více druhů sypkých látek,
- mletí, drcení, rozpad částic při zpracování cementu či kameniva,
- optimalizace farmaceutických procesů,
- opotřebení potrubí vlivem eroze částic,
- správné dimenzování zemědělských strojů,
- povlakování a sušení tablet,
- třídění materiálu různých tvarů a velikostí,
- pneumatická a hydraulická doprava,
- návrh fluidního lože.

2.2. Sypný úhel

Při simulaci sypkých hmot je potřeba znát kromě objemové hmotnosti materiálu, také statický a dynamický součinitel tření materiálu, které získáme ze znalosti sypného úhlu.

Sypný úhel je úhel sklonu vrstvy volně nasypaného materiálu vzhledem k vodorovné rovině nebo úhlem sklonu naklápěné desky, při kterém dochází k sypání materiálu. Hodnota sypného úhlu je jednak dána vlastnostmi daného materiálu, jako je velikost a tvar zrna, hustota, součinitel tření a vlhkost materiálu, ale také metodou měření sypného úhlu. Známe-li součinitel statického tření μ_s , můžeme dle rovnice (1) určit sypný úhel materiálu θ . [12] [13] [14]

$$\tan \theta \approx \mu_s \quad (1)$$



Obr. 4: Sypný úhel [14]

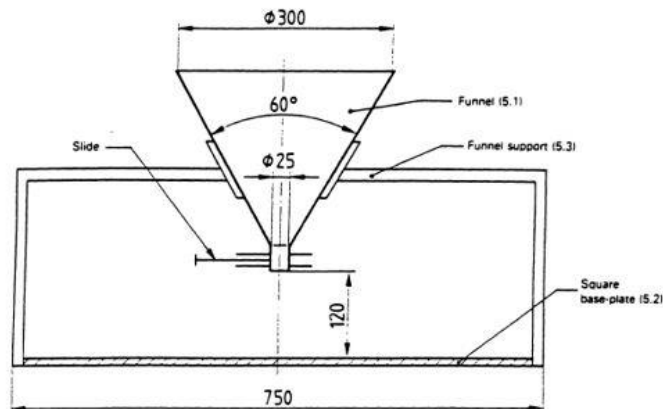
Pro měření sypného úhlu se nejčastěji používají tři metody, a to měření úhlu nasypání, měření úhlu navrstvení a metody rotujícího válce. Při měření sypného úhlu se kromě metody rotujícího válce neměří přímo úhel vzniklého kužele, ale průměr a výška kužele.

2.2.1. Měření úhlu nasypání

U této metody určování sypného úhlu se používá pevná násypka, ze které se vysypává materiál na desku, na které se vytvoří kuželová hromada materiálu. Násypka má nejčastěji kuželový tvar. Sypný úhel získáme dosazením naměřeného průměru kužele a jeho výšky do rovnice (2). [13] [14]

$$\theta = \arctan\left(\frac{2h_K}{d_K}\right) \quad (2)$$

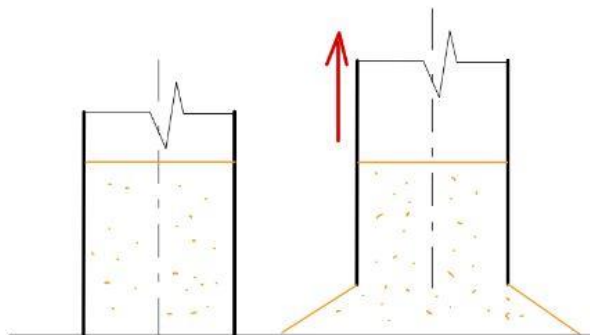
Pro snadnější měření se na desku, na kterou dopadá materiál, umísťuje milimetrový papír nebo je deska nahrazena kruhovou miskou, u které známe její průměr. Použijeme-li kruhovou misku, ukončíme nasypávání materiálu v okamžiku, kdy materiál dosáhne hrany misky a začíná přepadávat ven, pak již stačí změřit výšku vzniklého kužele a dosadit do rovnice (2). Tato metoda se používá k měření sypného úhlu tuhých průmyslových hnojiv podle normy ČSN EN 12047. Měření podle této normy je vhodné pro materiály, které mají maximální velikost zrn 5 mm. [13] [15]



Obr. 5: Měřicí stand dle normy ČSN EN 12047 [15]

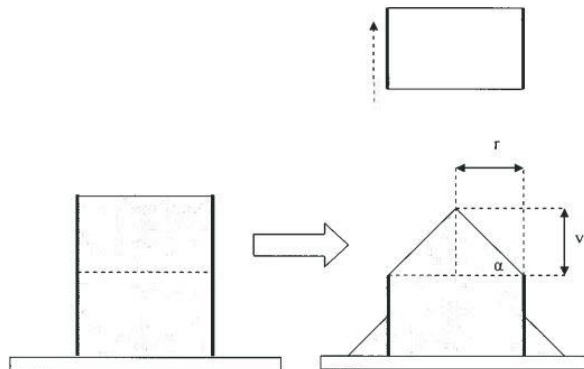
2.2.2. Měření úhlu navrstvení

U této metody se nepoužívá statická násypka, místo toho se násypka pomalu plynule zvedá ze základní desky. Při pohybu násypky vzhůru se postupně uvolňuje měřený materiál a dochází k navrstvení kužele na desce. Místo kužele se používá válcová násypka. [13] [14]



Obr. 6: Princip komínku

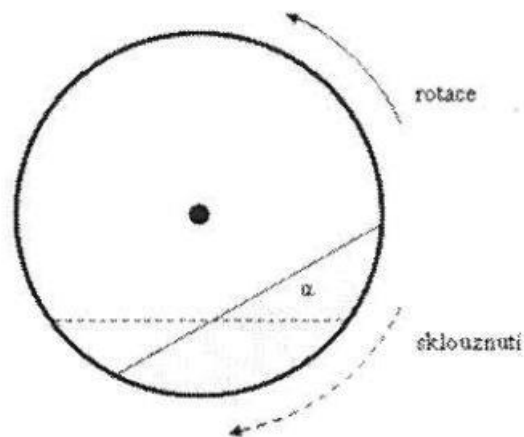
Při měření úhlu navrstvení může být základní deska nahrazena válcem. Měření probíhá tak, že válce naplněné materiálem jsou položeny na sobě a vrchní válec se začne pomalu pohybovat vzhůru. Na spodním válci vznikne kužel u, kterého stačí pouze změřit výšku, jelikož průměr již známe.



Obr. 7: Princip komínku s dvěma válci [13]

2.2.3. Rotující válec

Metodou rotujícího válce se získává hodnota dynamického součinitele tření. U této metody je materiál umístěn uvnitř válce, který má jednu stěnu průhlednou. Válec se otáčí konstantními otáčkami, sypký materiál se ve válci začne sklouzávat a zaujme určitý úhel, který odpovídá dynamickému synnému úhlu. Při vysokých otáčkách válce může docházet ke vzniku odstředivých sil, které mohou ovlivnit měření. [12] [13]



Obr. 8: Rotující válec [13]

2.3. Cíle práce

Cíle této práce lze rozdělit na hlavní a vedlejší cíle z toho plynoucí.

Hlavní cíle jsou:

- úprava konstrukce na základě výrobních možností firmy Farmet a.s. a celkové ceny stroje,
- úprava konstrukce na základě výsledků DEM a CFD simulací provozu stroje, aby došlo k vyloupení alespoň 90 % semen při zpracování 12 t/hod slunečnicových semen.

Vedlejší cíle potřebné pro splnění hlavních cílů:

- DEM simulace provozu stroje,
- návrh zařízení na měření vlastností slunečnicových semen potřebných k DEM simulaci,
- ověření výpočtů návrhu potřebného výkonu elektromotoru pomocí CFD výpočtů,
- návrh měřicího standu pro verifikaci DEM a CFD výpočtů.

3. Konstrukční úpravy návrhu vysokokapacitní loupačky semen olejnin

Tato kapitola se zabývá konstrukčními změnami původního návrhu loupačky, tyto změny byly provedeny vzhledem k technologickým možnostem firmy Farmet a.s. a celkové ceně stroje. Nejprve je představeno původní řešení se svými nevýhodami, následně je navrženo nové řešení konstrukce. Hlavní změnou je použití jiného typu magnetického separátoru, od které se odvíjely další dílčí změny konstrukce.

3.1. Původní návrh loupačky

V následujících odstavcích je krátce shrnut princip funkce a konstrukce původního návrhu.

Semena slunečnice jsou nejprve přivedena do násypky. V násypce je rozhrnovací šnek, který zajišťuje rovnoměrné rozložení semen slunečnice po celé délce rotoru. Šnek je poháněn vlastním elektromotorem se šnekovou převodkou.

Na dně násypky je bubnový magnetický separátor, který zachytává kovové nečistoty a chrání ústrojí loupačky.

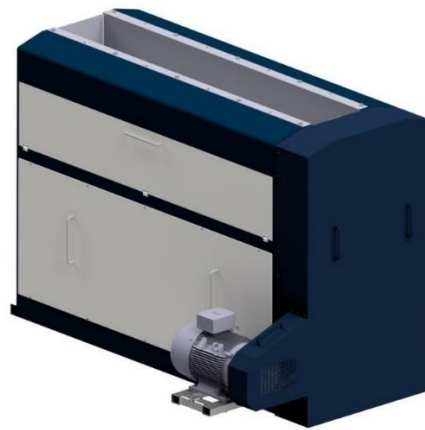
Vlevo pod separátorem je sběrné místo kovových nečistot. Nečistoty je možné ze stroje bezpečně vyjmout při provozu stroje

Na pravé straně dna násypky je dávkovač, který uzavírá prostor mezi separátorem a stěnou násypky. Poloha dávkovače je řízena pomocí dvou lineárních aktuátorů. Poloha dávkovače udává mezeru mezi dávkovačem a separátorem. Velikostí této mezery je řízen tok materiálu z násypky do rotorového prostoru.

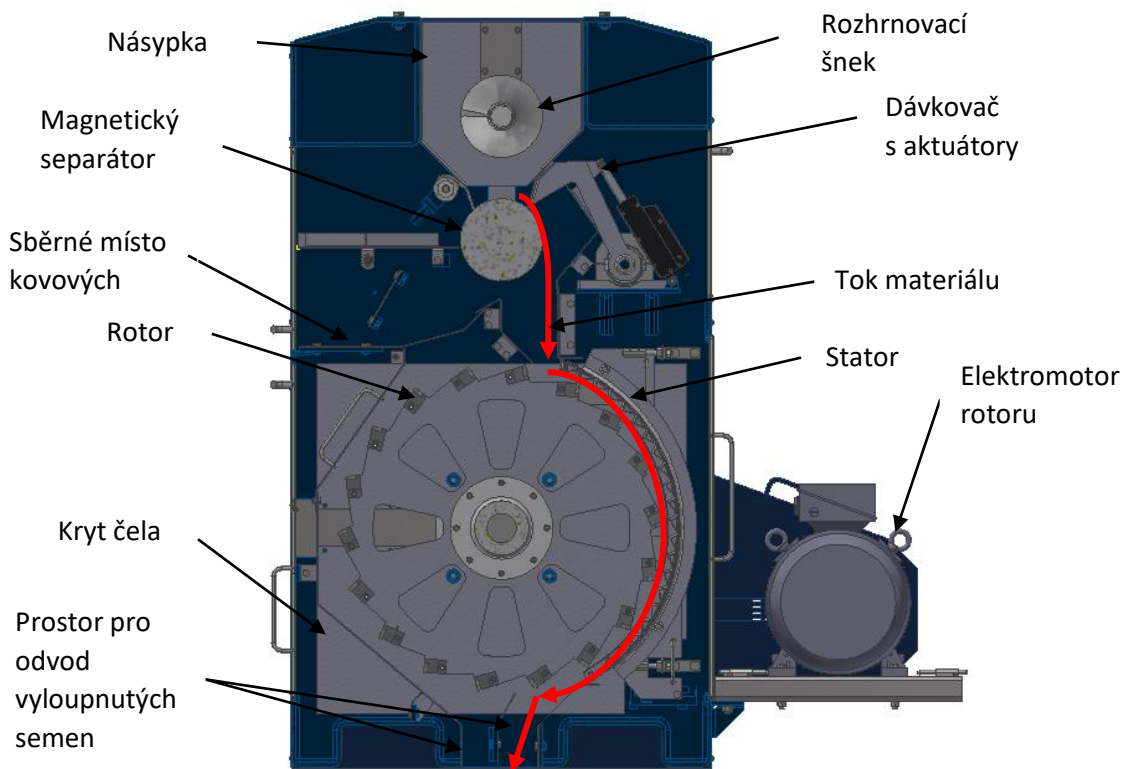
Pod separátorem se nachází rotorový prostor, ve kterém dochází k loupání semen. Rotor tvoří hřídel se čtyřmi disky, na kterých jsou uloženy lopatky, které přicházejí do kontaktu se semeny a vystřelují je na nárazovou desku.

Rotor je poháněn asynchronním elektromotorem, moment je na rotor přenášen pomocí řemenového převodu.

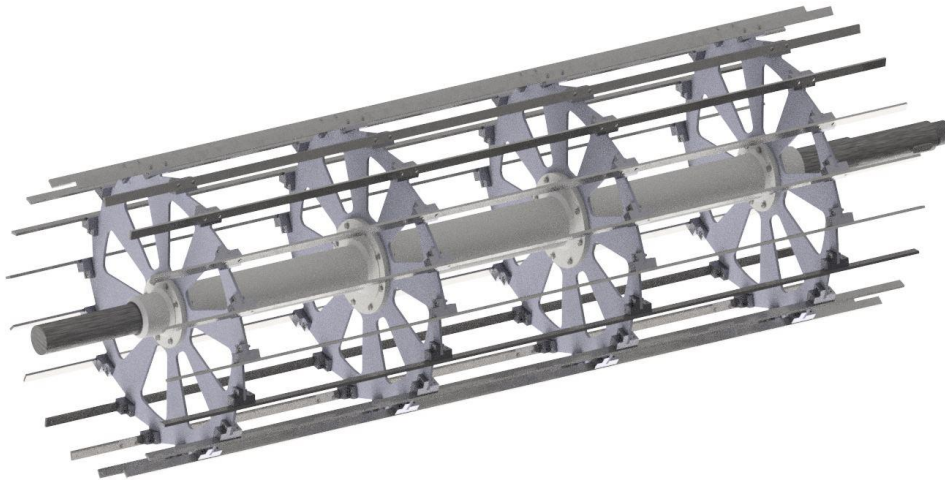
Rám loupačky tvoří svařovaná konstrukce, ve které jsou vloženy ostatní prvky stroje popsané výše.



Obr. 9: Původní návrh loupačky



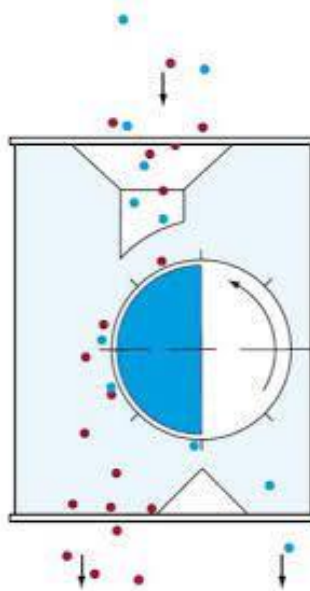
Obr. 10: Původní návrh loupačky v řezu



Obr. 11: Rotor loupačky

3.2. Změna způsobu separace kovových nečistot

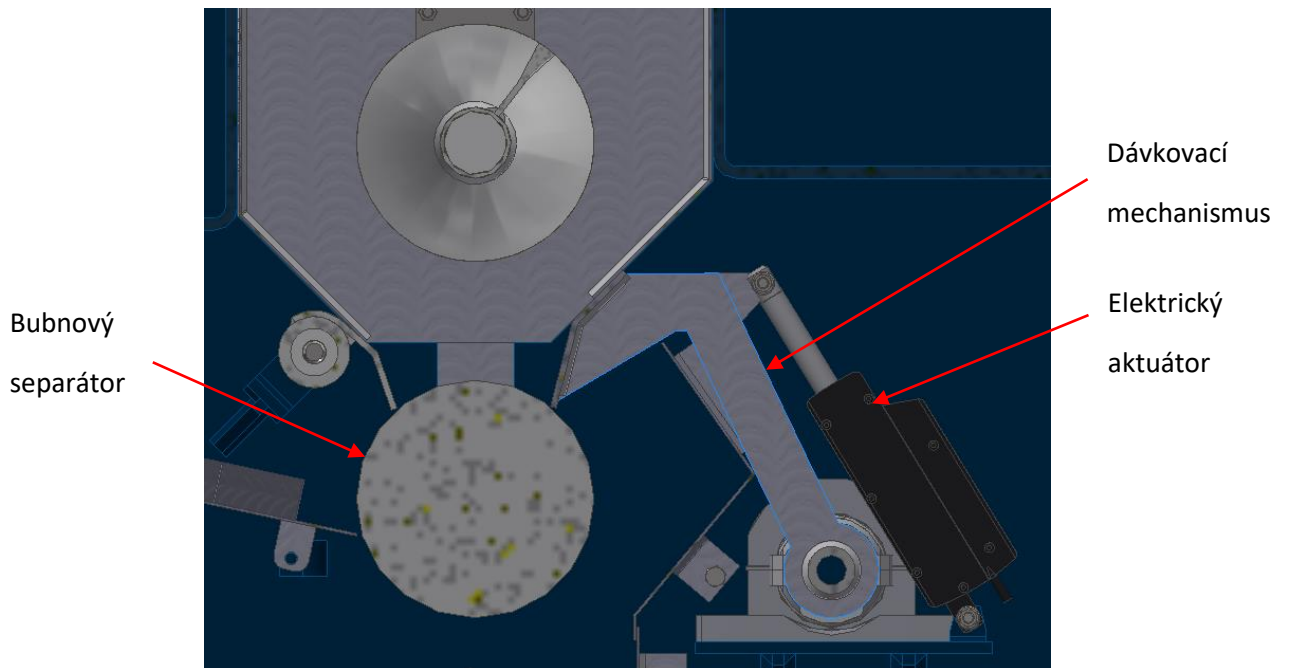
Pro separaci kovových nečistot byl původně navržen magnetický bubnový separátor. Tento druh separátoru tvoří vnější rotující buben, ve kterém je uložen půlkruhový magnet. Na rotující buben proudí materiál, kovové částice zůstanou vlivem magnetického pole zachyceny na povrchu bubnu, jakmile překročí úvrať, kde magnetické pole končí, kovové nečistoty z bubnu odpadnou do výběrového místa. [16] [17]



Obr. 12 Princip bubnového separátoru [17]

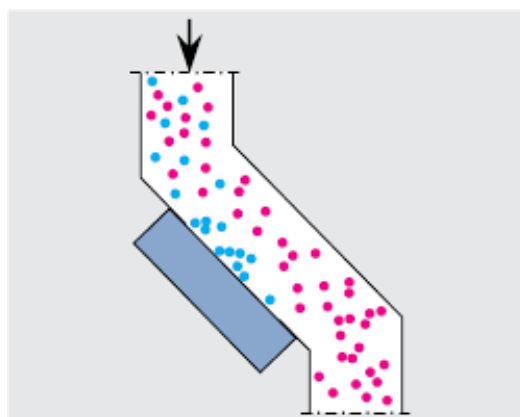
Bubnový separátor byl umístěn na dno násypky loupačky a společně s dávkovacím mechanismem uzavírá prostor násypky. Tok materiálu byl v tomto návrhu řízen pomocí dvou elektrických aktuátorů. Výhodou tohoto způsobu separace je, že kovové částice jsou svedeny do výběrového místa a není potřeba čistit přímo bubnový separátor a přerušovat chod stroje. Nevýhodou bubnového separátoru je jeho vysoká pořizovací cena a potřeba

zajistit přesnou polohu ložisek separátoru vůči sobě na rámu stroje, což je z hlediska svařované konstrukce rámu velmi obtížné. Z těchto důvodů vznikl požadavek na jiné konstrukční řešení.



Obr. 13: Bubnový separátor s dávkovacím mechanismem

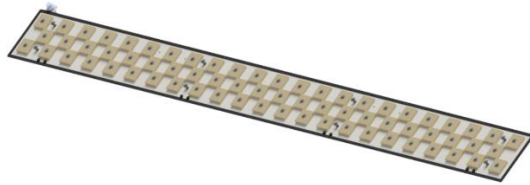
Pro nové konstrukční řešení separace kovových nečistot byla zvolena metoda magnetické desky. U této metody tvoří separátor, ve formě desky, část stěny prostoru, kterým je materiál veden z násypky do rotoru. Nevýhodou této metody je, že kovové nečistoty zůstávají zachycené na separátoru a je nutné separátor pravidelně manuálně čistit. Oproti bubnovému separátoru je toto provedení mnohem levnější a jednodušší na konstrukci. [17]



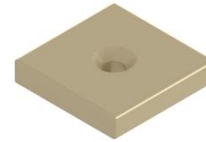
Obr. 14: Princip deskového separátoru [17]

Deskový separátor v novém návrhu tvoří základní deska o rozměrech 2350×200×4 mm, na které je uloženo 68 magnetů o rozměrech 50×50×10 mm. V magnetu díra pro šroub s kuželovou hlavou, pomocí kterého je magnet na desce uchycen. Nad těmito magnety je umístěn krycí plech, který chrání magnety před opotřebením a tvoří

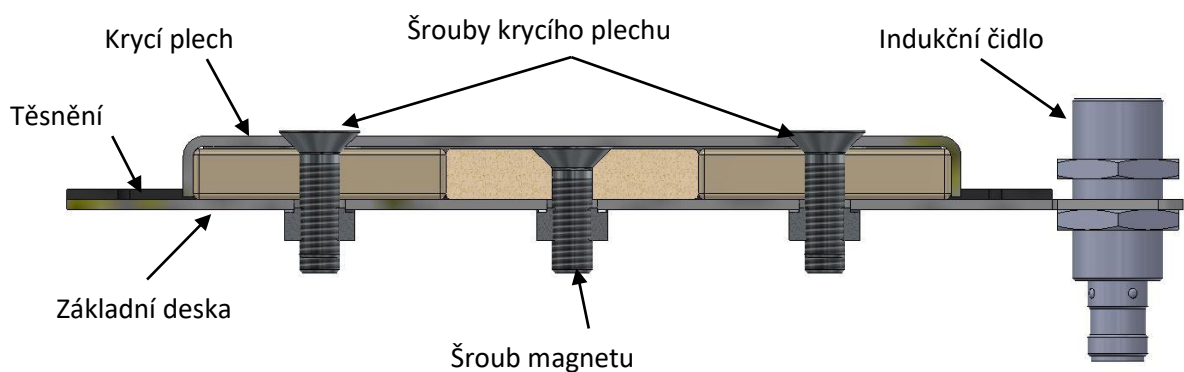
plochu, na které se zachytávají kovové nečistoty. Separátor je uložen na pantech, aby bylo možné ho jednoduše vyklopit a očistit. Po obvodu základní desky separátoru je nalepené ploché těsnění, které utěšňuje prostor mezi separátorem a násypkou.



