

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Fakulta lesnická
a dřevařská**

**Simulace výroby chemické buničiny
ze zemědělského odpadu**

Diplomová práce

Bc. Karel Škrabálek

Ing. Kateřina Hájková, Ph.D.

2023

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Karel Škrabálek

Dřevařské inženýrství

Název práce

Simulace výroby chemické buničiny ze zemědělského odpadu

Název anglicky

Simulation of chemical pulp production from agricultural waste

Cíle práce

Cílem diplomové práce je uskutečnit laboratorní simulaci výroby papíru ze zemědělského odpadu. Poznatky porovnat pro jednotlivé způsoby výroby chemické buničiny, a to jak z hlediska chemického, tak z hlediska papírenského.

Metodika

1. Zpracování literární rešerše (březen-červen 2022).
2. Experimentální část – Příprava vzorků (červenec-září 2022).
3. Experimentální část – Analýza vlastností (říjen-prosinec 2022).
4. Statistické zpracování výsledků a jejich interpretace v textové, tabelární i grafické podobě (leden-únor 2023).
5. Závěr (březen 2023)

Doporučený rozsah práce

70 stran

Klíčová slova

chemická buničina, biochar, chemická analýza, mechanické vlastnosti

Doporučené zdroje informací

BAJPAI, P. 2012. Biotechnology for Pulp and Paper Processing. US: Springer, 414 s. ISBN 978-1-4614-1408-7.

BUČKO, J. 2001. Chemické spracúvanie dreva v teórii a praxi. Vysokoškolská učebnica. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 427 s, ISBN 80-228-1089-4.

ČERVENKA, E., KRÁL, Z., TOMIS, B. Chemie dřeva a celulózy I-III. Pardubice: VŠCHT Pardubice, 1980, 228 s. ČSN ISO 302 (50 0258). 1993. Buničiny. Určenie čísla Kappa. Praha: Český normalizační institut, 8 s.

MILICHOVSKÝ, M., KADEŘÁBEK, V., MURCKOVÁ, E., TOMIS, B., GEBRTOVÁ, J. 1979. Návod pro laboratorní cvičení z chemické technologie papíru a celulózy. 1. část. Pardubice: Vysoká škola chemickotechnologická v Pardubicích, 88 s.

OMER, S. H., KHIDER, T. O., ELZAKI, O. T. et al. Application of soda-AQ pulping to agricultural waste (okra stalks) from Sudan. BMC Chem Eng 1, 6 (2019).

SIXTA, H. Handbook of pulp. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006, 1369 s. ISBN 3-527-30999-3.

SOUČEK, M. 1977. Zkoušení papíru. Praha: SNTL, 1977, 344 s.

Tappi Test Methods. Georgia: Tappi Press Atlanta, 2004. ISBN 1-930657-33-1.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Kateřina Hájková, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 13. 7. 2022

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 31. 8. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 23. 02. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Simulace výroby chemické buničiny ze zemědělského odpadu" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 1.4. 2023



Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Kateřině Hájkové, Ph.D. za její ochotu, za vedení mé diplomové práce a za poskytnutí velkého množství literatury ke zpracování. Také jí patří poděkování za korekturu samotné práce a za odborné vedení při výzkumu a měření dat. Dále pak děkuji firmě OP papírna, s.r.o. za dodání veškerých surovin pro výzkum. Jmenovitě děkuji Ing. Romaně Škrabákové a Karlu Škrabáčkovi za pomoc s kontrolou práce a poskytnutí veškeré podpory pro napsání této diplomové práce.

Simulace výroby chemické buničiny ze zemědělského odpadu

Souhrn

Diplomová práce pojednává o výrobě chemické buničiny z jednoletých rostlin. V práci jsem se zaměřil na konopí, len a sisal. Konkrétně na problematiku jejich zpracování, z pohledu chemického, tak i papírenského. Zkušební vzorky rostlin jsou testovány za laboratorních podmínek na chemické složení. Zároveň je ze surovin vyrobena chemická buničina. Výsledky a postupy u jednotlivých zkoušek, i s kroky výroby, jsou zaznamenány a popsány v následujícím textu samotné práce. Součástí této práce jsou grafické a tabulkové zpracování i porovnání jednotlivých výsledných hodnot u všech měřených vzorků. Z veškerých typů byla vyhodnocena jednoletá rostlina s nejlepšími vlastnostmi pro papírenské využití.

Klíčová slova: chemická vláknina, natronová buničina, dusičnato-alkalická buničina, chemická analýza, mechanické vlastnosti

Simulation of chemical pulp production from agricultural waste

Summary

The master thesis deals with the production of chemical pulp from annual plants. At work, I focused on hemp, flax, and sisal. Here I will focus on the issue of their processing from a chemical and papermaking point of view. Plant test samples are tested under laboratory conditions for mechanical strength. The results and procedures for individual tests, including production steps, are recorded and described in the following text of the work itself. Part of this work is graphical and tabular processing and comparing individual resulting values for all measured samples. The annual plant with the best properties for papermaking is evaluated from all types.

Keywords: chemical pulp, soda pulp, nitrate-alkaline pulp, chemical analysis, mechanical properties

Obsah

1 Úvod	11
2 Cíl práce	12
3 Literární rešerše.....	13
3.1 Jednoleté rostliny a jejich zemědělský odpad	13
3.1.1 Len	13
3.1.1.1 Využití lnu a jeho druhy	14
3.1.2 Konopí	14
3.1.2.1 Využití konopí a jeho druhy	15
3.1.2.2 Léčivé účinky konopí	15
3.1.2.3 Použití ve stavebnictví a oděvním průmyslu	16
3.1.3 Sisal	16
3.1.3.1 Využití sisalu	16
3.1.3.2 Odrůdy agáve	17
3.2 Papír	17
3.2.1 Výroba papíru	17
3.2.1.1 Historický vývoj výroby papíru	17
3.2.1.2 Výroba buničiny v současné době	18
3.2.2 Zpracování vlákniny	18
3.2.2.1 Chemické zpracování	18
3.2.2.2 Mechanické zpracování	19
3.2.3 Zdroje vláken na výrobu papíru	19
3.2.4 Výroba papíru z jednoletých rostlin	20
3.2.4.1 Charakteristika nedřevného vlákna	20
3.2.4.2 Chemické a morfologické vlastnosti nedřevných vláken	20
3.2.4.3 Procesy rozvlákňování	21
3.2.5 Výroba papírenské vlákniny používaná u jednoletých rostlin	23
3.2.5.1 Dusičnано-alkalická várka	23
3.2.5.2 Natronová várka	23
3.2.5.3 Neutrálně sulfitový způsob	23
3.2.5.4 Metoda Organosolv	24
3.2.5.5 Chemicko-mechanická metoda	24

3.3 Souhrn dosavadních poznatků	25
4 Metodika	26
4.1 Suroviny	26
4.2 Chemická analýza primární suroviny	26
4.2.1 Mletí primární suroviny	26
4.2.2 Sítování vzorku	26
4.2.3 Stanovení sušiny a vlhkosti vzorku	27
4.2.4 Stanovení popela	27
4.2.5 Extrakce vzorku ethanol-toluenem	28
4.2.6 Stanovení obsahu celulózy ve vzorku dle Seiferta	29
4.2.7 Stanovení obsahu ligninu ve vzorku dle Klasona	30
4.3 Výroba buničiny	30
4.3.1 Natronová várka	31
4.3.1.1 Použité chemikálie	31
4.3.1.2 Příprava varné chemikálie	32
4.3.1.3 Pracovní postup várky	32
4.3.1.4 Praní natronové buničiny	33
4.3.2 Dusičnano-alkalická várka	34
4.3.2.1 Použité chemikálie	34
4.3.2.2 Pracovní postup várky	35
4.4 Analýza černého louhu	35
4.4.1 Stanovení sušiny	36
4.4.2 Měření pH	36
4.4.3 Hustota	36
4.4.4 Dynamická viskozita	37
4.4.5 Mezipovrchové napětí	38
4.4.6 Koncentrace alkalického ligninu	40
4.5 Analýza buničiny	40
4.5.1 Koncentrace neprovarů	40
4.5.2 Celkový výtěžek	41
4.5.3 Polymerační stupeň	41
4.5.4 Rheosedimentace	42

4.5.5 Kappa číslo	45
4.5.5.1 Stanovení faktoru thiosíranu	45
4.5.5.2 Slepý pokus	45
4.5.5.3 Vlastní stanovení	46
4.5.5.4 Výpočet Kappa čísla	46
4.6 Výroba zkušebních archů	47
4.6.1 Rozvlákňování	47
4.6.2 Výroba archů	48
4.7 Mechanické vlastnosti papíru	49
4.7.1 Pevnost v tahu	49
4.7.1.1 Tržné zatížení	50
4.7.1.2 Tržná délka	50
4.7.1.3 Relativní prodloužení	51
4.7.1.4 Pevnost v tahu	51
4.7.1.5 Index absorpce tažné práce	51
4.7.2 Pevnost v průtlaku	52
4.7.3 Stanovení propustnosti pro vzduch podle Gurleye	53
5 Výsledky	54
5.1 Chemická analýza primární suroviny	54
5.2 Výroba buničiny	54
5.3 Analýza černého louhu	56
5.4 Analýza buničiny	56
5.5 Mechanické vlastnosti papíru	58
6 Diskuze	59
6.1 Chemická analýza primární suroviny	59
6.2 Analýza černého louhu	60
6.3 Analýza buničiny	61
6.4 Mechanické vlastnosti papíru	61
7 Závěr	63
8 Literatura	66
9 Seznam použitých symbolů	71

1 Úvod

V současné době dochází ke znatelnému nárůstu cen za kulatinu. Toto se dotýká jak pilařského průmyslu, tak i průmyslu papírenského. Papírny čerpají odpad z pilnic nebo jiných dřevařských výroben, bohužel toto nestačí, tím vzniká zájem o kulatinu. Jenom v České republice se pohybuje spotřeba papíru okolo 1,33 milionů tun ročně, což v přepočtu, když na jednu tunu papíru je potřeba cca 1,5 tuny dřeva, vychází 2,66 milionů tun čistě jen dřeva za rok. Toto množství odpovídá asi 5,9 mil m³ smrkové dřevoviny. Takto to nemůžeme jednoznačně počítat, jelikož do celkového množství není zahrnuto použití recyklovaného papíru.

Jednou z částí této práce je snaha se věnovat možnosti výrobě papíru z jednoletých rostlin, a to konkrétně z lnu, sisalu a konopí, které budou vyrobeny natronovým a dusičnано-alkalickým způsobem a porovnat s buničinou vyrobenou firmou OP papírna s.r.o. Následně se z buničiny vytvoří archy, které budou posouzeny na mechanické vlastnosti a následně porovnány s mechanickými vlastnostmi papíru vyrobeného z jehličnanů.

Druhá část je věnována odpadní látce vzniklé při výrobě papíru, černému louhu. Zde se budou stanovovat jeho základní fyzikální vlastnosti, které se následně porovnájí s již hotovými vzorky kukuřice a výluhy z listnáčů a jehličnanů.

2 Cíl práce

Hlavním cílem této práce bylo uskutečnit diskontinuální natronové a dusičnано-alkalické várky, lnu, konopí a sisalu. Složení primárních surovin (len, konopí, sisal) charakterizovat koncentrací Seifertovy celulózy, Klasonova ligninu, popela a látek extrahovatelných do binární směsi ethanol-toluen. Sledován je vliv použitého varného postupu na celkový výtěžek a množství neprovarů.

U vyrobených produktů – buničiny a louhu stanovit vybrané vlastnosti a porovnat je mezi jednotlivými typy.

Z fyzikálních vlastností louhu je to hustota, viskozita, mezipovrchové napětí a celková sušina. Z obecných vlastností buničiny jde o stupeň odvaření (Kappa číslo), průměrný polymerační stupeň polymerace, rychlost sedimentace. A u výsledného produktu vyrobeného papíru se jedná o mechanické vlastnosti – pevnost v tahu, v průtlaku a propustnost pro vzduch.

3 Literární rešerše

3.1 Jednoleté rostliny a jejich zemědělský odpad

Jednoleté rostliny neboli jednoletky jsou ty rostliny, které dospívají, kvetou a odumírají v jednom roce. Jedná se hlavně o ty rostliny, které nepřečkávají zimu, ať již celé rostliny, jejich semena nebo výtrusy. Někdy se může stát, pokud to vegetační období dovolí, že i jednoletky přežijí do dalšího roku. Ke známým druhům jednoletek patří převážně obilí, len či konopí a rostliny s velmi krátkou vegetační dobou jako je agáve sisalové (*Jednoletá rostlina – Multimediaexpo.cz*, 2014).

Mezi zemědělské odpady řadíme nejčastěji právě slámu, natě, znehodnocená krmiva, silážní šťávy, listí ovocných dřevin, nadzemní hmotu plodin jako jsou jeteloviny, luskoviny, olejninu a byliny (*Odpady ze zemědělství a lesnictví*, 2023).

3.1.1 Len

Len patří do čeledi lnu, kterou známe jako *Linaceae*. Zde najdeme asi dalších 90 různých druhů rostlin, které se vyskytují po celém světě. Nejvíce se těmto rostlinám daří v oblasti Středomoří a na jihozápadě USA. Len setý, který je nejvíce využívaný, pochází z východní oblasti Středomoří, kde se využíval již kolem roku 5000 př. n. l. na léčení dýchacích cest. Lněná vlákna byla využívána i k mumifikaci ve starém Egyptě, důkazem toho byla zkamenělá lněná semínka nalezená na mumiích v pyramidách (*Flax seeds*, 2022).

Len je jednoletá rostlina, která dorůstá výšky 50 až 120 cm, má kopinaté (jednoduché) listy. Len má pětičlenné květy nejčastěji modré, bílé nebo vzácněji růžové barvy, které kvetou na konci května a začátkem srpna. Po opylení se z květu utvoří semenné kulaté lusky složené z pěti oddílů, z nichž má každý dvě semena zabarvená do zlaté nebo hnědé barvy. Semena dozrávají od konce července do září, během dozrání samotná rostlina hnědne a umírá. Doba sklizně nastává po zežloutnutí lusku a semena uvnitř chrastí (*Flax seeds*, 2022).

3.1.1.1 Využití lnu a jeho druhy

Len se nejvíce využívá na semeno, olej a vlákninu. Lněné semeno obsahuje 18–20 % bílkovin, které mají podobné složení jako bílkoviny v sójovém bobu. Jelikož se jedná o olejnaté semeno, tak obsahuje vysoké množství oleje, a to až 45 %. Důležité je právě složení lněného oleje, protože len je jeden z nejvýznamnějších zdrojů rostlinných Omega3 a Omega6 nasyčených kyselin (*Len setý*, 2023).

Odrůdy lnu na vlákninu:

- *Avian* – dobrá kvalita vlákna a jeho vysoký výnos. Tyto rostliny jsou náchylné na povětrnostní počasí, lámou se a ohýbají (*Len setý*, 2023).
- *Felice* – mají vysoký výnos vlákna a dobrou odolnost vůči chorobám. Nevýhodou je, že mladé rostliny rostou velmi pomalu, zralé jsou až v období od srpna do září (*Len setý*, 2023).
- *Lisette* – výhodou je jejich rychlý vývoj a zralost mladých rostlin od srpna do září. Odrůda je odolná vůči většině chorob. Má velké výnosy dlouhých vláken (*Len setý*, 2023).

Odrůdy lnu na olej a lněné semínko:

- *Ingot* – odrůda, jejíž semena jsou malá a žlutá. Samotná rostlina je oproti ostatním odrůdám vysoká (*Len setý*, 2023).
- *Lirina* – rostlina mající modré květy je velice bohatá na olej, velmi výnosná. Je ale náchylnější na stabilitu. Dozrává začátkem srpna (*Len setý*, 2023).
- *LS Koral* – zlatá odrůda se světle žlutými semeny a vysokým obsahem oleje (*Len setý*, 2023).
- *Serenade* – lněná odrůda s bílým květem a větším potenciálem na výnos semene. Naproti tomu má nižší obsah oleje. Díky její menší výšce je tato odrůda stabilnější (*Len setý*, 2023).

