

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY



**DÁVKOVÁNÍ PAPIROVÉ VLÁKINY  
V AUTOMATICKÉM STROJI PRO VÝROBU  
SAZENIC**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

JAKUB ČECH

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čech** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **491491**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Dávkování papírové vlákniny v automatickém stroji pro výrobu sazenic**

Název bakalářské práce anglicky:

**Dosing of paper pulp in an automatic potting machine for the seedlings production**

Pokyny pro vypracování:

Automatický stroj na výrobu sazenic pracuje tak, že je nejprve vytvořen kelímek z papírové vlákniny. Do takto vyrobeného kelímku je v dalším kroku vložena sazenice. V posledním kroku je do kelímku vpraven substrát.

1) Formou literární rešerše se seznámte s procesem výroby papíru, zaměřte se především na produkci výrobků z papírové vlákniny z odpadového papíru. Pozornost věnujte také způsobu čerpání/dávkování papírové hmoty.

2) Připravte vzorky papírové vlákniny a proveďte její testování v automatickém stroji na výrobu sazenic. Zaměřte se na sledování procesu tvorby kelímku ve stroji a na vlastnosti výsledného produktu. Zkuste změřit/sledovat také další vlastnosti papírové vlákniny vhodné pro návrh dávkování papírové vlákniny do stroje.

3) Na základě poznatků z literární rešerše a provedených pokusů zkuste navrhnout řešení vhodného dávkování papírové vlákniny v automatickém stroji. Na základě vlastního pozorování doporučte vhodnou recepturu papírové vlákniny.

Seznam doporučené literatury:

Dle vlastní literární rešerše a doporučení vedoucího bakalářské práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jaromír Štancl, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **18.09.2022**

Ing. Jaromír Štancl, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

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

V Praze dne .....

.....

Jakub Čech

## Poděkování

Nejvíce děkuji svým rodičům za podporu během mého studia, věčnou trpělivost a také za neustálé a včasné tisknutí mých studijních materiálů. Mé poděkování taktéž patří Ing. Jaromír Štancl, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a odborný dohled.

## Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	Jakub
<b>Příjmení autora:</b>	Čech
<b>Název práce česky:</b>	Dávkování papírové vlákniny v automatickém stroji pro výrobu sazenic
<b>Název práce anglicky:</b>	Dosing of paper pulp in an automatic potting machine for the seedlings production
<b>Rozsah práce:</b>	počet stran: 73 počet obrázků: 64 počet tabulek: 4
<b>Akademický rok:</b>	2021/22
<b>Jazyk práce:</b>	Český
<b>Ústav:</b>	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
<b>Studijní program:</b>	Teoretický základ strojního inženýrství
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Jaromír Štancl, Ph.D.
<b>Klíčová slova:</b>	Papírová vláknina (buničina), výroba papíru, výroba buničiny, recyklace papíru, čerpání buničiny, čerpadla, reologie, stroj na výrobu sazenic
<b>Klíčová slova anglicky:</b>	Paper pulp, paper production, pulp production, recycled paper, pulp pumping, pumps, rheology, automatic potting machine for the seedlings production
<b>Anotace česky:</b>	Bakalářská práce se zaměřuje v rešeršní části na výrobu papíru, papírové vlákniny a papíroviny, dále na výrobu buničiny z recyklovaného papíru. Pozornost je věnována také čerpání buničiny v papírenském průmyslu. Závěr rešeršní části práce je věnován reologickým vlastnostem zejména pak vláknitých suspenzí. V Experimentální části byly testovány různé druhy papírové vlákniny vyrobené ze sběrového papíru na automatickém stroji na výrobu sazenic. Dále byly měřeny reologické vlastnosti papírové vlákniny a obsah sušiny papírové vlákniny. Závěr práce je věnován doporučení vhodného čerpadla pro dávkování papírové vlákniny do automatického stroje na výrobu sazenic.

**Anotace anglicky:**

The bachelor thesis focuses on the research part for the production of paper, paper pulp, as well as for the production of pulp from recycled paper. Attention is also paid to the pumping of pulp in the paper industry. The conclusion of the research part of the work is devoted to the rheological properties of fibrous suspensions in particular. In the Experimental part, various types of paper pulp produced from recycled paper were tested for automatic machines for the production of seedlings. Furthermore, the rheological properties of paper pulp and the dry matter content of paper pulp were measured. The conclusion of the work is the recommendation of a suitable pump for dosing paper pulp into automatic machines for the production of seedlings.

## Obsah

1	Úvod.....	- 9 -
2	Výroba papíru .....	- 10 -
2.1	Výroba vlákniny .....	- 11 -
2.1.1	Způsoby získání vlákniny: .....	- 12 -
2.2	Výroba papíroviny .....	- 16 -
3	Recyklace papíru.....	- 17 -
3.1	Postup výroby recyklovaného papíru .....	- 18 -
3.1.1	Třídění papíru.....	- 18 -
3.1.2	Rozvlákňování.....	- 18 -
3.1.3	Čištění větších částic .....	- 21 -
3.1.4	Flotace (Deinking) - Odbarvování .....	- 22 -
3.1.5	Bělení .....	- 23 -
3.2	Čerpání papírové hmoty (buničiny) v průmyslu.....	- 24 -
3.2.1	Odstředivá kalová čerpadla .....	- 24 -
3.2.2	Peristaltická čerpadla.....	- 25 -
3.2.3	Membránová čerpadla .....	- 26 -
3.2.4	Vřetenová čerpadla.....	- 27 -
3.2.5	Pístová čerpadla.....	- 27 -
4	Reologie .....	- 28 -
4.1	Newtonské kapaliny .....	- 28 -
4.2	Nenewtonské kapaliny.....	- 29 -
4.2.1	Pseudoplastické kapaliny .....	- 30 -
4.2.2	Dilatantní kapaliny .....	- 30 -
4.2.3	Ideálně plastické kapaliny (Binghamovy kapaliny).....	- 31 -
4.2.4	Skutečně plastické kapaliny .....	- 31 -
4.2.5	Tixotropie a reopexie .....	- 32 -

4.3	Reologické modely .....	- 32 -
4.4	Reologické vlastnosti suspenzí buničiny .....	- 35 -
4.4.1	Vlastnosti vláken a rozsahy konzistence .....	- 35 -
4.4.2	Vláknové kontakty a síly .....	- 35 -
4.4.3	Síly na vlákna a flokulace .....	- 36 -
4.4.4	Reologie vláknitých suspenzí .....	- 37 -
4.4.5	Zdánlivá mez toku .....	- 37 -
4.4.6	Zařízení s lopatkovou geometrií .....	- 38 -
5	Experimentální část .....	- 39 -
5.1	Charakteristika a popis automatického stroje na výrobu sazenic .....	- 39 -
5.2	Příprava papírové vlákniny .....	- 40 -
5.3	Výroba kelímků a následné testování .....	- 44 -
5.3.1	Vyhodnocení testu papírové vlákniny na automatickém stroji .....	- 46 -
5.4	Měření tokových vlastností papírových vláknin .....	- 52 -
5.4.1	Zpracování dat z měření kroutícího momentu u šroubového míchadla .....	- 54 -
5.4.2	Měření hustoty a obsahu sušiny papírové vlákniny .....	- 60 -
6	Návrh možného dávkování/čerpání buničiny do obalovačky .....	- 61 -
6.1	Návrh dávkovače .....	- 61 -
6.2	Doporučené složení papírové vlákniny .....	- 62 -
7	Závěr .....	- 63 -
8	Seznam zdrojů a použité literatury .....	- 64 -
9	Seznam symbolů .....	- 69 -
10	Seznam obrázků .....	- 70 -
11	Seznam tabulek .....	- 73 -



# 1 Úvod

V lesním hospodářství existuje řada situací, kdy je třeba přistoupit k umělé obnově lesa prostřednictvím výsadby lesních dřevin. Pro zefektivnění výsadby se začal stavět automatický stroj pro výrobu sazenic, který má za úkol automatizované obalování dopěstovaných či rozpěstovaných rostlin do rozložitelných kelímků včetně tvorby prorůstových obalů, a také aby bylo možné se sazenicí ihned manipulovat bez rizika uvolnění kořenů ze substrátu v kořenovém balu.

Tato práce se nezabývá konstrukcí vlastního stroje, ale návrhem a testování různých papírovin pro obalení sazenic a návrhem vhodného čerpání této papíroviny.

## 2 Výroba papíru

Ve střední Evropě je tradiční surovinou pro výrobu papíru smrkové dřevo zbavené kůry a listů. Obsahuje vlákna z celulózy (tvoří stěnu jednotlivých rostlinných buněk), která jsou mezi sebou spojena molekulárními „mosty“ z ligninu [1] (dává dřevu pevnost – jeho hlavním úkolem je spojování mezibuněčných vláken a zpevnění celulózových molekul v rámci buněčných stěn) [2].

Při výrobě kancelářského papíru se dřevo naseká na štěpky. Ty se následně upravují tak, aby se zachovala celulóza a zároveň došlo k degradaci ligninu. V opačném případě by byl papír příliš tuhý a nepoddajný pro běžné použití. Štěpky se proto vaří při vysokém tlaku a teplotě v agresivní chemické směsi. Lignin se rozpouští a vzniká buničina [1].

V dalším kroku se buničina ve vodě namele na menší vlákna a odbarví. Pro lepší pevnost a konzistenci papíru se do směsi přidává řada chemických látek [1].

Vzniklá papírovina se zbavuje vlhkosti několika po sobě jdoucími kroky:

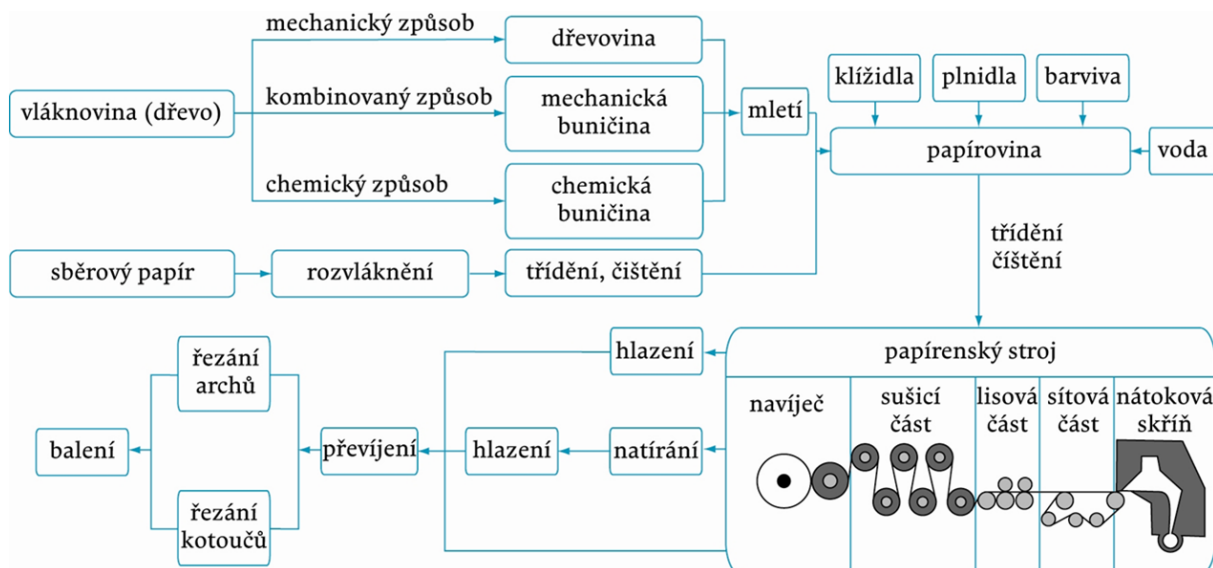
- odvodněním na sítu za působení gravitace
- lisováním (aktivní odstranění vlhkosti tlakem)
- sušením

Během sušení se na papír nanáší škrob, aby výsledný produkt nebyl příliš savý a dalo se na něj bez problémů psát [1].

Po sušení papír prochází za účelem uhlazení speciálním válcem (tzv. kalandrem). Pokud je to potřeba, aplikuje se v této fázi další povrchová úprava. Tímto způsobem vzniká např. křídový nebo voskovaný papír [1].

Po zarovnání okrajů se nakonec hotový papír namotává na obří cívky. Odtud se papír nařezává do požadovaného formátu, popř. se k dalšímu zpracování odesílá zákazníkům [1].

Při výrobě lepenky se v papírovině nechává větší podíl ligninu, který propůjčuje dřevu vysokou pevnost. Z něj se vyrábí vysoce odolný kraftový papír typické hnědé barvy. Slisováním několika vrstev tohoto papíru vzniká hladká lepenka [1].



Obrázek 1- Schéma výroby papíru [4]

## 2.1 Výroba vlákniny

Pro výrobu samotného papíru je nezbytné získat vlákna celulózy – vlákninu.

Tu lze získat:

- z jednoletých rostlin – bavlna (98 % celulózy), len, konopí, juta,
- z víceletých rostlin – jehličnaté a listnaté dřeviny, nejvhodnější je dřevo jehličnatých stromů – smrku a borovice,
- ze sběrového papíru – nejvhodnější je odpad přímo z výrob, méně vhodný je tříděný sběr,

Rostlinný materiál	Zastoupení celulózy [%]
Bavlník	95-99
Ramie (Boehmeria nivea)	80-90
Bambus	40-50
Dřevo	40-50
Kůra	20-30
Mechy	25-30
Bakterie	20-30

Obrázek 2 Zastoupení celulózy v různých rostlinných materiálech [7]

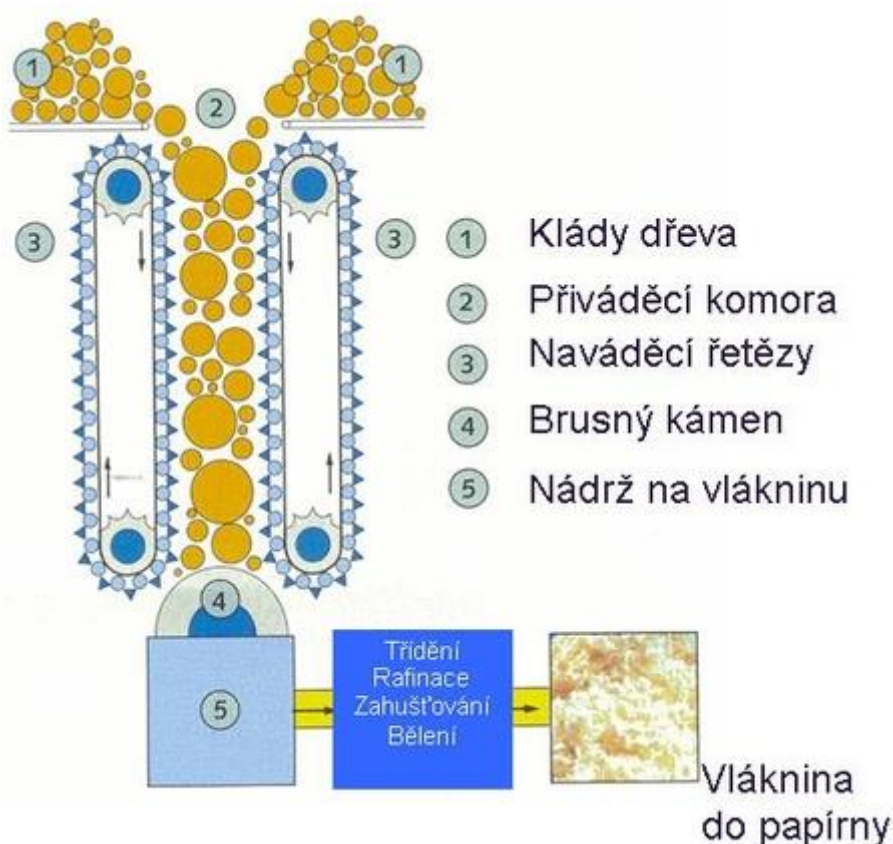
Sběrový papír je druhotnou surovinou, která se vrací zpět do výroby. Může pocházet z průmyslového sběru (sběrový papír a odpad papíru při jeho výrobě a zpracování) nebo z komunálního sběru (ze sběren, třídění papíru) [4].

Vlákninu nejčastěji získáváme ze dřeva jehličnatých stromů (smrkové dřevo), přičemž lze vyrobit různé typy vlákniny. Jednotlivé typy vlákniny se navzájem liší způsobem výroby (mechanicky či chemicky) a také svými vlastnostmi [4].

### 2.1.1 Způsoby získání vlákniny:

#### Mechanický způsob

Vlákniny jsou získávány mechanickou cestou (broušením). Vláknina se rozrušuje pouze mechanicky, proto vzniklá vláknina obsahuje všechny složky dřeva: celulózu, hemicelulózu, lignin a ostatní. Průměrné dřevo obsahuje 45 % celulózy, 25 % hemicelulózy, 25 % ligninu a 5 % vedlejších složek (škrob, pektiny, třísloviny, vosky, éterické oleje, minerální látky, rostlinná barviva) [6]. Takto získanou vlákninu nazýváme dřevovina. V důsledku obsahu ligninu v dřevovině dochází ke žloutnutí takto vyrobeného papíru. Papír je méně kvalitní, ale velmi pevný. Ze dřevoviny se vyrábí lepenky, kartony a balicí papíry [4].



Obrázek 3- Mechanický způsob výroby vlákniny [4]

### Kombinovaný (mechanicko-chemický) způsob:

Vláknina se získává tak, že nejprve vystavíme tzv. štěpky (10 mm dlouhé kousky dřeva) chemickému působení (vodní pára-teplo/chemikálie 20 %  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  a 5 %  $\text{NaHCO}_3$ ) a poté se dále zpracovávají mechanicky (zpracování je snadnější). Takto získané vlákniny nazýváme polobuničina. Pro výrobu polobuničiny se používá dřevo z listnatých stromů [4].



Obrázek 4- Mechanicko-chemický způsob výroby vlákniny [4]

### Chemický způsob:

Chemické zpracování dřeva spočívá ve vaření štěpků (kousky o velikosti cca 2 x 2 x 0,4 cm) v roztoku chemikálií. Výsledný produkt nazýváme buničinou a jde o téměř čistá celulózová vlákna. Ostatní složky se chemicky odstraní. Buničinu lze vyrobit dvojím způsobem, podle typu chemikálií, které použijeme při vaření štěpků [4]. Oba postupy (sulfátový i sulfitový) probíhají podobným technologickým postupem (hlavním cílem obou způsobů je odstranit lignin z dřevoviny) [6]:

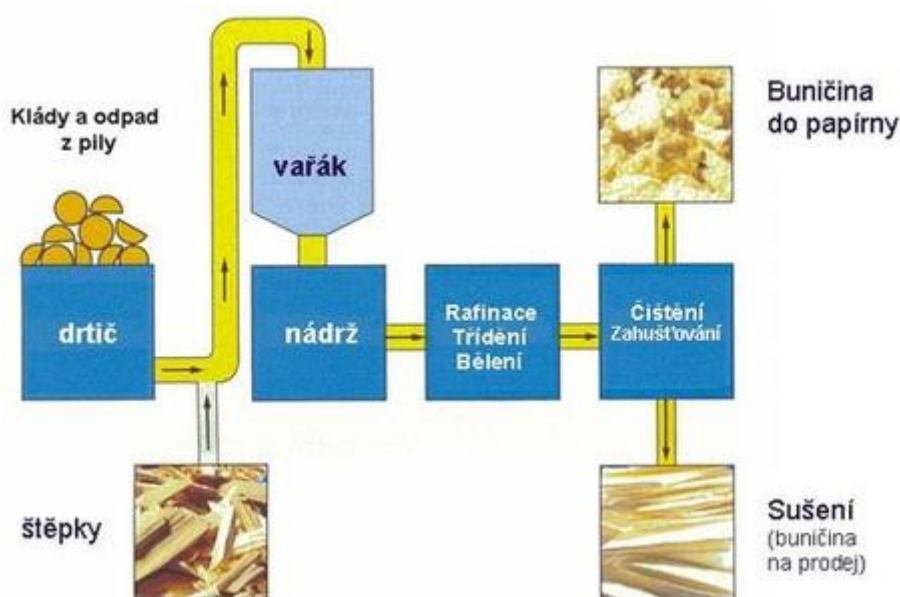
- Sulfitový způsob (kyselý) – chemickým činidlem je varná kyselina (roztok hydrogensířičitanu vápenatého  $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$  a kyseliny siřičité  $\text{H}_2\text{SO}_3$ ). Zavárka trvá několik hodin při teplotě 110-140 °C [5].

V celosvětovém měřítku je tímto způsobem vyráběno zhruba 10 % celkové produkce buničiny, tiskových, ale také hygienických papírů. [7].

Vlastnosti: atmosférické emise, znečišťování vodních toků, nelze k výrobě použít borovice, nižší pevnost, nižší výnos než v případě mechanické celulózy, dobré vlastnosti k archivaci, snadno bělitelné [7].
- Sulfátový způsob (zásaditý) – k vaření dřeva se používá varný louh (roztok hydroxidusodného  $\text{NaOH}$  a sulfidu sodného  $\text{Na}_2\text{S}$ ). Vaří se až 5 hodin při teplotě až 180 °C [5].

Tímto zásaditým způsobem výroby je vyráběno zhruba 80 % veškeré buničiny [7].

