

Použití celulózy v oblasti inkoustového tisku

Jan Katrňák

Bakalářská práce
2021

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Jan Katrňák
Osobní číslo:	T18958
Studijní program:	B2808 Chemie a technologie materiálů
Studijní obor:	Polymerní materiály a technologie
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Použití celulózy v oblasti inkoustového tisku

Zásady pro vypracování

Technologie inkoustového tisku umožňuje cílenou depozici funkčních materiálů. Polymery (či už přírodní nebo syntetické) reprezentují skupinu materiálů hojně využívaných v různých odvětvích průmyslu. Celulóza představuje nejhojnější zastoupeny obnovitelný biopolymer v přírodě. Ačkoliv je celulóza ve formě papíru hodně využívána například v tištěné elektronice hlavně jako podkladový materiál (substrát), příprava funkčního inkoustu na bázi celulózy je dosti problematická vzhledem ke špatné rozpustnosti celulózy v běžných rozpouštědlech. Cílem práce bude připravit ucelený přehled o možnostech využití celulózy v oblasti inkoustového tisku. Práce by měla zahrnovat popis použitelnosti celulózy jednak jako funkčního inkoustu a jednak jako snadno a cenově dostupného potiskovaného podkladu (substrátu).

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Hoath, S. D. (ed.), *Fundamentals of Inkjet Printing: The Science of Inkjet and Droplets*, 2016, Weinheim: Wiley, ISBN 9783527337859.
2. Magdassi, S. (ed.), *The Chemistry of Inkjet Inks*, 2010, Singapore: World Scientific Publishing Company, ISBN 9789812818218.
3. Heinze, T., El Seoud O. A., Koschella, A., *Cellulose Derivatives*. 2018, Cham: Springer International Publishing, ISBN 978-3-319-73168-1.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavol Šuly, Ph.D.**
Centrum polymerních systémů

Datum zadání bakalářské práce: **1. února 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2021**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

Ing. Jana Navrátilová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Ačkoli je celulóza ve formě papíru hodně využívána hlavně jako podkladový materiál (substrát), například v domácnostech, kancelářích nebo v oblasti tištěné elektroniky, příprava funkčního inkoustu na bázi celulózy je dosti problematická vzhledem ke špatné rozpustnosti celulózy v běžných rozpouštědlech. Táto práce je zaměřená na problematiku využití celulózy v oblasti inkoustového tisku. Práce může být rozdělena na tři hlavní části, přičemž první část představuje ucelený přehled o technologii inkoustového tisku, který zahrnuje základní členění tisku, popis hlavních druhů inkoustů a nejdůležitějších vlastností jako viskozita a povrchové napětí. Druhá část práce je zaměřená na celulózu, která představuje nejhojnější zastoupeny obnovitelný biopolymer v přírodě. Tato část popisuje způsoby získávání celulózy, základní druhy, vlastnosti a použití celulózy. Spojením obou okruhů lze dosáhnout stanovený cíl práce, kterým je příprava přehledu o možnostech využití celulózy jednak jako funkčního inkoustu a jednak jako snadno a cenově dostupného potiskovaného podkladu (substrátu).

Klíčová slova: inkoustový tisk, inkousty, celulóza, papírová elektronika, substrát.

ABSTRACT

Although cellulose in the form of paper is widely used mainly as a substrate, for example in homes, offices or in the field of printed electronics, the preparation of a functional cellulose-based ink is quite problematic due to the poor solubility of cellulose in common solvents. This work is focused on the use of cellulose in the field of inkjet printing. The work can be divided into three main parts. The first part represents an overview of inkjet printing technology, which includes a basic classification of printing, a description of the main types of inks and the most important properties such as viscosity and surface tension. The second part of this work is focused on cellulose that represents a most abundant renewable biopolymer in nature. This part describes the main methods of cellulose extraction, basic types, properties and uses of cellulose. The aim of this work can be achieved by merging of both above mentioned topics. The main aim can be defined as the preparation of an overview of the possibilities of using cellulose both as a functional ink and as an easily and affordable printed substrate.

Keywords: inkjet printing, inks, cellulose, paperelectronics, substrate.

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Pavol Šuly, Ph.D., který mi pomohl nejen v nasměrování v nepřehledném množství odborných článků týkajících se tohoto tématu, ale především v konzultacích, kde mi vysvětlil problematiku, která si v literatuře protiřečila či nebyla zcela jednoznačná. Rovněž děkuji za cenné rady z oblasti psaní vědecké práce. V neposlední řadě děkuji za trpělivost, neboť práce prošla několika výraznými změnami od prvního návrhu až k finálnímu a to nebylo rozhodně lehké v době, kdy výuka a konzultace probíhají pouze on-line.

Také bych chtěl poděkovat mojí rodině, která měla se mnou obrovskou trpělivost a podporovala mě při psaní bakalářské práce. Je nesmírně těžké obětovat čas s rodinou ve prospěch vysoké školy. Avšak moje rodina a především moje přítelkyně měla vždy pro to pochopení a držela mi palce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	INKOUSTOVÝ TISK	10
2.1	HISTORIE	10
2.2	POUŽITÍ INKOUSTOVÉHO TISKU	10
3	ČLENĚNÍ TISKU PODLE ZPŮSOBU GENERACE KAPIČEK	12
3.1	KONTINUÁLNÍ TISK (CONTINUOUSINKJET – CIJ)	12
3.2	KAPKA NA POŽÁDÁNÍ (DROP-ON-DEMAND – DOD)	13
4	ČLENĚNÍ TISKU PODLE DRUHU TVORBY INKOUSTOVÝCH KAPEK	14
4.1	TEPELNÝ ZPŮSOB (THERMALINKJET)	14
4.2	PIEZOELEKTRICKÝ ZPŮSOB (PIEZOELECTRICINKJET)	15
5	INKOUSTY	17
5.1	INKOUSTY NA VODNÍ BÁZI	18
5.2	INKOUSTY NA BÁZI ROZPOUŠTĚDLA	18
5.3	UV TVRDITELNÉ INKOUSTY	19
5.4	HOT-MELTS	20
5.5	ELEKTRICKY-VODIVÉ INKOUSTY	20
6	VLASTNOSTI INKOUSTŮ	21
6.1	VISKOZITA	21
6.2	POVRCHOVÉ NAPĚTÍ A SMÁČENÍ POVRCHU	23
6.2.1	Smáčení substrátu	25
6.3	BEZROZMĚRNÉ KRITÉRIA	25
6.3.1	Ohnesorgovo číslo	25
6.3.2	Reynoldsovo číslo	26
6.3.3	Weberovo číslo	26
6.3.4	Zeta-potenciál	26
7	SUBSTRÁTY	28
7.1	PORÉZNÍ POVRCH	28
7.2	POLYMERNÍ POVRCH	29
7.3	POVRCH OŠETŘENÝ CELULÓZOVOU VRSTVOU	30
8	CELULÓZA	31
8.1	ZDROJE PRO VÝROBU CELULÓZY	34
9	CELULÓZA PRO INKOUSTOVÝ TISK	36
9.1	METODY ZÍSKÁVÁNÍ MCC A CNC	36

9.2	INKOUSTY OBSAHUJÍCÍ CELULÓZU.....	39
9.3	CELULÓZA JAKO PODKLADOVÝ MATERIÁL (SUBSTRÁT)	41
9.3.1	Mikrofluidní-papírové analytické zařízení (Mikrofluidics paper-based analytical devices - μ PADs).....	42
9.3.2	Flexibilní elektronický obvod	43
9.3.3	Celulózové nano-papírové diody jako indikátor NO ₂	44
9.3.4	Snímač vlhkosti	45
	ZÁVĚR	46
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	47
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	53
	SEZNAM POUŽITÉ TERMINOLOGIE.....	55
	SEZNAM OBRÁZKŮ	56
	SEZNAM TABULEK.....	57

1 ÚVOD

I když žijeme ve světě digitálních technologií, stále máme pořád kolem sebe ohromné množství tištěných materiálů. Ať už se jedná o média jako noviny, časopisy, billboardy, či o balící materiál nebo reklamní předměty v podobě triček, všechny tyto produkty vznikají využitím různých tiskařských technik, při kterých dochází k reprodukci žádaného vzoru (motivu) na požadovaný podklad (substrát). V současné době se lze střetnout také s tzv. tištěnou elektronikou pro různé aplikace od světlo-emitujících diod až po například senzory. Technologie inkoustového tisku představuje bezkontaktní způsob přípravy funkčních vzorů (například již zmíněných sensorů). Kromě toho, inkoustovým tiskem lze připravit funkční vzory různých tvarů (od jednotlivých kapiček až po složité vlastní vzory) při vysokém rozlišení.

Současně lze pozorovat celosvětovou snahu o nahrazení syntetických materiálů materiálem přírodním, kterým by se minimalizovala zátěž na životní prostředí. Jednou z možností je využití celulózy, která představuje nejhojněji zastoupený obnovitelný biopolymer v přírodě. V mnoha případech jde o poctivý stavební materiál rostlinného původu, který je snadno dostupný, levný a netoxický. Komplikace ovšem nastávají během jeho zpracování. Jedná se tedy zároveň i o výzvu, kde výstupem by byla odměna v podobě ekologického produktu za nízkou cenu.

Kombinaci inkoustového tisku a celulózy se otvírají nové možnosti. Každý z nás již jistě viděl potištěný papír (např. denní tisk). Málokdo však ví, že celulózu ve formě papíru lze využít i jako podklad pro různé elektronické obvody, kde potisk tvoří samotné vodivé obvody či jiné funkční materiály. Celulózu lze ovšem využít i jako přísadu do inkoustu, ale také pro povlakování substrátu, které přinese žádané vlastnosti pro tisk.

Předkládanou bakalářskou práci se chci zaměřit na 3 hlavní oblasti. Napřed se práce věnuje technologii inkoustového tisku, která zahrnuje členění tisku, klasifikací hlavních druhů inkoustů a jejich hlavní vlastnosti jako viskozita a povrchové napětí. Druhá oblast se věnuje celulóze, jejím druhům, možnostem získávání, zpracování, vlastnostem a použití. Následně jsou obě oblasti spojeny v podobě přehledu o možnostech využití celulózy jak v podobě funkční inkoustu, tak v podobě cenově dostupného potisknutelného substrátu. Vzhledem na různé modifikace celulózy, se práce soustřeďuje hlavně na použití základních druhů celulózy, či už ve formě vláken, nebo krystalů.