Obr. 15: Separátor bez krycího plechu

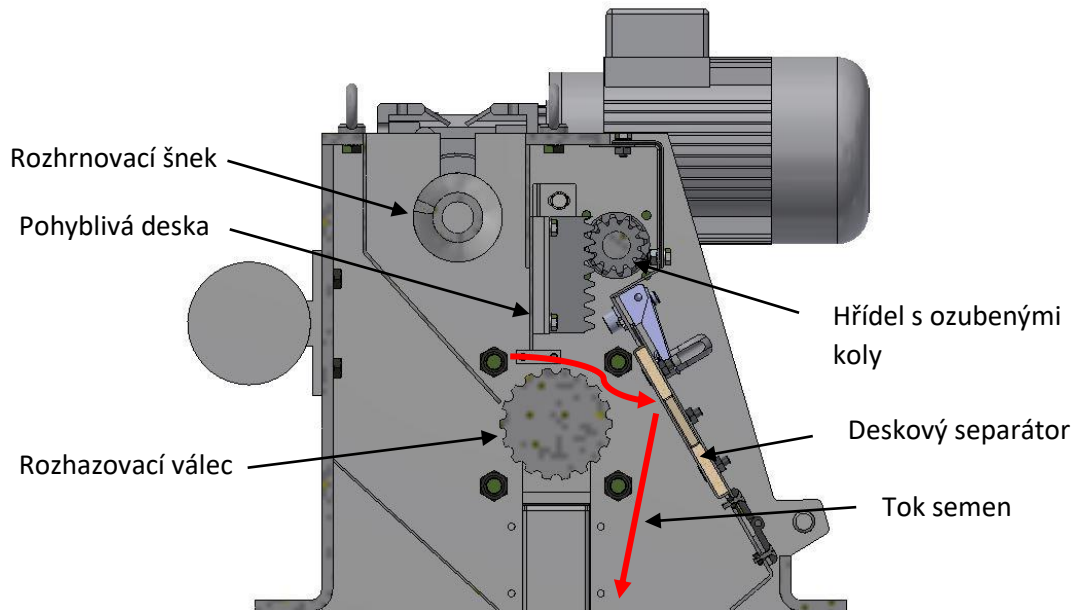


Obr. 16: Magnet separátoru



Obr. 17: Magnetická deska v řezu

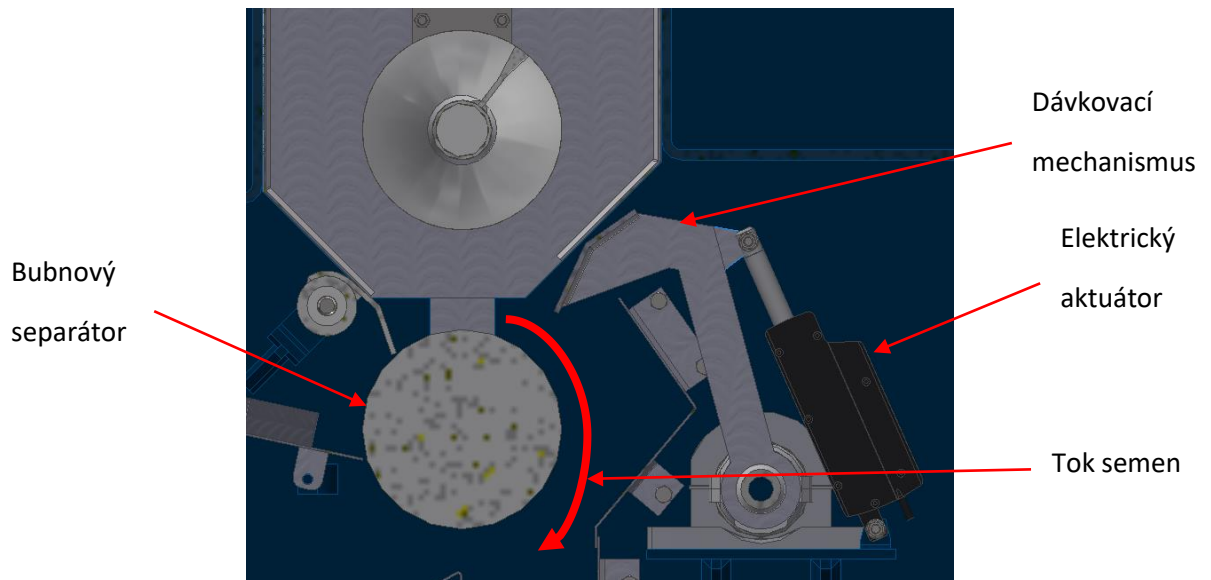
Magnetická deska není umístěna zespodu šachty jako na Obr. 14, jelikož tok materiálu padající na desku by mohl strhnout zachycené kovové nečistoty a ty by mohly vniknout do rotorového prostoru. Místo toho je deska umístěna ve vrchní části šachty, kterou je materiál veden do rotorového prostoru viz Obr. 18. Materiál, tak nedopadá na separátor samovolně, ale je na separátor vrhán pomocí rozhazovacího válce s drážkami. Na separátoru je umístěné čidlo, které zajistí zastavení rozhazovacího válce při vyklopení separátoru a je tak možné bezpečně očistit separátor.



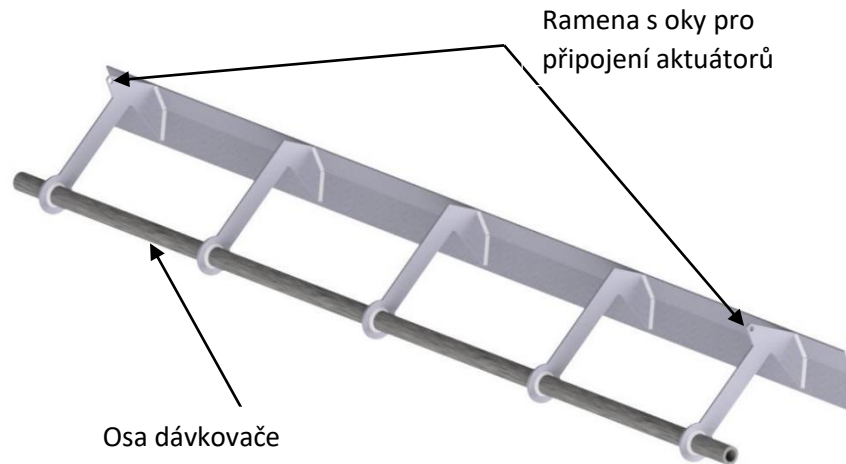
Obr. 18: Násypka s deskovým separátorem

3.3. Změna dávkovacího mechanismu

V původním návrhu byl tok materiálu řízen velikostí mezery mezi bubnovým separátorem a dávkovacím mechanismem, který byl ovládán pomocí 2 lineárních aktuátorů. Z důvodů změny způsobu separace a celkové změny zástavby násypky bylo zapotřebí použít jiný způsob řízení materiálového toku.

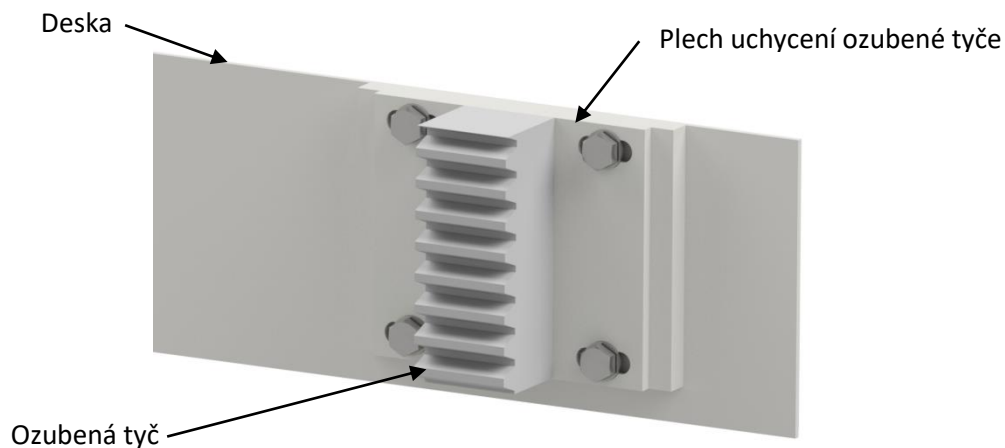


Obr. 19: Otevřený dávkovací mechanismus původního návrhu



Obr. 20: Původní dávkovací mechanismus

V novém návrhu je tok materiálu z násypky do rotorového prostoru řízen velikostí mezery mezi rozhazovacím válcem a pohyblivou deskou viz Obr. 18. Poloha desky je ovládána pomocí hřídele s dvěma ozubenými koly a dvěma ozubenými tyčemi. Ozubené tyče jsou navařené na plechy s vypálenými oválnými otvory pro šrouby pomocí, kterých jsou tyče uchyceny na pohyblivé desce. Oválné otvory umožňují nastavit požadovanou polohu tyčí vůči ozubeným kolům a zajistit tak správný záběr ozubení. Na konci hřídele je ruční kolo s ukazatelem polohy viz Obr. 22.



Obr. 21: Část pohyblivé desky s ozubenou tyčí



Obr. 22: Ruční kolo s ukazatelem polohy od výrobce Eles+Ganter [18]

3.4. Konstrukční změny rámu

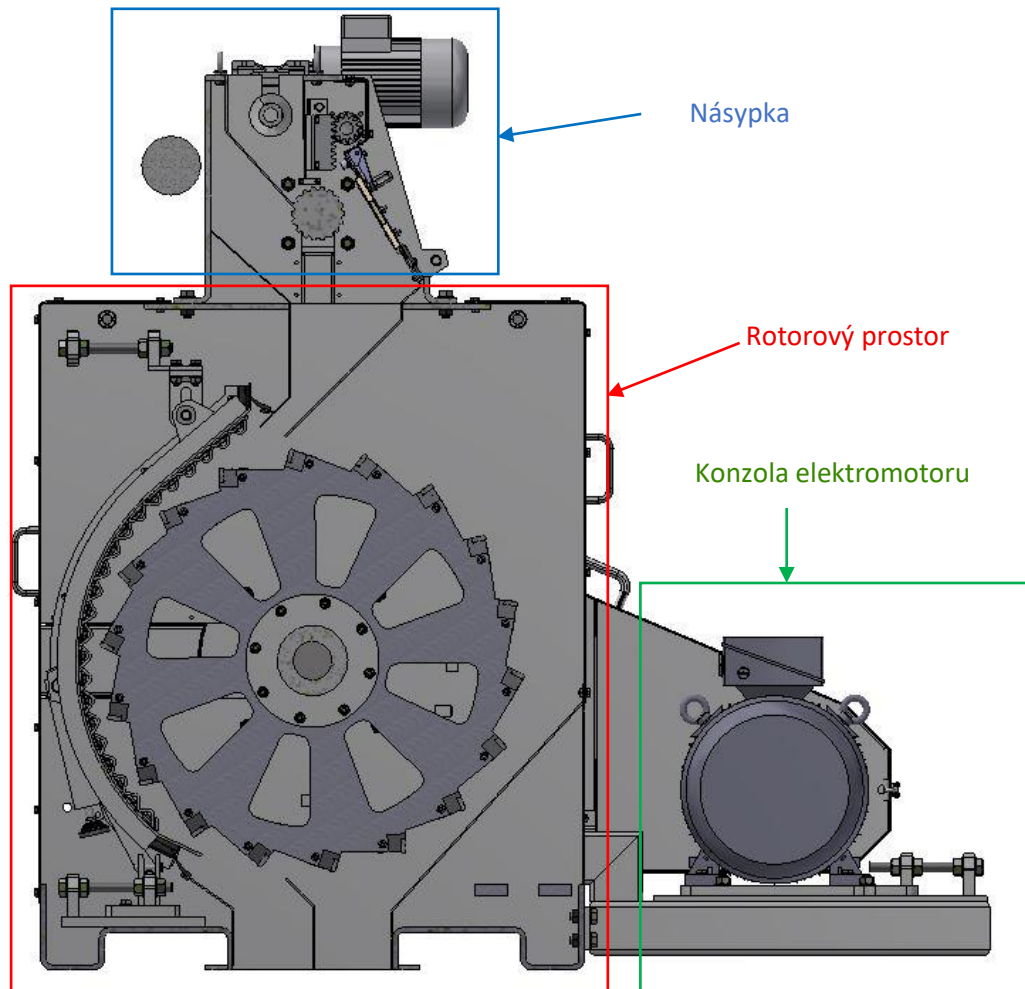
V původním návrhu tvořila rám loupáčky svařovaná konstrukce, do které byly uloženy ostatní části stroje viz Obr. 10.

Těmito částmi byly:

- násypka s rozhazovacím válcem,
- bubnový separátor,
- dávkovací mechanismus,
- rotor,
- stator,
- konzola s elektromotorem.

Po nahrazení bubnového separátoru deskovým a změně dávkovacího mechanismu, nebylo již možné použít tuto konstrukci, jelikož by bylo obtížné do rámu umístit rozhazovací válec a také by byl obtížný přístup k čištění separátoru.

Z těchto důvodů byl rám loupáčky rozdělen na 2 části, násypku a rotorový prostor. Byl tak zajištěn lepší přístup k údržbě stroje a také se tím ulehčí výroba a montáž.

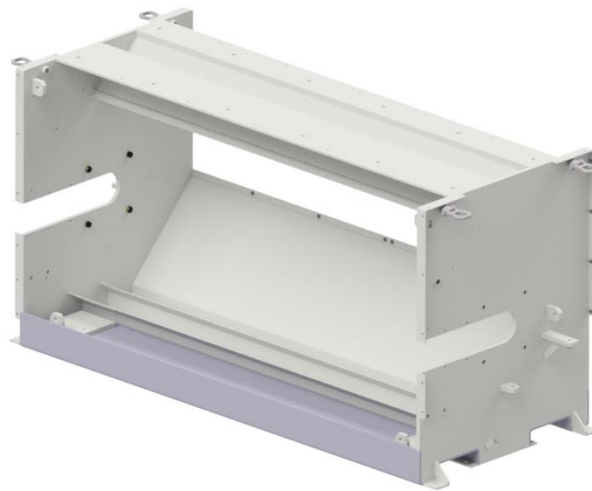


Obr. 23: Nový koncept stroje

Základ loupačky nyní tvoří rám rotorového prostoru, ve kterém je uložený stator a rotor. Na rámu je v horní části umístěna násypka a na boku rámu je konzola s elektromotorem a krytváním.

Základem nového rámu jsou 2 desky o tloušťce 20 mm s dírami pro připojení ostatních prvků stroje. Desky jsou spojeny ohýbanými profily o tloušťce 10 mm. K okrajům čel jsou navařeny plechy s dírami, které slouží k uchycení krytů rotorového prostoru. Na vrchu rámu jsou otvory pro uchycení násypky k rámu. V čelech rámu jsou vypáleny zámky pro navaření úchytů dalších komponent stroje.

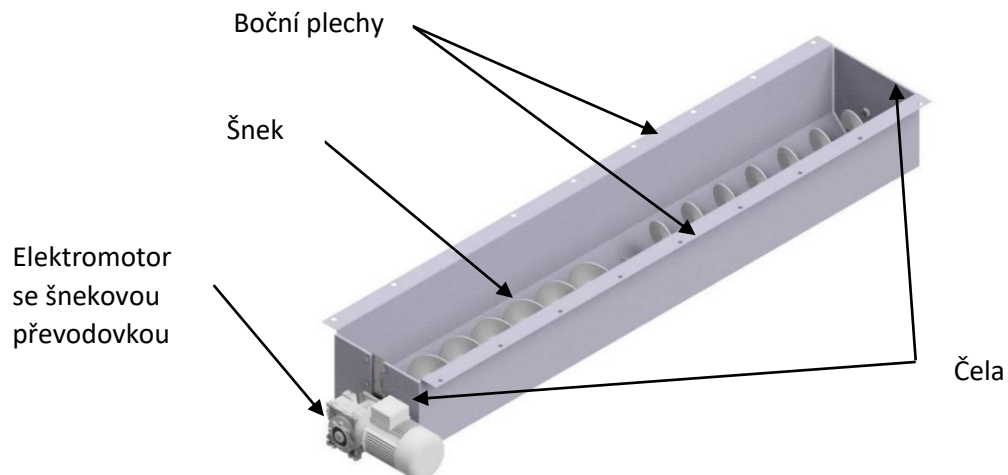
V rozích rámu jsou umístěná sklopná závěsná oka, která slouží k manipulaci se strojem. Předpokládaná hmotnost stroje je 2400 kg, proto byla použita 4 závěsná sklopná oka se závitem M24.



Obr. 24 Nový rám stroje

3.5. Konstrukční změny násypky

V původním návrhu byl součástí násypky pouze rozhrnovací šnek s pohonem a násypka byla vložena do rámu stroje viz Obr. 10.



Obr. 25: Původní návrh násypky

Po změně konceptu stroje je součástí násypky také separátor, rozhazovací válec s elektromotorem a dávkovací mechanismus viz Obr. 18.



Obr. 26: Nová násypka

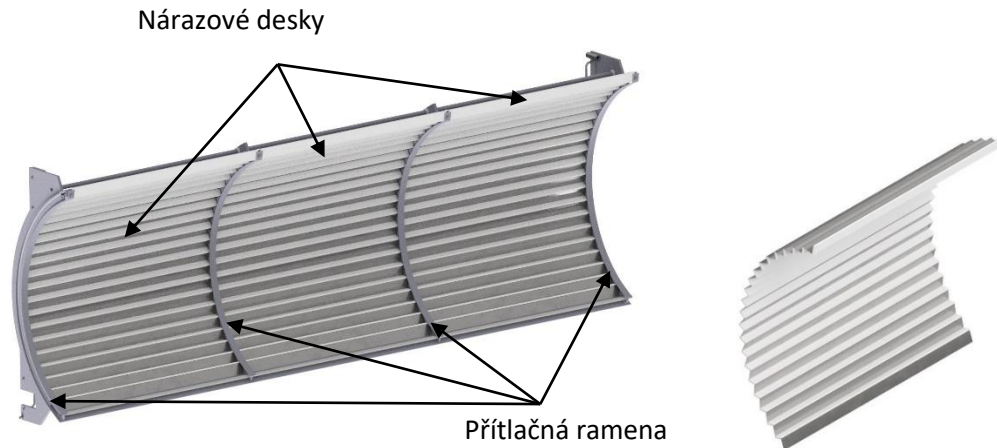
Rám násypky je svařovaná konstrukce, kterou tvoří 2 čela o tloušťce 20 mm a ohýbané plechy o tloušťce 10 mm s vypálenými otvory pro uchycení ostatních částí násypky. Na boku rámu je také uchycen elektrický naviják, který se používá na vyklopení statoru a výměnu opotřebovaných částí nárazové desky.



Obr. 27: Rám násypky

3.6. Konstrukční změny statoru

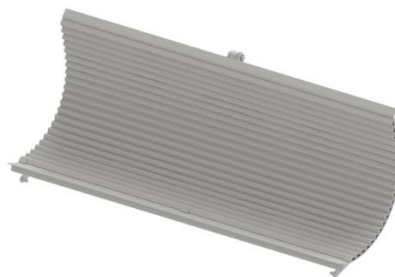
Původní návrh stator se skládá z nárazové desky a rámu. Základ statoru tvořil skružený plech s výztuhami a prvky připojení k rámu. Na statoru byly 3 nárazové desky. základ nárazové desky tvořil ohýbaný plech o tloušťce 2 mm a šířce 745 mm. Na tento základ byly nalepené keramické destičky pro zvýšení životnosti desek. Nárazové desky byly v konstrukci přichyceny pomocí čtyř přitlačných ramen. Ve spodní části přitlačného ramena byl otvor pro uložení ramen na osu, která byla uložena v rámu statoru. Ramena byla přišroubována v horní části k rámu statoru, kde byly navařené matice DIN 929.



Obr. 28: Původní návrh statoru

Obr. 29: Původní nárazová deska

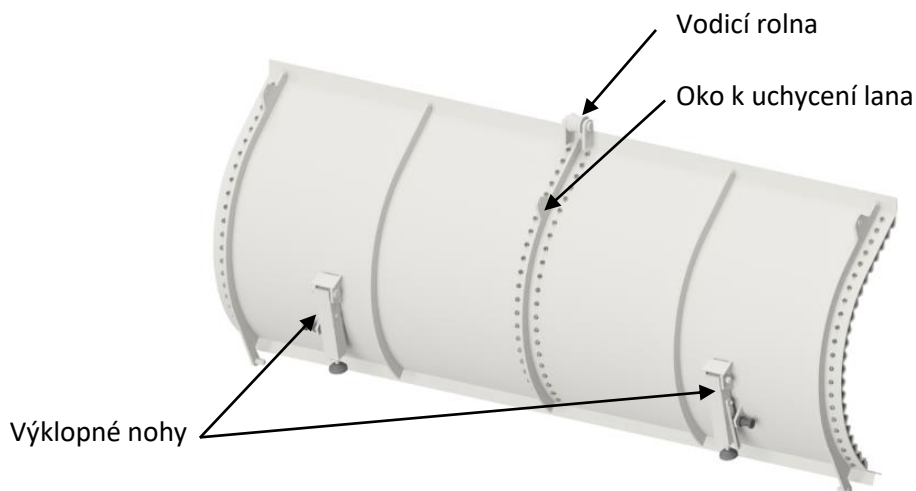
Jelikož by bylo velmi obtížné přesně vyrobit takto ohýbanou desku, byly nárazové desky rozdělené na malé ohýbané segmenty o tloušťce 5 mm s vypálenými zámky, kterými se do sebe skládají. Na segmentech jsou navařené matice k uchycení na rám statoru. Nově tak nárazovou desku tvoří 44 segmentů o délce 1150 mm. Ve skruženém plechu jsou vypálené otvory pro šrouby k uchycení segmentů nárazové desky.



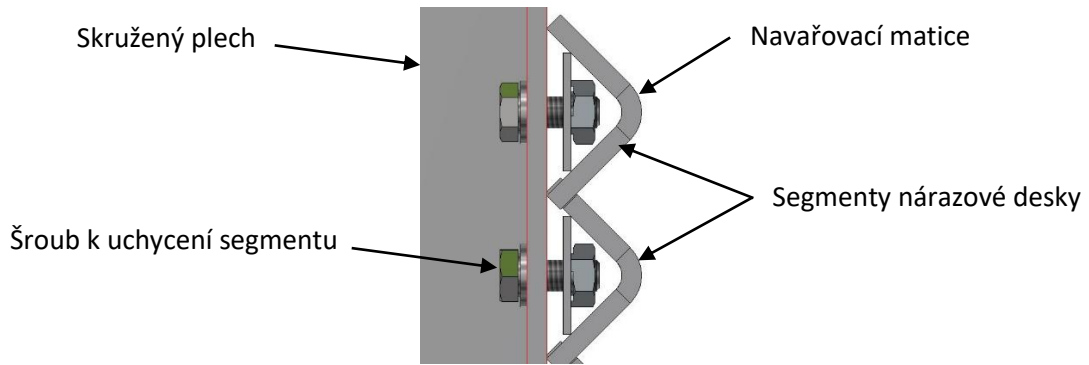
Obr. 30: Nový stator



Obr. 31: Detail segmentu

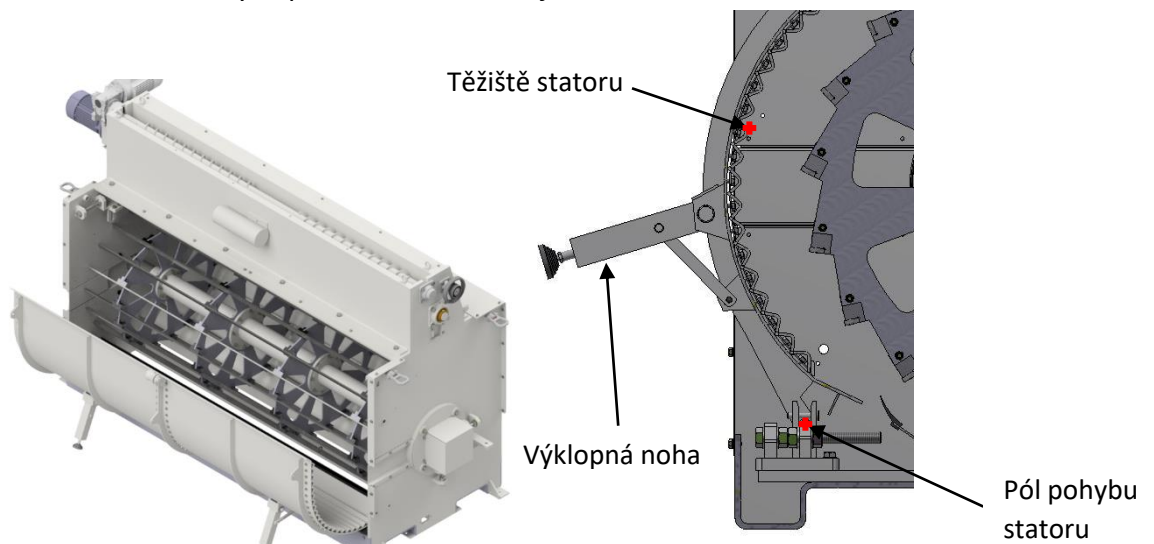


Obr. 32: Zadní strana nového statoru



Obr. 33: Detail uložení segmentů nárazové desky

Výměna poškozených segmentů nárazové desky probíhá přímo ve stroji. Při výměně se stator pomocí elektrického navijáku, který je uchycen na boku rámu násypky, spustí na výklopné nohy tak, aby bylo možné lopatky vyměnit. Kvůli nerovnostem povrchu jsou na nohách patky s kulovým čepem, které umožňují naklápění a vyrovnání nerovností povrchu. Aby se stator po odpojení horních posuvů statoru nezačal naklápět směrem do stroje, je umístěno těžiště statoru před spodním čepem statoru, na kterém je uložen a dochází tak k samovolnému vyklápění statoru ze stroje.