3.1.2 Konopí

První zmínka o konopí je z dob před sedmi tisíci lety z Babylonie. Nejstarší objev byl však v Číně, kde se našla vlákna stará kolem šesti tisíc let. Naopak prvním písemným

dokumentem o použití při terapii je z roku 2737-2697 před naším letopočtem, jehož autorem byl tehdejší císař Šen-nung, který byl uznávaný léčitel (*Konopí seté*, 2022).

Jedná se o jednoletou rostlinu dosahující výšky 80-350 centimetrů. Rostlina je přímá v horní části s krátce větvenou lodyhou. Samičí rostlina je větší než rostlina samčí, je více olistěná s tmavší barvou. Květy samčí jsou zabarveny do žluta na rozdíl od květů samičích, ty mají barvu tmavozelenou (*Konopí seté*, 2022).

3.1.2.1 Využití konopí a jeho druhy

V České republice se konopí začalo legálně využívat k léčebným účelům v roce 2013. Tuto činnost má zde pod kontrolou ministerstvo zdravotnictví, které jako příslušný orgán vydává potřebná povolení k pěstitelství (*Konopí seté*, 2022).

3.1.2.2 Léčivé účinky konopí

V minulosti již některé státy zlegalizovaly používání lékařské marihuany, i díky měnícímu se názoru odborníků a lékařů. Při intenzivním kouření, kdy je konopí využíváno jako omamná látka – droga a je v tomto směru použito pro nelékařské účely, má tato látka veliké negativní účinky. Pouze jen šest procent studií prokázalo, že má marihuana léčivé vlastnosti.

Nejzákladnější účinky konopí s ohledem na lékařskou marihuanu jsou: léčba zeleného zákalu, zvýšení kapacity plic, kladně ovlivňuje epileptické záchvaty, snižuje příznaky Dravetova syndromu, napomáhá v zastavení šíření rakoviny, snižuje úzkost, snižuje bolesti při roztroušené skleróze, motivuje kreativitu mozku a chrání ho proti mozkové příhodě.

Ač má konopí svoje pozitivní účinky, má i své negativní, jednak může způsobit psychózu, zvyšuje sklony k depresím, způsobuje problémy s rovnováhou a v určitém množství může být návykové (*Léčebná síla konopí*, 2022).

3.1.2.3 Použití ve stavebnictví a oděvním průmyslu

Konopí je vlákno funkční, které roste na poli. Mezi výhody patří termoregulační vlastnosti a savost, v konopném tričku se tedy člověk méně potí. Naopak ve stavebnictví je savost problém. Vlákno je navíc samo o sobě antibakteriální (*Konopné vlákno*, 2020).

Na rozdíl od bavlny se konopí pěstuje i v mírném páse a není je potřeba vozit z tropických oblastí. Má až čtyřikrát větší výtěž než bavlna s tím, že k růstu potřebuje až o padesát procent méně závlahy. Zbylé vlastnosti má konopí poměrně stejné jako bavlna, proto je ve velkém využíváno na vlákno při výrobě oblečení (*Konopné vlákno*, 2020).

Dále je konopí využíváno ve stavebnictví, je to dobrý izolant. Díky jeho vláknům lze zhotovovat desky, výhodou je jejich pružnost na rozdíl například od dřeva a dále má i větší pevnost než desky dřevovláknité. Konopná tkanina je odolná vůči horku, UV záření a povětrnostním vlivům, čehož je využíváno na výrobu provazů, sítí anebo dokonce plachet.

3.1.3 Sisal

Sisal, celým svým názvem sisalové vlákno, se získává z listů agáve sisalové, *Agave sisalana*. Rostlina pochází ze Střední Ameriky z provincie Yucatán. Svůj název získala podle přístavního města Sisal, odkud se vyváželo její vlákno. V současnosti se nejvíce sisalu vyváží z Tanzanie, Brazílie, Angoly, Keni a Mexika, a to do Spojených států amerických, Velké Británie, Francie i k nám. Jedná se o rostlinu zařazenou do kategorie kaktusů a sukulentů, čeledi *Amaryllidaceae*. Samotný sisal se z rostliny získává především ručně, tento produkt náleží mezi velmi odolné materiály (*AtlasRostlin.cz*, 2023).

Agáve sisalová má tlustý, relativně krátký dřevitý stonek, ze kterého vyrůstají široké dužnaté listy až do výšky dvou metrů. Celá rostlina tak může dosahovat výšky okolo 8 metrů. Každý list je zakončený hrotem, po odkvětu rostlina zahyne (*Sisalové vlákno*, 2022).

3.1.3.1 Využití sisalu

Díky stavbě vláken je sisal odolná rostlina v oděru, má dobré absorpční a sorpční vlastnosti. Vlákno je pevné, poddajné, hrubé, tuhé a málo pružné. Díky takovým vlastnostem

je vhodný na různé tkaniny. Zejména se z jeho vláken vyrábí provazy, nábytkové tkaniny, peelingové rukavice do sauny, koberce a rohože. Nevhodný je na použití v textilním průmyslu (*Vlákna: Sisal – SI, 2022*).

3.1.3.2 Odrůdy agáve

Celkový počet odrůd přesahuje něco nad 300 druhů, základními jsou *Agave Americana Marginata*, *Agave Filifera*, *Agave Sisalana*, *Agave Stricta*, *Agave Victoriae-Reginae*, *Agave Yuccifolia* (*Agáve, 2019*).

3.2 Papír

Slovo papír je odvozen od názvu rákosovité vlákniny papyru. Papyrus je produkt šáchoru papírodárného a roste ve velké míře podél řeky Nil protékající Egyptem. Papír je základním materiálem využívaným v dnešních i dávných dobách pro komunikaci, zachování informací, slouží pro výrobu obalových materiálů, v Číně byl použit i na výrobu stěn a v celém světě je používán jako tepelná izolace (*Britt, 2020*).

3.2.1 Výroba papíru

3.2.1.1 Historický vývoj výroby papíru

Samotnou výrobu papíru lze vysledovat až do roku 105 našeho letopočtu do Číny. Zde úředník působící u císařského dvora Cchaj Lun vytvořil list papíru složený z morušových a jiných vláken, starých hadrů a konopného odpadu. Na jeho cestách směrem na západ se toto umění dostalo do Střední Asie. Teprve až kolem roku 751 až 793 je vyroben první papír v Bagdádu se zlatým věkem islámské kultury, která sebou přinesla papír až na hranice Evropy.

Ve 14. století již v Evropě stála řada papíren, konkrétně ve Španělsku, Francii, Itálii a Německu. V 50. letech 15. století byl vynalezen knihtisk, tím se rapidně zvýšila poptávka po výrobě papíru. Během 18. století se podstatně výroba papíru nemění, stále se využívají lněné

a bavlněné hadry jako hlavní surovina, avšak z důvodu menší dostupnosti surovin je zapotřebí využít hojnějšího materiálu, dřeva (Bajpai, 2012).

V roce 1800 je vydána kniha, která popisuje vývoj praktických metod výroby papíru z dřevní a jiné rostlinné buničiny. Postupem se takto vyvinulo několik hlavních procesů výroby, které zbavují průmysl na závislosti používání bavlněných a lněných hadrů. Vývoj se zaměřil na hlavní dvě cesty a to chemickou, kde docházelo k rozpouštění ligninu pomocí chemikálií a cestu mechanickou, kdy se hmota drtila pomocí brusného kamene. Ovšem mechanická metoda neuměla vytvořit tak bílou vlákninu z důvodu zůstatku ligninu a dalších složek v dřevovině. Buničina, vláknina vznikající chemickou cestou z mletého dřeva, byla poprvé zhotovena v Německu roku 1840. Tento proces se začíná ve velké míře používat až kolem roku 1870. Patent na sulfitovou buničinu je vydán ve Spojených státech v roce 1867 (Britt, 2020).

V dnešní době je nejvíce využívána sulfátová (alkalická) technologie a v menší míře natronová (alkalická) a sulfitová (kyselá) metoda k výrobě buničiny.

3.2.1.2 Výroba buničiny v současné době

Přijaté dřevo do celulózky může mít různou formu. Nejvíce se zde zohledňuje proces, jakým má být dřevo rozvlákněno a původ suroviny. Příjem probíhá ve formě kulatiny nebo štěpky, samotná kulatina se musí před vstupem do dalšího procesu odkornit, dále následuje rozštěpkování (*Pulp and Paper Manufacturing Process*, 2022).

3.2.2 Zpracování vlákniny

3.2.2.1 Chemické zpracování

V další fázi se některé kroky ve zpracování mohou lišit, záleží totiž na vstupních surovinách. Štěpky jsou uchovávány ve velkém kotli, kam se následně přidávají příslušné varné chemikálie k výrobě chemické buničiny.

Nadále jsou třísky nahřívány párou při specifických teplotách, aby dřevo změklo, částečně se rozpustil lignin a extrakční látky. Některé z fermentorů pracují kontinuálně s přísunem štěpky a louhu, tyto suroviny se přivádí přerušovaně. Takto dochází k úpravě vsázky

najednou. Potom je obsah vypuštěn do další nádoby, kde se odvedou těkavé látky s párou. Následně se vrátí buničina zpět do cyklu výroby (*Pulp and Paper Manufacturing Process*, 2022).

3.2.2.2 Mechanické zpracování

Mechanický proces je výrazně jednodušší. Mezi dva brusné kameny se sype štěpka, která se mele. Díky tření se vlákna od sebe oddělí. Celý tento proces probíhá s vysokým obsahem vody v suspenzi. Po rozvláknění je přebytečná voda odvedena a znovu použita.

Rozvlákněná dřevovina nadále putuje do kádí, kde probíhá proces bělení. Bělená dřevovina je ta, která je zbavena nežádoucích zabarvujících nečistot pomocí hydroxidu sodného. Bělící činidla a jejich pořadí, ve kterém se použijí, je závislé na řadě faktorů, nejvýznamnější z nich je cena chemikálií a typ buničiny. Bělení mechanické dřevoviny je navrženo tak, aby selektivně ničilo barevné nečistoty, ale ponechalo lignin s celulózu nedotčený. Dalšími chemikáliemi přidanými do procesu jsou hydrogensířičitan sodný, chlornan vápenatý nebo sodný, peroxid vodíku a další (*Pulp and Paper Manufacturing Process*, 2022).

3.2.3 Zdroje vláken na výrobu papíru

Všechny buněčné stěny obsahují vlákna celulózy, jak u víceletých rostlin, tak rostlin jednoletých. U jednoletých rostlin tvoří asi jednu třetinu stavební struktury a kolem poloviny u rostlin víceletých.

Nejvíce rozšířenou surovinou v dnešní době je dřevo a recyklovaný papír odpadní nebo lepenka. Další jsou textilní vlákna z bavlny nebo lnu, ty se využívají zejména u papíru, kde je požadována velká pevnost. Poslední surovinou jsou syntetická neboli umělá vlákna, kde největší výhodou použití je to, že mohou mít vlákna stejnou délku a průměr, což u přírodních materiálů nelze dosáhnout (Britt, 2020).

3.2.4 Výroba papíru z jednoletých rostlin

3.2.4.1 Charakteristika nedřevného vlákna

Většina vláken při výrobě buničiny z nedřevných vláken je použita z jednoletých rostlin, které za krátkou dobu dosáhnou svoji maximální velikosti na rozdíl od dřevné hmoty, která roste desítky let. Některé výjimky zde ale nalezneme, třeba bambus, nebo hesperaloe (Azzez, 2018).

Mezi hlavní buničiny z nedřevných vláken náleží bagasa z cukrové třtiny, obilná sláma, bambus, rákos, trávy, stonky z kukuřice, čiroku atd. V dnešní době již existuje několik typů slámek, které se hojně využívají v procesu výroby buničiny. Z těchto slámek je na rozvláknění nejvíce vhodné a používané žito, pšenice a řepka, ty jsou dostupné a hodí se na výrobu papíru s vysokou mechanickou pevností (Azzez, 2018).

Některé rostliny patří mezi speciální, které se mohou rovnat s některými jehličnany a většinou druhů listnatých dřevin jako je kenaf a obří rákos.

Všechny výše zmíněné i další zde neuvedené rostliny mají různé fyzikální a chemické vlastnosti. Sláma, bagasa a stonky z kukuřice atd. byly porovnány s některými vlákny zhotovenými z tvrdých dřevin, čímž byla zjištěna podobná frakce vláken. Jednoděložné rostliny podle výzkumu obsahují velký podíl velmi tenkostěnných buněk, sudovitých buněk parenchymu a cévy s jemnými buňkami v širokém rozsahu. Dvouděložné zase obsahují jádro z krátkých vláken, které obklopuje vrstva vláken lýkových. Proces je ale nákladný a zdlouhavý díky vysokému obsahu ligninu v jednotlivých vláknech jádra (Azzez, 2018).

3.2.4.2 Chemické a morfologické vlastnosti nedřevných vláken

Tyto vlastnosti hrají tu nejvýznamnější roli při výrobě papíru, jak už u vláken dřevných, tak nedřevných. Morfologie je charakteristika buněčné stěny, podle které je samotné vlákno odvozeno. Rostlinné vlákno je složeno z protáhlé sklerenchymatické buňky, ve které se nachází dobře vyvinuté, obvykle lignifikované stěny, které mají schopnost podpory rostliny. Nejdůležitější je šířka, a hlavně délka vlákna, které se pak mohou zohlednit při výrobě konkrétního papíru na konkrétní použití. Délka a šířka se odlišuje podle druhu rostliny, měkké dřevo má poměr zhruba 60–100:1, tvrdé dřevo 2–60:1. průměrná délka vlákna se pak pohybuje

od 1 do 30 mm, ta nejkratší vlákna nalezneme u trav. Průměrný poměr délky k průměru u nedřevných druhů se pohybuje od 50:1 do 1500:1. Vlákna stonková jsou obecně krátká a mají poměr délky k průměru podobný jako mají listnaté tvrdé dřeviny. Většina vláken má tendenci být více heterogenní, má nižší obsah ligninu, ale za to více celulózy.

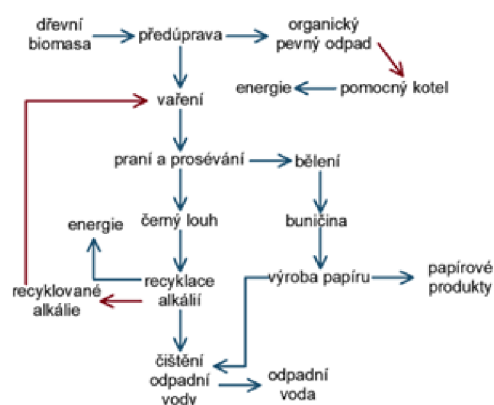
Chemické vlastnosti jsou rozdílné druh od druhu. Významnou roli hraje i samotná půda, ve které rostliny rostou. Dále je růst a jejich vlastnosti ovlivněné klimatem a podnebím. Nedřevné materiály mají samy o sobě obsah křemíku, hemicelulózy a živin vyšší než dřevo, proto se tyto materiály musí nejdříve upravovat. Listy a nevláknitý materiál se odstraňují stejně jako například kůra u dřeva. To má pozitivní vliv na obsah popela a vlastnosti buničiny v papíru.

Celkově je dáno, že délka vlákna přispívá k pevnosti a roztržení papíru. Dále je důležitý poměr obsahu ligninu a celulózy, tyto dvě složky zajišťují pevnost. Naopak přítomnost krátkých vláken ovlivňuje odvodnění z papírenského síta a spojení dlouhých vláken k sobě (Azzez, 2018).

3.2.4.3 Procesy rozvlákňování

Samotné rostliny na rozdíl od dřeva mají menší obsah ligninu, kratší růstové cykly a malé požadavky na zavlažování. Jsou každý rok obnovitelné a mají vysoký roční výnos celulózy ve srovnání se dřevem. Tím pádem je rozvlákňování jednoletých rostlin výhodnější naproti rozvláknění dřeva. Dále jednoleté rostliny mohou být rozvlákněny jednoduchými chemikáliemi (hydroxid sodný). Alkalická náplň je pro delignifikaci těchto materiálů nižší, než je požadována u dřeva. Běžně se používající strategie pro výrobu buničiny mechanické, chemické, tepelné a chemicko-mechanické. Při zpracování jednoletých rostlin je ale lepší využít jen chemický proces rozvláknění z důvodu potřeby degradace ligninu a hemicelulóz na malé, ve vodě rozpustné, molekuly.