2 INKOUSTOVÝ TISK

2.1 Historie

Historie tisku sahá až do starověku, kdy se tisklo za pomoci dřevěných destiček. Prvním významným milníkem byl vynález knihtisku Johannesem Gutenbergem v roce 1450. V roce 1843 přišel s rotačním lisem Richard MarchHoe. V průběhu 19. století docházelo k postupnému navyšování tiskové kapacity za pomoci parou-poháněného lisu od německého vynálezce Friedricha Koeniga.[1]

Ve 20. století docházelo k rozvoji tisku. V průběhu historie vzniklo několik tiskařských metod, z nichž lze uvést např.:

- knihtisk
- ofsetový tisk
- sítotisk
- inkoustový tisk
- laserový tisk
- termotisk
- digitální tisk

Inkoustový tisk se začal rozvíjet v 50. letech 20. století. První tiskárnu vynalezl Ichiro Endo v Japonsku ve firmě Canon koncem 70. let 20. století. Zpočátku tiskárny využívaly mechanický princip vytlačování inkoustu z trysky. Avšak koncem 70. let dva týmy (John Vaught z firmy Hewlett-Packard a Ichiro Endo z firmy Canon) nezávisle na sobě přišly s tepelným způsobem vytlačování kapek z trysky. V roce 1977 pan Endo vyvinul tiskací hlavu pracující na principu piezoelektrického jevu. Pár let poté (1982) Robert Howard přišel s první tiskárnou fungující na tomto principu.[1][2]

2.2 Použití inkoustového tisku

Ve 20. století došlo k rozvoji tiskařského průmyslu. Rovněž příchod nových materiálů a vývoj v oblasti elektroniky předurčil inkoustový tisk stát se skvělým nástrojem pro ukládání nejen vizuálních vzorců, ale také funkčních ploch v oblasti elektroniky, medicíny a biotechnologií.

Cílem inkoustového tisku jsou:

- co nejvyšší rychlost
- co nejnižší náklady
- variabilita substrátů
- kvalita tisku
 - vizuální obrazce
 - ostrost
 - plnost barev
 - stálost tisku
 - funkční plochy
 - podle požadavků jednotlivé aplikace (elektrická vodivost, nevodivost, propustnost, ohebnost tisku,...) [2]

3 ČLENĚNÍ TISKU PODLE ZPŮSOBU GENERACE KAPIČEK

Každá tiskárna se skládá z hlavy a trysky, skrze kterou je protlačován inkoust. Rozeznáváme 2 základní typy tiskacích metod dle způsobu generace kapiček inkoustu:

1. **Kontinuální tisk (Continuousinkjet – CIJ)**
2. **Kapka na požádání (Drop-on-demand – DOD)**

3.1 Kontinuální tisk (Continuousinkjet – CIJ)

Kontinuální tisk vznikl v roce 1951, když na trh uvedla firma Siemens první tiskárnu.

U kontinuálního tisku dochází k tomu, že inkoust je protlačován souvisle skrz trysku o průměru v řádech mikrometrů. Hlava obsahuje piezoelektrický krystal, který na základě elektrického impulzu změni svůj tvar, čímž působí inkoust. Ten je následně vlnitě protlačován skrze trysku a vystříknut do prostoru, kde se souvislý proud inkoustu rozpadne na menší kapky. Schéma kontinuálního tisku je zobrazeno na obrázku č. 1. Za 1 sekundu lze vytvořit 50 000 až 150 000 kapek. Záleží na požadovaném množství. Kapky mají nepravidelnou velikost (velikost a tvar závisí na povrchovém napětí, aplikovaném pulsu a např. průměru trysky).[3]

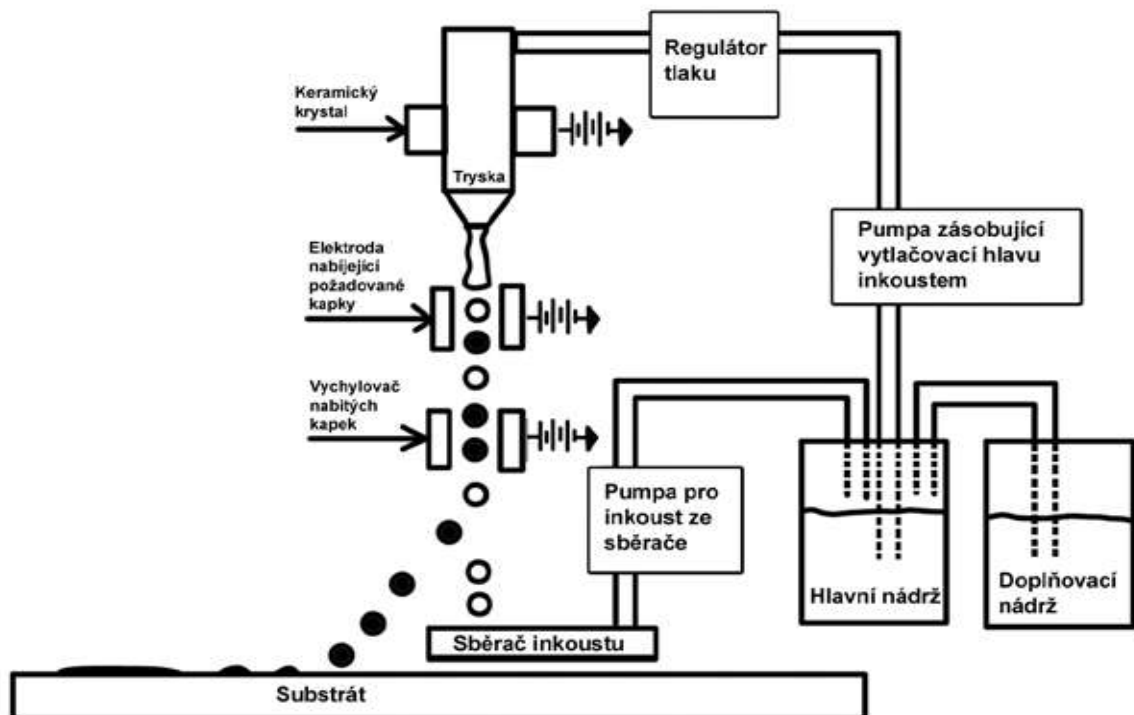
Následně proud kapek prochází systémem elektrod (vytvářejících elektrické pole), které dodávají požadovaným kapičkám náboj podle předem definovaného programu. Poté kapky procházejí soustavou vychylovacích desek, kde jsou tyto nabitě kapky vychýleny z dráhy letu na substrát do požadované pozice. Nenabitě kapky putují přímo do sběrného okapu. Většina inkoustu je recyklována. Jen malá část je použita pro tisk.[3]

Inkoust ze sběrného okapu putuje zpět do zásobníku, nikoliv však do zásobníku s původním inkoustem. Opětovného vytlačení inkoustu do hlavy zařizuje pumpa a ventil, který reguluje požadované množství inkoustu pro tisk. Zásobníky rovněž obsahují čidla měřící viskozitu inkoustu a podle potřeby lze doplňovat příslušné rozpouštědlo.

Výhody souvislého tisku:

- vysoká rychlost inkoustových kapek – přibližně 20m/s
- vysoká rychlost kapek umožňuje větší vzdálenost mezi tryskou a substrátem
- vysoká frekvence vytlačování kapek z trysky – dovoluje vysokou rychlost tisku

- trysky nemají tendenci se ucpávat, protože skrz trysku neustále prochází inkoust – nehrozí sedimentace inkoustu v částech hlavy – tím pádem lze použít i rozpouštědla na bázi ketonů a alkoholů, které pomáhají k rychlému vysychání inkoustu na substrátu.[3][4]



Obrázek 1 Princip kontinuálního tisku (překresleno podle: [3])

3.2 Kapka na požádání (Drop-on-demand – DOD)

Metoda DOD spočívá ve vytryskování jednotlivých kapek již z trysky hlavy tiskárny. To znamená, že se používá téměř 100% inkoustu vytlačeného z trysky (část může zůstat na trysce). Recyklační okruh jako je tomu u CIJ zcela odpadá.

Vytvořená kapka, která vyletí z trysky, nemusí být vždy dokonalého kulového tvaru. Při tomto procesu může dojít ke tvorbě satelitních menších kapek, které se odtrhnou za hlavní kapkou. Výsledná kvalita připraveného motivu pak závisí na skutečnosti, zdali dojde během letu ke spojení hlavní a satelitní kapky či nikoliv.[3]

4 ČLENĚNÍ TISKU PODLE DRUHU TVORBY INKOUSTOVÝCH KAPEK

Ať už tiskárna pracuje na způsobu souvislého tisku nebo kapky na požádání, tak se v hlavě tiskárny nachází ovládací mechanismus, který vytváří kapky inkoustu. Existují 2 základní typy:

1. Tepelný způsob (Thermalinkjet)
2. Piezoelektrický způsob (Piezoelektrickinkjet)

4.1 Tepelný způsob (Thermalinkjet)

Tepelný způsob tvorby kapky funguje na principu vypařování kapalin. V hlavě tiskárny se nachází elektrický obvod s cívkou, která zahřeje inkoust v trysce, když cívkou projde elektrický proud. Prudkým zahřátím inkoustu dojde k vytvoření plynné bubliny uvnitř trysky. Tím se zvýší tlak v trysce a inkoust je protlačen z trysky a vytřísknut směrem k substrátu.