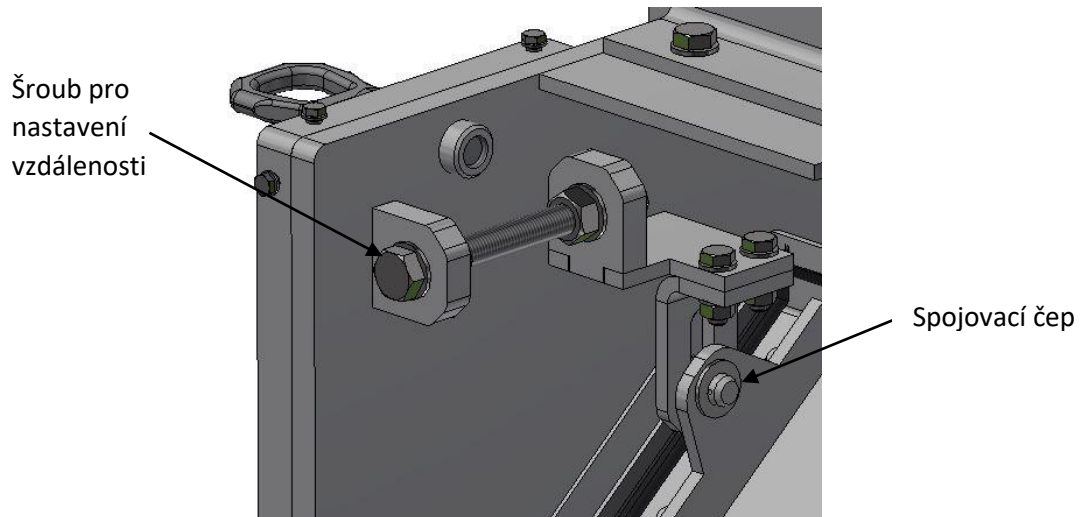
Obr. 34: Vykloněný stator při výměně segmentů

Obr. 35: Těžiště statoru

3.7. Posuv statoru

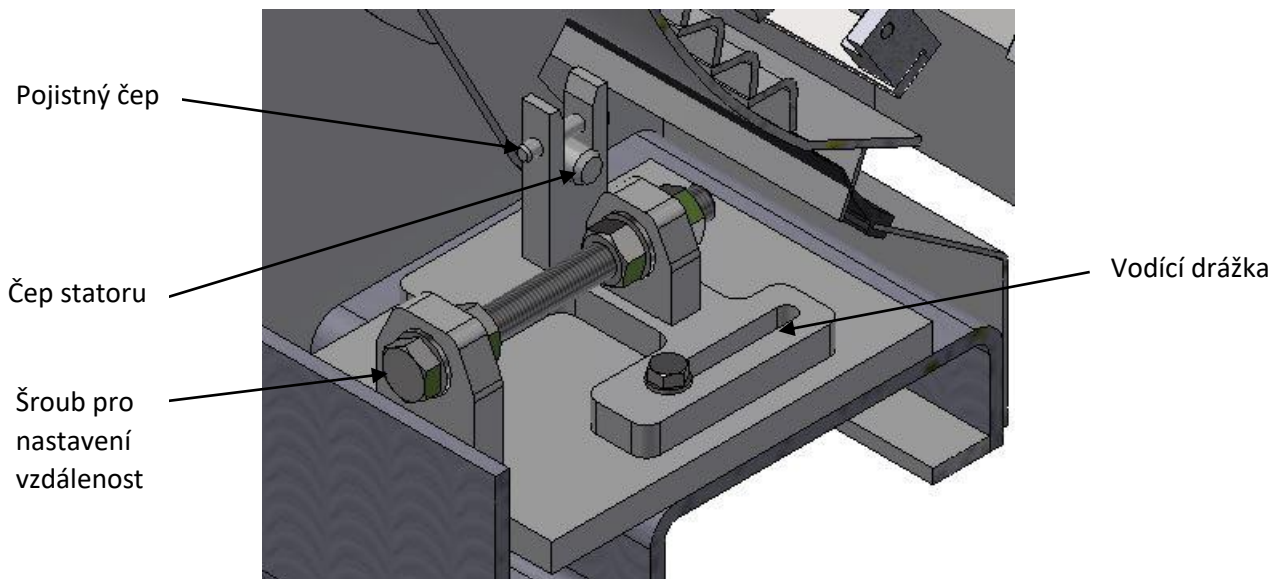
Jelikož základ statoru tvoří skružený plech s navařenými výztuhami je téměř nemožné dosáhnout přesně požadované geometrie, proto je stator uložen na čtyřech posuvných bodech, které umožňují vyrovnat výrobní nerovnosti a zajistit tak stejnou vzdálenost statoru od rotoru v celé délce.

Horní úchyt tvoří jednoduché svařené výpalky, které jsou uloženy na dlouhém šroubu s maticemi, pomocí kterých se nastavuje poloha statoru. Stator je s horními úchyty spojen pomocí čepu, který je zajištěn závlačkou.



Obr. 36: Horní úchyt statoru

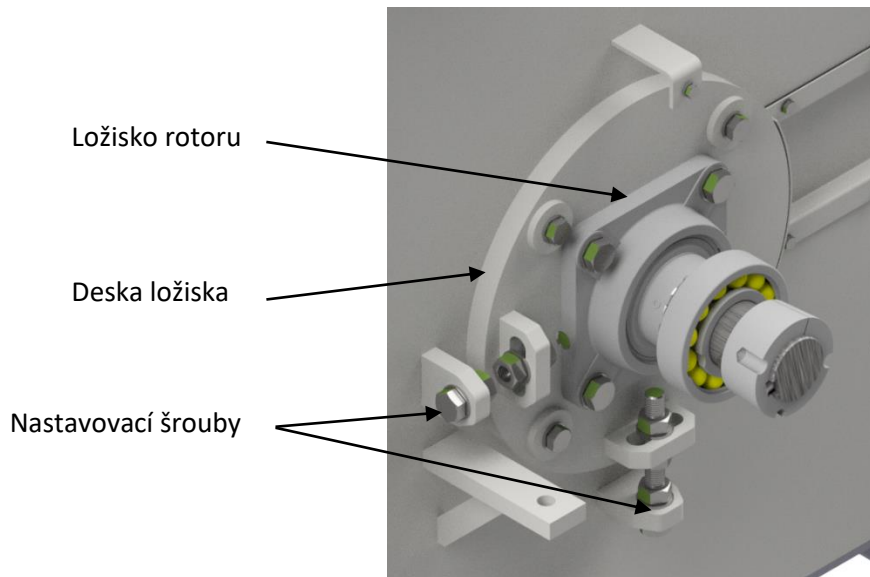
Spodní úchyt tvoří obdobně svařené výpalky, navíc je zde v jednom výpalku vodící drážka, ve které je šroub, který vede výpalek v požadované trajektorii. Poloha statoru je opět nastavována dlouhým šroubem s maticemi. Stator je v úchytu uložen pomocí čepu ve vypálené drážce a z vrchu zajištěn čepem.



Obr. 37: Spodní úchyt statoru

3.8. Uložení ložiska statoru

Ložiska rotoru nejsou umístěna přímo na rámu loupáčky, ale jsou umístěna na desce, která umožňuje nastavit požadovanou polohu ložisek a zajistit tak jejich souosost a kompenzovat nepřesnosti výroby. Poloha desky se nastavuje pomocí dvou šroubů.



Obr. 38: Uložení ložiska rotoru

3.9. Uložení řemenic na rotoru a elektromotoru

V původním návrhu byly řemenice rotoru a elektromotoru spojené s hřídelí pomocí těsného pera. U tohoto spojení náboje s hřídelí je však velmi obtížné při montáži nastavit vzájemnou polohu řemenic. Z tohoto důvodu byl požadován jiný způsob spojení řemenic s hřídelemi.

V novém návrhu byly použita svěrná upínací pouzdra Taper Lock. Tato pouzdra jsou spojena s hřídelem pomocí těsného pera. V řemenici je kuželová díra a vnější povrch pouzdra má také kuželový tvar, krouticí moment je přenášen pomocí tření mezi dírou a pouzdrem. Tato pouzdra umožňují snadné nastavení polohy řemenice na hřídeli.



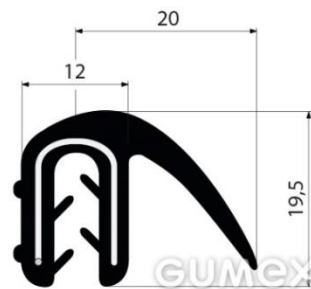
Obr. 39: Upínací pouzdro Taper Lock [19]

3.10. Utěsnění rotorového prostoru

Při loupání semen slunečnice vzniká velké množství mastného prachu, proto je potřeba dobře utěsnit prostor rotoru. Boky statoru jsou utěsněné pomocí profilu U-PIRELI s kovovou výztuží s bočním těsněním. Těsnění je nasazené na svařený výpalek, který má podobnou geometrii jako stator. Zvolené těsnění dovoluje deformaci až 17 mm, což je dostatečné pro pokrytí geometrických nepřesností výroby.

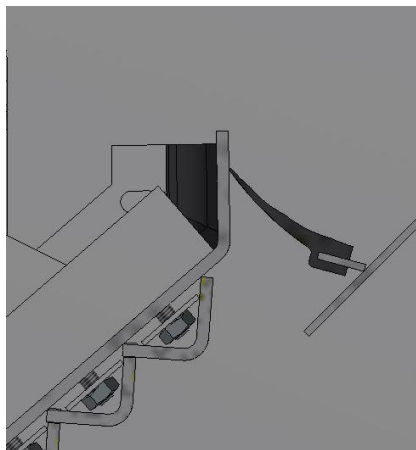


Obr. 40: Boční těsnění statoru

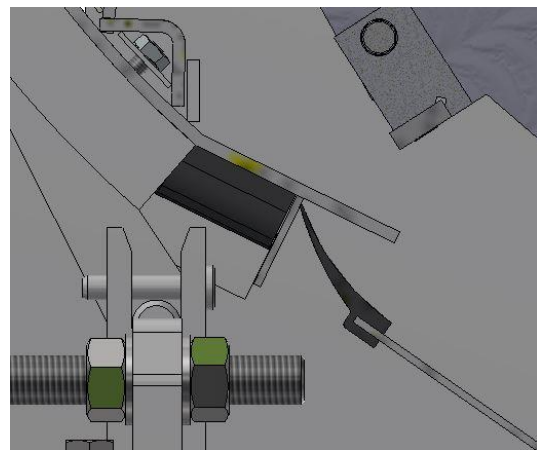


Obr. 41: Profil U-PIRELI s kovovou výztuží s bočním těsněním [20]

Horní a spodní část statoru je utěsněna pomocí profilu U-PIRELI s kovovou výztuží s praporkem. Toto těsnění umožňuje deformaci až 40 mm. Horní a spodní část statoru se utěsní natlačením statoru na toto těsnění.



Obr. 42: Utěsnění horní části statoru

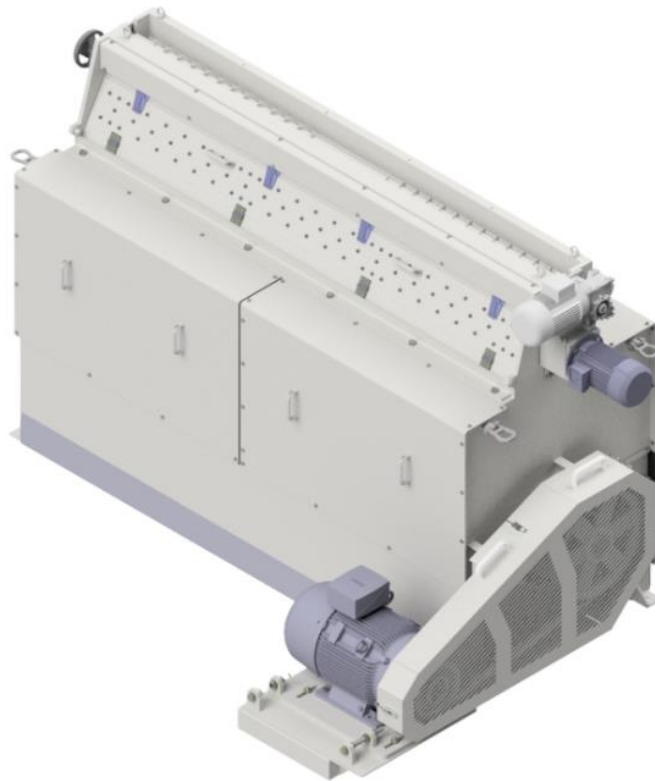


Obr. 43: Utěsnění spodní části statoru



Obr. 44: Profil U-PIRELI s kovovou výztuží s praporkem [21]

Pro zajištění, co nejlepšího utěsnění, jsou na krytech, které zakrývají stator a prostor pro výměnu lopatek na rotoru, nalepená plochá těsnění.



Obr. 45: Kompletně sestavený model upraveného konstrukčního řešení vysokokapacitní loupačky

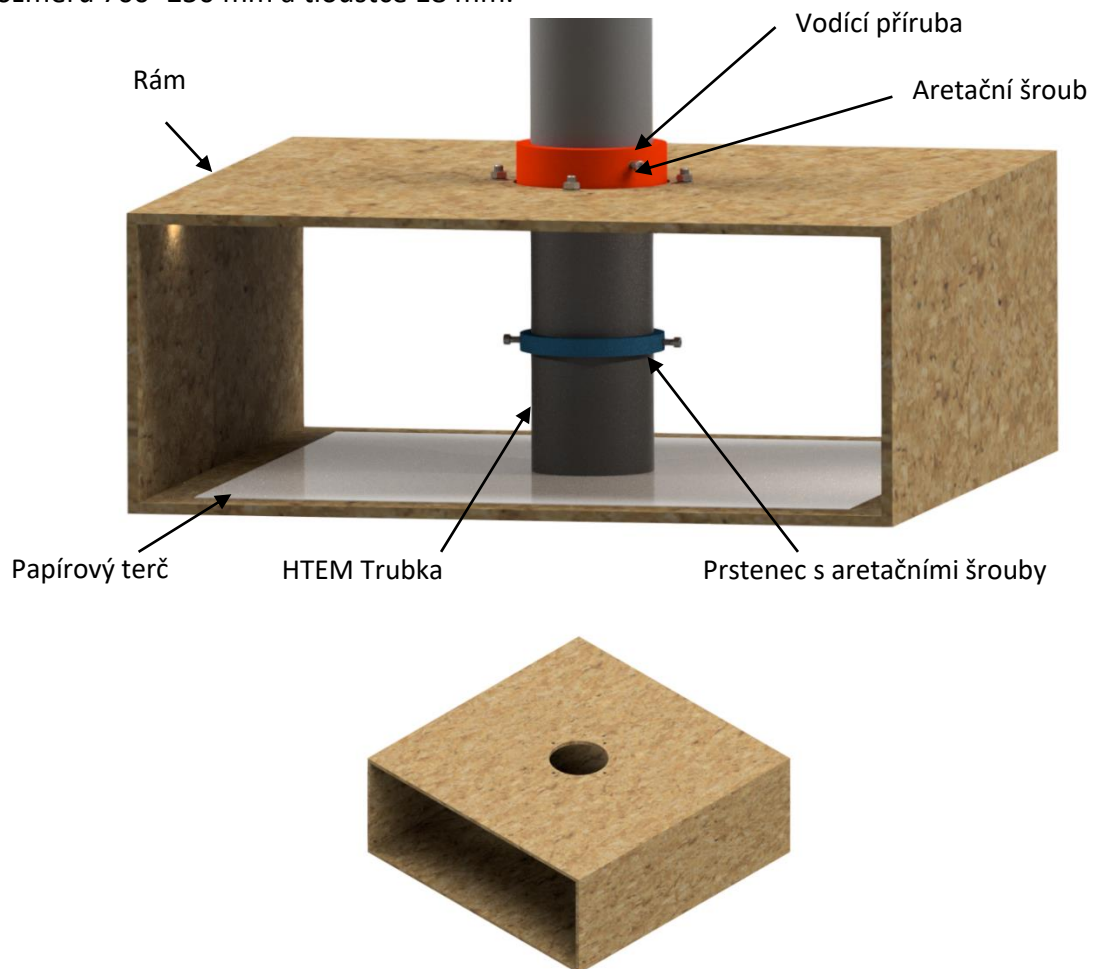
4. Měření sypného úhlu

Při simulaci sypkých hmot je potřeba znát kromě objemové hmotnosti materiálu také statický a dynamický součinitel tření materiálu, které získáme ze znalosti sypného úhlu. Na základě kapitoly o sypném úhlu byly navrženy dva standy pro získání těchto hodnot.

Na základě maximálních rozměrů semínek slunečnice, kde velká semínka mohou mít maximální rozměr 10-12 mm, byla pro měření statického sypného úhlu zvolena metoda navrstvení a pro měření dynamického sypného úhlu byl navržen stand na principu rotujícího válce.

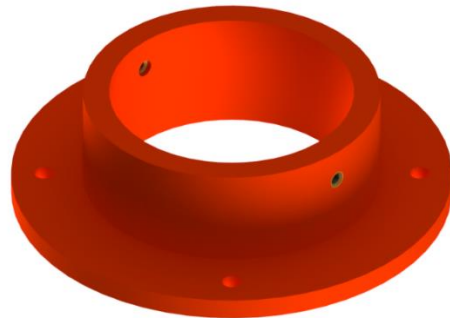
4.1. Stand na měření statického dynamického úhlu

Tento stand byl navržen na principu měření úhlu navrstvení. Základ standu tvoří rám z OSB desek. Spodní a horní deska rámu má rozměr 700×700 mm a tloušťku 18 mm. V horní desce je otvor pro vodící přírubu o průměru 140 mm. Boční stěny rámu tvoří dvě OSB desky o rozměru 700×250 mm a tloušťce 18 mm.



Obr. 46: Rám standu

V otvoru horní desky rámu je umístěna vodící plastová příruba vytištěná na 3D tiskárně. Tato příruba slouží k vedení trubky s měřeným sypkým materiálem. V přírubě jsou dva otvory pro závitové vložky do plastu, ve kterých jsou umístěny aretační šrouby, které slouží k fixaci trubky s materiálem při měření průměru navrstveného materiálu a otvory pro uchycení k rámu.



Obr. 47: Vodící příruba



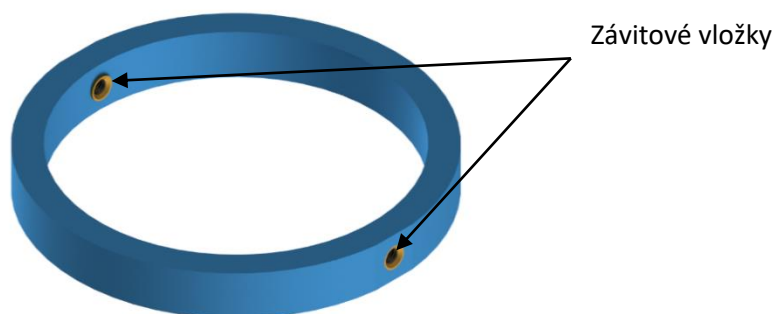
Obr. 48: Závitová vložka

Na násypku standu byla použita HTEM trubka o průměru 100 mm a délce 500 mm. Tyto trubky se běžně používají na odpadní potrubí.



Obr. 49: HTEM trubka [22]

Na trubce je umístěn prstenec vytištěný na 3D tiskárně, který slouží k nastavení maximální výšky zdvihu trubky s měřeným materiálem. V prstenci jsou dva otvory se závitovými vložkami do plastu, ve kterých jsou umístěny šrouby určené k aretaci prstence na trubce v požadované výšce zdvihu.



Obr. 50: Prstenec pro nastavení výška

Pro snadné měření průměru nasypaného kužele je na základní desce rámu umístěn vytištěný terč. Průměry kružnic jsou odstupňovány po 10 mm. Maximální měřitelný průměr kužele je 600 mm.



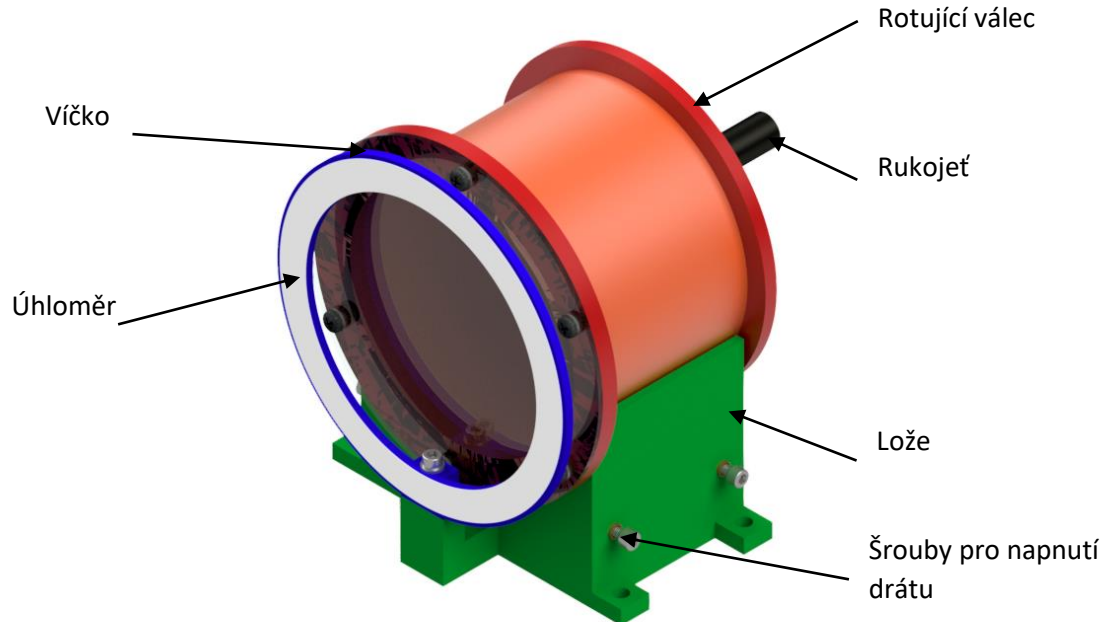
Obr. 51: Stand na měření statického sypného úhlu



Obr. 52: Stand na měření statického sypného úhlu 2

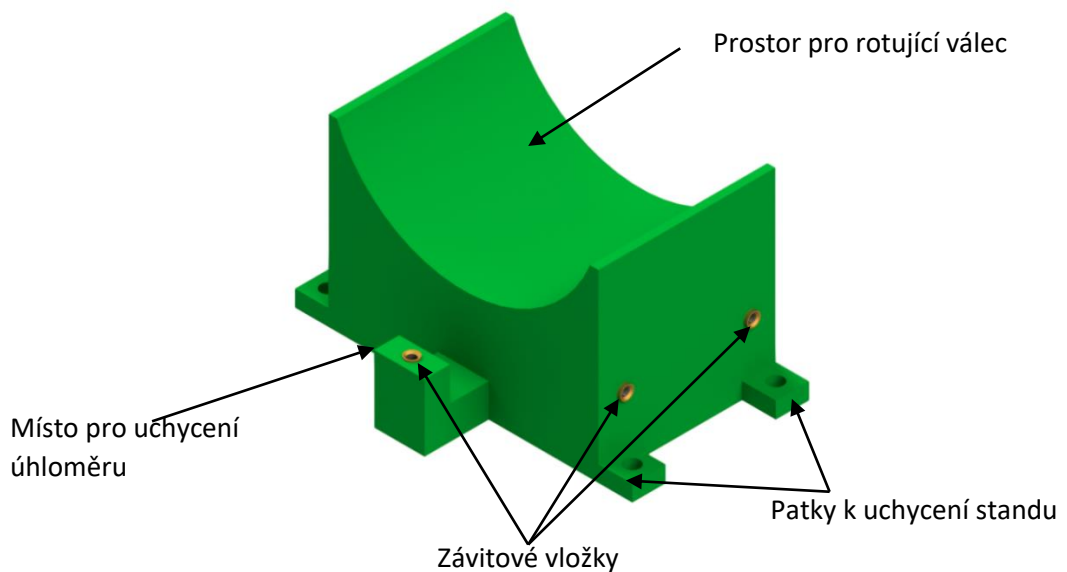
4.2. Stand na měření dynamického sypného úhlu

Tento stand je založen na principu rotujícího válce. Konstrukce standu je navržena co nejjednodušeji. Všechny díly, kromě válce, jsou vytištěné na 3D tiskárně a válcem se otáčí ručně.



