

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY



**NÁVRH KONSTRUKCE MACERÁTORU PRO
PŘEDÚPRAVU LIGNOCELULÓZOVÝCH ODPADŮ
O VÝKONNOSTI 3 t·h⁻¹**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vysoká škola:
Ústav:

ČVUT v Praze
12118

Fakulta:
Akademický rok:

strojní
2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Bc. Antonín Setnička**
program N2301 Strojní inženýrství
obor 3909T012 Procesní technika

název česky:

**Návrh konstrukce macerátoru pro předúpravu lignocelulózových odpadů o
výkonnosti zpracování 3 t·h⁻¹**

název anglicky:

**Design of a retting mill for pretreatment of lignocellulosic wastes with
a productivity of 3 t·h⁻¹**

Zásady pro vypracování

Zadání:

Navrhněte průmyslovou verzi macerátoru pro dezintegraci lignocelulózové biomasy s přirozenou vlhkostí typu tráva, listí, štěpka, odpad z domácností jako prvotní krok zpracování v technologii suché anaerobní fermentace. V rámci diplomové práce:

- zpracujte rešerši zaměřenou na konstrukci a scale-up drtičů a mlýnů pro rozpojování vlhkých vláknitých materiálů;
- proveďte základní měření na poloprovozním modelu macerátoru s cílem určit jeho optimální provozní konfiguraci z hlediska výkonnosti a identifikujte slabá místa jeho konstrukce;
- vypracujte metodiku scale-up a základní konstrukční návrh macerátoru o výkonnosti zpracování suroviny 3 t·h⁻¹;
- proveďte potřebné pevnostní výpočty a zpracujte výkresovou dokumentaci průmyslové verze maceračního mlýnu.

Rozsah grafických prací: sestavný výkres macerátoru.

Rozsah průvodní zprávy: Úvod, rešerše, experimentální ověření výkonnosti poloprovozního modelu, scale-up zařízení, základní konstrukční návrh, potřebné pevnostní výpočty, sestavný výkres, závěr.

Seznam odborné literatury: dle doporučení vedoucího práce a vlastní rešerše.

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

Konzultant diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: 30. října 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 15. ledna 2016

T. Jirout

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
vedoucí ústavu



Michael Valášek

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 29. října 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

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.

Zadání diplomové práce převzal dne 30. 10 2015

Antonín Setnička
Bc. Antonín Setnička

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrh konstrukce macerátoru pro předúpravu lignocelulóзовých odpadů o výkonnosti $3 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v přiloženém seznamu literatury.

V Praze, dne 26.1. 2016

.....

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Lukášovi Krátkému, Ph.D. za cenné rady a poskytnuté informace v oblasti návrhu konstrukce strojů. Rovněž také děkuji své rodině a přátelům za podporu během celého studia.

Anotační list

Jméno autora:	Antonín
Příjmení autora:	Setnička
Název práce česky:	Návrh konstrukce macerátoru pro předúpravu lignocelulózových odpadů o výkonnosti 3 t·h ⁻¹
Název práce anglicky:	Design of a retting mill for pretreatment of lignocellulosic wastes with a productivity of 3 t·h ⁻¹
Rozsah práce:	počet stran: 78 počet obrázků: 78 počet tabulek: 4 počet příloh: 2
Akademický rok:	2015/2016
Jazyk práce:	český
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
Konzultant práce:	
Zadavatel:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem konstrukce maceračního mlýnu s výkonností $3 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$. V teoretické části jsou vybrány a popsány některé typy mlýnu pro dezintegraci vlhké a suché vláknité biomasy. Dále je zde popsán poloprovozní macerační mlýn a jsou zde uvedeny prvotní experimenty s mletím vlhké vláknité biomasy. Další část práce se zabývá experimenty pro stanovení výkonnosti maceračního mlýnu. Následně se pojednává o scale-up a konstrukčním uspořádáním průmyslového maceračního mlýnu. V poslední části práce je uveden návrh konstrukce průmyslového maceračního mlýnu a jsou zde popsány jednotlivé dílčí části celého zařízení včetně úvah, které vedly ke zvolenému řešení daného konstrukčního problému.

Abstract

This thesis describes the design of the structure of a retting mill with the productivity of $3 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$. In the theoretical part of the thesis there are chosen and described some types of the mill for disintegration of a wet and dry fibrous biomass. Further there is described a pilot plant retting mill and there are also given initial experiments with milling of a wet fibrous biomass. Next part of the thesis deals with the experiments for determine a productivity of the maceration mill. Subsequently it discusses about the scale-up and the design of the maceration industrial mill. The last part is given to the structural design of the industrial maceration mill. There are described the individual parts of the entire plant, including the considerations which led to the chosen solution of the constructional arrangement.

Klíčová slova:

Dezintegrace, scale-up, konstrukce maceračního mlýnu

Keywords:

Disintegration, scale-up, construction of maceration mill

Využití:

Technologie dezintegrace vlhkých vláknitých materiálů

Obsah

1. Úvod	9
2. Rešerše	10
2.1. Zařízení pro dezintegraci vláknitých materiálů	10
2.1.1. Zhodnocení použití mlýnů pro mechanickou dezintegraci	19
2.2. Scale-up mlýnů	20
2.3. Macerační mlýn	21
2.3.1. Podstata dezintegrace	22
2.3.2. Konstrukční uspořádání	23
2.3.3. Výsledky z dosavadních měření na maceračním mlýnu	24
3. Cíle diplomové práce	26
4. Experimentální měření	27
4.1. Výkonnost poloprovozního mlýnu	27
4.2. Diskuze a vyhodnocení experimentálního měření	35
4.3. Analýza slabých míst současné konstrukce maceračního mlýnu	39
5. Scale-up a konstrukční uspořádání průmyslového maceračního mlýnu	41
6. Konstrukce průmyslové verze maceračního mlýnu	48
6.1. Požadavky na konstrukci a provoz maceračního mlýnu	48
6.2. Konstrukční uspořádání průmyslové verze	48
6.2.1. Návrh pohonu	50
6.2.2. Rotor průmyslového maceračního mlýnu	53
6.2.3. Nosná konstrukce	65
6.2.4. Drhlík	66
6.2.5. Propadové síto	68
6.2.6. Ostatní prvky	70
7. Závěr	72
8. Seznam symbolů	74
9. Seznam řeckých symbolů	75
10. Seznam zkratk	75
11. Seznam příloh	75
12. Použitá literatura	76

1. Úvod

V dnešní době, kdy je díky ekonomické podpoře velký trend využívání biopaliv, dochází k rozvoji a výstavbě nových bioplynových stanic. V bioplynových stanicích se zpracovává široká škála bioodpadů a surovin včetně takových, které se obtížně zpracovávají např. bioodpady z udržování zeleně (tráva, listí), bioodpady z domácností a ze zahrad, odpady z chovu hospodářských zvířat (kejda, hnůj), vedlejší produkty ze zemědělství (sláma), cíleně pěstovaná biomasa (kukuřice, řepa, senáž). Ve většině případů se tedy zpracovává materiál na bázi lignocelulózy. Provozovatelé bioplynových stanic se stále snaží zvyšovat produkci bioplynu pokud možno s minimálními investičními náklady. Jednou z cest, jak tohoto dosáhnout je vhodně zvolená metoda předúpravy vstupní suroviny. Metody předúpravy mohou být mechanické, fyzikální, chemické, biologické a jejich různé kombinace. Avšak všechny metody předúprav jsou založeny na zpřístupnění složek materiálu enzymatickému rozkladu, ke kterému dochází při dezintegraci, kdy se redukuje velikost vstupních částic a tím dochází k zvyšování povrchu materiálu, který je dostupnější enzymovému rozkladu, díky čemuž se zvyšuje produkce bioplynu.

V případě mechanické dezintegrace je v technické praxi možno využít mnoha typů mlýnů, které pracují na různých principech rozpojování. Podle tohoto hlediska lze mlýny rozdělit na zařízení s volně uloženými tělesy, vibrační, kuličkové, kladkové, nárazové úderové, válcové anebo koloidní. Jedním z hlavních kritérií pro volbu vhodného typu mlecího zařízení je vlhkost zpracovávané biomasy. V případě dezintegrace suché vláknité biomasy se dá říci, že je po technické stránce vyřešena, což ovšem neplatí pro dezintegraci vlhkého materiálu. Dosavadní zařízení pro mletí vlhké vláknité biomasy má mnoho nevýhod, např. dochází k jeho ucpání, které způsobuje diskontinuální provoz. Další nevýhodou je vysoká energetická náročnost, která se pohybuje řádově v tisících $\text{kW}\cdot\text{h}^{-1}$. [1] Na Ústavu procesní a zpracovatelské techniky Fakulty strojní ČVUT bylo v předchozích letech vyvinuto úsilí navrhnout zcela nové koncepční uspořádání mlýnu pro dezintegraci vlhkých vláknitých materiálů za minimálních energetických nároků. Tato diplomová práce pokračuje v systematickém testování jednotky, její konstrukční optimalizaci z hlediska výkonnosti ve vztahu k požadované jakosti výstupního materiálu a energetické nenáročnosti. Na základě analýzy konstrukce současných dezintegračních jednotek, systematických experimentů s optimalizovaným konstrukčním uspořádáním maceračního mlýnu, byla definována metodika scale-up maceračního mlýnu a navržen demonstrativní model zařízení v průmyslovém měřítku pro uvažované množství $3 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ komunální zeleně.

2. Rešerše

2.1. Zařízení pro dezintegraci vláknitých materiálů

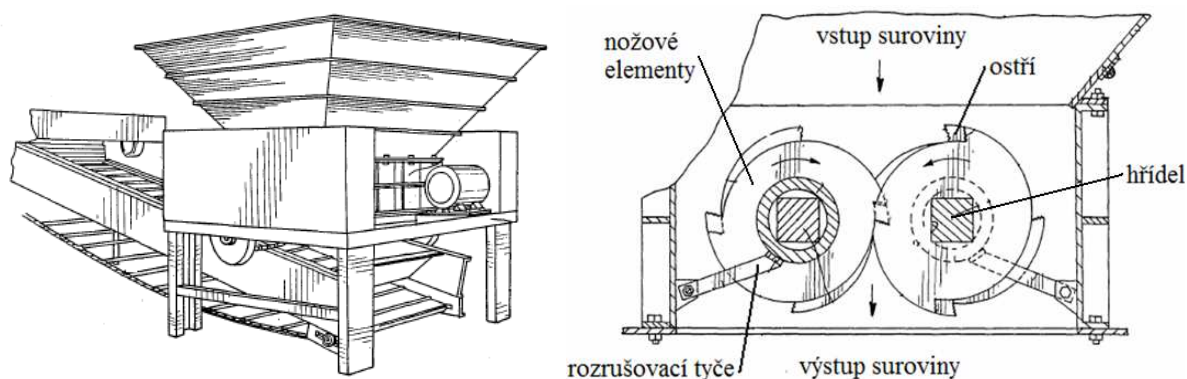
Drtiče

Rozměry vstupních surovin, např. kosti a dřevní odpad určeného k mletí, mohou být značně veliké. Jejich přímé zpracování v mlýnu by vyžadovalo zvýšení doby zdržení vzhledem k požadované velikosti částice. Z tohoto důvodu se před mlecí stanicí doporučují umístit takzvané drtiče. Jedná se o zařízení, která slouží k hrubému rozpojení materiálu. Drtiče jsou schopny dezintegrovat surovinu na velikost 10 mm. V průmyslových provozech se používají různé typy drtičů např. čelistové, úderové, válcové nebo kruhové. Pro zpracování lignocelulózových materiálů se obvykle používají drtiče úderové, šnekové a nožové drtiče nebo jejich vzájemné kombinace. Nejčastěji se však používají rotační nožové drtiče. [2,1]

Konstrukční uspořádání drtiče je závislé na typu zpracovaného materiálu. Pro dezintegraci lignocelulózových materiálů lze použít několik typů nožových drtičů např. Lundelleho drtič. [1]

Lundelleho drtič

Lundelleho drtič, viz obr. 2.1, pracuje při nízkých frekvencích otáčení oproti klasickým nožovým drtičům. Materiál je přiváděn přes násypku mezi dva navzájem opačně otáčející se rotory. Hřídele rotorů jsou čtvercového průřezu a jsou osazeny nožovými elementy s ostřím. Tyto elementy jsou vzájemně odsazeny. Vzdálenost odsazení udává výstupní velikost částice drceného materiálu. Aby nedocházelo k nabalování vláknitého materiálu na rotory, jsou mezi jednotlivé nožové segmenty instalovány rozrušovací tyče. [3]



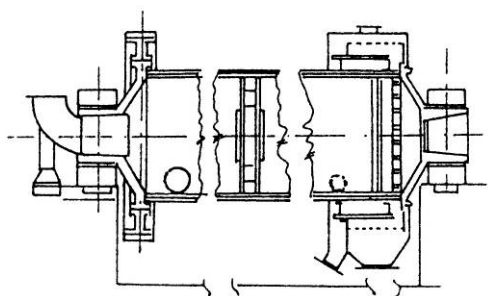
Obr. 2.1 Lundelleho drtič pro rozmělnění lignocelulózových materiálů.[3]

Stanovením energetické náročnosti nožového drtiče se zabývali Schell a Harwood. Při svých experimentech stanovili energetickou náročnost při dvoustupňovém drcení travin a papíru. Po prvním stupni drcení trávy s obsahem vlhkosti 10% hm. byla výstupní velikost částic 10 – 20 cm a stanovená energetická náročnost byla $8,2 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$. Po druhém stupni drcení, kdy velikost výstupních částic byla 2,5 cm, byla energetická náročnost $4,1 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$. Při rozsekání novinového papíru s vlhkostí 10 % hm. v prvním stupni, po kterém byla výstupní velikost částic 4 cm je energetická náročnost $15,2 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$, ve druhém stupni pro výstupní velikost 2,5 cm bylo třeba $7,6 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$. [4]

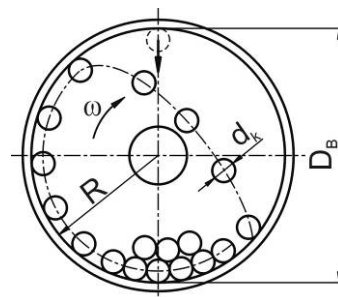
Stanovením energetické náročnosti nožového drtiče se zabýval i Adapa a jeho tým. Při svých experimentech zpracovával v nožovém drtiči pšeničnou, ovesnou, a řepnou slámu. Vlhkost slámy se pohybovala v rozmezí 13,1 – 15,6 % hm. Výslednou velikost částic však autor neuvádí. Energetická náročnost pro rozdrčení ječné slámy o vlhkosti 13,5 % hm. byla $3,15 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$, pro pšeničnou slámu o vlhkosti 15,6 % hm. $2,27 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$, pro ovesnou slámu o vlhkosti 13,1 % hm. $2,74 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ a pro řepkovou slámu o vlhkosti 15,1 % hm. $1,96 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$. [5]

Kulové mlýny

K dezintegraci materiálu v kulovém mlýnu, viz obr. 2.2, dochází pomocí volně uložených mlecích těles. Nejčastěji jsou mlecími tělesy koule. Tělesa jsou uloženy ve válcové části mlýnu – bubnu. Vnitřní stěny bubnu jsou obloženy otěruvzdorným materiálem. Při otáčení bubnu dochází k unášení mlecích těles, která při pádu drtí a rozpojují materiál, viz obr. 2.3. K dezintegraci materiálu dochází také vzájemným třením tělísky mezi sebou a mezi bubnem. [6] Vznikající smykové a tlakové síly způsobí narušení krystalické struktury celulózy, sníží stupeň polymerizace celulózy, zmenší se velikost částec a vzroste specifický povrch. [1]



Obr. 2.2 Komorový kulový mlýn [6]



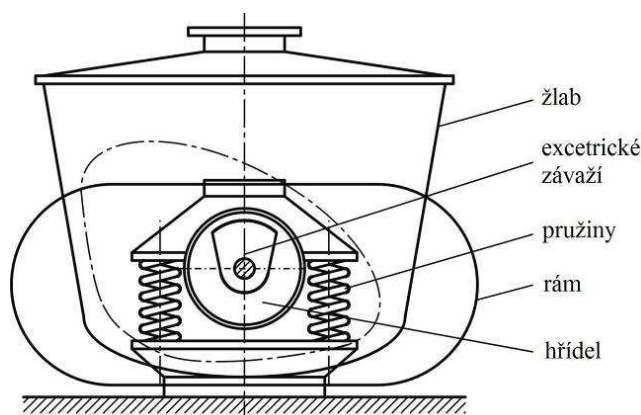
Obr. 2.3 Princip funkce kulového mlýnu [6]

V kulových mlýnech lze zpracovávat jakýkoliv materiál bez ohledu na obsah vlhkosti. Účinnost rozmělnění materiálu závisí na druhu rostlinné suroviny. [1] Nejmenší účinnost mletí kulovým mlýnem je při mletí tvrdých odpadů, jako je např. dřevní štěpka. [8]

Energetickou náročností a účinností mletí na výnos glukózy z cukrové třtiny a bagasy (jedná se o vláknité zbytky cukrové třtiny po extrakci šťávy) se zabýval Silva. Velikost částic po rozemletí se pohybovala v rozmezí 0,25 – 1 mm. Doba mletí se pohybovala v časovém rozmezí 30 – 120 minut o frekvenci otáčení 400 ot·min⁻¹. Mletí probíhalo v cyklickém režimu. Pro surovou neupravenou bagasu byla naměřena výtěžnost glukózy 22 % hm. Maximální výtěžnosti glukózy byla 83,6 % hm., Těto hodnoty bylo dosaženo po 90 minutách mletí. V případě neupravené slámy z cukrové třtiny byla výtěžnost 23,5 % hm. Po 120 minutách mletí slámy se zvýšila výtěžnosti na 82,1 % hm. Energetickou náročnost však autor bohužel neuvádí. [7]

Vibrační kulové mlýny

Vibrační kulový mlýn, viz obr. 2.4, vychází z klasického kulového mlýna. Oproti kulovému mlýnu nevykonává buben – žlab rotační pohyb, ale vibrační. Ve žlabu jsou nasypána mlecí tělesa. Vibrace mlýnu jsou vyvolány excentricky umístěným závažím na hřídeli. Tyto vibrace vyvolají krouživý pohyb náplně bubnu a dochází k mletí materiálu působením mlecích těles vlivem smykových sil. Při mletí dochází k intenzivnějšímu promíchávání zpracovávaného materiálu oproti mletí v klasických kulových mlýnech. [6]. Díky intenzivnějšímu promíchávání mletého materiálu dosahuje vibrační mlýn vyšší účinnosti rozmělnění zpracovávaného materiálu. [8]



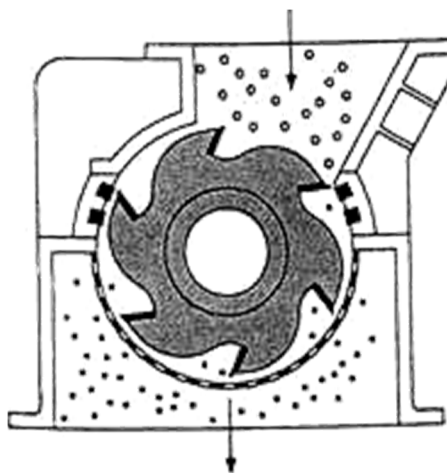
Obr. 2.4 Vibrační kulový mlýn [6]

Energetickou náročnost vibračního kulového mlýnu při dezintegraci rostlinné biomasy zkoumal Kobayashi a jeho tým. Cílem jeho práce bylo vyhodnotit energetickou náročnost rozemletí dřevní štěpky norského smrku na jemný prášek. Do mlýnu byly vloženy štěpky o velikosti 22 mm a vlhkosti 11 % hm. Po rozemletí měly částice rozměr 150 μm . K rozdrcení dřevní štěpky na daný výstupní rozměr bylo potřeba 800 $\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$. Kobayashi a jeho tým provedli ještě porovnávací experiment, ve kterém místo vibračního kulového mlýnu použili mlýn nožový. Pro rozemletí dřevní štěpky na velikost 1 mm bylo potřeba 110 $\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ rozpojovací energie. [9]

Nožové mlýny

Tento typ mlýnu, viz obr. 2.5, lze s výhodou použít pro mletí suchých materiálů, tj. materiálů s vlhkostí do 15 % hm [2]. Nejčastěji se využívá nožových mlýnu k dezintegraci vláknitých materiálů, jako jsou traviny a jim podobné materiály. Princip mletí v nožovém mlýnu je založen na střihu materiálu, který je vyvolán silovým působením mlecích segmentů. [1] Energetická náročnost dezintegrace závisí na rychlosti plnění mlýna, velikosti otvorů v propadovém sítu, frekvenci otáček rotoru a typu geometrie daného ostří. [10,11]

Energetická náročnost dezintegrace nožového mlýnu je ve většině experimentů porovnávána s energetickou náročností dezintegrace úderového mlýnu. Jedním z těch, kdo se zabývali tímto porovnáním, byli Cadoché a Lopéz. (1989). Při experimentech zpracovávali pšeničnou slámu o vlhkosti 4 – 7 % hm. Do mlýnu vstupovala stébla slámy o velikosti 22,4 mm a byla rozemleta na výstupní rozměr 3,2 mm, 2,5 mm a 1,6 mm. Energetická náročnost pro dané výstupní rozměry dosahovala hodnot 5,5 5 $\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$, 6,4 5 $\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ a 7,5 $\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$. [13]



Obr. 2.5 Nožový mlýn [12]

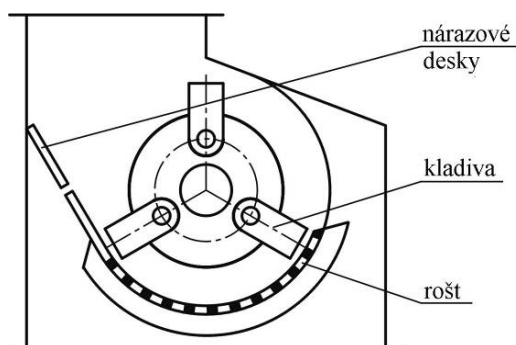
Úderové mlýny

Úderový mlýn, viz obr. 2.6, se dá použít pro rozemletí jakékoli biomasy s obsahem vlhkosti do 15 % hm. [2] Princip mletí v úderovém mlýnu je založen na stříhu materiálu, který je vyvolán silovým působením mlecích segmentů na částici zpracovávaného materiálu. Hlavní částí úderového mlýnu je rotor, na kterém jsou uchyceny mlecí segmenty označované jako kladiva. Uložení kladiv na rotoru je buď pevné, anebo volné. Rotor je umístěn v mlecí komoře, jejíž součástí je propadové síto. Na otáčející se rotor je přiváděn materiál a rázovými účinky mlecích kladiv je rozpojován. Dále dochází k rozpojení nárazy částic do pláště a vzájemným naražením částic. Nejdůležitější nárazy pro rozemletí jsou nárazy způsobené kladívky na materiál.[6] Velmi důležitým parametrem u úderových mlýnů je obvodová rychlost kladívek, která se pohybuje od 76 – 117 m·s⁻¹. Dalším důležitým parametrem je pevnostní charakteristika materiálu. [15] Maximální velikost výstupních částic lze do určité míry regulovat velikostí otvorů štěrbin nebo síta. [10] Pořizovací a provozní náklady úderového mlýnu jsou v porovnání s ostatními mlýny nízké a snadná je i jeho údržba. [18]

Úderové mlýny jsou poměrně levná zařízení, jednoduše se dají přizpůsobit typu rozměňovaného substrátu a díky konfiguraci propadových sít lze dosáhnout požadované velikosti částic. Spotřeba energie závisí na počáteční velikosti částic, vlhkosti substrátu a jeho vlastnostech a na množství zpracovávaného materiálu. [1]