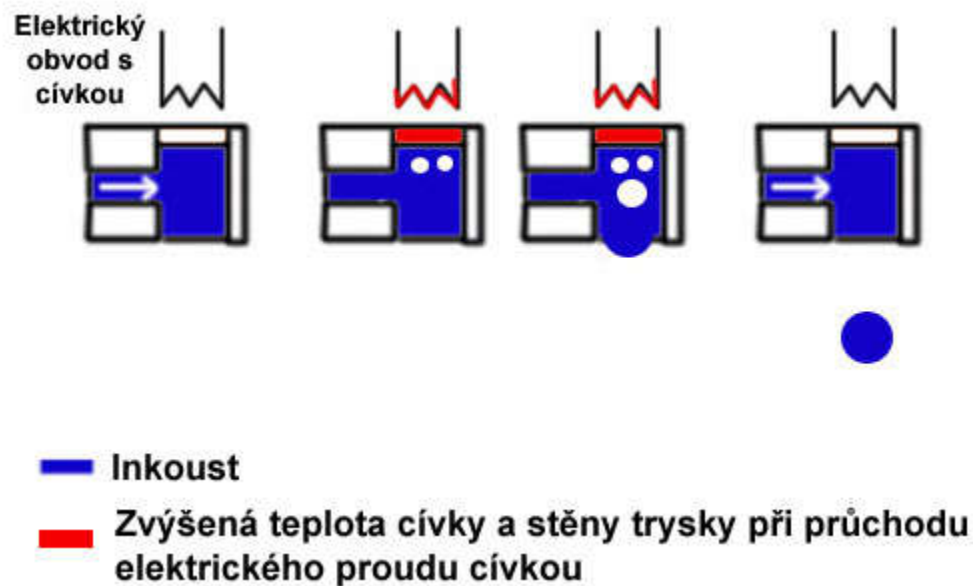
Tepelný způsob používá inkousty na bázi vody či jiné bázi, která dovoluje tvorbu plynné bubliny.

Výhody způsobu:

- levná výroba hlavy (nejsou zapotřebí složité a drahé součástky)

Nevýhody:

- slabá síla vytlačování inkoustu
- krátká vzdálenost mezi tryskou a substrátem
- omezený okruh použitelných inkoustů[3][4]



Obrázek 2 Princip trysky s tepelným způsobem tvorby kapky. (Překresleno podle:[3])

4.2 Piezoelektrický způsob (Piezoelectricinkjet)

Piezoelektrický jev je založený na geometrické změně tvaru krystalu, když je do krystalu přiveden elektrický proud. Zpravidla se používají krystaly na bázi PZT (sloučenina olova, zirkonia a titanu).

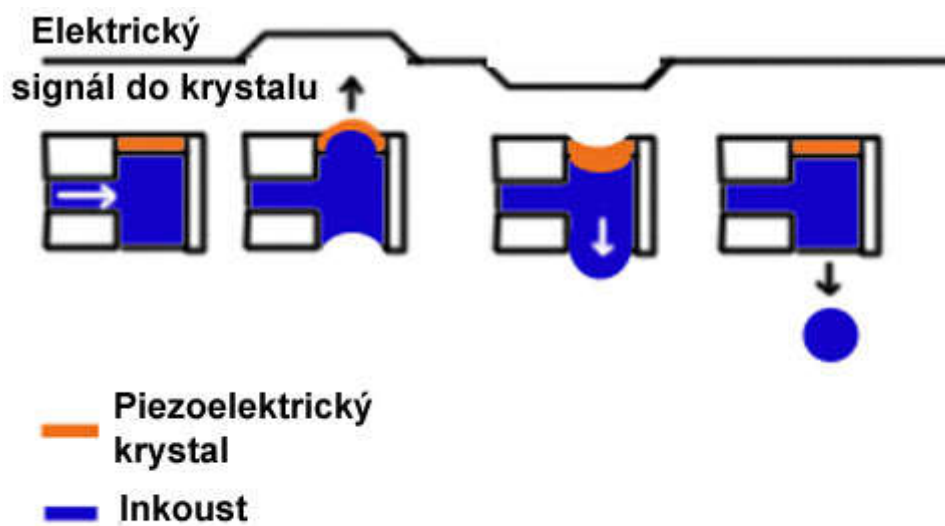
Krystal je umístěn na stěně trysky. Do krystalu je přiveden elektrický proud. Krystal změní tvar a tím vytvoří napřed negativní tlak v trysce a následně pozitivní tlak, čímž protlačí inkoust z trysky směrem k substrátu.

Výhody piezoelektrického způsobu:

- široká paleta použitelných inkoustů
- menší náchylnost na usazování inkoustu v hlavě oproti tepelnému způsobu
- nízké provozní náklady
- přibližně stejná rychlost a objem vystřelených kapek
- větší vytlačovací síla – lze uplatnit větší vzdálenost mezi tryskou a substrátem

Nevýhody:

- vyšší pořizovací náklady na výrobu hlavy[3]



Obrázek 3 Princip fungování trysky s piezoelektrickým krystalem (Překresleno dle: [3])

5 INKOUSTY

Inkoust je médium, které se v kapalně fázi nanáší na substrát, kde dojde k vytvoření požadovaného motivu (vzoru) buď odpařením rozpouštědla anebo vytvrzením inkoustu. Inkousty se skládají z několika složek: [5]

1. pigmenty (pigments)

Hlavním úkolem pigmentů je dodat inkoustu barvu. Používají např. lithol (červená), ftalokyanin (zelená), indanthrene (modrá). Existují i pigmenty, které plní funkci ochranou vůči teplu, světlu, rozpouštědlům apod.

2. pojiva (binders)

Jde především o polymery jako akryláty, alkaloidy, celulóza či pryskyřice. Hlavní funkcí pojiv je vázání pigmentů k sobě a substrátu. Některé po natisknutí jednoduše uschnou po odpaření rozpouštědla, jiné potřebují speciální vytvrzování (např. UV světlem). Pojiva jsou nositeli různých dalších funkcí jako např. odolnost vůči vodě v případě celulózových nanočástic.

3. přísady (aditives)

Přísadami jsou myšleny složky do 5 hmot. %. Jde o látky, které např. upravují povrchové napětí pro lepší nasákavost do substrátu. Odpěňovače (defoamers) např. zamezují tvorbě bublin při tisku. Nebo např. alkaloidy pomáhají rozpouštět celulózu ve vodných inkoustech.

4. rozpouštědla (solvents)

Hlavní funkcí rozpouštědel je udržovat inkoust v tekuté fázi. Používá se voda či jiná rozpouštědla, případně i směs více rozpouštědel.

Porovnání složení inkoustů pro různé druhy tiskařských technik jsou uvedeny v Tabulce 1.

Tabulka 1 Srovnání složení inkoustů pro jednotlivé druhy tisku.[5]

	Složení inkoustu (hmot. %)			
	Pigment	Pojivo	Rozpouštědlo	Příklady
Inkoustový tisk	5-10	5-20	65-95	1-5
Sítotisk	12-20	45-65	20-30	1-5
Hlubokotisk	12-17	20-35	60-65	1-2
Flexotisk	12-17	40-45	25-45	1-5

Inkousty se dělí podle chemického složení a použití na:

- Inkousty na vodní bázi
- Inkousty na bázi rozpouštědla
- UV-tvrditelné inkousty
- Hot-melts (také zvané phase-change)
- Elektricky-vodivé inkousty

5.1 Inkousty na vodní bázi

Většina běžných kancelářských tiskáren s inkoustovým tiskem používá inkousty na vodní bázi. Rovněž pro tepelný tisk se používají především inkousty na vodní bázi.

Inkoust lze barvit:

- barvivem
- pigmentem

Barvivo může podléhat vyblednutí pod slunečním zářením. Naopak pigmenty bývají zpravidla s vyššími pořizovacími náklady.

Mezi ostatní přísady patří:

- stabilizátory
- změkčovadla
- atd.

Tisk vodných inkoustů doprovází i ochranné povlakování, které chrání natisknutý inkoust před vlivy vlhkosti. Nebo lze použít zalaminování. Na druhou stranu u některých aplikací je zapotřebí, aby natištěný vzor plnil svou funkci jen do určité doby.

V případě tištěné elektroniky se může také použít roztok karboxymetylové celulózy (CMC), která je dobře rozpustná ve vodě jako aniontický polyelektrolyt, s uhlíkovými vlákny. [5]

5.2 Inkousty na bázi rozpouštědla

Inkousty lze připravit i v rozpouštědle organických těkavých látek. Jde o levné látky, které lze použít i na flexibilní materiály.

Výhody:

- vodě-odolné
- UV-odolné

Nevýhody:

- výpary rozpouštědel při tisku – nutnost odsávacího zařízení u tiskárny
- vyšší náklady na teplotní úpravu naneseného inkoustu
- ne příliš ekologické (některé dokonce i zdraví škodlivé)

Inkousty na bázi rozpouštědla jsou zpravidla vodě-odolné a UV-odolné. Odpadá tedy nutnost použití speciálního povlakování po tisku. Nicméně vysoká rychlost tisku vyžaduje i rychlé zasychání inkoustů na substrátu. Tudíž se zpravidla substráty před tiskem a po tisku nahřívají. Tiskárny používající tyto inkousty disponují teplotními ohříváči a větráky.[3]

Inkousty lze rozdělit do 2 podskupin:

1. tvrdá rozpouštědla

Nanesené inkousty nevyžadují žádné speciální povlakování či úpravy. Naopak tiskárny musí používat odsávání pro nebezpečné výpary.

2. mírná „eco“ rozpouštědla

Nejsou tak nezávadná jako inkousty na bázi vody, ale lze je používat v tiskárnách v uzavřených prostorech bez použití přídavných odsávacích zařízení. V poslední době rostou na popularitě.

5.3 UV tvrditelné inkousty

Tyto inkousty zpravidla obsahují akrylátové monomery s iniciátorem. Inkoust natištěný na substrát musí být vystaven UV záření (zdrojem může být například UV lampa). V inkoustu vystaveném UV záření proběhne chemická reakce, jež způsobí vytvrzení inkoustu. Ozařování trvá v řádech mili-sekund. Chemická reakce trvá v řádech mili-sekund, což jedna umožňuje vyšší rychlosti tisku v případech, kdy se substrát pohybuje a tiskařská hlava je stacionární, za níž (ve směru pohybu substrátu) se nachází ozařovací UV-lampa. A

také UV-vytvrzení nepřímo zabrání tomu, aby se inkoust nasákl hluboko do porézního substrátu. UV-vytvrditelné inkousty se zpravidla neodpařují.