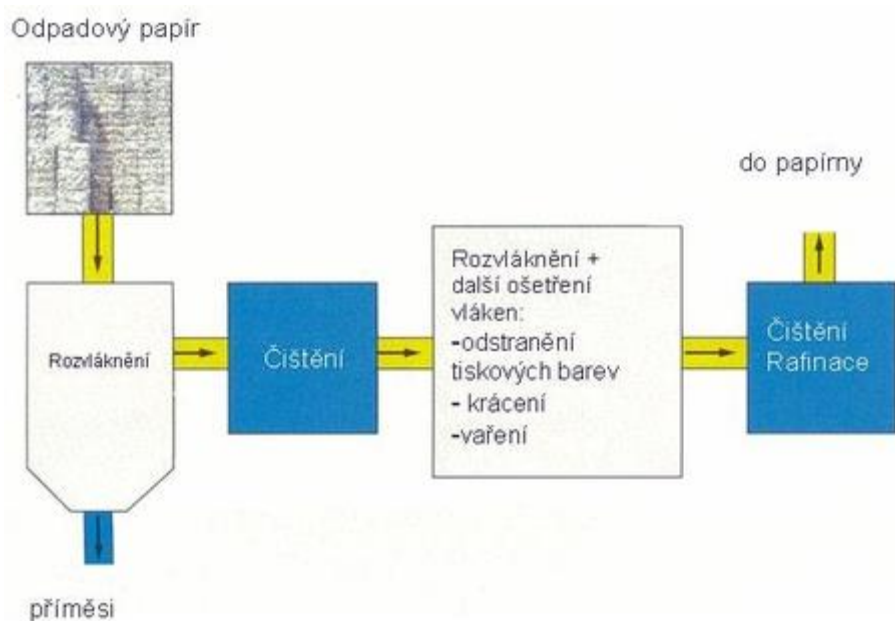
Vlastnosti: nižší výnos než v případě mechanické celulózy, obtížnější bělení, velmi dobrá pevnost, dobré vlastnosti k archivaci, k výrobě možno použít všechny druhy dřeva, dobrá potiskovatelnost [7].



Obrázek 5- Schéma chemického způsobu výroby buničiny [4]

## Recyklovaná celulóza:

Ta se vyrábí ze sběrového papíru jeho rozvlákněním a zbavením nečistot. Po ukončení varu se buničina dále ještě zpracovává. Postupně se pere, třídí, čistí a bělí, odvodňuje a ve finální fázi suší. Část nečistot v surovině však zůstává, proto není zcela bílá. Vhodná je zejména k výrobě papíru novinového, balícího a tam, kde nezáleží na vzhledu a vysoké kvalitě. Bělení buničiny je nutné pro výrobu klasického bílého papíru. Dříve se k bělení používaly sloučeniny chlóru, ale z důvodu vzniku fosgenu se změnil technologický postup bělení bez použití chlóru. Pak mluvíme o ekologické buničině, či ekologických papírech [7].



Obrázek 6 Výroba recyklované vlákniny [4]

## 2.2 Výroba papíroviny

Abychom získali papír, jak jej známe z běžného života, potřebujeme nejdříve získat vlákninu, která je v následujícím kroku podrobena mletí. Do takto rozmělněné vlákniny se přidávají plnidla, klíždla, barviva a vzniká papírovina. Samotný proces výroby papíru pak probíhá na papírenském stroji [7].

Technologický postup výroby papíru můžeme tedy shrnout do tří bodů:

- výrobu vlákniny (dřevoviny a buničiny),
- výrobu papíroviny,
- vlastní výrobu papíru,

Výroba papíroviny probíhá v několika fázích [8]:

- mletí,
- plnění,
- klížení,
- barvení,

První operací při výrobě papíroviny je rozvláknění zdrojové suroviny (dřevo, celulóza, sběrový papír) a vytvoření vodní suspenze, ve které je rozvlákněná surovina rozptýlená.

Následuje mletí této suspenze, při kterém dochází ke krácení vláken v příčném směru. Ve směru podélném dochází k tzv. fibrilaci, což je uvolnění fibril z buněčné stěny vláken. Aby získala rozemletá celulóza vlastnosti nutné ke zhotovení papíru, přidávají se do vláknité suspenze plnidla. Nejčastěji se používají silně bílé chemické látky, jako například kaolin, uhličitan vápenatý a titanová běloba. Tím získává surovina lepší optické vlastnosti, respektive požadovanou bělost. Protože vláknina je silně hygroskopická (voda proniká až do kapilární struktury papíru) a tím je papírovina i rozměrově nestálá, přidávají se do papíroviny klíždla. Ta mají za úkol zvýšit odolnost papíru proti pronikání vzdušné vlhkosti. Klížit lze papír ve hmotě, kdy se klíždla přidávají do papíroviny ještě v tekutém stavu. Klížit lze ale i povrchově – již na hotovém papíru. Jako klíždla se používají živočišný klíh, kalafuna, škrob, křemičitan sodný (vodní sklo), kasein, albumin a další. Má-li být papír barevný, přidávají se do papírové hmoty rozpustná barviva. Barvit papír lze však také až v hotovém stavu povrchově. Obvykle se papírovina barví ve hmotě pomocí organických barviv, ředěných v poměru 1:50 až 1:200. Papírovina obsahuje také další pomocné látky, které příznivě ovlivňují zpracování papíroviny v papírenském stroji, zejména látky na zvýšení pevnosti papíru [8].



Spojením a promícháním všech složek (vláknina, plnidla, klíždla, barviva) s velkým objemem vody vzniká papírovina. Papírovina obsahuje 1 % sušiny a 99 % vody. Při výrobě v papírenském stroji dochází k postupnému odstranění vody až na požadovaný zůstatek vlhkosti cca 5–10 % ve zhotoveném papíru [8].

### **3 Recyklace papíru**

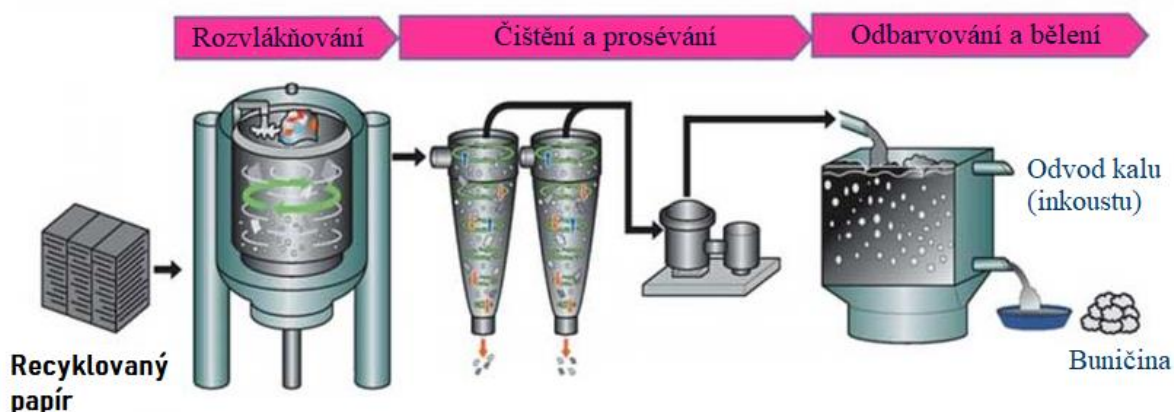
Cílem recyklace je získat směs papíroviny, kterou lze dále upravovat [1].

Pro celkovou výrobu papíru se spotřebuje zhruba 40 % nových dřevěných vláken a zhruba 50 % rozvlákněného recyklovaného papíru (zbytek tvoří příměsi). Procentuální zastoupení čerstvých vláken a recyklované vlákniny při výrobě jednotlivých druhů papíru však může kolísat od 0 do 100 %. Jiné složení má například bílý, nebo recyklovaný kancelářský papír. Klíčový je však neustálý návrat papíru do recyklačního cyklu, aby byl zajištěn jeho dostatek pro další výrobu. Ale ani výrobky z papíru nelze recyklovat donekonečna [3]. Během recyklačních procesů vlákna ztrácejí pružnost a pevnost, proto se jejich možnost plnohodnotné recyklace snižuje [9]. Po pěti až šestinásobné recyklaci je kvalita a délka vláken papíru snížena tak, že je nelze již dále zpracovat [3].

Při recyklaci starého papíru jde hlavně o celulózová vlákna, díky kterým je možné snížit spotřebu primární suroviny pro její získání – dřeva [9].

Sběrový papír s dlouhými celulózovými vlákny (jako je kancelářský papír) má největší flexibilitu pro recyklaci, protože jej lze použít k výrobě nových papírových produktů, které používají buď dlouhá nebo krátká vlákna. Sběrový papír s krátkými celulózovými vlákny (jako jsou noviny) lze recyklovat pouze do jiných produktů, které používají krátká celulózová vlákna. Z tohoto důvodu má sběrový papír s dlouhými vlákny obecně vyšší hodnotu než sběrový papír s krátkými vlákny [12].

### 3.1 Postup výroby recyklovaného papíru



Obrázek 7- Postup výroby recyklovaného papíru [24]

#### 3.1.1 Třídění papíru

Na začátku se papír vytrídí a sveze ke zpracovateli. Zde se dostává starý papír na pás. Někdy je ručně tříděn, aby se z hromad odstranil papír, který je pro recyklaci nevhodný, popřípadě je nerecyklovatelný. Jedná se o kopíraky, hygienické papíry, křídový papír, voskovaný papír a papír jinak chemicky ošetřený. Tyto odpady se použijí buď jako palivo, popřípadě se likvidují jiným způsobem [9]. Papír se také klasifikuje podle kvality. Sběrový papír s podobnými kvalitami se kombinuje, protože má podobné množství vlákniny, které lze extrahovat z buničiny. Papír je poté odvážen do recyklačních zařízení papíren. Jakmile je sběrový papír přijat do recyklačního zařízení, je dále tříděn na základě jeho povrchové úpravy a struktury. Například velmi tenký lehký papír, jako jsou noviny, se třídí odděleně od silných papírových materiálů, jako jsou papírové složky. Toto třídění je důležité, protože se vyrábějí různé druhy papírového materiálu na základě materiálů, ze kterého se získávají [10].

#### 3.1.2 Rozvlákňování

Po vytrídění se papír rozdrťí, aby se materiál rozložil na malé kousky. Poté, co je materiál jemně rozdrčen, se přidá velké množství vody spolu s dalšími chemikáliemi, jako je peroxid vodíku, hydroxid sodný a křemičitan sodný, aby se rozložila a oddělila vlákna papíru [10]. Tomuto se říká pulper (česky rozvlákňovač). Zde se papír máčí a míchá zhruba čtvrt hodiny. Díky míchání změkklého papíru vznikne kaše, známá jako buničina [9].

### 3.1.2.1 Příklady rozvlákňovačů

Rozvlákňovače mohou být kontinuální nebo dávkovací, vertikální nebo horizontální. Rozvlákňovače mohou obsahovat i síta pro odstranění nečistot, zároveň se mohou přidávat chemikálie na odbarvení.

#### Rozvlákňovač pro nízko-koncentrované buničiny

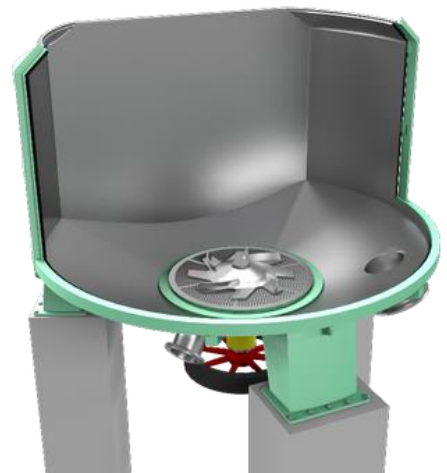
Koncentrace buničiny: 5-8 % hm.

Rozvlákňovač s nízkou konzistencí je univerzálnější stroj, má silné rozvlákňovací schopnosti, široké použití [17]. Je určen pro kontinuální a periodické rozvlákňování vláknitých materiálů, jako je chemická buničina, mleté dřevo, sběrový papír (vč. papírů se zvýšenou pevností za mokra), dřev, minerální vlákna, azbest atd [18]. Není určen pro odstraňování tiskárenské barvy [19].

Tento rozvlákňovač je obecně potřeba vybavit strojem na splétání lan, aby se vláknina zbavila dlouhých nečistot, jako jsou plastové obalové sáčky, provázky... [17].



Obrázek 8-Detail rotoru rozvlákňovače pro nízko-koncentrované buničiny



Obrázek 9- Nízko koncentrační rozvlákňování [21]

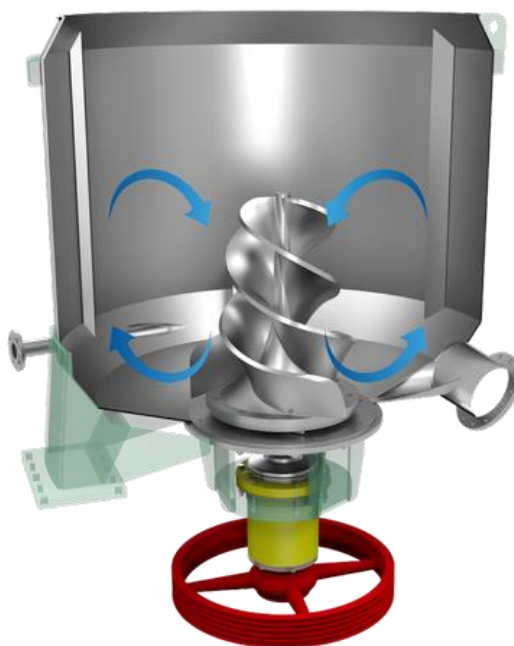


Obrázek 10-Schéma ukázky stroje pro splétání lan v rozvlákňovači [21]

### Rozvlákňovač pro vysoko-konzertované vlákny

Koncentrace buničiny: 12-18 % hm.

Používá se také pro odstraňování tiskárenské barvy, je provozován v dávkovacím procesu. Unikátní konstrukce rotoru vytváří vynikající cirkulaci uvnitř kádě a poskytuje dobré rozměňování surovin, což umožňuje provoz při zvýšené konzistenci [20]. Nedochozí k rozměňování nečistot, zachovává délku vlákna v původní velikosti [22].



Obrázek 11- Rozvlákňovač pro vysoko-konzertované vlákny [22]

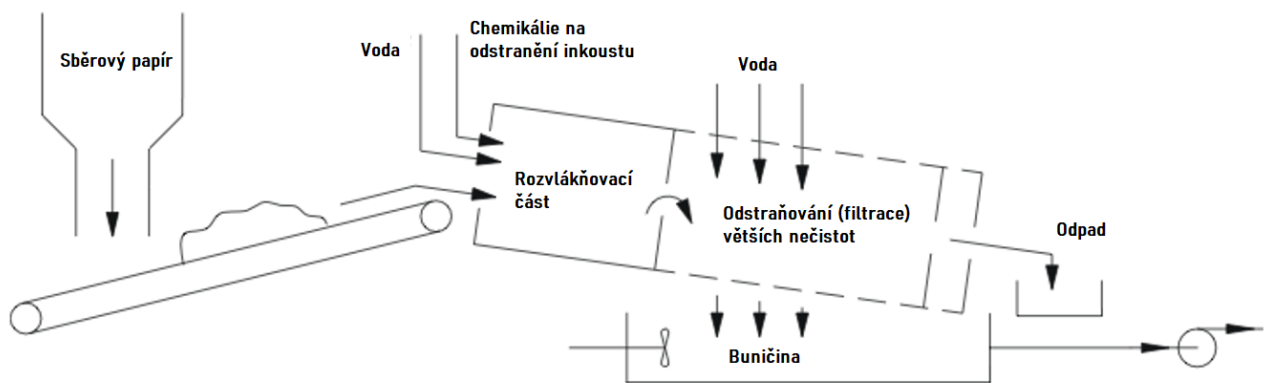
## Bubnový rozvlákňovač

Koncentrace buničiny: 14-18 % hm.

Bubnový rozvlákňovač je rozvlákňovací a prosévací souprava (čištění větších částic). Obvykle se používá pro rozvlákňování sběrového papíru, jako jsou noviny, průmyslová lepenka a směsný sběrový papír. Bubnový rozvlákňovač se používá pro kontinuální rozvlákňování.

Bubnový rozvlákňovač dokáže z buničiny odstranit lehké až těžké nečistoty, jako jsou plasty, fólie a tavné lepidlo. Zároveň probíhá částečné odbarvení. Nedochozí k rozměňování nečistot.

Bubnový rozvlákňovač dosahuje nejlepšího efektu rozvlákňování, vlákno si plně zachovává pevnost a délku vlákna sběrového papíru, takže výtěžnost buničiny je výrazně zlepšena [15].

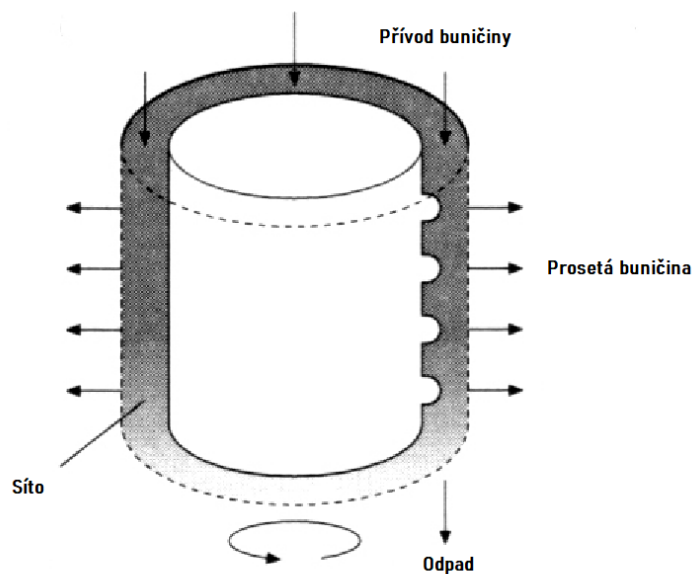


Obrázek 12- schéma: Bubnový rozvlákňovač [16]

### 3.1.3 Čištění větších částic

V této části, kaše neboli buničina prochází řadou sít s různými otvory, aby se odstranily větší nečistoty, jako jsou kancelářské sponky, svorky, pásky a plastové fólie, které byly obsaženy ve sběrovém papíru [10]. Sponky a svorky se mohou také odstraňovat magnetickou cestou [9].

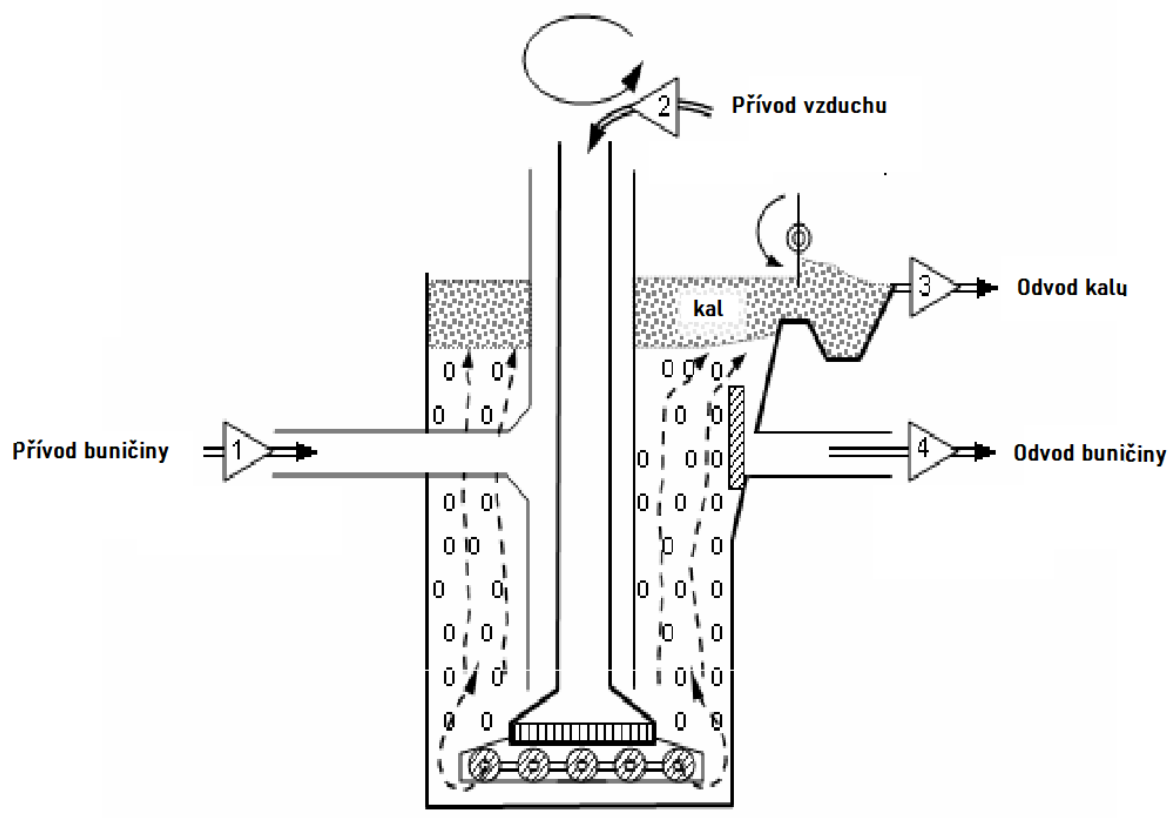
Používají se různé druhy sít podle zvoleného procesu: tlakové síto, odstředivé síto a vibrační síto.



Obrázek 13- Schéma odstředivého síta [23]

### 3.1.4 Flotace (Deinking) - Odbarvování

Tato fáze nenastává vždy. Závisí na zpracovávaném druhu papíru a používá se tam, kde je na papíře nějaký inkoust. Flotací se zajistí odstranění tiskového inkoustu a lepidel [11]. Po odstranění větších nečistot se buničina přidá do flotační nádrže. Zde se využijí vzduchové bubliny k odstranění částic inkoustu. Inkoust a další částice se přilepí na vzduchové bubliny. Poté vyplavou nahoru, odkud je můžeme odstranit [10]. Používají se 3, 4 nebo 5 flotační články v sérii [14].