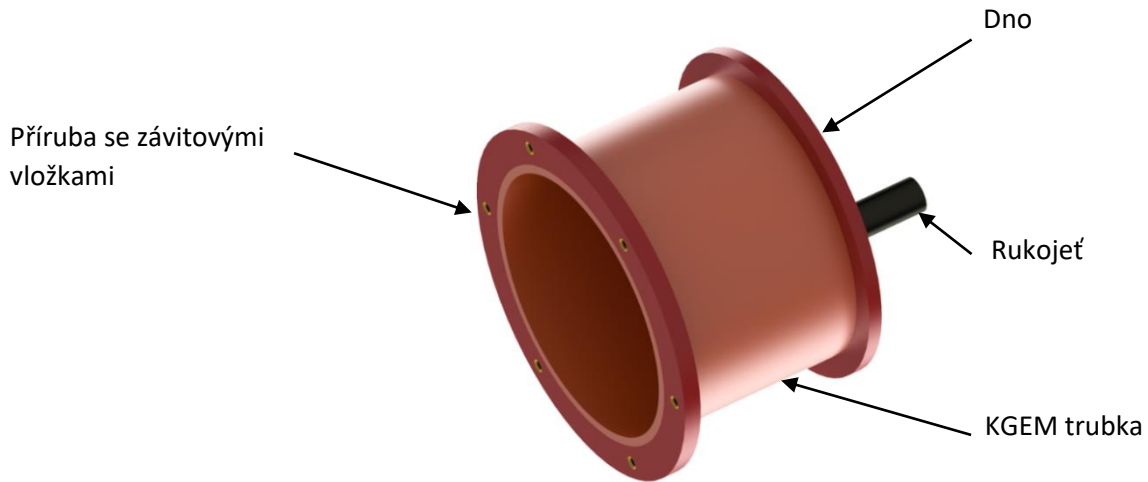
Obr. 53: Model standu na měření dynamického sypného úhlu

Základ standu tvoří plastové lože, ve kterém je uložen rotující válec. V tělese lože jsou otvory pro závitové vložky, ve kterých jsou šrouby, na kterých je přes válec natažený napnutý drát, který zajišťuje správnou polohu válce v loži. V přední části lože je úchyt s otvorem a závitovou vložkou. Na tomto úchytu je umístěný rámeček úhlooměru. V rozích lože jsou patky s otvory pro uchycení standu.

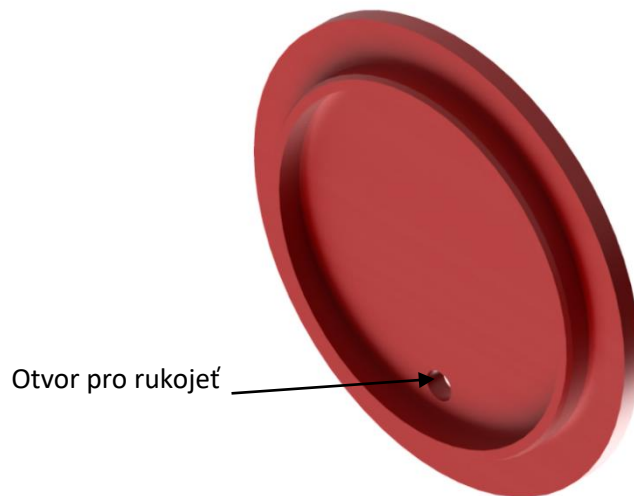


Obr. 54: Lože standu

Válec tvoří KGEM trubka o vnitřním průměru 150 mm a délce 120 mm. Na jednom konci válce je nalepené dno a na druhém konci je nalepená příruba se závitovými vložkami pro uchycení víčka. Víčko tvoří plexisklo o tloušťce 3 mm s otvory pro šrouby. Dno má na sobě nákrůžek pro snadné vystředění v trubce. Ve dně je otvor pro uchycení rukojeti.



Obr. 55: Rotující válec



Obr. 56: Dno válce



Obr. 57: Stand na měření dynamického sypného úhlu

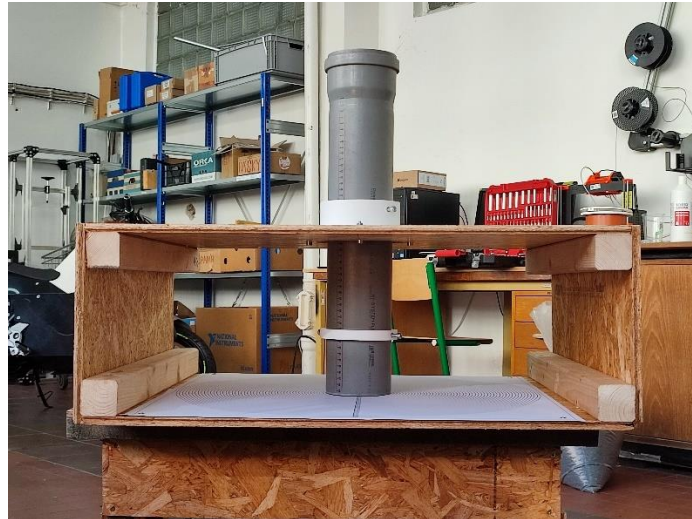
Pro snadné odečítání měřeného úhlu je před válcem úhloměř, ze kterého se odečte hodnota dynamického sypného úhlů. Tento způsob měření je možné použít pouze pokud je válec z poloviny zaplněn materiálem, pokud by tak tomu nebylo, bylo by nutné měření nafotit a z fotek určovat úhel, který materiál ve válci zaujme.

4.3. Měření sypného úhlu

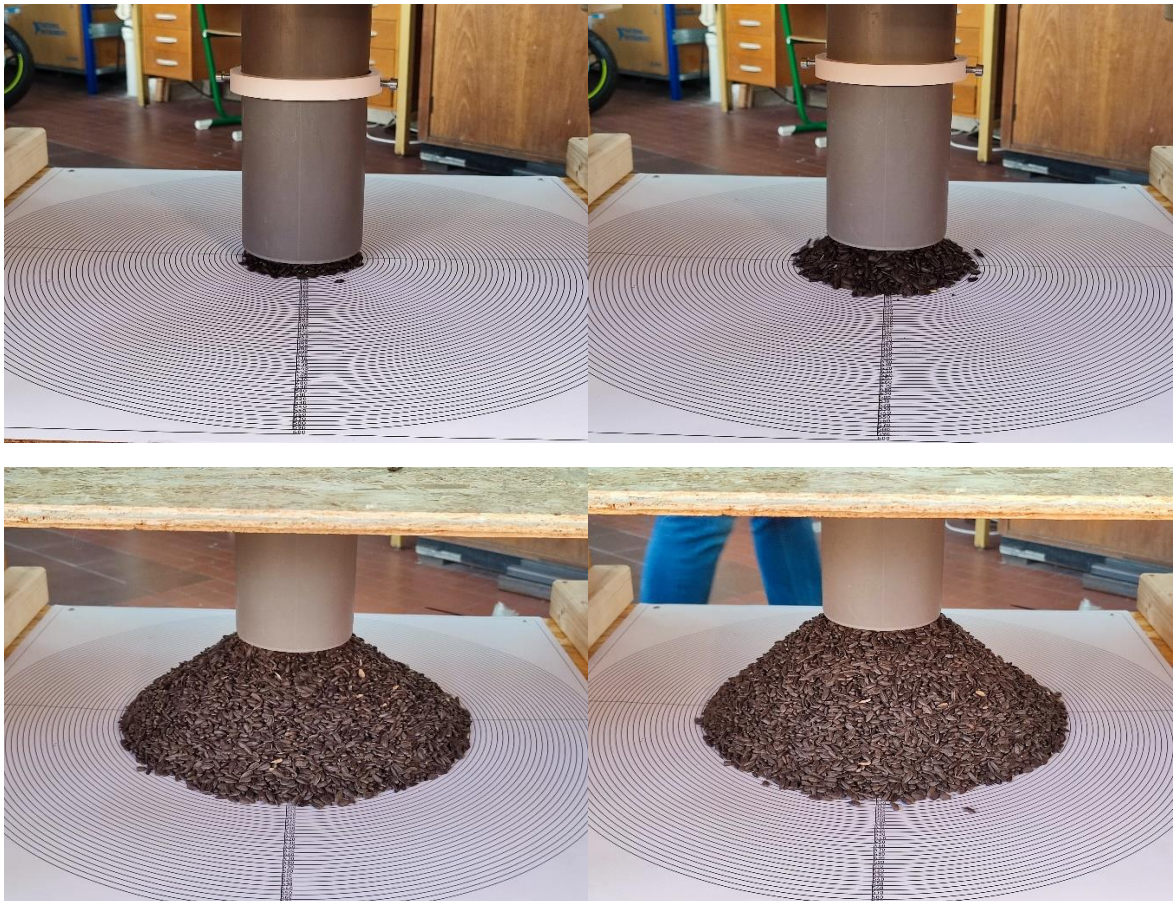
K měření statického a dynamického sypného úhlu byla použita semena slunečnice o vlhkosti 18 %. Měření probíhalo při pokojové teplotě 20 °C.

4.3.1. Měření statického sypného úhlu

Před zahájením měření byla pomocí prstence na trubce standu nastavena maximální výška zdvihu trubky na $h_K=100$ mm. Následně byla trubka naplněna semeny slunečnice. Po naplnění, bylo zahájeno pomalé zdvihání. Po dosažení maximální výšky byla trubka zaaretována a z terče byl odečtený průměr vzniklého kužele. Toto měření bylo provedeno 10krát.



Obr. 58: Stand připravený k měření



Obr. 59: Postupné vrstvení hromady

Tab. 1: Průměr měřeného kužele

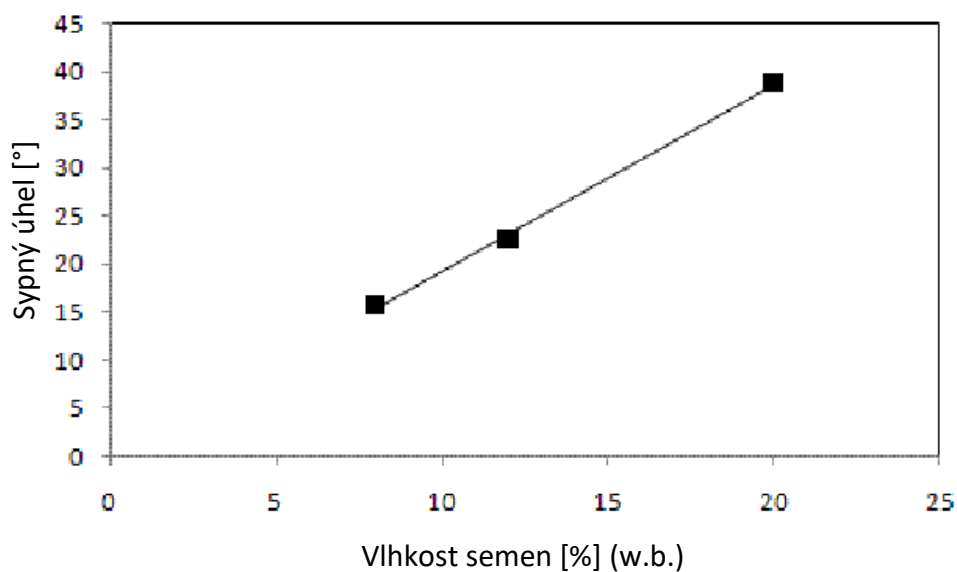
Měření	d_k [mm]
1	330
2	350
3	330
4	350
5	360
6	370
7	350
8	360
9	370
10	370
$\overline{d_K}$	354

Statický sypný úhel získáme dosazením průměrné hodnoty průměrů kuželů do rovnice (3). Součinitel statického tření μ_s získáme dosazením statického sypného úhlu do rovnice (4).

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{2h_K}{\overline{d_K} - d_T}\right) = \arctan\left(\frac{2 \cdot 100}{354 - 100}\right) = 38,2^\circ \quad (3)$$

$$\mu_s = \arctan \theta_s = 0,66 \quad (4)$$

Získaná hodnota sypného úhlu odpovídá hodnotě dle studie „Study on mechanical properties of sunflower seeds“, která se zabývá vlastnostmi slunečnicových semen. [23]



Obr. 60: Velikost sypného úhlu slunečnicových semen v závislosti na vlhkosti semen [23]

4.3.2. Měření dynamického sypného úhlu

Na standu pro měření dynamického sypného úhlu se odečítá přímo hodnota dynamického sypného úhlu θ_D z úhlooměru, který je umístěn před rotujícím válcem. Aby bylo možné takto odečítat hodnotu úhlu, musí být válec zaplněn do poloviny semenou slunečnice. Po naplnění a uzavření válce plexisklem je válec umístěn do lože. V loži je zajištěn dvěma napnutými dráty. Kvůli snížení tření mezi ložem a válcem byl válec namazán olejem. Při měření bylo válcem ručně otáčeno. Měření probíhalo 90 vteřin a během tohoto času bylo z úhlooměru odečteno 10 hodnot dynamického sypného úhlu.



Obr. 61: Naplněný stand před měřením

Tab. 2: Hodnoty dynamického sypného úhlu

Měření	θ_D [°]
1	30
2	32
3	30
4	31
5	34
6	33
7	32
8	31
9	30
10	30
$\overline{\theta_D}$	31,3

Hodnota dynamického sypného úhlu by měla být dle rovnice (5) 80 % z hodnoty statického sypného úhlu.

$$\theta_{Dteor} = 0,8 \cdot \theta_S = 0,8 \cdot 38,2 = 30,6^\circ \quad (5)$$

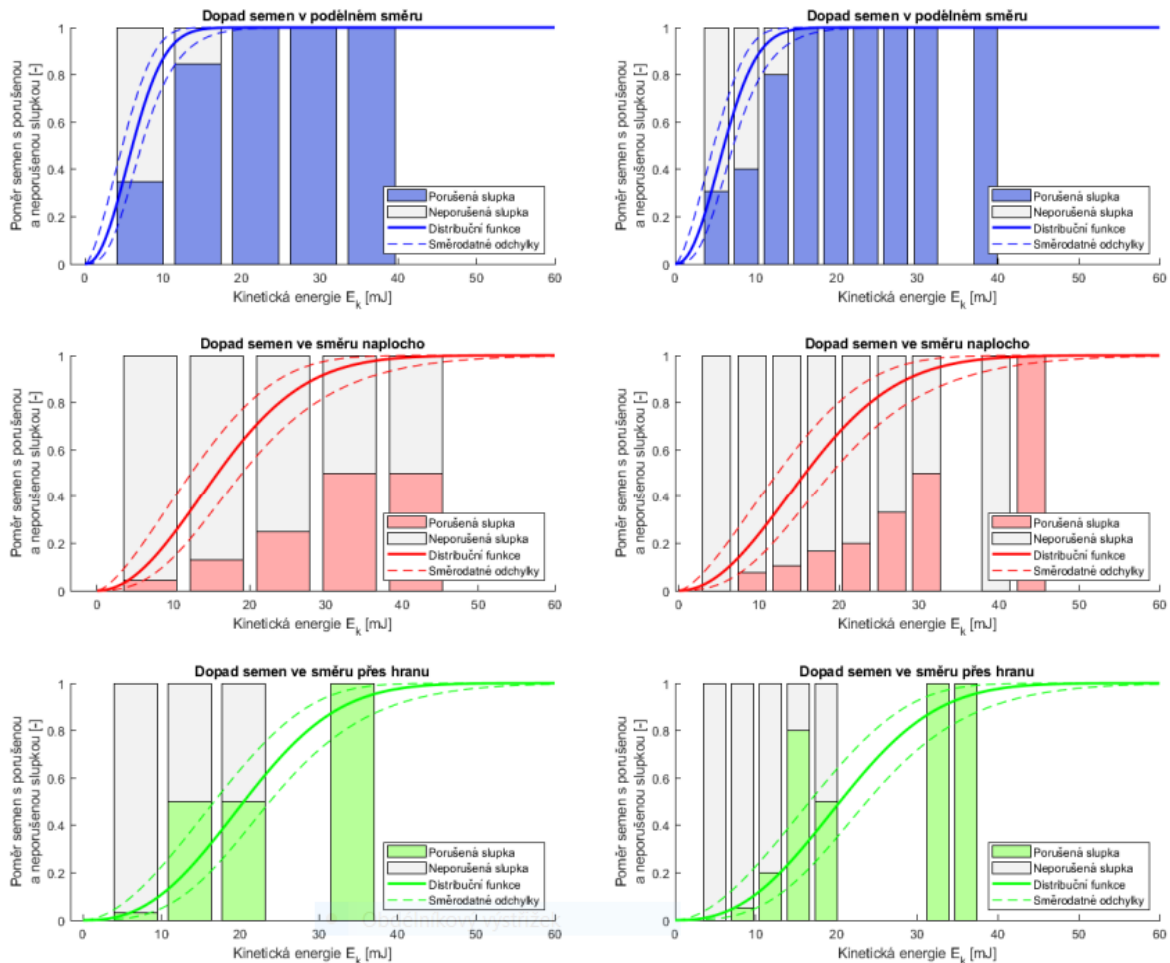
Naměřená hodnota se od teoretické liší o 0,7°, což mohlo být způsobeno nepřesností měřící metody.

Pro DEM simulaci bude použita hodnota dynamického součinitele tření, která vychází z teoretické hodnoty dynamického sypného úhlu dle rovnice (5).

$$\mu_D = \arctan \theta_D = 0,53 \quad (6)$$

5. Simulace loupání

K simulaci loupání byl použitý DEM software Ansys Rocky. Základní parametry stroje byly navrženy na základě potřebné nárazové energie slunečnicového semene získané ze studie: „Zkoumání energetické náročnosti loupání semen [1]“ na Obr. 62. Podle této studie byla zvolena minimální energie potřebná k porušení slupky v jakémkoliv směru semínka 40 mJ. Na základě této hodnoty bude určené množství vyloupaných semen. Semena, která budou mít při dopadu na nárazovou desku větší nárazovou energií než 40 mJ, budou považována za vyloupaná.



Obr. 62: Studie zkoumání energetické náročnosti loupání semen [1]

5.1. Návrh otáček rotoru

Z rovnice (7), která vyjadřuje kinetickou energii semínka a její hodnota je 40 mJ, byla získána dle rovnice (8) rychlost semínka při dopadu na nárazovou desku.

$$E_s = \frac{1}{2} \cdot m_s \cdot v_s^2 \quad (7)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{2 \cdot E_s}{m_s}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{0,065 \cdot 10^{-3}}} = 32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (8)$$

Pro zjednodušení návrhu, bylo uvažováno, že tuto rychlost předá semenům rotor při jejich kontaktu. Vzhledem k velmi krátké vzdálenosti mezi lopatkami rotoru a nárazovou deskou bylo zanedbáno zpomalení semena před dopadem na desku. Po tomto zjednodušení odpovídá tato rychlost obvodové rychlosti rotoru dle rovnice (9) ze, které byly po úpravě na rovnici (10), získány minimální otáčky rotoru.

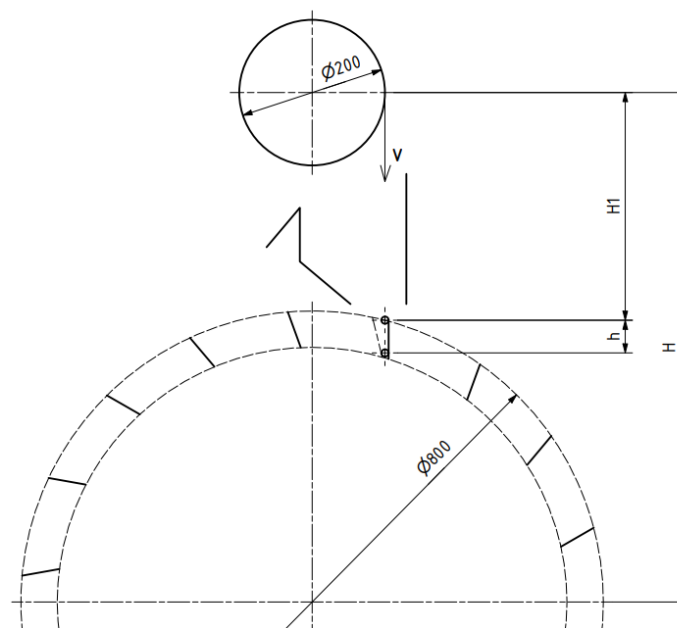
$$v_s = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{Rmin}}{60} \quad (9)$$

$$n_{Rmin} = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{60 \cdot 32}{\pi \cdot 0,8} = 764 \text{ min}^{-1} \quad (10)$$

Provozní otáčky byly zvoleny $n_R = 800 \text{ min}^{-1}$.

5.2. Návrh výšky lopatky rotoru

Pro původní návrh byla výška lopatek navržena z volného pádu semínka ze separátoru na rotor s počáteční rychlostí udělenou separátorem. Výsledná výška je vzdálenost, kterou semínko uletí, než se dostane do kontaktu s následující lopatkou na rotoru. Na základě této úvahy byla získána minimální výška lopatek 25 mm.