Výhody:

- rychlé vytvrzení inkoustu
- malá nasákavost inkoustu do substrátu
- inkoust se neodpařuje

Nevýhody:

- dražší inkoust než u jiných typů
- dražší komponenty do tiskáren v podobě UV-lamp
- natištěný inkoust spíše vystupuje nad povrch substrátu – tvoří reliéf
- náchylnost k praskání – nevhodné pro flexibilní substráty[3]

5.4 Hot-melts

Inkousty typu Hot-melts se vyznačují tím, že za běžné pokojové teploty se nachází v pevném skupenství. Avšak při tisku se zvýší teplota do rozmezí 100-130°C, čímž inkoust zkapalní. Inkoust změní skupenství z kapalného na pevné v momentě dopadu na substrát. Jako pojivo inkoustu se používají vosky. Hot-melts inkousty neobsahují těkavé organické sloučeniny, které by se mohly odpařovat během tisku. Druh, pórovitost, propustnost anebo povrchová energie substrátu mají klíčový význam pro kvalitu tisku.[7][8]

5.5 Elektricky-vodivé inkousty

Pro tisk elektroniky se používají 2 druhy inkoustů:

- Metal-organic-decomposition inkoust (MOD)
 - o menší usazování v tryskách
 - o nepotřebuje koloidní stabilizátory
- Metallic-nanoparticle inkoust (NP)
 - o velký obsah kovů
 - o malý kontaktní odpor
 - o komerčně dostupné

Organické vodiče jsou lehčí, flexibilnější a levnější než anorganické vodiče [9]

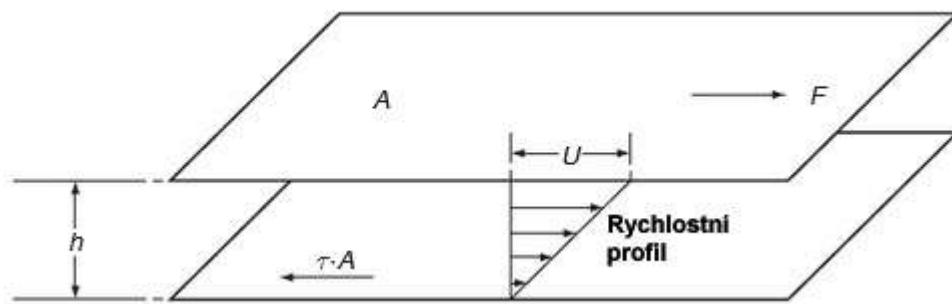
6 VLASTNOSTI INKOUSTŮ

Inkousty se při tisku používají v kapalně fázi. Mezi nejdůležitější vlastnosti inkousty lze zařadit hustotu, viskozitu a povrchové napětí. Vzhledem na požadované aplikace lze uvažovat ještě navíc například vodivost a jiné vlastnosti.

6.1 Viskozita

Viskozita definuje odpor studované kapaliny vůči toku, kterou lze vyjádřit jako míru úměrnosti mezi smykovým napětím (angl. shear stress) a rychlostí smykové deformace (angl. shear rate).[10]

Když působíme silou F na desku, která má plochu A , jež se nachází ve vzdálenosti h od stacionární spodní desky, pak pro kapalinu mezi deskami platí:



Obrázek 4 Princip viskozity.[11]

Smykové napětí (shear stress) se vypočítá jako:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

kde F je smyková síla působící na desku a A je plocha desky.

Rychlost smykové deformace (shear rate) se vypočítá jako:

$$\dot{\gamma} = \frac{U}{h} \quad (2)$$

kde U je rychlost a h vzdálenost mezi deskami.

Viskozitu vypočítáme následovně:

$$\eta = \frac{\text{smykové napětí}}{\text{rychlost smykové deformace}} \quad (3)$$

Toto vychází z Newtonova zákona:

$$\tau_{xy} = \eta_0 * \dot{\gamma}_{xy} \quad (4)$$

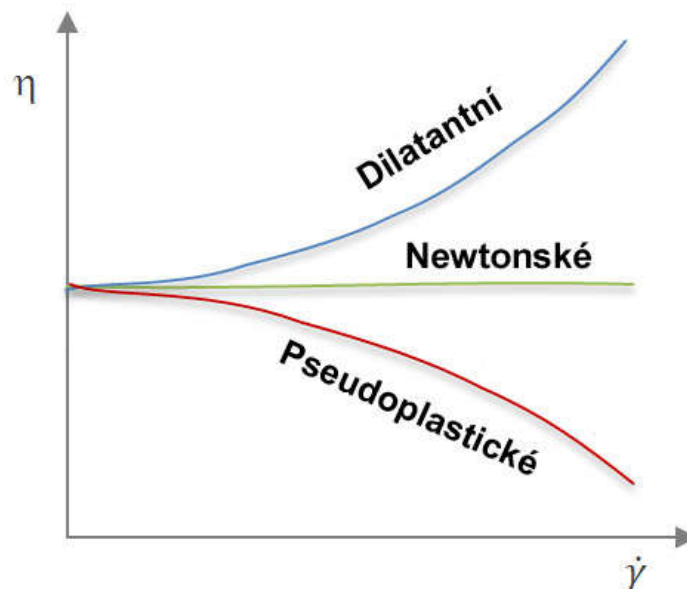
kde τ_{xy} je smykové napětí, $\dot{\gamma}_{xy}$ rychlost smykové deformace a η_0 newtonská (limitní) viskozita.

Na základě kterého rozdělujeme kapaliny na:

1. newtonské
2. neneutonské

Newtonské kapaliny se vyznačují tím, že jejich viskozita je nezávislá na čase a rychlosti smykové deformace. Neneutonské kapaliny se dělí na:

- a. dilatantní
- b. pseudoplastické

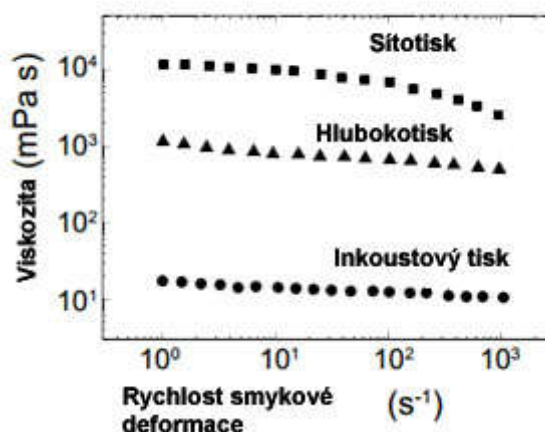


Obrázek 5 Graf závislosti viskozity na rychlosti smykové deformace.[12]

Dilatantní jsou kapaliny, jejichž viskozita s rychlostí smykové deformace roste. U pseudoplastických viskozita s rostoucí rychlostí smykové deformace klesá. Většina polymerních kapalin vykazuje pseudoplastické chování. Jen při velmi nízkých a velmi vysokých rychlostech smykové deformace se chovají jako newtonovské kapaliny.[11][13][14]

Viskozitu můžeme změřit na rotačním nebo kapilárním reometru dle požadovaného rozsahu rychlostí smykových deformací. [15]

Různé druhy tiskací metody vyžadují jiné vlastnosti inkoustů. Například sítotisk vyžaduje vyšší viskozitu než inkoustový tisk:



Obrázek 6 Porovnání různých druhů tisků v závislosti viskozity na rychlosti smykové deformace.[5]

6.2 Povrchové napětí a smáčení povrchu

Povrchové napětí je snaha kapaliny snížit svůj povrch na nejmenší možnou plochu.

Molekuly v kapalině se vzájemně přitahují. Když se zahřejí natolik, že překonají přitažlivost, tak přejdou do plynné fáze. Molekula uvnitř objemu je obklopena dalšími molekulami ze všech stran, avšak na povrchu jen z určitých stran. To je energeticky náročný stav. Vytvoření nového povrchu je energeticky náročné a tudíž se kapalina bude chovat tak, aby minimalizovala plochu povrchu. To se projevuje tak, že malé množství kapaliny má tendenci tvořit kapky. [16]

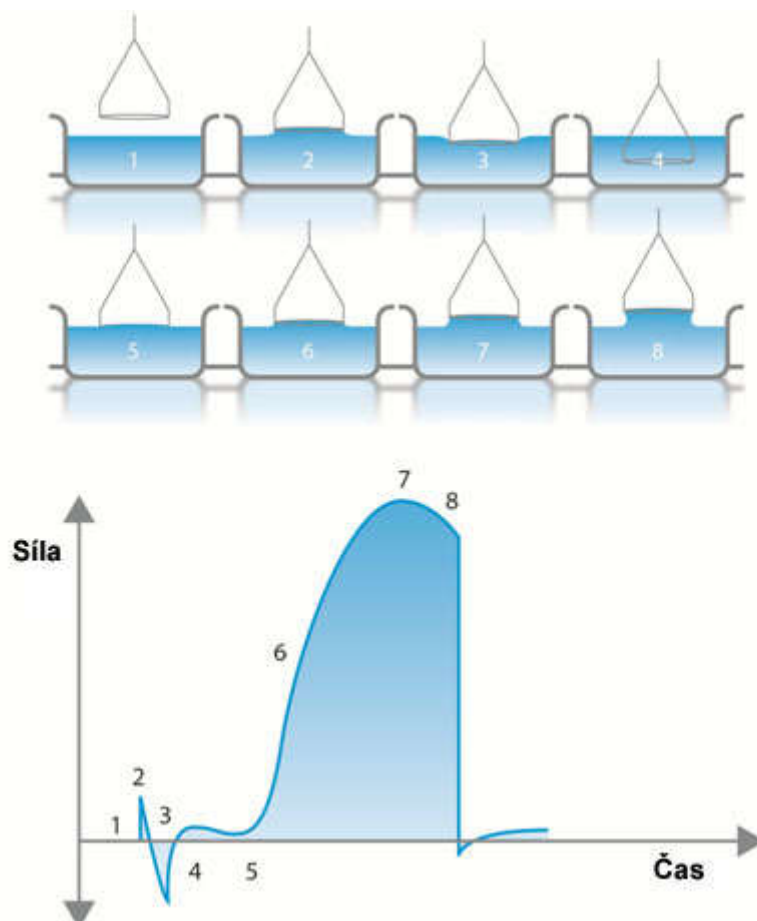
Vypočítá se:

$$\sigma \sim \frac{U}{2R^2} \quad (5)$$

kde σ je povrchové napětí, U celková kohezní energie molekuly a R^2 je plocha molekuly.