Obrázek 14- Schéma Flotačního článku [13]

### 3.1.5 Bělení

Jestliže je požadován produkt bílé barvy, mohou být pro další zvýšení bělosti přidána další bělicí činidla a peroxid vodíku.. Tento krok nepřetržitě bělí buničinu, dokud není připravena pro konečnou fázi zpracování. Někdy se přidávají barviva, aby se vytvořily barevné produkty, a v některých případech se přidá malé množství modrého a černého barviva, aby se vytvořil zářivě bílý tiskový papír . Hnědá papírová hmota, jako je například papírová hmota používaná k výrobě papírových utěrek, lepenek a kartonů se nebílí [10].

Buničina, kterou v této fázi tvoří 99 procent vody a jedno procento vlákniny, může být kombinována s buničinou vyrobenou z nových materiálů, aby se zlepšily její vlastnosti, a poté je přečerpána do papírenského stroje [10].



## 3.2 Čerpání papírové hmoty (buničiny) v průmyslu

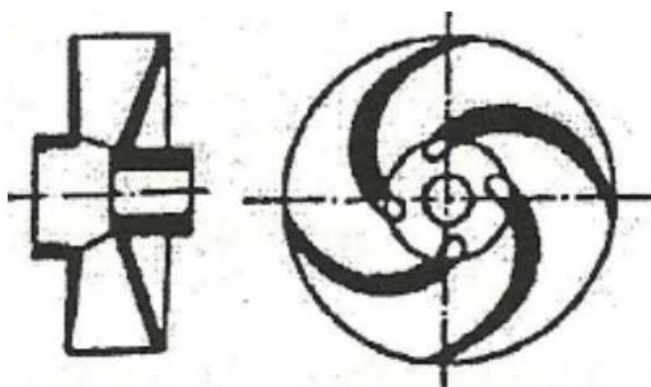
Čerpání papíru a buničiny může být docela náročný proces, protože surový materiál je extrémně náročný na přenos. Kromě toho se k získání požadované kvality konečného produktu používá řada chemikálií. Přenos buničiny je neustálý proces v papírenském průmyslu. V několika fázích výroby papíru je potřeba kaši buničiny přepravovat z jednoho místa na druhé. Tato suspenze je často extrémně viskózní, těžká a abrazivní, což vyžaduje čerpadlo postavené tak, aby odolalo ucpávání, vysokému obsahu pevných látek a korozivnímu prostředí [25].

### 3.2.1 Odstředivá kalová čerpadla

Buničina se může skládat z velkého množství recyklovaného papíru a vzduchu, a proto jsou odstředivá čerpadla navržena s velkými vůlemi, které umožňují průchod takové pevné látky. Odstředivá čerpadla slouží pro velké průtoky (cca 1500 m<sup>3</sup>/h) a menší koncentrace (do 6%) [32].

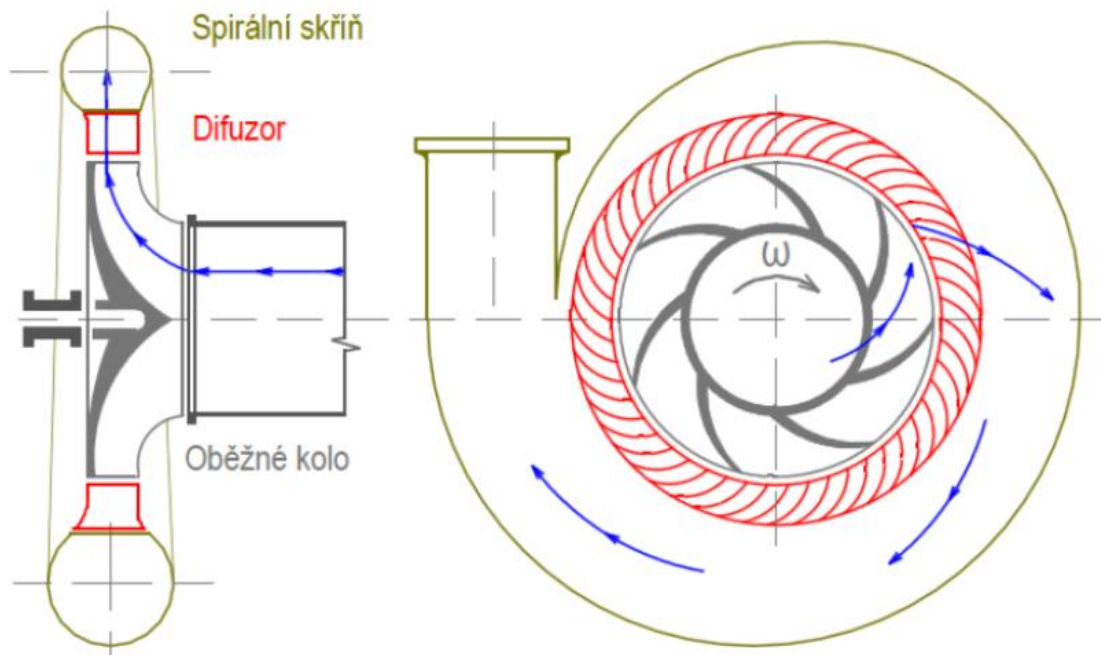
Oběžná kola jsou hlavní rotační součásti, která předává energii dopravované kapalině pomocí lopatek.

Lopatky oběžného kola kalového čerpadla musí být silnější než lopatky klasického vodního čerpadla. Kvůli této tloušťce musí být na kole méně lopatek (3÷6), jinak by byl průchod pro čerpané látky příliš úzký, a to by mělo negativní vliv na výkon a průchodnost čerpadla. Toto vede ke snížení čerpací výšky a účinnosti [30].



Obrázek 15- Oběžné kolo kalového čerpadla pro papírovinu [30]



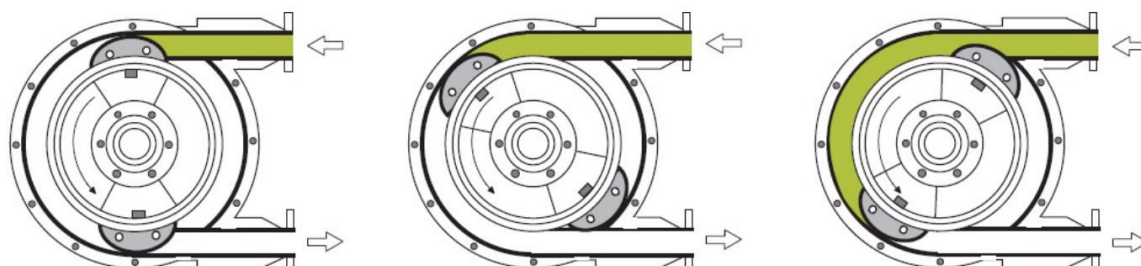


Obrázek 16- Schéma proudění kapaliny v odstředivém čerpadle [33]

### 3.2.2 Peristaltická čerpadla

Čerpadla jsou vhodná pro malé objemové průtoky (až 45 m<sup>3</sup>/h), kde chceme, aby nedocházelo k separaci a pění. Čerpadla udržují přesný, konstantní průtok. Čerpaná kapalina prochází celou dobu hadicí, takže nepřijde do kontaktu s ventily nebo mechanickými ucpávkami nebo oběžnými koly. Při údržbě stačí vyměnit jenom hadici, což je velmi rychlý a jednoduchý postup. Čerpadlo funguje jako vlastní zpětný ventil. Čerpadlo taktéž funguje na sucho. Čerpat můžeme kapaliny s až 80% obsahem pevných látek (papírovina 10÷18 %) [26], [27], [28].

Peristaltické čerpadlo pracuje tak že válečky nebo patky peristaltického čerpadla při otáčení stlačují hadici a vytvářejí podtlak, který nasává kapalinu hadicí [29].



Obrázek 17- Schéma fungování peristaltického čerpadla [30]

### 3.2.3 Membránová čerpadla

Tyto typy čerpadel se používají k přepravě kapalin s vysokou, nízkou nebo střední viskozitou a také kapalin s velkým obsahem pevných látek. Membránová čerpadla zvládají řadu agresivních chemikálií, jako jsou kyseliny, protože mohou být navržena s širokou škálou materiálů těla a také membrán. Průtokový objem je až 35 m<sup>3</sup>/h [38].

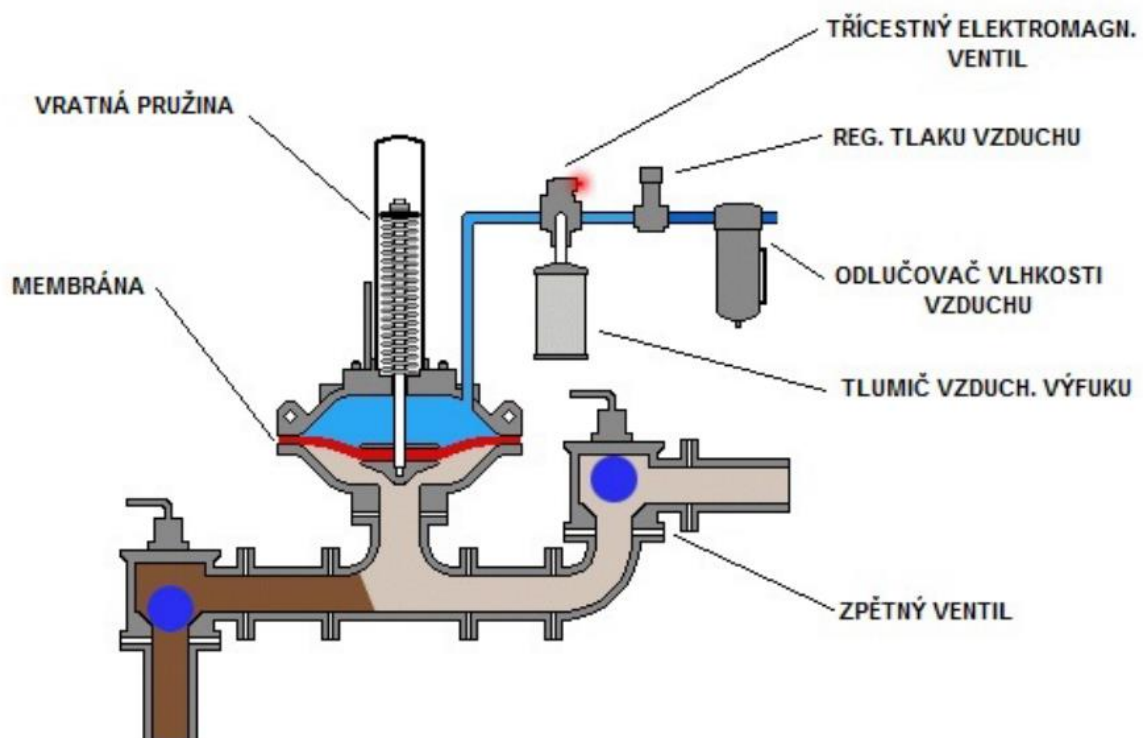
Princip činnosti je založen na střídavém prohýbání membrány. Kapacita membránového čerpadla je dána velikostí zdvihu membrány nebo počtem zdvihů za minutu. Velkou výhodou čerpadel je jejich jednoduchost a především těsnost. Čerpadla pro čerpání kalů jsou poháněna většinou pomocí stlačeného vzduchu. Stlačený vzduch působí na horní část membránové komory, tlačí membránu směrem dolů a vytlačuje dutinu čerpadla. Zpětný ventil na výtlačné straně se zvedá, kapalina vytéká. Poté stlačený vzduch opouští komoru membrány, pružina (nebo vzduchový válec) zvedá píst a dochází ke zvedání membrány. Protože se membrána zvedá, zpětný ventil se na straně sání také zvedá a kapalina proudí do čerpadla. Když píst dosáhne vrcholu, je dutina čerpadla vyplněna a čerpadlo přechází do režimu vyprázdnění [30].

U membránových čerpadel se používají dva druhy zpětných ventilů:

Kuličkový ventil: pro čerpání kapaliny s obsahem pevných částic větším než 15%

kuličkový ventil snáze proniká čerpaným médiem [30]

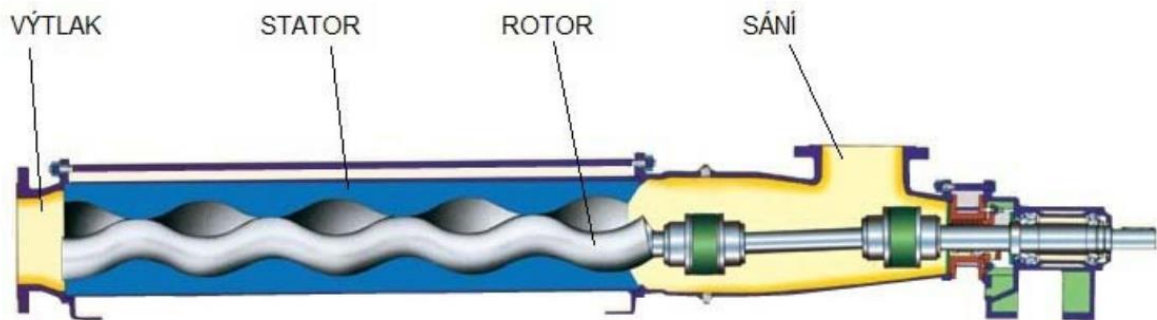
Klapkový ventil: pro čerpání kapalin s obsahem pevných částic pod 15% hranicí [30]



Obrázek 18-Membránové čerpadlo [30]

### 3.2.4 Vřetenová čerpadla

Progresivní dutinová čerpadla pro výrobu papíru jsou cenově výhodnou čerpací alternativou [36]. Vřetenová čerpadla mohou čerpat s vysokou koncentrací pevných látek až 45 % (papírovina až 20%). A objemový průtok dosahuje okolo 300 m<sup>3</sup>/h záleží na modelu čerpadla [34] [35]. Tato čerpadla dokáží zajistit dopravní výšku až 140 m. Čerpadla produkují přesný průtok na otáčku, což usnadňuje řízení průtoku čerpadla jednoduchou regulací rychlosti čerpadla. Stejně tak lze čerpadla použít, když potřebujete stálý průtok, ale viskozita čerpané kapaliny je proměnlivá. Čerpadlo má rotor rotující uvnitř pouzdra zvaného stator. Rotor je vždy kovový a stator je vyroben z pryžového materiálu. Tekutina je mezi dutinami a rotační pohyb rotoru tlačí tekutinu z jednoho konce na druhý [37].

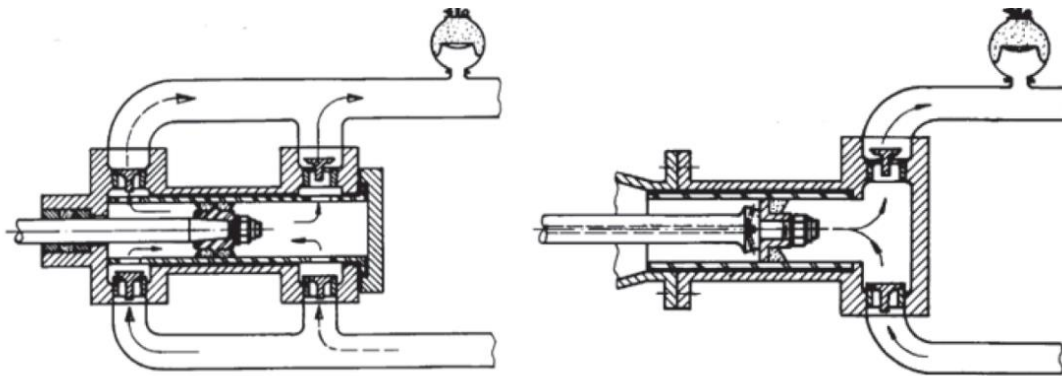


Obrázek 19- Vřetenové čerpadlo [30]

### 3.2.5 Pístová čerpadla

Tato čerpadla jsou dražší než jiné typy objemových čerpadel na dopravu. Čerpadla jsou schopna vytvářet vysoké tlaky za nízkých průtoků. K čerpání se používají dvojčinná a trojčinná pístová čerpadla. Písty dvojčinného čerpadla jsou fázově posunuty o 180° a trojčinného o 120° z důvodu správného seřízení čerpadla. Trojčinná čerpadla mají nižší stupeň pulzace průtoku.

Pístové čerpadlo pracuje tak že pohybem pístu vzniká podtlak a dochází k nasátí určitého objemu čerpaného média do pracovního prostoru čerpadla. Poté dochází k natlakování tohoto objemu a následnému vytlačování mimo čerpadlo. Čerpaný medium se dostává do styku s pístem a pracovním prostorem pístu (což je válec) [30].



Obrázek 20- Schéma dvojčinného a trojičinného pístového čerpadla [30]

## 4 Reologie

Reologie je materiálová věda, která se zabývá chováním látek (kapalných i pevných), které jsou schopny za daných podmínek téct. Tato disciplína zkoumá deformační vlastnosti látek, kterou jsou vystaveny působení vnějších sil – především závislosti deformace a napětí.

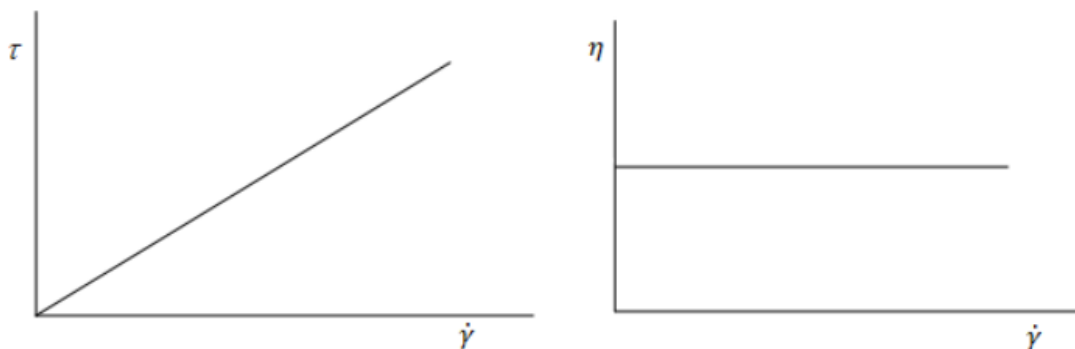
Kapaliny dělíme nejen na reálné a ideální, ale také na newtonské a neneutonské, jestli jsou v souladu s Newtonovým zákonem. U newtonských látek je viskozita při dané teplotě a tlaku konstantní. Naopak u neneutonských kapalin, které jsou reologicky složitější, viskozita není konstantní [42].

### 4.1 Newtonské kapaliny

Newtonské kapaliny jsou látky (např. voda), jejichž reologické chování lze popsat Newtonovým zákonem viskozity:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

Kde  $\eta$  je dynamická viskozita charakterizuje vnitřní tření newtonské tekutiny a má jednotku Pa·s. Tato látková charakteristika je závislá na teplotě a tlaku. U kapalných látek viskozita klesá s teplotou, naopak u plynných látek s teplotou roste [42].



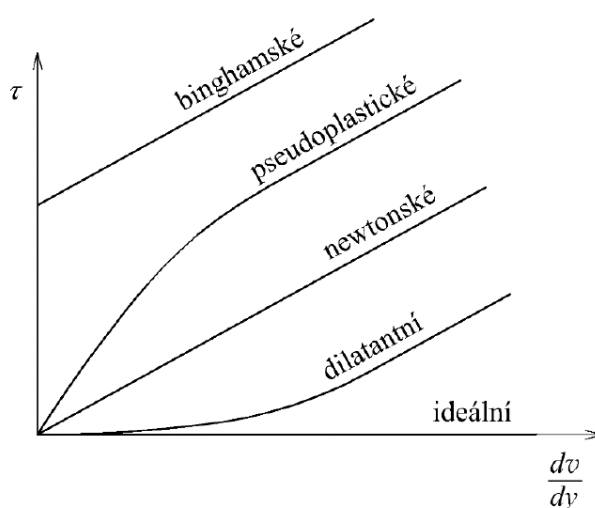
Obrázek 21-Toková křivka (vlevo) a viskozitní křivka (vpravo) newtonských kapalin [42]

Mimo dynamickou viskozitu se používá také viskozita kinematická. Kinematická viskozita  $\nu$  je vyjádřena podílem dynamické viskozity  $\eta$  a hustoty kapaliny  $\rho$ . Tato viskozita je udávána v  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  a využívá se např. při popisu hydrodynamiky kapalin [42].

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

## 4.2 Nenewtonské kapaliny

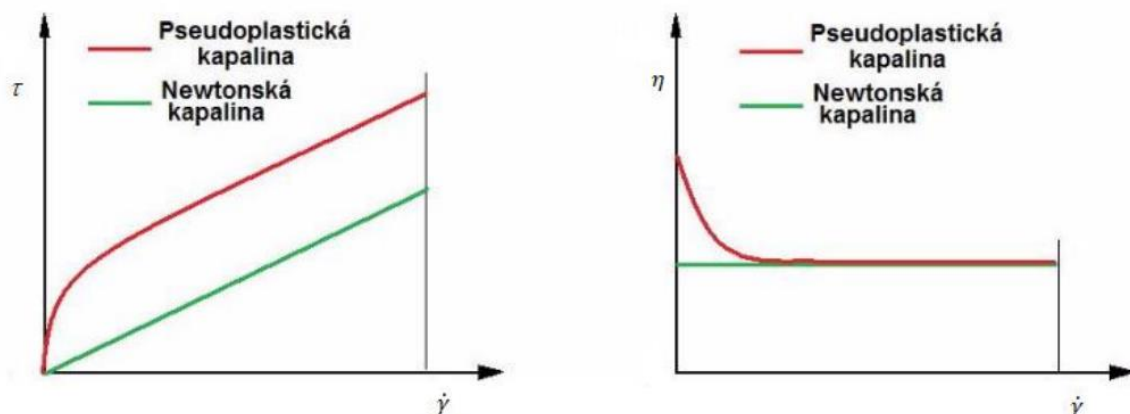
Nenewtonské kapaliny jsou takové látky, které se neřídí Newtonovým zákonem viskozity. Pro nenewtonské kapaliny platí rovnice totožná s Newtonovým zákonem, kde  $\eta$  je, avšak zdánlivá viskozita, která je závislá na tečném napětí nebo rychlosti deformace. Nenewtonské chování také nastává, pokud při proudění kapaliny dojde v důsledku toku ke změně vnitřní struktury. Nenewtonské kapaliny se podle tokového chování zpravidla dělí na pseudoplastické, dilatantní a plastické (binghamské) kapaliny – viz obr. 43 [42].