Jak již bylo uvedeno, tak energetická náročnost úderového mlýnu se nejčastěji porovnává s energetickou náročností nožového mlýnu. Stanovením energetické náročnosti úderového mlýnu se zabývali Cadoché a Lopéz. (1989). Experiment je popsán výše. Energetická náročnost byla 21 kWh·t⁻¹, 29 kWh·t⁻¹ a 42 kWh·t⁻¹. [13]

Stanovení energetické náročnosti úderového mlýnu se dále zabývalo mnoho dalších týmů, např. Ghorbani a jeho tým. Ti stanovovali energetickou náročnost úderového mlýnu při dezintegraci vojtěšky s vlhkostí 9 % hm. Vstupní velikost vojtěšky byla 18 a 12 mm. Průměr otvorů nainstalovaného síta byl 1,68 mm. Měrná rozpojovací energie při mletí částic o velikosti 18 mm byla 4,47 kWh·t⁻¹ a při rozemletí vojtěšky se vstupní velikostí 12 mm byla 1,5 kWh·t⁻¹. [14]

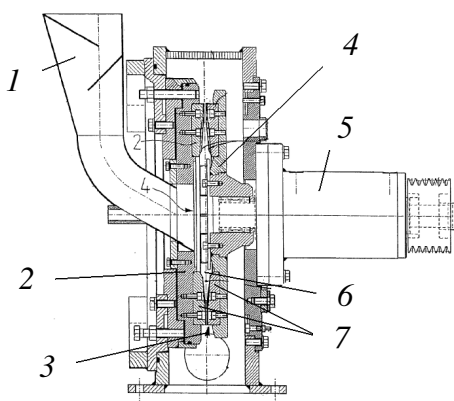


Obr. 2.6 Úderový mlýn [6]

Diskové mlýny

Tento typ mlýnu, viz obr. 2.7, lze použít pro jemné zpracování surovin s vlhkostí do 15% hm.[2] Princip rozpojování spočívá v namáhání materiálu na stříh a smyk. Diskový mlýn se skládá ze dvou disků, přičemž jsou buď oba rotující, anebo je jeden z nich stacionární a druhý rotující. Na discích jsou pevně uchyceny mlecí segmenty. Zpracovávaná surovina je do mlýnu přiváděna axiálně - do středu disku. Za provozu je surovina vlivem odstředivé síly radiálně unášena od středu disků a je namáhána na stříh a smyk působením silových účinků mlecích segmentů. Tento rozemletý materiál je pak odváděn z mlecí komory proudem vzduchu, který vytváří lopatky metače připevněné na rotujícím disku. Díky rotaci disku nedochází k hromadění materiálu v pracovním prostoru. [1] Tvar dezintegrovaných částic je jehlovitý a maximální velikost částice je 1 - 2 mm. [15]

Diskové mlýny je výhodné použít pro zpracování tvrdých materiálů. Nevýhodou diskových mlýnů je neefektivní využití energie, protože většina se přemění v odpadní teplo. Dále pak patří mezi energeticky nejnáročnější mlecí zařízení a proto je jejich použití pro zpracování lignocelulóзовých materiálů nevýhodné. [2,10]



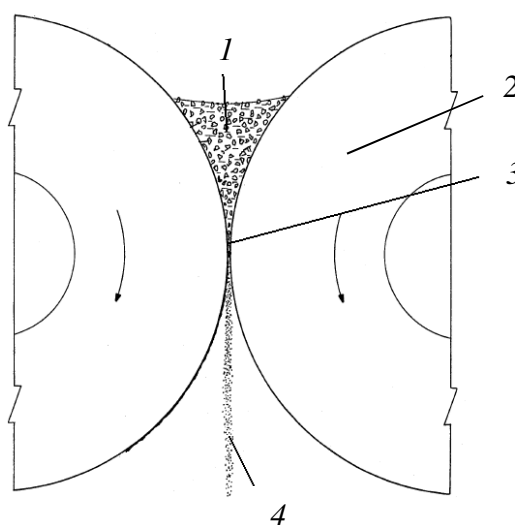
Obr. 2.7 Diskový mlýn [16]: 1 – násypka, 2 – pevný disk,
3 – výstup materiálu, 4 – rotující disk, 5 – převodovka,
6 – mlecí prostor, 7 – nože

Energetickou náročností při mletí diskovým mlýnem se zabýval např. Reppellin a jeho tým (2010). Při měření zjišťoval, jaký vliv má pražení biomasy na energetickou náročnost mletí. K experimentům používal štěpky ze smrku a buku o vstupní velikosti 2 – 4 mm. Ty byly rozemlety na velikost 0,5 mm. Potřebná měrná energie byla pro smrk 750 kWh^t⁻¹ a pro buk 850 kWh^t⁻¹. Při stejných parametrech, ale s upraženým materiálem při teplotách nad 200 °C, se měrná rozpojovací energie změnila pod hodnotu 100 kWh^t⁻¹. Z toho vyplývá, že diskové mlýny jsou vhodné pro mletí tvrdých materiálů. [17,2]

Válcové mlýny

Válcové mlýny lze použít pro mechanickou předúpravu lignocelulózových materiálů, protože při průchodu materiálu mlecí mezerou působí na materiál vysoké smykové síly. Avšak tato zařízení se v průmyslové praxi zřídka používají. Princip mletí válcového mlýnu je uveden na obr. 2.8. Materiál je vtahován do mlecí mezery mezi dva válce. Tyto válce mají odlišnou frekvenci otáčení a díky tomu dochází v mlecí mezeře k rozpojování materiálu smykem. Mezi válci je pomocí distančních šroubů nastavitelná mlecí mezera. Při zpracování vlhkého materiálu však velmi často dochází k nalepování vrstvy materiálu na válce. Tuto vrstvu je nutno po určité době mechanicky odstranit. [2,6]

Válcové mlýny se v současné době používají pro rozmělnění např. bavlny, pilin nebo papíru. V některých případech použití válcových mlýnů dochází při zpracování ke zmenšení specifického povrchu vystupujícího materiálu a to z důvodu spojení částic a ztráty porézní struktury. [8]



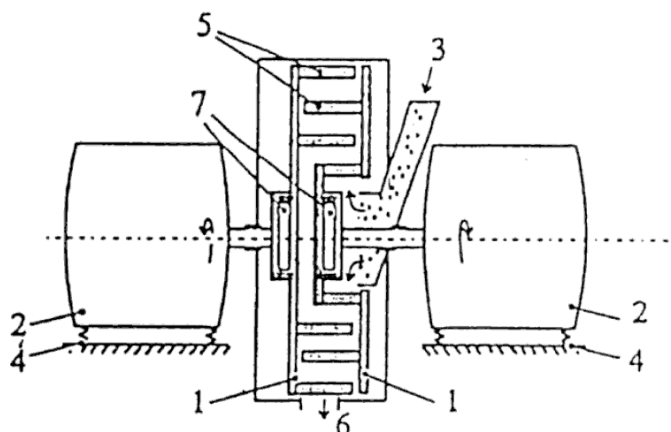
Obr. 2.8 Princip mletí válcových mlýnu [6]:

1 – vstup suroviny, 2 – mlecí válce, 3 – mlecí prostor, 4 – výstup suroviny

Výhoda použití válcových mlýnu je především krátká doba zdržení v mlecím zařízení a vysoký stupeň rozmělnění lignocelulózových materiálů. Konečná velikost částic se po rozemletí může pohybovat v rozmezí 600 – 800 μm . Jako další výhodu lze označit nízkou hlučnost a prašnost. Hlavní nevýhoda tohoto zařízení spočívá v tom, že při mletí nedochází k požadovanému rozvláknění rostlinné struktury. [8] Další nevýhodou válcových mlýnů spočívá ve vysokých pořizovacích a provozních nákladech. [18]

Koloidní mlýn

Princip dezintegrace koloidního mlýnu, viz obr. 2.9, spočívá na otěru materiálu, ke kterému dochází působením smykových sil na částici materiálu mezi mlecími segmenty. Materiál je do mlecí komory přiváděn ve formě suspenze. Při průtoku úzkou štěrbinou mezi rotujícími disky je vystaven vysokým smykovým silám, a tím dochází k jeho rozpojení. [6,1] Výstupní rozměr částičky je závislý na velikosti mezery mezi kotouči a rychlostí jejich rotace. Disky mohou být různě profilované. Pro zvýšení intenzity rozmělnění pevné fáze se na disky instalují segmenty s různým typem ostří. [2] Doba mletí závisí na druhu zpracovávaného materiálu, velikosti mlecí mezery mezi disky a jeho viskozitě. [8]



Obr. 2.9 Koloidní mlýn [19] 1 – rotující disky;
2 – pohon mlýnu; 3 – vstup suroviny; 4 – pružné
podloží; 5 – mlecí elementy; 6 – výstup suroviny;
7 – kontrolní prvky

Stanovením energetické náročnosti rozpojování v koloidním mlýnu se zabýval Hideo a jeho tým. Při svém experimentu zpracovávali rýžovou slámu v koloidním a kulovém mlýnu. V koloidním mlýnu docházelo k dezintegraci suspenze o složení 1 kg rýžové slámy a 20 l vody. Výsledkem experimentu bylo zjištění, že účinnost hydrolýzy při předúpravě koloidním mlýnem rostla se zvyšující se dobou mletí. Největší konverze polysacharidů (90 %) bylo dosaženo po hodinovém mletí v kulovém mlýnu. Velikost výstupních částic byla menší než 2 mm. Energetická náročnost procesu dosáhla hodnoty 30 000 kWh·t⁻¹. [20]

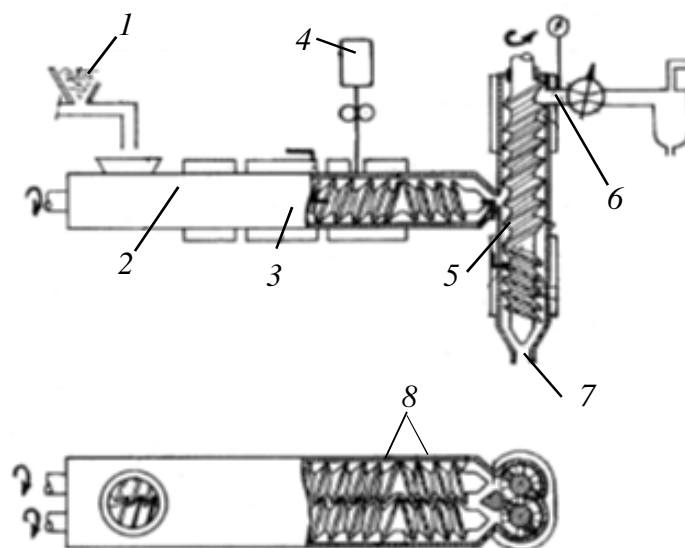
Stanovením energetické náročnosti při mletí dřevních štěpků z tvrdého dřeva se v koloidním mlýně zabývali Schell a Hardwood. Mletí probíhala za proměnných procesních parametrů, kterými byly frekvence otáčení, velikost mlecí mezery mezi disky statoru a rotoru, přítlak, teplota a doba zdržení. Vstupní vodní suspenze měla koncentraci 40 % hm. štěpků. Velikost výstupních částic se pohybovala v rozmezí od 1 do 1,5 mm. Z experimentů vyplynulo, že s rostoucí frekvencí otáčení, teplotou zpracování suroviny a klesající dobou zdržení klesá rozpojovací energie. Pro otáčky 1200 ot·min⁻¹, teplotu 126 °C a dobu zdržení 6 minut je třeba rozpojovací energie 551 kWh·t⁻¹, ale při otáčkách 1800 ot·min⁻¹, teplotě 126 °C a dobu zdržení 3 minuty je energetická náročnost 244 kWh·t⁻¹. [4]

Extrudéry

Dalším zařízením k rozmělnění vlhké biomasy, je extrudér. Zařízení je zobrazeno na obr. 2.10. V tomto případě se nejedná o klasickou dezintegrační jednotku, ale její užití v technologiích mechanického rozmělnění biomasy je v současnosti velkým trendem. Princip mletí v extrudéru je založen na stříhu a otěru materiálu, ke kterému dochází působením smykových sil na částici biomasy mezi šnekem a válcem za zvýšené teploty a tlaku. [21,1]

Aktivním mlecím členem extrudéru může být rotující šroub nebo šrouby v tangenciální komoře. Extrudéry lze dělit podle smyslu otáčení na souběžné a protiběžné. Také lze dělit dle směru závitů na levý nebo pravý anebo dle chodů závitů na jednochodé nebo dvojchodé. Počet závitů je přímo úměrný kompresnímu poměru, čím více má extrudér závitů, tím více je materiál stlačován. [22]

Na obr. 2.10 je zobrazena dvoušneková dezintegrační jednotka. Materiál je nejprve ve vstupní části prohříván, následně promíchán a rozmělněn. V další části zařízení je vystaven účinku různých chemických metod předúprav. V pracovním prostoru působí na materiál velké smykové síly a tím dochází k roztrhnutí rostlinného svazku. [1]



Obr. 2.10 Jednotka kontinuálního rozmělnění biomasy [23]:

1 – násyпка, 2 – 1. extrudér, 3 – temperace, 4 – nástřik kyseliny,
5 – 2. extrudér, 6 – výstup kapalné fáze, 7 – výstup tuhé fáze,
8 – zádrž materiálu

V průmyslové praxi se používají různé modifikace extrudérů. Jedno z nich je temperování prvního extrudéru a použití koloidního mlýnu místo druhého extrudéru. V této konfiguraci dochází k 40 – 90 % rozdrčení vstupního materiálu. Doporučovaná objemová komprese je u tohoto zařízení 2:1 až 4:1. Dalšími důležitými provozními parametry jsou frekvence otáčení šneku a disku. Doporučená hodnota otáček šneku je 70-100 ot·min⁻¹ a otáček disku 800 - 1800 ot·min⁻¹. Energetická náročnost tohoto zařízení je 100 – 200 kWh·t⁻¹. Tuto hodnotu lze snížit přidáním slabého roztoku kyseliny sírové nebo dusičné na 120-130 kWh·t⁻¹. [24,1]

2.1.1. Zhodnocení použití mlýnů pro mechanickou dezintegraci

Z výše uvedených informací vyplývá, že mechanická dezintegrace je energeticky velmi náročný proces. Z tohoto důvodu je hlavním kritériem pro výběr vhodné technologie předúpravy energetická náročnost, kdy volíme zařízení, která mají nejnižší hodnotu rozpojovací energie ve vztahu k požadované jakosti materiálů a výkonnosti dezintegrace. Energetická náročnost potřebná k rozemletí daného materiálu závisí na typu použité dezintegrační jednotky a její konfiguraci. Závisí také na poměru vstupní a požadované výstupní velikosti částic, na charakteristice biomasy (vlhkost, složení). [1]

V průmyslové praxi obecně platí, že pro mletí materiálu s vlhkostí do 15 % hm. jsou energeticky nejvýhodnější úderové a nožové mlýny. Materiály s vlhkostí větší než

15 % hm. se zpracovávají v extrudérech nebo koloidních mlýnech. Hlavní nevýhodou těchto zařízení je však mletí v cyklech, ucpávání mlecí mezery a vysoká energetická náročnost. [1]

2.2. Scale-up mlýnů

K přenosu procesních parametrů z laboratorního mlýnu na průmyslový lze obecně, za předpokladu zachování geometrické podobnosti, použít dvou teorií. Pro zařízení, jehož princip je založen na stříhu materiálu, např. mlýn nožový nebo úderový, se většinou využívá teorém zachování účinku působící tlakové síly. [25, 26] V tomto teorému je uvedeno, že velikost tlakové síly působící na částici v laboratorním mlýnu musí být rovna tlakové síle, která působí na částici v průmyslovém mlýnu.

Pro zachování geometrické podobnosti obou zařízení musí být zachována obvodová rychlost rotoru. Na základě principu zachování obvodových rychlostí lze přenést frekvence otáčení a průměr rotoru z laboratorního zařízení na provozní zařízení pomocí rovnice (1). [26]

Pro přenos procesních parametrů zařízení, jehož princip je založen na otěru materiálu, např. mlýny válcové nebo koloidní, se využívá teorém konstantního měrného příkonu neboli teorém zachování účinku působící smykové síly u modelového a průmyslového zařízení. [25, 27] Při zachování geometrické podobnosti a zachování měrných příkonů mezi modelovým laboratorním a průmyslovým zařízením lze pomocí vztahu (2) přenést průměr a frekvenci otáček rotoru z laboratorního zařízení na průmyslové. [27]

$$n_{pr} = n_{lab} \cdot \frac{D_{lab}}{D_{pr}} \quad (1)$$

$$n_{pr} = n_{lab} \cdot \left(\frac{D_{lab}}{D_{pr}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

Kde:

n_{pr} ... frekvence otáček průmyslového zařízení ($\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$)

n_{lab} ... frekvence otáček laboratorního zařízení ($\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$)

D_{pr} ... průměr rotoru průmyslového zařízení (m)

D_{lab} ... průměr rotoru laboratorního zařízení (m)

2.3. Macerační mlýn

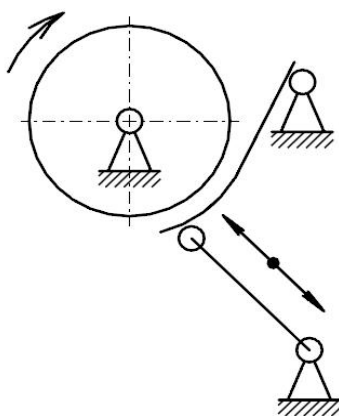
Technologie mechanické dezintegrace biomasy s vlhkostí do 15 % hm. je v současné době technicky vyřešena. Nejčastěji se v technologii zpracování suché biomasy používají nožové nebo úderové mlýny. Tato zařízení mají minimální energetické nároky vzhledem k požadovanému stupni zpracování materiálu. Avšak technologie mechanické dezintegrace biomasy s vlhkostí nad 15 % hm., tedy vlhké biomasy, není v současné době technicky dořešena. V praxi se nejčastěji používají koloidní mlýny nebo dezintegrační jednotky tvořené extrudérem a koloidním mlýnem. Tato zařízení jsou schopna dezintegrovat vlhkou vláknitou biomasu na požadovanou velikost pouze v cyklech, protože velmi často se dochází k ucpání mlecí mezery vlhkým materiálem. Taková dezintegrační jednotka, která by byla schopna rozemlít vlhkou vláknitou biomasu v kontinuálním režimu při nízké energetické náročnosti, se v současné době na trhu nevyskytuje. Z tohoto důvodu bylo na Ústavu procesní a zpracovatelské techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze navrženo zařízení, které vlhkou vláknitou biomasu kontinuálně zpracovávávat umožňuje. Dezintegrační zařízení bylo navrženo ve spolupráci s firmami Prokop Invest, Aivotec a 3V Tech. Tyto firmy již zkušenosti s problematikou mletí vlhkých materiálů mají. Prototypový macerační mlýn je zobrazen na obr. 2.11. [1]



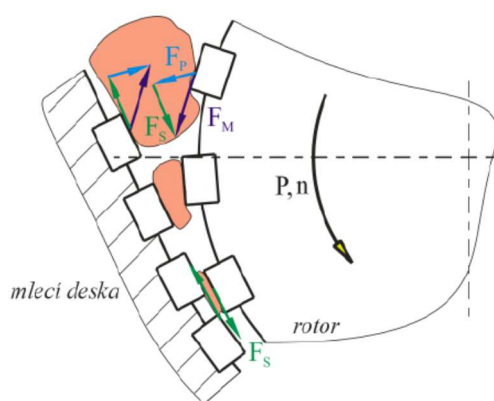
Obr. 2.11 Macerační mlýn [28]

2.3.1. Podstata dezintegrace

Schéma mechanismu maceračního mlýnu je zobrazeno na obr. 2.12. Jedná se o uspořádání válec – deska. K dezintegraci materiálu v maceračním mlýnu dochází mezi rotorem a zakřivenou deskou. Silové účinky, které působí při mletí na částici, jsou znázorněny na obr. 2.13. Nejprve dochází k destrukci větších částic působením nárazových účinků mlecích segmentů. Dále je předdrcená částice vtahována do mlecí mezery, kde je namáhána stříhem a otěrem od mlecích segmentů a tím dochází k jejímu rozvláknění. [1]



Obr. 2.12 Schéma mechanismu maceračního mlýnu [1]

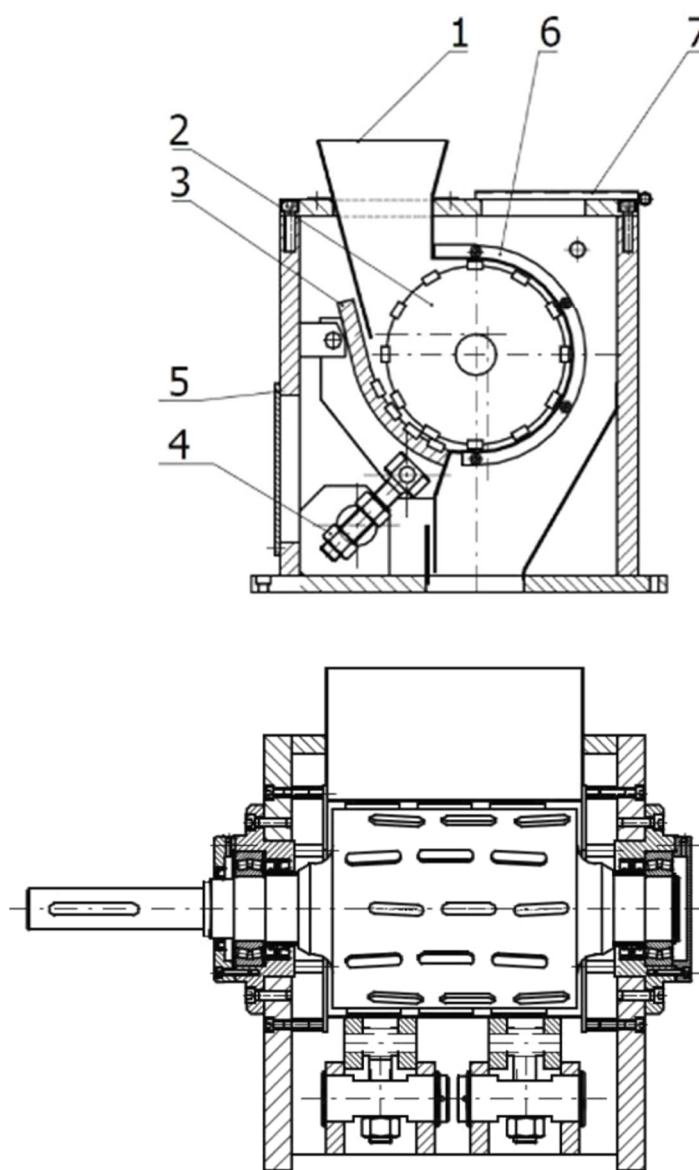


Obr. 2.13 Silové účinky působící na částici [1]

2.3.2. Konstrukční uspořádání

Konstrukční uspořádání modelového maceračního mlýnu je zobrazeno na obr. 2.14. Materiál je do maceračního mlýnu přiváděn násypkou (1). Otáčející rotor (2), na kterém jsou po obvodě přivařeny mlecí segmenty, vtahuje materiál do mlecí mezery mezi rotor a drhlík (3). Mlecí mezera je nastavitelná pomocí stavěcího šroubu (4) s jemným závitem. Stavěcí šroub je přístupný po demontování kontrolního víka (5). Rozmělněný materiál je vytlačován odstředivou silou do kalibračního síta (6) a následně propadá sítím nebo je vrácen zpět do mlecí mezery. Pro kontrolu síta a procesu mletí je v horní části maceračního mlýnu umístěno kontrolní víko (7). [28]

Aktivní mlecí průměr rotoru zařízení je 230 mm a délka 270 mm. [28]



Obr. 2.14 Konstrukční uspořádání modelového maceračního mlýnu:

1 – násypka, 2 – rotor, 3 – drhlík, 4 – stavěcí šroub pro nastavení mlecí spáry, 5 – kontrolní víko, 6 – síto, 7 – kontrolní víko [28]

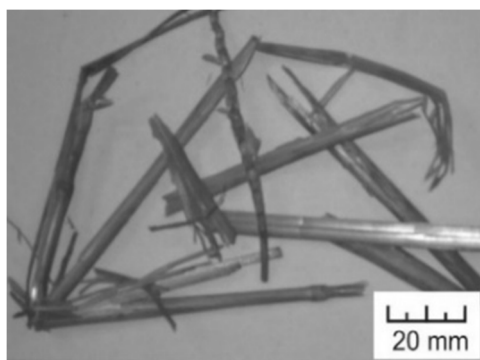
2.3.3. Výsledky z dosavadních měření na maceračním mlýnu

V dosavadních experimentech na maceračním mlýnu byla mleta pšeničná sláma. Sláma obecně patří mezi zástupce biomasy s lignocelulózovým základem. Jedná se o surovinu, která se používá v zemědělství nejčastěji jako podestýlka pro hospodářská zvířata anebo krmivo. Je to tedy vedlejší produkt zemědělské výroby, který lze energeticky využít v surovém stavu (sláma) nebo častěji až po jejím využití v živočišné výrobě (slamnatý hnůj).