Jednou z metod měření povrchového napětí je DuNoüy kroužková metoda (Obrázek 7). Používá se kroužek z platinového drátu, který se ponoří do kapaliny. Při vytahování kroužku z kapaliny se měří síla, která je zapotřebí pro překonání povrchového napětí.

V prvním kroku se kroužek nachází nad kapalinou (1). Poté se kroužek dotkne hladiny, což vyvolá pozitivní hodnotu díky adhezní síle mezi kroužkem a kapalinou (2). Vzápětí musí být kroužek protlačen do kapaliny, což vyvolává negativní sílu (3). Kroužek se dostane pod hladinu a naměříme malé pozitivní síly kvůli podpůrnému drátku (4). Když začneme drátek vytahovat z kapaliny, tak se začne zvyšovat i potřebná síla (5). Následně síla postupně roste (6). Za určitý čas dojde k dosažení maximální síly (7). A nakonec těsně před překonáním povrchového napětí naměřená síla mírně klesne (8) [17].



Obrázek 7 Jednotlivé etapy měření povrchového napětí kroužkovou metodou DuNoüy.[17]

Hodnota povrchového napětí významně ovlivňuje smáčení potiskovaného substrátu, a tedy i šíření inkoustu po substrátu.

6.2.1 Smáčení substrátu

Rozprostření kapky na substrátu se vyjadřuje za pomoci Youngovi rovnice:

$$\sigma_{sv} = \sigma_{s-i} + \sigma_{i-v} * \cos \theta \quad (6)$$

kde σ_{sv} je rozdíl mezifázového napětí mezi substrátem a párou, σ_{s-i} rozdíl mezifázového napětí mezi substrátem a inkoustem, σ_{i-v} je rozdíl mezifázového napětí mezi inkoustem a párou a θ je kontaktní úhel mezi kapkou a substrátem.

Velký kontaktní úhel ($>90^\circ$) naznačuje špatnou smáčení substrátu použitým inkoustem. Malý kontaktní úhel naznačuje dobré smáčení povrchu substrátu:



Obrázek 8 Ilustrace smáčení substrátu kapalinou.[5]

Povrchy s nízkým povrchovým napětím jako např. PTFE jsou velmi obtížné smáčet. Pro tisk se považuje, když je povrchové napětí inkoustu o 7-10 mN/m menší než povrchové napětí substrátu. Pokud se tiskne např. na PET o povrchovém napětí 48 mN/m, pak by inkoust měl mít povrchové napětí $<30\text{mN/m}$.[5]

6.3 Bezrozměrné kritéria

6.3.1 Ohnesorgovo číslo

Ohnesorgovo číslo dává do vztahu viskozitu, setrvačnost a povrchové napětí. S číslem přišel roku 1936 Wolfgang von Ohnesorge. [18]

Vypočítá se ze vztahu:

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma L}} \quad (7)$$

kde μ je dynamická viskozita kapaliny, ρ hustota kapaliny, σ povrchové napětí a L je charakteristická délková velikost (typicky průměr kapky).

Pro inkoustový tisk je důležité, aby Ohnesorgovo číslo inkoustu bylo mezi 0,1 a 1, pak je inkoust tisknutelný a nemá tendenci usazovat se v trysce.

Opakem Ohnesorgova čísla je Z -číslo. Inkoust by měl mít $Z > 4$ a $Z < 14$. Pokud má inkoust Z -číslo menší jak 4, tak kapka bude mít dlouhý ocas a satelitní kapky. Pokud je Z větší jak 14, tak inkoust nevytvoří kapku [19].

6.3.2 Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo udává poměr mezi setrvačností a viskozitou kapaliny. Používá se pro identifikování tzv. laminárního nebo turbulentního proudění. Kritická hodnota mezi těmito dvěma typy se pohybuje zpravidla kolem hodnoty 2000. [20]

Výpočet:

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad (8)$$

kde u je rychlost toku, L charakteristická délka (průměr trysky) a ν je kinetická viskozita kapaliny.

6.3.3 Weberovo číslo

Weberovo číslo je vztah mezi setrvačností kapaliny v porovnání s jejím povrchovým napětím. Často se používá pro hodnocení toku tenkých filmů a tvorby kapek a bublin.[21]

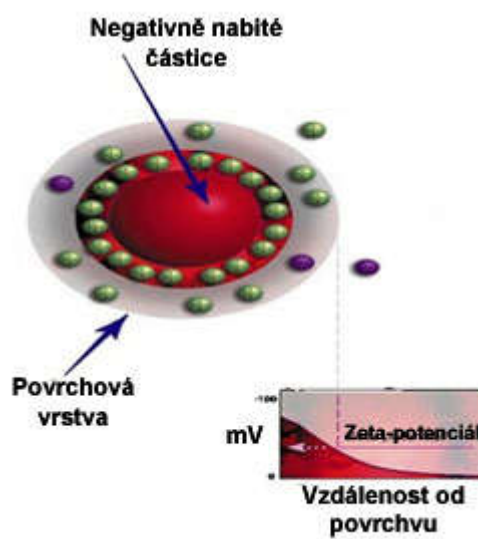
Výpočet:

$$We = \frac{\rho v^2 L}{\sigma} \quad (9)$$

kde ρ hustota kapaliny, v rychlost, L charakteristická délka (průměr kapky) a σ povrchové napětí.

6.3.4 Zeta-potenciál

Zeta-potenciálem lze měřit velikost přitažlivosti nebo resp. odpuzení mezi částicemi. Používá se pro určování stability koloidních systémů. Mezi částicí a okolím se měří povrchový potenciál. Uvnitř tzv. elektrické dvojvrstvy se nachází Sternova vrstva a na hranici mezi dvojvrstvou a okolím se měří zeta-potenciál. Neměří se přímo, ale stanovuje se experimentálně buď elektro-kineticky nebo elektro-akusticky. [22]



Obrázek 9 Znázornění Sternovy vrstvy a elektrické dvojvrstvy pro měření Zeta-potenciálu.[22]

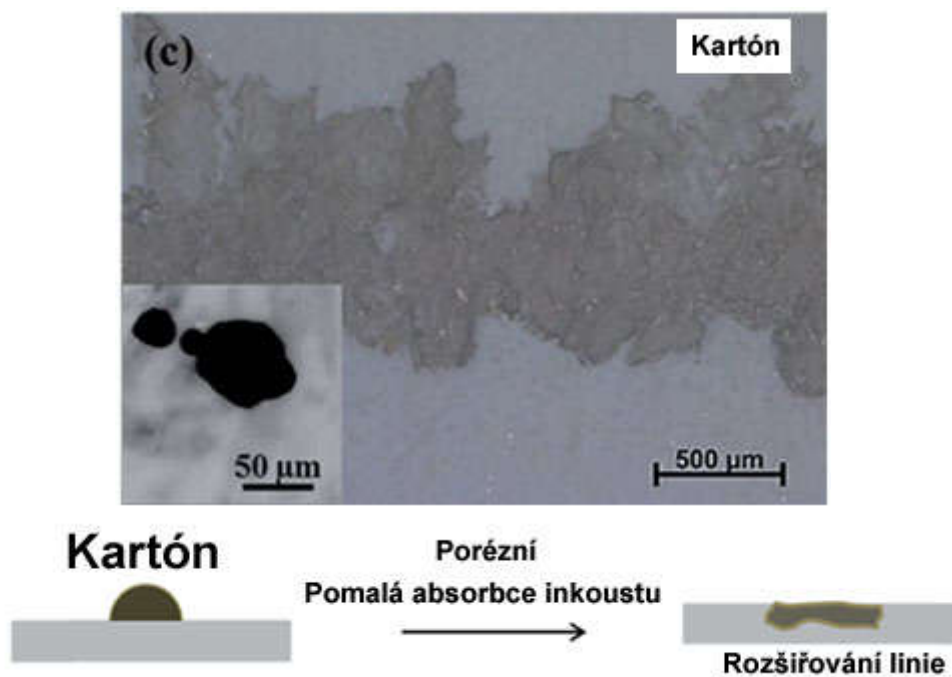
7 SUBSTRÁTY

Velikost jedné inkoustové vrstvy na substrátu se pohybuje v rozmezí od 0,2 do 2 mikronů. U substrátů se sleduje především povrchová energie a drsnost jako faktory ovlivňující kvalitu tisku. Kromě toho, u elektricky-vodivých inkoustů s obsahem kovových nanočástic je zapotřebí vytvrzování teplem v rozmezí od 150 do 200°C (i vyšší teploty v závislosti na použitém inkoustu a typu vodivých částic). Substrát musí být schopen tyto teploty zvládnout bez deformací či degradace. Navíc, nasákavost povrchu je rovněž důležitá pro elektrickou vodivost natištěných vzorů.[19]

Samozřejmě je nutné před přípravou vzorů vzít v úvahu i chemickou stabilitu substrátu vzhledem k rozpouštědlům použitých pro přípravu inkoustů. Celulózové nanočástice (CNC) se využívají nejen jako přísada do inkoustů, ale také je lze použít jako speciální povrchová úprava před tiskem. [19]

7.1 Porézní povrch

Porézní povrchy jsou silně nasákavé, čímž dochází ke zvětšení natištěného vzoru. U kartónu jde až o 75% pro inkoust na vodní bázi. Tempo nasákávání inkoustu do substrátu je pozvolné.