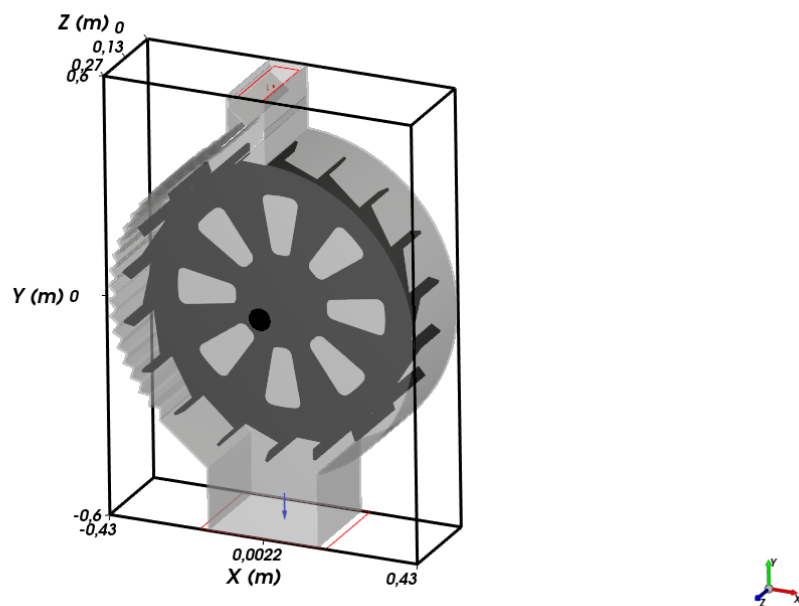
Obr. 63: Schéma návrhu výšky lopatky

Po úpravě konstrukce, již tento výpočet neodpovídá, také není vhodné uvažovat sypkou hmotu, jako hmotný bod, spíše se chová jako kapalina. Výška lopatek nové konstrukce bude stanovena na základě výsledků simulací provozu stroje v následujících kapitolách. Výška lopatek pro první simulaci byla zvolena 30 mm.

5.3. Příprava modelu

Jelikož u tohoto druhu loupáčky je zpracované množství přímo úměrné délce rotoru, mohl být model k simulaci zmenšen a byl tak ušetřen výpočetní čas. Délka rotoru a nárazové desky modelu je tedy 10krát menší (230 mm), také objemový tok semen je 10krát menší (1,2 t/hod), průměr rotoru (800 mm) a výška lopatek zůstala stejná (30 mm)

Kvůli snížení nároků na výpočetní kapacitu byl model zjednodušen a rozdělen na čtyři Stl. modely (nárazová deska, rám, násypka a rotor). Otáčky rotoru byly nastaveny na 800 ot/min.



Obr. 64: Importovaná geometrie

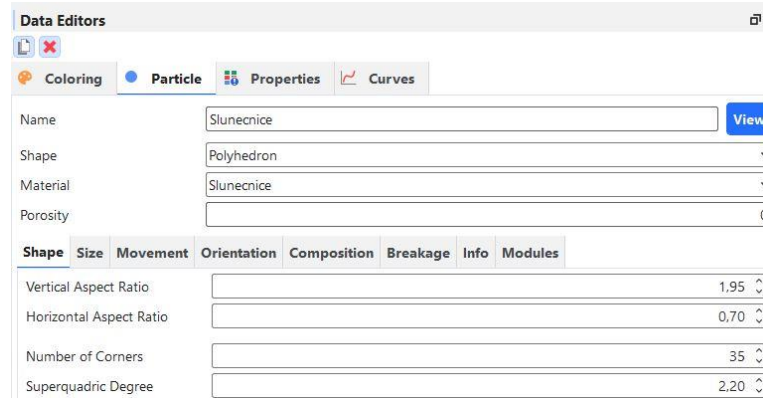
Pro simulaci byly použity mnohostěnné částice. Velikost částic byla definována pomocí průměru odpovídající koule. Byly použity tři velikosti částic viz Tab. 3.

Tab. 3: Velikost částic a jejich rozložení

Průměr odpovídající koule [mm]	Procentuální rozložení [%]
4,8	9
5,2	80
6	11

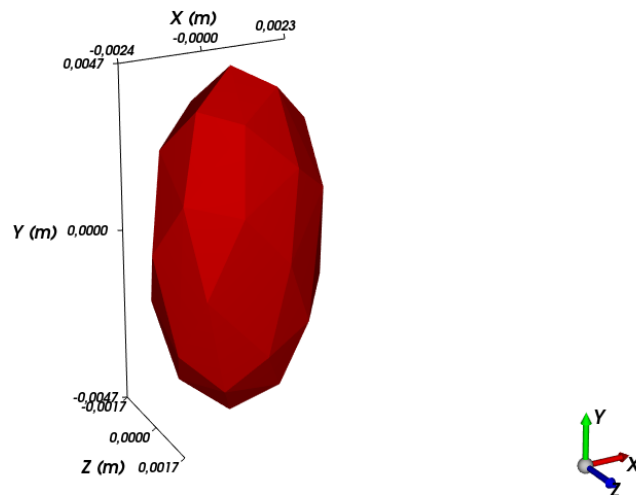
Objemová hmotnost slunečnice byla nastavena na 450 kg/m^3 . Statický součinitel tření byl nastaven na 0,66 a dynamický součinitel tření byl nastaven na 0,53.

Vstup částic byl umístěn do násypky v horní části modelu. Objemový tok částic byl nastaven na 1,2 t/hod.



Obr. 65: Nastavení velikosti částic

Slunecnice



Obr. 66: Mnohostěn reprezentující semeno slunečnice

5.4. Volba výpočetních modulů

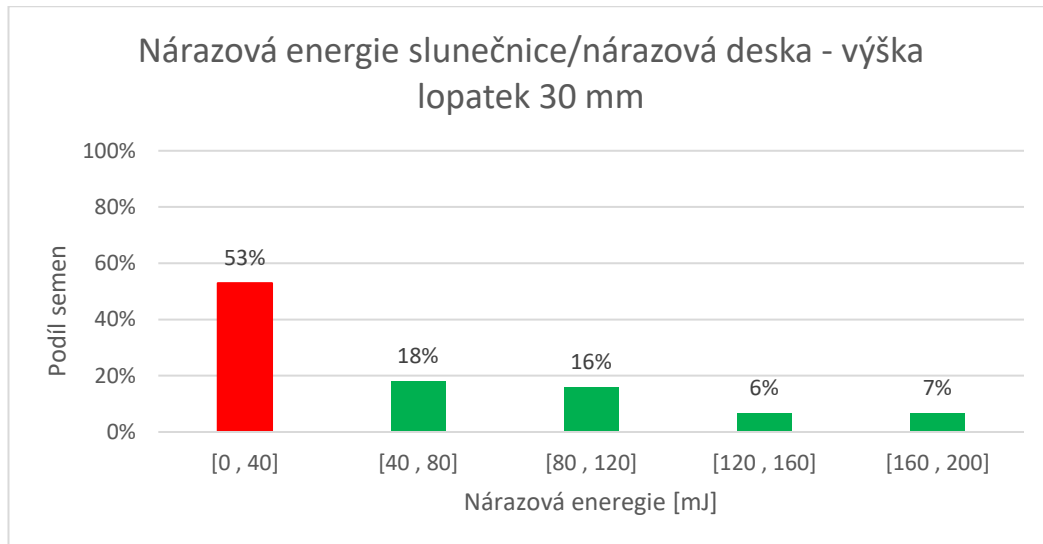
Počet vyloupaných semen slunečnice je vyhodnocován na základě minimální potřebné nárazové energie.

Proto byly zvoleny tyto moduly:

- Boundary Collision Statistics,
- Contacts Energy Spectra,
- Contacts Overlap Monitor,
- Inter-Group Collision Statistics,
- Particle Instantaneous Energies,
- Particles Energy Spectra.

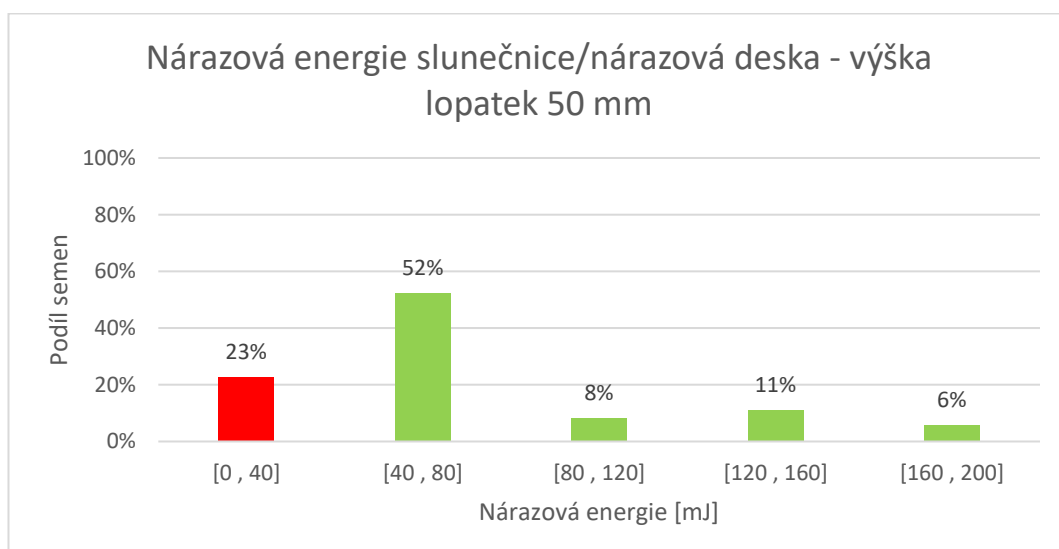
5.5. Vyhodnocení simulace

Výstupem simulace je graf zobrazující procentuální rozložení nárazové energie semen slunečnice na nárazovou desku. Z Obr. 67 je patrné, že nedojde k vyloupenutí 53 % semen. Požadavek na vyloupenutí 90 % semen, tak není splněn a je potřeba upravit výšku lopatek rotoru.

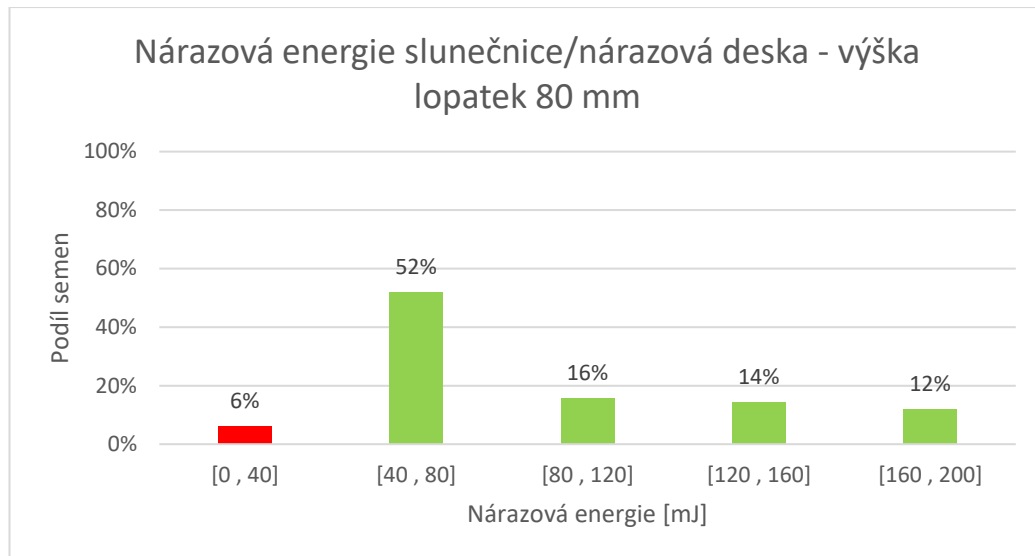


Obr. 67: Nárazová energie slunečnice/nárazová deska-výška lopatek 30 mm

Byly provedeny další dvě simulace se stejným nastavením a výškou lopatek rotoru 50 mm a 80 mm. Z Obr. 68 vyplývá, že výška lopatek 50 mm je stále nedostačující a dojde k vyloupenutí pouze 77 % semen slunečnice, oproti tomu z Obr. 69 je vidět, že u lopatek o výšce 80 mm dojde k vyloupenutí 94 % slunečnice.



Obr. 68: Nárazová energie slunečnice/nárazová deska-výška lopatek 50 mm



Obr. 69: Nárazová energie slunečnice/nárazová deska-výška lopatek 80 mm

Na základě simulací loupání a jejich výsledků budou na loupačce použité lopatky o výšce 80 mm. Dojde tak k vyloupenutí minimálně 94 % semen z 12 t/hod. Celkový počet vyloupenutých semen však může být ve skutečnosti větší, jelikož nárazová energie 40 mJ podle které je posouzeno, zda došlo k vyloupenutí semene, je potřeba při dopadu na plochu, pokud semeno dopadne na hranu, stačí k vyloupenutí pouze energie o velikosti 20 mJ.

6. Výpočet potřebného výkonu elektromotoru

Celkový výkon elektromotoru se skládá ze dvou částí, z výkonu potřebného k vyloupenutí semen a ztrátového výkonu.

Výkon potřebný k vyloupenutí požadovaného množství semen za hodinu je stanoven podle rovnice (11), kde výkon je roven kinetické energii hmotnostního toku semen.

$$P_l = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v_s^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{12000}{3600} \cdot 32 = 1\,700\text{ W} \quad (11)$$

Ztrátový výkon je odpor vzduchu rotujících lopatek rotoru. Pro výpočet vzdušného odporu na lopatkách rotoru bylo vycházeno z Newtonova vztahu (12) pro výpočet aerodynamické odporové síly.

$$F = \frac{1}{2} \cdot S_y \cdot C_d \cdot \rho \cdot v_u^2 \quad (12)$$

V našem případě je působící odporová síla navíc funkcí souřadnice x , jelikož rychlost ve směru kolmém na lopatku s poloměrem lineárně roste. Proto byl odvozen upravený vztah (13) aplikovaný na lopatku rotoru. Výsledný odpor lopatek rotoru byl vyjádřen ve formě ztrátového krouticího momentu, který je potřeba překonat (14).

$$\frac{dM_z}{z} = dF \cdot x = \left(\frac{1}{2} C_d \cdot \rho \cdot v \cdot dS \right) \cdot x = \left[\frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_R}{60} \cdot x \right)^2 \cdot l \cdot dx \right] \cdot x \quad (13)$$

$$M_z = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_R}{60} \right)^2 \cdot l \cdot z \cdot \frac{r_2^4 - (r_2 - h)^4}{4} \quad (14)$$

Ztrátový výkon byl získán dle rovnice (15).

$$P_z = M_z \cdot \omega_R = M_z \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n_R}{60} \quad (15)$$

Potřebný výkon elektromotoru jsme získali součtem ztrátového výkonu a výkonu potřebného k vyloupenutí požadovaného množství semen a uvažováním ztrát v řemenovém převodu a ztrát v ložiskách.

$$P = \frac{P_l + P_z}{\eta_{rem} \cdot \eta_{lož}} \quad (16)$$

Tento výpočet ztrátového krouticího momentu předpokládá lineární závislost momentu na počtu lopatek, v další části práce bude provedena CFD simulace, zda je tento předpoklad správný, popřípadě bude ztrátový moment získán ze simulace provozu stroje. CFD výpočet bude proveden v Ansys Fluent.

6.1. CFD výpočet

Teoretický výpočet proudění (CFD) je založen na řešení soustavy pohybových rovnic a rovnice kontinuity. Pohybové rovnice pro viskózní kapalinu jsou vyjádřeny nelineárními diferenciálními Navier-Stokesovými rovnicemi a určují rovnováhu mezi silami setrvačnými, plošnými, objemovými a třecími. Tyto rovnice jsou sestaveny pro diskrétní modelovanou oblast, kterou je třeba nejdříve rozdělit na síť výpočtových buněk. Linearizace soustavy těchto rovnic je provedena pomocí metody konečných objemů. Soustava linearizovaných rovnic je řešena iteračně. Výsledkem řešení jsou hydrodynamické veličiny (rychlost, tlak, turbulentní energie a disipace) v jednotlivých buňkách výpočtové oblasti. Pro simulaci proudění se nejčastěji používají modely $k-\epsilon$ nebo $k-\omega$. [24] [25]

6.1.1. Model $k-\epsilon$

Jedná se o dvourovnicový model, který obsahuje dvě transportní rovnice, které vyjadřují turbulentní vlastnosti proudění. První rovnice představuje turbulentní kinetickou energii k [m^2/s^2], druhá rovnice představuje turbulentní disipaci ϵ [m^2/s^3]. Turbulentní disipace vyjadřuje rozsah turbulence. Tento model je užitečným pro tok vrstvy s volným smykem s relativně malými gradienty tlaku. Model poskytuje dobré výsledky pro proudění u stěny, tak i pro vnitřní proudění. Ovšem za podmínky, že tlakové gradienty jsou malé. To znamená, že tento model není vhodný např. pro kompresory, u kterých dochází ke vzniku velkých tlakových gradientů. [25] [26]

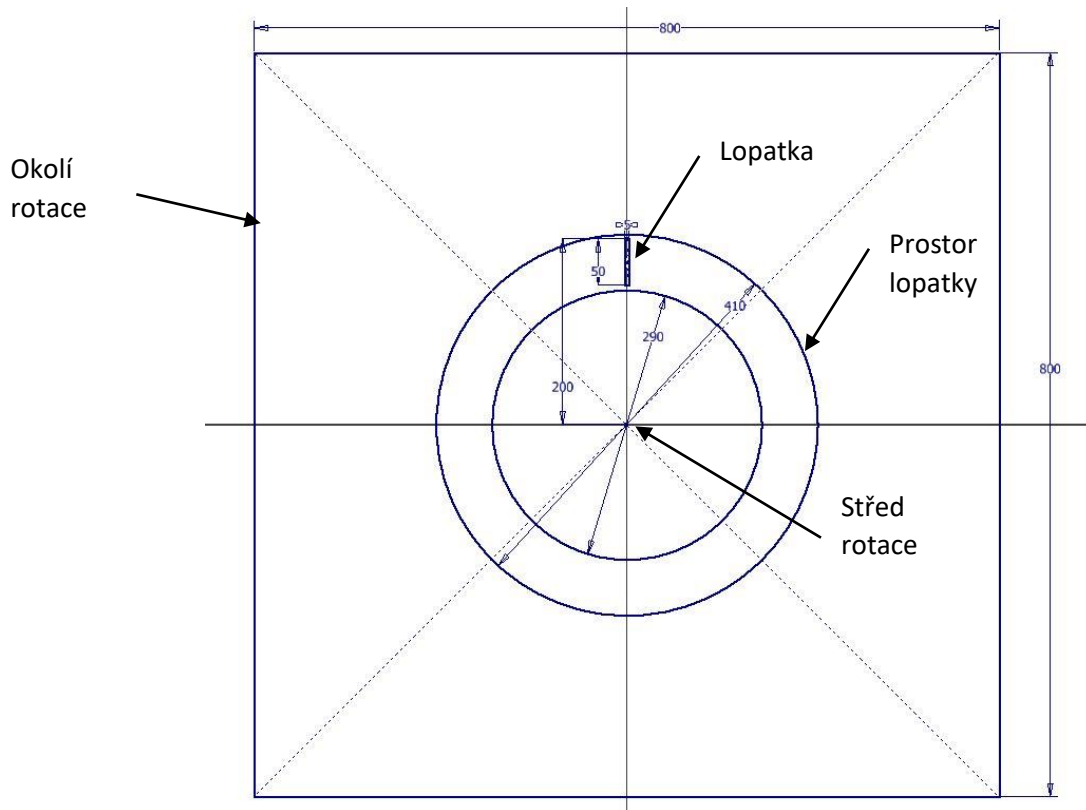
6.1.2. Model $k-\omega$

Model $k-\omega$ je také dvourovnicový model, takže obsahuje další dvě transportní rovnice, které reprezentují turbulentní vlastnosti proudění. První transportovanou veličinou je stejně jako v předchozím modelu $k-\epsilon$ kinetická energie k v turbulenci. Druhou veličinou je specifická ztráta ω . Specifická ztráta je proměnná, jenž určuje rozsah turbulence, zatímco první proměnná k určuje energii v turbulenci. Tento model se používá pro toky s nízkými hodnotami Reynoldsova čísla Re (30), kde je mezní vrstva relativně silná a viskózní podvrstva tím pádem může být vyřešena. [25] [26]

6.2. Ověření výpočtu pro jednu lopatku

Před simulováním provozu celého stroje, bude provedena simulace ztrátového výkonu pro jednu lopatku za účelem ověření nastavení simulace.

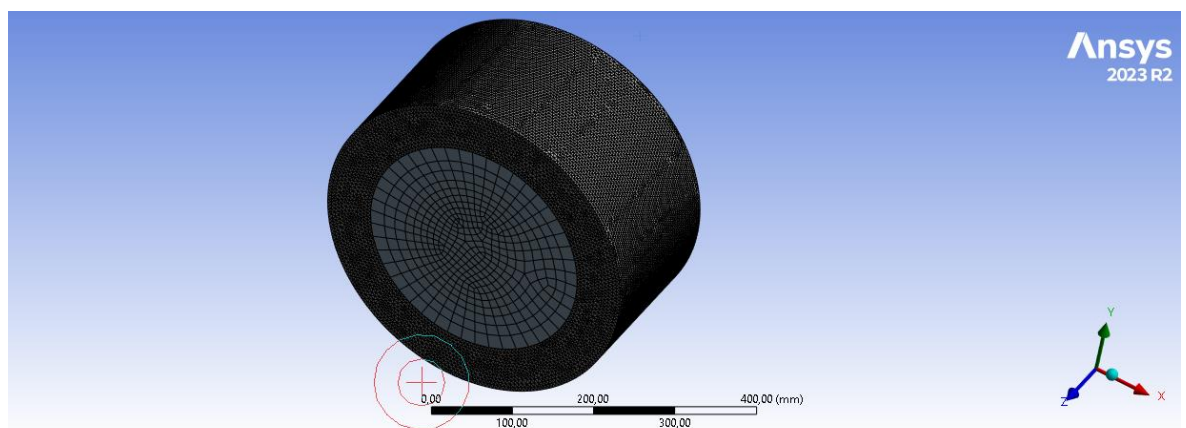
Pro simulaci byl vytvořen model lopatky o vnějším průměru 400 mm, výšce 50 mm, tloušťce 5 mm a délce 200 mm. Kolem lopatky byl vytvořen prostor o rozměrech 800×800×300 mm.



Obr. 70: Náčrt modelu pro simulaci 1 lopatky

6.2.1. Síťování modelu

Na síť modelu byly použity tři velikosti elementu o velikostech 5 mm, 25 mm a 40 mm. Abychom dosáhli, co nejpřesnějších výsledků, byly na prostor lopatky použité elementy o velikosti 5 mm. Elementy o velikosti 25 mm byly použité na síť středu rotace lopatek, na okolí rotace byly použité elementy o velikosti 40 mm. Elementy o větší velikosti byly použité hlavně kvůli snížení celkového počtu elementů a tím pádem byly sníženy požadavky na výpočetní kapacitu a byl také ušetřen výpočetní čas.



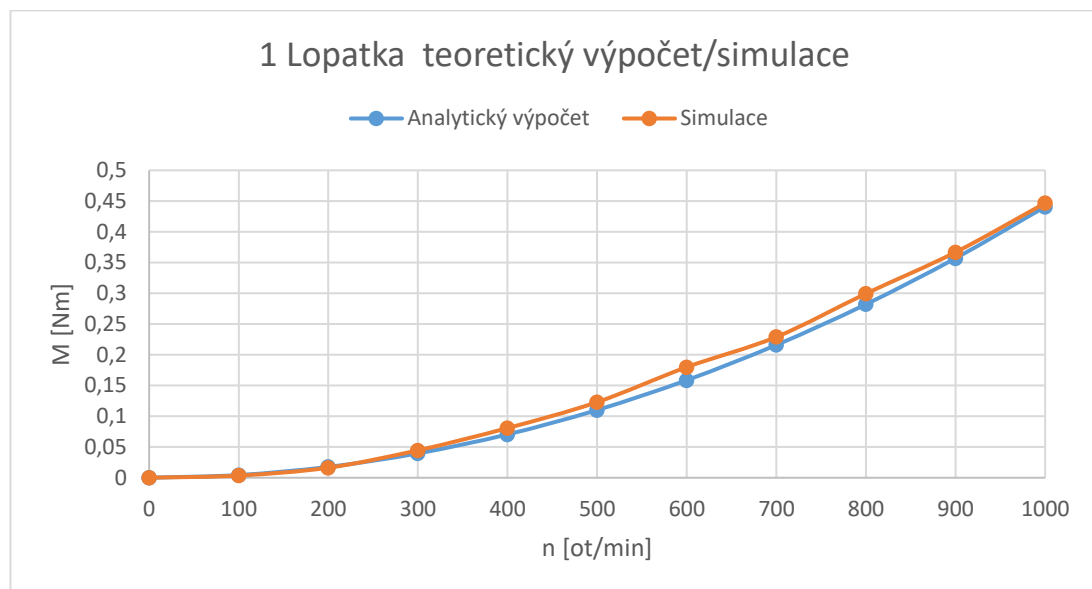
Obr. 71: Síť rotujícího prostoru 1 lopatky

6.2.2. Nastavení simulace

Prvně bylo v ose Y nastaveno gravitační zrychlení. Pro výpočet byl použitý výpočetní model k- ϵ . Prostor kolem lopatek byl vyplněn vzduchem o hustotě $1,225 \text{ kg/m}^3$. Velikost časového kroku byla nastavena na $0,05 \text{ s}$, během každého časového kroku bude provedeno 20 iterací a celkový počet kroků je nastaven na 100, výpočet tedy bude simulovat 5 vteřin rotace lopatky.