Obrázek 22-Reogramy nenewtonských látek [43]

## 4.2.1 Pseudoplastické kapaliny

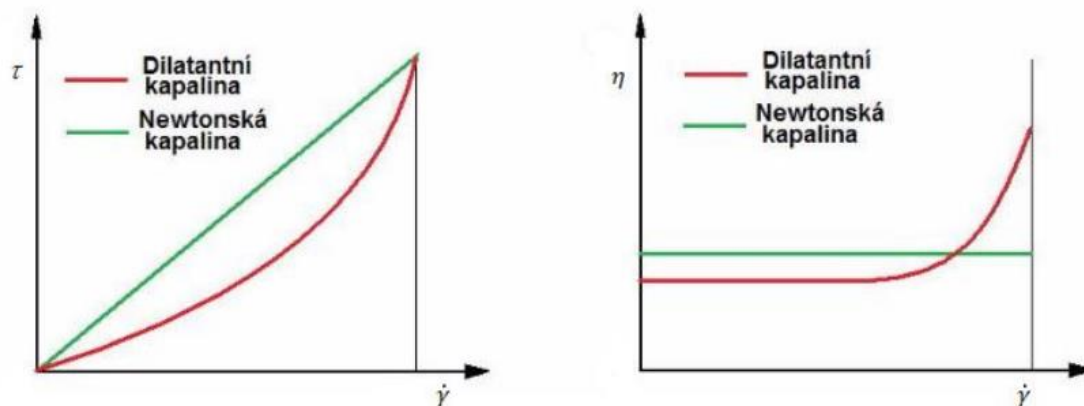
Pseudoplastické látky jsou charakterizovány poklesem zdánlivé viskozity s rostoucím gradientem smykové rychlosti. Při jakémkoliv napětí tečou, proto nevykazují žádnou mez toku. To je důvodem, proč toková křivka prochází počátkem, stejně jako je tomu u látek newtonských [42]. Pseudoplasticitata je technologicky výhodná, protože snižuje energetickou náročnost při míchání a toku kapalin potrubím [44].



Obrázek 23-Toková křivka (vlevo) a viskozitní křivka (vpravo) pseudoplastických kapalin [42]

## 4.2.2 Dilatantní kapaliny

U dilatantních látek zdánlivá viskozita roste se zvyšující se smykovou rychlostí. Tyto kapaliny mají rovněž nulovou mez toku jako kapaliny pseudoplastické. Kapalina se chová jako mazivo mezi částicemi, pokud je smyková rychlost nízká. Naopak pokud je gradient smykové rychlosti vysoký, suspenze se lehce rozšíří – dilatuje [42]. Dilatance je naopak oproti pseudoplasticitě technologicky nevýhodná, protože zvyšuje energetickou náročnost míchání a dalších procesů [44].

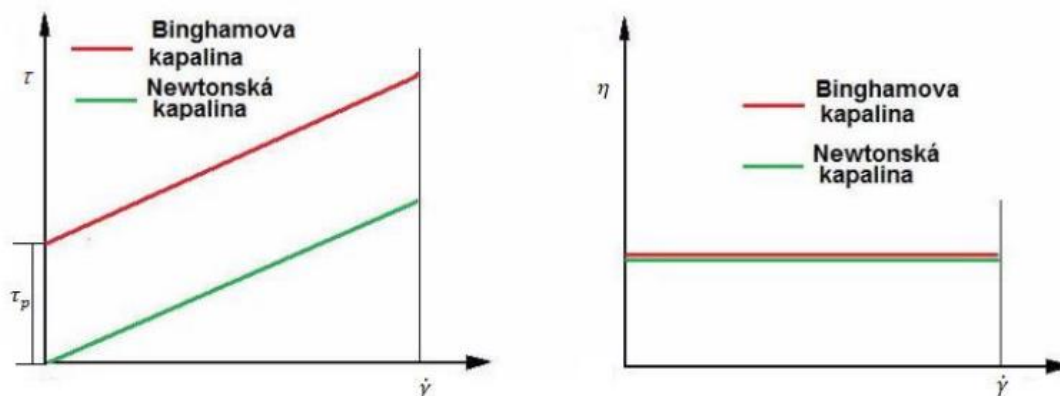


Obrázek 24-Toková křivka (vlevo) a viskozitní křivka (vpravo) dilatantních kapalin [42]



### 4.2.3 Ideálně plastické kapaliny (Binghamovy kapaliny)

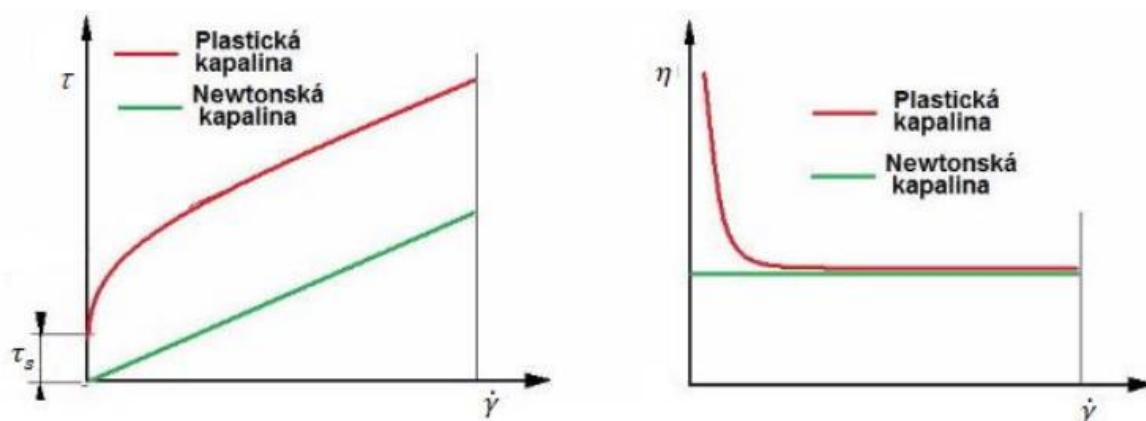
Binghamovy kapaliny jsou v klidném stavu charakteristické trojrozměrnou strukturou, která je svojí tuhostí schopna odolávat napětí, které je menší než tzv. počáteční smykové napětí  $\tau_p$ . Toto napětí je nazýváno jako dynamická mez toku. Po dosažení dynamické meze toku se původní struktura rozpadá a látka se chová jako newtonská kapalina [42].



Obrázek 25- Toková křivka (vlevo) a viskozitní křivka (vpravo) ideálně plastických kapalin [42]

### 4.2.4 Skutečné plastické kapaliny

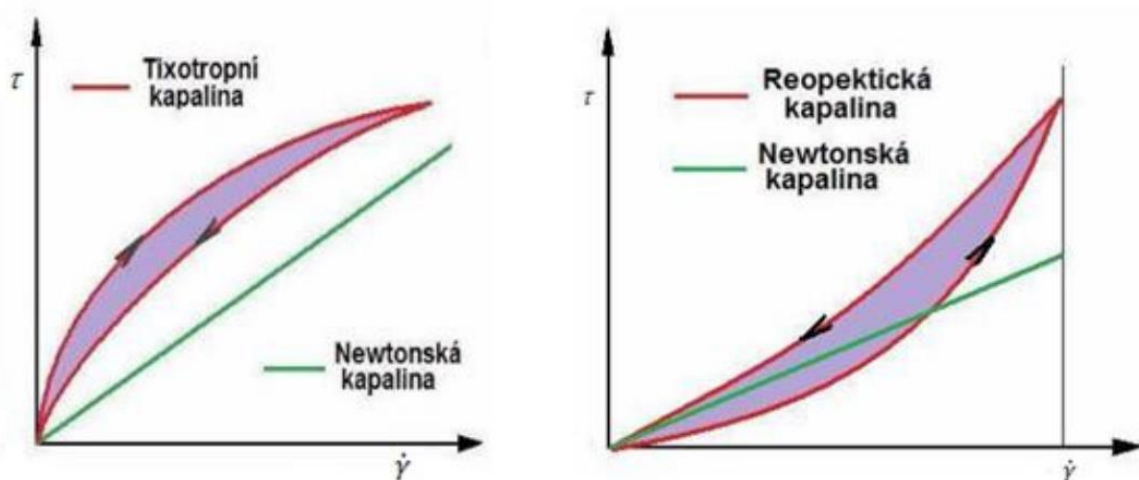
Skutečné plastické kapaliny mají v klidovém stavu trojrozměrnou strukturu, která má schopnost odolávat napětí, které je menší než napětí na mezi deformace  $\tau_s$ . Toto napětí se nazývá počáteční napětí nebo také statická mez toku. Při získání počátečního napětí je struktura rozrušena a kapalina teče jako newtonská kapalina. Při malých smykových rychlostech se stává, že přímka není lineární, protože skutečné napětí na mezi deformace  $\tau_s$  je menší než u ideální kapaliny [42].



Obrázek 26-7 Toková křivka (vlevo) a viskozitní křivka (vpravo) skutečných plastických [42]

## 4.2.5 Tixotropie a reopexie

Vlivem deformace dochází u neneutonských látek ke změně struktury, to má vliv na makroskopické chování tekutiny. Tixotropní kapaliny jsou takové, kdy zdánlivá viskozita klesá v čase při konstantním tečném napětí. Tixotropní systém vykazují plastické a pseudoplastické kapaliny. Naopak pokud zdánlivá viskozita roste v čase, označujeme kapaliny jako reopektické. Reopektický systém se objevuje u dilatantních kapalin. Pokud jsou kapaliny (platí pro látky tixotropní i reopektické) v klidovém stavu, dochází k obnovení zdánlivé hustoty do původního stavu. Viskozita se do původního stavu nemusí úplně vrátit, pokud v kapalině došlo díky deformaci k mechanickému poškození molekul [42].



Obrázek 27-Závislost smykového napětí na smykové rychlosti pro tixotropní tekutinu (vlevo) [42]

## 4.3 Reologické modely

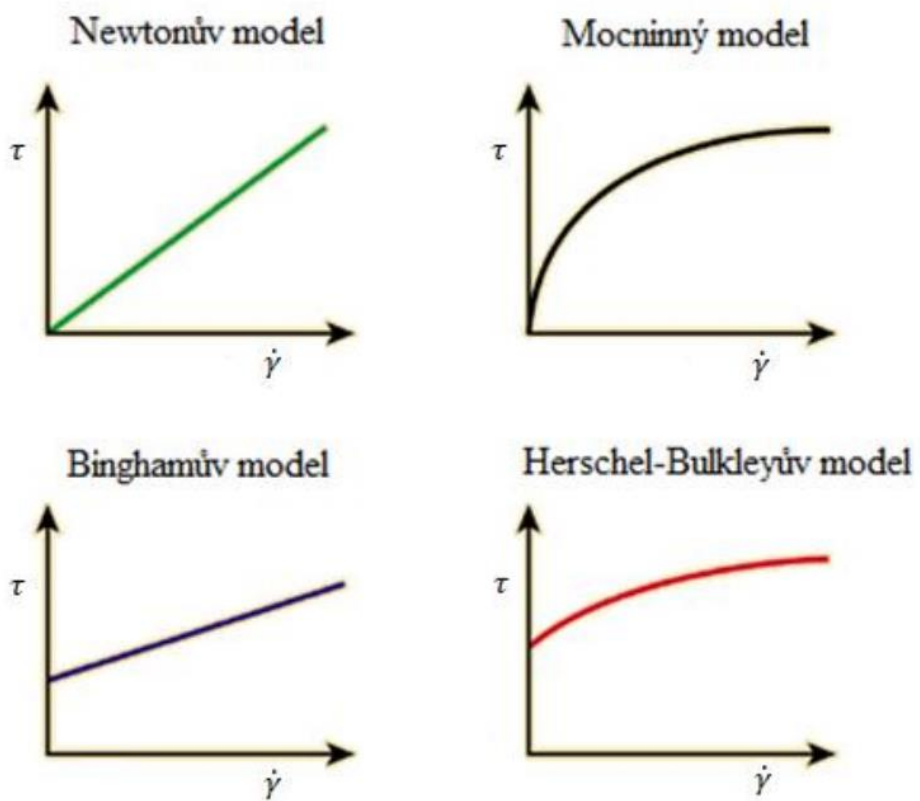
Reologické chování látek lze popsat několika následujícími reologickými modely. Jsou to vztahy mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí. Binghamův model vyjadřuje chování viskoplastických látek. Pomocí modelu Oswald de Waele, který se nazývá také jako Power law, nebo-li mocninový model, lze popsat látky dilatantní a pseudoplastické. Pokud je index tokového chování  $m$  větší než 1, látka je dilatantní a pokud je index tokového chování naopak menší než 1, jedná o látku pseudoplastickou. V případě, že je index tokového chování roven 1, přechází tento vztah na Newtonův zákon. Model Herschel - Bulkley oba předchozí modely kombinuje a slouží k popisu plastických látek. Cassonovým modelem lze také popsat chování viskoplastických látek. Používá se také k charakterizaci disperzních soustav v potravinách a také k charakterizaci tokových vlastností čokolád. Reologickým modelem Ellis lze také popsat chování neneutonských



kapalin. Pokud je podíl  $\frac{\tau}{\tau_{0,5}}$  větší než 1, lze tento model zjednodušit na model Oswald de Waele [44].

Tabulka 1-Přehled reologických modelů [44]

Název modelu	Model	Legenda
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_a \cdot \gamma$	$\tau$ – smykové napětí $\tau_0$ – mez toku $\eta_a$ – zdánlivá viskozita $\gamma$ – smyková rychlost
Oswald de Waele (mocninový)	$\tau = K \cdot \gamma^m$	$\tau$ – smykové napětí $K$ – koeficient konzistence $\gamma$ – smyková rychlost $m$ – index toku $m > 1$ – dilatantní $m < 1$ – pseudoplastická
Herschel - Bulkley	$\tau = \tau_0 + \eta_a \cdot \gamma^m$	$\tau$ – smykové napětí $\tau_0$ – mez toku $\eta_a$ – zdánlivá viskozita $\gamma$ – smyková rychlost $m$ – index toku
Casson	$\tau^{0,5} = \tau_0 + \eta \cdot \gamma^{0,5}$	$\tau$ – smykové napětí $\tau_0$ – mez toku $\eta$ – viskozita $\gamma$ – smyková rychlost
Ellis	$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\tau}{\tau_{0,5}}\right)^{\alpha-1}}$	$\eta$ – viskozita $\eta_0$ – počáteční viskozita $\tau$ – smykové napětí $\tau_{0,5}$ – smykové napětí vyjádřeno jako $\frac{\eta_0}{2}$ $\alpha$ – parametr



Obrázek 28-Grafické zobrazení vybraných reologických modelů [42]

## **4.4 Reologické vlastnosti suspenzí buničiny**

Tok vláknitých suspenzí je klíčovým faktorem při výrobě rozmanité řady produktů, například vláknem vyztužených kompozitů, potravin, koberců a textilií. Žádné z těchto průmyslových odvětví není větší než výroba celulózy a papíru. Jedná se o hlavní průmysl téměř ve všech zemích, které vyrábí kancelářské papíry, obaly, krabice, papírové kapesníky, hygienické výrobky a sortiment výrobků na jedno použití. Vlákno pro tento průmysl pochází z rozvlákňování biomasy, v moderní době většinou stromů [39].

Rostoucí světová populace vyžaduje, aby více energie a produktů pocházelo z obnovitelných zdrojů a navíc z těch, které nezasahují do dodávek potravin. Lesní biomasa je logickým zdrojem. Stejně jako v případě buničiny a papíru bude zpracování biomasy pro tyto nové aplikace vyžadovat manipulaci s vlákny v suspenzi v různých fázích zpracování [39].

### **4.4.1 Vlastnosti vláken a rozsahy konzistence**

Vlákna dřevní buničiny jsou duté trubičky s typickou průměrnou délkou 1–3 mm a průměrem 15–30  $\mu\text{m}$ . Kolem těchto průměrů existuje široká variabilita, a to i v rámci jednoho druhu. V souladu s tím je délka vlákna specifikována různými váženými průměry, typickým je vážený průměr délky vlákna, aby byla dána váha delším vláknům v distribuci [39].

Suspenze buničinových vláken se zpracovávají v různých rozmezech podle hmotnostní koncentrace (hmotnost vláken dělená celkovou hmotností suspenze). Kerekes a kol. [39] klasifikoval rozsahy následovně: nízká konzistence (0–8 %), střední konzistence (8–20 %) a vysoká konzistence (20–40 %). Při nízké konzistenci je suspenze dvoufázová kaše, která se při střední a vyšší konzistenci mění na třífázovou heterogenní směs vody, vláken a vzduchu. Při vyšším obsahu plynu, je vhodné použít místo hmotnostní konzistence objemovou koncentraci. Všechny výše uvedené rozsahy konzistence se nacházejí v procesech výroby buničiny a papíru [39].

### **4.4.2 Vlákňové kontakty a síly**

Velký poměr stran vláken buničiny (40–100) vyvolává významný kontakt mezi vlákny při všech konzistencích. To má silný vliv na reologii suspenze. V oblasti nízké konzistence se s rostoucí konzistencí mění povaha kontaktů od příležitostných kolizí, přes nucené kontakty až po nepřetržitý kontakt. Tyto kontaktní režimy byly popsány shlukovým číslem  $N$ , definovaným jako počet vláken v objemu namotaných délkou jednoho vlákna. Tento parametr lze vyjádřit jako objemovou koncentraci  $C_v$ , délkou vlákna  $L$  a průměru  $d$ . Vlákna buničiny mají rozdílnou délku vláken, různé průměry a jako všechny lignocelulózové materiály mají tendenci bobtnat ve vodě. V souladu s tím je pro výpočet počtu vláken a tímto  $N$ , vhodnější hmotnost než objem. Kerekes a Schell [39]

poskytují pro tento výpočet níže uvedený hmotnostní výraz. V této rovnici je  $L$  délkou vážená průměrná délka vláken buničiny (m);  $C_m$  je hmotnostní konzistence (%) a  $\omega$  je hrubost vlákna (hmotnost na jednotku délky vlákna, kg/m). Posledně jmenovaná vlastnost je běžně měřená vlastnost buničिनových vláken. Podle toho má konstanta jednotky kg/ m<sup>3</sup> [39].

$$N \approx 5 \cdot C_m \cdot \frac{L^2}{\omega} \quad (3)$$

V raných pracích Mason [39] identifikoval  $N = 1$  jako „kritickou koncentraci“, při které poprvé dochází ke srážkám mezi vlákny ve smykovém proudění. V pozdější práci Soszynski a Kerekes [39] a Kerekes a Schell [39] ukázali, že při  $N \approx 60$  mají vláknité suspenze asi tři kontakty na vlákno. To je kritická hodnota, protože vlákna jsou omezena třibodovým kontaktem. Po ukončení smykového proudění se vlákna zablokují v síti v ohnuté konfiguraci. Toto elastické ohýbání vytváří normálové síly na kontaktech, a výsledná třecí síla dodává síti mechanickou pevnost. V pozdější práci Martinez et al. [39] identifikovali další kritickou hodnotu  $N$ ,  $N \approx 16$  a nazvali ji „číslem shlukování gelu“. Pod touto hodnotou se suspenze chová jako v podstatě zředěná. V nedávné práci se ukázalo, že limity  $N= 16$  a  $60$  odpovídají „prahu konektivity“ a „prahu tuhosti“ optických sítí [39].

#### 4.4.3 Síly na vlákna a flokulace

Flokulace je v oblasti chemie proces, při kterém částice vycházejí ze suspenze a sedimentují ve formě vloček.

Kromě třecích sil mohou k pevnosti na kontaktech přispívat i další síly, jako jsou síly z chemické flokulace (je v oblasti chemie proces, při kterém částice vycházejí ze suspenze a sedimentují ve formě vloček), hákování zakřivených vláken a povrchové napětí, když je obsah vzduchu značný ( Kerekes et al., [39] ). Tyto síly dodávají vláknovým sítím mechanickou pevnost [39].

Při smykovém toku se vlákna shlukují do lokálních hmotnostních koncentrací nazývaných vločky, které mají obvykle velikost několika délek vláken. Když  $N < 60$ , vločky jsou volné agregáty, ale když  $N > 60$ , vločky získají mechanickou pevnost. Jejich velikost a síla jsou ovlivněny podmínkami proudění, například historií smykového proudění, jako je použití čerpadel nebo míchadel. Vločky, které mají vyšší koncentraci, než je průměr suspenze, mají také větší pevnost, než je průměr suspenze. V důsledku toho jsou vláknité suspenze heterogenní jak z hlediska hmotnosti, tak pevnosti, což je důležitý faktor v reologii buničiny [39].

Stručně řečeno, vláknité suspenze vykazují velký rozsah chování, od zředěných suspenzí přes heterogenní dvoufázové suspenze až po třífázové směsi mokřých vláken v plynu. Při průmyslové

výrobě papíru se suspenze buničiny formují na papír filtrací v rozsahu  $16 < N < 60$ , aby se minimalizovala jak spotřeba vody, tak flokulace [39].