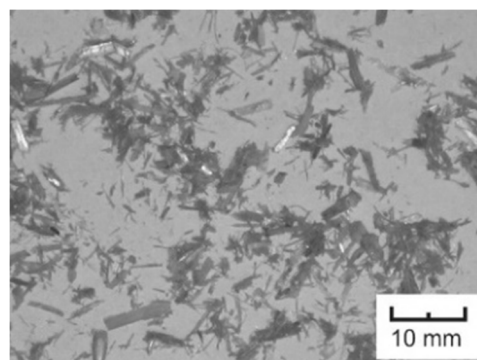
Hlavním problémem slámy při jejím využití v bioplynových stanicích je její kompozitní struktura. Ta způsobuje, že je sláma obtížně biologicky rozložitelná, struktura zabraňuje jejímu smočení do kapalné fáze. Sláma plave na hladině, není tedy přístupná hydrolytickým mikroorganismům a nedochází k jejímu enzymatickému rozkladu. Jak již bylo uvedeno, sláma většinou vstupuje do provozu bioplynových stanic ve vlhkém stavu a její rozvláknění v současných dezintegrátorech je neúčinné a energeticky náročné. Z tohoto důvodu si pro své experimenty na vyhodnocení efektivity dezintegrace maceračního mlýnu vybral Krátký (2015) jako referenční materiál pšeničnou slámu. [1]

Při svých experimentech použil Krátký (2015) pšeničnou slámu, která nebyla technologicky zpracována. (tzn. lisována, drcena, sebrána sběracím vozem). Jednalo se pouze o slámu, která byla odebrána přímo z pole po sklizni obilním kombajnem. Autor uvádí, že sláma obsahovala 93 % hm. TS a 88 % VS. Sláma byla před experimenty nejprve máčena ve vodě o teplotě 40 °C pro přiblížení se jejímu složení v reálném provozu bioplynové stanice. Konečná vlhkost slámy byla 40 % hm. V prvotních experimentech se autor zabýval stanovením provozních parametrů. Provozní parametry byly stanoveny takto: mlecí mezera 0,1 mm, otáčky rotoru 170 ot·min⁻¹, průměr otvorů v propadovém sítu 5 mm, manuální dávkování slámy a její diskontinuální zkrápění vodou. [1]

V další fázi testování byly provedeny experimenty na vyhodnocení vlivu mletí na velikost a strukturu částic slámy ve vztahu k energetické náročnosti. Vstupní velikost částic (stébel) byla přibližně 200 mm a výstupní velikost částic byla vizuálně změřena do 10 mm, jak je vidět z obr. 2.15. Autor také nechal vzorky slámy podrobit analýze mikrostruktury, viz obr. 2.16. Z obrázků je patrný rozdíl slámy před mletím a po mletí. Dochází k redukci velikosti slámy, k rozrušení rostlinného svazku a jeho rozvláknění. Dezintegrovaná sláma zvýšila svůj specifický povrch a díky tomu je přístupnější enzymovému rozkladu. [1]

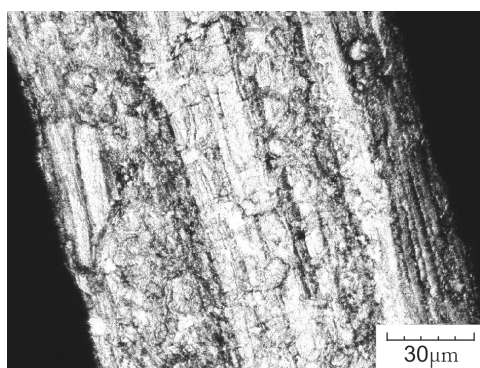


a) před mletím

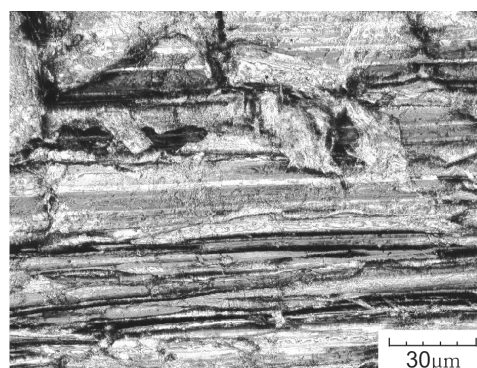


b) po mletí

Obr. 2.15 Velikost částic pšeničné slámy před a po mletí [1]



a) před drcením



b) po drcení

Obr. 2.16 Mikrostruktura podélného řezu částic pšeničné slámy [1]

Energetická náročnost dezintegrace vlhké slámy na maceračním mlýnu byla stanovena pomocí měření činného výkonu elektromotoru po dobu mletí. Získaná hodnota energetické náročnosti mletí vlhké slámy o výkonnosti $120 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ mlecího válce je $33 \pm 3 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$. V přepočtu na celkovou sušinu je energetická náročnost $50 \pm 5 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ TS. K dané hodnotě je nutné ještě započítat hodnotu energie, která je potřebná k pokrytí pasivních odporů. Její hodnota je $10 \text{ Wh}\cdot\text{t}^{-1}$. [1]

Autor dále uvádí, jak ovlivnilo mletí vlhké slámy v maceračním mlýnu výtěžnost bioplynu. Výtěžnost bioplynu neupravené slámy a výtěžnost rozmělněné slámy byla stanovena pomocí fermentačních testů dle evropského standardu VDI4630 (2006). Specifická produkce bioplynu z neupravené slámy byla $491 \pm 76 \text{ Nm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ TS a specifická produkce z rozemleté slámy dosahovala hodnoty $605 \pm 17 \text{ Nm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ TS. Z této bilance je tedy patrné, že dochází ke zvýšení výtěžnosti bioplynu rozemleté slámy o 25 % oproti slámě, která rozemleta nebyla. [1]

3. Cíle diplomové práce

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2, existují pro mletí vlhké vláknité biomasy různé typy mlýnů. Nejčastěji se používají koloidní mlýny nebo extrudéry. Hlavní nevýhodou těchto zařízení je energetická náročnost a diskontinuální provoz. Proto byl vyvinut macerační mlýn pro mletí vlhké vláknité biomasy, který dokáže pracovat v kontinuálním režimu. Prvotní experimenty dokazují, že se jedná o unikátní zařízení, které nejen dokáže pracovat v kontinuální režimu, ale i jeho energetická náročnost mletí je oproti jmenovaným zařízením nižší. Pro porovnání: energetická náročnost extrudéru je 100 - 200 kWh·t⁻¹ oproti tomu energetická náročnost dezintegrace maceračního mlýnu je 33 kWh·t⁻¹.

V halové laboratoři Ústavu procesní a zpracovatelské techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze se nachází zmiňovaný prototyp poloprovozního modelu maceračního mlýnu. Pro uvedení tohoto zařízení na trh je nutné nejprve provést další experimenty. Ty by měly směřovat ke stanovení výkonnosti poloprovozního zařízení a ke stanovení principu přenosu parametrů z poloprovozního zařízení na průmyslové zařízení.

Cíle diplomové práce:

- Experimentální – provést základní měření na poloprovozním modelu macerátoru s cílem určit jeho optimální konfiguraci z hlediska výkonnosti a identifikovat slabá místa jeho konstrukce.
- Projekční – vypracovat metodiku scale-up a základní konstrukční návrh macerátoru o výkonnosti zpracování suroviny 3 t·h⁻¹.
- Konstrukční – navrhnout demonstrativní model macerátoru v průmyslovém měřítku a vytvořit jeho sestavný výkres.

4. Experimentální měření

4.1. Výkonnost poloprovozního mlýnu

Investoři firmy Prokop Invest a Aivotec, předpokládají využití maceračního mlýnu v bioplynových stanicích a kompostárnách, z toho důvodu byly pro testování zvoleny tyto materiály: pšeničná sláma, tráva, listí, dřevní štěpka a kuchyňské odpady. Velikost složek je zobrazena na obr. 4.1 až 4.4.



Obr. 4.1 Zpracovávaný materiál - štěpka



Obr. 4.2 Zpracovávaný materiál - sláma



Obr. 4.3 Zpracovávaný materiál - listí



Obr. 4.4 Zpracovávaný materiál - tráva

Prvotní experimentální měření byla provedena s cílem nalézt vhodné nastavení maceračního mlýnu. Výsledkem zkoušek bylo zjištění, že při frekvenci otáček 129 min^{-1} nedochází k akumulaci suroviny v mlecí komoře a materiál je z komory vyhazován. Obecně platí, že se zvyšujícími otáčkami roste energetická náročnost, a proto se frekvence otáček dále nezvyšovala. [29] Optimální nalezené nastavení mlecí mezery je 0,1 mm.

Před samotným stanovením výkonnosti laboratorního mlýnu byla provedena měření, při kterých se zjišťovala závislost stupně rozmělnění materiálu na konfiguraci propadového síta. Měření probíhala při těchto provozních parametrech: mlecí mezera 0,1 mm, otáčky 129 min^{-1} , průměr otvorů v propadovém sítu 5 mm. Materiál byl do mlýnu plněn ručně a při mletí docházelo k jeho zkrápění vodou. Zpracovanou směs tvořily pšeničná sláma, listí a štěpka a to v poměru hm. 2 : 1 : 1. Před mletím byla směs namáčena ve vodě o teplotě $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Vlhkost směsi se zvýšila na 68 % hm. Smíchaná směs, která byla připravena k mletí, je zobrazena na obr. 4.5. Tato směs odpovídá vstupu do kompostárny Aivotec.



Obr. 4.5 Smíchané materiály určené k mletí

V prvním experimentálním měření se zkusilo mlít bez použití propadového síta, viz obr. 4.6. Pokud by bylo možné mlít bez síta, při zachování požadovaného stupně rozmělnění, zvýšila by se výkonnost mlýnu. Při mletí sice docházelo k rozdrčení větších kusů štěpky, ale vláknité materiály tj. sláma a listí se nerozmělnily, viz obr. 4.7. Z tohoto experimentálního měření lze vyvodit závěr, že propadové síto je pro rozmělnění vláknitých materiálů nutné použít.



Obr. 4.6 Macerační mlýn konfigurace bez síta



Obr. 4.7 Zpracovaný materiál po mletí bez síta

V dalším experimentálním měření se propadové síto nainstalovalo. Obepínalo rotor pod úhlem 180 stupňů tak, aby těsně přiléhalo k mlecím segmentům rotoru, takže mezi segmenty a sítím nebyla mezera. Při mletí však docházelo k nedostatečné odvodu materiálu z mlýnu a neustálé rotaci materiálu kolem rotoru. Následně se do síta vyříznul obdélníkový otvor, viz obr. 4.8, s cílem zlepšit odvod materiálu, což se dalším mletím potvrdilo. Zpracovaný materiál vykazoval stejné vlastnosti jako materiál při mletí bez síta, viz obr 4.9. Opět zde byly větší kusy materiálu štěpky rozdrceny, ale vláknité materiály sláma a listí nebyly rozmělněny.

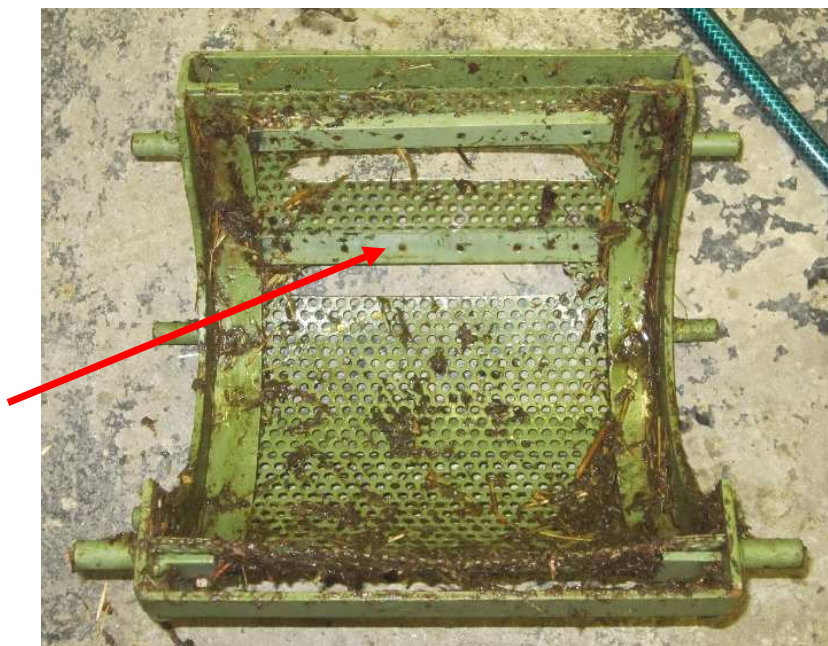


Obr. 4.8 Síto pro konfiguraci natěsno



Obr. 4.9 Rozemletý materiál při mletí s konfigurací natěsno

Následující experimentální měření již probíhalo se sítem, které se od mlecích segmentů odsadilo o 13 mm. Aktivní úhel opásání síta byl 90°. Aby nedocházelo k rotaci zpracovávaného materiálu kolem rotoru, byla k sítu instalována zarážka, viz obr. 4.10.



Obr. 4.10 Síta se zarážkou proti rotaci mletého materiálu

Při této konfiguraci propadového síta již rozemletý materiál splňoval požadovaný stupeň rozmělnění. Kusy štěpky byly rozdraceny stejně jako v předchozích experimentech, ale oproti předchozím měřením byl i dostatečně rozvlákněn vláknitý materiál, viz obr. 4.11. Rozdíl v rozmělnění materiálu při instalaci propadového síta bez odsazení a propadového síta s odsazením je zobrazen na obr. 4.12.



Obr. 4.11 Rozemletý materiál při mletí s konfigurací s odsazením



Obr. 4.12 Porovnání stupně rozmělnění materiálu vlevo síto s odsazením a vpravo síto natěsno

V následujícím experimentálním měření se zjišťoval vliv velikosti otvorů síta na rozmělnění materiálu. Stávající propadové síto s otvory 5 mm bylo nahrazeno sítem s otvory 10 mm, viz 4.13. Měření probíhalo při stejných otáčkách a to $129 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Složky zpracované směsi byly ve stejném poměru jako v předešlém měření. Rozemletý materiál, viz obr. 4.14, vykazoval stejné vlastnosti jako při použití síta s otvory 5 mm. Z měření tedy vyplývá, že změna velikosti otvorů neměla vliv na rozmělnění materiálu.



Obr. 4.13 Konfigurace se sítem o průměr otvorů 10 mm



Obr. 4.14 Rozemletý materiál při mletí se sítím s otvory 10 mm

Po optimalizaci konfigurace propadového síta následovala experimentální měření pro určení výkonnosti poloprovozního mlýnu. Stanovení výkonnosti probíhalo měřením doby mletí, při známé hmotnosti materiálu. Hmotnost zpracovaného materiálu byla 0,6 kg. Materiál se skládal z 0,3 kg slámy, 0,15 kg štěpky a 0,15 kg listí. Při experimentálním měření se určovala závislost výkonosti na čase a otáčkách. Procesní parametry byly stejné jako při předešlých měřeních, pouze otáčky byly proměnné. Materiál byl před mletím namáčen ve vodě o teplotě 40 °C. Vlhkost zpracovávaného materiálu se pohybovala v rozmezí 76 – 85 % hm. Výsledky z měření jsou uvedeny v tab. 1. Jsou zde uvedeny i hodnoty vztažené na délkový metr rotoru.

Otáčky rotoru (ot·min ⁻¹)	129	154	180
Vlhkost (% hm.)	76	81	85
Výkonnost (kg·h ⁻¹)	189,5	243,5	324,7
Výkonnost v sušině (kg·h ⁻¹)	45,5	46,3	48,7
Výkonnost (kg·h ⁻¹ ·m ⁻¹)	701,9	901,9	1202,6
Výkonnost v sušině (kg·h ⁻¹ ·m ⁻¹)	168,5	171,5	180,4

Tab.1 Závislost průtoku materiálu na otáčkách rotoru

4.2. Diskuze a vyhodnocení experimentálního měření

Výše uvedené experimenty přinesly nové poznatky o mletí vláknitých materiálů v maceračním mlýně. Jedním z předpokladů bylo, že k rozvláknění materiálu dojde působením mlecích segmentů na zpracováváný materiál. Tento předpoklad byl vyvrácen při experimentálním měření, kdy na maceračním mlýnu nebylo instalováno síto; zpracováváný materiál nevykazoval žádné známky rozvláknění. Z tohoto měření jasně vyplývá, že k rozmělnění nedochází působením mlecích segmentů na zpracováváný materiál.

Jakým způsobem dochází k rozvláknění materiálu v maceračním mlýnu, ukázaly následující experimenty již s instalovaným sítem. V případě instalace síta natěsno se nedostavil žádaný efekt rozmělnění materiálu, ten nastal až při konfiguraci síta, které bylo od mlecích segmentů odsazeno o 13 mm. **Odsazení síta od mlecích segmentů je pro rozmělnění materiálu klíčové.**

V případě instalace síta natěsno byl zpracováváný materiál působením odstředivé síly tlačěn na síto. Avšak díky tomu, že síto bylo instalováno těsně s mlecími segmenty, nedocházelo k potřebnému odpojení materiálu od rotoru, které by vedlo k jeho zachycení na síto. Materiál byl pouze posouván mlecími segmenty po obvodu síta. V případě použití odsazeného síta, vznikla v mlecí komoře mezera, která umožnila odpojení materiálu od rotoru. Díky tomu se zpracováváný materiál zachytával do otvorů síta, viz obr. 4.15, a vytvářel na sítu drsnou vrstvu, viz obr. 4.16 A. Do mlecí komory se hrnul nový materiál, který se o vzniklou vrstvu otíral, a docházelo tak k jeho rozvláknění. Na obr. 4.16 B je zobrazen detail vrstvy zachyceného materiálu, kde je možno vidět částečné rozvláknění mleté suroviny.



Obr. 4.15 Zachycený materiál na sítu



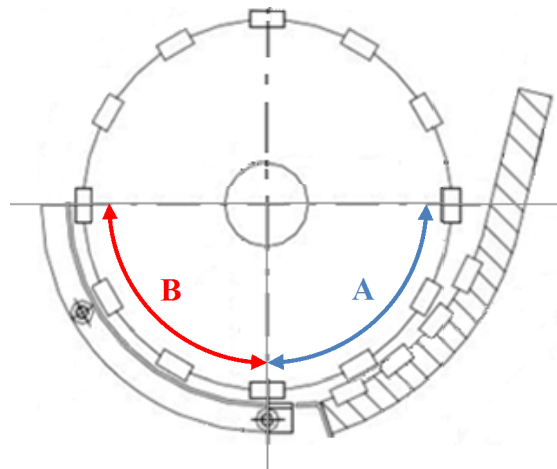
A)



B)

Obr. 4.16 Zachycená vrstvy materiálu na sítu

Z uvedených informací lze vyvodit, že mlecí prostor v maceračním mlýně je možno rozdělit na dvě sekce. Na obr. 4.17 jsou označeny A, B. V sekci A působí na zpracovávaný materiál stříh. V sekci B je materiál namáhán působením otěru.



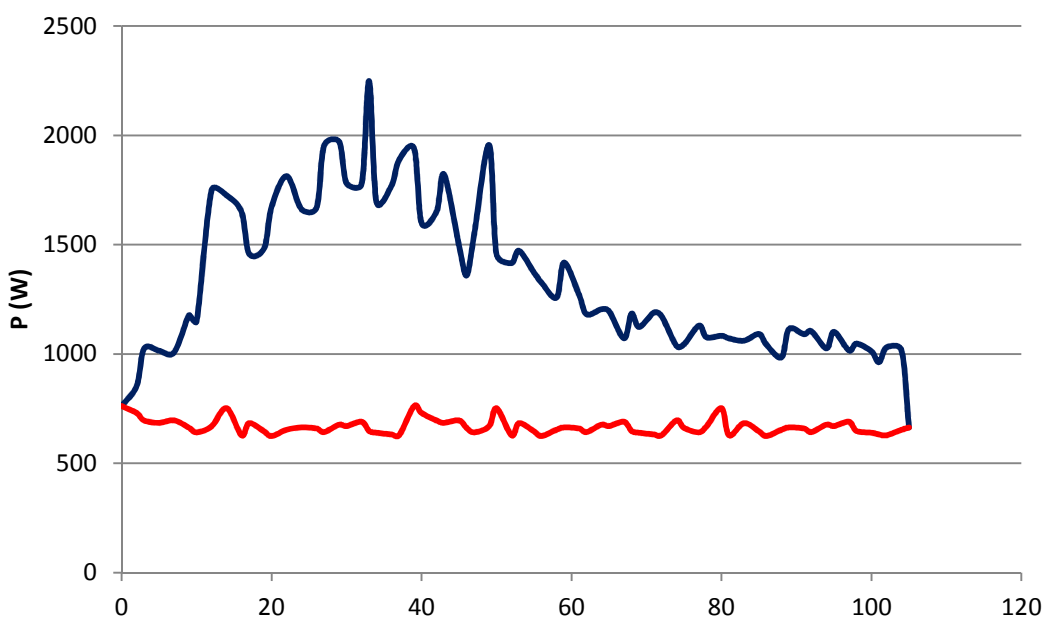
Obr. 4.17 Řez maceračním mlýnem a rozdělení na sekce: A – působení stříhu, B – působení otěru

Experimentální měření při použití síta s otvory 10 mm ukázalo, že změna velikosti otvorů neměla vliv na zpracovávaný materiál. Nedošlo k průchodu materiálu skrz síto a vznikala potřebná drsná vrstva materiálu. V průmyslovém mlýnu bude použito síto s otvory 10 mm pro zvýšení propustnosti vody a lepší čistitelnost síta po provozu.

Pro návrhový výpočet geometrie průmyslové verze mlýnu je vybrána varianta s nejnižšími otáčkami, protože obecně platí, že energetická náročnost dezintegrace roste s otáčkami. [29] Tedy varianta s $129 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a výkonnosti $189,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ při vlhkosti 76 % hm. U této varianty byla naměřena energetická náročnost.

Energetická náročnost dezintegrace materiálu v maceračním mlýně byla stanovena měřením činného výkonu v čase v intervalu jedné vteřiny. Závislost těchto dvou veličin byla následně graficky vykreslena počítačem, viz názorný příklad takového grafu obr. 4.18. Pro stanovení energetické náročnosti dezintegrace bylo nutno provést dvě měření. Jedno pro určení energetické náročnosti při chodu mlýnu naprázdno a druhé k určení celkové energetické náročnosti při mletí. Ze získaného grafu, se z vykreslených průběhů křivek závislosti činného výkonu na čase, určí hodnoty ploch pod křivkami pomocí lichoběžníkové metody numerické integrace. Rozdíl ploch pod křivkami udává vlastní energetickou náročnost dezintegrace. Při známém množství zpracovaného materiálu lze získanou hodnotu přepočítat na jednotku měrné rozpojovací energie $\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$.