6.2.3. Vyhodnocení simulace

Ztrátový krouticí moment získaný ze simulace byl porovnán s hodnotami získanými analytickým výpočtem dle rovnice (14). Výsledky simulace a analytického výpočtu se dle Obr. 72 téměř shodují a je tak možné použít toto nastavení simulace pro další výpočty.



Obr. 72: Porovnání ztrátového výkonu teoretického výpočtu a simulace pro 1 lopatku

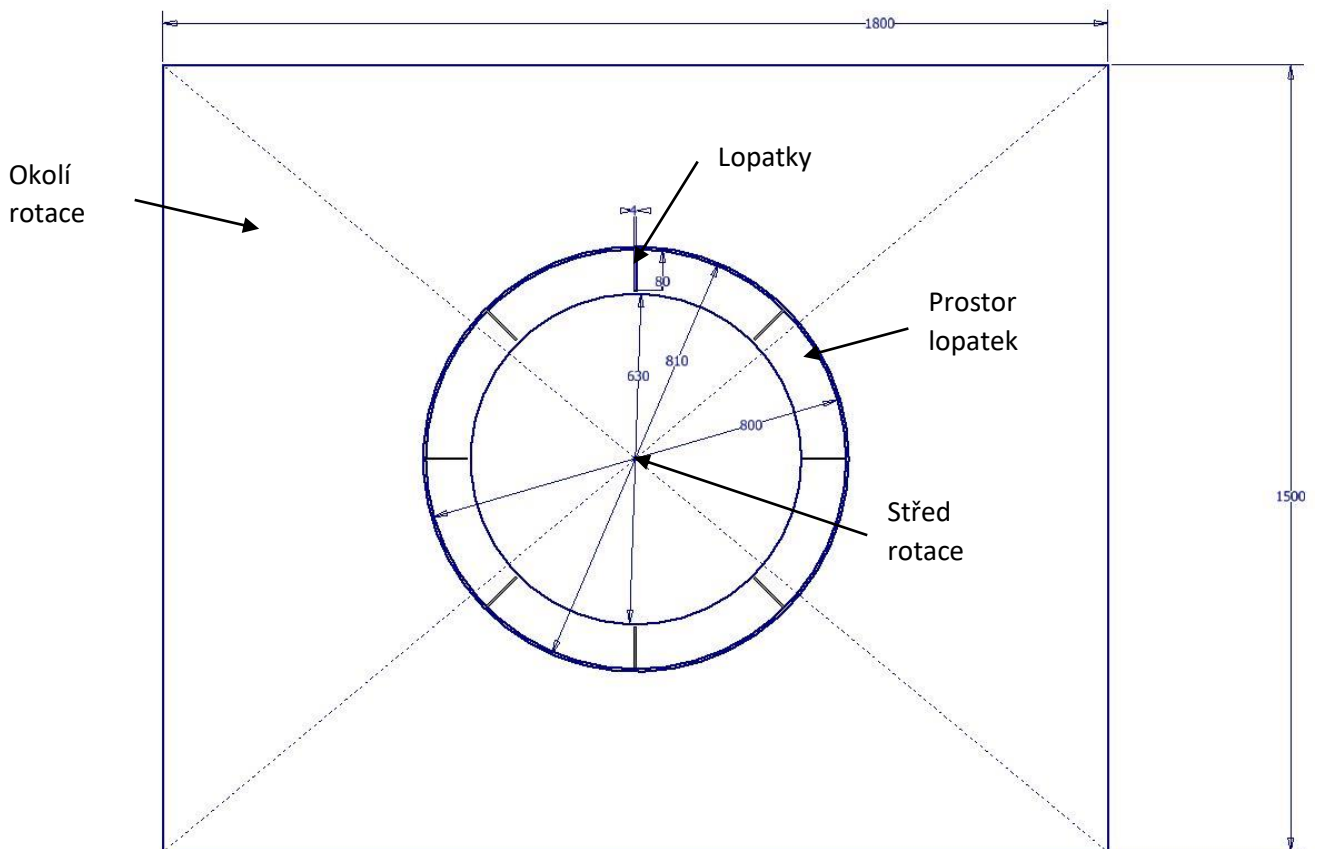
6.3. Vliv počtu lopatek

V této kapitole bude ověřen předpoklad lineární závislosti ztrátového momentu na počtu lopatek z rovnice (14). Bude tedy provedeno 10 výpočtů pro počet lopatek od 1 do 12.

6.3.1. Model a síť modelu

Pro tento výpočet bylo vytvořeno 12 modelů, které mají stejné rozměry lopatek a okolního prostoru, jen se liší jejich počet. Vnější průměr lopatek je 800 mm , výška lopatek je 80 mm , tloušťka je 4 mm a délka je 200 mm . Rozměry okolního prostoru jsou $1500 \times 1800 \times 300 \text{ mm}$.

Na síť v prostoru lopatek byly opět použité elementy o velikosti 5 mm a elementy o velikosti 25 mm a 40 mm byly použité na síť středu rotace a okolí rotace.



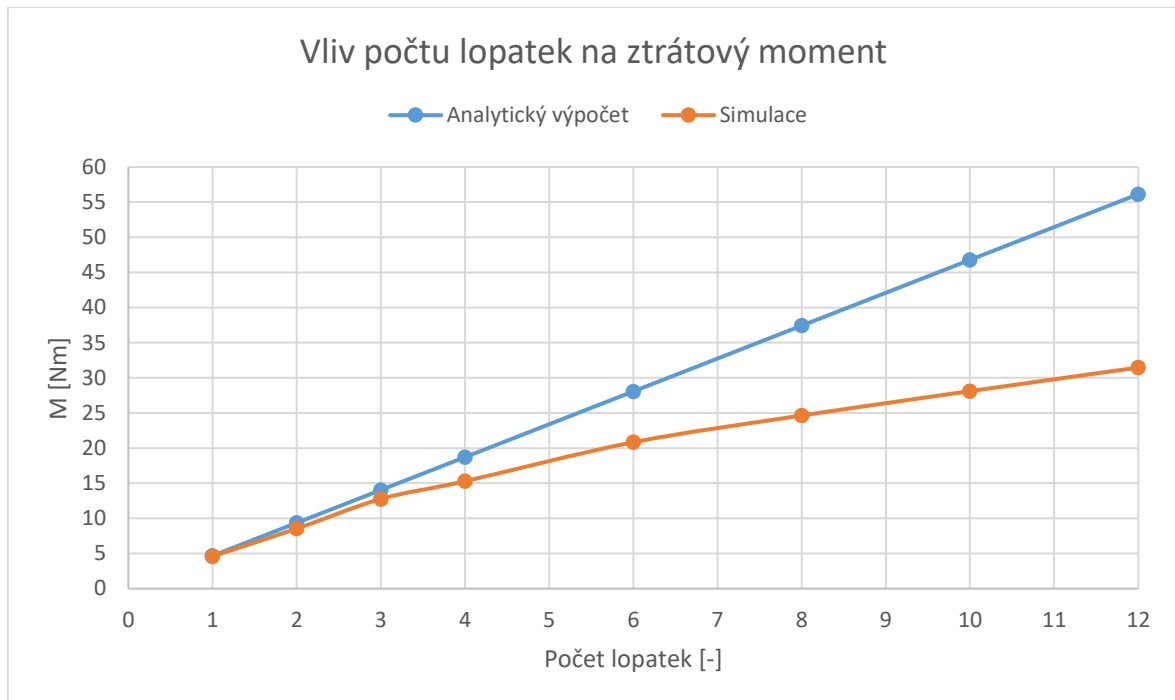
Obr. 73: Náčrt modelu pro 8 lopatek

6.3.1. Nastavení simulace

Nastavení výpočtů je téměř stejné, jako v předchozí simulaci, tedy bylo nastaveno gravitační zrychlení ve směru osy Y, byl použitý výpočetní model k- ϵ , hustota vzduchu byla nastavena na $1,225 \text{ kg/m}^3$. Bylo použité stejné nastavení i pro časové kroky. Tento výpočet byl však počítán pouze pro jednu hodnotu otáček a to 800 ot/min.

6.3.2. Vyhodnocení simulace

Z Obr. 74 je patrné, že analytická metoda se shoduje se simulací do 3 lopatek, pro více lopatek již není možné analytickou metodu použít. U 12 lopatek je analytická hodnota téměř dvakrát větší než u CFD výpočtu. Elektromotor navržený na základě analytického výpočtu je tedy značně předimenzovaný a není tedy tato metoda vhodná pro návrh potřebného elektromotoru. Namísto toho bude potřebný výkon elektromotoru získán ze ztrátového výkonu získaného z CFD výpočtu.



Obr. 74: Závislost ztrátového momentu na počtu lopatek

6.4. Vliv délky lopatek

Jelikož má rotor loupáčky délku 2,3 m, bylo by vhodné zmenšit model pro simulaci a snížit, tak nároky na výpočetní techniku a zkrátit, tak čas výpočtu. V této kapitole tedy ověříme, zda je ztrátový moment lineárně závislý na délce lopatek a je, tak možné zmenšit model pro simulaci a snížit výpočetní čas.

6.4.1. Model a síť modelu

Pro tento výpočet byl navrženo 6 modelů s 6 lopatkami o průměru rotace 400 mm, výšce lopatek 50 mm a tloušťce lopatky 5 mm. Délky lopatek byly zvoleny 100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm, 500 mm a 600 mm. Prostor okolí rotace má rozměry 800×800 mm a délka prostoru je vždy o 100 mm větší, než je délka lopatek.

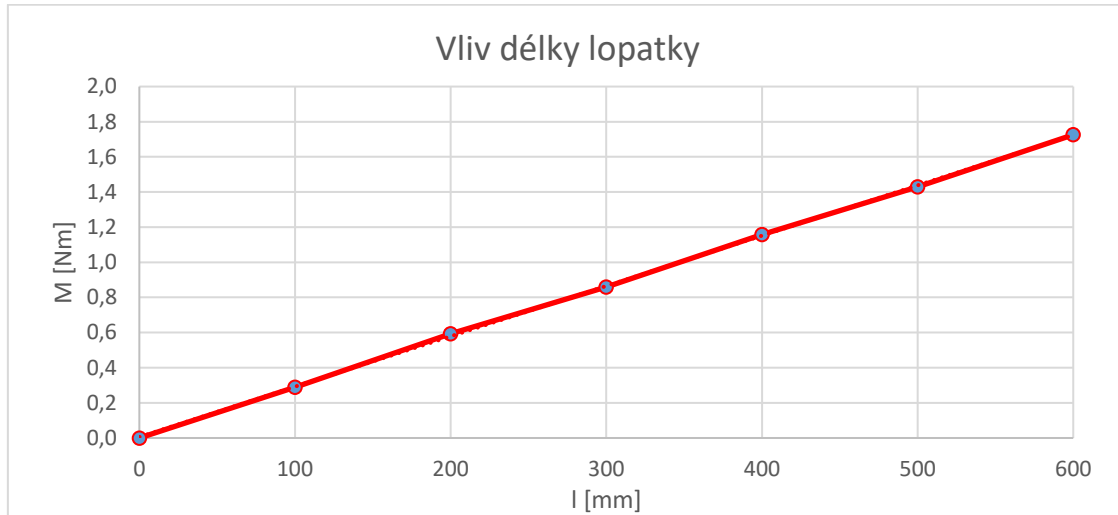
Na síť prostoru lopatek byly stejně, jako v předchozích výpočtech, použity elementy o velikosti 5 mm a na střed rotace a okolí byly použité elementy o velikosti 25 mm a 40 mm.

6.4.2. Nastavení simulace

K výpočtu byl použitý model k- ϵ a ve ose Y bylo nastaveno gravitační zrychlení. Otáčky prostoru lopatek byly nastaveny na 500 ot/min. Stejně jako v předchozích výpočtech byl časový krok nastaven na 0,05 s a bylo počítáno 100 časových kroků, kde během jednoho kroku proběhlo 20 iterací.

6.4.3. Vyhodnocení simulace

Z Obr. 75 vyplývá, že ztrátový moment na lopatkách je lineárně závislý na délce lopatek. Díky této závislosti není nutné simulovat ztrátový výkon loupáčky na modelu o délce 2,3 m, ale je možné model pro simulaci zmenšit a snížit tak požadavky na výpočetní techniku.



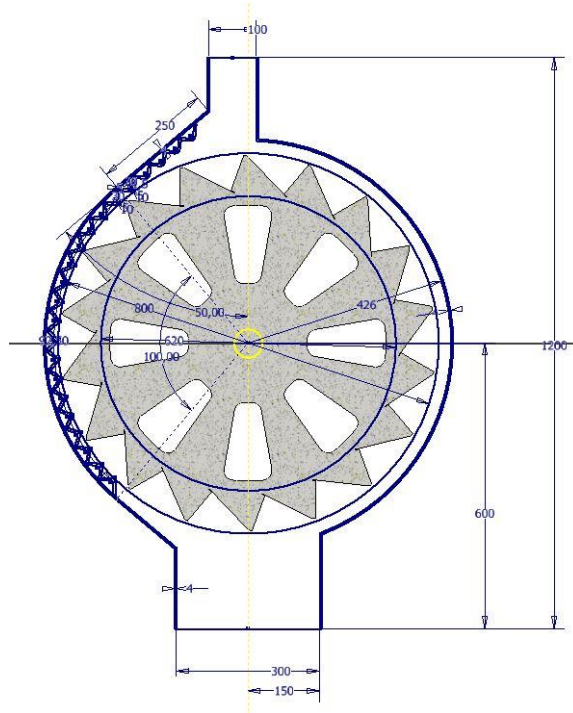
Obr. 75: Vliv délky lopatek

6.5. Výpočet ztrátového výkonu

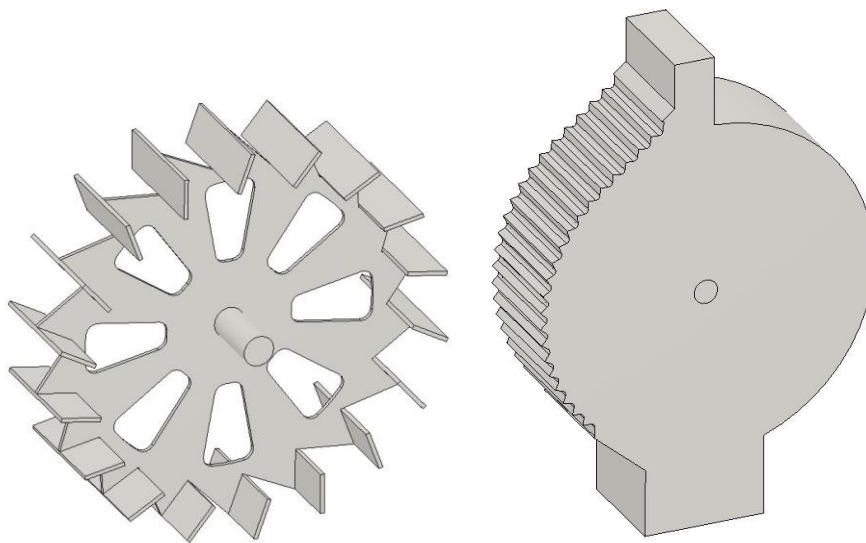
Na základě výsledků simulace z předchozí kapitoly Obr. 75, můžeme u modelu pro výpočet ztrátového výkonu zmenšit délku rotoru loupáčky a tím snížit nároky na výpočetní techniku. Délka rotoru výpočetního modelu byla upravena na 230 mm, je tedy 10krát kratší než délka reálné konstrukce a získaný moment ze simulace bude také 10krát menší.

6.5.1. Model a síť modelu

Model loupáčky pro výpočet byl velmi zjednodušen, zahrnuje pouze prostor rotoru, prostor násypky je pro tento výpočet zanedbatelný a pouze by zvyšoval nároky na výpočetní techniku.



Obr. 76: Náčrt výpočetního modelu loupačky



Obr. 77: Zjednodušený model rotoru Obr. 78: Celý výpočtový model

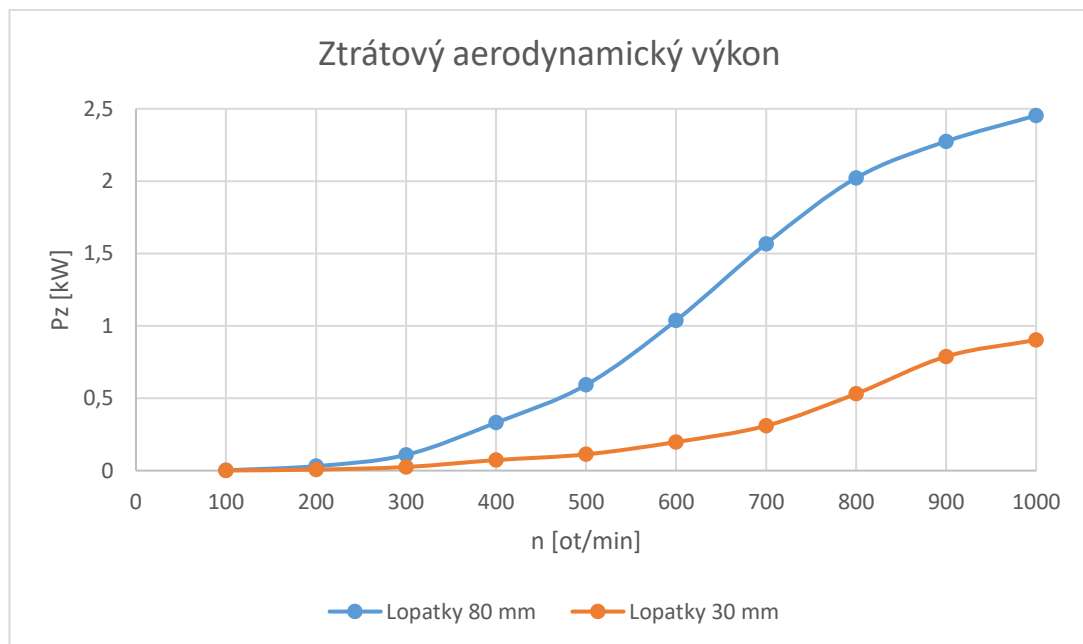
V prostoru okolí lopatek rotoru a v okolí nárazové desky byly použité elementy o velikosti 5 mm. Na síť ostatních prostorů, kterými jsou vstup, výstup loupačky a okolí hřídele rotoru, byly použité elementy o velikosti 20 mm.

6.5.2. Nastavení simulace

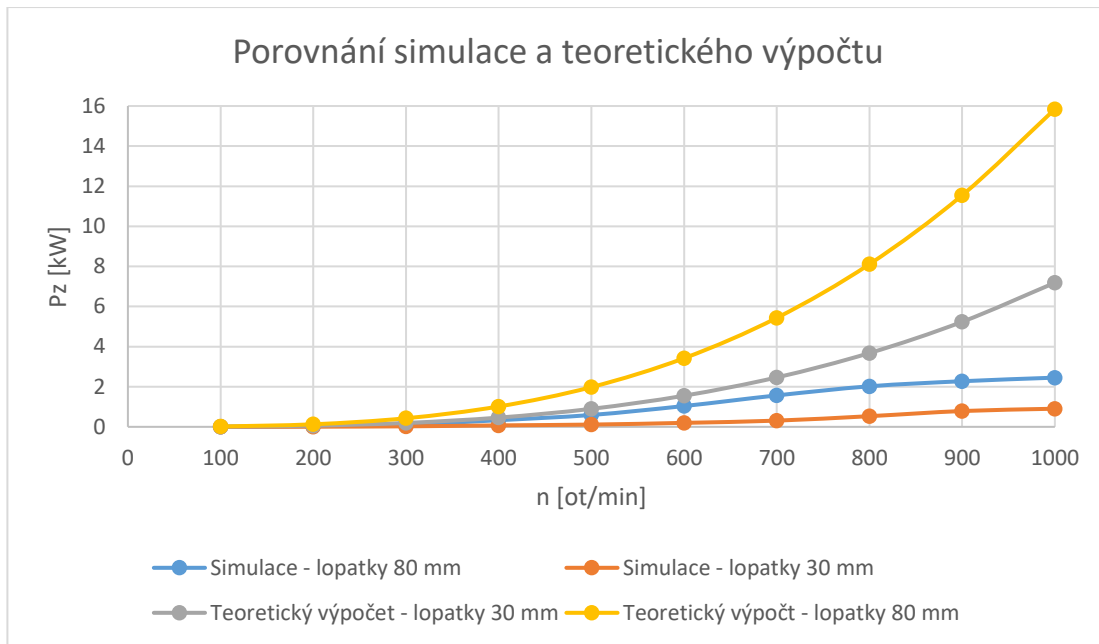
Prvně bylo nastaveno gravitační zrychlení v ose Y. Pro výpočet byl zvolen výpočtový model k- ϵ pro turbulentní proudění. Poté byl vysíťovaným prostorům přiřazen materiál, kterým je vzduch o hustotě $1,225 \text{ kg/m}^3$. Síti v okolí lopatek a hřídele rotoru byl nastaven rotační pohyb. Budou provedeny výpočty od 100 až do 1000 ot/min, kde se pro každý výpočet zvýší otáčky o 100 ot/min, bude tak provedeno 10 simulací, abychom získali ztrátový moment v tomto rozsahu otáček. Velikost časového kroku byla nastavena na 0,05 s a proběhne 100 časových kroků, kde během každého kroku proběhne 20 iterací.

6.5.3. Vyhodnocení simulace

Výsledky simulace jsou vyjádřené ztrátovým výkonem na rotoru modelu viz Obr. 79. Z Obr. 80, který porovnává výsledky simulace a teoretického výpočtu ztrátového výkonu dle rovnice (15), je patrné, že hodnoty teoretického výpočtu jsou 7krát vyšší než výsledky simulace. Nelze tedy teoretický výpočet použít k návrhu pohonu stroje a pohon je potřeba navrhnout na základě výsledků CFD simulace ztrátového výkonu na rotoru loupáčky. Ztrátový výkon loupáčky je zobrazen na Obr. 81. Provozní otáčky loupáčky jsou 800 ot/min, ztrátový výkon při těchto otáčkách je 20,2 kW.