Specifické konečné produkty jsou vyráběny na základě volby konkrétního procesu jako je např.: použitá technika, chemikálie, náklady a velikost mlýna. Celkový proces určuje výsledek vytěženého množství buničiny a její kvalitu. Jeden z příkladů zpracování jednoletých rostlin za cílem získat buničinu je uveden na Obrázku 1 (Azzez, 2018).



Obrázek 1 Vývojový diagram procesu výroby buničiny a papíru (Azzes, 2018)

Při výrobě nebělené buničiny s nižší jakostí se nejvíce využívají metody vápenné nebo vápeno-sodné buničiny. Proces je využitelný při rozvláknění hadrů a jutových vláken s lýkovými. Sulfitové, sulfátové a natronové procesy jsou nejvíce používány při výrobě vlákniny z listů a lýkových vláknitých surovin. Tato vlákna mají pak vysoké vlastnosti pevnosti buničiny, větší než buničina vyrobená z měkkého dřeva (Azzes, 2018).

Jednotlivé druhy rozvláknovacích procesů ukazuje Tabulka 1.

Tabulka 1 Specifické způsoby rozvláknění (Azzes, 2018)

Rostlina	Specifický způsob rozvláknění
Bagasa a rýžová sláma	Metoda založená na kyselině dusičné
Všestranné použití (dřevo i jednoleté rostliny)	Sulfátová metoda <ul style="list-style-type: none"> - Vynikající kvalita - Nejvíce využívána
Převážně bavlna	Natronová metoda
Všestranné použití (dřevo i jednoleté rostliny)	Sulfitová metoda <ul style="list-style-type: none"> - Zdlouhavé a komplikované získání varných chemikálií - Způsob je nákladný
Jednoleté rostliny	Metoda Organosolv <ul style="list-style-type: none"> - Využití kyselin nebo alkoholů jako rozpouštědla
Jednoleté rostliny	Metoda Formacell <ul style="list-style-type: none"> - Použití kyseliny mravenčí a octové - Delignifikace probíhá při nižších teplotách a tlaku
Jednoleté rostliny	Biorozvláknovací proces <ul style="list-style-type: none"> - Šetrný k životnímu prostředí - Nedosahuje potřebné pevnosti

3.2.5 Výroba papírenské vlákniny používaná u jednoletých rostlin

3.2.5.1 Dusičnato-alkalická várka

V tomto procesu je použita jako varná chemikálie 6% kyselina dusičná, která uvolňuje hydrolyticky lignin-sacharidové vazby, tudíž se lignin nitruje a částečně oxiduje na nitrolignin. Nitrolignin je poté při extrakci 5% roztokem hydroxidu sodného rozpuštěn, po rozpuštění nitroligninu zůstává poměrně čistá celulóza. Ta je na konci samotného procesu výroby buničiny neutralizována 1% roztokem kyseliny octové (Hájková et al., 2021).

3.2.5.2 Natronová várka

Proces natronové výroby je znám již od roku 1853, kdy byl přihlášen patent na alkalický rozklad dřeva za teploty a zvýšeného tlaku. Avšak už dříve se používali studené alkálie na delignifikaci bezdřevých rostlin, dokonce se uvádí, že okolo roku 750 začali používat tento způsob Arabové, kteří se učili výrobu papíru od čínských zajatců. První výroba celulózy začala roku 1860 v Pensylvánii, zde se začalo působit na dřevo teplotou 105 °C a 5,5% hydroxidem sodným. Po začátkách využívání natronového procesu nedosahuje sulfitový způsob uplatnění, veliké výhody shledáváme v levnějších chemikáliích a ve vyšším výtěžku buničiny. Výhodou je zde i jednodušší zpracování jednoletých rostlin na buničinu, právě pro to je tento způsob komerčně využíván na výrobu buničiny z jednoletých rostlin (Kačík a Tribulová, 2020; Omer, 2019).

3.2.5.3 Neutrálně sulfitový způsob

Polobuničiny v porovnání s buničinou jsou charakterizovány vyšším zastoupením ligninu a hemicelulóz. Polobuničiny mají vysoký výtěžek a velmi dobré pevnostní vlastnosti. Výtěžek u tohoto způsobu výroby je cca 70 %, tudíž i obsah organické hmoty v louhu je dostatečně vysoký k regeneraci. Hlavní varnou chemikálií je síran sodný s přídavkem či bez přídavku uhličitanu sodného. Při tomto způsobu delignifikace dochází k reakci ligninu a hydrogensířičitanového aniontu, v dalším kroku nám do reakce vstupuje další silný hydroxylový nukleofil, který způsobí, že fragmenty sulfonovaného ligninu snadněji difundují

do varného roztoku. Tento způsob je využíván převážně u listnatého dřeva a jednoletých rostlin (Skalický et al., 1964).

3.2.5.4 Metoda Organosolv

Tento způsob vaření buničiny je vhodný pro nedřevné rostliny, které mohou být při chemické várce považovány za vhodnou alternativu dřeva. Při získání buničiny pomocí kyseliny peroctové je při kyselé delignifikaci nižší spotřeba energie, než je požadována u tradičních metod výroby buničiny.

Při tomto procesu vaření se během oxidace ligninu kyselina octová spotřebuje na kyselinu peroxyoctovou. Peroxid vodíku je spotřebován při tvorbě kyseliny peroxyoctové a současně ztracen při rozkladu během vaření, což má za následek uvolnění molekulárního kyslíku. Výsledná buničina má díky této reakci i vyšší stupeň bělosti, což souvisí se schopností kyseliny peroxyoctové. Kyselina peroxyoctová totiž nejen oxiduje lignin, ale také redukuje či eliminuje její chromoforové skupiny (Barbash et al., 2011).

3.2.5.5 Chemicko-mechanická metoda

Při této metodě má vlákna velmi nízkou pevnost, tudíž nelze použít pro výrobu papíru s nižší plošnou hmotností. V celulózo-papírenském průmyslu však lze využít tuto vlákninu pro tvorbu lisovaných produktů právě z jednoletých rostlin.

Jelikož tyto způsoby tvorby vlákniny probíhají za studena, nedochází k takové delignifikaci jako u chemických způsobů probíhající za zvýšené teploty. Avšak výtěžnost těchto procesů je výrazně vyšší než u varných metod.

Metody získání chemicko-mechanické vlákniny můžeme rozdělit podle použitých chemikálií, a to na:

- Studený neutrálně sulfitový způsob – kdy je použito siřičitanu a uhličitanu sodného k tvorbě vlákniny.
- Studený alkalický sulfitový způsob – kdy je využíván pouze siřičitan sodný.
- Studený natronový způsob – kdy je jako chemikálie použit hydroxid sodný (Potůček et al., 2016).

3.3 Souhrn dosavadních poznatků

Z důvodu nedostatku vláknitých surovin, zejména jehličnatého dřeva, je v současnosti v celulózo-papírenském průmyslu už stálým jevem využití ostatních rostlinných materiálů. To je způsobeno stoupající výrobou buničiny, pro kterou nestačí lesní zásoby některých států. Tento nedostatek nutí průmyslově používat ve zvýšené míře i jiné suroviny. Patří sem dřeva listnatých stromů, ale i rychle rostoucí rostliny, především jednoleté rostliny (Kozmál, 1958).

Jednoleté rostliny se zpracovávají na polobuničinu a buničinu mechanicko-chemickým či chemickým způsobem. Nevhodné je použití kyselých sulfitových postupů z důvodu snadné hydrolyzy pentózanů a vysokého obsahu oxidu křemičitého. Buničina ze slámy má dobré pevnostní vlastnosti, ale její krátká vlákna snižují dynamickou pevnost (Bučko, 2001).

Buničinou vytvořenou ze lnu se zabývali Taha et al. (2021), kteří přidávali extrakty jako přísady do buničiny ze lněných vláken a následně zkoumali mechanické a protiplísňové vlastnosti, bohužel na pevnostní vlastnosti měl negativní vliv použitý extrakt.

Konopí použili pro výrobu buničiny Amode a Jeetah (2021), a to jak natronovým, tak i sulfátovým způsobem. Dokonce v případě natronového způsobu výroby byl zjištěn vyšší celkový výtěžek, což může být způsobeno tím, že tato metoda přispěla k větší delignifikaci právě Mauricijského konopí.

Sisal zpracovávali Bosco et al. (2022) převážně z důvodu velkého textilního odpadu. Jako možná alternativa recyklace se jevila právě výroba buničiny z tohoto materiálu. Tito autoři dosáhli celkového výtěžku okolo 50 % a také pevnostní vlastnosti byly pozitivní, proto uvádí odpady sisalových vláken jako slibnou potenciální surovinu pro výrobu papírové buničiny.

Protože doposud chybějí informace o dusičnано-alkalické várce těchto surovin, bylo jedním z cílů této diplomové práce porovnat natronovou várku s dusičnано-alkalickou pro již zmíněné suroviny.

4 Metodika

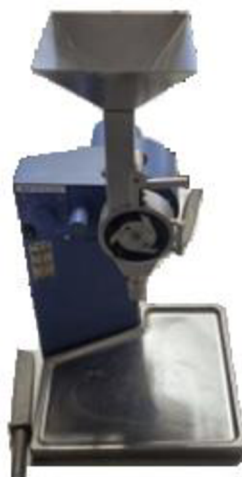
4.1 Suroviny

Primární surovinou byl len, sisal a konopí. Tyto suroviny byly vařeny natronovou a dusičnato-alkalickou metodou delignifikace. Primární suroviny, stejně jako natronovou buničinu ze lnu a konopí, nám dodala firma OP papírna, spadající pod Delfort Group se sídlem v Olšanech.

4.2 Chemická analýza primární suroviny

4.2.1 Mletí primární suroviny

Mletí suroviny (konopí, lnu i sisalu) probíhalo v nožovém mlýnu IKA MF 10 BASIC (Staufen, Německo) za laboratorních podmínek. Vlákna jednoletých rostlin byla mleta z důvodu jejich délky, abychom získali homogenní vzorek pro chemickou analýzu.



Obrázek 2 Nožový mlýn

4.2.2 Sítování vzorku

K sítování byla použita dvě síta o jiných frakcích. První síto mělo plechovou konstrukci se čtvercovými otvory o jednom oku velikosti 8 mm. Druhé síto mělo menší frakci, bylo tvořeno

drátěnou tkanou sítí se čtvercovými oky o rozměru strany 0,315 mm. Pod jemným sítím byla umístěna mísa, která zachytávala propad. Pro chemickou analýzu byl použit vzorek, který propadl prvním sítím a ulpěl na sítu druhém. Tato operace probíhala takovým způsobem, aby nedocházelo kvůli malé frakci k ucpávání frit.

4.2.3 Stanovení sušiny a vlhkosti vzorku

Stanovení vlhkosti probíhalo podle normy Tappi T 210 cm-03 (TAPPI, 2004). Do váženky bylo naváženo cca 5 g vzdušně suchého vzorku (v. s.). Vzorek byl vložen do sušárny o teplotě 105 °C do zajištění konstantní hmotnosti. Po této době byl vzorek zvážen, tím byla určena hmotnost absolutně suchého vzorku (a. s.).

Sušina, x_s , je vyjádřena pomocí vztahu

$$x_s = \frac{m_{a.s.}}{m_{v.s.}} \cdot 100, \quad (1)$$

kde: $m_{v.s.}$ [g] hmotnost vzdušně suchého vzorku

$m_{a.s.}$ [g] hmotnost absolutně suchého vzorku

Pro vlhkost, x_v , platí vztah

$$x_v = 100 - x_s, \quad (2)$$

kde: x_s [%] sušina vzorku (TAPPI, 2004)

4.2.4 Stanovení popela

Ke stanovení popela byl použit vzorek po stanovení sušiny. Popel byl určen dle normy Tappi T 211 om-02 (TAPPI, 2004).

Vzorky byly naváženy do porcelánových kelímků. Následovalo spálení vzorku nad kahanem v digestoři a poté žihání v peci při teplotě 525 °C po dobu čtyř hodin. Poté byla zvážena hmotnost vzorku popela. Z této hmotnosti bylo vypočteno jeho procentuální zastoupení popela, x_p v testovaném vzorku dle vztahu

$$x_p = \frac{m_p}{m_{a.s.}} \cdot 100, \quad (3)$$

kde: m_p [g] hmotnost popela

$m_{a.s.}$ [g] hmotnost absolutně suchého vzorku použitého k analýze (TAPPI, 2004)

4.2.5 Extrakce vzorku ethanol-toluenem

Před analýzou makromolekulárních látek (celulózy a ligninu) bylo nutné nejprve odstranit extrahovatelné látky (Červenka et al., 1980). Jako rozpouštědla byla použita směs ethanolu-toluenu v objemovém poměru 7:3. Samotné stanovení extrahovatelných látek bylo provedeno v souladu s normou Tappi 280 pm-99 (TAPPI, 2004).

Prvním krokem před každou extrakcí bylo zvážení prázdné baňky a extrakční patrony. Každá extrakční patrona byla naplněna vzdušně suchým vzorkem o hmotnosti cca 10 g.

Do varné baňky bylo nalito cca 230 ml směsi ethanolu a toluenu. Po sestavení extrakční aparatury a připojení vodovodního chladiče byl nastaven příkon topného hnízda tak, aby za atmosférického tlaku docházelo k varu rozpouštědla a během jedné hodiny bylo dosaženo čtyř extrakčních cyklů. Celkový čas jedné extrakce činil 6 hodin.

Po posledním extrakčním cyklu byla vyjmuta patrona s tuhým vzorkem ze Soxhletovy aparatury. Varná baňka s kapalným vzorkem byla v digestoři zahřívána, po odpaření většiny rozpouštědla byla baňka s kapalným vzorkem vložena do sušárny a sušena při teplotě 105 °C.

Procentuální zastoupení extrahovatelných látek, x_e , byl vypočten podle rovnice

$$x_e = \frac{\Delta m}{m_{a.s.}} \cdot 100, \quad (4)$$

kde: Δm [g] rozdíl hmotností baňky před a po extrakci

$m_{a.s.}$ [g] hmotnost absolutně suchého vzorku použitého k analýze (TAPPI, 2004)



Obrázek 3 Soxhletova aparatura

4.2.6 Stanovení obsahu celulózy ve vzorku dle Seiferta

Seifertova celulóza byla stanovena podle návodu uvedeného v práci Seiferta (1956). Analýza byla stanovena z rafinátu získaného po extrakci. Do baňky s plochým dnem byl navážen cca 1 g extrahovaného vzorku. Následně ke vzorku bylo napipetováno 6 ml acetylacetonu, 2 ml 1,4-dioxanu a 1,5 ml koncentrované kyseliny chlorovodíkové. Takto připravená baňka byla ponořena do vodní lázně a pod zpětný chladič a vařena 30 minut. Po dokončení varu byla baňka vyjmuta a ponechána vychladnout.

K vychladlému vzorku bylo přidáno 40 ml methanolu a obsah baňky byl zfiltrován na zvážené fritě S3. Poté byl vzorek promýván 100 ml methanolu, 40 ml horké destilované vody, 40 ml dioxanu a 50 ml methanolu. Promývání bylo uskutečněno tak, aby každá promývací látka byla se vzorkem ve styku minimálně 2 minuty. Takto promytý vzorek byl vložen do sušárny o teplotě 105 °C a sušen do konstantní hmotnosti. Poté byl vzorek zvážen a procentuální zastoupení Seifertovy celulózy, x_{SC} , bylo dopočteno podle vzorce

$$x_{SC} = \frac{\Delta m}{m_{a.s.}} \cdot 100, \quad (5)$$

kde: Δm [g] rozdíl hmotnosti na fritě

$m_{a.s.}$ [g] hmotnost absolutně suchého vzorku použitého pro analýzu (Seifert, 1956)

4.2.7 Stanovení obsahu ligninu ve vzorku dle Klasona

Zastoupení ligninu bylo stanoveno v souladu s normou Tappi T 222 om-02 (TAPPI, 2004). Kdy k naváženému vzorku po extrakci, cca 2 g, bylo přidáno 30 ml 72% kyseliny sírové. Za občasného promíchání po uplynutí dvou hodin byl vzorek kvantitativně převeden z kádinky do varné baňky. Před převedením vzorku bylo nejprve do varné baňky nalito 400 ml destilované vody, následovalo přidání vzorku a dolití 750 ml destilované vody. Takto připravené vzorky byly vařeny po dobu 4 hodin pod zpětným chladičem. Po vaření byly baňky vyjmuty z topných hnízd a nechány odstát do druhého dne.