Na obr. 4.18 je zobrazen grafický záznam z měření závislosti činného výkonu maceračního mlýnu na čase při mletí. Otáčky rotoru při mletí byly nastaveny na hodnotu $129 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Plocha pod červenou vykreslenou křivkou znázorňuje energetickou náročnost při mletí naprázdno. Plocha pod modrou vykreslenou křivkou znázorňuje celkovou energetickou náročnost při dezintegraci materiálu.



Obr. 4.18 – Graf závislosti činného výkonu na čase při otáčkách 129 min^{-1}

Výsledky z měření jsou uvedeny v tab. 2. Specifická rozpojovací energie je 8,73 kWh·t⁻¹ materiálu. Zpracováváno by mělo být 3 t·h⁻¹. Potřebný specifický rozpojovací výkon je tedy 26,2 kW. V případě celkového výkonu spotřebované při mletí je hodnota 52 kW. Z výsledků vyplývá, že na pokrytí pasivních odporů se spotřebuje 50 % výkonu.

Hmotnost materiálu (kg)	2,263
Energie spotřebovaná při mletí (Wh)	39,23
Energie mlýnu při chodu naprázdno (Wh)	19,47
Náročnost mletí vlhkého materiálu (Wh)	19,76
Specifická rozpojovací energie (kWh·t ⁻¹)	8,73
Celková rozpojovací energie (kWh·t ⁻¹)	17,33

Tab. 2. – Naměřené a vypočtené hodnoty pro rozpojovací energii

4.3. Analýza slabých míst současné konstrukce maceračního mlýnu

Při provozu laboratorního maceračního mlýnu se ukázaly některé konstrukční nedostatky. Tyto nalezené nedostatky jsou popsány u obr. 4.19 až 4.23.

Na obr. 4.19 je vidět, že mezi rotorem a těsněním drhlíku dochází k oděru. Ocelové těsnění drhlíku je příliš dlouhé a dochází k usazování široké vrstvy materiálu, která odnímá výkon. Toto těsnění by tedy mohlo být kratší.



Obr. 4.19 Rotor a drhlík

V násypce, viz obr. 4.20, dochází ke špatnému vtahování materiálu do mlecí části, protože vstup je moc úzký. Při provozu tak větší kusy materiálu v násypce přeskakují, viz např. brambora na obr. 4.21. Širší vstup by větší kusy surovin lépe nabíral.



Obr. 4.20 Násypka maceračního mlýnu



Obr. 4.21 Větší kusy materiálu v násypce přeskakují



Obr. 4.22 Úzký prostor za výstupním otvorem z mlecí části

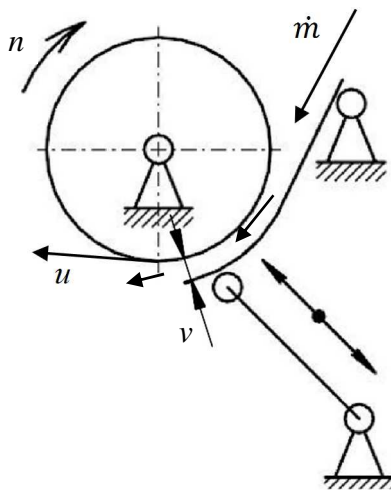
Na obr. 4.22 je zobrazen prostor za výstupním otvorem z mlecí části mlýnu. Při provozu se rozemletý materiál v tomto prostoru hromadí, což je vidět z kontrolního okénka na obr. 4.23. Nedochozí tak ke kontinuálnímu odvodu rozemletého materiálu propadovým otvorem, viz uvedená šipka na obr. 4.22. Propadový prostor je třeba zvětšit.



Obr. 4.23 Akumulace rozemletého materiálu

5. Scale-up a konstrukční uspořádání průmyslového maceračního mlýnu

Tok materiálu v maceračním mlýnu, viz obr. 5.1, si lze modelově představit, jako tok materiálu štěrbinou, ve které je jedna strana pohyblivá. Pro hmotnostní tok lze obecně použít rovnici (3). Po dosazení obvodové rychlosti za u [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] a průtočného průřezu za S [m^2] dostáváme vztah (4). Tento vztah lze aplikovat na tok materiálu v maceračním mlýnu, kde ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] je hustota zpracovaného materiálu, D [m] průměr rotoru maceračního mlýnu, n [$\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$] otáčky mlýnu, L [m] šířka mlecí mezery (délka rotoru) a v [m] výška mlecí mezery. Z tohoto vztahu je patrné, že výkonnost zařízení závisí na hustotě zpracovávaného materiálu, dále na průměru, otáčkách a délce rotoru a také na délce a šířce mlecí mezery.



Obr. 5.1 Tok materiálu v maceračním mlýně [1]

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot u \cdot S \quad (3)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \cdot L \cdot v \quad (4)$$

Hustota zpracovaného materiálu je konstantní. V průmyslovém maceračním mlýnu se bude zpracovávat stejný materiál jako na poloprovozním zařízení. Výška mlecí mezery musí zůstat pro zachování mlecího účinku konstantní. Hmotnostní tok maceračního mlýnu je tedy závislý jen na průměru, délce a otáčkách rotoru. Jak vyplývá ze vztahu (4) platí mezi danými veličinami a hmotnostním tokem přímá úměra.

$$\dot{m}_{mac} = f(L, D, n) \quad (5)$$

Dezintegrace materiálu v maceračním mlýnu je založena na vzájemném působení tlakových a smykových sil na mletý materiál. Při experimentálních měření se zpracovával stejný materiál, který se bude zpracovávat i v průmyslovém mlýně. Proto, aby došlo v průmyslovém zařízení ke stejnému rozmělnění materiálu jako v laboratorní verzi, předpokládám, že je nutné zachovat konstantní mlecí sílu. To znamená, že velikost sil působící na částici v laboratorní verzi zařízení musí být rovna velikosti síly působící na částici v průmyslové verzi zařízení.

Výpočet síly potřebné k rozmělnění materiálu v poloprovozním zařízení udává vztah (7). Tato síla je vypočtena přes krouticí moment laboratorního mlýnu, který se určí pomocí vztahu (6). Hodnoty činného výkonu $P_{\dot{\epsilon}}$ [W] a otáček n [min^{-1}] jsou určeny na základě experimentálního měření. Vypočtená síla F_l [N] je vztažena na délku rotoru poloprovozního zařízení.

$$Mk = \frac{P_{\dot{\epsilon}}}{\omega} = \frac{P_{\dot{\epsilon}}}{2\pi n} = \frac{2300}{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{129}{60}\right)} = 170,3 \text{ Nm} \quad (6)$$

$$F_l = \frac{Mk \cdot 2}{D_{LAB}} = \frac{170,3 \cdot 2}{0,23} = 1480,9 \text{ N} \quad (7)$$

Kde:

D_{LAB} ... průměr rotoru laboratorního mlýnu [m]

Pro přenos otáček z poloprovozního maceračního mlýnu na průmyslový mlýn, je možno použít vztahu (1) nebo (2), viz kapitola 2.2. Jejich rozdílnost je pouze v exponentu. V případě použití vztahu (1), kde jsou otáčky provozního zařízení n_{pr} [min^{-1}] přímo závislé na průměru laboratorního zařízení D_{lab} [m] a jeho otáčkách n_{lab} [min^{-1}], a nepřímo závislé na průměru provozního zařízení D_{pr} [m], by při změně průměru D_{pr} [m], došlo ke zmenšení provozních otáček n_{pr} [min^{-1}], viz vztah (8).

$$n_{pr} = \frac{D_{lab}}{D_{pr}} \cdot n_{lab} \quad (8)$$

Výkonnost maceračního mlýnu je přímo úměrná otáčkám a průměru rotoru viz vztah (5). Tzn., že použitím vztahu (8) by se výkonnosti průmyslového a laboratorního mlýnu rovnaly. Výkonnost průmyslového maceračního mlýnu má být $3 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$. Výkonnost poloprovozního maceračního mlýnu určená experimentálním měření, při frekvenci otáček

129 min⁻¹ a vlhkosti materiálu 73 % hm., je 189,5 kg·h⁻¹. Výkon poloprovozního zařízení je tedy nutné zvýšit 15,8 krát, zaokrouhleně 16 krát. To by v případě použití vztahu (1) znamenalo 16 krát zvýšit délku rotoru. Rozměr rotoru by dosáhl délky 4,32 m, což je z konstrukčního hlediska nevýhodné. Vztah (2) je stejného principu jako vztah (1). Z těchto důvodů se tyto dva vztahy pro scale-up otáček maceračního mlýnu nepoužily.

Při návrhu otáček provozního zařízení se vycházelo z této úvahy; pokud frekvence otáček, která se naměřila na poloprovozním zařízení, zůstane stejná na provozním zařízení a zvětší se průměr rotoru provozního zařízení, tak se zvýší úměrně i obvodová rychlost a nabízí se předpoklad, že úměrně vzroste i výkonnost.

Zvolený průměr rotoru průmyslového maceračního mlýnu je 720 mm. Průměr rotoru se oproti laboratorní verzi zvětšil 3 krát. Předpokládá se, že když se zachovají konstantní otáčky, výkonnost průmyslového mlýnu se zvýší na trojnásobnou hodnotu výkonnosti laboratorního mlýnu.

Dle vztahu (5) lze výkonnost maceračního mlýnu navýšit prodloužením jeho aktivní délky rotoru. Pokud se tedy rotor při zachování konstantních otáček zvýší 3 krát a výkonnost je nutné zvýšit 16 krát, musí se délka aktivní plochy zvýšit 5,33 krát, počítá se s hodnotou 5,5. Výpočet délky rotoru průmyslového mlýnu L_p udává vztah (9).

$$L_p = 5,5 \cdot L_{lab} = 5,5 \cdot 0,27 \doteq 1,5 \text{ m} \quad (9)$$

kde:

L_{lab} ... délka rotoru laboratorního mlýnu [m]

Pokud je známá aktivní délka rotoru a síla, která je potřebná pro rozmělnění materiálu vztažená na délku rotoru laboratorního mlýnu, lze spočítat celkovou mlecí sílu průmyslového mlýnu. Výpočet je uveden vztahem (10).

$$F = F_l \cdot \frac{L_p}{L_{lab}} = 1480,9 \cdot \frac{1,5}{0,27} = 8227,2 \text{ N} \quad (10)$$

Výpočet potřebného krouticího momentu průmyslového mlýnu při zachování celkové mlecí síly je uveden ve vztahu (11).

$$Mk = F \cdot \frac{D_{pm}}{2} = 8227,2 \cdot \frac{0,72}{2} = 2961,8 \text{ Nm} \quad (11)$$

Výpočet výkonu na rotoru ve vztahu (12):

$$P_r = Mk \cdot \omega = 2961,8 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{129}{60} = 40 \text{ kW} \quad (12)$$

V tab. 3 jsou uvedeny vypočtené hodnoty potřebného výkonu v závislosti na délce rotoru. Také je zde uvedena závislost teoretické výkonnosti maceračního mlýnu na délce rotoru. Při délce rotoru 1,5 je minimální potřebný výkon rotoru 40 kW. U této varianty je teoretická výkonnost 3304 kg·h⁻¹. Rozdíl mezi požadovanou hodnotou, která je 3000 kg·h⁻¹, a teoretickou hodnotou výkonu je tedy 304 kg·h⁻¹. Vzhledem k tomu, že se jedná o první zařízení tohoto typu, je zde vyšší riziko většího rozdílu mezi teoretickou výkonností provozního zařízení a skutečné výkonnosti. Z tohoto důvodu, je pro průmyslovou verzi maceračního mlýnu vybrána varianta s aktivní délkou rotoru 1,7 m. U této varianty je teoretická výkonnost 3745 kg·h⁻¹.

Délka rotoru provozního zařízení (m)	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
Mlecí síla poloprovozního mlýnu (N)	1480,9					
Průměr rotoru provozního zařízení (m)	0,72					
Potřebný mlecí výkon (kW)	40,0	42,7	45,3	48,0	50,7	53,3
Teoretická výkonnost (kg·h ⁻¹)	3304,3	3524,6	3744,9	3965,2	4185,5	4405,8

Tab. 3 – Závislost výkonnosti na délce rotoru při otáčkách 129 min⁻¹

Ze vztahu (13) se spočítá potřebný výkon motoru. Účinnost řemenového spoje se uvažuje 92 % a účinnost ložisek 98 % podle [30].

$$P = \frac{P_r}{\eta_{rem} \cdot \eta_{lož}} = \frac{45344}{0,92 \cdot 0,98} = 50,3 \text{ kW} \quad (13)$$

Výkon elektromotoru by měl být větší než 50,3 kW. V rámci bezpečnosti se výkon motoru navýší o součinitel bezpečnosti k=1,5.

$$P_M = P \cdot k = 50,3 \cdot 1,5 = 75,4 \text{ kW} \quad (14)$$

Potřebný výkon motoru by měl být větší než 50,3 kW, s bezpečností 75,4 kW. Vzhledem k tomu, že se jedná o první zařízení tohoto typu a rozdíl geometrie mezi poloprovozním zařízením a provozním zařízením je, dá se říci celkem markantní, doporučil bych použít motor o mnohem vyšším výkonu. V případě, že by

docházelo k odebírání nižšího výkonu a motor by byl velmi naddimenzován, lze motor vyměnit za slabší. Při této výměně motoru jsou všechny části zařízení dimenzované na vyšší výkon a zařízení je po konstrukční stránce bezpečné. V opačném případě vzniká problém s konstrukcí, která na vyšší výkon motoru není dimenzována.

Scale-up geometrie

Průmyslový mlýn má zachovanou geometrickou podobnost podle laboratorního mlýnu, přičemž některé konstrukční parametry musí zůstat totožné jako u mlýnu laboratorního, protože testovaný materiál zůstává pro průmyslový mlýn stejný. Zůstávají zachovány průměry a rozteče segmentů na drhlíku, velikost mlecí mezery, odsazení síta od rotoru a velikost otvorů u propadového síta.

Počet řad mlecích segmentů pro zachování geometrické podobnosti je vztažen na průměr laboratorního mlýnu a vypočítá se vztahem (15).

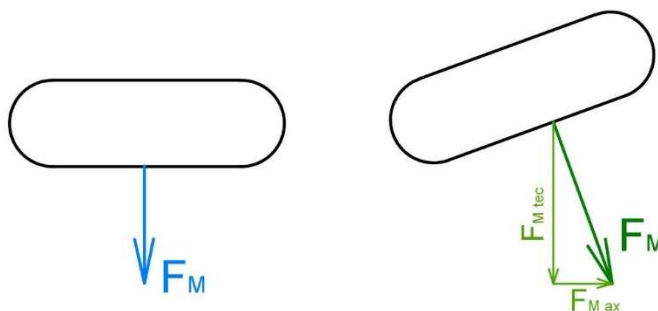
$$p_{\text{ř}} = \frac{i}{D_{\text{LAB}}} = p_{\text{ř}} = \frac{12}{0,23} = p_{\text{ř}} \doteq 52 \left(\frac{\text{řad}}{\text{metr průměru}} \right) \quad (15)$$

kde:

D_{LAB} ... průměr rotoru laboratorního zařízení [m]

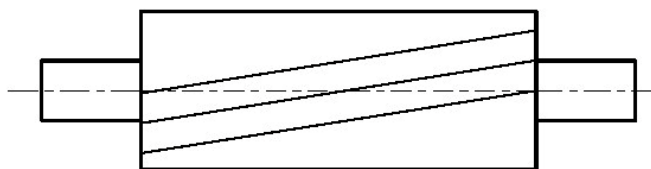
i ... počet řad mlecích segmentů na rotoru [-]

Mlecí segmenty jsou v laboratorním mlýně krom krajních, které jsou nahnuté o 3° , umístěny rovnoběžně s axiální osou. Pro zvýšení mlecího účinku bylo navrženo sklon mlecích segmentů. Síla tak nebude působit na zpracovaný materiál jen kolmo, viz levý segment obr. 5.2, ale i šikmo, viz pravý segment. Tím se mlecí síla rozloží na dvě složky a zvýší se působení na částici zpracovávaného materiálu. Dále bude díky vzniklé axiální síle docházet k odsunu materiálu od krajů rotoru a také dojde k rovnoměrnějšímu zatížení rotoru.



Obr. 5.2 Působení sil na materiál podle umístění segmentů:
vlevo vodorovné; vpravo pod úhlem

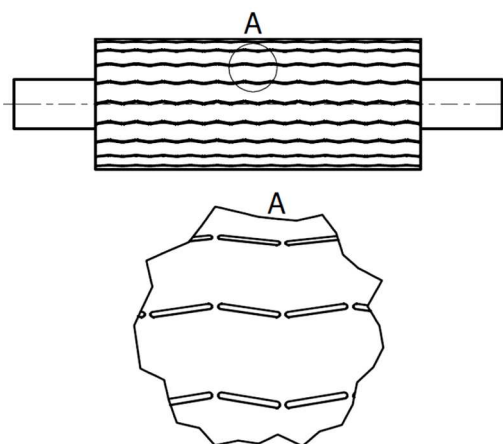
Konstrukční umístění mlecích segmentů se vybíralo ze tří variant, viz obr. 5.3 až 5.5. První varianta je zobrazena na obr. 5.3, kde jsou segmenty nakloněny pod úhlem po celé délce rotoru. V tomto provedení by docházelo nejen ke zlepšení mlecího efektu, ale i k rovnoměrnému dynamickému zatížení rotoru. Nevýhoda této varianty je technologická složitost výroby, a proto se od této varianty upustilo.



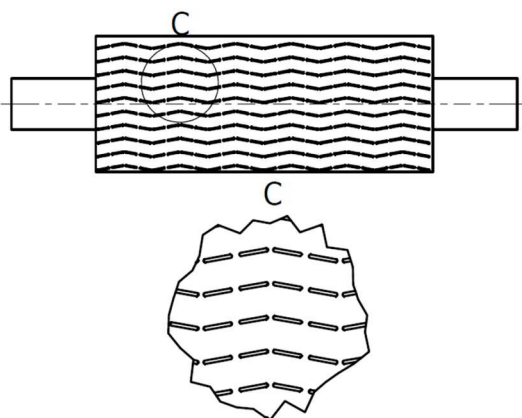
Obr. 5.3 Segmenty umístěné pod úhlem po celé délce rotoru

Na obr. 5.4 je zobrazena druhá varianta s uspořádáním dvou mlecích segmentů do šípového tvaru. Nevýhoda tohoto uspořádání je zhoršená čistící schopnost z důvodu nízkého počtu segmentů. Proto byla navržena varianta šípů se 4 mlecími segmenty, tzn., že velikost šípů je dvakrát větší, viz obr. 5.5. Tato varianta, byla vybrána pro průmyslový mlýn.

V [31] je uveden doporučený sklon nožů pro samochodnou sklízecí řezačku. Jedná se o stroj, který řeže vlhké vláknité materiál, jako je např. trávy, jeteloviny, obilí, kukuřice. Jedná se tedy o materiál, který má zpracovávat macerační mlýn. Proto jsem zvolil úhel sklonu segmentů 11° podle [31].

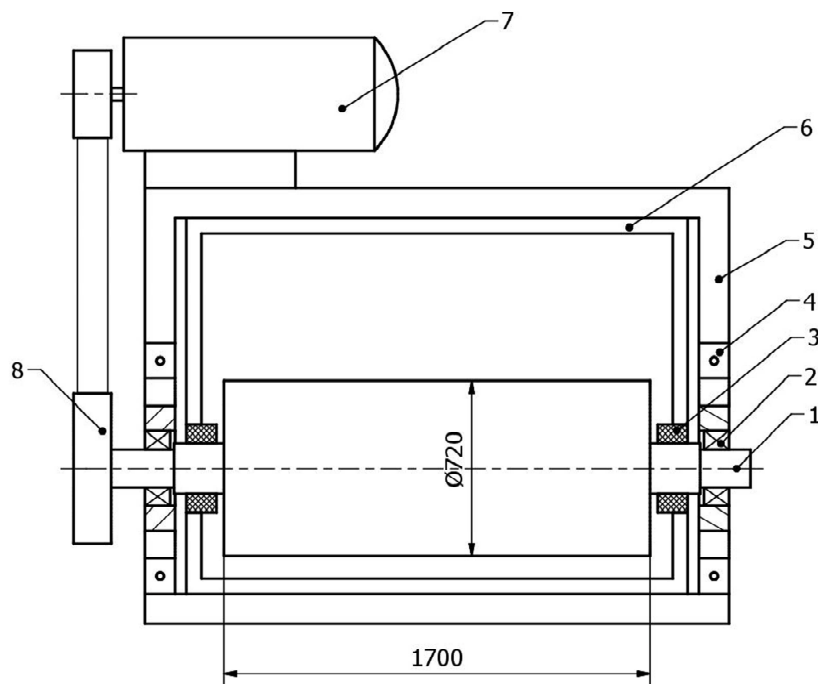


Obr. 5.4 Dva mlecí segmenty v šípovém tvaru



Obr. 5.5 Čtyři mlecí segmenty v šípovém tvaru

Na obr. 5.6 je zobrazeno základní schéma průmyslového maceračního mlýnu. Jeho procesní parametry: otáčky rotoru $129 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$, délka rotoru 1,7 m, průměr rotoru 0,72 m, výkonnost $3 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$.