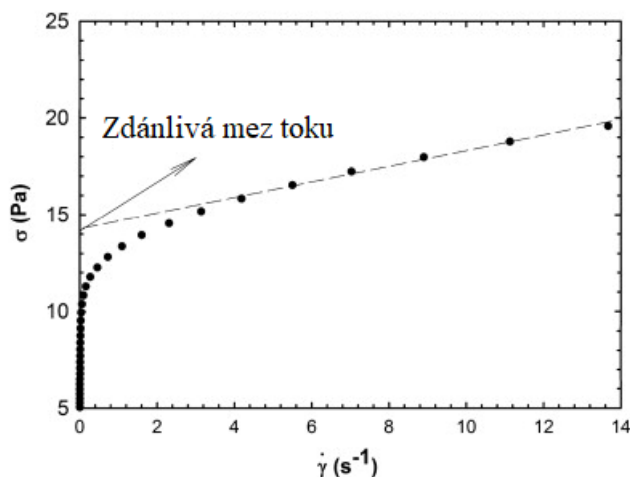
#### **4.4.4 Reologie vláknitých suspenzí**

Výše popsané složitosti činí reologii suspenzí buničiny složitou. Suspenzi často nelze považovat za kontinuum, protože vlákna a vločky jsou velké vzhledem k rozměrům proudového pole. Jak historie smykového proudění, tak čas v daném smykovém toku mohou způsobit, že velikost vloček a pevnost se budou mezi suspenzemi lišit, i když jsou průměry suspenze stejné. Orientace vláken a migrace od pevných hranic vytváří ochuzenou vrstvu v blízkosti stěn, což komplikuje reologická měření. Vzhledem k těmto faktorům a faktorům popsaným dříve není překvapivé, že definování a měření reologických vlastností vláknitých suspenzí je složité [39].

#### **4.4.5 Zdánlivá mez toku**

Mez toku je pravděpodobně nejdůležitější reologická vlastnost vláknitých suspenzí. Pokud není překročena, proudění neprobíhá. Jako reologická vlastnost má mez toku různé definice a způsoby měření. V jednoduchém případě Binghamovy tekutiny je to napětí potřebné k zahájení nepřetržitého pohybu ve formě newtonovského proudění. Neneutonské tekutiny však často nevykazují žádné jasné ohraničení, jaké se nachází v Binghamově tekutině. Existuje určitá kontroverze ohledně toho, zda je mez toku skutečnou vlastností materiálu. V souladu s tím je běžné definovat „zdánlivou mez toku“. Existuje několik přístupů, jak jí dosáhnout, které jsou relevantní pro vláknité suspenze např.:

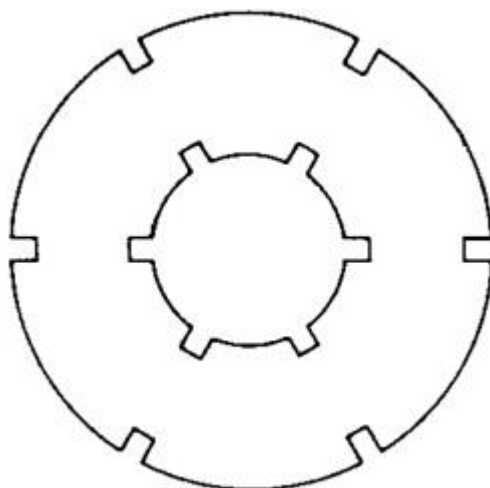
„Zjevné napětí pro zahájení toku“: Toto zdánlivé napětí je průsečík získaný extrapolací smykového napětí na nulovou rychlost smykové deformace, obvykle z lineární části křivky smykové napětí-rychlost smykové deformace [39].



Obrázek 29-Ukázka vyhodnocení zdánlivé meze toku [39]

#### 4.4.6 Zařízení s lopatkovou geometrií

Dalším přístupem k měření zdánlivého napětí na mezi toku je použití lopatkových rotorů ve skříních s přepážkami [39].



Obrázek 30-Lopatka v přepážkovém pouzdru, zařízení používané ke studiu suspenzí buničiny [39]

Head [39], Thalen a Wahren [39], Thalen a Wahren [39], Duffy a Titchener [39], Gullichsen a Harkonen [39], Bennington a kol. [39], Ein-Mozaffari a kol. [39] a Dalpke a Kerekes [39] použili zařízení s lopatkovou geometrií k měření zdánlivé meze toku suspenzí buničiny. Aplikovali rostoucí napětí na rotor a uvedli zdánlivou mez toku jako maximální napětí, potřebné dodat suspenzi k začátku kontinuálního pohybu [39].

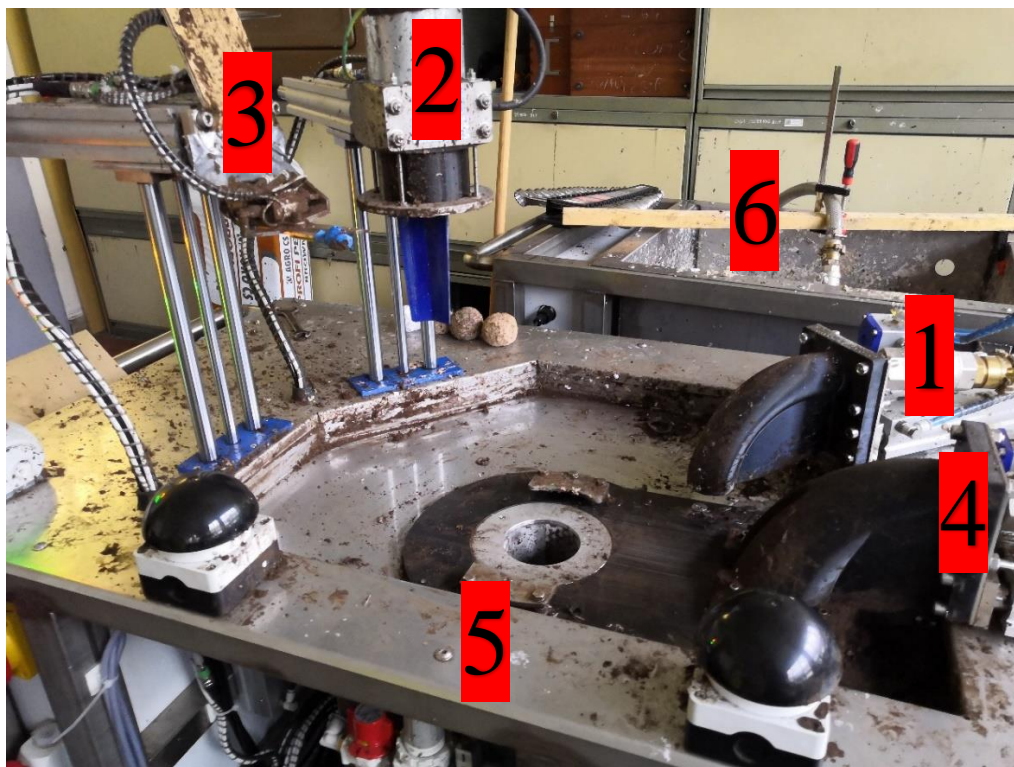
## 5 Experimentální část

Tato část se zaměřuje na tvorbu kelímků na automatickém stroji pro výrobu sazenic (obalovačka), z různých druhů sběrového papíru, následuje testování a vyhodnocování těchto kelímků. U různých druhů papírové vlákniny, která byla použita pro tvorbu kelímků, změříme reologické vlastnosti.

### 5.1 Charakteristika a popis automatického stroje na výrobu sazenic

Automatický stroj na výrobu sazenic pracuje tak, že je nejprve vytvořen kelímek z papírové vlákniny. Do takto vyrobeného kelímku je v dalším kroku vložena sazenice. V posledním kroku je do kelímku vpraven substrát. Sestavení pracovní části automatického stroje je uvedeno na obrázku 31.

Kelímek je vytvořen z papírové vlákniny, která byla předem připravena (přípravě papírové vlákniny je věnována následující kapitola 5.2), ta je umístěna v zásobníku (6), z něho je čerpána pomocí vřetenového čerpadla do formy kelímků. Forma kelímku (5) je tvořena kovovým sítem pro odstranění přebytečné vody a ve spodní části obsahuje vyhazovací dno pro pozdější vysunutí hotového výrobku. Forma je umístěna v podtlakové komoře, která je odsávána pomocí vývěvy za účelem odvodnění papírové vlákniny a substrátu. Mezi podtlakovou komorou a vývěvou je vřazen odlučovač vody s nádrží pro sběr odsáté vody. Po načerpání papírové vlákniny do formy hubicí (1), utvářeč (rozmetadlo) (2) papírovou vlákninu za současného odsávání komory, v níž je forma vložena, vytvaruje ve formě do podoby kelímku. Poté je manipulátorem (3) do kelímku vsazena sazenice. Následuje přívod substrátu pomocí hubice (4), který je čerpán vřetenovým čerpadlem ze zásobníku substrátu. Během přívodu substrátu je opět v činnosti odsávání komory formy za účelem lepšího plnění kelímku substrátem a odsátí přebytečné vody vnesené substrátem. Dochází tak k finálnímu "dosušení" kelímku, kdy kelímek získává požadovanou pevnost. V posledním kroku je kelímek odlepen od stěny formy pomocí proudu stlačeného vzduchu a ihned vyjede dno formy na kterém je hotový kelímek.



*Obrázek 31-Automatický stroj pro výrobu sazenic*

- 1- Výtok papírové vlákniny
- 2- Utvářeč kelímku (rozmetadlo)
- 3- Podavač sazenic
- 4- Výtok substrátu
- 5- Forma na kelímek
- 6- Zásobník na papírovou vlákninu

## **5.2 Příprava papírové vlákniny**

Sběrový papír byl pro snadnější rozvláknění nejprve rozdružen (natrhán) na menší kousky. Pro tento účel byla použita kartonová střiž (v případě kartonové lepenky), kancelářská skartovačka (kancelářský papír), nebo střižný mlýn SM 300 (ostatní druhy papíru) - obr. 32 a 33. Pro předúpravu na nožovém drtiči SM 300 byla volena největší dostupná velikost síta a otáčky nože 800 ot./min. Ukázka předupraveného papíru pomocí střižného mlýnu je na obrázku 34.

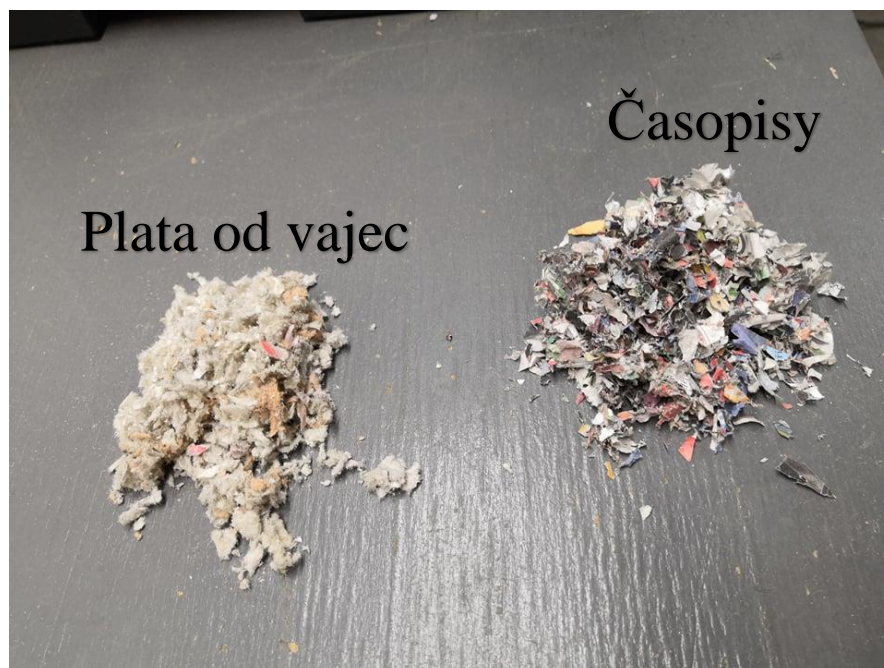




Obrázek 32- Střížný mlýn SM 300



Obrázek 33-Detail pracovního prostoru střížného mlýnu.



*Obrázek 34-Příklady struktury sběrového papíru z výstupu mlýnu*

Rozdružený suchý sběrový papír byl nejprve navážen a doplněn naváženým množstvím vody na požadovanou koncentraci papírové vlákniny (5, 10, 12,5 % hm.). Pro jednodušší rozvláknění se připravený papír nechal v záměsové vodě cca 30 minut macerovat. Takto připravená surovina byla následně rozvlákněna v míchané nádobě s plochým dnem o průměru 300 mm s použitím rychloběžného čtyřlopatkového míchadla s rovnými lomenými lopatkami o průměru 165 mm (obr. 35 a 36), při 450 ot./min pro rozvláknění a následně homogenizována při 750 - 1000 ot./min po dobu 10 minut (obr. 37 a 38). Dosáhneme struktury viz Obr. 39,40.



*Obrázek 35-Použité čtyřlopatkové míchadlo rovnými lomenými lopatkami 1*



*Obrázek 36-Použité čtyřlopatkové míchadlo s rovnými lomenými lopatkami 2*





Obrázek 37- Míchací zařízení 1



Obrázek 38- Míchací zařízení 2



Obrázek 39- Novinový papír s koncentrací 5 % hm



Obrázek 40- Karton s koncentrací 10 % hm.



### 5.3 Výroba kelímků a následné testování

Protože se předpokládá pro výrobu sazenic na automatickém stroji používat sběrový papír, který je většinou tvořen směsí různých druhů papíru, byla za tímto účelem připravena papírová vláknina z různých druhů papíru.

Byly připraveny následující vzorky papírové vlákniny v uvedených koncentracích (hm.) papíru ve vodě:

- Kartonová lepenka 5, 10, 12,5 % hm.
- Kancelářský papír 10 % hm.
- Novinový papír 10 % hm.
- Časopisy a reklamní letáky 10 % hm.
- Plata od vajec 10 % hm.
- Karton + piliny (poměru 1:2:4 - piliny-karton-voda)
- Karton + časopisy a reklamní letáky + plata od vajec + kancelářský papír (v poměru 1:1:1:1), 10 % hm.

Připravená papírová vláknina byla do obalovacího stroje dávkována manuálně a byla vyrobena ověřovací série 8 až 10 sazenic velikosti (D/d/h) 75/62/130 mm. Bylo tedy provedeno následující experimentální hodnocení:

- Schopnost obalovacího stroje utvořit papírový kelímek;
- průběh výroby sazenice na obalovacím stroji;
- uvolnění a vyhození kelímku z formy;
- subjektivní hodnocení vzhledu a konzistence produktu po vyhození z formy obalovacího stroje;
- mechanické testy produktu po jeho vysušení (tvrdost a pevnost).



Obrázek 41-struktura 5% koncentrace kartonu



Obrázek 42-struktura 10% koncentrace kartonu



Obrázek 43- struktura 12,5 % koncentrace kartonu <sup>1</sup>



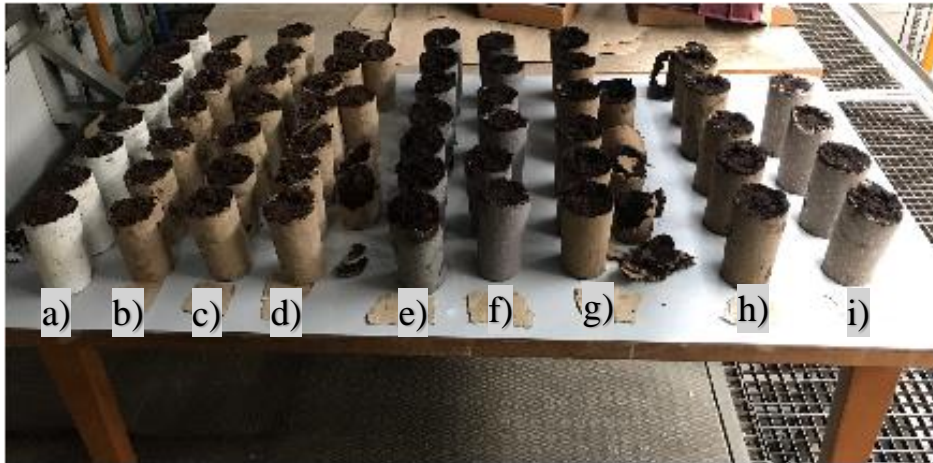
Obrázek 44-Kelímek z kartonové stříže z  
hnědé papírové lepenky



Obrázek 45-Kelímek z kancelářského papíru

<sup>1</sup> Na štítku je uvedena chybná hodnota koncentrace 15 %, vlákninu o této koncentraci nebylo možné na míchací stanici rozvláknit. Pro rozvláknění byla doplněna voda na finální koncentraci 12,5 % hm.





*Obrázek 46-Testovací série vyrobených produktů z různých druhů papírové vlákniny: a) kancelářský bělený papír; b) karton 10 % sušiny; c) karton 5 % sušiny; d) karton 12,5 % sušiny; e) časopisy; f) novinový papír; g) recyklovaná vláknina (plata od vajíčků); h) karton s bukovými pilinami; i) směs karton (10 %), kancelářský papír, časopisy a plata od vajíčků*

### **5.3.1 Vyhodnocení testu papírové vlákniny na automatickém stroji**

#### **5.3.1.1 Vliv koncentrace papírové vlákniny**

V případě papírové vlákniny byly připraveny a testovány následující koncentrace papíru ve vodě:

- Koncentrace nízká – 5 % papírové sušiny ve vodě.
- Koncentrace střední – 10 % papírové sušiny ve vodě.
- Koncentrace vysoká – 12,5 % papírové sušiny ve vodě.

Nebylo možné připravit papírovou vlákninu o koncentraci vyšší, než 12,5 % - docházelo již k velkému zatížení motoru a velmi špatnému rozvláknění papírové hmoty. I v obalovacím stroji se jevila vysoká koncentrace papírové sušiny 12,5 % jako limitní.

Obalovací stroj si dokázal bez větších problémů poradit i s poměrně nízkou koncentrací papírové vlákniny (přibližně kolem 5 % obsahu papírové sušiny), nicméně bylo nutné adekvátně zvýšit dávku papírové vlákniny a prodloužit čas odsávání vody z formy stroje.

Jako optimální z hlediska času odsávání i chování vlákniny během výroby papírového kelímku se nejlépe osvědčila střední koncentrace, tzn. vláknina připravená z 10% podílu papírové sušiny ve hmotě.

Během testování na obalovacím stroji bylo potvrzeno, že podíl vody ve vláknině nemá příliš zásadní vliv na schopnost stroje vyrobit kvalitní papírový kelímek. Nízko koncentrovaná vláknina ale vyžaduje navýšení dávky a prodloužení doby odsávání, odsáváno je více vody a dochází

k rychlejšímu zaplnění odlučovače (nutnost častého vypouštění vody). Naopak u vysoko koncentrované vlákniny již bylo dosahováno limitního krouticího momentu utvářeče kelímku ve formě a samotná vláknina obsahovala více nehomogenit v podobě špatně rozvlákněných částic papíru. Výrazný vliv koncentrace vlákniny na kvalitu vlastního výrobku nebyl zaznamenán.

### 5.3.1.2 Průběh sušiny během výroby sazenice na obalovacím stroji

Stanovení sušiny bylo prováděno standardní metodou sušením v komorové sušárně BINDER při teplotě 105 °C po dobu 24 hodin na základě rozdílu hmotnosti vzorku před sušením a po sušení.

Tabulka 2- Stanovení obsahu sušiny papírové vlákniny (karton 10% koncentrace)

Papírovina							
vzorek	miska	před sušením		po vysušení		vlhkost	sušina
		miska + vzorek	vzorek	miska+vzorek	vzorek m1		
	m <sub>m</sub> [g]	m <sub>0</sub> +m <sub>m</sub> [g]	m <sub>0</sub> [g]	m <sub>1</sub> +m <sub>m</sub> [g]	m <sub>1</sub> [g]	X [%]	S [%]
1	2,5141	11,2604	8,7463	3,5766	1,0625	87,9	12,1
2	2,5122	20,7662	18,254	4,7686	2,2564	87,6	12,4
3	2,5143	14,6654	12,1511	3,9392	1,4249	88,3	11,7
4	2,5116	23,173	20,6614	4,7124	2,2008	89,3	10,7
5	2,5075	14,4618	11,9543	3,7481	1,2406	89,6	10,4
6	2,5003	14,6272	12,1269	3,8293	1,329	89,0	11,0
Datum	2.12.2021				průměr	88,6	11,4
Parametry	105°C / 24 h				sm. Odch.	0,8	0,8

Tabulka 3- Stanovení obsahu sušiny – papírový kelímek po odsátí strojem (bez substrátu)

Papírový kelímek bez rašeliny - z kartonové stříže - ze stroje po odsátí vody strojem							
vzorek	miska	před sušením		po vysušení		vlhkost	sušina
		miska + vzorek	vzorek	miska+vzorek	vzorek m1		
	m <sub>m</sub> [g]	m <sub>0</sub> +m <sub>m</sub> [g]	m <sub>0</sub> [g]	m <sub>1</sub> +m <sub>m</sub> [g]	m <sub>1</sub> [g]	X [%]	S [%]
1	0	110	110	34,2016	34,2016	68,9	31,1
2	0	113,2	113,2	35,4505	35,4505	68,7	31,3
3	0	127	127	38,2114	38,2114	69,9	30,1
4	0	137,2	137,2	40,0346	40,0346	70,8	29,2
5	0	74,4	74,4	21,1754	21,1754	71,5	28,5
6	0	53,9	53,9	16,2222	16,2222	69,9	30,1
Datum	2.12.2021				průměr	70,0	30,0
Parametry	105°C / 24 h				sm. Odch.	1,1	1,1

Z uvedených tabulek je patrné, že v případě papírové vlákniny u testovaného kelímku o rozměrech (D/d/h) 75/62/130 mm vzroste sušina o cca 20 %, stroj tedy při tvorbě kelímku odsaje přibližně 20 % volné vody.

### **5.3.1.3 Vyhodnocení testovaných druhů papírové vlákniny na schopnost výroby kelímku v automatickém stroji a na kvalitu finálního výrobku**

Během výroby na obalovacím stroji se ukázala jako nejproblematictější vláknina připravená z novinového papíru, kdy formování kelímku bylo velmi problematické a naráželo na limity výkonu motoru rozmetadla (docházelo k odstavení stroje vlivem překročení proudového omezení a v jednom případě došlo i k ulomení utvářeče).