Další den byl nejprve zvážen bezpopelový filtrační papír, přes který byl vzorek následně zfiltrován pomocí Büchnerovy nálevky. Po zfiltrování vzorku z varné baňky, byl vzorek na filtračním papíru promyt 800 ml destilované vody.

Filtrační papír se vzorkem byl převeden do Petriho misky, ve které byl vzorek sušen při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti. Po usušení a zvážení bylo dopočítáno procentuální zastoupení Klasonova ligninu, x_{KL} , dle vzorce

$$x_{KL} = \frac{\Delta m}{m_{a.s.}} \cdot 100, \quad (6)$$

kde: Δm [g] rozdíl hmotnosti na filtračním papíru

$m_{a.s.}$ [g] hmotnost absolutně suchého vzorku použitého pro analýzu (TAPPI, 2004)

4.3 Výroba buničiny

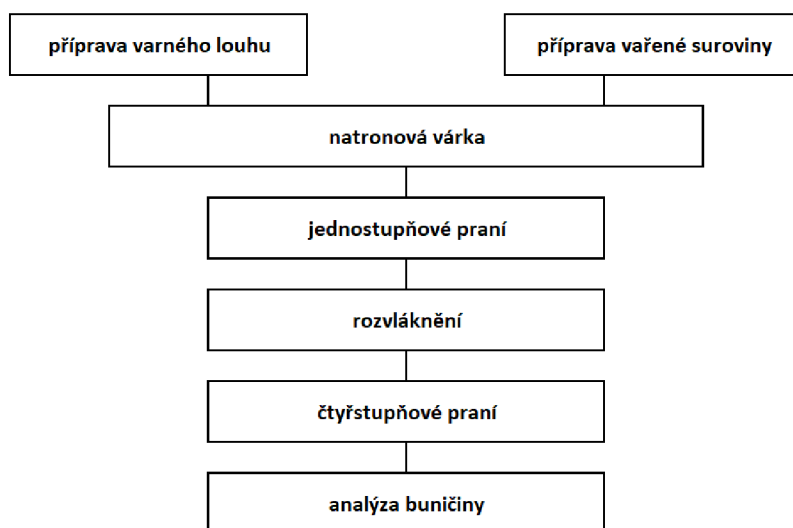
Pod názvem buničina je označována vláknina, která je vyrobená chemickým způsobem z rostlinných surovin, které obsahují celulózu a další inkrustační látky. Při optimálním působení

chemikálií dochází k rozpuštění ligninu s ostatními, celulózu doprovázejícími látkami (*Výroba buničiny*, 2023).

4.3.1 Natronová várka

Výhodou natronového způsobu výroby buničiny je jednoduché zpracování jednoletých rostlin. Proto se tento způsob komerčně využívá hlavně pro výrobu buničiny z jednoletých rostlin (Kačík a Tribulová, 2020).

Celkový postup práce od přípravy vzorků suroviny, přes provedení várky až po zpracování získané buničiny, včetně analýzy buničiny, je znázorněn na následujícím schématu, Obrázek 4.



Obrázek 4 Schéma natronové várky

4.3.1.1 Použité chemikálie

Jako varná chemikálie byl použit roztok hydroxidu sodného o koncentraci $250 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$. Druhou kapalinou byla vodovodní voda použitá k přípravě varného louhu, aby se dosáhlo hydromodulu 5:1.

4.3.1.2 Příprava varné chemikálie

K přípravě varné chemikálie bylo důležité znát sušinu vstupní suroviny. S její pomocí bylo dopočteno složení příslušné varné chemikálie přidávané do varné nádoby. Při výpočtu bylo potřeba počítat i s vodou obsaženou v surovině.

Varná chemikálie byla připravena z roztoku hydroxidu sodného a vodovodní vody. Objem jednotlivých kapalin, při již řečeném hydromodulu 5:1 a zanášce aktivních alkálií 19 %, je uveden v Tabulce 2.

Tabulka 2 Množství jednotlivých kapalin pro natronovou várku

Surovina	Konopí		Len		Sisal	
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 1	Vzorek 2
Hmotnost v. s. materiálu, g	24,86	23,82	20,63	20,89	21,41	23,59
Hmotnostní zlomek vlhkosti	0,0795	0,0795	0,0884	0,0884	0,0789	0,0789
Hydromodul	5	5	5	5	5	5
Zanáška aktivních alkálií, %	19	19	19	19	19	19
Objem NaOH 250 g·l ⁻¹ , ml	22,44	21,50	18,44	18,67	19,34	21,31
Objem vody v surovině, ml	1,98	1,89	1,82	1,85	1,69	1,86
Přídavek vody do varné roztoku, ml	90,01	86,24	73,76	74,69	77,58	85,48
Celkový objem varného louhu, ml	114,42	109,64	94,03	95,21	98,61	108,65

4.3.1.3 Pracovní postup várky

Várka byla uskutečněna v laboratorním vařáku. Potřebný vzorek k várce byl navážen a následně převeden do varné nádoby. Varná chemikálie byla připravena bezprostředně před várkou smícháním roztoku hydroxidu sodného a vodovodní vody. Při dávkování varného louhu do varných nádob bylo třeba roztok dávkovat na surovinu rovnoměrně po celém průřezu nádoby.

Celý varný proces se stával ze čtyř fází. První fází byl ohřev na teplotu 105 °C. Druhá fáze je impregnace při této teplotě po dobu 25–30 minut. Ve třetí fází probíhal ohřev na požadovanou teplotu, 160 °C. Poslední fází byla dovárka, která při teplotě cca 160 °C trvala po dobu potřebnou k dosažení požadovaného H-faktoru, cca 1050 h.

Průběh várky byl zaznamenáván v intervalech, ve kterých byla odečtena a zapsána teplota. Po dosažení teploty 100 °C bylo potřeba pomocí relativní rychlostní konstanty pro natronovou várku, dopočítat H-faktor pro daný čas od začátku várky (Zou, 2002).

H-faktor, jehož hodnota sloužila k identifikaci konce várky, byl odhadnut pomocí následujícího vztahu

$$H_i = H_{i-1} + \frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{60} \cdot \frac{k_{r,i} + k_{r,i-1}}{2}, \quad (7)$$

kde: H [h] H-faktor

τ [min] čas

k_R [-] relativní rychlostní konstanta

Po dosažení požadovaného H-faktoru byl vypnut ohřev vařáku a postupně byly vyjmuty varné nádoby. Po vyjmutí varných nádob probíhalo chlazení ve vodní lázni. Po ochlazení varných nádob byl uvařený obsah kvantitativně převeden do plastových nádob a varné nádoby byly vypláchnuty 100 ml vodovodní vody.

4.3.1.4 Praní natronové buničiny

Z uvařené buničiny byl po částech odstraněn výluh pomocí vymačkávání. Poté byla buničina zředěna 1 l vodovodní vody a promíchána. Následně byla suspenze buničiny zfiltrována pomocí sítka a ručně vyždímána.

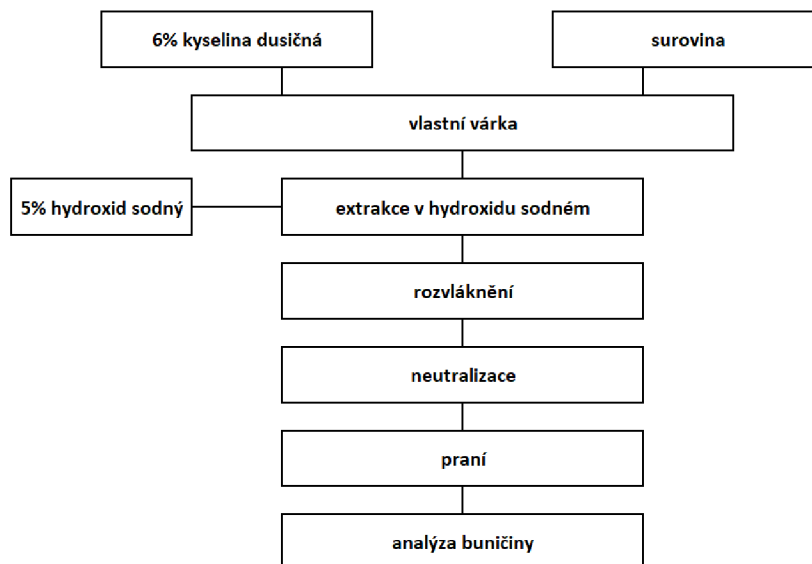
Poté byla buničina kvantitativně převedena do rozvlákňovače, kde byla v 1,5 litru vodovodní vody po dobu 10 minut rozvlákňována. Rozvlákněná suspenze byla opět zfiltrována přes sítko a ručně vyždímána.

Aby byl ze suspenze odstraněn veškerých varný louh, byla následně buničina čtyřstupňově vyprána pomocí zředovacího a zahušťovacího praní. To znamená, že vždy byla suspenze zředěna pomocí 2 l vodovodní vody a po cca 10 minutách zahuštěna filtrací přes sítko a ručním vymačkáním. Jelikož se jednalo o čtyřstupňové praní, tak se tento proces opakoval, aby bylo dosaženo čtyř stupňů.

4.3.2 Dusičnано-alkalická várka

Výhodou dusičnано-alkalického způsobu výroby buničiny je jednak jednoduché zpracování jednoletých rostlin, tak i krátký čas várky samotné. Komerčně se tato várka zatím nevyužívá, ale není k ní zapotřebí takových zařízení jako v případě várky natronové. Celý způsob této metody je založen na tom, že zředěná kyselina dusičná nejprve hydrolyticky uvolňuje lignin-sacharidové vazby a druhou částí této metody je rozpuštění v hydroxidu sodném a získání poměrně čisté buničiny (Hájková et al., 2021).

Celkový postup práce od přípravy vzorků suroviny, přes provedení várky až po zpracování získané buničiny, včetně analýzy buničiny, je znázorněn na následujícím schématu, Obrázek 5.



Obrázek 5 Schéma dusičnано-alkalické várky

4.3.2.1 Použité chemikálie

Jako varná chemikálie byla použita 6% kyselina dusičná. V druhé fázi k extrakci byl použit 5% hydroxid sodný. K fázi neutralizace byla použita 1% kyselina octová. Další kapalinou v procesu dusičnано-alkalické várky byla vodovodní voda, která sloužila k promývání po jednotlivých krocích.

4.3.2.2 Pracovní postup várky

Várka byla uskutečněna ve varné baňce. Potřebný vzorek k várce byl navážen a následně byl převeden do varné nádoby. Jako varná chemikálie sloužila již zmíněná 6% kyselina dusičná. Po aplikaci 1 litru varné chemikálie do varné baňky byla tato baňka umístěna do topného hnízda a její obsah byl pod zpětným chladičem vařen po dobu 30 minut. Po vlastní várce následovalo zfiltrování na sítku a promývání od kyseliny pomocí 2 litrů vodovodní vody po dobu 5 minut a opět zfiltrování.

Další fází byla extrakce v hydroxidu, do kádinky byl převeden již nitrovaný vzorek a k němu byl přidán 1 litr 5% hydroxidu sodného. Takto připravený vzorek byl vložen na plotnu a pod hodinovým sklem byl 15 minut vařen. Opět následovalo zfiltrování a zároveň i získání černého louhu. Po zfiltrování byla vláknina promyta 2 litry vodovodní vody po dobu 10 minut a zfiltrována.

Stejně jako u natronové várky, tak i v případě dusičnано-alkalické várky probíhalo rozvláknění, po kterém následovala desetiminutová fáze neutralizace v kádince pomocí 1 litru 1% kyseliny octové za občasného míchání a opět zfiltrování přes plastové sítko.

A poslední fází bylo vyprání od zbytku chemikálií pomocí vodovodní vody a následné zfiltrování.

4.4 Analýza černého louhu

Černý louh je výstupní (odpadní) louh při výrobě buničín alkalickým procesem. Obsahuje většinu jeho původních varných anorganických prvků, jako před vařením a k tomu rozpuštěnou dřevní hmotu (Sixta, 2006).

Samotná analýza je prováděna kvůli ekologii a možnostem porovnání vstupních a výstupních veličin. Z tohoto důvodu se provádí analýzy fyzikálních vlastností jako jsou celková sušina, pH, hustota, viskozita, mezipovrchové napětí a koncentrace alkalického ligninu.



Obrázek 6 Černé louhy

4.4.1 Stanovení sušiny

Hmotnost celkové sušiny alkalického louhu byla stanovena odpařením 10 ml výluhu v porcelánovém kelímku ve vodní lázni a následným sušením do konstantní hmotnosti (Hájková, 2019).

4.4.2 Měření pH

Měření pH probíhala v laboratoři za laboratorní teploty. Hodnota pH alkalického louhu byla naměřena na přístroji MW102 (Milwaukee, Wisconsin), Obrázek 7.



Obrázek 7 pHmetr

4.4.3 Hustota

Hustota byla určena pyknometrickým stanovením, Obrázek 8. Nejprve byl zvážen prázdný suchý pyknometr, poté byl naplněn destilovanou vodou a zvážen. Posledně byl naplněn

testovaným alkalickým louhem a opět zvážen. Po naměření všech údajů, byla vypočtena hustota černého louhu, ρ , podle vztahu

$$\rho = \frac{m_L - m_1}{m_W - m_1} \rho_W, \quad (8)$$

kde:	m_1	[g]	prázdný suchý pyknometr
	m_L	[g]	pyknometr naplněný analyzovaným černým louhem
	m_W	[g]	pyknometr naplněný destilovanou vodou
	ρ	[kg·m ⁻³]	hustota černého louhu
	ρ_W	[kg·m ⁻³]	hustota destilované vody (Hájková, 2019)



Obrázek 8 Pyknometr

4.4.4 Dynamická viskozita

Viskozita byla měřena pomocí kapilárního Ubbelohdeho viskozimetru, Obrázek 9. První měření bylo provedeno s destilovanou vodou o laboratorní teplotě, tím nám známé i viskozitě.

Destilovaná voda byla nasáta nad vrchní rysku Ubbelohdeho viskozimetru, následně pomocí stopek byla měřena doba průtoku mezi ryskami na viskozimetru. Tento postup byl

proveden i u zkoumaného louhu. Po měření každého vzorku kapaliny byl viskozimetr propláchnut destilovanou vodou. Poté byla stanovena viskozita černého louhu podle vztahu

$$\mu = \frac{\mu_w}{\rho_w t_w} \rho t, \quad (9)$$

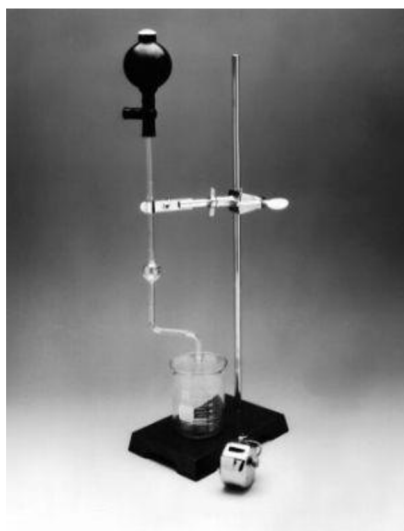
kde:	μ	[Pa·s]	dynamická viskozita černého louhu
	μ_w	[Pa·s]	dynamická viskozita destilované vody
	ρ	[kg·m ⁻³]	hustota černého louhu
	ρ_w	[kg·m ⁻³]	hustota destilované vody
	t	[s]	doba průtoku černého louhu
	t_w	[s]	doba průtoku destilované vody (Hájková, 2019)



Obrázek 9 Ubbelohdeho viskozimetr (Viskozimetr Ubbelohde IVa, 2023)

4.4.5 Mezipovrchové napětí

Mezipovrchové napětí černého louhu bylo stanoveno stalagmometricky, jedná se o kapkovou metodu, která se zakládá na porovnání hmotnosti kapek kapaliny se známým mezipovrchovým napětím (destilovaná voda) a hmotností kapek kapaliny, u níž mezipovrchové napětí bylo analyzováno.