Obr. 5.6 Koncept průmyslového maceračního mlýnu:

1 – rotor; 2 – ložisko; 3 – těsnění; 4 – domek ložiska;

5 – nosná konstrukce; 6 – vnitřní konstrukce;

7 – motor; 8 – řemenový převod

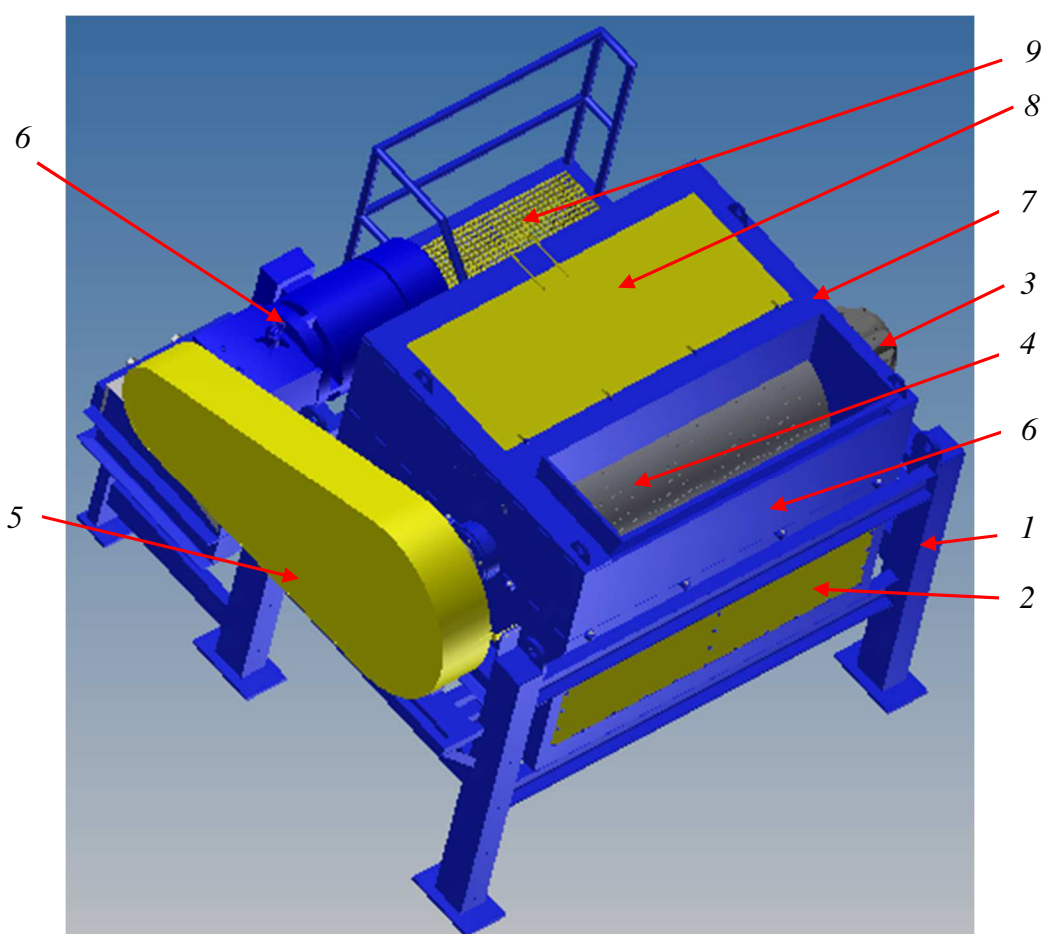
6. Konstrukce průmyslové verze maceračního mlýnu

6.1. Požadavky na konstrukci a provoz maceračního mlýnu

Průmyslový macerační mlýn by měl splňovat tyto požadavky:

- Nastavitelnost mlecí mezery
- Kontinuální režim mletí
- Čistitelnost síta
- Konstrukčně jednoduché zařízení
- Nenáročnost na provoz a obsluhu

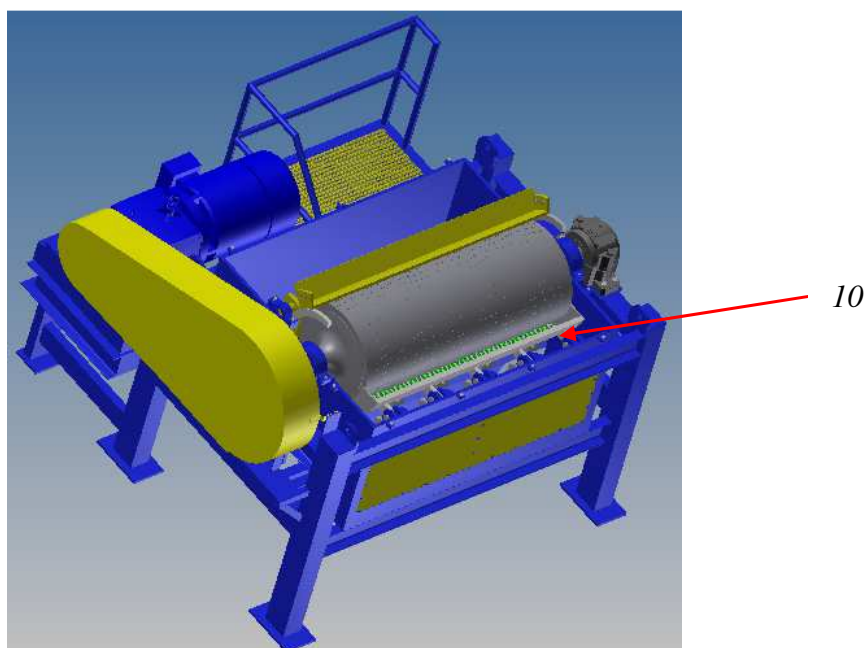
6.2. Konstrukční uspořádání průmyslové verze



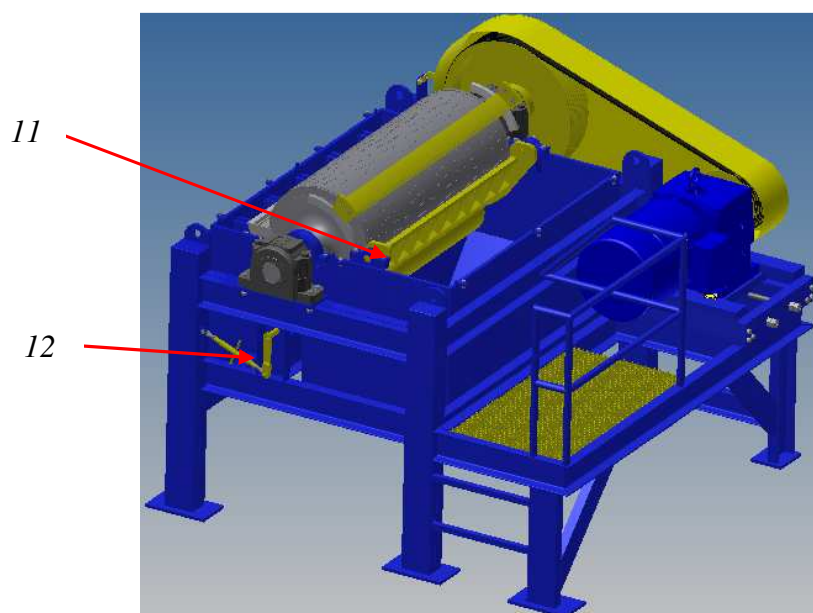
Obr. 6.1 Konstrukce průmyslového mlýnu: 1 – nosná konstrukce, 2 – dolní skříň, 3 – ložisková tělesa, 4 – rotor, 5 – řemenový převod, 6 – motor, 7 – horní skříň, 8 – kontrolní víko, 9 – obslužná plošina

Na obr. 6.1 je zobrazena konstrukce průmyslového mlýnu. Konstrukce průmyslového zařízení se skládá z nosné konstrukce (1), ke které je přivařena dolní skříň (2). Ke konstrukci je ložiskovými tělesy (3) uchycen rotor (4). Přenos krouticího

momentu zajišťuje řemenový převod (5), který pohání převodový motor (6). K dolní skříni je přišroubována horní skříň (7) a zakrývá vnitřní konstrukční uspořádání mlýnu. Rozdělení na dvě skříně umožňuje snadnou výměnu rotoru. Pro lepší kontrolu zařízení slouží kontrolní víko (8), které lze otevřít z obslužné plošiny (9). Na obr. 6.2 a 6.3 je zobrazeno zařízení bez horní skříně. Na obr. 6.2 je zobrazeno uložení drhlíku (10) v konstrukci. Na obr. 6.3 je zobrazeno uložení síta (11) v konstrukci a ovládací páka otvíracího mechanismu síta (12). Konstrukce zařízení je proti korozi chráněna krycím nátěrem.



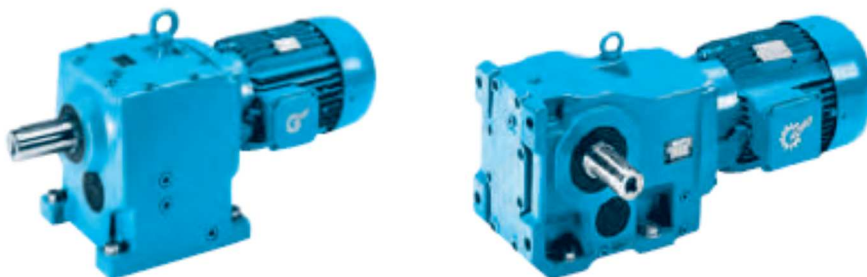
Obr. 6.2 Konstrukce průmyslového mlýnu 10 - drhlík



Obr. 6.3 Konstrukce průmyslového mlýnu 11 – síto,
12 – ovládací páka otvíracího mechanismu síta

6.2.1. Návrh pohonu

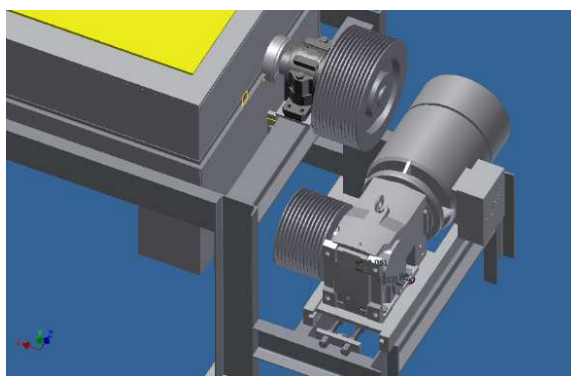
K pohonu rotoru maceračního mlýnu byl navržen převodový asynchronní motor s převodovkou, aby byla zajištěna redukce otáček na požadovanou hodnotu. Byly navrženy 2 varianty, a to použití motoru s kuželovou nebo čelní převodovkou, viz obr. 6.4. Kritériem pro výběr bylo umístění motoru, vzhledem k možnosti instalace řemenů. Po pevnostní stránce jsou si obě varianty rovny. Výhodou varianty s kuželovou převodovkou je kompaktní tvar celého zařízení. Půdorys je v tomto případě minimální. Motor je umístěn níže, čímž je stabilita zařízení vyšší. Další výhodou je, že odvod zpracovaného materiálu, lze umístit z boku zařízení nebo jeho zadní části. Nevýhodou této konfigurace je složité nasazování řemenů, což ilustruje obr. 6.5. Další nevýhodou je složitější konstrukce napínáku a krytu řemenového převodu. Motor je umístěn na boku zařízení a hrozí vyšší riziko při destrukce při plnění zařízení, ať už vniknutím zpracovávané suroviny do motoru případně střet se samotným plnicím zařízením např. lžíce bagru apod..



a) elektromotor s čelní převodovkou Nord

b) elektromotor s kuželovou převodovkou

Obr. 6.4 – Navrhované typy motorů [32]



Obr. 6.5 – Umístění motoru s kuželovou převodovkou

V 5. kapitole jsem doporučil použít motor o výkonu větším než 75,4 kW. Z nabídky, která je na trhu, bylo možno volit motor o výkonu 75 kW nebo 90 kW. Jak bylo uvedeno, jedná se o prototypové zařízení, a proto jsem vybral motor s čelní převodovkou značky Nord SK 92 – 280 M4 o výkonu 90 kW.

Přenos krouticího momentu

Přenos krouticího momentu z motoru na rotor musí splňovat tyto požadavky: spoj musí být pružný a v případě zaseknutí rotoru musí přestat přenášet krouticí moment. Tyto dvě podmínky splňuje buď pružná spojka, nebo řemenový převod.

Nejprve byla řešena varianta s pružnou spojkou. Tato varianta je konstrukčně jednodušší, nevyžaduje použití napínačku řemenů. Pro vhodný výběr pružné spojky byla oslovena firma TYMA. Firma doporučila pro daný krouticí moment pružnou spojku N-Eupex DS, viz obr. 6.6. Tlumení u spojky zajišťují plastové špalíky. Při překročení dovoleného krouticího momentu dochází k destrukci špalíků a přenos se zastaví. Pro obnovení krouticího momentu je pak nutné celou spojku rozebrat a gumové špalíky vyměnit. Navrhovaný macerační mlýn by měl pracovat v kontinuálním režimu. Je proto nutné eliminovat jakékoliv možnosti technických závad, které by mohly mlýn odstavit z provozu. Výměna gumových špalíků je jedna z nich. Z tohoto důvodu se od použití pružné spojky upustilo.



Obr. 6.6 – Pružná spojka N-Eupex DS [33]

K návrhu řemenového převodu, byl použit program ContiTech Suite 7.1, který je volně dostupný na webových stránkách firmy TYMA. Firemní software umožňuje rychlé návrhy převodu a se díky tomu byly vyzkoušeny různé varianty řemenů. Byla vybrána

varianta s 8 řemeny XPC. U této varianty byl poměr mezi počty řemenů a geometrií řemenic nejvýhodnější. Celkový návrh řemenového převodu zobrazen na obr. 6.7.

Řemen			
Druh řemenu	Klínový řemen	Typ řemenu	ADVANCE
Typ řemenu	CONTI-V FO "DIN 7753"	Profil řemenu	XPC
Vymazat zadané hodnoty			
Geometrie			
Malá řemenice		Velká řemenice	
Účinný průměr	dwk 450,00 mm	Účinný průměr	dwg 900,00 mm
Otáčky	nk 261,00 1/min	Otáčky	ng 130,50 1/min
Převodový poměr	i 2,00	Požadovaná délka řemenu	Lwgef
Minimální osová vzdálenost	amin	Maximální osová vzdálenost	amax
Osová vzdálenost	a 1573,60 mm	Délka řemenu	Lw 5300,00 mm
Vymazat zadané hodnoty			
Výkon			
Malá řemenice		Velká řemenice	
Krouticí moment	Mk 3292,86 Nm	Krouticí moment	Mg 5585,72 Nm
Přenášený výkon	P 90,000 kW	Požadovaný počet řemenů	Zgef
Požadovaný provozní součinitel	C2gef 1,5	Provozní podmínky	rázové zatížení
Náhled výsledku			
Výsledek			
Počet řemenů (zvolený)	Zer 8,00	Obvodová síla	Fu 14634,94 N
Šířka věnce	b 212,50 mm	Celková předepínací síla	Fv 29234,96 N
Požadovaný provozní součinitel	C2er 1,51	Statická síla ve větvi	Fstat 1846,15 N
Hodnota výkonu	Pr 17,84 kW	Vlastní frekvence řemenu	f 22,68 Hz
CONTI-V FO "DIN 7753" ADVANCE 8 * XPC 5300 - LW			

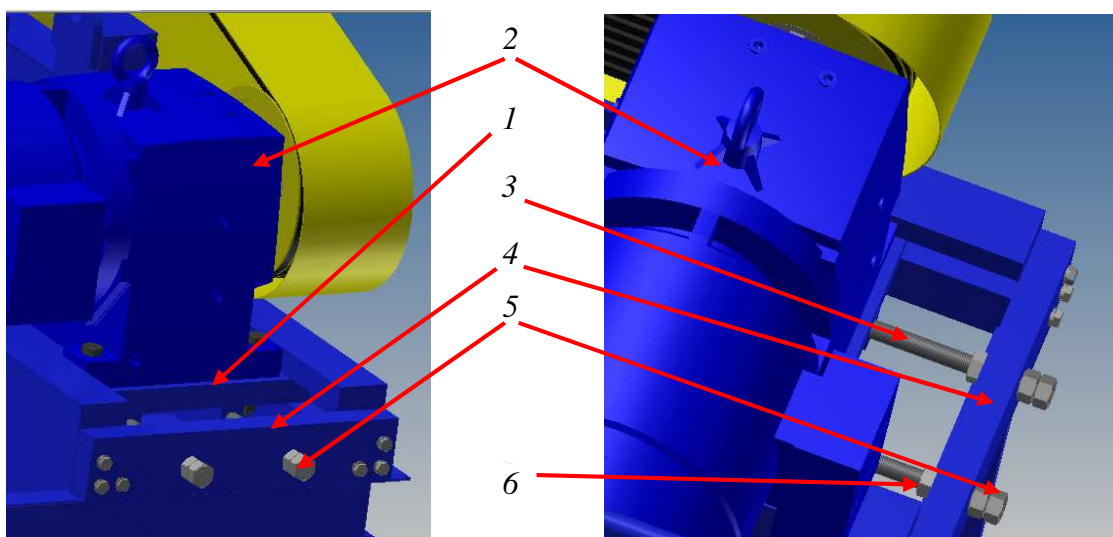
Obr. 6.7 Rozhraní programu ContiTech Suite 7.1 a vypočtené hodnoty pro návrh řemenového převodu

K zajištění řemenic na hřídeli jsou použita samosvorná kuželová pouzdra Taper, viz obr. 6.8.



Obr. 6.8 Pouzdro Taper [34]

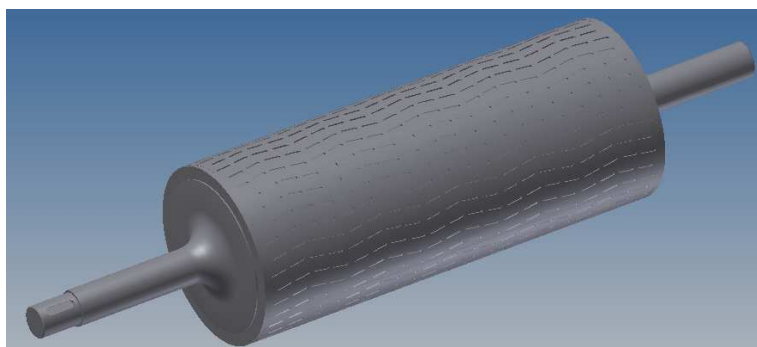
Na obr. 6.9 je zobrazeno napínání řemenů. Na posuvné desce (1), která je umístěná v drážce, je přišroubován převodový motor (2). Pro snadnou manipulaci posuvné desky musí být v drážce dostatečné množství maziva. K desce jsou zespodu přivřeny dvě matice, do kterých jsou šroubovány závitové tyče (3). Tyče jsou zajištěny v přední desce (4) dvěma maticemi (5), které slouží k ovládání tyčí. Pro zajištění polohy desky slouží jistící matice (6).



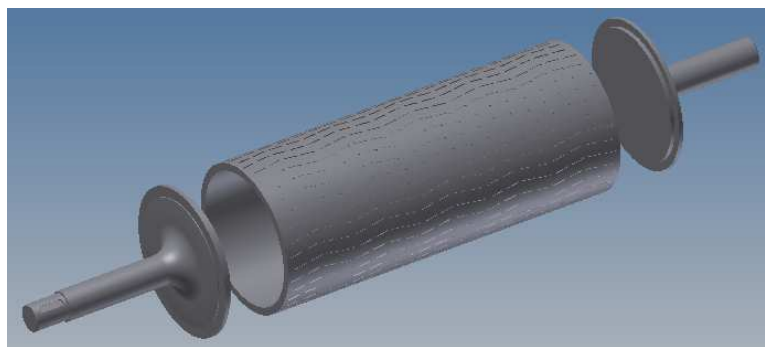
Obr. 6.9 Napínání řemenů: 1 – posuvná deska; 2 – převodový motor; 3 – závitová tyč;
4 – přední deska; 5 – ovládací matice; 6 – jistící matice

6.2.2. Rotor průmyslového maceračního mlýnu

Rotor maceračního mlýnu, viz obr. 6.10, tvoří svařenec skládající se ze čtyř částí, viz obr. 6.11. Skládá se z trubky, dvou čepů, a mlecích segmentů. Čepy jsou přivařeny k trubce. Do trubky jsou vyfrézované drážky pro mlecí segmenty ze slinutých karbidů, které jsou k trubce připájeny. Rotor je vyroben z oceli 11 523 ($\sigma_{Kmin} = 333$ MPa [35]).



Obr. 6.10 3D model rotoru maceračního mlýnu



Obr. 6.11 3D model rotoru maceračního mlýnu – rozdělení na části

Výpočty:

Průměry řemenic:

$$D_w = 900 \text{ mm}$$

$$d_w = 450 \text{ mm}$$

Parametry motoru:

$$P_M = 90 \text{ kW}$$

$$n = 261 \text{ min}^{-1}$$

Převodový poměr

$$i = \frac{D_w}{d_w} = \frac{900}{450} = 2 \quad (16)$$

Skutečné otáčky rotoru

$$n_R = \frac{n_M}{i} = \frac{261}{2} = 130,5 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (17)$$

Výkon na rotoru

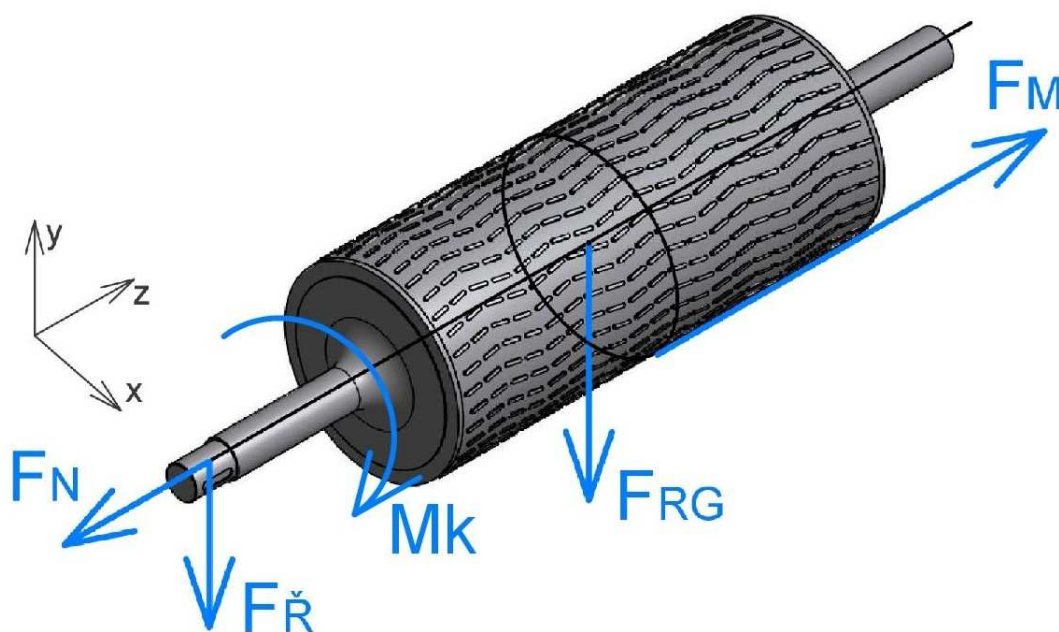
$$P = P_M \cdot \eta_{řem} \cdot \eta_{lož} = 90 \cdot 0,92 \cdot 0,98 = 81,14 \text{ kW} \quad (18)$$

Krouticí moment

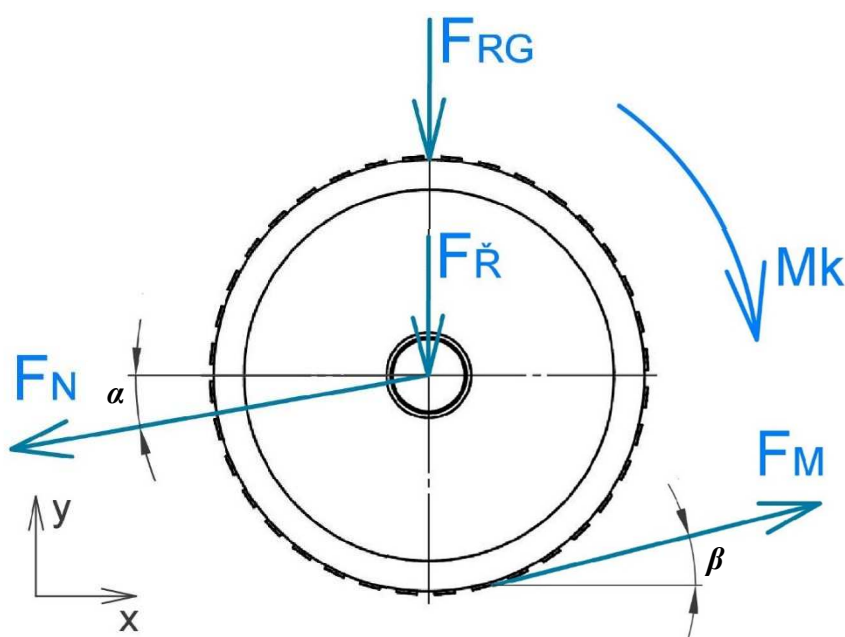
$$Mk = \frac{P}{\omega} = \frac{P \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_R} = \frac{81144 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 130,5} = 5937,7 \text{ Nm} \quad (19)$$

Zatížení rotoru

Hřídel rotoru maceračního mlýnu je zatížen krouticím momentem a ohybovým momentem. Krouticí moment je vyvozen od motoru. Ohybový moment vytvářejí tyto síly: napínací síla řemenů F_N , síla vlastní tíhy řemenice $F_{\check{R}}$, síla vlastní tíhy celého rotoru F_{RG} a síla, která vzniká v mlecí mezeře F_M , viz obr. 6.12-13. Ve výpočtech je uvažován kritický stav, kdy do středu mlecího prostoru vnikne tělese a rotor se zasekne. Působíště mlecí síly je tedy pro výpočet ve středu rotoru.