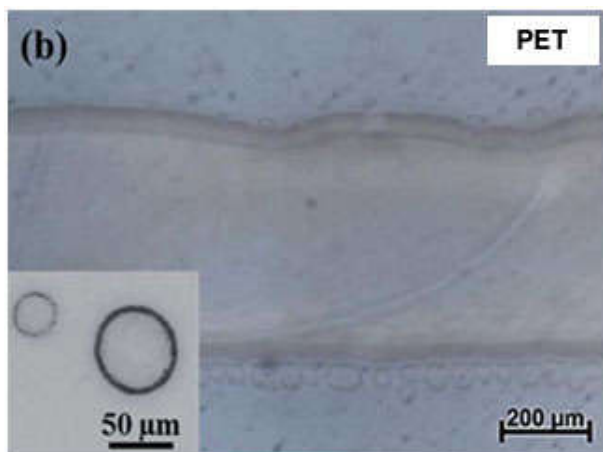
Obrázek 10 Tisk inkoustu na kartón a řez natisknuté kapky.[19]

7.2 Polymerní povrch

U nenasákavých povrchů jako např. PET, se vyskytuje často známý defekt tisk zvaný prstencový efekt, kdy dochází k aglomeraci inkoustu na okrajích vysychající kapky. K tomu dochází kvůli tomu, že rozpouštědlo se odpařuje hlavně na okrajích natištěné kapky.



Obrázek 11 Princip vzniku prstencového efektu. K odpařování dochází především na okrajích. To vytváří tok kapaliny směrem od středu k okraji.[5]



Obrázek 12 Tisk inkoustu na PET.[19]

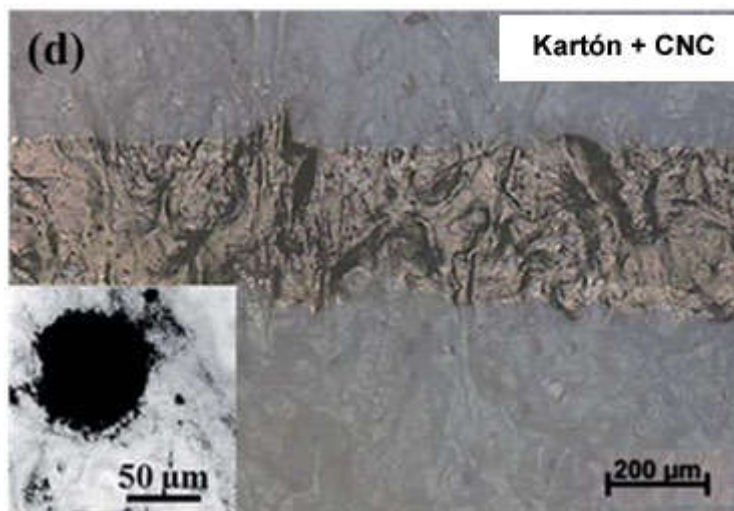
Tento defekt lze omezit přidáním dalšího rozpouštědla, které je méně náchylné na natahování k okrajům natištěné kapky.



Obrázek 13 Smáčivost inkoustu na PET a řez natištěné kapky. Vznik prstencového efektu.[19]

7.3 Povrch ošetřený celulóзовou vrstvou

Když se použije CNC jako povrchová úprava pro inkoustový tisk, tak lze docílit vlastností tisku, které ostatní substráty postrádají. Nasákavost substrátu je nižší. Zvětšení natištěného vzoru se pohybuje okolo 25%. Tím se docílí vyššího rozlišení. Tempo nasákavosti je zpočátku velmi rychlé a následně se ustálí. Tato rychlá nasákavost nejspíš vede k absenci prstencového efektu, který se u takto ošetřeného substrátu nevyskytuje.



Obrázek 14 Inkoust na kartónu ošetřený vrstvou CNC.[19]

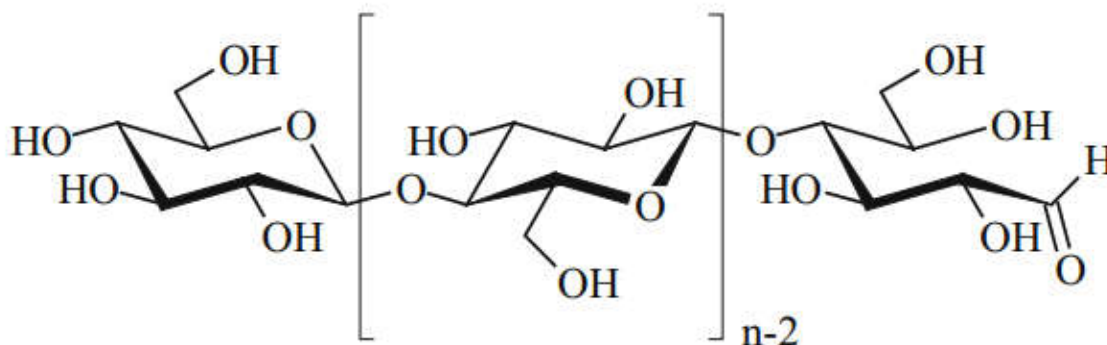
Na druhou stranu celulóзовá vrstva substrátu zvyšuje drsnost.



Obrázek 15 Řez natištěnou kapku a smáčení povrchu kartónu ošetřeného vrstvou CNC.[19]

8 CELULÓZA

Tento nejrozšířenější biopolymer na světě je stavební látkou rostlinných buněčných stěn. Celulóza je polysacharid skládající se z beta-D-glukózy. Jednotky glukózy jsou vázány β -1,4-glykosidovou vazbou. Celulóza se skládá z dlouhých řetězců, které nejsou větvené. [23]



Obrázek 16 Strukturální vzorec celulózy. [23]

Systematický název:	poly- β (1,4) glukóza
Sumární vzorec:	$[C_6H_{10}O_5]_n$
Molární hmotnost:	300 000 až 500 000 g/mol
Hustota:	1,56 g/cm ³
Bod tání:	260-270 °C (rozpad)

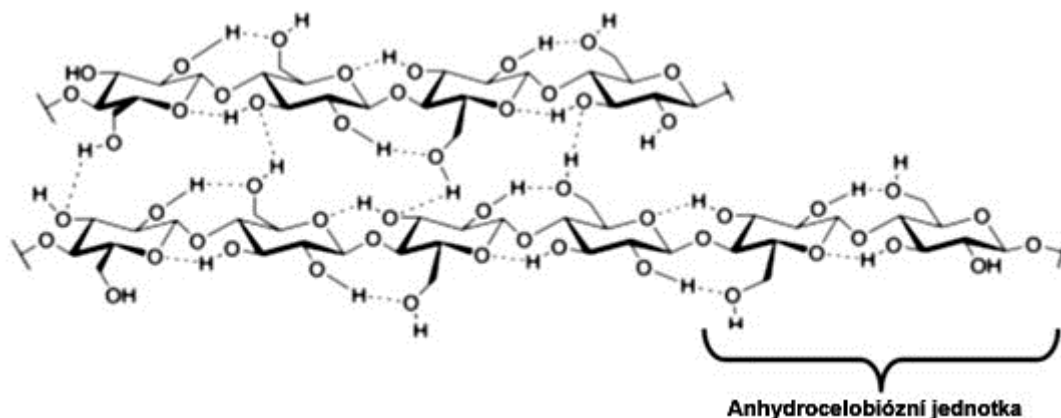
V roce 1838 byla celulóza objevena francouzským chemikem Anselmem Payenem, který určil její vzorec. V roce 1870 byla poprvé celulóza použita jako termoplastický polymer firmou Hyatt Manufacturing Company. V roce 1920 Hermann Staudinger určil polymerní strukturu celulózy. A v roce 1992 byla poprvé chemicky syntetizována celulóza bez použití biologických enzymů. [23]

Celulóza je dostupná, stabilní, ne-toxická, obnovitelná, splňuje podmínky pro použití ve farmacii.

Celulóza je nerozpustná ve vodě a ve většině běžných rozpouštědel. Nerozpustnost je přisuzována hlavně silným intramolekulárním a mezimolekulárním vodíkovým vazbám mezi jednotlivými řetězci. [24]

Rozpouštění celulózy

Celulóza se netaví a nelze ji rozpustit ve vodných ani organických rozpouštědlech. Musí se použít více agresivnější rozpouštědla. Je to dáno především vodíkovými intramolekulárními a intermolekulárními silami, které jsou velmi silné, a také vysokým polymeračním stupněm: [25][26]



Obrázek 17 Znázornění vodíkových sil mezi molekulami celulózy. [25]

Jednou z možností je použít iontové kapaliny, které se všeobecně skládají z velké hustoty nízko nabitých organických kationtů a velkou hustotou nízko nabitých anorganických aniontů. I při nízkých teplotách (<100°C) jde o chemicky a teplotně stabilní, recyklovatelné a v některých případech i nehořlavé kapaliny. To z nich dělá atraktivní rozpouštědlo v procesu zpracování celulózy.[27][28] Mezi nejpoužívanější kationty patří imidazolium s různými alkylovými substituenty, pyridinium a ammonium. Kationty či anionty musí být dostatečně malé, aby se dostali k hydroxylovým skupinám celulózy. Avšak hlavní úlohu v rozpouštění sehrávají anionty. Z iontových kapalin se používá např. [C2mim][OAc] (1-Ethyl-3-methyl-imidazolium acetate), [C2mim]Cl 1-Ethyl-3-methylimidazolium chloride nebo 1-butyl-3-methyl-imidazolium chlorid.[29][23]

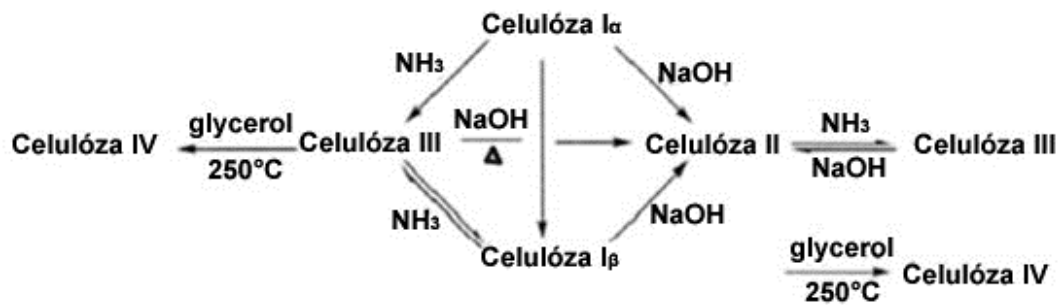
Celulózu lze také rozpouštět v anorganických komplexech kovů jako např. kupren ($[\text{Cu}(\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{NH}_2)_2](\text{OH})_2$), nitren ($[\text{Ni}(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2)_3\text{N}](\text{OH})_2$) aj.[30]