Obrázek 10 Stalagmometr (Stalagmometers, 2023)

Stalagmometr, Obrázek 10, byl naplněn destilovanou vodou o laboratorní teplotě a o známém mezipovrchovém napětí. Mezipovrchové napětí pro destilovanou vodu bylo vypočteno pomocí vztahu

$$\gamma_w = 75,621 - 0,15T_w - 1,0266 \cdot 10^{-4}T_w^2, \quad (10)$$

kde: γ_w [mN·m⁻¹] mezipovrchové napětí vody
 T_w [°C] teplota destilované vody

Na Petriho misku bylo nakapáno 50 kapek destilované vody ze stalagmometru a byla zjištěna jejich hmotnost. Stejný postup byl opakován i s černým louhem. Ze známých naměřených hmotností kapek destilované vody bylo určeno mezipovrchové napětí černého louhu pomocí vztahu

$$\gamma = \gamma_w \frac{m}{m_w}, \quad (11)$$

kde: γ [mN·m⁻¹] mezipovrchové napětí černého louhu
 γ_w [mN·m⁻¹] mezipovrchové napětí destilované vody
 m [g] hmotnost kapek černého louhu
 m_w [g] hmotnost kapek destilované vody (Hájková, 2019)

4.4.6 Koncentrace alkalického ligninu

Při určení koncentrace alkalického ligninu byl nejprve vysrážen vzorek černého louhu pomocí koncentrované kyseliny sírové. Primární roztok alkalického ligninu byl připraven právě rozpuštěním 100 mg vysráženého ligninu v 1 litru vodného roztoku hydroxidu sodného o koncentraci $1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$. Pro tyto vzorky byly zjištěné absorbance při vlnové délce 280 až 290 nm, tyto koncentrace sloužily k vytvoření závislosti, ze které byla určena koncentrace alkalického ligninu.

Hodnoty absorbance byly naměřené pomocí spektrofotometru DR 6000UV-VIS (Hach, Colorado). Na základě naměřených hodnot, z nich byla odvozena závislost absorbance A na koncentraci alkalického ligninu a z té dopočítána koncentrace alkalického ligninu, který byl vyjádřen v $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$.

4.5 Analýza buničiny

U buničiny natronové (konopí, len, sisal) i u dusičnано-alkalické (konopí, len, sisal) byly stanovené obecné vlastnosti, konkrétně celkový výtěžek a množství neprovarů. Dále pro tyto buničiny i pro průmyslově vyráběné natronovým způsobem (konopí, len) bylo z obecných vlastností stanovené číslo kappa, polymerační stupeň a sedimentační rychlost.

4.5.1 Koncentrace neprovarů

U posledního stupně praní (natronová buničina) či u posledního promývání (dusičnано-alkalická buničina) bylo provedeno ruční třídění neprovarů pomocí pinzety. Pomocí tohoto třídění byly odstraněny hrubé neprovary. Tyto neprovary byly vkládány na Petriho misku, poté včetně Petriho misky byly vloženy do sušárny na 4 hodiny při teplotě $105 \text{ }^\circ\text{C}$.

Koncentrace neprovarů byla určena na základě hmotnosti vysušených neprovarů a hmotnosti absolutně suchého materiálu, která byla použita pro varný proces.

4.5.2 Celkový výtěžek

Celkový výtěžek je jedna z obecných vlastností, která charakterizuje vlákninu. Nižší výtěžek obecně mají vlákniny, které jsou zpracovávány chemickým způsobem.

Stanovení celkového výtěžku probíhalo tak, že buničina po separaci neprovarů byla vysušena do konstantní hmotnosti. Z této hmotnosti buničiny a hmotnosti vytríděných neprovarů byl dopočten celkový výtěžek podle vztahu

$$CV = \frac{m_B + m_{HN}}{m_{a.s.}} \cdot 100, \quad (12)$$

kde: CV [%] celkový výtěžek
 m_B [g] hmotnost absolutně suché buničiny
 m_{HN} [g] hmotnost absolutně suchých hrubých neprovarů
 $m_{a.s.}$ [g] hmotnost absolutně suchého vzorku použitého k varnému procesu (Hájková, 2019)

4.5.3 Polymerační stupeň

Buničina pro stanovení polymeračního stupně musela být nejprve rozpuštěna v teatrátu sodném s komplexy železa (FeTNa), po jejím rozpuštění mohl být analyzován průměrný polymerační stupeň pomocí Ubbelohdeho viskozimetru. Aby vzorek mohl být porovnán s původním materiálem, byl stanoven i průměrný polymerační stupeň primární suroviny.

Na základě doby průtoku testovaného rozpuštěného vzorku o dané koncentraci vlákniny a doby průtoku rozpouštědla (teatrátu sodného s komplexy železa) bylo vypočteno viskozitní číslo

$$\eta_{red} = \frac{(\tau_1 - 1)}{c}, \quad (13)$$

kde: η_{red} [dl·g⁻¹] viskozitní číslo
 τ_1 [s] čas průtoku analyzovaného vzorku
 τ_0 [s] čas průtoku rozpouštědla
 c [g·dl⁻¹] koncentrace vlákniny (Milichovský et al., 1979)

Limitní viskozitní číslo je poté definováno jako

$$LV\check{C} = \lim_{c \rightarrow 0} \eta_{red} , \quad (14)$$

kde:	η_{red}	[dl·g ⁻¹]	viskozitní číslo
	$LV\check{C}$	[-]	limitní viskozitní číslo
	c	[g·dl ⁻¹]	koncentrace vlákniny (Milichovský et al., 1979)

Podle Milichovského et al. (1979) byl průměrný polymerační stupeň vypočten z následujícího vztahu

$$PPS = 193,5(LV\check{C})^{1,064} , \quad (15)$$

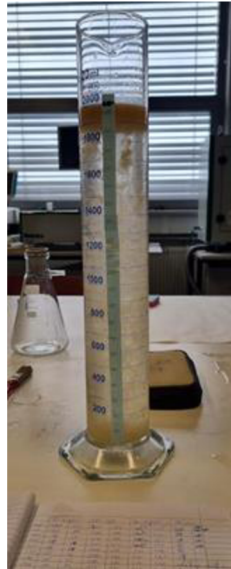
kde:	PPS	[-]	průměrný polymerační stupeň
	$LV\check{C}$	[-]	limitní viskozitní číslo (Milichovský et al., 1979)

4.5.4 Rheosedimentace

Rheosedimentace představuje typ sedimentace, který je založen na sledování kinetiky samovolného pohybu vytvořené síťoviny vlákniny při sedimentaci.

Ke sledování pohybu rozhraní je zapotřebí dvoulitrového odměrného válce, který je opatřen délkovou stupnicí.

Suspenze buničiny o dané koncentraci byla vložena do odměrného válce, tak aby její objem zaujímal danou výšku, Obrázek 11. Takto připravená směs byla rozvířena a po uklidnění suspenze bylo posuzováno její chování. V okamžiku, kdy se vytvořilo rozhraní síťoviny a vyčeřené vody, byly zapnuty stopky. Byl sledován a zaznamenáván pohyb rozhraní daný výškou v závislosti na čase (Milichovský, 1978).



Obrázek 11 Příprava suspenze pro měření rheosedimentace

Pro stanovení rheosedimentace buničiny bylo použita koncentrace absolutně suchých vláken cca 2 g do 2 litrů vody. Sledování pohybu rozhraní probíhalo nejprve v kratších intervalech, které se postupně prodlužovaly. Po konci sledování byla použitá suspenze zfiltrována a sušena při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti, aby bylo možné zjistit její přesnou hodnotu počáteční koncentrace.

Experimentálně naměřená časová závislost polohy rozhraní mezi suspenzí buničiny a čistou kapalinou nad suspenzí byla převedena do lineárního tvaru

$$\frac{\tau}{h_0 - h} = \alpha + \beta\tau, \quad (16)$$

kde: τ [s] čas

h_0 [mm] výška počátečního rozhraní

h [mm] výška rozhraní

α [-] regresní koeficient

β [-] regresní koeficient (Milichovský, 1978)

Pomocí programu Excel byly vyhodnoceny hodnoty regresních koeficientů. Na základě počáteční koncentrace vlákniny ve 2 litrech suspenze a koeficientu β byla vypočtena konečná koncentrace síťoviny

$$c_K = \frac{h_\infty c_1}{\left(h_0 - \frac{1}{\beta}\right)}, \quad (17)$$

- kde: c_K [g·l⁻¹] konečná koncentrace síťoviny
 h_∞ [mm] výška rovná objemu 2000 ml kapaliny
 c_1 [g·l⁻¹] koncentrace suspendovaných látek
 h_0 [mm] výška počátečního rozhraní
 β [-] regresní koeficient (Milichovský, 1978)

Ze známé hodnoty koncentrace síťoviny v okamžiku, kdy se objevilo zřetelné rozhraní mezi síťovinou a čistou kapalinou

$$c_P = \frac{h_\infty}{h_0} \cdot c_1, \quad (18)$$

- kde: c_P [g·l⁻¹] počáteční koncentrace síťoviny
 h_∞ [mm] výška rovná objemu 2000 ml kapaliny
 c_1 [g·l⁻¹] koncentrace suspendovaných látek
 h_0 [mm] výška počátečního rozhraní (Milichovský, 1978)

a ze známého regresního koeficientu α byla vypočtena rychlost sedimentace podle vztahu

$$v_s = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{c_P^2}{c_S^2} \cdot \frac{(c_K - c_S)^2}{(c_K - c_P)^2}, \quad (19)$$

- kde: v_s [g·l⁻¹] počáteční koncentrace síťoviny
 α [-] regresní koeficient
 c_P [g·l⁻¹] počáteční koncentrace síťoviny
 c_S [kg·m⁻³] standardní koncentrace (1 kg·m⁻³)
 c_K [g·l⁻¹] konečná koncentrace síťoviny (Milichovský, 1978)

4.5.5 Kappa číslo

Kappa číslo neboli stupeň odvaření buničiny bylo stanovené pomocí titračního měření podle normy ČSN ISO 302 (50 0258) (ČSN ISO, 1993). K titracím bylo zapotřebí: manganistan draselný o koncentraci $0,02 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, kyselina sírová o koncentraci $2 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, jodid draselný o koncentraci $1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, thiosíran sodný o koncentraci $2,0 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, dichroman draselný $0,001667 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, 25% kyselina chlorovodíková, 0,2% škrobový maz jako indikátor a destilovaná voda.

Stanovení Kappa čísla se skládá ze třech jednotlivých stanovení, které jsou popsány v následujících podkapitolách.

4.5.5.1 Stanovení faktoru thiosíranu

Do titrační baňky bylo odpipetováno 25 ml $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, toto množství bylo okyseleno 6 ml HCl. Takto připravená směs byla titrována $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, konec titrace byl indikován pomocí škrobového mazu. Indikátor nám zajistil přechod zabarvení z oranžového do šedomodré barvy. Faktor byl vypočten dle vzorce

$$f = \frac{5 \cdot V_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} \cdot c_{\text{KMnO}_4}}{b_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot c_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}}, \quad (20)$$

kde:	f	[–]	faktor thiosíranu sodného
	$V_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}$	[ml]	odpipetovaný objem dichromanu draselného
	c_{KMnO_4}	[$\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$]	koncentrace manganistanu draselného
	$b_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$	[ml]	spotřeba thiosíranu sodného
	$c_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$	[$\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$]	koncentrace thiosíranu sodného (ČSN ISO, 1993).

4.5.5.2 Slepý pokus

Do kádinky bylo nalito 790 ml destilované vody. Do druhé kádinky bylo odpipetováno 100 ml KMnO_4 , toto množství bylo smícháno se 100 ml H_2SO_4 . Takto připravená směs byla přelita k destilované vodě a kádinka od směsi byla vypláchnuta 10 ml destilované vody, aby

vzniklo 1 litr směsi. Ke směsi bylo přidáno 20 ml KI a za stálého míchání byl vzorek titrován roztokem $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. Ukončení titrace bylo indikováno škrobovým mazem, který umožní přechod z tmavého do čirého zabarvení.

4.5.5.3 Vlastní stanovení

Byly naváženy cca 2 g absolutně suché buničiny. Vzorek buničiny byl převeden do plastové nádoby o objemu 1000 ml a zalit 50 ml destilované vody, kde se vzorek nechal bobtnat cca 1 minutu. Poté se vlákna rozrušovala pomocí skleněné tyčinky a následně byla takto připravená suspenze doplněna destilovanou vodou a intenzivněji rozvlákněna pomocí mixéru.

Poté byl připravený vzorek kvantitativně převeden do kádinky a suspenze byla doplněna na objem 790 ml. Do kádinky se připravila směs jako při stanovení slepého pokusu, tudíž tvořená 100 ml KMnO_4 a smíchána se 100 ml H_2SO_4 . Směs byla přilita do kádinky se vzorkem a kádinka od ní byla opět vypláchnuta 10 ml destilované vody, poté následovala reakce směsi se vzorkem za stálého míchání po dobu 10 minut. Po uběhnutí času byla reakce přerušena přilítím 20 ml KI. Vyloučený jod byl titrován pomocí $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, kdy konec titrace byl indikován škrobovým mazem s přechodem barvy z fialovohnědé do čiré.

4.5.5.4 Výpočet Kappa čísla

Spotřeba KMnO_4 byla stanovena podle faktoru $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ a jeho spotřeby při slepém pokusu podle vzorce

$$V_{\text{KMnO}_4} = \frac{(a_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} - b_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}) \cdot c_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot f}{5 \cdot c_{\text{KMnO}_4}}, \quad (21)$$

kde:	V_{KMnO_4}	[ml]	objem manganistanu draselného
	$a_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$	[ml]	spotřeba thiosíranu sodného při vlastním stanovení
	$b_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$	[ml]	spotřeba thiosíranu sodného při slepém pokusu
	$c_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$	[mol · l ⁻¹]	koncentrace thiosíranu sodného
	f	[-]	faktor thiosíranu sodného
	c_{KMnO_4}	[mol · l ⁻¹]	koncentrace manganistanu draselného (ČSN ISO, 1993)

Vypočtená hodnota nám pomohla přiřadit správný korekční faktor podle Tabulky 3.

Tabulka 3 Korekční faktory pro výpočet Kappa čísla

V_{KMnO_4} , ml	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	0,958	0,960	0,962	0,964	0,966	0,968	0,970	0,973	0,975	0,977
40	0,979	0,981	0,983	0,985	0,987	0,989	0,991	0,994	0,996	0,998
50	1,000	1,002	1,004	1,006	1,009	1,011	1,013	1,015	1,017	1,019
60	1,022	1,024	1,026	1,028	1,030	1,033	1,035	1,037	1,039	1,042
70	1,044	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Pomocí korekčního faktoru, vypočtené hodnoty spotřeby $KMnO_4$ v ml a hmotnosti absolutně suché buničiny použité pro toto stanovení byl vypočítán stupeň odvaření vyjádřený tzv. kappa číslem podle následující rovnice

$$\kappa = \frac{V_{KMnO_4} d}{m_{asb}}, \quad (22)$$

kde: κ [-] Kappa číslo

V_{KMnO_4} [ml] objem manganistanu draselného

d [-] korekční faktor z Tabulky 3

m_{asb} [g] hmotnost absolutně suché buničiny použité pro stanovení (ČSN ISO, 1993)

4.6 Výroba zkušebních archů

4.6.1 Rozvlákňování

Buničina před výrobou testovacích archů byla vložena do laboratorního rozvlákňovače Lorentzen & Wettres, Obrázek 12. Vložené množství bylo zalito cca 1 l vodovodní vody a po dobu 10 minut byla vláknina rozvlákňována. Takto rozvlákněná suspenze putovala do laboratorního archovače na výrobu zkušebního archu.



Obrázek 12 Laboratorní rozvlákňovač Lorentzen & Wettres

4.6.2 Výroba archů

Výroba testovacích archů byla provedena na laboratorním archovači RAPID-KÖTHEN RK-2A, Obrázek 13, který byl tvořen třemi částmi (zařízení vytvářející list, zařízení, které umožňuje manipulaci s mokrým listem a zařízení, které list papíru suší).