Obr. 6.12 Zatížení rotoru maceračního mlýnu



Obr. 6.13 Zatížení rotoru maceračního mlýnu rovina yx

Velikosti sil:

Mlecí síla vypočtena z krouticího momentu.

$$F_M = \frac{2 \cdot Mk}{d_5} = \frac{2 \cdot 5937,7}{0,72} = 16493,6 \text{ N} \quad (20)$$

Napínací síla řemenic byla určena pomocí programu ContiTech Suite 7.1

$$F_N = 29\,234,96 \text{ N}$$

$$F_{RG} = 13\,900 \text{ N}$$

$$F_{\check{R}} = 2\,500 \text{ N}$$

$$F_M = 16\,493,6 \text{ N}$$

Mlecí a napínací síla od řemenu jsou pro další výpočet sklopeny do rovin xz a yz.

$$\text{Uhly sklonu:} \quad \alpha = 10^\circ \quad \beta = 14^\circ$$

$$F_{Nx} = F_{\check{R}} \cdot \cos\alpha = 29234,96 \cdot \cos 10 = 28790,8 \text{ N} \quad (21)$$

$$F_{Ny} = F_{\check{R}} \cdot \sin\alpha = 29234,96 \cdot \sin 10 = 5076,6 \text{ N} \quad (22)$$

$$F_{Mx} = F_M \cdot \cos\beta = 16493,6 \cdot \cos 14 = 16003,7 \text{ N} \quad (23)$$

$$F_{My} = F_M \cdot \sin\beta = 16493,6 \cdot \sin 14 = 3990,2 \text{ N} \quad (24)$$

Výpočet reakcí

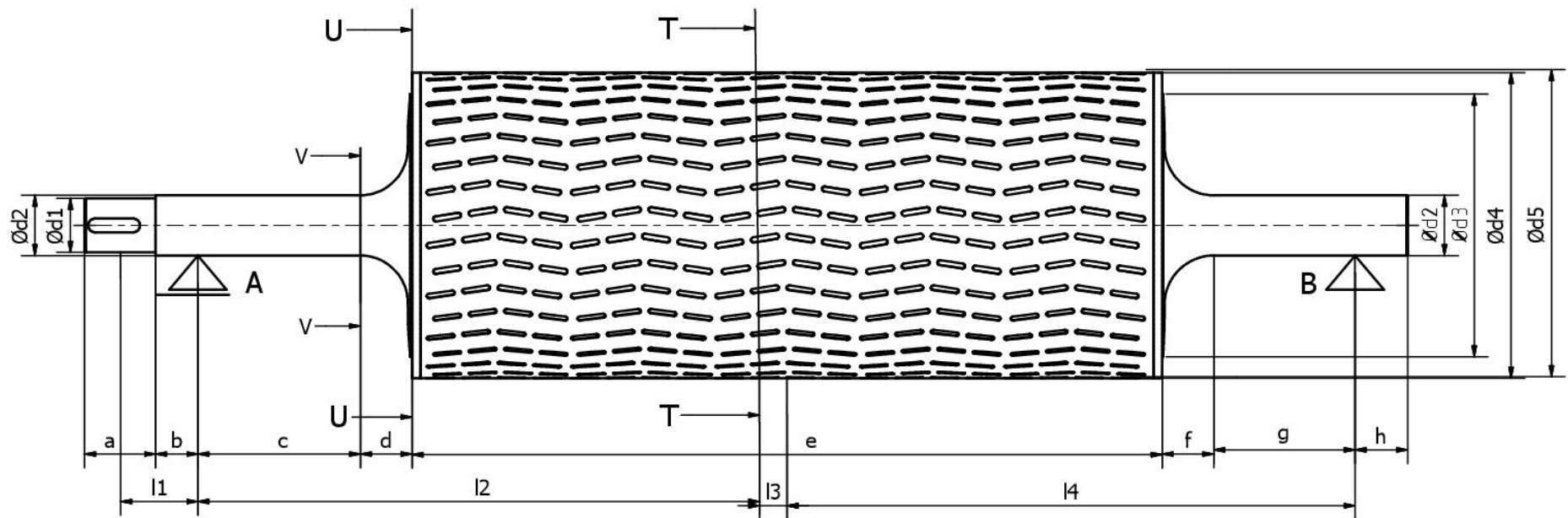
Na obr. 6.14 jsou uvedeny rozměry rotoru a na obrázku 6.15 je schematicky zobrazeno uvolnění rotoru pro výpočet reakcí.

$$l_1 = 0,236 \text{ m}$$

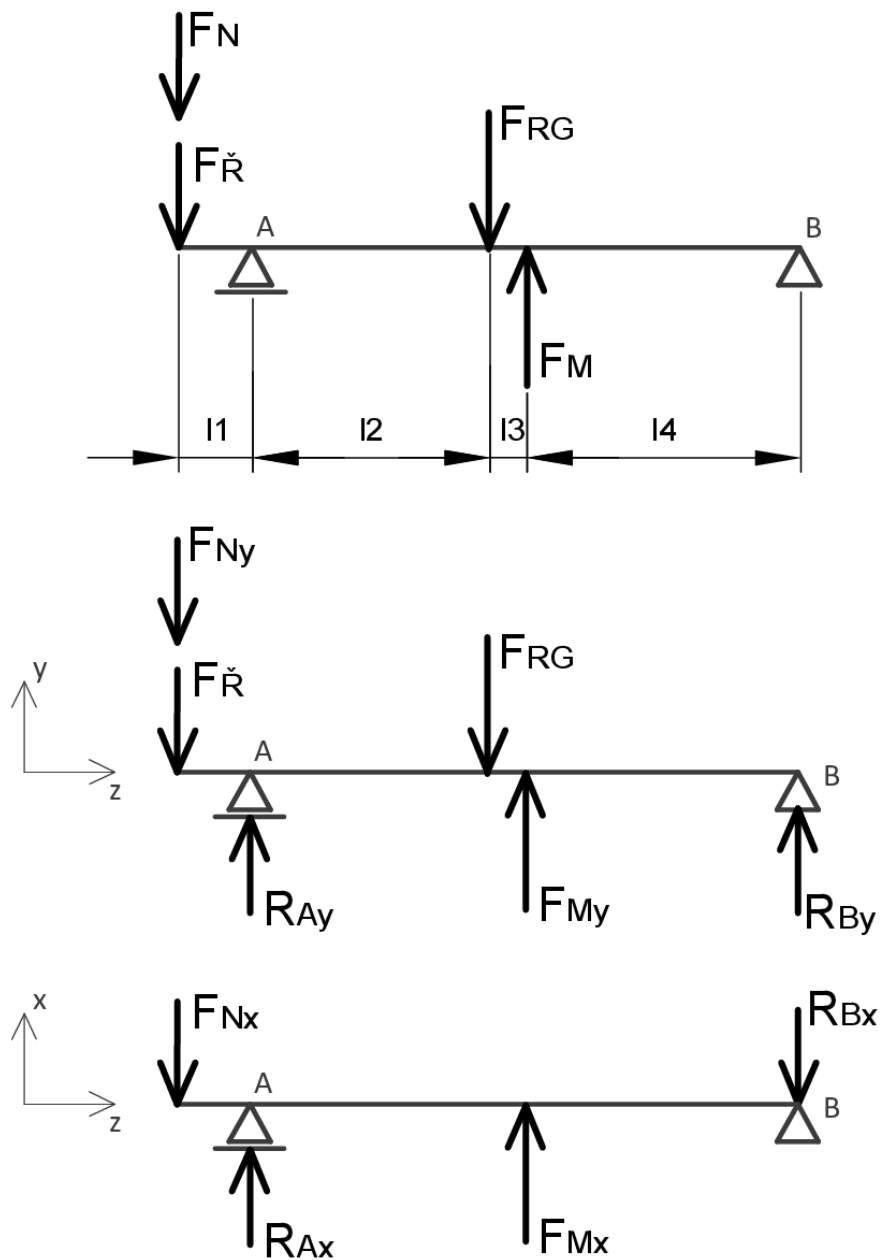
$$l_2 = 1,258 \text{ m}$$

$$l_3 = 0,06 \text{ m}$$

$$l_4 = 1,318 \text{ m}$$



Obr. 6.14 Rozměry rotoru $d_1 = 125 \text{ mm}$, $d_2 = 140 \text{ mm}$, $d_3 = 590 \text{ mm}$, $d_4 = 700 \text{ mm}$, $d_5 = 720 \text{ mm}$, $a = 165 \text{ mm}$, $b = 98 \text{ mm}$, $c = 397 \text{ mm}$, $d = 120 \text{ mm}$, $e = 1740 \text{ mm}$, $f = 120 \text{ mm}$, $g = 328 \text{ mm}$, $h = 122 \text{ mm}$, $l_1 = 236 \text{ mm}$, $l_2 = 1258 \text{ mm}$, $l_3 = 60 \text{ mm}$, $l_4 = 1318$



Obr. 6.15 Reakce na rotoru

Výpočet reakcí v rovině yz

$$\sum M_{Bi} = 0 \quad (25)$$

$$l_1 \cdot (F_{\check{R}} + F_{Ny}) - F_{RG} \cdot l_2 + F_{My} \cdot (l_2 + l_3) + R_{By} \cdot (l_2 + l_3 + l_4) = 0 \quad (26)$$

$$R_{By} = \frac{-l_1 \cdot (F_{\check{R}} + F_{Ny}) + F_{RG} \cdot l_2 - F_{My} \cdot (l_2 + l_3)}{(l_2 + l_3 + l_4)} \quad (27)$$

$$R_{By} = \frac{-0,236 \cdot (2500 + 5076,6) + 13900 \cdot 1,258 - 3990,2 \cdot (1,258 + 0,06)}{(1,258 + 0,06 + 1,318)}$$

$$R_{By} = 3960,2 \text{ N}$$

$$\sum M_{Ai} = 0 \quad (28)$$

$$-F_{My} \cdot l_4 + F_{RG} \cdot (l_3 + l_4) - R_{Ay} \cdot (l_4 + l_3 + l_2) + (F_{\check{R}} + F_{Ny}) \cdot (l_4 + l_3 + l_2 + l_1) = 0 \quad (29)$$

$$R_{Ay} = \frac{-F_{My} \cdot l_4 + F_{RG} \cdot (l_3 + l_4) + (F_{\check{R}} + F_{Ny}) \cdot (l_4 + l_3 + l_2 + l_1)}{(l_4 + l_3 + l_2)} \quad (30)$$

$$R_{Ay} = \frac{-3990,2 \cdot 1,318 + 13900 \cdot (0,06 + 1,318) + (2500 + 5076,6) \cdot (1,318 + 0,06 + 1,258 + 0,236)}{(1,258 + 0,06 + 1,318)}$$

$$R_{Ay} = 13526,2 \text{ N}$$

Výpočet reakcí v rovině xz

$$\sum M_{Bi} = 0 \quad (31)$$

$$F_{Nx} \cdot l_1 + F_{Mx} \cdot (l_2 + l_3) - R_{Bx} \cdot (l_2 + l_3 + l_4) = 0 \quad (32)$$

$$R_{Bx} = \frac{F_{Nx} \cdot l_1 + F_{Mx} \cdot l_2}{(l_2 + l_3 + l_4)} = \frac{28790,8 \cdot 0,236 + 16003,7 \cdot (1,258 + 0,06)}{(1,258 + 0,06 + 1,318)} \quad (33)$$

$$R_{Bx} = 10579,5 \text{ N}$$

$$\sum M_{Ai} = 0 \quad (34)$$

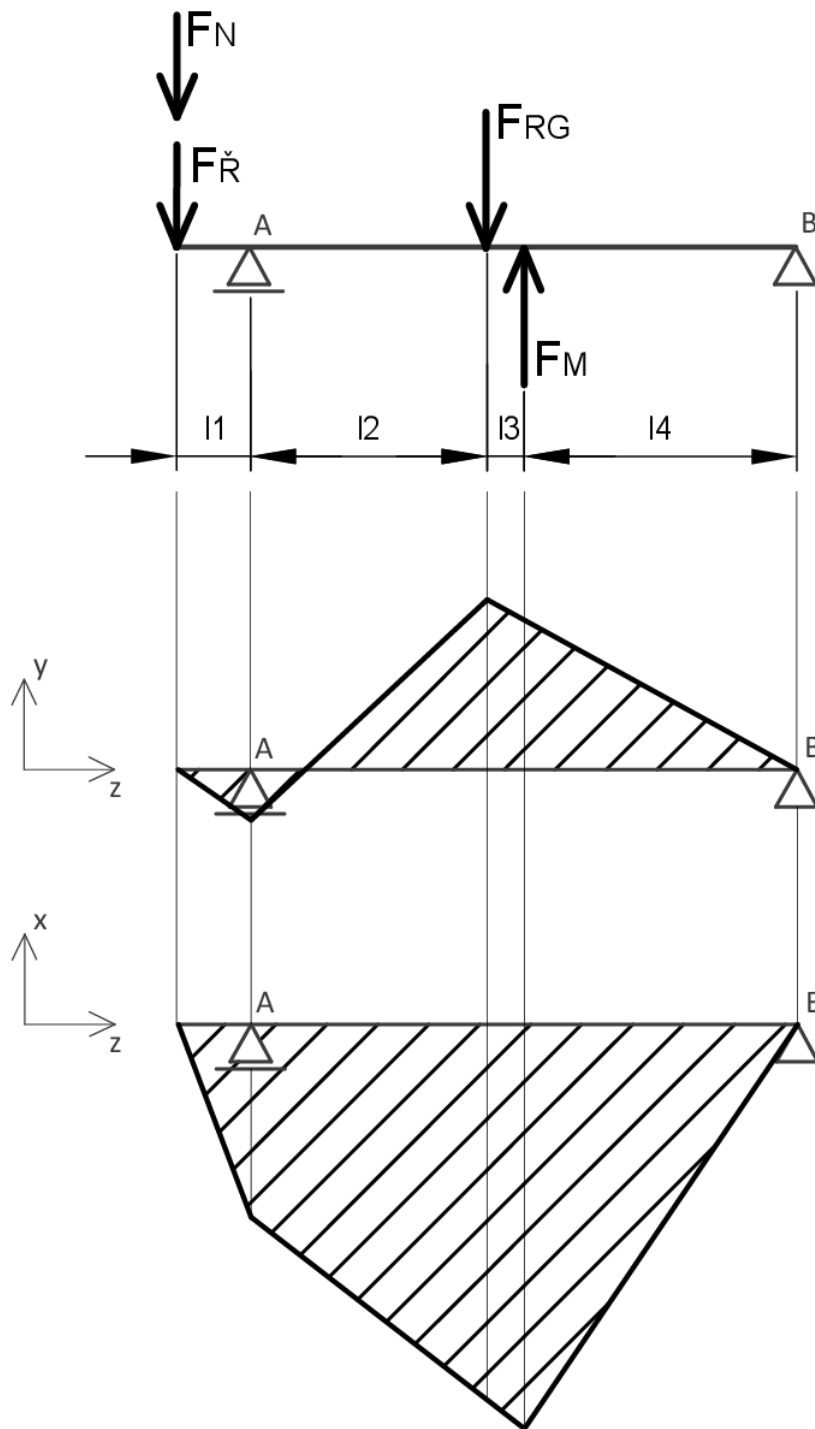
$$-F_{Mx} \cdot l_4 - R_{Ax} \cdot (l_2 + l_3 + l_4) + F_{Nx} \cdot (l_1 + l_2 + l_3 + l_4) = 0 \quad (35)$$

$$R_{Ax} = \frac{-F_{Mx} \cdot l_4 + F_{Nx} \cdot (l_1 + l_2 + l_3 + l_4)}{(l_2 + l_3 + l_4)} \quad (36)$$

$$R_{Ax} = \frac{-16003,7 \cdot 1,318 + 28790,8 \cdot (0,236 + 1,258 + 0,06 + 1,318)}{(1,258 + 0,6 + 1,318)}$$

$$R_{Ax} = 23366,6 \text{ N}$$

Po výpočtu reakcí byly vykresleny průběhy momentů v rovinách, viz obr. 6.16.



Obr. 6.16 Průběhy momentů

Výpočet napětí

Výpočet napětí v místě T. V tomto místě je průřez mezikruží. Vnější průměr trubky je 710 mm. V trubce rotoru jsou zapuštěny mlecí segmenty do hloubky 5 mm, proto se pro výpočet počítá s vnějším průměrem 700 mm.

$$D_{out} = 700 \text{ mm}$$

$$D_{in} = 675 \text{ mm}$$

$$M_{OT} = \sqrt{M_{oxT}^2 + M_{oyT}^2} = \sqrt{13618,3^2 + 6417,4^2} = 15054,6 \text{ Nm} \quad (37)$$

Volím $\alpha = 2$ podle τ_{MAX}

$$M_{oredT} = \sqrt{M_{OT}^2 + \left(\frac{\alpha}{2} \cdot M_k\right)^2} = \sqrt{15054,6^2 + \left(\frac{2}{2} \cdot 5937,7\right)^2} = 16183,2 \text{ Nm} \quad (38)$$

$$W_{OT} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D_{out}^4 - D_{in}^4)}{D_{out}} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(700^4 - 675^4)}{700} = 4558936,1 \text{ mm}^3 \quad (39)$$

$$\sigma_{ored} = \frac{M_{ored}}{W_{OT}} = \frac{16183200}{4558936,1} = 3,5 \text{ MPa} \quad (40)$$

$$k = \frac{\sigma_K}{\sigma_{ored}} = \frac{333}{3,5} = 95,1 \quad (41)$$

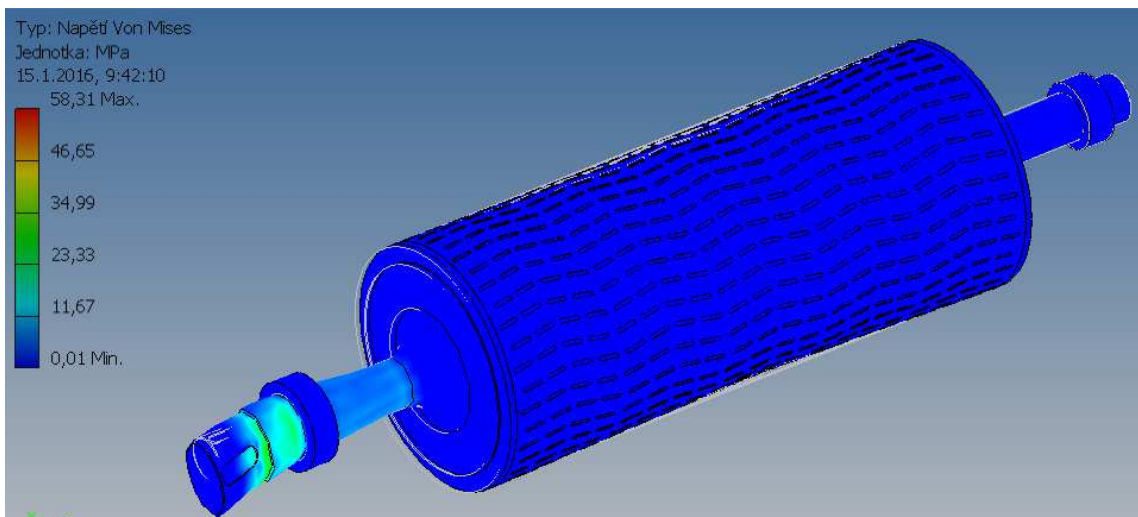
Průřez vyhovuje. V tab. 4 jsou uvedeny hodnoty bezpečností ve vybraných úsecích. Z uvedených hodnot vyplývá, že hřídel z hlediska napětí vyhovuje.

Průřez	d [mm]	M _o [Nm]	M _{ored} [Nm]	σ _{red} [MPa]	k [-]
V	140	8966,4	10754	39,9	8,35
U	590	16010,5	17076	0,85	393,3
A	140	7025,9	9199	34	9,75

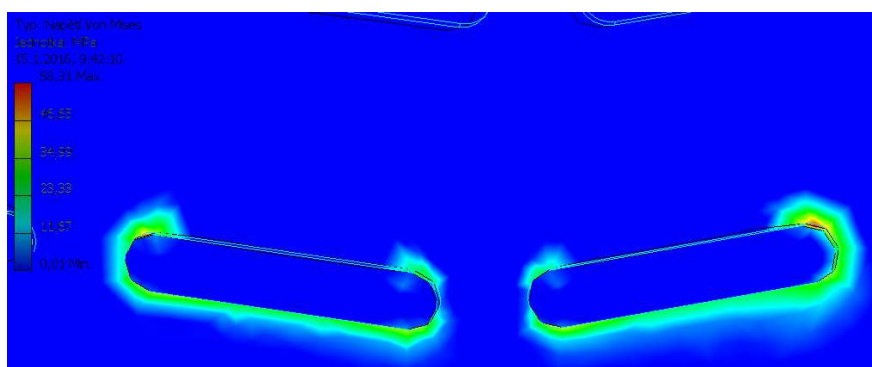
Tab. 4. – *Bezpečnost ve vybraných průřezech*

Numerický výpočet

Na rotoru jsem provedl numerický výpočet pro průběh napětí. Numerický výpočet jsem provedl v programu Autodesk Inventor Professional 2011. V tomto programu jsem vytvořil potřebný 3D model a zatížil ho daným zatížením. Byl nasimulován případ, kdy dojde k zaseknutí rotoru při vniknutí cizího tělesa do středu rotoru. Vlastnosti sítě: počet prvků 25 818 a počet uzlů 479 149. Výsledný průběh napětí rotoru je na obr. 6.17. Napětí na průměrech d_1 a d_2 se pohybuje maximálně do 32 MPa. Největší napětí se nachází na mlecích segmentech, které se zaseknou. V této oblasti je maximální napětí 58,31 MPa, viz obr. 6.18. Rotor je vyroben z oceli 11 523 o mezi kluzu 333 MPa [35]. Rotor je dostatečně dimenzovaný.



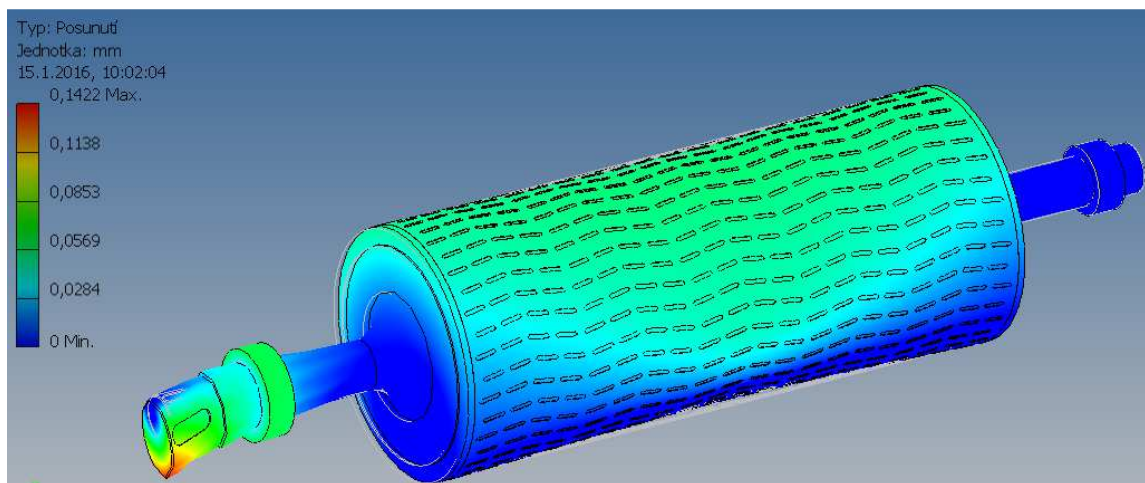
Obr. 6.17 Průběh napětí na rotoru



Obr. 6.18 Maximální napětí na rotoru

Výpočet průhybu rotoru

Průhyb rotoru jsem řešil pouze numericky. Na obr. 6.19 je zobrazen průhyb přes celý rotor. Z obrázku je patrné, že k největšímu průhybu dochází od působení napínací síly řemenů. Maximální hodnota je 0,14 mm. Tuto hodnotu lze uvažovat za bezpečnou.