Další skupinu pro rozpouštění celulózy tvoří anorganické hydráty roztavených solí. Sem spadají látky jako $\text{LiClO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{LiI}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{LiSCN} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}(\text{NCS})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ aj.[31]

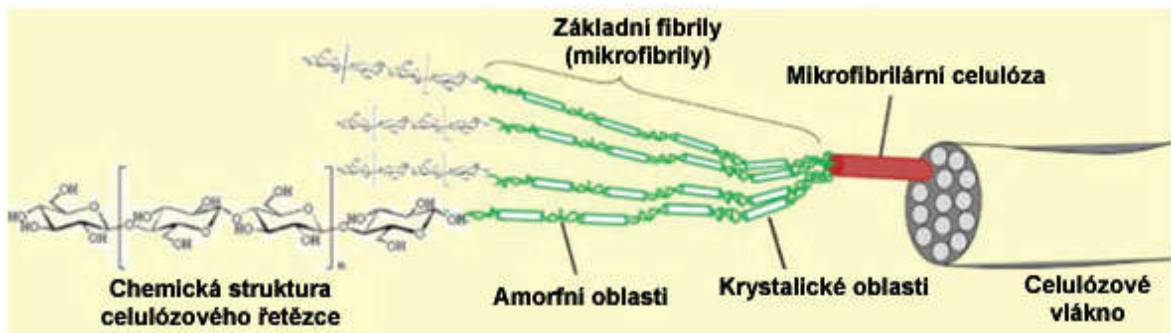
Polymorfismus celulózy

Celulóza vzniká ve 4 formách:

1. Celulóza I
 - přírodní celulóza, která je metastabilní
2. Celulóza II
 - vzniká z celulózy I a tento proces je nevratný
 - jde o stabilní formu
 - nazývá se rovněž jako regenerovaná celulóza
3. Celulóza III
 - vzniká buď z celulózy I nebo II a tento proces lze vrátit
 - připravuje se etylendiaminem
4. Celulóza IV
 - vzniká z celulózy III za pomoci glycerolu při vysoké teplotě[24]



Obrázek 18 Vztahy mezi jednotlivými formami celulózy a jejich vzniku.[24]



Obrázek 19 Struktura celulóзовého vlákna.[23]

Celulóza se využívá v řadě odvětví. V potravinářství a medicíně jako obalový materiál potravin a léků. V papírenském průmyslu tvoří hlavní složku tiskovin. Rovněž se používá na výrobu filtrů, polstrování a sítí. V neposlední řadě se s ní lze setkat jako plnivo do kompozitních materiálů a různých povlaků. [32]

8.1 Zdroje pro výrobu celulózy

A. Přírodní rostlinná vlákna

Tabulka 2 Přírodní zdroje celulózy a jejich složení.[33]

Zdroj	Složení (%)			
	Celulóza	Hemi-celulóza	Lignin	Extrakt
Dřevo	43-47	23-25	16-24	2-8
Stonky kukuřice	35-45	25	17-21	4-7
Bavlna	95	2	1	0,4
Konopí	70	22	6	2
Juta	71	14	13	2
Stébla rýže	43	33	20	1
Sisal	73	14	11	2
Stébla pšenice	58-73	25-31	16-23	3-5,8

B. Syntetické vlákna

- z ropných derivátů

2 typy celulózy:

1. regenerovaná
2. čistá celulóza

Rozdělení délky vláken:

1. krátké vlákna (poměr délky a průměru 20 až 60:1)
2. dlouhé vlákna (kontinuální vlákna s poměrem 200 až 500:1)

8.2 Způsoby získávání celulózy:

A. Extrakce z palmové drti za použití oxidace kapalně fáze

1. rozemletí palmových plodů zbavených oleje
2. palmová drť se zahřeje na 160-180°C v destilované vodě po dobu 30 minut
3. poté se nechá zchladit

4. drť se prolije destilovanou vodou a etanolem
5. přidá se 30% H_2O_2 po dobu 10-24h při teplotě 60-80°C
6. promyje se studenou vodou
7. přefiltruje se

B. Extrakce ze zemědělského odpadu

1. Vysuší se zemědělské zbytky jako obilná sláma nebo stébla rýže
2. povaří se s 90% kys. mravenčí po dobu 120 minut
3. prolije se znovu kys. mravenčí
4. přidá se 4% H_2O_2
5. upraví se pH na 11 za pomoci NaOH
6. hydrolýza kyselinou sírovou po dobu 5h a teplotě 45 °C za konstantního míchání
7. výsledná směs se promyje studenou vodou a opakovaně se odstřeďuje
8. zbytek se vysuší ve vakuu na konstantní hmotnost po dobu 48 hodin

C. Extrakce ze dřeva

1. k suchému vzorku dřeva se přidá diethyl glykol dimethyl ether a HCl
2. nechá se ve vodní lázni o teplotě 90°C po dobu 60 minut za občasného třepání
3. nechá se ochladit a odstředít
4. promyje se 3x metanolem a destilovanou vodou
5. nechá se vysušit

D. Extrakce z bavlny

1. ke vzorku se přidá NaOH a nechá se povařit při teplotě 105°C po dobu 1h
2. přidá se peroxid vodíku
3. provede se hydrolýza za pomoci HCl
4. nechá se ochladit a profiltrovat
5. zbytek se vysuší v peci při 40°C po dobu 24h [23]

Chemickými úpravami můžeme získat různé deriváty celulózy jako např. ethyl celulóza, methyl celulóza, SMCC (silicified microcrystalline cellulose), hydroxyethylcellulose.[24]

9 CELULÓZA PRO INKOUSTOVÝ TISK

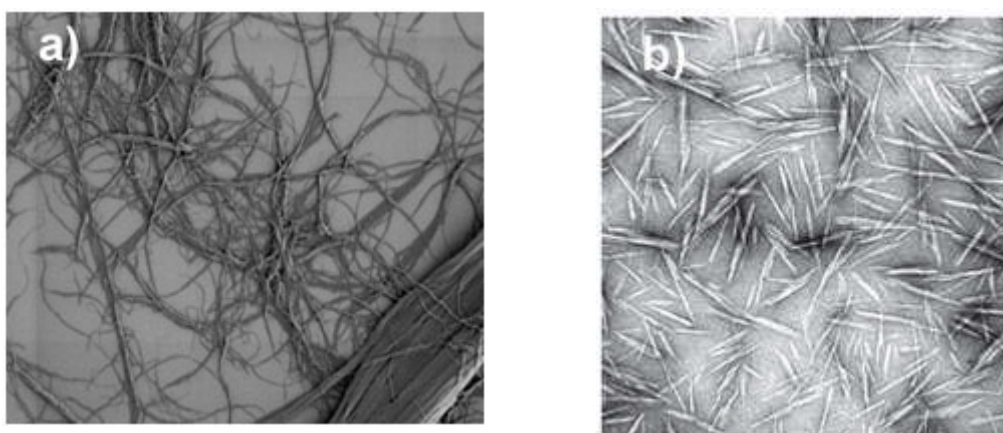
Celulóza se může použít v několika podobách pro inkoustový tisk. Nejčastěji se používají:

1. Mikrokrystalická celulóza (MCC)
2. Celulózové nanokrystaly (CNC)

Liší se velikostí.

MCC – vláknovitý tvar o velikosti od 20 do 200 μm

CNC – tyčovitý tvar o délce 100nm a průměru 5-10nm[34]



Obrázek 20 a) MCC, b) CNC [35]

9.1 Metody získávání MCC a CNC

Celulóza se skládá z dlouhých fibril. Aby bylo možné získat celulózové nanokrystaly, tak se musí fibrily zkrátit. Postupy získávání se dělí na:

A. MECHANICKÉ

- a. homogenizace za vysokého tlaku
- b. mikrofluidizace
- c. jemné mletí
- d. drcení zmražené celulózy

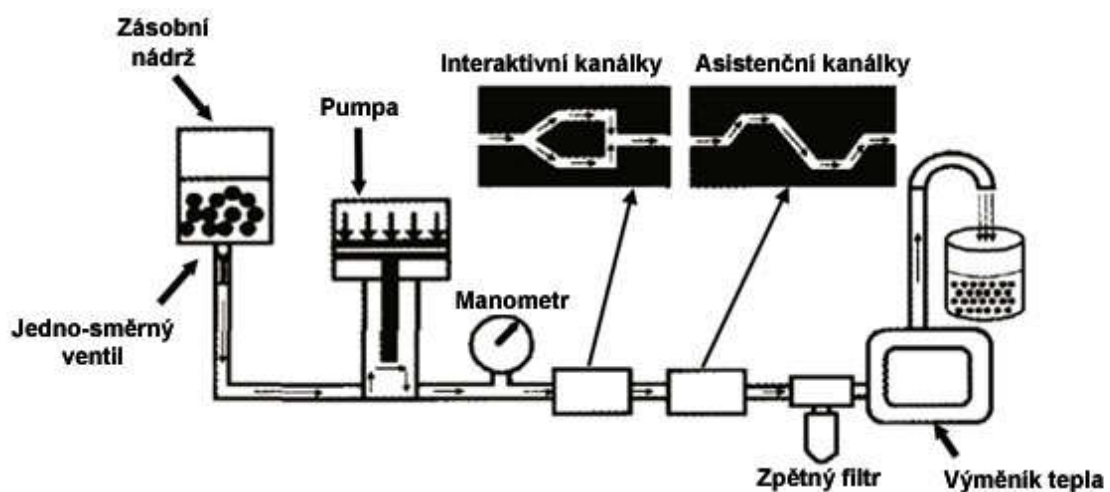
Homogenizace za vysokého tlaku

Surový materiál je vytlačován pístem skrz trysku o průměru 0,1mm rychlostí 200-300m/s. Tím dochází k přetržení dlouhých celulózových fibril na krátké jemné částice. Metoda vznikla v 80. letech. Získá se stabilní mikrokrystalický celulózový gel s vysokou viskozitou. Pokud se použije síla 600 barů a cyklus se opakuje 10 krát, tak lze získat

částice o průměru 3-18 nm. Mezi nevýhody metody patří vysoké energetické náklady na vyvinutí vysoké síly v pístu a také náchylnost pístu na zanesení dlouhými celulózovými vlákny.