Obdobné problémy byly zaznamenány i u vysoko koncentrované vlákniny z kartonové lepenky (12,5 % hm.). Tuto vlákninu bylo také obtížné připravit – obtížně se homogenizovala. Naopak nízko koncentrovaná vláknina z kartonové lepenky (5 % hm.) vyžadovala prodloužení doby odsávání a zpomalila celý cyklus výroby, podařilo se však vyrobit kvalitní a soudržné výrobky, které však byly pocitově vlhčí. Výroba obalovaných sazenic z vlákniny z kartonové lepenky 10 % hm. byla bezproblémová, výrobky byly kvalitní, po vyjmutí z formy celkově dobře soudržné. U vlákniny z papírové lepenky s přídavkem bukových pilin byla výroba sazenice bezproblémová, po vyjmutí výrobku z formy byl kelímek pocitově sušší a pevnější (přídavek pilin usnadnil odsátí vody a výrobek byl více vysušen).

Vlákninu připravenou z kancelářského papíru bylo velmi snadné rozvláknit, rozvláknění a homogenizace trvala mnohem kratší dobu. Výroba kelímku v obalovacím stroji byla bezproblémová, podařilo se vyrobit kelímek dobré kvality, nicméně pevnost vlhkého výrobku po vyjmutí z formy se pocitově jevila nižší v porovnání s výrobkem připraveným z kartonové lepenky.

Vlákninu připravenou z plat od vajíček (opětovně využitý materiál vyrobený z vlákniny z odpadového materiálu) bylo na stroji možné také zpracovávat bez větších problémů, po vyjmutí výrobku z obalovacího stroje však působil méně soudržně s tendencí se rozpadat, po vysušení kelímku se tento nedostatek vytratil.

Vláknina připravená z časopisů se hůře rozvlákněovala, byl nutný delší čas pro rozvláknění i homogenizaci. Zpracování na stroji bylo bezproblémové, výrobek byl kvalitní, soudržnost výrobku po vyjmutí z formy dobrá.

Použití papírové vlákniny ve směsi (karton : časopisy : plata od vajíček : kancelářský papír: 1:1:1:1) poněkud eliminuje nedostatky jednotlivých druhů odpadového papíru.



#### 5.3.1.4 Testování penetremem

Vyrobené vzorky kelímků z různých druhů papíru byly dále uskladněny po dobu 14 dnů v místnosti při teplotě 18 °C za účelem jejich vyschnutí. Po vysušení kelímku se výrazně zpevní samotný papírový obal. Po vysušení bylo provedeno měření mechanických vlastností kelímku pomocí kapesního půdního penetrometru 16-T0163 (Controls S.r.l., Itálie).

Testování penetremem funguje tak že v pouzdru se stupnicí a gumovým kroužkem je uložena pružina a na konci je hrot. Hrotů je více druhů záleží, v jakém rozsahu chceme měřit a potom je zapotřebí výsledné hodnoty přepočítat pomocí koeficientu pro daný hrot. Hrot zaboříme do kelímků a gumový kroužek se nám posune na stupnici dle toho, jak se nám pružina zdeformuje. Hodnotu odečteme na stupnici. Měření jsme prováděli na boku kelímku a na dně kelímku.



*Obrázek 47- Měření tlaku k proražení stěny kelímku pomocí ručního penetrometru*

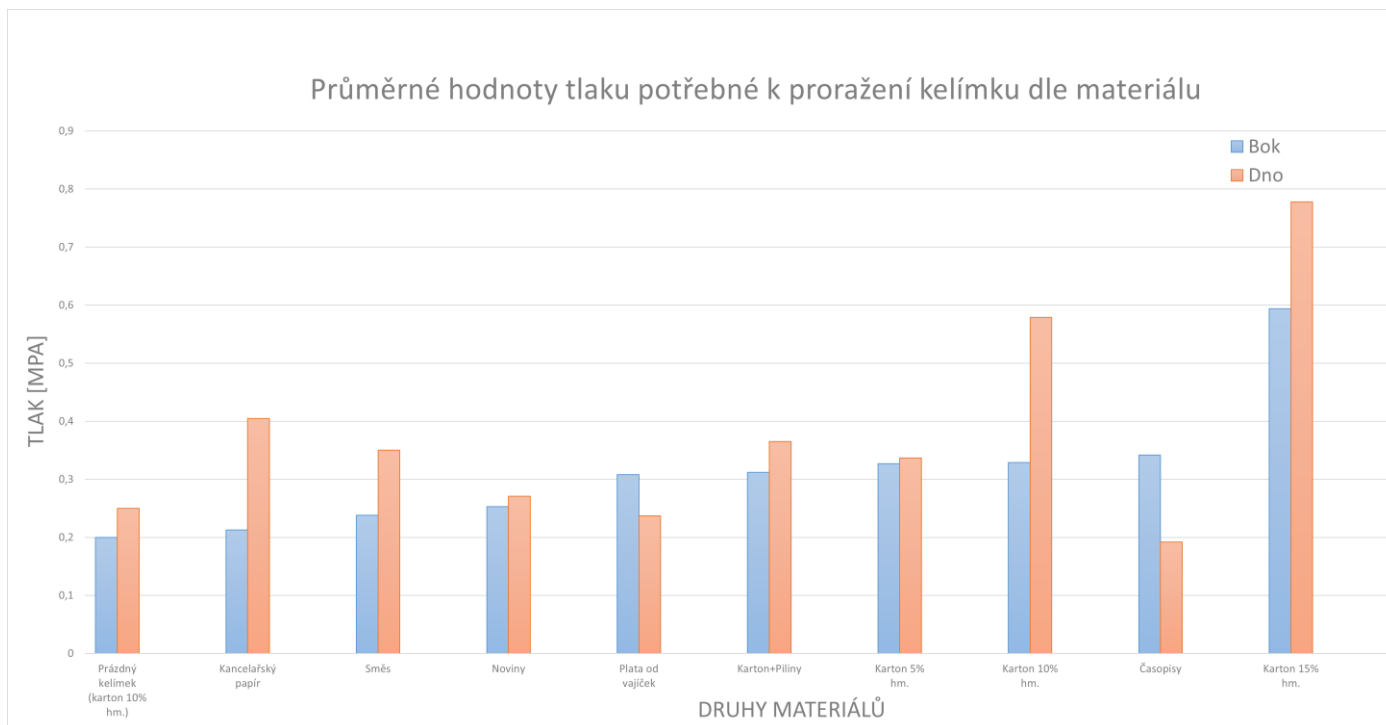


*Obrázek 48- Měření tlaku k proražení dna kelímku pomocí ručního penetrometru*

Naměřené hodnoty tlaku k proražení papírového kelímku jsou uvedeny v tabulce 5. Naměřené hodnoty tlaku potřebného k proražení výrobku byly zprůměrovány a vyneseny do grafu na obrázku 49, 50.

Tabulka 4-Hodnoty z měření s penetrometrem

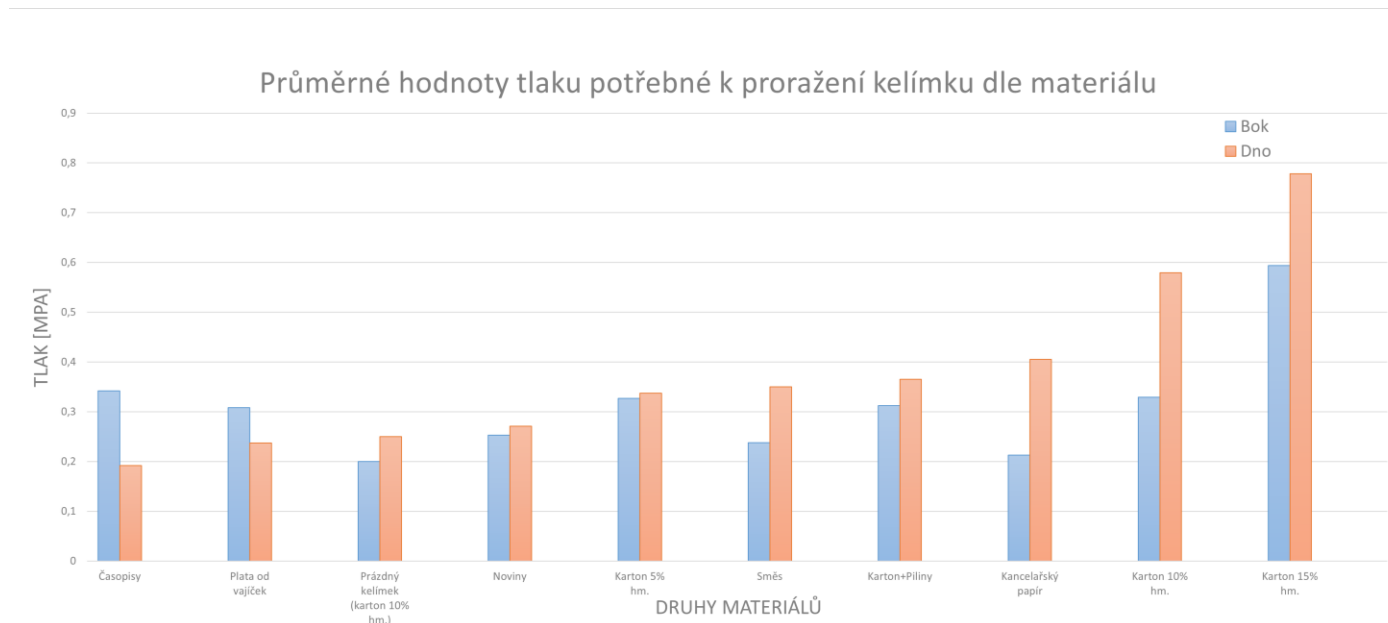
Druh papíru k výrobě vlákniny	Místo měření	Vzorek - tlak k proražení [MPa]										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
Kancelářský papír	stěna	0,22	0,15	0,26	0,2	0,25	0,25	0,17	0,2			0,213
	dno	0,32	0,35	0,6	0,32	0,45	0,45	0,35	0,4			0,405
Karton. lepenka 5% hm.	stěna	0,52	0,25	0,27	0,25	0,35	0,25	0,4				0,327
	dno	0,35	0,3	0,35	0,31	0,4	0,3	0,35				0,337
Karton. lepenka 10% hm.	stěna	0,25	0,35	0,4	0,35	0,25	0,25	0,45				0,329
	dno	0,7	0,6	0,6	0,4	0,55	0,5	0,7				0,579
Karton. lepenka 12,5% hm.	stěna	0,5	0,55	0,55	0,55	0,5	0,8	0,7	0,55	0,65		0,594
	dno	0,65	0,65	0,7	0,8	0,85	0,85	0,7	0,8	1		0,778
Novinový papír	stěna	0,25	0,3	0,15	0,22	0,2	0,35	0,3				0,253
	dno	0,3	0,22	0,3	0,35	0,23	0,3	0,2				0,271
Časopisy	stěna	0,5	0,4	0,3	0,25	0,25	0,35					0,342
	dno	0,1	0,25	0,1	0,25	0,35	0,1					0,192
Plata od vajíček	stěna	0,3	0,3	0,3	0,3	0,35	0,3					0,308
	dno	0,3	0,22	0,2	0,3	0,2	0,2					0,237
Kartonová lepenka+bukové piliny	stěna	0,4	0,3	0,27	0,3	0,25	0,35					0,312
	dno	0,44	0,25	0,4	0,4	0,3	0,4					0,365
Směs	stěna	0,2	0,25	0,25	0,25							0,238
	dno	0,55	0,35	0,35	0,15							0,350



Obrázek 49-Tlak potřebný pro protržení kelímku (seřazeno podle tlaku na bok)

Typy vlákniny seřazené podle potřebného tlaku pro proražení boku (od nejmenšího):

- Prázdný kelímek (karton 10 % hm.)
- Kancelářský papír
- Směs
- Noviny
- Plata od vajec
- Karton + piliny
- Karton 5 % hm.
- Karton 10 % hm.
- Časopisy
- Karton 12,5 % hm.



*Obrázek 50-Tlak potřebný pro protržení kelímku (seřazeno podle tlaku na dno)*

Typy vlákniny seřazené podle potřebného tlaku pro proražení dna (od nejmenšího):

- Časopisy
- Plata od vajec
- Prázdný kelímek (karton 10 % hm.)
- Noviny
- Karton 5 % hm.
- Směs
- Karton + piliny
- Kancelářský papír
- Karton 10 % hm.
- Karton 12,5 % hm.

10% karton nám vychází pevnostně nejlépe jak z boku, tak na dně.

12,5% karton z důvodu nepříznivé tvorby kelímku ve stroji, bereme jen jako informativní.

Časopisy a novinový papír kvůli tiskárenské barvě, nejsou pro sazenice příliš vhodné.

Plata od vajec docela dobře držela svůj tvar, i když to už je poslední fáze recyklace papíru (plata od vajec už nelze recyklovat v průmyslu).

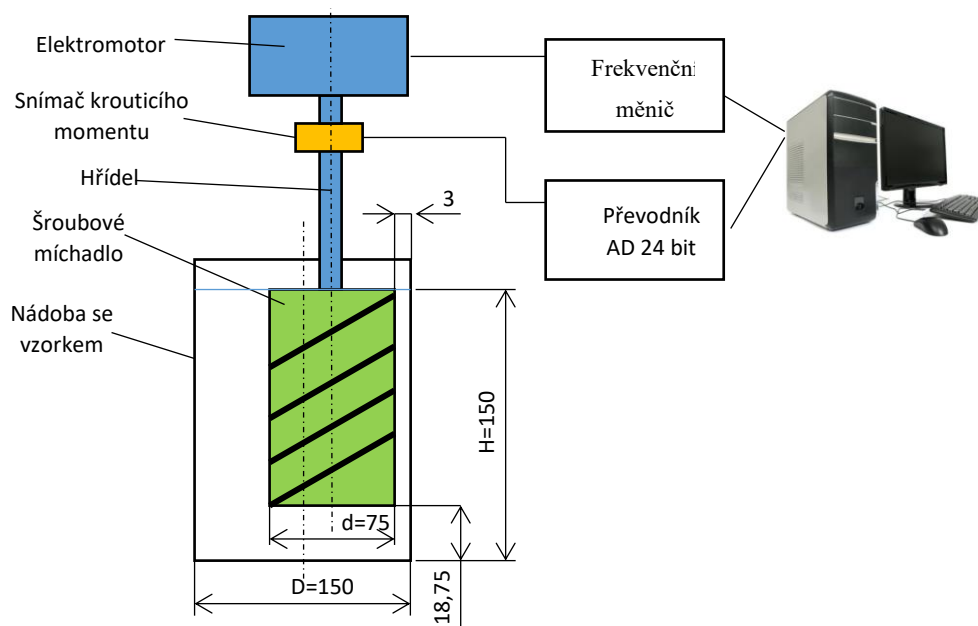
## 5.4 Měření tokových vlastností papírových vláknin

Reologické chování papírových vláknin jsme prováděli na míchací stanici vybavenou asynchronním elektromotorem s nastavitelnými otáčkami (pomocí frekvenčního měniče) a snímáním krouticího momentu na hřídeli míchací stanice. Použití klasického reometru pro měření reologických vlastností papírové vlákniny nebylo možné. Při konfiguraci deska-deska a kužel-deska docházelo k vytlačení vody a měřila se tak odvodněná vlákna. Při měření pomocí kuličkového tělíska docházelo k nabalování vláken na toto tělísko.

Papírovou vlákninu jsme umístily do válcové nádoby o průměru 150 mm s plochým dnem, a míchali pomocí excentricky umístěného šroubového míchadla při postupně zvyšujících se a snižujících se otáčkách a současném měření krouticího momentu. Schéma a geometrie měřicí aparatury viz. Obr.51. Měření jsme prováděli u těchto druhů papírových vláknin:

- Kartonová lepenka 5 % hm.
- Noviny 5 % hm.
- Časopisy 5 % hm.
- Plata od vajec 5 % hm.
- Kancelářský papír 5 % hm.

U 10% suspenze vznikaly při míchání šroubovým míchadlem v suspenzi vzduchové kapsy a docházelo k trhání struktury, které nám nepříznivě ovlivňovaly měření, protože šroubové míchadlo musí být plně obtékáno suspenzí. Z tohoto důvodu jsme měření prováděli jen u 5% suspenze. Vyšší koncentrace papírové vlákniny nebylo možné na dostupném přístrojovém vybavení měřit.



Obrázek 51-Schéma měřicí stanice s excentricky umístěným šroubovým míchadlem pro měření tokových vlastností papírové vlákniny [46]





*Obrázek 52- Obrázek měřicí aparatury*



*Obrázek 53- Měření 10% hm. kartonu s tvorbou vzduchových kapes*



*Obrázek 54- Měření 5% hm. kartonové lepenky*



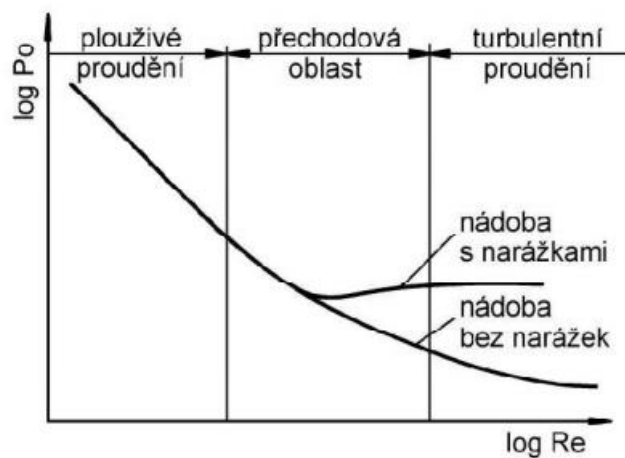
*Obrázek 55- Měření 5% hm. plat od vajec*

Nejprve jsme změřily pasivní odpory šroubového míchadla pomocí snímače krouticího momentu pro zvyšující se otáčky i snižující se otáčky. Připravenou papírovou vlákninu o dané koncentraci jsme přendali do skleněné nádoby dle schématu obr. 51 a umístili šroubové míchadlo. Měření jsme prováděli pro zvyšující se otáčky od 0,5 ot/min do 250 ot/min. Dále jsme otáčky snižovali z 250 na 0,5 ot./min. Měření bylo 3x opakováno při zvyšujících se otáčkách a 3x při snižujících se otáčkách. Zaznamenávány byly krouticí momenty jako průměrná hodnota po dobu měření 20 s (průměr z cca 630 naměřených hodnot krouticího momentu).

#### 5.4.1 Zpracování dat z měření krouticího momentu u šroubového míchadla

Suspenze vody s papírovou vlákninou se chová jako neneutonská tekutina. Pro neneutonské tekutiny není zdánlivá viskozita látkovým parametrem (konstantou), ale proměnnou veličinou. Ani zdánlivá, ani diferenciální viskozita nejsou pro neneutonské tekutiny konstantní, a proto se pro fyzikální hodnocení těchto tekutin používá závislosti smykového napětí na gradientu rychlosti vyjádřením pomocí tzv. reologických modelů [41].

Po vypočtu Reynoldsova čísla bylo zjištěno, že se pohybujeme v oblasti plouživého proudění (malé hodnoty Reynoldsova čísla do 70).



Obrázek 56- Typický průběh příkonové charakteristiky [40]

Pro geometricky podobná uspořádání míchacího zařízení můžeme vyjádřit příkonové číslo  $P_o$  jako funkci modifikovaného Reynoldsova čísla  $Re$  [40].

$$P_o = \frac{P}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5} = f(Re) \quad (4)$$

$d$ - je průměr čerpadla ( $d=75$  mm)

Za příkon čerpadla  $P$  dosadíme:

$$P = M_k \cdot \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_k \quad (5)$$

Po úpravě dostáváme vztah pro bezrozměrné příkonové číslo:

$$P_o = \frac{2 \cdot \pi \cdot M_k}{\rho \cdot n^2 \cdot d^5} \quad (6)$$

V oblasti plouživého proudění lze příkonové číslo vyjádřit jako:

$$P_o = \frac{A}{Re} \quad (7)$$

kde konstanta  $A$  závisí na geometrickém uspořádání míchacího systému. V naší použité konfiguraci s excentricky umístěným šroubovým míchadlem byla konstanta  $A$  určena experimentálně  $A=249$  [45].

Ze známé hodnoty příkonového čísla a konstanty  $A$ , lze určit hodnotu Reynoldsova čísla podle vztahu:

$$Re = \frac{A}{P_o} \quad (8)$$

V teorii míchání se často užívá modifikované Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\mu} \quad (9)$$

V našem případě se jedná o míchání nenewtonské látky. Pro vyhodnocení byla použita metoda navržená Metznerem a Ottem. Autoři vycházejí z příkonové charakteristiky pro newtonské kapaliny  $P_o=f(Re)$ , při stanovení  $Re$  však nahrazují viskozitu ve jmenovateli efektivní viskozitou, která je určována jako zdánlivá viskozita při efektivní smykové rychlosti  $\dot{\gamma}_{ef}$  [48].

$$Re = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\eta_{ef}} \quad (10)$$

kde efektivní viskozita je definována jako:

$$\eta_{ef} = K \cdot \dot{\gamma}_{ef}^{m-1} \quad (11)$$

kde  $K$  je koeficient konzistence a  $m$  je index toku.

Z vypočtené hodnoty  $Re$  dle rovnice 8 lze aplikací rovnice 10 vypočítat efektivní viskozitu podle rovnice 12:

$$\eta_{ef} = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{Re} \quad (12)$$

Aplikací Metznerovy a Ottovy metody následně určíme efektivní smykovou rychlost  $\dot{\gamma}_{ef}$  podle rovnice 13:

$$\dot{\gamma}_{ef} = k \cdot n \quad (13)$$

kde  $k$  je Metznerova konstanta a pro naše šroubové míchadlo byla určena experimentálně [45],  $k=15,5$ .