Obr. 6.19 Průběhy momentů

Výpočet počtu řad i_r mlecích segmentů

Průměr d_5 udává průměr rotoru průmyslového mlýnu

$$d_5 = 720 \text{ mm}$$

Vypočtený poměr mezi průměrem rotoru laboratorního mlýnu a počtem řad mlecích segmentů

$$p_r = 52 \left(\frac{\text{řad}}{\text{metr průměru}} \right)$$

$$i_r = p_r \cdot d_5 = 52 \cdot 0,72 = 37,44 \doteq 37 \text{ řad} \quad (42)$$

K zamezení procházení mletého materiálu skrze řady je vhodné, aby každá druhá byla odsazená v axiálním směru. Měl by jich být tedy sudý počet. Pro lepší čistitelnost prostoru mezi řadami jsem zvolil 36 řad.

Výpočet ložisek

Z obou ložisek je nejvíce namáháno ložisko A. Výpočet celkové reakční síly:

$$R_A = \sqrt{R_{Ax}^2 + R_{Ay}^2} = \sqrt{23366,6^2 + 13526,2^2} = 26999,2 \text{ N} \quad (43)$$

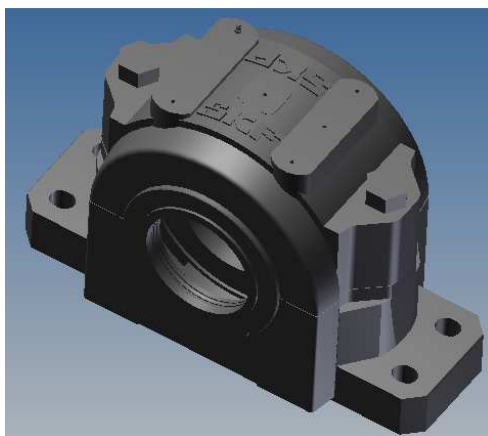
Výpočet dynamické únosnosti ložiska

Exponent trvanlivosti ložiska $p=10/3$ z [30]

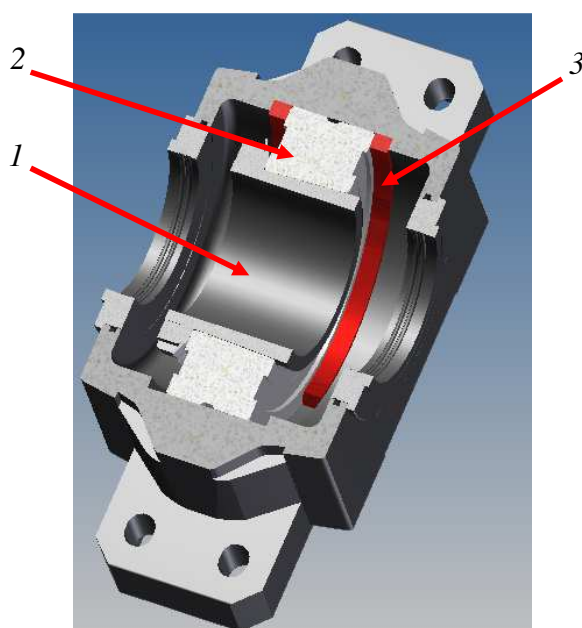
Trvanlivost ložiska L_h byla zvolena z [36] pro drtiče. Doporučená hodnota je 25 000 h.

$$C \geq R_A^p \sqrt{\frac{60 \cdot L_h \cdot n}{10^6}} = 26999,2^{10/3} \sqrt{\frac{60 \cdot 25000 \cdot 130,5}{10^6}} = 131,5 \text{ kN} \quad (44)$$

V průmyslovém mlýnu je použito dělené stojaté ložiskové těleso FSNL 532 s upínacím pouzdrém, viz obr. 6.20. Uchycení hřídele a zajištění ložiska v tělese je zobrazeno na obr. 6.21. Toto těleso s upínacím pouzdrém bylo vybráno, aby nebylo nutné na hřídeli vytvářet osazení. V tělese je instalováno soudečkové ložisko 22232 s dynamickou únosností 1000 kN [37]. Ložisko plně vyhovuje podmínce na dynamickou únosnost.



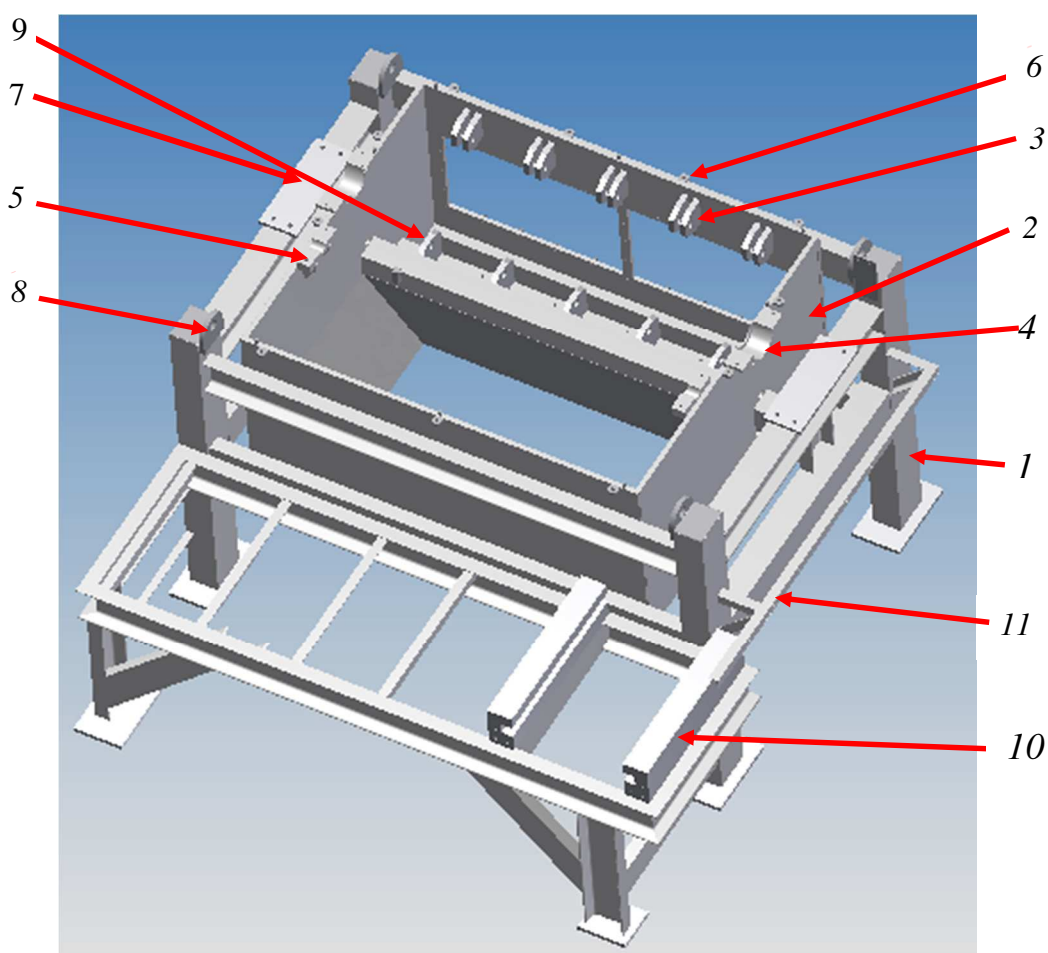
Obr. 6.20 Ložiskové těleso FSNL 532



Obr. 6.21 Řez ložiskovým tělesem
FSNL 532, 1 – upínací pouzdro,
2 – ložisko 22232, 3 – axiální
vodící kroužky

6.2.3. Nosná konstrukce

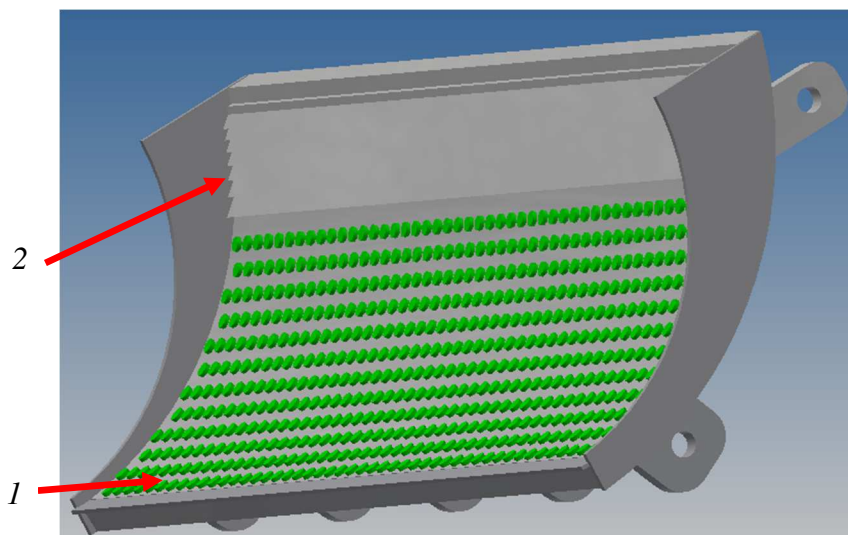
Nosná konstrukce je zobrazena na obr. 6.22. Nosná konstrukce je vyrobena z konstrukční oceli 11 375. Základ tvoří svařovaná konstrukce (1), na níž je přivařena dolní skříň (2). K dolní skříni jsou přivařena závěsná oka (3) pro uchycení drhlíku. Ke skříni je přivařena dolní část komory stlačované ucpávky (4). Dále je ke skříni přivařena objímka (5) pro instalaci síta. K zafixování horní skříně jsou k dolní skříni přivařena oka (6). Ke konstrukci jsou přivařeny vyrovnávací desky (7) pro umístění ložiskových těles. Pro manipulaci s celým zařízením jsou ke konstrukci přivařena nosná oka (8). K uchycení drhlíku jsou ke konstrukci přivařeny desky s otvory (9). Ke konstrukci je přivařen základ napínáku řemenů (10). Pro uchycení krytu řemenového převodu je ke konstrukci navařena lišta (11).



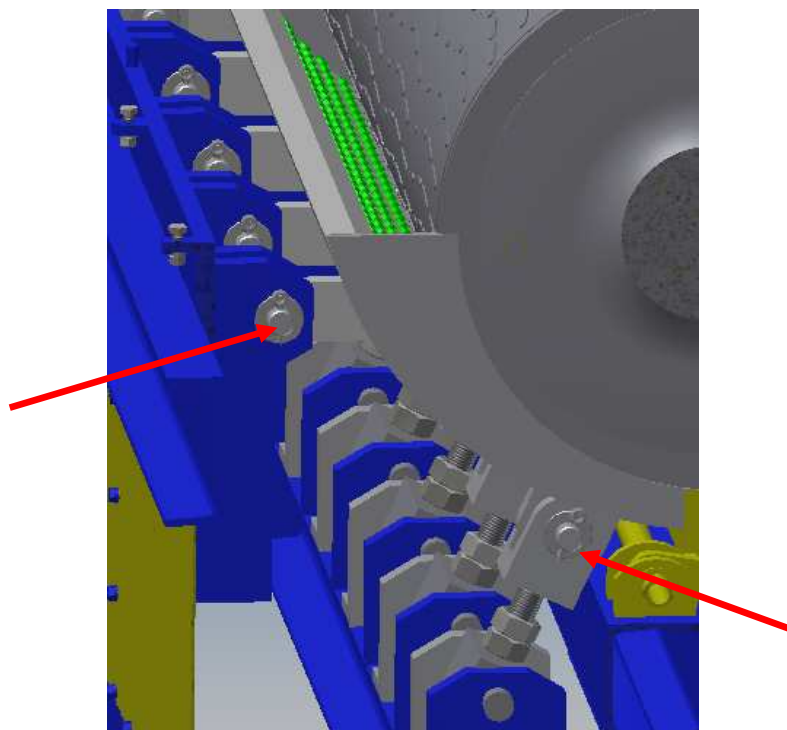
Obr. 6.22 Nosná konstrukce: 1 – ocelová konstrukce, 2 – dolní skříň, 3 – uchycení drhlíku, 4 – komora ucpávky, 5 – objímka, 6 – fixační oka, 7 – vyrovnávací desky pod ložisková tělesa, 8 – nosná oka, 9 – desky s otvory pro drhlík, 10 – základ napínáku řemenů, 11 – lišta k uchycení krytu řemenového převodu

6.2.4. Drhlík

Konstrukce drhlíku je zobrazena na obr. 6.23. Konstrukce drhlíku je vyrobena z konstrukční oceli 11 523. K drhlíku jsou připájeny mlecí segmenty ze slinutých karbidů (1). Pro zamezení protáčení materiálu v násypce jsou v drhlíku vytvořeny zuby (2). Drhlík je k nosné konstrukci uchycen čepy, viz obr. 6.24.

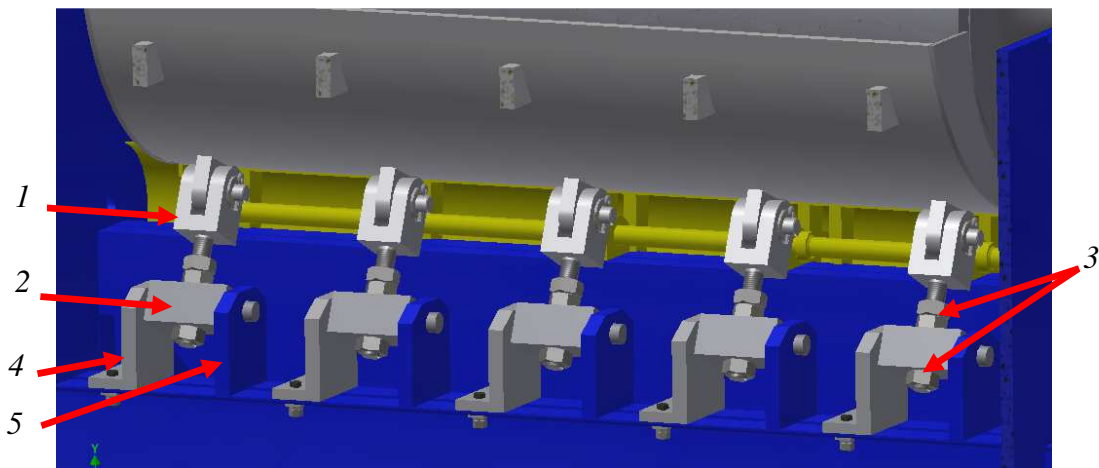


Obr. 6.23 Drhlík: 1 – mlecí segmenty; 2 – zuby proti protáčení materiálu



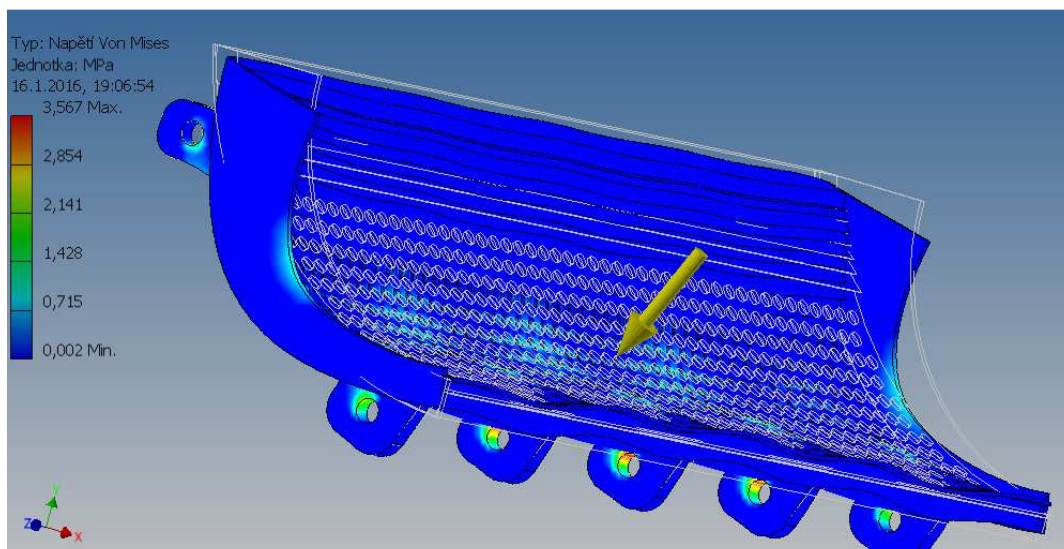
Obr. 6.24 Uchycení drhlíku k nosné konstrukci

System polohování mlecí mezery je zobrazen na obr. 6.25. Drhlík je čepy přichycen k šroubovicové tyči (1). Šroubovicová tyč je nasunuta do třmenu (2). Po nastavení velikosti mlecí mezery je drhlík zajištěn maticemi (3). Pro montáž třemenu je jedna deska (4) přišroubována k nosné konstrukci a druhá (5) je přivařena.



Obr. 6.25 Polohování mlecí mezery: 1 – šroubová tyč; 2 – třmen; 3 – zajišťovací matice; 4 – deska přišroubovaná; 5 – deska přivařená

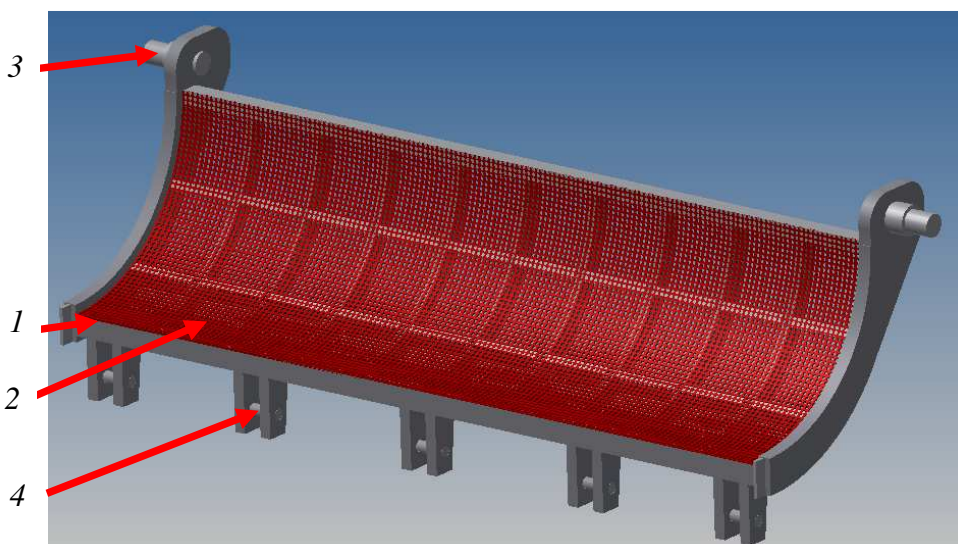
Na konstrukci drhlíku jsem provedl orientační numerický výpočet pro určení průběhu napětí. Namodeloval jsem krizový stav, kdy uprostřed konstrukce drhlíku působí mlecí síla. Vlastnosti sítě: počet prvků 7 227 a počet uzlů 14 349. Výsledky analýzy jsou zobrazeny na obr. 6.32. Maximální hodnota napětí je 3,6 MPa a nachází se v oblasti otvorů pro čepy. Konstrukce drhlíku je vyrobena z oceli 11 523 o mezi kluzu 333 MPa [35]. Konstrukce drhlíku je dostatečně dimenzována.



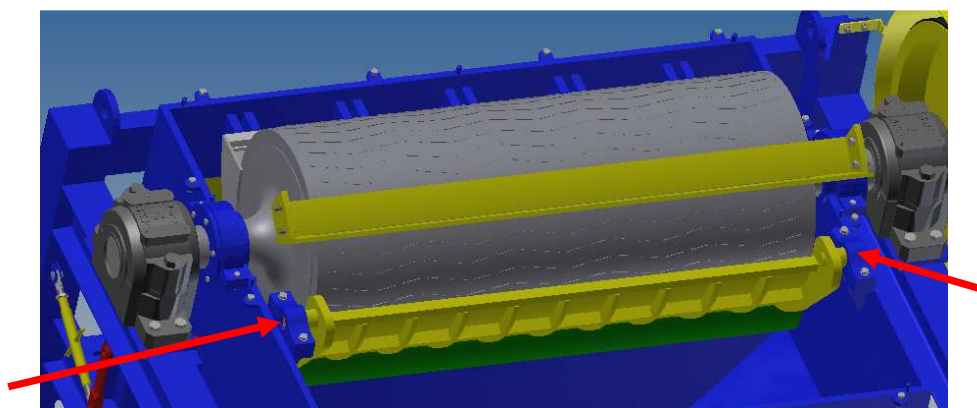
Obr. 6.26 Analýza konstrukce drhlíku

6.2.5. Propadové síto

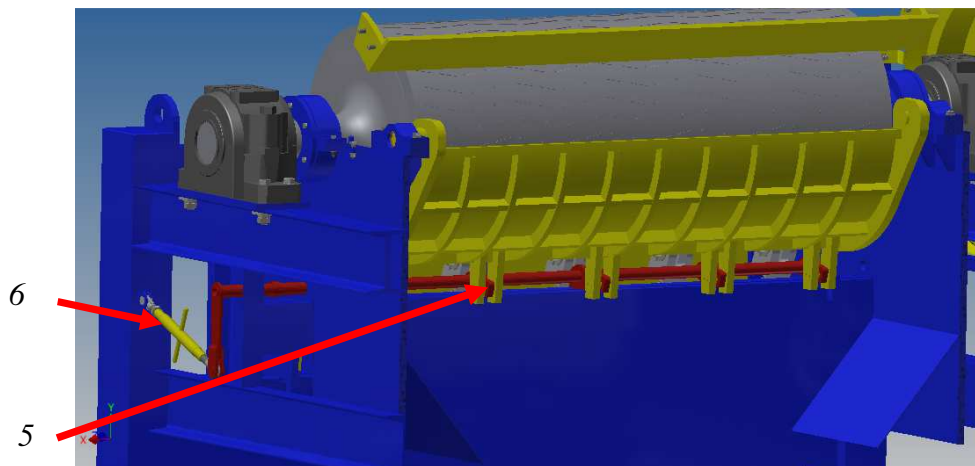
Konstrukce propadového síta, viz obr 6.27, se skládá z nosné konstrukce (1), děrovaného plechu (2), dvou horních čepů (3) a pěti spodních čepů (4). Nosná konstrukce síta je vyrobena z konstrukční oceli 11 523. Děrovaný plech s otvory o průměru 10 mm je uchycen k nosné konstrukci. Celá konstrukce síta je zavěšena horními čepy do dolní skříně mlýnu, viz obr. 6. 28. Pro zajištění polohy síta slouží spodní čepy, do kterých se zachytne zámek síta, viz obr. 6.29 – (5). Zavírací mechanismus je manuálně ovladatelný pomocí ovládací tyče (6). Konstrukci zámku síta, viz obr. 6.30, tvoří ocelová trubka na níž jsou přivařeny zavírací háky a ovládací páka. Pro přivaření k nosné konstrukci jsou na trubce nasunuty ocelové desky. Aby nedocházelo k přímému vniknutí kapalin do uzavíracího mechanismu je ke konstrukci síta přivařen ochranný kryt, viz obr. 6.31.