Výroba jednotlivých archů papíru probíhala následovně. Do nohy přístroje bylo vloženo síto, které zabraňovalo odsátí buničiny. Následně byla noha zaplněna 4 l vody, do které byla následně přimíchána suspenze z nádoby rozvlákňovače. Takto připravená suspenze byla vířena po dobu cca půl minuty, aby se vlákna rovnoměrně rozprostřela po celém objemu. Voda se odsála a na sítu v noze zůstala rovnoměrně rozložená vlákna buničiny. List, který se utvořil na sítu, byl překryt kartonem a pomocí gaučovacieho válce byl zhotovený arch vyndán ze síta. Následně byl arch zakryt papírem a byl vložen na sušící plotnu, kde docházelo k jeho usušení za tlaku a teploty 95 °C po dobu 15 minut. Takto usušený vzorek byl zbaven krycích papírů a přemístěn do klimatizované místnosti k analýze jeho mechanických vlastností.



Obrázek 13 Laboratorní archovač RAPID-KÖTHEN RK-2A

4.7 Mechanické vlastnosti papíru

Mechanickými vlastnostmi papíru, které sledujeme u papíru, jsou pevnost v tahu, tažnost, tržná síla a délka, pevnost v průtlaku, propustnost pro vzduch a další. Tyto vlastnosti charakterizují každý materiál, nejen papír, z hlediska namáhání při působení nějaké síly. Předchází se zde porušení při zpracování ve výrobních strojích a v balících linkách (Macháň a Slavětinský, 1990).

4.7.1 Pevnost v tahu

Při zkoušce papírů, kdy je vzorek vystaven působení vnějšího zatížení, které způsobí jeho přetržení, se za definovaných podmínek zjišťuje tržné zatížení, pevnost v tahu, tržná délka, tažnost a práce potřebná k přetržení tahem (Souček, 1977).

Veškeré veličiny uvedené v následujících podkapitolách byly změřeny v souladu s ISO 1924-2 (ČSN EN ISO, 2009) pomocí trhacího zařízení (FRANK-PTI, Birkenau), Obrázek 14.



Obrázek 14 Laboratorní trhací zařízení FRANK-PTI

4.7.1.1 Tržné zatížení

Tržné zatížení je zatížení, které bylo změřené při zkoušce tahem, při němž dochází k přetržení proužku papíru stanovené délky a jednotkové šířky za stanovených podmínek

$$TS = \frac{F}{b}, \quad (23)$$

kde:	TS	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$	tržné zatížení
	F	$[\text{N}]$	zatížení při přetrhu
	b	$[\text{m}]$	šířka zkušebního proužku (Souček, 1977)

4.7.1.2 Tržná délka

Tržná délka BL je míra pevnosti papíru různých plošných hmotností. Tržná délka je vyjádřena pomyslnou délkou pásu papíru, při které by se volně zavěšený papír přetrhl vlastní vahou. Udává se v m a počítáno bylo podle vztahu

$$BL = \frac{F}{BWbg}, \quad (24)$$

kde:	BL	$[\text{m}]$	tržná délka
	F	$[\text{N}]$	zatížení při přetrhu
	BW	$[\text{g} \cdot \text{m}^{-2}]$	plošná hmotnost

b	[m]	šířka zkušebního proužku
g	[m s ⁻²]	tíhové zrychlení (Souček, 1977)

4.7.1.3 Relativní prodloužení

Relativní prodloužení ε je prodloužení zkušebního vzorku papíru při zkoušce tahem v okamžiku přetržení. Vypočítáno bylo podle vztahu

$$\varepsilon = \frac{(\Delta l)_{max}}{l_0} \cdot 100, \quad (25)$$

kde:	ε	[%]	relativní prodloužení
	$(\Delta l)_{max}$	[m]	absolutní prodloužení při přetržení
	l_0	[m]	délka měřeného proužku (Souček, 1977)

4.7.1.4 Pevnost v tahu

Pevnost v tahu TI a byla vypočtena podle vztahu

$$TI = \frac{TS}{BW}, \quad (26)$$

kde:	TI	[N m g ⁻¹]	pevnost v tahu
	TS	[N·m ⁻¹]	tržné zatížení
	BW	[g·m ⁻²]	plošná hmotnost (Souček, 1977)

4.7.1.5 Index absorpce tažné práce

Index absorpce tažné práce $TEAI$ byl doložen pomocí práce potřebné k přetržení tahem W a absorpční tažné práce TEA . Jako první bylo potřeba vypočítat hodnotu práce potřebné k přetržení tahem W podle vztahu

$$W = \int_{(\Delta l)_0}^{(\Delta l)_{max}} F d(\Delta l), \quad (27)$$

kde:	W	[mJ]	práce potřebná k přetržení tahem
------	-----	------	----------------------------------

$(\Delta l)_{\max}$ [mm]	absolutní prodloužení při přetržení
$(\Delta l)_0$ [mm]	absolutní prodloužení na začátku zatěžování
F [N]	zatížení při přetrhu
Δl [mm]	absolutní prodloužení (Souček, 1977)

Z této hodnoty pak byla dopočítána absorpční tažná práce TEA pomocí vztahu

$$TEA = \frac{W}{l \cdot b}, \quad (28)$$

kde: TEA [J·m ⁻²]	absorpční tažná práce
W [mJ]	práce potřebná k přetržení tahem
l [m]	délka vzorku
b [mm]	šířka vzorku (Souček, 1977)

Po výpočtu těchto dvou hodnot bylo možné dopočítat index absorpce tažné práce $TEAI$ podle vztahu

$$TEAI = \frac{TEA}{BW}, \quad (29)$$

kde: $TEAI$ [J·g ⁻¹]	index absorpce tažné práce
TEA [J·m ⁻²]	absorpční tažná práce
BW [g·m ⁻²]	plošná hmotnost (Souček, 1977)

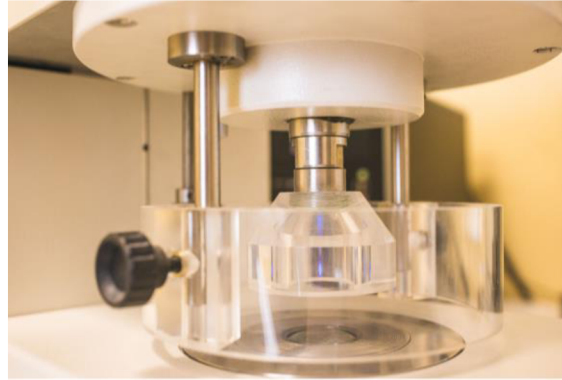
4.7.2 Pevnost v průtlaku

Tato zkouška vyjadřuje odpor kladený zkušebním tělesem (vzorkem), které klade tlak rovnoměrně působící na plochu vzorku v kolmém směru při okamžiku protržení. Jednotka je udávána v kPa.

Standardní pevnost v průtlaku je pevnost, která je přepočítána na plošnou hmotnost 100 g·m⁻². V našem případě byl použit způsob dle Mullena. Za tohoto případu tlak působí na

vzorek hydrostaticky. Tlak se zvyšuje za pomoci pístu působícího rovnoměrně přes pryžovou membránu.

Měření pevnosti v průtlaku bylo provedeno na stroji zobrazeném na Obrázku 15 podle normy ISO 2758 (ISO, 2014).



Obrázek 15 Přístroj na měření pevnosti v průtlaku (SPM – Laboratorní zkoušky, 2022)

4.7.3 Stanovení propustnosti pro vzduch podle Gurleye

Při stanovení propustnosti pro vzduch je měřen čas v s, kterého je zapotřebí, aby za danou dobu vzorkem o ploše $6,45 \text{ cm}^2$ prošlo 100 ml vzduchu za určitých podmínek. Výsledek byl vyjádřen v sekundách. Měření probíhala podle normy ISO 5636-5:2013 (ISO, 2019) na přístroji, který je zobrazen na Obrázku 16.



Obrázek 16 Přístroj pro měření propustnosti podle Gurleye (Gurley Densometers Permeability, 2023)

5 Výsledky

Výsledky jednotlivých analýz jsou představeny formou statistických dat v jednotlivých podkapitolách a v kapitole diskuse jsou prodiskutovány.

5.1 Chemická analýza primární suroviny

V Tabulce 4 jsou uvedené průměrné procentuální zastoupení pro jednotlivé složky rostlin (konopí, len, sisal) a doplněny o směrodatnou odchylku v závorce.

Tabulka 4 Průměrné chemické složení surovin

Surovina / chemická komponenta	Popel, %	Extraktivní látky, %	Celulóza, %	Lignin, %
Konopí	3,599 (0,03)	1,257 (0,04)	37,656 (1,63)	24,806 (1,39)
Len	2,939 (0,02)	1,518 (0,07)	39,173 (1,02)	25,075 (0,81)
Sisal	1,375 (0,01)	0,186 (0,05)	43,169 (0,14)	19,646 (0,99)

5.2 Výroba buničiny

U dusičnано-alkalické buničiny není zapotřebí počítat průběh této várky, tudíž je časový interval uveden pouze v Tabulce 5 a doplněn o přidávané množství chemikálií při jednotlivých krocích.

Tabulka 5 Časový průběh dusičnано-alkalické várky

Operace	τ , min	V, ml
Vlastní várka	30	1000 ml 6% HNO ₃
Promytí	5	2000 ml H ₂ O
Extrakce	15	1000 ml 5% NaOH
Promytí	10	2000 ml H ₂ O
Rozvláknění	10	1000 ml H ₂ O
Neutralizace	10	1000 ml CH ₃ COOH
Promytí	10	3000 ml H ₂ O

Natronová várka byla uvařena na H-faktor 1046 h. Pro všechny suroviny byla shodná hodnota, protože laboratorní vařák obsahoval 6 varných nádob o objemu 750 ml, tak každá surovina byla vařena ve dvou varných nádobách. Výpočet H-faktoru pro natronovou várku je uveden v Tabulce 6.

Tabulka 6 Natronová várka – časový a teplotní záznam

t, min	T, °C	k _r	H, h	t, min	T, °C	k _r	H, h
0	21	–	–	135	126	21,63	3,042
15	29	–	–	140	130	33,51	5,340
30	37	–	–	145	134	51,47	8,881
32	40	–	–	150	137	70,62	13,968
37	46	–	–	155	139	86,98	20,535
40	51	–	–	160	142	118,44	29,094
45	57	–	–	165	147	196,22	42,205
50	62	–	–	170	151	291,34	62,520
55	68	–	–	175	154	389,97	90,907
60	73	–	–	180	158	571,68	130,976
65	77	–	–	185	160	690,32	183,560
70	81	–	–	190	160	690,32	241,086
75	86	–	–	195	160	690,32	298,613
80	91	–	–	200	160	690,32	356,140
85	97	–	–	205	160	690,32	413,666
89	100	1	0,033	210	160	690,32	471,193
90	102	1,29	0,052	215	160	690,32	528,720
95	105	1,87	0,184	220	160	690,32	586,246
100	105	1,87	0,340	225	160	690,32	643,773
105	105	1,87	0,496	230	160	690,32	701,300
110	106	2,11	0,662	235	160	690,32	758,826
115	105	1,87	0,827	240	160	690,32	816,353
120	106	2,11	0,993	245	160	690,32	873,880
125	113	4,9	1,285	250	160	690,32	931,406
130	117	7,82	1,815	260	160	690,32	1046,460

5.3 Analýza černého louhu

Základní fyzikální vlastnosti černého louhu uvádí Tabulka 7, hodnoty uvedené v tabulce jsou průměrné.

Tabulka 7 Fyzikální vlastnosti černého louhu

Fyzikální vlastnosti	Natronový výluh			Dusičnano-alkalický výluh		
	Konopí	Len	Sisal	Konopí	Len	Sisal
Celková sušina, %	4,27	4,32	4,17	4,95	5,94	1,50
pH	12,72	12,91	12,52	12,59	12,52	12,52
Hustota, kg·m ⁻³	1024,82	1009,17	1024,39	1026,35	1037,27	1010,99
Dynamická viskozita, mPa·s	1,22	1,20	1,14	1,17	1,23	1,11
Mezipovrchové napětí, mN·m ⁻¹	53,34	40,10	44,79	63,96	59,03	53,59
Koncentrace ligninu, g·l ⁻¹	1,14	1,13	1,14	1,12	1,13	1,12

5.4 Analýza buničiny

V Tabulce 8 jsou uvedené obecné vlastnosti uvařené buničiny, jako je množství neprovarů, celkový výtěžek, hodnoty jsou průměrné včetně směrodatné odchylky. Kappa číslo pro natronovou a dusičnano-alkalickou buničinu zobrazuje Tabulka 9. A hodnoty polymeračního stupně a rheosedimentace pro natronovou a dusičnano-alkalickou várku jsou porovnány i s průmyslově vyrobenými buničinami ze lnu a konopí, Tabulka 10.

Tabulka 8 Obecné vlastnosti buničiny

Obecné vlastnosti	Natronová buničina			Dusičnano-alkalická buničina		
	Konopí	Len	Sisal	Konopí	Len	Sisal
Množství neprovarů, %	0,60 (0,04)	1,04 (0,01)	0,71 (0,03)	0,74 (0,10)	0,91 (0,03)	1,14 (0,04)
Celkový výtěžek, %	40,18 (1,07)	33,83 (0,47)	48,77 (5,19)	38,83 (0,55)	37,02 (0,10)	47,54 (0,44)

Tabulka 9 Kappa číslo

Kappa číslo	Natronová buničina	Dusičnano-alkalická buničina	Průmyslová natronová buničina
Konopí	33,04	27,78	19,53
Len	36,80	26,61	19,86
Sisal	24,74	29,77	–

Tabulka 10 Průměrný polymerační stupeň a standardní sedimentační rychlost buničiny

Veličina		Průměrný polymerační stupeň	Standardní sedimentační rychlost, mm·s⁻¹
Natronová buničina	Konopí	809,6 (44,5)	11,072
	Len	305,5 (18,1)	–
	Sisal	304,3 (23,0)	2,269
Dusičnano-alkalická buničina	Konopí	237,7 (24,1)	545,091
	Len	226,3 (21,6)	4,292
	Sisal	210,5 (25,5)	4,531
Průmyslová natronová buničina	Konopí	560,2 (32,7)	5,232
	Len	533,6 (40,6)	4,473
Celulóza	Konopí	278,3 (29,1)	–
	Len	130,1 (32,2)	–
	Sisal	167,1 (24,2)	–

5.5 Mechanické vlastnosti papíru

Mechanické vlastnosti vyrobených archů jsou uvedené v Tabulce 11, opět se jedná o průměrné hodnoty, které jsou doplněny o směrodatnou odchylku.

Tabulka 11 Mechanické vlastnosti testovaných archů

Mechanické vlastnosti		TS, N m ⁻¹	BL, km	ε, %	TI, N m g ⁻¹	TEAI, J·g ⁻¹	BS, kPa	AP, s
Natronová buničina	Konopí	518,232 (30,60)	0,676 (0,01)	0,662 (0,03)	6,548 (0,08)	0,022 (0,01)	123,200 (10,75)	0,380 (0,084)
	Len	481,860 (4,71)	0,608 (0,01)	0,546 (0,02)	5,992 (0,05)	0,020 (0,01)	94,200 (11,05)	0,660 (0,11)
	Sisal	1295,172 (23,40)	1,660 (0,03)	0,736 (0,04)	16,262 (0,18)	0,056 (0,03)	74,140 (1,42)	0,340 (0,06)
Dusičnano- alkalická buničina	Konopí	113,130 (10,65)	0,136 (0,01)	0,078 (0,01)	1,516 (0,04)	0,004 (0,01)	29,660 (2,36)	0,680 (0,15)
	Len	2122,454 (87,50)	0,528 (0,01)	1,550 (0,05)	5,212 (0,08)	0,020 (0,02)	27,020 (0,76)	2,394 (0,02)
	Sisal	637,470 (17,98)	0,822 (0,01)	0,488 (0,01)	7,904 (0,11)	0,026 (0,01)	41,400 (1,08)	0,460 (0,09)
Průmyslová natronová buničina	Konopí	841,830 (42,20)	1,086 (0,01)	2,100 (0,04)	10,784 (0,16)	0,144 (0,04)	92,780 (0,46)	1,580 (0,08)
	Len	941,578 (14,26)	1,162 (0,03)	2,248 (0,03)	11,636 (0,01)	0,206 (0,02)	95,080 (3,06)	2,320 (0,11)

6 Diskuze

6.1 Chemická analýza primární suroviny

Jednoleté rostliny použité k várkám byly dezintegrovány pomocí nožového mlýnu a podrobeny analýze chemického složení podle postupu v kapitole 4.1. Chemický rozbor uvádí Tabulka 4.