Obr. 79: Ztrátový aerodynamický výkon-simulace



Obr. 80: Porovnání výsledků simulace a teoretického výpočtu ztrátového aerodynamického výkonu



Obr. 81: Ztrátový aerodynamický výkon loupáčky s lopatkami 80 mm

6.6. Potřebný výkon elektromotoru

Potřebný výkon elektromotoru se skládá ze dvou částí, výkonu potřebného k loupání a ztrátového výkonu. Při návrhu elektromotoru je také potřeba uvažovat ztráty v ložiskách a ztráty v řemenovém převodu, pomocí kterého je přenášen výkon elektromotoru na rotor. Výkon potřebný k loupání dle rovnice (11) je 1,7 kW, ztrátový výkon při provozních otáčkách 800 ot/min je na základě výsledků simulace 20,2 kW. Ztráty v ložiskových domcích jsou dle SKF 2 % a účinnost řemenového převodu je 92 %.

$$P = \frac{P_l + P_z}{\eta_{řem} \cdot \eta_{lož}} = \frac{1,7 + 20,2}{0,92 \cdot 0,98 \cdot 0,98} = 24,8 \text{ kW} \quad (17)$$

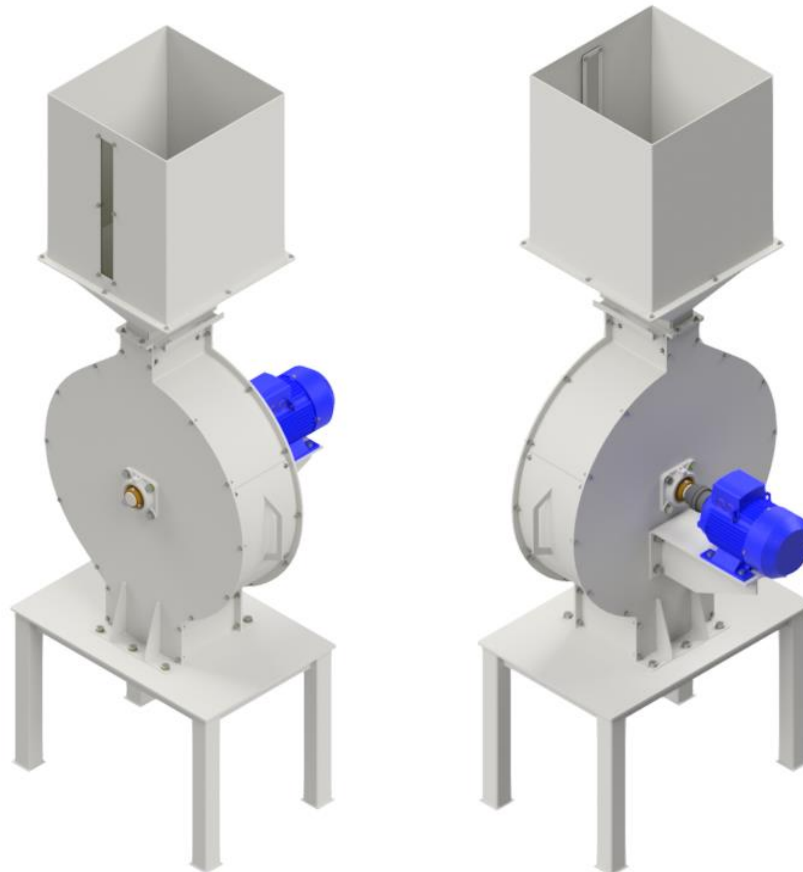
Pro pohon loupačky je dle rovnice (17) potřeba motor o výkonu 24,8 kW. Byl tedy zvolen asynchronní elektromotor o výkonu 30 kW. Při použití tohoto motoru je možné provozovat loupačku až do 1000 ot/min. To umožňuje loupát i jiné druhy semen olejnin, které vyžadují na loupání vyšší otáčky než slunečnice.

7. Návrh standu pro verifikaci CFD a DEM výpočtů

Při výpočtu aerodynamického ztrátového výkonu došlo k zjednodušení modelu výpočtu za účelem ušetření výpočetního času, který má relativně vysokou pořizovací cenu, je vhodné mít ověřený, proto bude simulace ověřena experimentálně. Za tímto účelem bude navržen stand pro verifikaci CFD výpočtu, na tomto standu bude také možné loupat slunečnicová semena, a tak ověřit DEM výpočty.

7.1. Konstrukce standu

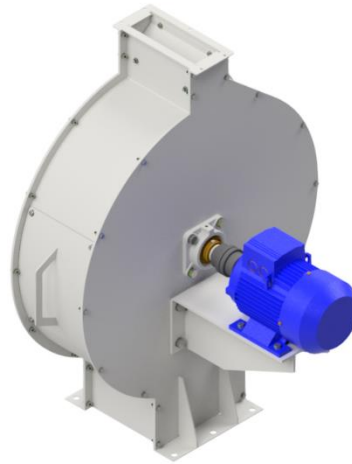
Konstrukce standu tvoří tři hlavní části: loupačka, násypka a podstavec. Konstrukce standu je velmi podobná loupačce, oproti loupačce je však značně zjednodušená. Není zde např. magnetický separátor, není možné měnit vzdálenost nárazové desky a rotoru a není zde řemenový převod mezi elektromotorem a rotorem, elektromotor je tak přímo spojen s hřídelem rotoru.



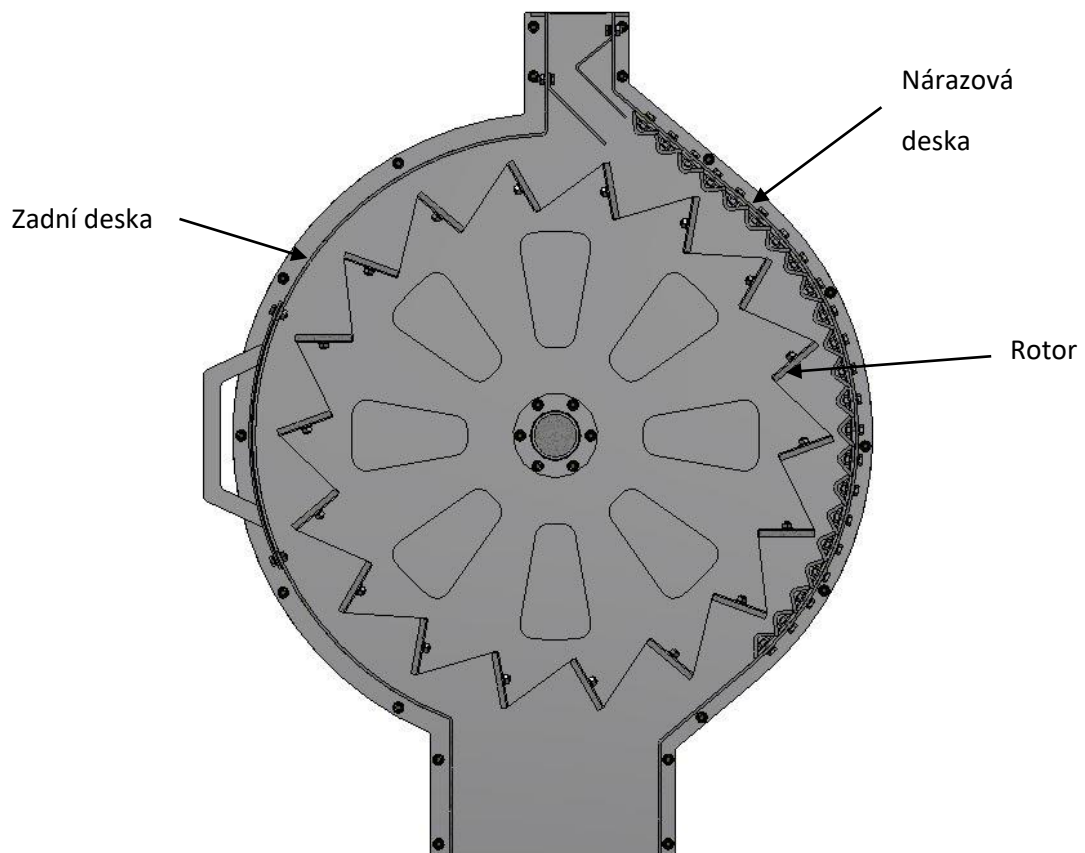
Obr. 82: Stand pro ověření CFD a DEM výpočtů

7.1.1. Část loupačky standu

Oproti velké loupačce nemá loupačka standu hlavní rám, ve kterém jsou uloženy dílčí prvky stroje. Jednotlivé části jsou spojeny šrouby a tvoří zjednodušenou konstrukci prostoru statoru. Těmito částmi jsou nárazová deska, dvě čela a zadní stěna.

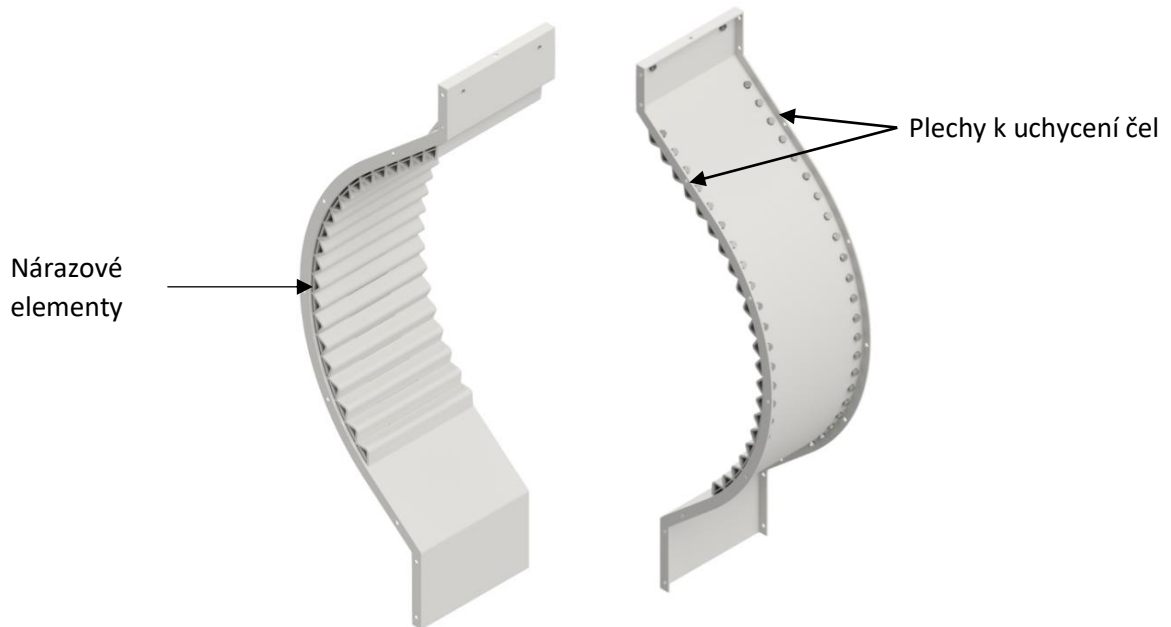


Obr. 83: Část loupačky



Obr. 84: Řez standem loupačky

Základ nárazové desky tvoří skružený hardoxový plech o tloušťce 4 mm, ve kterém jsou vypálené otvory pro šrouby k uchycení jednotlivých segmentů nárazové desky. Po obvodu plechu jsou navařené výpalky s otvory, které slouží k uchycení čel.



Obr. 85: Nárazová deska

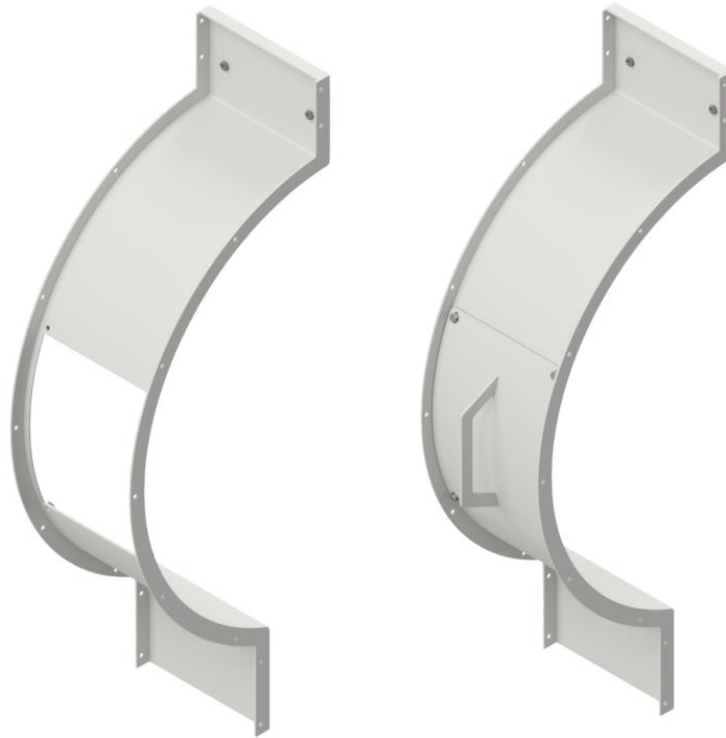
Nárazový segment tvoří ohnutý hardoxový plech o tloušťce 5 mm a délce 260 mm. V elementech jsou vypálené zámky, pomocí kterých se jednotlivé elementy skládají do sebe a zjednoduší montáž nárazové desky. Na druhé straně elementu jsou na koncích navařené plechy s maticemi, které slouží k uchycení elementu na desku.

Na nárazové desce standu se také dá odzkoušet způsob uchycení segmentu na nárazové desce a jejich montáž.



Obr. 86: Nárazový segment

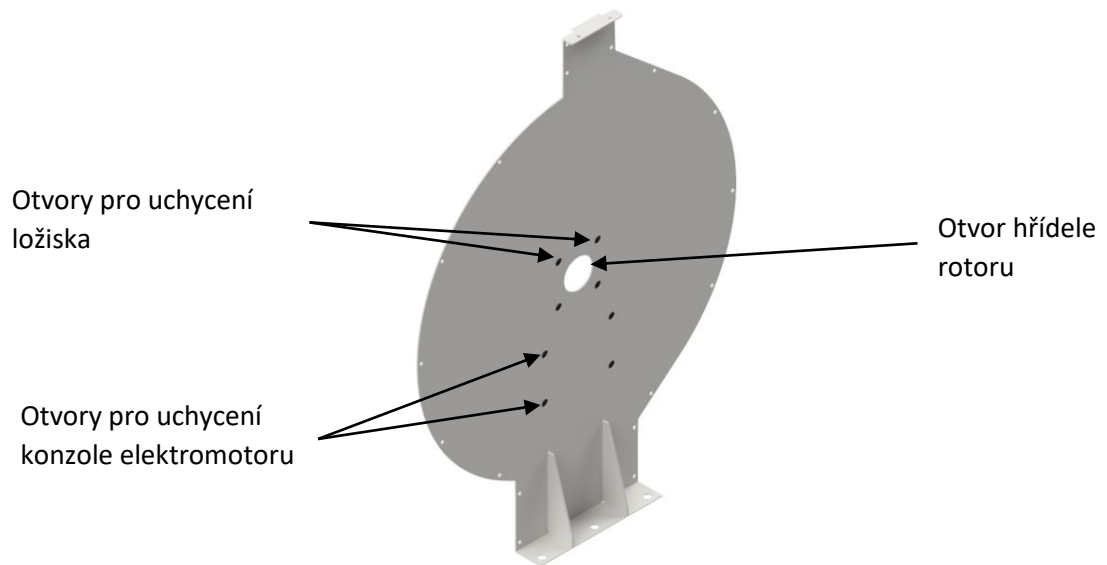
Zadní desku tvoří obdobně, jako nárazovou desku, skružený plech s navařenými bočními plechy s otvory k uchycení čel. V desce je otvor, který slouží k výměně lopatek na rotoru. Víko otvoru a deska jsou utěsněné pomocí nalepovacích pásků plochého těsnění.



Obr. 87: Zadní deska

Obr. 88: Zadní deska s víkem pro výměnu lopatek

Čela standu loupáčky jsou vypálena z hardoxového plechu o tloušťce 4 mm. Po obvodu čel jsou vypálené otvory pro spojení čel s nárazovou deskou a zadní deskou. V čelech jsou také vypálené otvory pro hřídel a otvory pro uchycení ložiskových domků. V horní části čel jsou navařené plechy s otvory, které po složení čel a desek tvoří přírubu ke spojení loupáčky a násypky. Ve spodní části jsou navařené plechy s otvory, které jsou určeny k uchycení loupáčky na podstavci. Jak na horních plechách, tak na těch spodních, jsou navařené vzpěry pro zvýšení pevnosti. Na jednom z čel jsou navíc vypálené otvory pro uchycení konzoly motoru k loupáčce. V otvorech pro ložiska a konzolu motoru jsou navařené matice pro snadnější montáž ložisek a konzole motoru.



Obr. 89: Čelo s otvory pro konzolu motoru

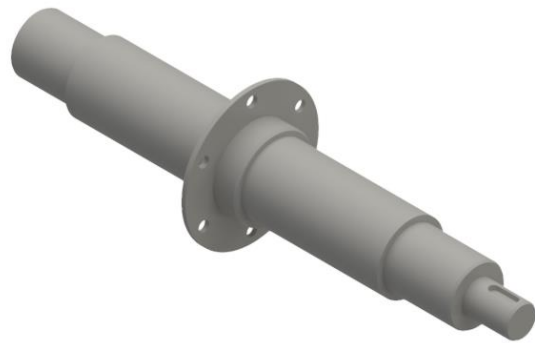


Obr. 90: Sestavené desky s čely

Rotor standu loupáčky se skládá z hřídele, disku a lopatek. Pro ušetření materiálu byl hřídel svařen z tyče a vypálené příruby pro spojení s diskem. Po svaření je hřídel obroben na požadované rozměry. Na jednom konci hřídele je drážka pro pero, která slouží ke spojení hřídele a elektromotoru pomocí hřídelové spojky. Hřídel rotoru je uložen ve dvou ložiskových domcích.

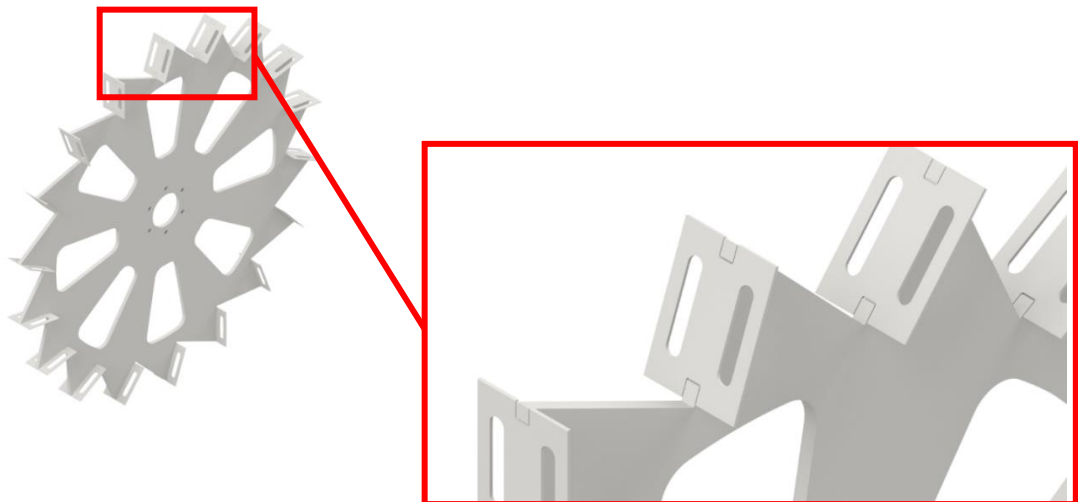


Obr. 91: Rotor standu



Obr. 92: Hřídel rotoru

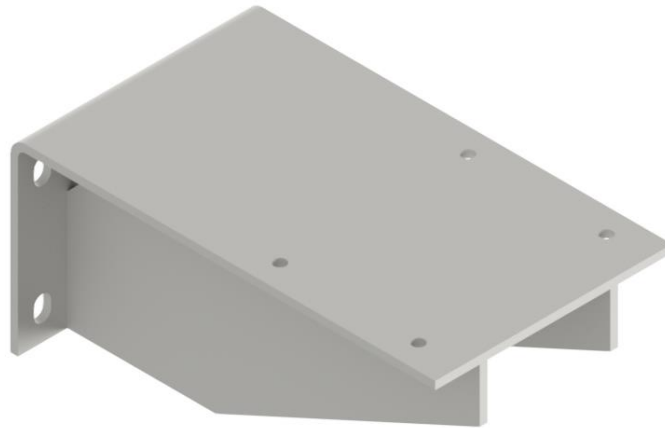
Disk rotoru byl vypálen z hardoxového plechu o tloušťce 8 mm. Pro snížení hmotnosti disku je v disku vypáleno osm odlehčovacích otvorů. Na disk jsou navařené vypálené držáky lopatek. V disku jsou vypálené zámky, které zajišťují přesnou polohu držáků lopatek na disku. V držácích jsou vypálené oválné drážky, díky kterým je možné na rotor umístit různé velikosti lopatek.



Obr. 93: Disk rotoru

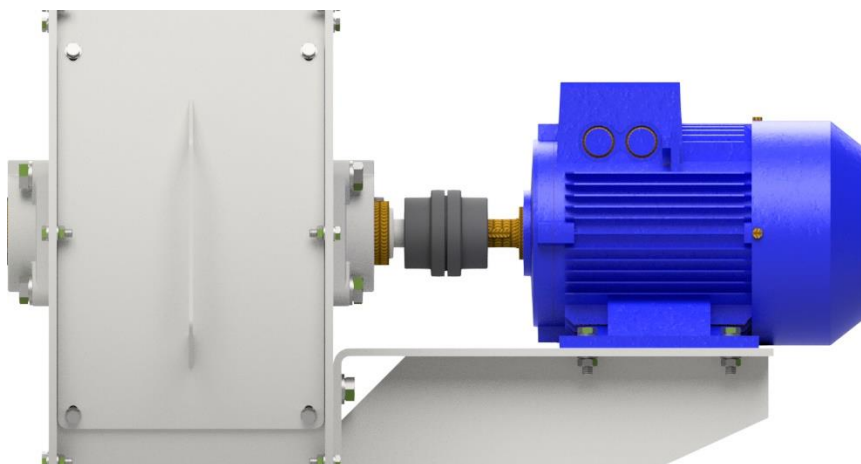
V lopatkách jsou dvě díry s kuželovým zahloubením pro šrouby s kuželovou hlavou. Pro měření byly vyrobené tři sady lopatek o výšce 30 mm, 50 mm a 80 mm. Aby se nemusel při každé výměně rozebírat celý stand, je v zadní desce otvor pro výměnu lopatek na rotoru.

Konzoli elektromotoru tvoří ohýbaný plech tloušťky 8 mm, na kterém jsou navařené dvě výztuhy pro zvýšení pevnosti konzole. V konzole jsou vypálené čtyři oválné drážky, které slouží k uchycení konzole na čele standu a umožňují posun konzole, aby bylo dosaženo požadované sousososti mezi rotorem a elektromotorem.



Obr. 94: Konzola elektromotoru

Rotor je poháněn šesti pólovým asynchronním elektromotorem o výkonu 3 kW a jmenovitých otáčkách 950 ot/min. Elektromotor je s rotorem spojen pomocí pružné HRC spojky od firmy Haberkorn. Jedná se o pružnou ozubcovou hřídelovou spojku, která je schopna vyrovnat mírné nepřesnosti vzájemné polohy rotoru a hřídele elektromotoru.



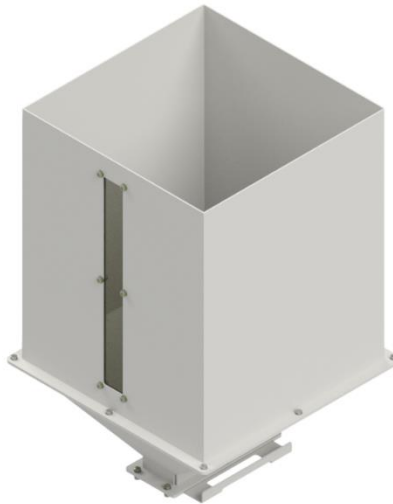
Obr. 95: Spojení elektromotoru a rotoru



Obr. 96: HRC pružná spojka Haberkorn [27]

7.1.2. Násypka

Násypka je navržena, aby se do ní vešlo 200 kg slunečnice a stand by mohl na plný výkon pracovat po dobu 10 minut. Násypka je rozdělena na tři části, těmi jsou: horní část násypky, kuželová část a šupák.