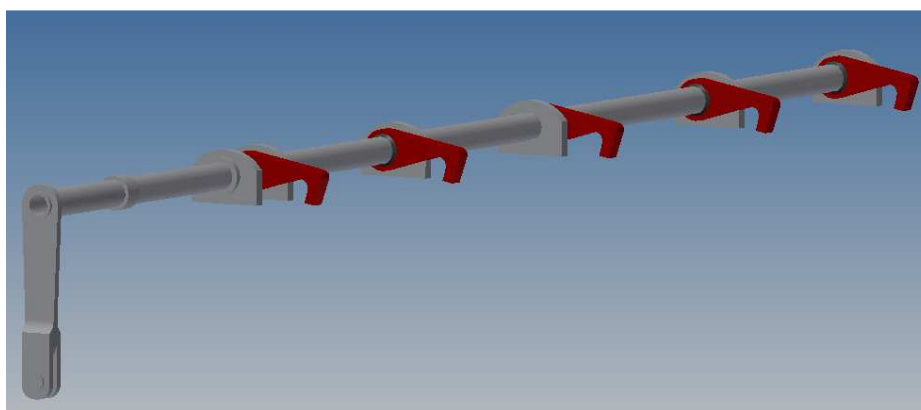
Obr. 6.27 Síto: 1 – nosná konstrukce; 2 - děrovaný plech; 3 – horní závěsný čep; 4 – spodní čepy



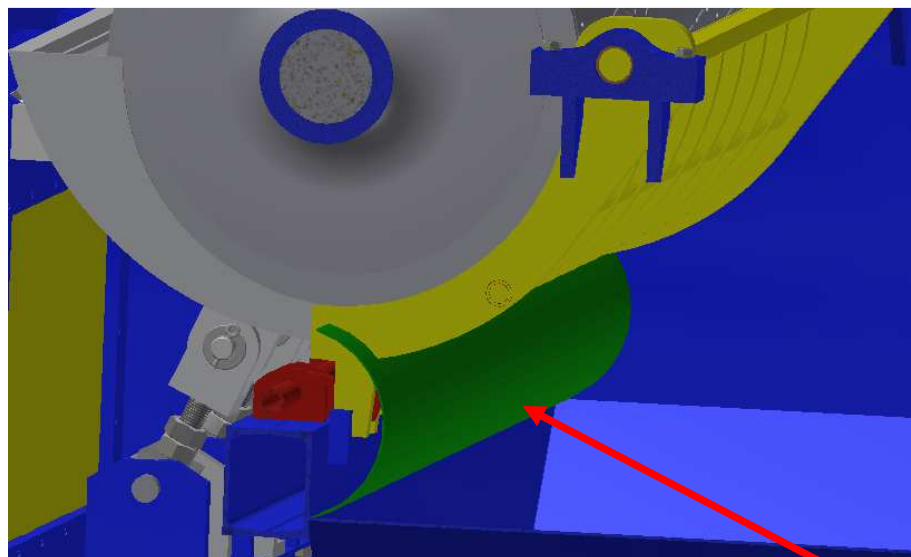
Obr. 6.28 Zavěšení síta v horní skříně



Obr. 6.29 Zámek síta: 5 – zámek síta; 6 – ovládací tyč

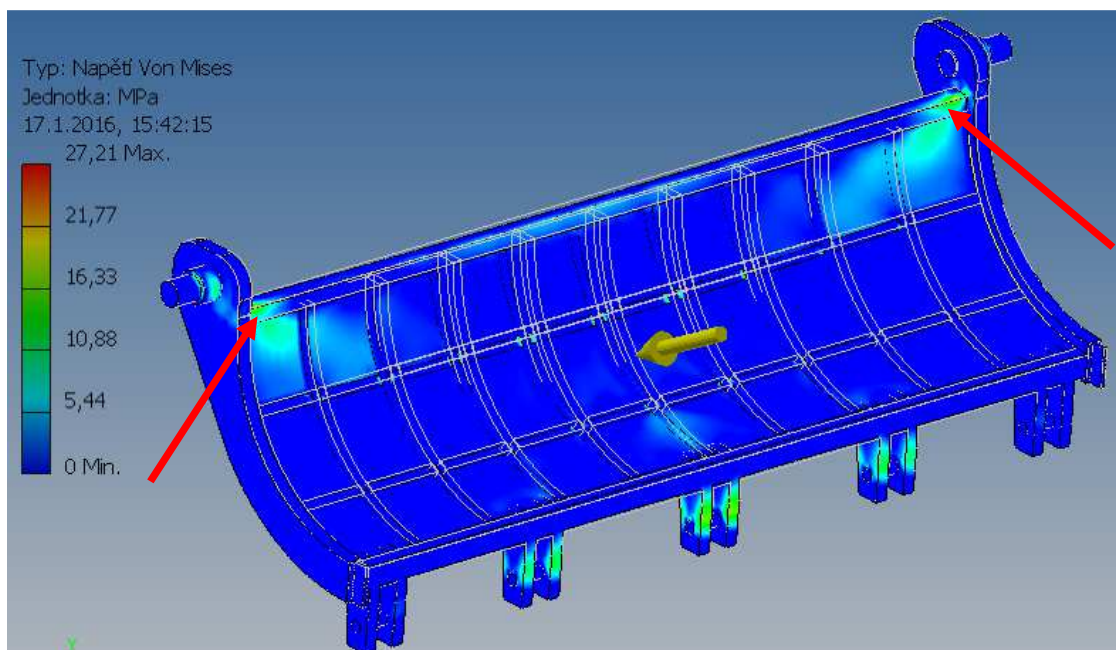


Obr. 6.30 Konstrukce zámku síta



Obr. 6.31 Ochranný kryt zavíracího mechanismu síta

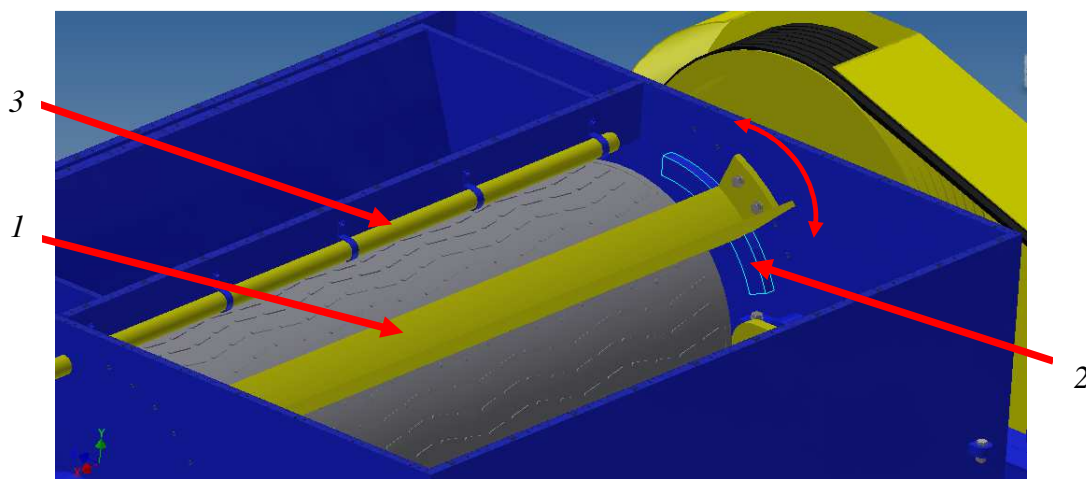
Na konstrukci síta jsem provedl orientační numerický výpočet průběhu napětí. Namodeloval jsem krizový stav, kdy uprostřed konstrukce síta působí mlecí síla. Vlastnosti sítě: počet prvků 42 073 a počet uzlů 64 662. Výsledky analýzy jsou zobrazeny na obr. 6.32. Maximální hodnota napětí je 27,21 MPa a nachází se na okrajích horní hrany síta, viz obr. 6.32 – označeno červenými šipkami. Konstrukce síta je vyrobena z oceli 11 523 o mezi kluzu 333 MPa [35]. Konstrukce síta je dostatečně dimenzována.



Obr. 6.32 Analýza konstrukce síta – průběh napětí

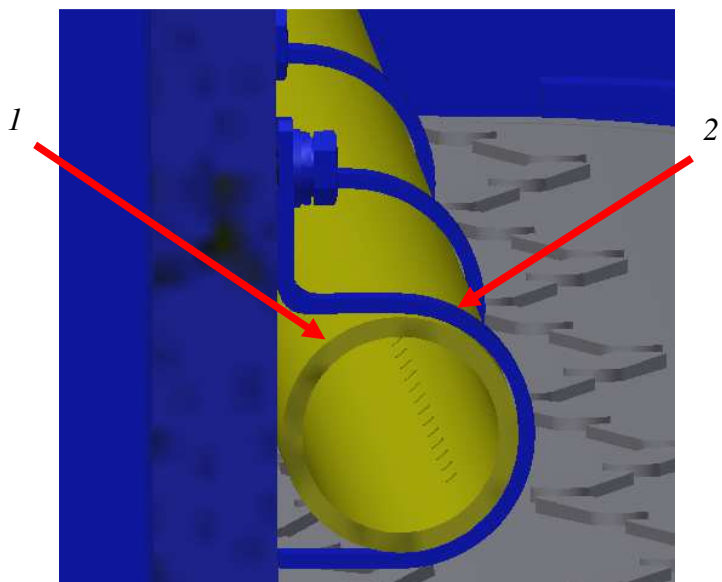
6.2.6. Ostatní prvky

Aby nedocházelo k rotaci zpracovávaného materiálu kolem rotoru, je nad rotorem umístěna zarážka (1), viz obr. 6.33. Zarážka je přišroubovaná k horní skříni a lze ji nastavovat po obvodu rotoru. K tomuto účelu je v horní skříni umístěná vodící tyč (2).



Obr. 6.33 Řez horní skříní: 1 – zarážka, 2 – vodící tyč, 3 – kropící systém

Pro čištění rotoru je v horní skříni umístěn kropicí systém (3), viz obr. 6.33. Detail systému je na obr. 6.34. Jedná se plastovou trubku (1), která je uchycena objímkou (2) do horní skříně nad rotor. V trubce jsou vyvrtané otvory, které směřují proti mlecím segmentům. Voda tryská mezi řady mlecích segmentů a dochází tak k očištění rotoru, který lépe vtahuje zpracovávaný materiál do mlecí části mlýnu.



Obr. 6.34 Kropicí systém: 1 – trubka
s otvory, 2 – objímka

7. Závěr

V úvodu této práce je vypracována rešerše zařízení vhodných pro mletí vláknitých materiálů. Pro mletí vlhké vláknité biomasy existují na trhu různé typy mlýnů. Jejich hlavní nevýhodou je vysoká energetická náročnost a diskontinuální provoz. Z tohoto důvodu byl na půdě ČVUT vyvinut macerační mlýn pro mletí vlhké vláknité biomasy, který dokáže pracovat v kontinuálním režimu.

- Při experimentálním měření byl vyvrácen předpoklad, že k rozvláknění materiálu dojde působením mlecích segmentů na zpracovávaný materiál. K rozmělnění materiálu dochází v prostoru síta, které musí být od rotoru odsazené. Odsazení síta od mlecích segmentů je pro rozmělnění materiálu klíčové. Při použití odsazeného síta, vzniká v mlecí komoře mezera, která umožňuje odpojení materiálu od rotoru. Díky tomu se zpracovávaný materiál zachytává do otvorů síta a vytváří na sítu drsnou vrstvu. Do mlecí komory se dostává nový materiál, který se o vzniklou vrstvu otírá, a dochází tak k jeho rozmělnění.
- Na základě dosažených poznatků doporučuji provést další experimenty s menším počtem řad mlecích segmentů na drhlíku k ověření jejich vlivu na mletí. Při nižším počtu segmentů se sníží finanční náročnost na výrobu zařízení.
- Na laboratorním mlýnu byla změřena výkonnost. Pro návrhový výpočet průmyslové verze maceračního mlýnu byla vybrána varianta se $129 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ o výkonnosti $189,5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ a vlhkosti 76 % hm. U této varianty byla změřena energetická náročnost. Specifická rozpojovací energie je $8,73 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ a celková rozpojovací energie je $17,33 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$. Na pokrytí pasivních odporů bylo potřeba 50 % celkového výkonu.
- Během experimentálního měření jsem identifikoval slabá místa zařízení. V násypce docházelo ke špatnému vtahování materiálu do mlecí části, protože vstup je moc úzký. Při provozu tak větší kusy materiálu v násypce přeskakují např. brambora. Při provozu se rozemletý materiál hromadí v prostoru za sítím. Nedochozí tak ke kontinuálnímu odvodu rozemletého materiálu propadovým prostorem.
- V projekční části byl navržen scale-up pro macerační mlýn. Byl vytvořen Basic design mlýnu pro modelové množství $3 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$. Rozměry rotoru průmyslového mlýnu byly navrženy takto: průměr 0,7 m a délka 1,7 m.

- V konstrukční části byly vytvořeny podklady ke konstrukci průmyslové verze maceračního mlýnu ve formě 3D modelu a sestavy. Při návrhu modelové konstrukce průmyslové verze jsem použil poznatky z měření. U průmyslového zařízení doporučuji použít motor s frekvenčním měničem.

8. Seznam symbolů

$a - h$	délky úseků na rotoru	[m]
C	dynamická únosnost ložiska	[N]
d_i	průměry i na rotor	[m]
D	průměr rotoru laboratorního maceračního mlýnu	[m]
D_{in}	vnitřní průměr trubky rotoru	[m]
D_{LAB}	obecný průměr rotoru laboratorního mlýnu	[m]
D_{out}	výpočtový vnější průměr trubky rotoru	[m]
D_{pm}	průměr rotoru průmyslového maceračního mlýnu	[m]
D_{Pr}	obecný průměr rotoru provozního mlýnu	[m]
F_M	mlecí síla	[N]
F_{Mx}	složka mlecí síly v rovině xz	[N]
F_{My}	složka mlecí síly v rovině yz	[N]
F_{Max}	složka mlecí síly v axiálním směru	[N]
F_{Mtec}	složka mlecí síly v tangenciálním směru	[N]
F_N	napínací síla řemenů	[N]
F_{Nx}	složka napínací síly v rovině xz	[N]
F_{Ny}	složka napínací síly v rovině yz	[N]
F_{RG}	síla od vlastní tíhy rotoru	[N]
$F_{\check{R}}$	síla od vlastní tíhy řemenice	[N]
F_t	síla vlastní tíhy	[N]
F_{RG}	síla vlastní tíhy	[N]
$F_{\check{R}}$	síla vlastní tíhy	[N]
i	počet řad mlecích segmentů laboratorního maceračního mlýnu	[-]
$i_{\check{r}}$	počet řad mlecích segmentů průmyslového maceračního mlýnu	[-]
k	součinitel bezpečnosti	[-]
l_i	délka úseku i	[m]
L	délka rotoru	[m]
L_h	trvanlivost ložiska	[hod]
L_{LAB}	délka rotoru laboratorního mlýnu	[m]
L_P	délka rotoru průmyslového mlýnu	[m]
\dot{m}	hmotnostní tok	[kg·s ⁻¹]
\dot{m}_{mac}	hmotnostní tok maceračního mlýnu	[kg·s ⁻¹]
M_{Bi}	momenty k uložení B	[Nm]
M_{Ai}	momenty k uložení A	[Nm]

M_k	kroučicí moment	[Nm]
M_o	ohybový moment	[Nm]
$M_{o_{red}}$	ohybový moment redukovaný	
n_R	otáčky rotoru	[min ⁻¹]
n_{pr}	otáčky průmyslového mlýnu	[min ⁻¹]
n_{lab}	otáčky laboratorního mlýnu	[min ⁻¹]
P	výkon	[kW]
$P_{\check{c}}$	činný výkon	[kW]
P_r	výkon na rotoru	[kW]
$P_{\check{r}}$	poměr řad segmentů	$\frac{\text{řad}}{m \text{ průměru}}$
R_A, R_B	reakce v ložiscích A, B	[N]
S	průřez	[m ²]
t	čas	[s]
u	obvodová rychlost	[m·s ⁻¹]
v	šířka mlecí mezery	[m]
\dot{V}	objemový tok	[m ³ ·s ⁻¹]
W_o	průřezový modul	[mm ³]

9. Seznam řeckých symbolů

α	úhel sklonu napínací síly řemenů	[°]
β	úhel sklonu mlecí síly	[°]
π	konstanta	[-]
$\eta_{lož}$	účinnost ložisek	[-]
$\eta_{řem}$	účinnost řemenového převodu	[-]
σ	napětí	[MPa]
σ_{Kmin}	mez kluzu	[MPa]
σ_{red}	redukované napětí	[MPa]
ω	úhlová rychlost	[s ⁻¹]

10. Seznam zkratk

TS	celková sušina
VS	organická sušina

11. Seznam příloh

Příloha č. 1 Sestavný výkres MM 001

Příloha č. 2 3D model – macerační mlýn

12. Použitá literatura

- [1] KRÁTKÝ, L., JIROUT, T.: *Moderní trendy předúpravy biomasy pro intenzifikaci výroby biopaliv druhé generace*. Praha: Česká technika-nakladatelství ČVUT, 2015
- [2] KRÁTKÝ, L., JIROUT T., *Biomass Size Reduciton Machines for Enhancing Biogas Production*. Chemical Engineering, 2011, roč. 24, č. 3, s 391-399
- [3] LUNDELL, V.J.: *Slow speed shredder*. Int. Cl. B02C 18/16, US 4925116, 15.5.1990.
- [4] SCHELL D., HARWOOD, CH.: *Milling of lignocellulosic biomass*. Applied Biochemistry and Biotechnology. 1994, roč. 45-46, č. 1, s 159-168
- [5] ADAPA, P., et al. 2011. *Grinding performance and physical properties of non-treated and steam exploded barley, canola, oat and beat straw*. Biomass and Bioenergy. Vol. 36, no. 1, p. 549-561. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.10.004.
- [6] RIEGER, F., NOVÁK, V., JIROUT, T.: *Hydromechanické procesy II.*, Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005.
- [7] SILVA, A., INOUE, H., ENDO, T. YANO, S., BON, E.: *Milling pretreatment of sugercane bagasse and straw for enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation*. Bioresource Technology. 2010, roč. 101, č. 19, s 7402-7409
- [8] PANDEY, A. *Handbook of plant-based biofuels*. New York: CRC Press, 2009.
- [9] KOBAYASHI, N., GUILIN, P., KOBAYASHI, J., HATANO, S., ITAYA, Y., MORI, S.: *A new pulverized biomass utilization technology*. Powder Technology. 2008. roč. 180, č. 3, s. 272-283.
- [10] NAIMI, L.: *Experiments and modelling of size reduction of switch grass in a laboratory rotary knife mill*. Vancouver, 2008. Diploma Thesis. The University of British Columbia
- [11] MIU, P., WOMAC, A. R., CANNAYEN, I., SOKHANSANJ, S. *Analysis of biomass comminution and separation process in rotary equipment – a review*. In: ASSABE Annual Internationla Meeting, Portland, Oregon, 9-12 July 2006.
- [12] *Recyklace – mletí a drcení* [online] TUL [vid. 20.06. 2015] dostupné z: < http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/03.htm#036>
- [13] CADOUCHE, L., LÓPEZ, G. *Assessment of size reduction as a preliminary step in the production of ethanol from lignocellulosic wastes*. Biological Wastes. 1989, roč. 30, č. 2, s 153-157.
- [14] GHORBANI, Z., MASOUMI, A. A., HEMMAT, A., *Specific energy consumption for reducing the size of alfalfa chops using a hammer mill*. Biosystems Engineering. 2010 roč. 105, č 1, s 34-40.
- [15] YU, M., ALVIN, R., WOMAC, PORDESINO, L. *Review of biomass size reduction technology*. In: ASAE Annual International Meeting, Las Vegas, Nevada, USA, 27-30 July 2003

- [16] ALSTON AND BIRD LLP. Disc mill. Vynálezce: Karlheinz Herbold, Holger Watzelt. Příhl. 13. 12. 2004. MPT: B 02 C 1/08, Čís. Patent US 2007/ 0181723 A1, 27. 03. 2007. Databáze patentů ESPACENET
- [17] REPELLIN, V. GOVIN, A., ROLLAND, M., GUYONNET, R.: *Energy requirement for fine grinding of torrefied wood*. Biomass and Bioenergy. 2010, roč. 34, č. 7, s. 923-960.
- [18] LOPO, P.: *The right grinding solution for you: roll, horizontal or vertical*. Feed management 53/3, 2002, str.23-26.
- [19] GOLJANDIN, D., TAMM, B., TYMANOK, A. Treatment of agricultural wastes using disintegrator. In: Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering: 6/3. Tallin: Estonian Academy Publisher, 2000, s. 198-206.
- [20] HIDENO, A., INOUE, H., TSUKAHARA, K., FUJIMOTO, S., MINOWA, T., Inoue, S., Endo, T., Sawayama, S.: *Wet disk milling pretreatment without sulfuric acid for enzymatic hydrolysis of rice straw*. Bioresource Technology. 2009, roč. 100, č. 10, s. 2706-2711.
- [21] KARUNANITHY, Ch., MUTHUKUMARAPPAN, K.: *Effect of Extruder Parameters and Moisture Content of Switchgrass, Prairie Cord Grass on Sugar Recovery from Enzymatic Hydrolysis*. Applied Biochemistry and Biotechnology. 2010, roč. 162, č. 6, s. 1785-1803.
- [22] CHUNG, J.T., et al. 2011. *Srew extruder for continuous and solvent-free resin emulsification*. US Patent 2011/0286296 A1. Nov.24.2011.
- [23] VANDE SANDE & PRIDDY. *Process and apparatus for hydrolyzing cellulose, materiál*. Autor: Berger, Pierre (Saint-Etienne, FR), Gelus. Registrováno 15.04.1983. INT. Cl. C13K 1/00, Patent No. Us 4478644, 23.11 1984, Databáze patentů ESPACENE T
- [24] ANDRITZ, I.: *High defibrization pretreatment proces for mechanicalrefining* Vynálezce: M. J. Sabourin. Příhl. 19.11.2007. MPT: D21B 1/12, Čís. patentu US 2008 0066877 A, 20. 3. 2008. Databáze patentů ESPACENET.
- [25] HARRIS, C., ARBITER, N.: *Grinding Mill Operation and Scale up: Theory and Equations*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2007-07-27, roč. 1, 3-4, s. 249-263.
- [26] RODRIGUEZ, F., RAMIREZ, R., RUIZ, R., CONCHA, F. : *Scale-up procedur efor industrial cage mills*. International Journal of Mineral Processing. 2010, roč. 97, č. 1 – 4, s. 39-43.
- [27] MANNHEIM, V. : *Empirical and scale–up modeling in stirred ball mills*. Chemical Engineering Research and Design. 2011, roč. 89, č. 4, s 339-352

- [28] NALEZENEC, J.: *Návrh nového typu macerátoru pro bioplynové stanice*. Praha: ČVUT, 2012. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky.
- [29] DEINES, W., PEI, Z. Power consumption study in knife milling of wheat straw. *Transactions of Manufacturing Research*, 2010, roč. 4. 38, s 191-196
- [30] KUGL, O., HOUKAL, J., TOMEK, P., ZÝMA, J.: *Projekt - III. ročník*, ČVUT v Praze, Praha 2000
- [31] *Katalogový list KRONE BIG X 450/480 Samojízdná sklízecí řezačka*
- [32] *Základní katalog převodovek IE1* [online] NORD [vid. 20.12. 2015] dostupné z: <https://www.nord.com/cms/media/documents/bw/G1000_CZ_1810.pdf>
- [33] *Spojky N-EUPEX* [online] Flender [vid. 20.12. 2015] dostupné z : <<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10037924>>
- [34] *Spojnení-hřidel-naboj_taper lock* [online] Haberkorn [vid. 20.12. 2015] dostupné z: <http://www.haberkorn.cz/data/files/file/pohonne-systemy/prislusenstvi-pohonu/08_Spojneni-hřidel-naboj_taper-lock.pdf>
- [35] LEIVEBER, J., VÁVRA, P.: *Strojnické tabulky*, Albra, Úvaly 2008
- [36] *Určení velikosti ložiska* [online] SKF [vid. 20.12. 2015] dostupné z: <http://www.exvalos.cz/soubory/File/Hlavni_katalog_SKF/6000_CS_00_03_Urceni%20velikosti%20loziska.pdf>
- [37] *Hlavní katalog SKF-Soudečková ložiska* [online] SKF [vid. 20.12. 2015] dostupné z: <http://www.exvalos.cz/soubory/File/Hlavni_katalog_SKF/6000_CS_06_Soudeckova%20loziska.pdf>