Fagbemigun et al. (2014), kteří se zabývali kukuřicí, uvedli, že různé hodnoty složení mohou být způsobeny odlišným genotypem nebo odlišnými klimatickými podmínkami růstu.

Pro suroviny bylo stanoveno nejvyšší množství popela 3,559 % pro konopí, podobné pro len, avšak pro sisal bylo naměřeno pouze 1,375 %. Námi naměřené hodnoty obsahu popela jsou výrazně nižší než hodnoty slunečnice 8,2 % a kukuřice 7,5 % (Housseinpour et al., 2010). V případě dřevin je množství popela u jehličnanů a listnáčů výrazně nižší, což může být způsobeno množstvím dužiny ve stéblech jednoletých rostlin. U břízy bylo zjištěno přibližně 0,5 % a u borovice pouze 0,2 % (Barbash et al., 2011).

Množství extraktu přecházejícího do ethanol-toluenu je nižší než při použití směsi ethanol-benzen pro kukuřici (Kaur et al., 2017). Množství látek extrahovatelných do směsi z ethanolu s toluenem je nižší i než bylo zjištěno pro buk 2,64 % a smrk 2,70 % (Potůček a Miklík, 2011).

Obsah Seifertovy celulózy v analyzovaných surovinách byl podobný jako ve vzorcích Housseinpour et al. (2010) 33,6 % pro kukuřici a 38,2 % pro pšenici a mírně vyšší celulózu obsahovala řepková sláma 49,9 % (González et al., 2013). Naše naměřené hodnoty se blíží hodnotám dřeva uváděným Barbash et al. (2011), a to 41,0 % u břízy a 47,0 % u borovice.

V případě ligninu bylo jeho množství nejnižší u sisalu analyzované 19,6 % podobné obsahu ligninu v ostatních jednoletých plodinách, tj. pšenici charakterizované 15,3 %, řepce 20,0 %, kukuřici 17,4 % a slunečnici 18,2 % (Housseinpour et al., 2010). Oproti dřevinám byl obsah ligninu u sisalu nižší než u listnatých stromů, kde byl obsah ligninu stanoven u dubu přibližně 21,4 % a u buku 24,5 % (Potůček a Miklík, 2011), což jsou hodnoty podobné konopí a lnu. Dále je také výrazně nižší ve srovnání s jehličnany, a to 29,5 % u borovice a 30,4 % u smrku (Potůček a Miklík, 2011).

6.2 Analýza černého louhu

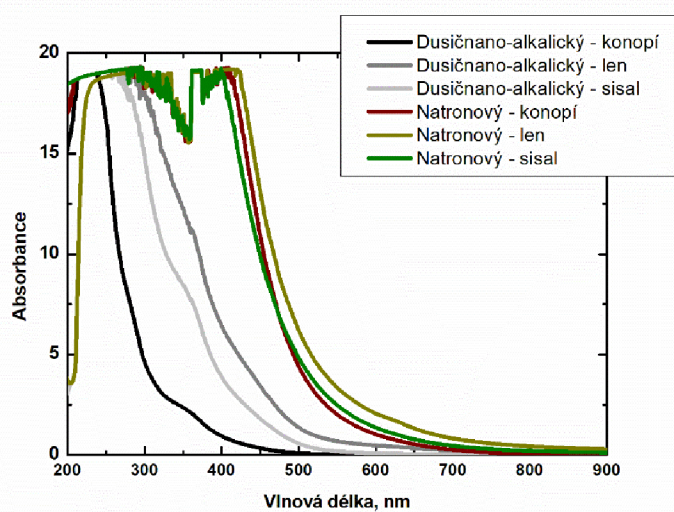
Základní fyzikální vlastnosti černého louhu uvádí Tabulka 7. Celková sušina obsažená v černém louhu se pohybuje v typickém rozmezí okolo 5 %, akorát u v případě dusičnано-alkalické várky sisalu je výrazně nižší.

Při porovnání hodnot pH jsou hodnoty vyšší než pro dusičnано-alkalický výluh kukuřice 11,8 a zároveň nižší než pro natronový výluh kukuřice 13,2 (Hájková et al., 2023). V porovnání se sulfátovou buničinou jsou hodnoty téměř shodné, z listnáčů 12,2 a z jehličnanů 12,6 (Potůček et al., 2020).

Hustota černých výluhů připravených dusičnано-alkalickým i natronovým způsobem byla nižší, než naměřili autoři Hájková et al. (2023) pro kukuřici, dusičnано-alkalický výluh $1081,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a natronový výluh $1133,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Zároveň byly zjištěné hodnoty nižší i než hodnoty sulfátového výluhu $1071,0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ z listnatých dřevin a $1097,0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ z jehličnanů (Potůček et al., 2020).

Dynamická viskozita naměřená Hájková et al. (2023) pro kukuřici byla shodná v případě dusičnано-alkalického louhu $1,2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, a vyšší pro natronový výluh $1,7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

V případě mezipovrchového napětí Hájková et al. (2023) dosáhli pro výluhy kukuřice odlišných hodnot než pro analyzované vzorky, a to $38,5 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ pro dusičnано-alkalický louh a $60,7 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ pro natronový výluh. V analyzovaných vzorcích konopí, lnu a sisalu bylo vždy vyšší mezipovrchové napětí naměřeno pro dusičnано-alkalický výluh než pro natronový.



Obrázek 17 UV-VIS spektrum černých výluhů

Posledním parametrem u černého louhu byla koncentrace alkalického ligninu, spektra pro analyzované výluhy jsou uvedena na Obrázku 17. Z UV-VIS spekter je zřejmé, že natronové a dusičnано-alkalické výluhy se liší obsahem složení, avšak absorbance alkalického ligninu je zachována právě v rozmezí 280 až 290 nm. Námi naměřená data jsou nižší, než stanovili pro kukuřici Hájková et al. (2023), dusičnано-alkalický výluh $1,7 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ a $3,6 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ pro natronový výluh. Avšak ne tak o tolik nižší jako při porovnání se sulfátovým výluhem, pro listnáče $27,0 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ a pro jehličnany dokonce $56,0 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ (Potůček et al., 2020).

6.3 Analýza buničiny

Celkový výtěžek je typický pro chemické buničiny. Obecně je celkový výtěžek chemické buničiny přibližně 30–45 %. Množství neprovarů je nízké, takže v těchto chemických várkách nevzniká téměř žádný odpad.

Pokud jde o stupeň delignifikace, je při vaření dusičnано-alkalické buničiny výrazně nízké tzv. Kappa číslo, i když várka netrvá ani 1 hodinu. Hodnoty sedimentační rychlosti se však výrazně liší. Při těchto hodnotách je rychlost preferována ze lnu a sisalu, protože čím nižší sedimentační rychlost, tím lepší papírenské vlastnosti a lepší tvorba pojivového systému vlákna. Poslední hodnotou je stupeň polymerace, který je naopak výrazně vyšší pro konopí než pro ostatní analyzované suroviny.

6.4 Mechanické vlastnosti papíru

Připravené testovací archy papíru byly uloženy do klimatizované laboratoře, kde byla udržována teplota $(23 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu (50 ± 5) a následně byly stanoveny mechanické pevnostní vlastnosti. Hodnoty vlastností jsou uvedeny v Tabulce 11.

Hlavním cílem této práce bylo zhodnotit mechanické vlastnosti papírů vyrobených z konopí, lnu a sisalu. Dobrých mechanických vlastností bylo dosaženo pro natronovou buničinu vyrobenou průmyslově. Avšak i nám se podařilo vyrobit kvalitní buničinu ze sisalu pomocí natronového způsobu a lněnou buničinu vyrobenou dusičnано-alkalickým způsobem. Tyto hodnoty se však nedají porovnat se sulfátovou buničinou z jehličnanů, kde autoři dosáhli

tržné délky 7,99 km, relativního prodloužení 3,2 %, pevnosti v tahu 78,4 N·m·g⁻¹ a indexu absorpce v tahu 1,78 J·g⁻¹ (Boček, 2003).

Tyto hodnoty byly porovnány s hodnotami buničiny vyrobené z jednoletých rostlin. V porovnání s buničinami vyrobených z kukuřice Hájková et al. (2023) bylo dosaženo pouze 1,66 km tržné délky, kdežto autoři pro natronovou buničinu z kukuřice dosáhli až 5,4 km, i u ostatních hodnot byly hodnoty pro kukuřici téměř čtyřikrát vyšší.

Amode a Jeetah (2020), kteří analyzovali mauricijské konopí uvařené natronovým způsobem dosáhli pevnosti v tahu 10,97 N·m·g⁻¹.

Bosco et al. (2022) se věnovali výrobě papíru ze sisalových vláken a dosáhli pevnosti v tahu 9,9 N·m·g⁻¹, což je nižší než námi stanovená hodnota, avšak vyššího relativního prodloužení 2,02 %.

Nejvíce podobná hodnota tržné délky byla dosažena v případě kukuřice uvařené natronovým způsobem 0,3 km (Fišerová et al., 2006).

Srovnatelné relativní prodloužení bylo dosaženo pro lničku setou uvařenou dusičnано-alkalickým způsobem 1,1 % (Hájková et al., 2021), pro natronovou buničinu z řepkových stonků 1,7 % (Enayati et al., 2009), a pro pergamenový papír tvořený směsí konopí, lnu a sisalu 1,42 % (Danielewicz et al., 2019).

V případě pevnosti v tahu bylo dosaženo Fišerovou et al. (2006) pro natronovou buničinu 26,1 N·m·g⁻¹ pro rýžovou slámu a 3,2 N·m·g⁻¹ pro kukuřici.

Pevnost v průtlaku byla porovnána s řepkovou buničinou uvařenou pomocí způsobu CTMP. Bylo dosaženo vyšších výsledků, ale pouze dvojnásobných, tržnou délku uvádí 2,6 km a pevnost v tahu 83,2 N·m·g⁻¹ (González et al., 2013).

Poslední veličinou, která byla vyhodnocena, byla propustnost pro vzduch stanovená podle Gurleye. Námi stanovené hodnoty jsou ve všech případech výrazně nižší, než stanovili Hájková et al. (2023) pro kukuřici, 78,7 s pro dusičnано-alkalickou buničinu a pro natronovou dokonce 90,1 s.

7 Závěr

Cílem této práce bylo zjištění a posouzení mechanických vlastností jednoletých rostlin lnu, konopí a sisalu, které byly vyrobeny natronovým a dusičnано-alkalickým způsobem. Zkoušky byly prováděny na pevnost v tahu, tržnou délku, prodloužení, pevnost v průtlaku a stanovení propustnosti podle Gurleye.

Dalším cílem bylo zjištění fyzikálních vlastností u černého louhu, který vzniká jako odpadní loup při výrobě buničiny alkalickým způsobem. Zkoušky byly provedeny na hustotu, pH, dynamickou viskozitu, povrchové napětí a koncentraci alkalického ligninu. Všechny zkoušky byly provedeny v daném zkušebním prostředí, které je za potřebí pro každou z nich a pod odborným dozorem.

Při chemické analýze primární suroviny bylo zjištěno, že sisal má nejmenší procentuální zastoupení popela, extraktivních látek a ligninu. Konopí má největší procento popela. Len má zase naopak nejvíce extraktivních látek s ligninem.

Fyzikální vlastnosti černého louhu jsme stanovovali jako aritmetický průměr z pěti naměřených hodnot. Hodnoty byly měřeny pro natronový výluh, kde největší procento sušiny a nejvyšší pH měl len, největší hustotu, mezipovrchové napětí a dynamickou viskozitu konopí a největší koncentrace ligninu byla naměřena $1,14 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ u konopí a lnu. A pro dusičnано-alkalický výluh byly naměřeny nejvyšší pro sušinu, hustotu, dynamickou viskozitu a koncentrace ligninu u lnu. Nejvyšší pH a mezipovrchové napětí mělo konopí.

Analýza buničiny proběhla u obou várek, kde u natronové buničiny bylo stanoveno množství neprovarů pro konopí nejmenší výsledek 0,60 % a pro len množství nejvyšší 1,04 %. Dusičnано-alkalická buničina měla nejméně neprovarů u konopí (0,74 %) a nejvíce u sisalu (1,14 %). Stanovení celkového výtěžku nejlépe dopadlo u sisalu z natronové buničiny, kde byl výtěžek stanoven na 48,77 %, nejhůře dopadl len u buničiny natronové, kde celkový výtěžek činil jen 33,83 %. Číslo Kappa bylo porovnáno s průmyslově vyrobenou natronovou buničinou, zde jsou hodnoty nízké, nejvyšší hodnotu v tomto případě dosahuje len z natronové buničiny 36,80, nejmenší hodnotu má konopí, které bylo vyrobeno průmyslově.

Polymerační stupeň byl porovnáván ještě s celulózu a průmyslovou natronovou várkou. Nejvyšší průměrný polymerační stupeň byl dosažen u konopí z natronové buničiny a to 809,6; nejnižších hodnot jsme naměřili u celulózy lnu 130,1.

Rheosedimentační rychlost jsme nebyli schopni určit u všech měřených vzorků z důvodu, že rychlost klesání buničiny byla příliš vysoká a nešlo ji přesně určit. Druhý důvod byl u velmi světlé buničiny nepřesné stanovení koncové hladiny, která se odečítala od stupnice. Posledním důvodem byl objem buničiny, který byl menší než objem vody, tím docházelo k nadnesení vzorku a nebylo možno určit odečet. Největší možnou naměřenou rychlost měla buničina dusičnано-alkalické várky, konopí, které mělo rychlost $5445,091 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Nejpomalejší pak byla buničina dusičnано-alkalické várky, len ($4,292 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$).

Mechanické vlastnosti buničin jsou vypočteny průměrem všech měření z dané zkoušky. Jsou zde porovnávány natronová buničina, dusičnано-alkalická buničina a buničina natronová průmyslová, zde jsou porovnány jen rostliny konopí a len, dále je se všemi zkouškami porovnán i sisal.

Největší naměřená hodnota tržného zatížení byla naměřena $2122,454 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ u dusičnано-alkalické várky lnu, nejnižší hodnotu mělo konopí u dusičnано-alkalické várky ($113,130 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$).

Tržnou délku má nejdelší sisal natronové buničiny (1,660 km) a nejkratší délku konopí (0,136 km) u dusičnано-alkalické várky.

Nejvyšší relativní prodloužení v % má len, který je vyroben průmyslově. Úplně nejmenších hodnot dosahuje konopí, které je vařeno v dusičnано-alkalické várce a má hodnotu 0,078 %, tato hodnota je skoro 9x menší než předposlední hodnota sisalu.

Pevnost v tahu byla naměřena největší u sisalu natronové buničiny s hodnotou $16,262 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{g}^{-1}$, nejmenší hodnoty bylo naměřeno u konopí dusičnано-alkalické várky $1,516 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{g}^{-1}$.

Index absorpce tržné práce je nejvyšší u lnu vyrobeného průmyslově a to $0,206 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, nejmenší hodnotu má konopí dusičnано-alkalické várky s hodnotou $0,004 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$.

Nejlepší hodnotu pevnosti v průtlaku má konopí z natronové várky, kde je hodnota 123,200 kPa, nejmenší je hodnota 27,020 kPa u lnu dusičnано-alkalické buničiny.

Nejhorších mechanických výsledků zde dosáhlo konopí dusičnано-alkalické buničiny, toto může být zapříčiněno poměrně krátkými vlákny, které konopí má. Nejlepší měřené vlastnosti má sisal a len, který má u většiny zkoušek nejlepší výsledky.

Proto natronovým způsobem lze zpracovávat všechny tyto suroviny, bohužel pro využití dusičnано-alkalického procesu není konopí vhodné, zatímco sisal a len i u tohoto typu buničiny se jeví jako potenciální možný zdroj vlákniny.

8 Literatura

Agáve. *Agave*. *Českéstavby.cz* [online]. ©2023 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.ceskestavby.cz/rostliny/agave.html2>.