Obr. 97: Násypka

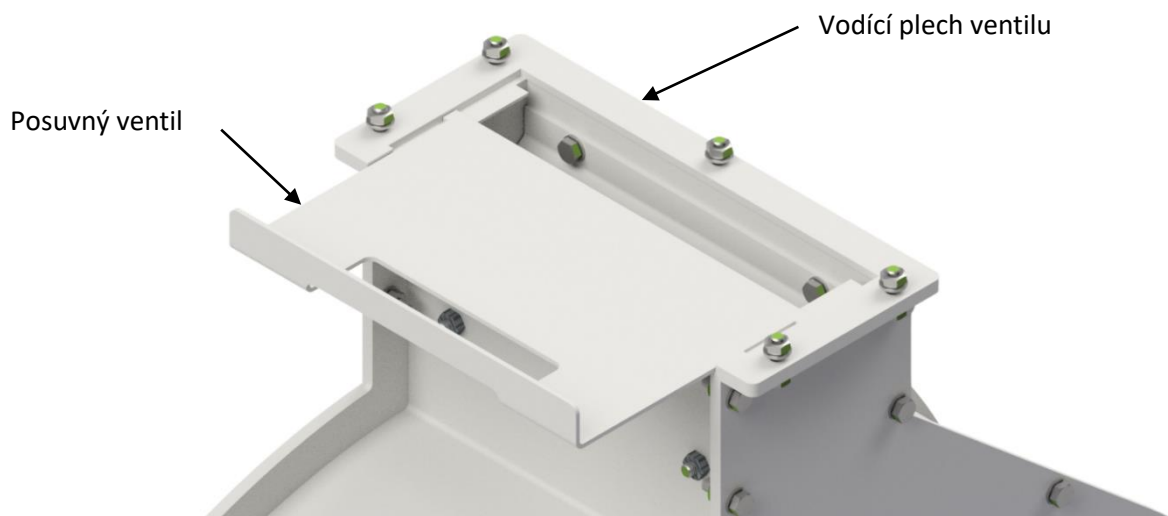
Horní část je vytvořena z plechu o tloušťce 2 mm, který je ohnutý do tvaru U a k němu je navařena plechová deska s vypáleným otvorem pro průhledné plexisklo, díky kterému je možné sledovat hladinu materiálu v násypce. V dolní části násypky je přivařený čtvercový výpalek s otvory pro šrouby pomocí, kterých je násypka spojena s kuželovou částí.

Konstrukci kuželové části násypky tvoří dva ohýbané svařené plechy, ke kterým jsou na vrchu a ve spod kuželové části navařené výpalky s otvory, pomocí kterých je kuželová část spojena s dalšími částmi standu.



Obr. 98: Kuželová část násypky

Mezi přírubou kuželové příruby a přírubou loupačky je umístěný posuvný ventil, který tvoří dno násypky a pomocí, kterého je možné řídit tok materiálu z násypky do loupačky. Posuvný ventil je vypálen z plechu o tloušťce 4 mm a na konci je ohnutý. Tento ohyb slouží jako rukojeť ventilu.



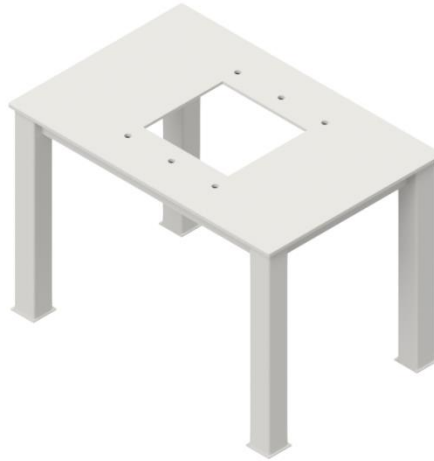
Obr. 99: Pootevřený posuvný ventil



Obr. 100: Vodící plech ventilu

7.1.3. Podstavec

Loupačka je umístěna na podstavci proto, aby bylo možné pod ni umístit box, do kterého budou padat vyloupaná semena a slupky slunečnice. Desku podstavce tvoří výpalek s otvory pro navařovací matice, pomocí kterých je loupáčka připevněna na podstavci. Nohy podstavce tvoří jekly EN 10219, které jsou k desce navařené. Mezi jednotlivými nohami jsou navařené plechy, které zvyšují celkovou pevnost podstavce.



Obr. 101: Podstavec standu



Obr. 102: Vyrobený stand pro verifikaci CFD a DEM výpočtů



Obr. 103 Vyrobený stand pro verifikaci CFD a DEM výpočtů 2

7.2. Verifikace simulace ztrátového výkonu

Pro verifikaci výsledků simulace ztrátového výkonu byl použitý stand navržený v předchozí kapitole. Pro měření byl použitý frekvenční měnič pomocí, kterého byly řízené otáčky elektromotoru a také z něho byl odečítaný výkon elektromotoru.

7.2.1. Měření výkonu elektromotoru

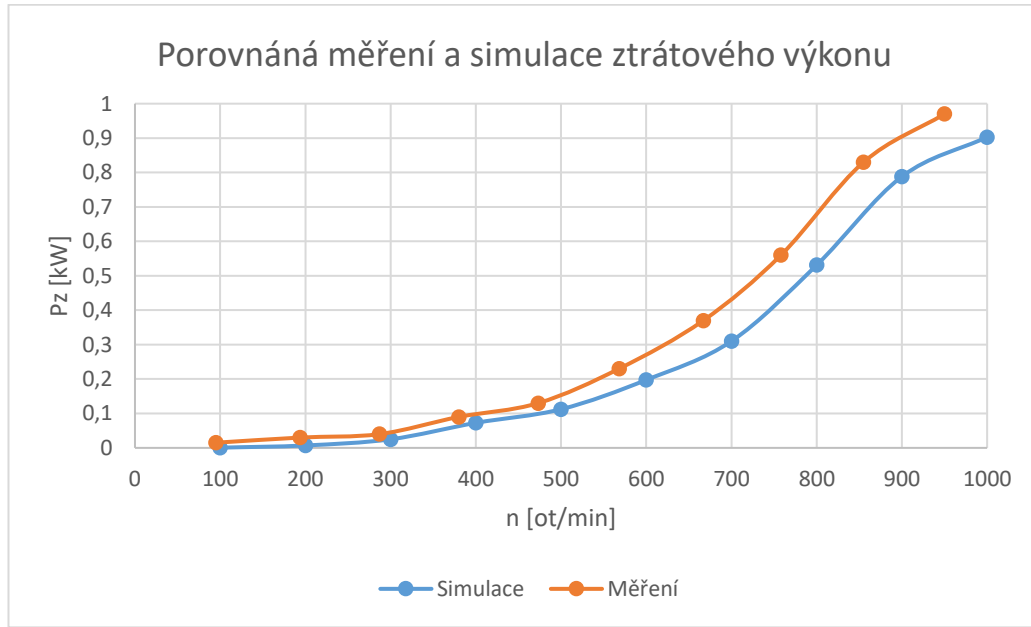
Měření probíhalo od 5 do 50 Hz. Frekvence na měniči byla měněna po 5 Hz. Maximální otáčky motoru jsou 950 ot/min. Z důvodu plných výrobních kapacit spolupracující firmy bylo možné k měření použít pouze lopatky o výšce 30 mm.

Tab. 4: Naměřené hodnoty výkonu elektromotoru

f [Hz]	5	10,2	15,1	20	24,9	29,9	35,1	39,9	45	50
n [ot/min]	95	194	287	380	473	568	667	758	855	950
P [kW]	0,015	0,03	0,04	0,09	0,13	0,23	0,37	0,56	0,83	0,97

7.2.2. Porovnání naměřených hodnot a výsledků simulace

Průběh křivek simulace a měření se téměř shoduje. Rozdíl mezi nimi mohou tvořit ztráty v ložiskách, které nejsou při simulaci uvažovány. Rozdíl mezi křivkami může být také způsoben zjednodušením modelu pro CFD výpočet a nastavením sítě. Na základě shody simulace a měření je možné použít k výpočtu ztrátového výkonu nastavení CFD výpočtu z kapitoly 6.5 Výpočet ztrátového výkonu.



Obr. 104: Porovnání naměřených hodnot a výsledků simulace

8. Závěr

V diplomové práci se podařilo splnit všechny očekávané cíle. Byla provedena úprava konstrukce z bakalářské práce „Konstrukční návrh vysokokapacitní loupačky semen olejnin“, následně byl simulován provoz stroje a byly zvolené vhodné úpravy pro optimální chod stroje a také byl navržen vhodný pohon stroje.

V úvodní kapitole se práce zabývala rešerší principu výpočtu metody diskretních prvků (DEM) a vhodných DEM softwarů, ze kterých byl zvolen software Ansys Rocky pro simulaci provozu loupačky.

Před simulací provozu stroje byla provedena úprava konstrukce loupačky na základě výrobních technologií firmy Farnet a.s. a celkové ceny stroje. Hlavní úpravou prvotního návrhu byla změna metody separace kovových nečistot. Bubnový separátor byl kvůli vysoké pořizovací ceně nahrazen deskovým separátorem. Kvůli této změně byl rám stroje rozdělen na dvě části, násypku a rotorový prostor. Další velkou změnou bylo rozdělení nárazových desek na jednotlivé nárazové segmenty. Poté byly na konstrukci provedeny dílčí úpravy podle výrobních možností spolupracující firmy.

Na základě rešerše o DEM softwarech byly zjištěny vlastnosti materiálu, které jsou potřebné k nastavení DEM simulace. Jsou jimi měrná hmotnost, statický součinitel tření a dynamický součinitel tření simulovaného materiálu.

Měrná hmotnost slunečnice je 450 kg/m^3 . Součinitele tření slunečnice jsme získali z měření sypného úhlu, které bylo provedeno na dvou standech, které byly navrženy na základě rešerše sypného úhlu a jeho měření. Statický součinitel tření slunečnice je $\mu_s=0,66$ a dynamický součinitel tření slunečnice je $\mu_D=0,53$.

Následně byla provedena simulace loupání v programu Ansys Rocky. Nejprve byla provedena simulace loupání s lopatkami rotoru o výšce 30 mm. Množství vyloupaných semen bylo určeno na základě nárazové energie slunečnice při dopadu na nárazovou desku. Aby došlo k vyloupaní semene, musí být nárazová energie větší než 40 mJ. U lopatek o výšce 30 mm by došlo k vyloupaní pouze 47 % semen a nebyl tak splněn požadavek na vyloupaní alespoň 90 % semen. Proto byly provedené další dvě simulace s lopatkami o výšce 50 mm a 80 mm. U 50 mm lopatek by došlo k vyloupaní 77 % semen, také tedy nejsou vhodné k provozu stroje. U lopatek o výšce 80 mm dojde k vyloupaní až 94 % semen. Splňují tedy požadavek podílu vyloupaných semen a budou použité k provozu stroje.

V následující kapitolách byly v Ansys Fluent provedeny výpočty k ověření platnosti analytické metody pomocí, které byl získán ztrátový výkon rotoru. Na základě výsledků simulace bylo zjištěno, že analytická metoda není vhodná pro výpočet ztrátového výkonu rotoru. Ztrátový výkon rotoru byl získán pomocí CFD výpočtů v Ansys Fluent. Na základě tohoto výkonu byl zvolen 30 kW asynchronní motor, který bude pohánět rotor loupačky.

V další části práce byl navržen zkušební stand pomocí, kterého je možné verifikovat DEM výpočty v Ansys Rocky na základě, kterých byla zvolena vhodná výška lopatek a také je možné na tomto standu verifikovat CFD výpočet pro ztrátový výkon loupačky.

V poslední části práce bylo provedeno na tomto standu měření pro verifikaci výpočtů ztrátového výkonu na rotoru. Výsledky měření potvrdili správnost výsledků simulace a je tedy možné použít tyto výpočty k návrhu pohonu stroje.

Použitá literatura

- [1] Inovace technologie loupání a metodika loupateľnosti semen olejnin [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/97745/F2-D-2021-Hoidekr-Jan-2021-Hoidekr-text.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Disertační práce. České Vysoké Učení Technické. Vedoucí práce Prof. Ing. David Herák, Ph. D., prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph. D., Ing. Martin Dub, Ph. D.
- [2] Sunflower impact dehuller. Bühler group [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: https://www.buhlergroup.com/content/buhlergroup/global/en/products/sunflower_impactdehuller.html
- [3] Dehulling equipment: Dehulling system for oil crushing plants. Elica pro [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://elica-pro.com/products/dehulling-equipment/dehulling-system-for-oil-crushing-plants/>
- [4] JK Machinery: JHI nárazové loupáčky. JK-Machinery.z [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://jk-machinery.cz/stroje/jhi-narazove-loupacky/>
- [5] JONÁK, Martin. Optimalizace konstrukce korečkových dopravníků. Online, Disertační práce, vedoucí doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2018. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=169683. [cit. 2024-02-16].
- [6] BUSTA, Michal. Analýza namáhání vybraných částí bagru při provozu. Online, Diplomová práce, vedoucí Ing. Petr Vosynek, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2021. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=225693. [cit. 2024-02-16].
- [7] ŠMILAUER, Václav. Cohesive Particle Model using the Discrete Element Method on the Yade Platform. Online, PhD thesis, vedoucí Prof. Ing. Milan Jirásek, DrSc., Prof. Laurent Daudeville. Praha: Czech Technical University in Prague & Université Grenoble I, 2010. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79056/F1-D-2018-Smilauer-Vaclav-thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. [cit. 2024-02-16].
- [8] Ansys Rocky. ANSYS. SVS FEM [online]. [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.svsfem.cz/ansys-rocky>
- [9] Newton Overview. *Advanced Conveyor Technologies Inc.* [online]. [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.demsoftware.net/software/>
- [10] ALTAIR®. Altair® EDEM™ [online]. [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://altair.com/edem>
- [11] List of Open Source DEM (Discrete Elements Method) Software [online]. [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.simonwenkel.com/lists/software/list-of-opensource-DEM-software.html>
- [12] Sypný úhel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sypn%C3%BD_%C3%BAhel

- [13] MACURA, Jan. *Sypnost práškových látek 1*. Hradec Králové, 2006. Dostupné také z: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/6018/DPTX_0_0_11160_0_52995_0_17464.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce Doc. RNDr. Zdeněk Zatloukal, CSc.
- [14] Angle of Repose. *ScienceDirect* [online]. [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/angle-of-repose>
- [15] ČSN EN 12047: Solid fertilizers - Measurement of static angle of repose (ISO 8398:1989 modified). 1996.
- [16] Magnetický válec: separace trampových částic železa pomocí magnetického válce. IFE Processing Technology CZ [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.ife-bulk.com/cs/Magnetick%C3%A1-technika/magneticky-valec.html>
- [17] MAGNETICKÝ SEPARÁTOR [online]. Brno, 2015 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=100098. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. JIŘÍ MALÁŠEK, Ph.D.
- [18] Ruční kola pro ukazatelé polohy: VRTP-XX. In: Eles+Ganter [online]. [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.elesa-ganter.cz/cs/cze/produkty/ukazatele-polohy--1002/Ukazatele-polohy--Rucni-kola-pro-ukazatele-polohy--VRTP-GXX2#sortby=0&facetvalue=>
- [19] *Spojení hřídel - náboj: Upínací pouzdro Taper Lock*. Online. In: HABERKORN. Dostupné z: <https://eshop.haberkorn.cz/upinaci-pouzdro-taper-lock.html>. [cit. 2024-05-28].
- [20] Profily a výroba těsnění: Profil U-PIRELI s kovovou výztuží s bočním těsněním A1526. In: GUMEX [online]. [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/pryzovy-u-profil-pireli-s-bocnim-tesnenim-tesneni-s-vyztuhou-pvc-10437005>
- [21] Profily a výroba těsnění: Profil U-PIRELI s kovovou výztuží s praporkem A1105/6, pro nasunutí 4-6mm. In: GUMEX [online]. [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/pryzovy-u-profil-pireli-s-praporkem-tesneni-s-vyztuhou-pvc-10445001>
- [22] *Trubka HTEM DN 100 délka 500 mm*. Online. In: DEK. Dostupné z: <https://www.dek.cz/produkty/detail/4410050884-htem-trubka-dn-110x500mm-15-90>. [cit. 2024-04-28].
- [23] JAFARI, Sahebeh; KHAZAEI, Javad; ARABHOSSEINI, Akbar; MASSAH, Jafar a , Mohammad Hadi. STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF SUNFLOWER SEEDS. Online. 2011. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Angle-of-repose-for-sunflower-seeds-as-a-function-of-moisture-content_fig9_234082430. [cit. 2024-04-28].

- [24] SVS. *Ansys Fluent*. Online. Ansys. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>. [cit. 2024-04-30].
- [25] PŘÍHODA, Jaromír a LOUDA, Petr. *Matematické modelování turbulentního proudění*. Praha: Nakladatelství ČVUT. ISBN 978-80-01-03623-5.
- [26] LEVÝ, Tomáš. *Modelování turbulentního proudění stlačitelných tekutin pomocí vhodných RANS modelů turbulence*. Online, Diplomová práce, vedoucí Doc. Ing. Jan Vimmr, Ph.D. 2019: Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/37553/1/Levy_Tomas_DP201_9.pdf. [cit. 2024-04-30].
- [27] *Spojky*. Online. In: HABERKORN. Haberkorn. Dostupné z: <https://eshop.haberkorn.cz/pohonne-elementy/spojky/>. [cit. 2024-05-05].

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma loupacího stroje JHI 05 s vertikální osou rotace [4]	2
Obr. 2: Schéma loupacího stroje Bühler Sunflower Impact Dehuller s horizontální osou rotace [2]	2
Obr. 3: Schéma výpočtu metody DEM [5]	3
Obr. 4: Sypný úhel [14]	5
Obr. 5: Měřicí stand dle normy ČSN EN 12047 [15]	6
Obr. 6: Princip komínku	6
Obr. 7: Princip komínku s dvěma válci [13]	7
Obr. 8: Rotující válec [13]	7
Obr. 9: Původní návrh loupačky	10
Obr. 10: Původní návrh loupačky v řezu	10
Obr. 11: Rotor loupačky	11
Obr. 12 Princip bubnového separátoru [17]	11
Obr. 13: Bubnový separátor s dávkovacím mechanismem	12
Obr. 14: Princip deskového separátoru [17]	12
Obr. 15: Separátor bez krycího plechu Obr. 16: Magnet separátoru	13
Obr. 17: Magnetická deska v řezu	13
Obr. 18: Násypka s deskovým separátorem	14
Obr. 19: Otevřený dávkovací mechanismus původního návrhu	14
Obr. 20: Původní dávkovací mechanismus	15
Obr. 21: Část pohyblivé desky s ozubenou tyčí	15
Obr. 22: Ruční kolo s ukazatelem polohy od výrobce Eles+Ganter [18]	16
Obr. 23: Nový koncept stroje	17
Obr. 24 Nový rám stroje	18
Obr. 25: Původní návrh násypky	18
Obr. 26: Nová násypka	19
Obr. 27: Rám násypky	19
Obr. 28: Původní návrh statoru Obr. 29: Původní nárazová deska	20
Obr. 30: Nový stator Obr. 31: Detail segmentu	20
Obr. 32: Zadní strana nového statoru	20
Obr. 33: Detail uložení segmentů nárazové desky	21
Obr. 34: Vyklopený stator při výměně segmentů Obr. 35: Těžiště statoru	21
Obr. 36: Horní úchyt statoru	22
Obr. 37: Spodní úchyt statoru	22
Obr. 38: Uložení ložiska rotoru	23
Obr. 39: Upínací pouzdro Taper Lock [19]	23
Obr. 40: Boční těsnění statoru Obr. 41: Profil U-PIRELI s kovovou výztuží s bočním těsněním [20] ...	24
Obr. 42: Utěsnění horní části statoru Obr. 43: Utěsnění spodní části statoru	24
Obr. 44: Profil U-PIRELI s kovovou výztuží s praporkem [21]	25
Obr. 45: Kompletně sestavený model upraveného konstrukčního řešení vysokokapacitní loupačky	25
Obr. 46: Rám standu	26
Obr. 47: Vodicí příruba Obr. 48: Závitová vložka	27
Obr. 49: HTEM trubka [22]	27
Obr. 50: Prstenec pro nastavení výška	27
Obr. 51: Stand na měření statického sypného úhlu	28
Obr. 52: Stand na měření statického sypného úhlu 2	28
Obr. 53: Model standu na měření dynamického sypného úhlu	29
Obr. 54: Lože standu	29
Obr. 55: Rotující válec	30
Obr. 56: Dno válce	30
Obr. 57: Stand na měření dynamického sypného úhlu	31
Obr. 58: Stand připravený k měření	32

Obr. 59: Postupné vrstvení hromady.....	32
Obr. 60: Velikost sypného úhlu slunečnicových semen v závislosti na vlhkosti semen [23]	33
Obr. 61: Naplněný stand před měřením.....	34
Obr. 62: Studie zkoumání energetické náročnosti loupání semen [1]	36
Obr. 63: Schéma návrhu výšky lopatky.....	37
Obr. 64: Importovaná geometrie.....	38
Obr. 65: Nastavení velikosti částic.....	39
Obr. 66: Mnohostěn reprezentující semeno slunečnice	39
Obr. 67: Nárazová energie slunečnice/nárazová deska-výška lopatek 30 mm	40
Obr. 68: Nárazová energie slunečnice/nárazová deska-výška lopatek 50 mm	40
Obr. 69: Nárazová energie slunečnice/nárazová deska-výška lopatek 80 mm	41
Obr. 70: Náčrt modelu pro simulaci 1 lopatky.....	44
Obr. 71: Síť rotujícího prostoru 1 lopatky.....	44
Obr. 72: Porovnání ztrátového výkonu teoretického výpočtu a simulace pro 1 lopatku	45
Obr. 73: Náčrt modelu pro 8 lopatek	46
Obr. 74: Závislost ztrátového momentu na počtu lopatek.....	47
Obr. 75: Vliv délky lopatek.....	48
Obr. 76: Náčrt výpočetního modelu loupáčky.....	49
Obr. 77: Zjednodušený model rotoru Obr. 78: Celý výpočtový model	49
Obr. 79: Ztrátový aerodynamický výkon-simulace	50
Obr. 80: Porovnání výsledků simulace a teoretického výpočtu ztrátového aerodynamického výkonu..	51
Obr. 81: Ztrátový aerodynamický výkon loupáčky s lopatkami 80 mm.....	51
Obr. 82: Stand pro ověření CFD a DEM výpočtů.....	53
Obr. 83: Část loupáčky.....	54
Obr. 84: Řez standem loupáčky	54
Obr. 85: Nárazová deska.....	55
Obr. 86: Nárazový segment	55
Obr. 87: Zadní deska Obr. 88: Zadní deska s víkem pro výměnu lopatek	56
Obr. 89: Čelo s otvory pro konzolu motoru	57
Obr. 90: Sestavené desky s čely.....	57
Obr. 91: Rotor standu Obr. 92: Hřídél rotoru	58
Obr. 93: Disk rotoru	58
Obr. 94: Konzola elektromotoru.....	59
Obr. 95: Spojení elektromotoru a rotoru	59
Obr. 96: HRC pružná spojka Haberkorn [27]	60
Obr. 97: Násypka	60
Obr. 98: Kuželová část násypky	61
Obr. 99: Pootevřený posuvný ventil	61
Obr. 100: Vodící plech ventilu	61
Obr. 101: Podstavec standu.....	62
Obr. 102: Vyrobený stand pro verifikaci CFD a DEM výpočtů	62
Obr. 103 Vyrobený stand pro verifikaci CFD a DEM výpočtů 2	63
Obr. 104: Porovnání naměřených hodnot a výsledků simulace	64



Seznam tabulek

Tab. 1: Průměr měřeného kužele	33
Tab. 2: Hodnoty dynamického sypného úhlu	34
Tab. 3: Velikost částic a jejich rozložení.....	38
Tab. 4: Naměřené hodnoty výkonu elektromotoru.....	63