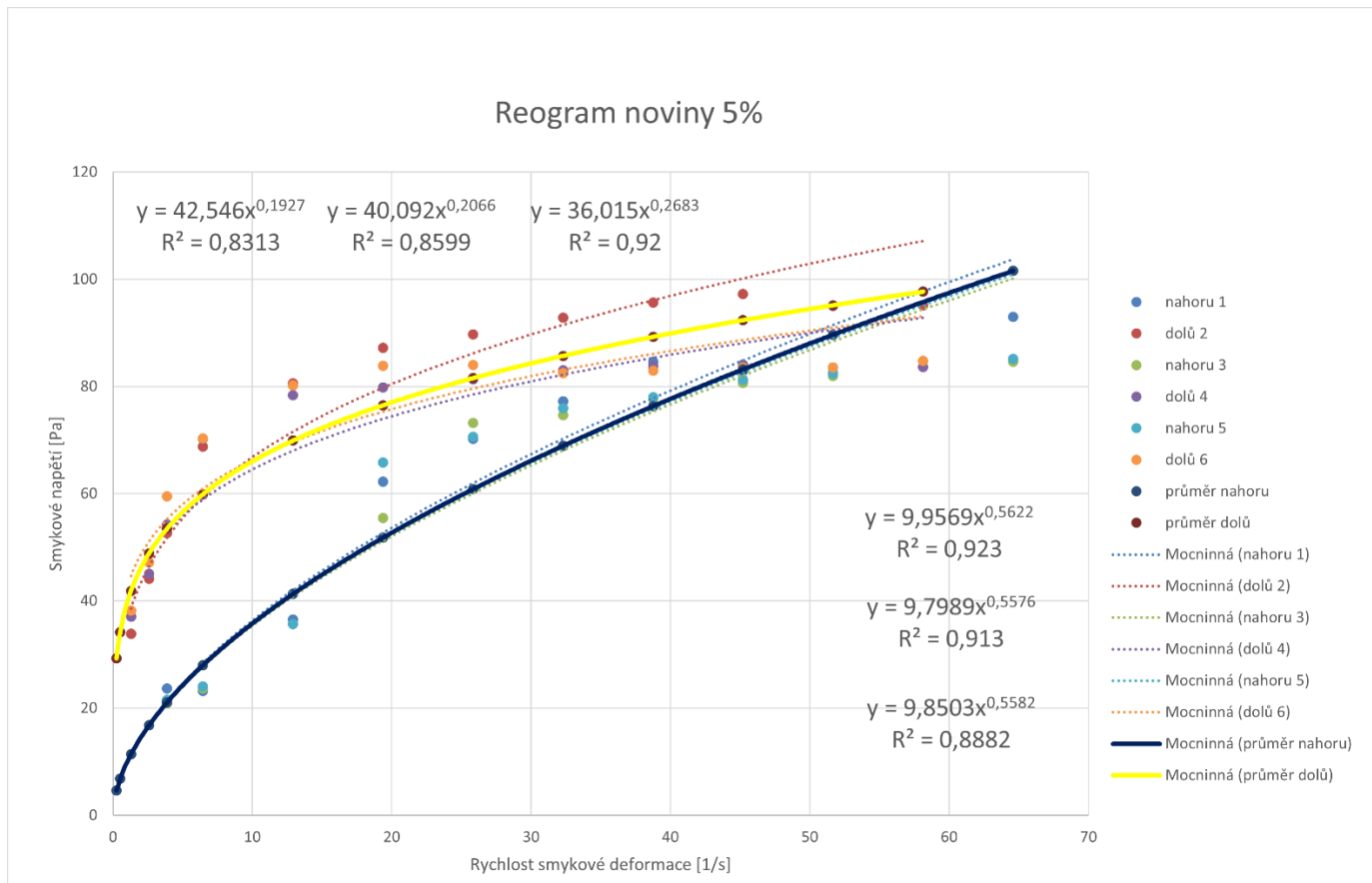
Smykové napětí dopočteme dle vztahu:

$$\tau = \eta_{ef} \cdot \dot{\gamma}_{ef} \quad (14)$$

Vypočtené hodnoty byly vloženy do grafu jako závislost smykového napětí na efektivní smykové rychlosti a proloženy mocninovou aproximací (viz obrázek 57). Získané rovnice popisující mocninovou aproximaci byly porovnány ze vztahem v rovnici 15:

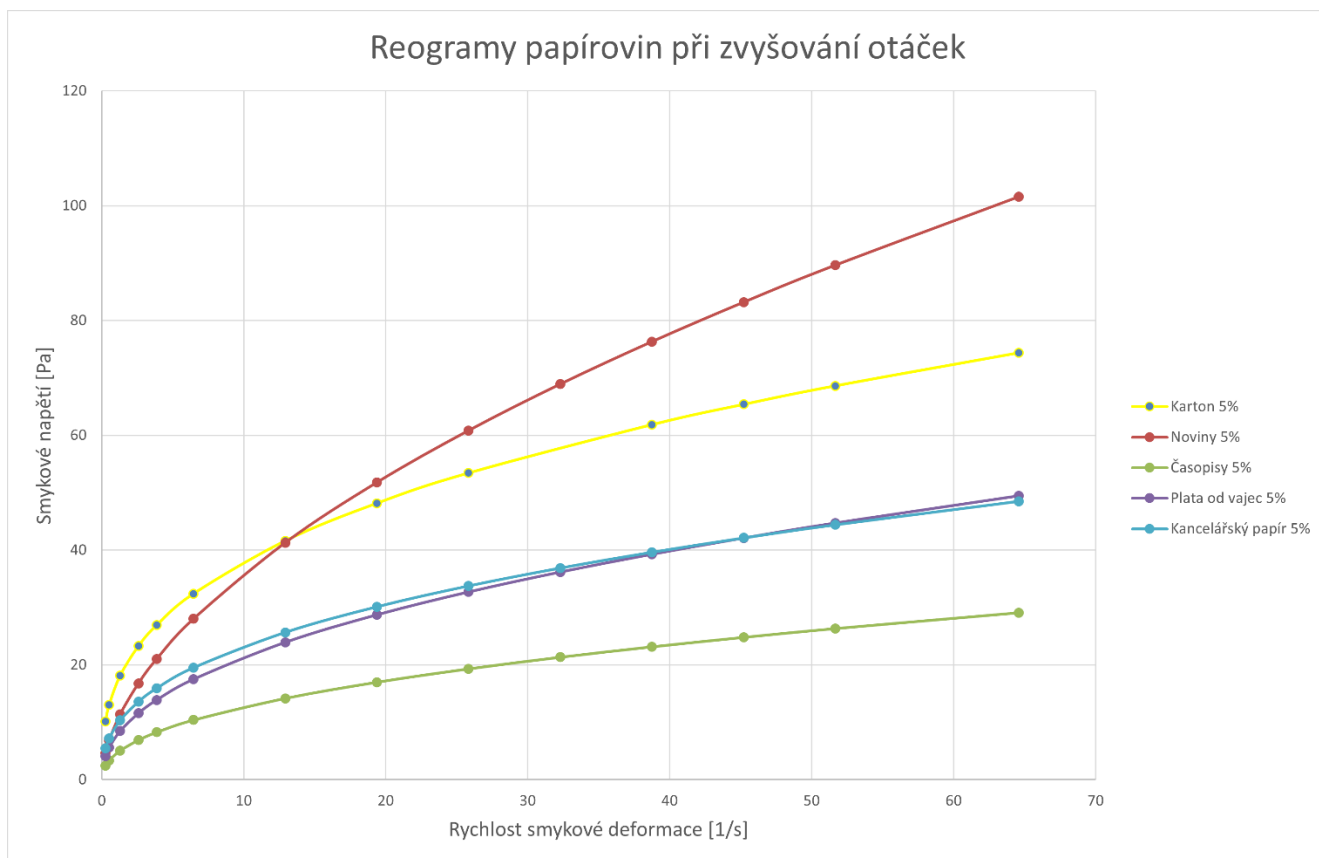
$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}_{ef}^m \quad (15)$$

Z těchto aproximací byly získány koeficienty  $K$  a  $m$ , zvlášť pro hodnoty naměřené při rostoucích otáčkách a při klesajících otáčkách. Získané hodnoty koeficientů  $K$  a  $m$  byly následně zprůměrovány pro každý typ papírové vlákniny zvlášť a tím byly získány reogramy všech testovaných papírových vláknin - obrázky 58 a 59.

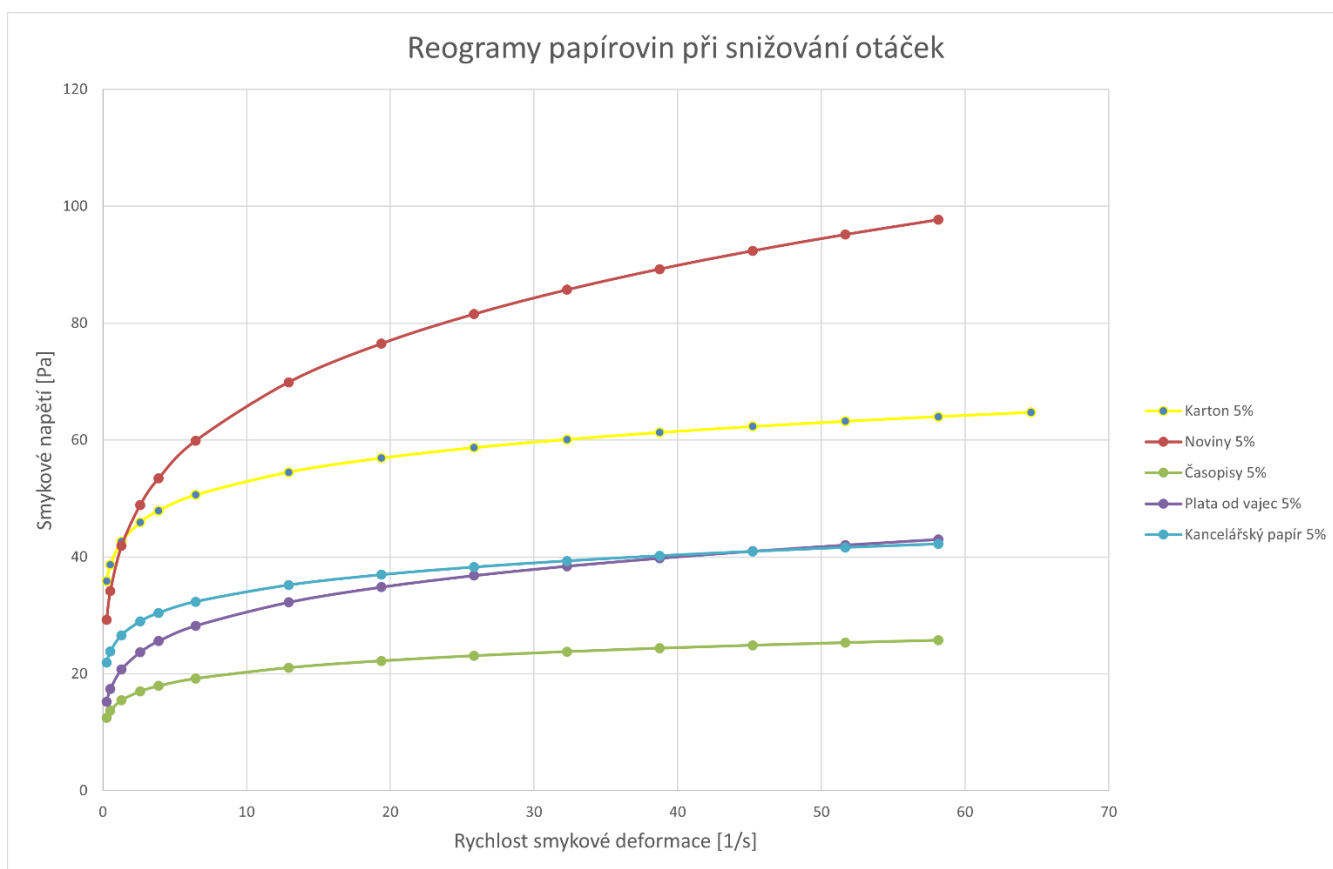


Obrázek 57- Ukázka vyhodnocení dat





Obrázek 58- Výsledný graf všech reogramu pro zvyšující se otáčky

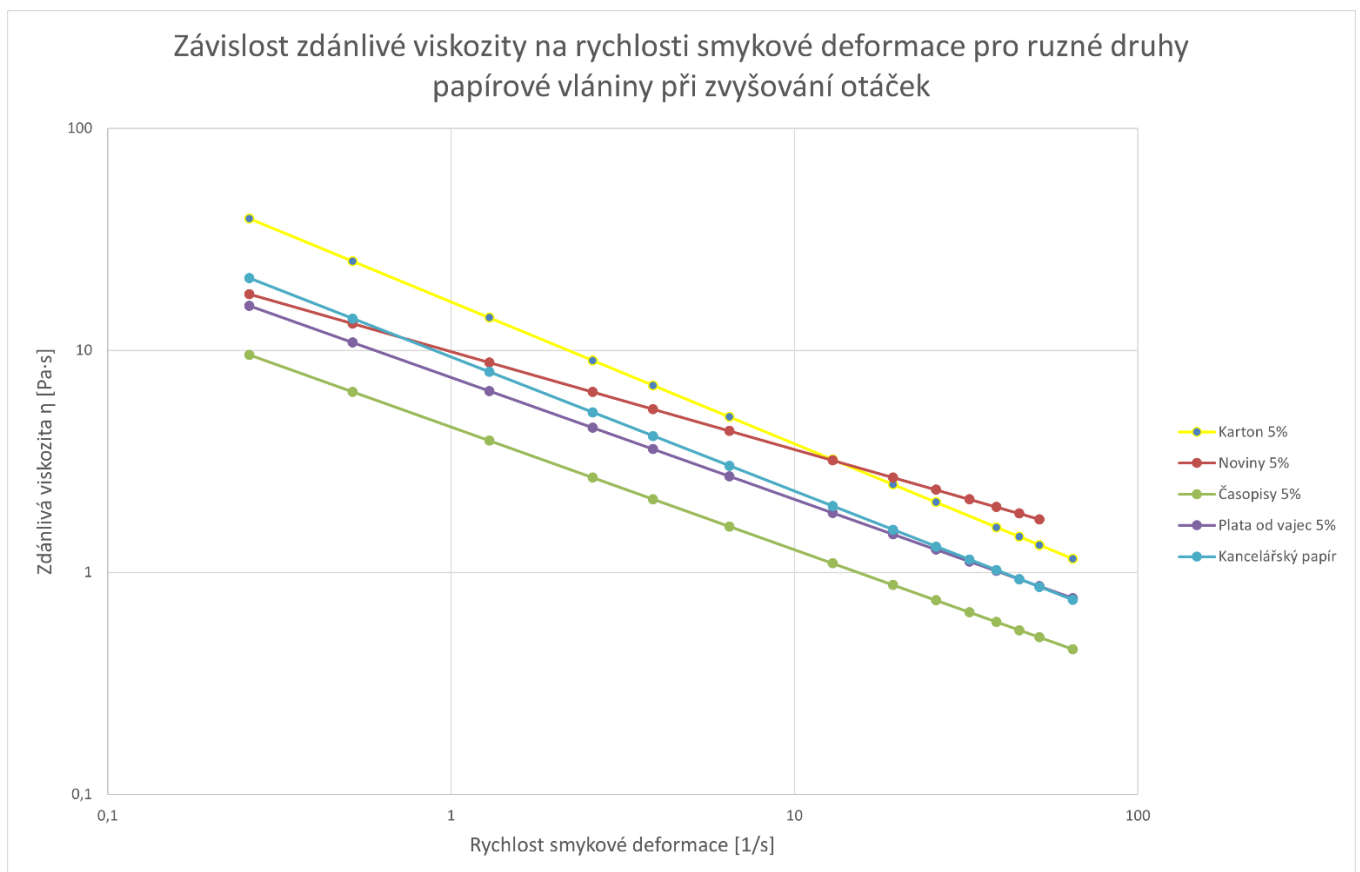


Obrázek 59- Výsledný graf všech reogramu pro snižující se otáčky

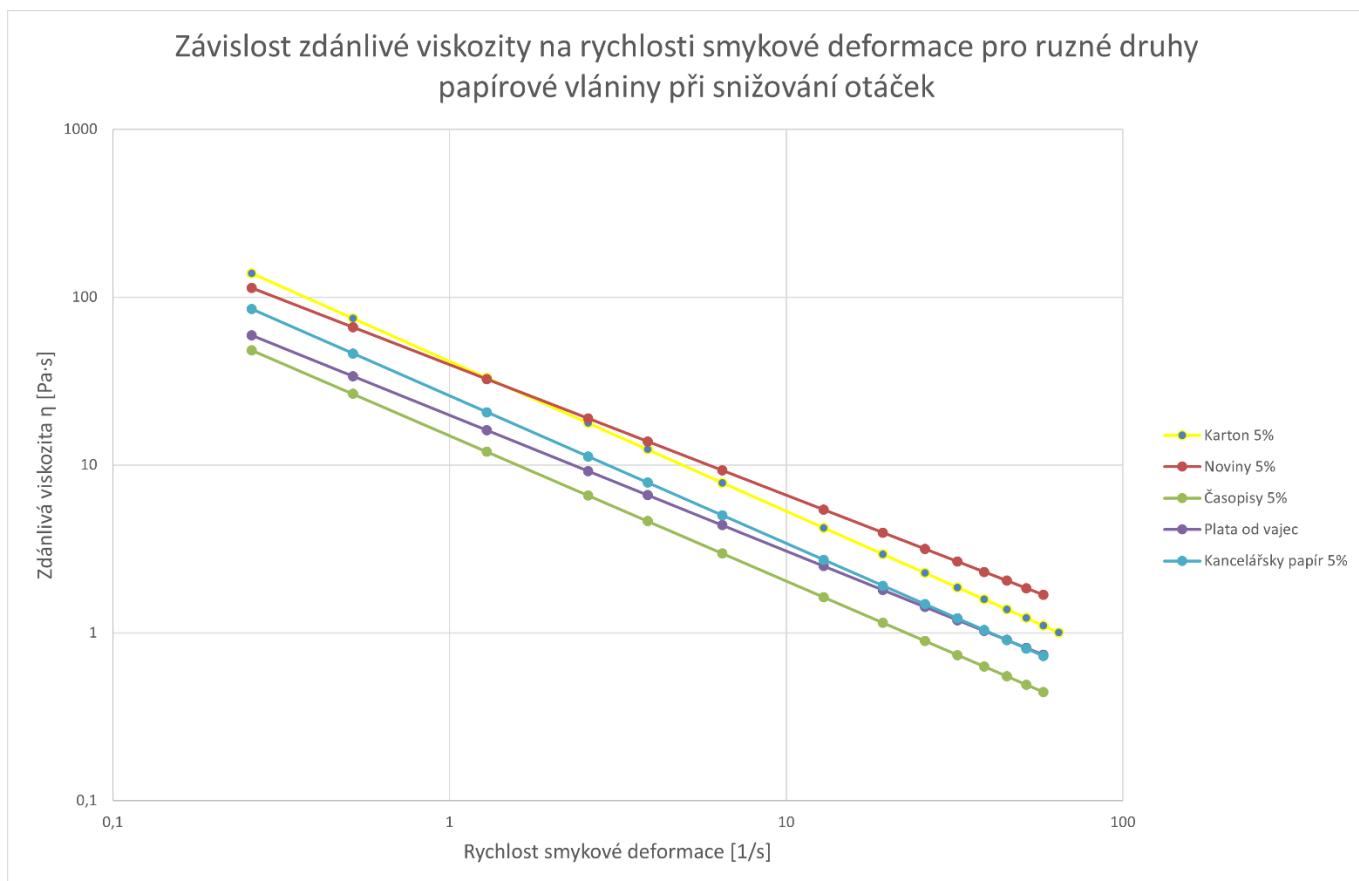
Z obrázků 57 až 59 je vidět, že zvolený mocninový (power law) model celkem spolehlivě popisuje naměřená data.

Z vypočteného indexu toku  $m$  které bylo menší než jedna, jsme došli k tomu že papírová vláknina se chová jako pseudoplastická kapalina. Odchylna v reogramu získaná z měření při zvyšujících se otáčkách a snižujících se otáčkách je pravděpodobně způsobena sedimentací vsádky. Při měření při zvyšujících se otáčkách míchadlo dostává vlákna do vznosu, naopak při klesajících otáčkách je vsádka rozmíchána a při nízkých otáčkách začíná opět sedimentovat. Nejdůležitější reogram je pro nás při zvyšování otáček (simulace nasávání čerpadla při rozběhu). Z grafů lze vidět že novinový papír nám klade největší odpor, naopak časopisy nejmenší.

Pro úplnost je na obrázku 60 a 61 uvedena závislost efektivní viskozity na efektivní rychlosti smykové deformace.



Obrázek 60- Výsledný graf závislosti zdánlivé viskozity na rychlosti smykové deformace při zvyšování otáček



Obrázek 61- Výsledný graf závislosti zdánlivé viskozity na rychlosti smykové deformace při zvyšování otáček

## 5.4.2 Měření hustoty a obsahu sušiny papírové vlákniny

U připravených papírových vláknin (5% koncentrace) jsme změřily hustoty (zvážením 1000ml objemu). Odebrali jsme vzorky papírových vláknin a nechali usušit v komorové sušárně BINDER při teplotě 105 °C po dobu 24 hodin, následně dopočetali podíl sušiny ve vzorku na základě rozdílu hmotnosti vzorku před sušením a po sušení.

*Tabulka 5-Porovnání podílu sušiny a hustoty*

Druh vlákniny	Hustota pro 5% koncentraci [kg/m <sup>3</sup> ]	Podíl sušiny [%]
Kancelářský papír	1039,7	5,4
Kartonová lepenka	1015,7	6,49
Plata od Vajec	1012,1	5,9
Novinový papír	992,1	6,1
Časopisy	979,2	7,0

Domnívám se, že hustota se liší podle toho, jak papírovina nabobtná ve vodě a v tom se liší jednotlivé papírové vlákniny. Pokud nabobtnají, suspenze zvětší svůj objem, ale hmotnost zůstává stejná a dochází ke snižování hustoty.