AMODE, N.S.; JEETAH, P. Paper Production from Mauritian Hemp Fibres. *Waste Biomass Valor* 2021, č. 12, 1781–1802. ISSN 1877-2641.

AZZEZ, M.A. Pulping of Non-Woody Biomass. In: KAZI, S.M., eds. *Pulp and Paper Processing*. IntechOpen, 2018, 164. ISBN 978-1-78923-848-8.

AtlasRostlin.cz. *Agáve sisalová* [online]. ©2023 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.atlasrostlin.cz/exoticke-rostliny/agave-sisalova>.

BAJPAI, P. *Biotechnology for Pulp and Paper Processing*. US: Springer 2012, 414. ISBN 978-1-4614-1408-7.

BARBASH, V.; POYDA, V.; DEYKUN, I. Peracetic acid pulp from annual plants. *Cellulose Chemistry and Technology* 2011, 45(9–10), 613–618, ISSN 0576-9787.

BOČEK, S. *Použití sekundárních vláken ve výrobě pytlového papíru*. Univerzita Pardubice: Pardubice, 2003, 112.

BOSCO, M.; MBISE, E.; MINJA, R.J.A. Production of Paper Pulp Using Sisal Fiber Waste from Sisal Spinning Processes. *Tanzania Journal of Engineering and Technology* 2022, 41(2), 151–157, ISSN 2619-8789.

BUČKO, J. *Chemické spracovanie dreva v teórii a praxi*. Zvolen: Technická univerzita ve Zvolenu, 2001, 427. ISBN 80-228-1089-4.

BRITT, K.W. *Papermaking*. *Britannica* [online]. ©1999 [cit. 2022-12-17]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/papermaking>.

ČERVENKA, E., KRÁL, Z., TOMIS, B. *Chemie dřeva a celulózy I-III*. Pardubice: VŠCHT Pardubice, 1980, 228.

ČSN ISO 302 (50 0258). *Buničiny. Určenie čísla Kappa*. Praha: Český normalizační institut, 1993, 8.

ČSN EN ISO 1924-2 (50 0340) *Papír a lepenka – Stanovení tahových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 2009.

DANIELEWOCZ, D.; ŚLUSARSKA, S. Miscanthus×giganteus stalks as a potential non-wood raw material for the pulp and paper industry. Influence of pulping and beating conditions on the fibre and paper properties. *Industrial Crops & Products* 2019, 141, 111744(1–11). ISSN 9266690.

ENAYATI, A. A.; HAMZEM, Y.; MIRSHOKRAIE, S.A.; MOLAI, M. Papermaking potential of canola stalks. *BioResources* 2009, 4(1), 245–256. ISSN 1930-2126.

FAGBEMIGUN, T.K.; FAGBEMI, O.D.; OTITOJU, O.; MGBACHIUZOR, E.; IGWE, C.C. Pulp and paper-making potential of corn husk. *International Journal of AgriScience* 2014, 4, 209–213. ISSN 2228-6322.

FIŠEROVÁ, M.; GIGAC, J.; MAJTNEROVÁ, A.; SZEIFFOVÁ, G. Evaluation of annual plants (*Amaranthus caudatus* L., *Atriplex hortensis* L., *Helianthus tuberosus* L.) for pulp production. *Cellulose Chemistry and Technology* 2006, 40(6), 405–412. ISSN 0576-9787.

Flax seeds. *Flax: growing & caring for linseed*. *Plantura* [online]. ©2021 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://plantura.garden/uk/flowers-perennials/flax/flax-overview>.

GONZÁLEZ, I.; ALCALÁ, M.; ARBAT, G.; VILASECA, F.; MUTJE, P. Suitability of rapeseed chemithermomechanical pulp as raw material in papermaking. *BioResources* 2013, 8, 1967–1708. ISSN 1930-2126.

Gurley Densometers Permeability. *Porosity meter* [online]. ©2023 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z <https://amlinstruments.co.uk/instruments/gurley-densometers-permeability-porosity-meter/>.

HÁJKOVÁ, K. Vytěšňovací praní natronové buničiny. Univerzita Pardubice: Pardubice, 2019, 165.

HÁJKOVÁ, K.; BOUČEK, J.; PROCHÁZKA, P.; KALOUS, P.; BUDSKÝ, D. Nitrate-Alkaline Pulp from Non-Wood Plants. *Materials* 2021, 14, 3673. ISSN 1996-1944.

HÁJKOVÁ, K.; JURCZYKOVÁ, T.; FILIPI, M.; BOUČEK, J. Chemical pulp from corn stalks. *Biotechnology Reports* 2023, 37, e00786. ISSN 2215-017X.

HOUSSEINPOUR, R., LATIBARI, A.J.; FARNOOD, R.; FATEHI, P.; SEPIDDEHDAM, S.J. Fiber morphology and chemical composition of rapeseed (*Brassica napus*) stems. *IAWA Journal* 2010, 31, 457–464. ISSN 0928-1541.

ISO 2758:2014 *Paper — Determination of bursting strength*. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.

ISO 5636-5:2013 *Paper and board — Determination of air permeance (medium range) — Part 5: Gurley method*, Geneva: International Organization for Standardization, 2019, 12.

Jednoletá rostlina. *Multimediaexpo.cz* [online]. ©2014 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z http://www.multimediaexpo.cz/mmecz/index.php/Jednolet%C3%A1_rostlina.

Konopí seté. (*Cannabis Sativa L.*) *Topvet* [online]. ©2010 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z <https://www.topvet.cz/herbar/konopi-sete>.

Konopné vlákno. *Farma lapka* [online]. ©2013 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z <https://www.farmalapka.cz/home/konopne-vlakno/>.

KAČÍK, F.; TRIBULOVÁ, T. *Chemie dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2020, 98. ISBN 978-80-213-2938-6.

KOZMÁL, F. *Výroba papiera v teórii a praxi*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1958, 818.

KAUR, D.; BHARDWAJ, N.K.; LOHCHAB, R.K. Prospects of rice straw as a raw material for paper making. *Wasre Management* 2017, 60, 127–139, ISSN 1879-2456.

Len setý. *Elvita.cz* [online]. ©2017 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z <https://www.elvita.cz/clanek/len-sety.html>.

Léčebná síla konopí. *Vitalia.cz* [online]. ©2015 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z <https://www.vitalia.cz/clanky/lecebna-sila-konopi/>.

Výroba buničiny. *Fraxinus.mendelu.cz* [online]. ©2021 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_BC/Povinne_predmety/Vyroba_buniciny_a_papiru/VVP_03_-_Vyroba_buniciny.pdf.

MILICHOVSKÝ, M., KADEŘÁBEK, V., MURCKOVÁ, E., TOMIS, B., GEBRTOVÁ, J. *Návody pro laboratorní práce z chemické technologie papíru a celulózy*. Pardubice: VŠCHT Pardubice, 1979, 88.

MILICHOVSKÝ, M. Způsob hodnocení dějů probíhajících v papírenských suspenzích. *Papír a celulóza* 1978, 33(7–8), 61–64. ISSN 0031-1421.

MACHÁŇ, J.; SLAVĚTINSKÝ, L. *Nauka o materiálu pro 1. a 2. ročník SPŠG, studijní obor obalová technika*. Praha: SPN, 1990. Učebnice pro střední školy. ISBN 80-042-3455-0.

Odpady ze zemědělství a lesnictví. *Webhost.mendelu.cz* [online]. ©2023 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=4416&typ=html.

OMER, S.H.; KHIDER, T.O.; ELZAKI, O.T.; MOHIELDIN, S.D.; SHOMEINA, S.K. Application of soda-AQ pulping to agricultural waste (okra stalks) from Sudan. *BMC Chemical Engineering* 2019, 1–6, ISSN 2524-4175.

- Pulp and Paper Manufacturing Process in the Paper Industry. *Pulpandpaper-technology.com* [online]. ©2022 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z <https://www.pulpandpaper-technology.com/articles/pulp-and-paper-manufacturing-process-in-the-paper-industry>.
- POTŮČEK, F.; RAHMAN, M.; MIKLÍK, J. Displacement washing kraft pulp with various consistency. *Cellulose Chemistry and Technology* 2020, 54, 943–952. ISSN 0576-9787.
- POTŮČEK, F.; ŘÍHOVÁ, M.; GURUNG, B. Chemi-mechanical pulp from rapeseed straw. *Cellulose Chemistry and Technology* 2016, 50(3–4), 489–496. ISSN 0576-9787.
- POTŮČEK, F.; MIKLÍK, J. Displacement washing of kraft pulp cooked from beech wood. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen* 2011, 53(1), 49–58. ISSN 1336-3824.
- Sisalové vlákno. *Westwing.cz* [online]. ©2023 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z <https://www.westwing.cz/inspiration/trendy/materialy-v-interieru/sisalove-vlakno-prirodni-material-u-vas-doma/>.
- SIXTA, H. Handbook of pulp. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006, 1369. ISBN 978-35-27-30999-3.
- SKALICKÝ, Č.; FELLEGI, J.; KUBÍNEK, V. *Dřevoviny a polobuničiny*. Praha: SNTL, 1964, 176.
- SEIFERT, K. Über ein neues Verfahren zur Schnellbestimmung Der Rein-Cellulose. *Das Papier* 1956, 10, 301–306.
- SOUČEK, M. *Zkoušení papíru*. Praha: SNTL, 1977, 344.
- SPM – Laboratorní zkoušky. *Spm.cz* [online]. ©2022 [cit. 2023-03-12]. Dostupné z https://spm.cz/sluzby/laboratorni_zkousky.html.
- Stalagmometers. *Kocour.net* [online]. ©2023 [cit. 2023-03-12]. Dostupné z https://www.kocour.net/productdetails?id=262&sub_id=262.
- Tappi Test Methods. Georgia: Tappi Press Atlanta, 2004. ISBN 1-930657-33-1.
- TAHA, M.; HASSAN, M.; DEWIDARE, M.; KAMEL, M.A.; ALI, W.Y.; DUFRESNE, A. Evaluation of eco-friendly cellulose and lignocellulose nanofibers from rice straw using Multiple Quality Index. *Egyptian Journal of Chemistry* 2021, 64(8), 4707–4717, ISSN 4492285.
- Vlákna: Sisal - SI *Turbo.cdv.tul.cz* [online]. ©2014 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z <https://turbo.cdv.tul.cz/mod/book/view.php?id=863&chapterid=616>.
- Viskozimetr Ubbelohde IVa. *Thermofischer.cz* [online]. ©2023 [cit. 2023-03-10]. Dostupné z <https://www.thermofischer.cz/produkty/viskozimetr-ubbelohde-iva-6000-30000mm2-s-sklo>.

ZOU, H. *Effect of Kraft Pulping on Oxygen Delignification*. Maine, The University of Maine, 2002, 246.

9 Seznam použitých symbolů

$a_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$	[ml]	spotřeba thiosíranu sodného při vlastním stanovení, rce (21)
b	[m; mm]	šířka zkušebního proužku, rce (23;24;28)
$b_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$	[ml]	spotřeba thiosíranu sodného, rce (20;21)
BL	[m]	tržná délka, rce (24)
BW	[g·m ⁻²]	plošná hmotnost, rce (24;26;29)
c	[g·dl ⁻¹]	koncentrace vláknin, rce (13;14)
c_K	[g·l ⁻¹]	konečná koncentrace síťoviny, rce (17;19)
c_{KMnO_4}	[mol·l ⁻¹]	koncentrace manganistanu draselného, rce (20;21)
$c_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$	[mol·l ⁻¹]	koncentrace thiosíranu sodného, rce (20;21)
c_P	[g·l ⁻¹]	počáteční koncentrace síťoviny, rce (18;19)
c_S	[kg·m ⁻³]	standardní koncentrace (1 kg·m ⁻³), rce (19)
c_1	[g·l ⁻¹]	koncentrace suspendovaných látek, rce (17;18)
CV	[%]	celkový výtěžek, rce (12)
d	[-]	korekční faktor z Tabulky 3, rce (22)
f	[-]	faktor thiosíranu sodného, rce (20;21;27)
F	[N]	zatižení při přetrhu, rce (23;24)
g	[m s ⁻²]	tíhové zrychlení, rce (24)
h	[mm]	výška rozhraní, rce (16)
h_0	[mm]	výška počátečního rozhraní, rce (16;17;18)
h_∞	[mm]	výška rovná objemu 2000 ml kapaliny, rce (17;18)
H	[h]	H-faktor, rce (7)
k_R	[-]	relativní rychlostní konstanta, rce (7)
l	[m]	délka vzorku, rce (28)
l_0	[m]	délka měřeného proužku, rce (25)

$LV\check{C}$	[-]	limitní viskozitní číslo, rce (14;15)
m	[g]	hmotnost kapek černého louhu, rce (11)
m_{asb}	[g]	hmotnost absolutně suché buničiny použité pro stanovení, rce (22)
$m_{a.s.}$	[g]	hmotnost absolutně suchého vzorku, rce (1;3;4;5;6;12;
m_B	[g]	hmotnost absolutně suché buničiny, rce (12)
m_{HN}	[g]	hmotnost absolutně suchých hrubých neprovarů, rce (12)
m_L	[g]	pyknometr naplněný analyzovaným černým louhem, rce (8)
m_P	[g]	hmotnost popela, rce (3)
$m_{v.s.}$	[g]	hmotnost vzdušně suchého vzorku, rce (1)
m_W	[g]	pyknometr naplněný destilovanou vodou, rce (8)
m_w	[g]	hmotnost kapek destilované vody, rce (11)
m_1	[g]	prázdný suchý pyknometr, rce (8)
PPS	[-]	průměrný polymerační stupeň, rce (15)
t	[s]	doba průtoku černého louhu, rce (9)
t_w	[s]	doba průtoku destilované vody, rce (9)
TEA	[J·m ⁻²]	absorpční tažná práce, rce (28;29)
$TEAI$	[J·g ⁻¹]	index absorpce tažné práce, rce (29)
TI	[N·m·g ⁻¹]	pevnost v tahu, rce (26)
TS	[N·m ⁻¹]	tržné zatížení, rce (23;26)
T_w	[°C]	teplota destilované vody, rce (10)
v_s	[g·l ⁻¹]	počáteční koncentrace síťoviny, rce (19)
V_{KMnO_4}	[ml]	objem manganistanu draselného, rce (21;22)
$V_{K_2Cr_2O_7}$	[ml]	odpipetovaný objem dichromanu draselného, rce (20)
W	[mJ]	práce potřebná k přetržení tahem, rce (27;28)
x_e	[%]	zastoupení extraktivních látek, rce (4)

x_{KL}	[%]	zastoupení Klasonova ligninu, rce (6)
x_P	[%]	zastoupení popela, rce (3)
x_S	[%]	sušina vzorku, rce (1;2)
x_{SC}	[%]	zastoupení Seifertovy celulózy, rce (5)
x_V	[%]	vlhkost vzorku, rce (2)
α	[-]	regresní koeficient, rce (16;19)
β	[-]	regresní koeficient, rce (16;17)
γ	[mN·m ⁻¹]	mezipovrchové napětí černého louhu, rce (11)
γ_w	[mN·m ⁻¹]	mezipovrchové napětí vody, rce (10;11)
ε	[%]	relativní prodloužení, rce (25)
η_{red}	[dl·g ⁻¹]	viskozitní číslo, rce (13;14)
κ	[-]	Kappa číslo, rce (22)
μ	[Pa·s]	dynamická viskozita černého louhu, rce (9)
μ_w	[Pa·s]	dynamická viskozita destilované vody, rce (9)
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota černého louhu, rce (8;9)
ρ_w	[kg·m ⁻³]	hustota destilované vody, rce (8;9)
τ	[min; s]	čas, rce (7;16)
τ_0	[s]	čas průtoku rozpouštědla, rce (13)
τ_1	[s]	čas průtoku analyzovaného vzorku, rce (13)
Δl	[mm]	absolutní prodloužení, rce (27)
$(\Delta l)_0$	[mm]	absolutní prodloužení na začátku zatěžování, rce (27)
$(\Delta l)_{max}$	[m; mm]	absolutní prodloužení při přetržení, rce (25;27)
Δm	[g]	rozdíl hmotností, rce (4;5;6)