V tabulce č. 4 vidíme že čím větší je hustota tím nižší je podíl sušiny u vzorku (kromě kartonové lepenky), pravděpodobně kvůli odebírání vzorků, protože u suspenze dochází ke vzniku rozhraní vody a suspenze a při vyšší hustotě je voda ve vrchní části a při odebírání nabere obě složky. Naopak při nižší hustotě suspenze, je suspenze ve vrchní části a zbytková voda na dně nádoby a při odebrání vzorku nedochází ke smíchání a vzorek obsahuje více sušiny.

## 6 Návrh možného dávkování/čerpání buničiny do obalovačky

### 6.1 Návrh dávkovače

U stávajícího řešení čerpání a dávkování buničiny je použito vřetenové čerpadlo (D5 KURZ na obrázku 62), které čerpá buničinu v uzavřeném okruhu. Dávkování papírové vlákniny do formy je pak zajištěno otevřením pneumaticky ovládaného kulového kohoutu, kdy potřebná dávka je dána dobou otevření tohoto kohoutu. Toto řešení má ale problém v dávkování, není vždy zajištěna stejná dávka papírové vlákniny, a navíc docházelo při neustálém čerpání vlákniny v okruhu k jejímu zahřívání. Zahřívání vlákniny se sice podařilo zamezit tím, že čerpadlo je spouštěno v programovém kroku před dávkou vlákniny a poté opět odstaveno, s tím nastal však další problém, kdy v zásobníku dochází k oddělování vlákniny a vody (voda stoupá nahoru). Zaznamenáno bylo také zacpání čerpadla suchou vlákninou (a to i při provozu), čerpadlo bylo navíc nutné již vyměnit. Určitým východiskem by bylo doplnit zásobník papírové vlákniny mícháním, ale to nevyřeší problém nestejnoměrného dávkování, které je navíc citlivé na kvalitu suroviny.



*Obrázek 62-Vřetenové čerpadlo D5 KURZ*

Pro různé velikosti kelímku a různou koncentraci papírové vlákniny jsou požadovány různé dávky papírové vlákniny. Tomu odpovídá požadovaný průtok čerpadla cca 5 l/min (pro nejmenší kelímek a nejvyšší koncentraci papíru ve vláknině) až 30 l/min (největší kelímek, nejnižší koncentrace papíru ve vláknině). Pro účel dávkování papírové vlákniny navrhuji použití pístového čerpadla s pneumatickým pohonem a kulovými ventily. Toto čerpadlo na jeden pohyb pístu dodá přesné množství papírové vlákniny. Použít lze např. pístové čerpadlo s pneumatickým pohonem s regulovatelným množstvím dávky řady PA od firmy CSF - např. PAR-100 s průtokem až 55 l/min. Toto čerpadlo má světlost hrdel DN40, což by nemělo způsobovat problémy s jejich ucpáváním. Tyto čerpadla byly navržena tak aby vyhovovaly nejširší spektrum požadavků na čerpání produktů s extrémně vysokou viskozitou.



*Obrázek 63-Dvojčinné čerpadlo CSF [47]*

## **6.2 Doporučené složení papírové vlákniny**

Novinový papír z důvodu velmi špatného formování kelímků nedoporučuji. Zároveň novinový papír, časopisy a letáky z důvodu přítomnosti tiskárenského inkoustu taktéž nedoporučuji, protože by mohl být problematický v kontaktu s rostlinou. Kancelářský papír a plata od vajec vykazují menší pevnost po vyjmutí z formy. Doporučil bych kartonovou lepenku v koncentraci 8÷10 %, protože nad 10% koncentrací je obtížné formování kelímků. 5% koncentrace už příliš prodlužuje cyklus výroby, byť se nejlépe čerpá. Použitelná je i směs, kde by měla být kartonová lepenka dominantní. U kartonové lepenky se musí vyvarovat přítomnosti samolepek, izolep atp. způsobují problémy.

## 7 Závěr

Rešeršní část této bakalářské práce byla zaměřena na postupy papírenského průmyslu, používané technologie a postupy při zpracování recyklovaného papíru a používaná čerpadla pro čerpání papírové vlákniny. Konec rešeršní části je zaměřen na reologii.

- Způsoby získání vlákniny – mechanický, mechanicko-chemický, chemický způsob,
- Vstup papíroviny do papírenského stroje o 1 % hm. koncentrace,
- Recyklovaný papír musí být rozvlákněn-čištěn a proséván – odbarvován,
- V průmyslu pro výrobu papíru se nejčastěji používají odstředivá čerpadla kvůli velkým objemovým průtokům.

V praktické části bylo provedeno testování papírovin na automatickém stroji na výrobu sazenic (obalovačka). Taktéž měření tokových vlastností papírových vláknin.

Nejhůře dopadl novinový papír, a to jak při testování na automatickém stroji, tak to následně potvrdilo i reologické měření. Naopak dobré výsledky byly u kartonové lepenky. Podle výsledků všech měření v experimentální části bakalářské práce doporučuji 10% kartonovou lepenku. V závěru experimentální části práce navrhuji možné dávkování a čerpání buničiny na dvojčinném pístovém čerpadle PAR-100.

## 8 Seznam zdrojů a použité literatury

- [1] Jak se vyrábí a recykluje papír?. *Tonerpartner* [online]. [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: <https://www.tonerpartner.cz/clanky/jak-se-vyrabi-a-recykluje-papir-53335cz39332/>
- [2] Votrubová, O.: Anatomie rostlin, skriptum, Karolinum, Praha 1996
- [3] Jak se vyrábí papír. *Drevojecesta* [online]. [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: <https://www.drevojecesta.cz/aktuality/jak-se-vyrabi-papir>
- [4] Výroba papíru. *ELUC* [online]. [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/2541>
- [5] Papír I. *Grafikpromedia* [online]. [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <http://grafikpromedia.spspzlin.cz/vsp/papir-i>
- [6] Inovace profesní přípravy budoucích učitelů chemie: Výroba papíru [online]. [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: [https://theses.cz/id/8bigl6/DVD/komplet\\_vyroba\\_p/Vyroba\\_papiru\\_ppt.pdf](https://theses.cz/id/8bigl6/DVD/komplet_vyroba_p/Vyroba_papiru_ppt.pdf)
- [7] pracování celulózy pro průmyslové aplikace [online]. [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/42772/%C5%A1ustkov%C3%A1\\_2018\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/42772/%C5%A1ustkov%C3%A1_2018_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [8] Výroba papíru. *ELUC* [online]. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1774>
- [9] *Trideniodpadu: JAK SE RECYKLUJE PAPIR* [online]. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/jak-se-recykluje-papir>
- [10] *Greentumble: how-is-paper-recycled-step-by-step* [online]. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://greentumble.com/how-is-paper-recycled-step-by-step/>
- [11] *Conserve-energy-future: Co je recyklace papíru?* [online]. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.conserve-energy-future.com/paperrecycling.php>
- [12] *Archive: Výroba a recyklace papíru* [online]. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://archive.epa.gov/wastes/conservation/materials/paper/web/html/papermaking.html>



- [13] *Deinking* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:FICell.PNG>
- [14] *Deinking* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Deinking>
- [15] *Bubnový rozvlákňovač* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <http://www.paperpulpingmachine.com/paper-pulper-machine/drum-pulper/>
- [16] *Použití bubnových rozvlákňovačů* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <http://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/using-drum-pulpers.html>
- [17] *Nízkokonzistentní rozvlákňovač* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <http://www.paperpulpingmachine.com/paper-pulper-machine/low-consistency-pulper/>
- [18] *Nízkokonzistentní vertikální rozvlákňovač LCV* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.papcel.cz/en/products/paper-amp-board/cardboard/stock-preparation-line/machinery-and-equipment/raw-material-furnish-pulping-pulper-tank-cleaning/low-consistency-vertical-pulper-lcv/>
- [19] *Nízkokonzistentní rozvlákňování* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/paper-production/stock-preparation/low-consistency-pulping>
- [20] *Rozvlákňování s vysokou konzistencí* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/paper-production/stock-preparation/high-consistency-pulping>
- [21] *Automatický rozvlákňovač z nerezové oceli s nízkou konzistencí - pro celulózy a papírny* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/low-consistency-pulper-for-pulp-paper-mills-19420022097.html>
- [22] *Automatický systém vysokokonzistentního rozvlákňovače z nerezové slitiny - pro celulózu a papírnu* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z:

<https://www.indiamart.com/proddetail/high-consistency-pulper-system-for-pulp-paper-mill-19418622797.html>

[23] *Schéma znázorňující princip třídění, kdy buničina prochází sítím kruhovým pohybem.* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Diagram-showing-the-principle-of-screening-where-pulp-is-passed-down-the-screen-in-a\\_fig2\\_235305740](https://www.researchgate.net/figure/Diagram-showing-the-principle-of-screening-where-pulp-is-passed-down-the-screen-in-a_fig2_235305740)

[24] *Brief Analysis of Waste Paper Pulp Processing* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <http://www.paperpulpingmachine.com/analyze-waste-paper-pulp-processing/>

[25] *Problémy s čerpáním papíru a buničiny* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://eddyump.com/applications/paper-pulp-pump-applications/>

[26] *Vysoce univerzální řešení podávání kapalin a manipulace s kapalinami pro operace s celulózou a papírem* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.masterflex.com/tech-article/versatile-liquid-feed-fluid-handling-for-pulp-paper-operations>

[27] *Peristaltic pumps* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.granzow.com/pumps/paper>

[28] *Peristaltická čerpadla: Perfektní řešení problému s dávkováním vápna* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.verderliquids.com/cz/cs/prumysl/cerpadla-odpadnich-vod-a-kalu/peristalticka-cerpadla-perfektni-reseni-problemu-s-davkovanim-vapna/>

[29] *Jak fungují peristaltická čerpadla?* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.wmftg.com/cs-cz/podpora/cerpadla-podle-funkcniho-principu/jak-funguji-peristalticka-cerpadla/>

[30] *ZPŮSOBY DOPRAVY ZNEČIŠTĚNÝCH KAPALIN A KALŮ* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=39137](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39137)

- [31] *Paper-stock-pulp-pump* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.tobeepump.com/paper-stock-pulp-pumps/tsj-paper-stock-pulp-pump.html>
- [32] *Buničina* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: [https://www.northridgepumps.com/c\\_31\\_pulp#!/filter=true&page=1](https://www.northridgepumps.com/c_31_pulp#!/filter=true&page=1)
- [33] *VLIV KONEČNÉHO POČTU LOPATEK U HYDRODYNAMICKÝCH ČERPADEL* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://adoc.pub/vliv-koneneho-potu-lopatek-u-hydrodynamickych-erpadel.html>
- [34] *Progressive Cavity Pumps Streamline Pulp & Paper Applications* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.pumpsandsystems.com/progressive-cavity-pumps-streamline-pulp-paper-applications>
- [35] *Progresivní dutinové čerpadlo třídy* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <http://pcp-pump.com/1-3-k-class-progressive-cavity-pump.html>
- [36] *ŘEŠENÍ ČERPÁNÍ PRO PAPIRENSKÝ PRŮMYSL* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.libertyprocess.com/progressive-cavity-pumps-for-pulp-paper.html>
- [37] *Progresivní dutinové čerpadlo* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.flexachem.com/progressive-cavity-pump/>
- [38] *Typy a aplikace membránových čerpadel* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/diaphragm-pump-types-and-applications/>
- [39] *Reologie suspenzí buničiny: kritický přehled* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250911002594?via%3Dihub#bib47>
- [40] *HYDRODYNAMICKY OPTIMALIZOVANÁ MÍCHADLA* [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63573/F2-DP-2016-Fiser-Petr-DP\\_Petr%20Fiser.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63573/F2-DP-2016-Fiser-Petr-DP_Petr%20Fiser.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [41] *Reologické chování tekutin – stanovení reogramů – [RC]* [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/0047~~C3KODwtRSE3JLAEA.pdf?redirected>

- [42] *Vliv etherů celulózy* [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=167110](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=167110)
- [43] *VISKOZITA A POVRCHOVÉ NAPĚTÍ* [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fzolotarev.fd.cvut.cz%2Ffyz%2Fctrl.php%3Fact%3Dshow%2Cfile%2C28143&psig=AOvVaw3q5dpN62xdByqiKpGLkKJw&ust=1652354378868000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCKCsn-6p1\\_cCFQAAAAAdAAAAABAD](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fzolotarev.fd.cvut.cz%2Ffyz%2Fctrl.php%3Fact%3Dshow%2Cfile%2C28143&psig=AOvVaw3q5dpN62xdByqiKpGLkKJw&ust=1652354378868000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCKCsn-6p1_cCFQAAAAAdAAAAABAD)
- [44] *Využití reologických modelů v potravinářství* [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/42752/dlaba%C4%8D\\_2018\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/42752/dlaba%C4%8D_2018_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [45] DOSTÁL, Martin, Jiří MORAVEC, Tomáš JIROUT, Milan RYDVAL, Karel HURTIG a Dita JIROUTOVÁ. Rheological behaviour of fresh concrete mixtures. In: GUERRERO, Antonio a Teresa CIDADE (Ed.). Book of Abstracts - 15th Annual European Rheology Conference, Seville, Spain, April 26-28,2022 [USB]. Seville, 2022 [cit. 2022-05-31].
- [46] *Obalování sadebního materiálu lesních dřevin technologickým systémem PostCont*. Praha, 2020. VÝZKUMNÁ ZPRÁVA k PROJEKTU. ČZU, ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivan Kuneš, Ph.D. ,Ing. František Lopot, Ph.D.
- [47] DOUBLE-ACTING AIR-OPERATED PISTON PUMPS [online]. In: . [cit. 2022-05-22]. Dostupné z: <http://m.vkcerpadla.cz/files/pistove/catalogue-air-operated-piston-pumps.pdf>
- [48] Rieger, F., Novák, V., Jirout, T. Hydromechanické procesy II, Skriptum ČVUT, ČVUT v Praze, 2005.

## 9 Seznam symbolů

$A$	Koeficient míchadla	[-]
$d$	Průměr míchadla	[m]
$k$	Metznerova konstanta	[-]
$K$	Koeficient konzistence	[Pa·s]
$m$	Index toku	[-]
$n$	Otáčky	[1/s]
$P$	Příkon	[W]
$Po$	Příkonové číslo	[-]
$\dot{\gamma}_{ef}$	Rychlost smykové deformace	[1/s]
$\eta_{ef}$	Efektivní viskozita	[Pa·s]
$\mu$	Dynamická viskozita	[Pa·s]
$\nu$	Kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	Hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau$	Smykové napětí	[Pa]

## 10 Seznam obrázků

Obrázek 1- Schéma výroby papíru [4] .....	- 11 -
Obrázek 2 Zastoupení celulózy v různých rostlinných materiálech [7].....	- 11 -
Obrázek 3- Mechanický způsob výroby vlákniny [4].....	- 12 -
Obrázek 4- Mechanicko-chemický způsob výroby vlákniny [4].....	- 13 -
Obrázek 5- Schéma chemického způsobu výroby buničiny [4].....	- 14 -
Obrázek 6 Výroba recyklované vlákniny [4] .....	- 15 -
Obrázek 7- Postup výroby recyklovaného papíru [24] .....	- 18 -
Obrázek 8-Detail rotoru rozvlákňovače pro .....	- 19 -
Obrázek 9- Nízko koncentrační rozvlákňování.....	- 19 -
Obrázek 10-Schéma ukázky stroje pro splétání lan v rozvlákňovači [21].....	- 20 -
Obrázek 11- Rozvlákňovač pro vysoko-koncertované vlákniny [22].....	- 20 -
Obrázek 12- schéma: Bubnový rozvlákňovač [16] .....	- 21 -
Obrázek 13- Schéma odstředivého síta [23] .....	- 22 -
Obrázek 14- Schéma Flotačního článku [13].....	- 23 -
Obrázek 15- Oběžné kolo kalového čerpadla pro papírovinu [30] .....	- 24 -
Obrázek 16- Schéma proudění kapaliny v odstředivém čerpadle [33] .....	- 25 -
Obrázek 17- Schéma fungování peristaltického čerpadla [30] .....	- 25 -
Obrázek 18-Membránové čerpadlo [30] .....	- 26 -
Obrázek 19- Vřetenové čerpadlo [30].....	- 27 -
Obrázek 20- Schéma dvojčinného a trojičinného pístového čerpadla [30].....	- 28 -
Obrázek 21-Toková křivka (vlevo) a viskozitní křivka (vpravo) newtonských kapalin [42]-	29 -
Obrázek 22-Reogramy nenewtonských látek [43] .....	- 29 -
Obrázek 23-Toková křivka (vlevo) a viskozitní křivka (vpravo) pseudoplastických kapalin [42] -	30 -
Obrázek 24-Toková křivka (vlevo) a viskozitní křivka (vpravo) dilatantních kapalin [42] -	30 -
Obrázek 25- Toková křivka (vlevo) a viskozitní křivka (vpravo) ideálně plastických kapalin [42]	.....
.....	- 31 -
Obrázek 26-7 Toková křivka (vlevo) a viskozitní křivka (vpravo) skutečných plastických [42]-	31 -
Obrázek 27-Závislost smykového napětí na smykové rychlosti pro tixotropní tekutinu (vlevo) [42]	.....
.....	- 32 -
Obrázek 28-Grafické zobrazení vybraných reologických modelů [42] .....	- 34 -

Obrázek 29-Ukázka vyhodnocení zdánlivé meze toku [39] .....	- 38 -
Obrázek 30-Lopatka v přepážkovém pouzdru, zařízení používané ke studiu suspenzí buničiny [39] .....	- 38 -
Obrázek 31-Automatický stroj pro výrobu sazenic.....	- 40 -
Obrázek 32- Střížný mlýn SM 300 .....	- 41 -
Obrázek 33-Detail pracovního prostoru střížného mlýnu. ....	- 41 -
Obrázek 34-Příklady struktury sběrového papíru z výstupu mlýnu.....	- 42 -
Obrázek 35-Použité čtyřlopatkové míchadlo s rovnými lomenými lopatkami 1 .....	- 42 -
Obrázek 36-Použité čtyřlopatkové míchadlo s rovnými lomenými lopatkami 2 .....	- 42 -
Obrázek 37- Míchací zařízení 1 .....	- 43 -
Obrázek 38-Míchací zařízení 2 .....	- 43 -
Obrázek 39-Novinový papír s koncentrací 5 % hm .....	- 43 -
Obrázek 40-Karton s koncentrací 10 % hm. ....	- 43 -
Obrázek 41-struktura 5% koncentrace kartonu .....	- 44 -
Obrázek 42-struktura 10% koncentrace kartonu .....	- 44 -
Obrázek 43-struktura 12,5 % koncentrace kartonu .....	- 44 -
Obrázek 44-Kelímek z kartonové stříže z hnědé papírové lepenky .....	- 45 -
Obrázek 45-Kelímek z kancelářského papíru .....	- 45 -
Obrázek 46-Testovací série vyrobených produktů z různých druhů papírové vlákniny: a) kancelářský bělený papír; b) karton 10 % sušiny; c) karton 5 % sušiny; d) karton 12,5 % sušiny; e) časopisy; f) novinový papír; g) recyklovaná vláknina (plata od vajíček); h) karton s bukovými pilinami; i) směs karton (10 %), kancelářský papír, časopisy a plata od vajíček .....	- 46 -
Obrázek 47- Měření tlaku k proražení stěny kelímku pomocí ručního penetrometru .....	- 49 -
Obrázek 48- Měření tlaku k proražení dna kelímku pomocí ručního penetrometru .....	- 49 -
Obrázek 49-Tlak potřebný pro protržení kelímku (seřazeno podle tlaku na bok) .....	- 50 -
Obrázek 50-Tlak potřebný pro protržení kelímku (seřazeno podle tlaku na dno) .....	- 51 -
Obrázek 51-Schéma měřicí stanice s excentricky umístěným šroubovým míchadlem pro měření tokových vlastností papírové vlákniny [46] .....	- 52 -
Obrázek 52- Obrázek měřicí aparatury .....	- 53 -
Obrázek 53- Měření 10% hm. kartonu s tvorbou vzduchových kapes .....	- 53 -
Obrázek 54- Měření 5% hm. kartonové lepenky .....	- 53 -
Obrázek 55- Měření 5% hm. plata od vajed .....	- 53 -
Obrázek 56- Typický průběh příkonové charakteristiky [40] .....	- 54 -

Obrázek 57- Ukázka vyhodnocení dat .....	- 56 -
Obrázek 58- Výsledný graf všech reogramu pro zvyšující se otáčky .....	- 57 -
Obrázek 59- Výsledný graf všech reogramu pro snižující se otáčky .....	- 57 -
Obrázek 60- Výsledný graf závislosti zdánlivé viskozity na rychlosti smykové deformace při zvyšování otáček .....	- 58 -
Obrázek 61- Výsledný graf závislosti zdánlivé viskozity na rychlosti smykové deformace při zvyšování otáček .....	- 59 -
Obrázek 62-Vřetenové čerpadlo D5 KURZ.....	- 61 -
Obrázek 63-Dvojčinné čerpadlo CSF [47].....	- 62 -



## 11 Seznam tabulek

Tabulka 1-Přehled reologických modelů [44].....	- 33 -
Tabulka 2-Stanovení obsahu sušiny papírové vlákniny (karton 10% koncentrace) .....	- 47 -
Tabulka 3- Stanovení obsahu sušiny – papírový kelímek po odsátí strojem (bez substrátu)-	47 -
Tabulka 4-Hodnoty z měření s penetrometrem.....	- 50 -
Tabulka 5-Porovnání podílu sušiny a hustoty .....	- 60 -