Mikrofluidizace

Tato metoda využívá sílu 4000 barů a posílá proud směsi surového materiálu a vody proti sobě v hlavě s tryskami. Tato metoda je rovněž energeticky náročná, také se zde vyskytuje riziko zanesení systému dlouhými celulózovými vlákny a je těžko aplikovatelná v průmyslovém měřítku.



Obrázek 21 Schéma procesu mikrofluidizace.[36]

Jemné mletí

Tato metoda spočívá v rozemletí materiálu v drtiči, který se skládá ze dvou ozubených disků. Vnější disk je stacionární a vnitřní disk je rotační. Materiál je drcen silou mezi disky. Jde o málo účinnou metodu, kdy musí docházet až 15-násobnému opakování cyklu, aby bylo dosaženo velikosti částic o průměru 10-40nm.

Drcení mražené celulózy

Tekutým dusíkem se zmrazí směs vody s celulózovými vlákny. Následně se zmrzlý materiál drtí. Metoda je vysoce nákladná a proto se nepoužívá. [36] [37]

Kvůli energetické náročnosti se mechanické způsoby získávání CNC moc nepoužívají a převažují chemické metody:

B. CHEMICKÉ

a. zásaditá hydrolýza

- b. kyselá hydrolýza
- c. biologická fermentace

Cílem chemických postupů je přerušit β -1,4-glukosidickou vazbu. Hydrolýza je chemický způsob, jak získat CNC. Chemický přístup má tu výhodu, že díky němu lze z mikrostruktury celulózy snížit obsah amorfni fáze a cíleně zachovat krystalickou část v podobě fibril.

Zásaditá hydrolýza

Pro zásaditou hydrolýzu se používají NaOH při teplotě 60°C po dobu 2 hodin. Rovněž se používá NaClO. Tímto způsobem se získá II-forma celulózy o velikosti částic 150nm. Nicméně zásaditá hydrolýza se zpravidla používá jako přípravný krok, kdy je cílem ze surové směsi rozpustit lignin a pektin.

Kyselá hydrolýza

Lze postupovat několika způsoby:

1. Za použití 55 hmot. % kyseliny sírové a 10 hmot.% síran sodný m-nitrobenzen jako katalyzátor po dobu 5h a při teplotě 50°C
2. Jako katalyzátor použít síran měďnatý a lineární alkylbenzensulfonan sodný
3. Lze použít ultrazvuk s kyselinou sírovou, kde vzniknou fibrily o průměru 10nm a délce 200-400nm s krystalinitou 63%

Hydrolýza má však velkou nevýhodu v podobě odpadních kyselin, zásad, vody a residuí. Na druhou stranu jde o levný proces.

Biologická fermentace

V roce 1886 byla poprvé získána celulóza z bakterií. Používají se rody bakterií jako Acetobakter, Azotobakter a Achromobakter. Celulóza získaná z bakterií je čistší, krystalinita přesahuje 60% a stupeň polymerizace se pohybuje mezi 2000 až 6000. Celulóza je vytlačována z bakterií přes jejich póry v buněčných stěnách. Průměr nanofibril se pohybuje mezi 2 až 4 nm a délka v řádech stovek mikrometrů. [36] [37]

9.2 Inkousty obsahující celulózu

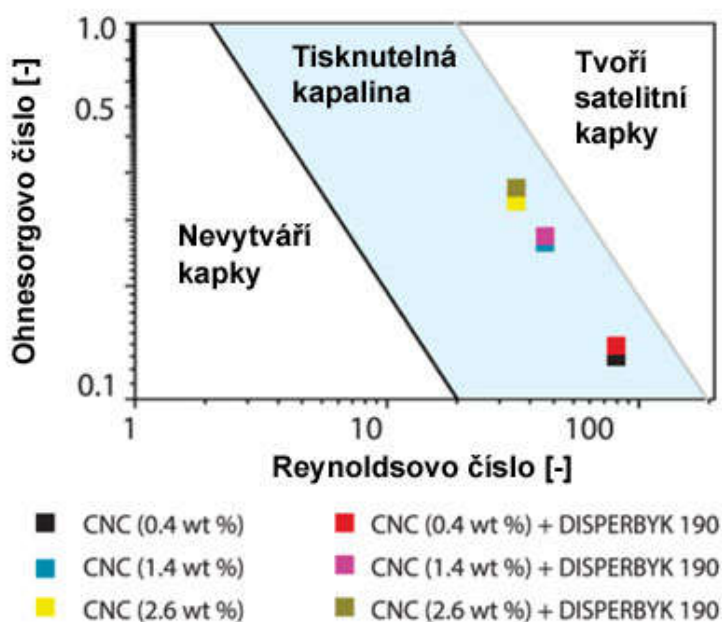
Do inkoustů pro inkoustový tisk se používají CNC získané hydrolýzou. CNC mohou obsahovat sulfo-skupiny (s-CNC) nebo karboxylové skupiny (c-CNC) v závislosti na tom, jaká hydrolýza byla použita. Díky svým optickým vlastnostem se tyto inkousty používají pro tisk ochranných prvků cenin, polygrafických dekorací nebo fotografických filtrů.[8]

Tabulka 3 Vlastnosti vodných suspenzí pro s-CNC a c-CNC.[36]

CNC typ	hmot. %	pH	ζ -potenciál, mV	viskozita, Pa·s	povrchové napětí, mN/m	objem-průměrná délka, nm
c-CNC	2,5	1,7	$-21,3 \pm 0,3$	$3,9 \pm 0,3$	$62,1 \pm 0,5$	273 ± 53
s-CNC	3,0	2,2	$-29,4 \pm 0,2$	$4,6 \pm 0,5$	$59,0 \pm 0,5$	314 ± 54

Tabulka 4 Reologické parametry s-CNC při hustotě inkoustu 1020kg/m^3 . [36]

Složení inkoustu	ζ -potenciál	povrchové napětí, mN/m	viskozita, mPa·s	Oh	Re
CNC (0,4 hmot. %)	$-27,3 \pm 0,5$	$67,7 \pm 0,8$	$1,6 \pm 0,3$	0,13	82,24
CNC (1,4 hmot. %)	$-32,6 \pm 0,5$	$68,1 \pm 0,3$	$3,1 \pm 0,2$	0,26	42,45
CNC (2,6 hmot. %)	$-18,5 \pm 0,6$	$64,0 \pm 0,8$	$4,0 \pm 0,2$	0,34	32,9



Obrázek 22 Graf závislosti Oh na Re čísla pro inkousty s obsahem CNC.[36]

Graf na obrázku 22 znázorňuje mapu tisknutelnosti, která je rozdělená na 3 oblasti. V první oblasti se Re pohybuje na nízkých hodnotách a inkoust nevytvoří kapku (viskozita inkoustů je vysoká). V prostřední oblasti inkoust vytváří sférické kapky při tisku (tato oblast představuje oblast dobré tisknutelnosti). V třetí oblasti je viskozita inkoustu natolik nízká, že při tisku vznikají satelitní kapky a inkoust vytváří šplíchanec při dopadu na substrát (špatná kvalita připraveného vzoru).[36]

Pro tištěnou elektroniku se používá jako vodivý materiál stříbro, které je odolné vůči oxidaci. Na druhou stranu nanočástice stříbra agregují, což negativně ovlivňuje tisk. Inkoust na vodní bázi obsahující stříbrné nanočástice lze obohatit o celulózové nanočástice (CNC), kterými lze snížit obsah stříbrných nanočástic a při tom zachovat vodivost natisknutého inkoustu. Navíc se přidávkem CNC dosáhne stability inkoustu na vodní bázi, což je obtížné u kovových přísad.[19]

Příklad celulózového inkoustu se stříbrnými nanočásticemi:

200 ml 0,5 hmot.% CNC po TEMPO oxidaci při neutrální pH se smíchá s 200 ml 0,5mmol hexadecylpyridinium chloridem po dobu 5 min. Pak se přidá 10mmol 200ml $AgNO_3$ a míchá 5 min. Nakonec se přidá 30mmol 200ml $NaBH_4$ a míchá po dobu 5 min. Výsledná suspenze projde centrifugou po dobu 20 minut o 10 000 otáčkách/minutu. Výsledná sedimentace byla znovu rozpuštěna ultrasonickou sondou při 20 kHz po dobu 15 minut.

Při použití stříbrných nanočástic v kombinaci s CNC lze významně snížit obsah stříbra. Již při 3 hmot% stříbra lze dosáhnout elektrické vodivosti natištěného inkoustu. Při zvyšování obsahu stříbra v inkoustu dochází k agregaci stříbra po vytištění. To je způsobeno odpudivými silami celulózových nanočástic.[19][38]

Tabulka 5 Vlastnosti různých inkoustů obsahující CNC a stříbro.[19]

inkoust	obsah CNC (hmot. %)	obsah stříbra (hmot.%)	odpor 5ml kapky (Ω)	Stability inkoustu z hlediska sedimentace částic.
CNC-stříbro 1	0,4+/-0,4	1,0+/-0,1	nevodivý	stabilní
CNC-stříbro 2	0,9+/-0,3	2,1+/-0,1	nevodivý	stabilní
CNC-stříbro 3	1,2+/-0,4	2,9+/-0,2	0,31+/-0,01	stabilní
CNC-stříbro 4	2,1+/-0,1	4,2+/-0,2	0,12+/-0,02	1den nestabilní

Kovové nanočástice v inkoustech vyžadují vytvrzování po tisku, aby bylo dosaženo kontinuální vodivosti natištěného inkoustu. Záleží však na složení inkoustu a velikosti tištěné elektrické cesty. V případě vzorků CNC-stříbro 1 až CNC-stříbro 3 při

obsah stříbra ve výši 3 hmot. % je zapotřebí teplota 250°C po dobu 30 minut a tím získáme vodivé cesty o odporu desítek Ohmů. [19] Avšak existuje celá řada komerčních vodivých inkoustů, které se liší teplotou pro vytvrzování.

K dosažení tisknutelnosti inkoustu se používají snižovače povrchového napětí (povrchově aktivní látky, surfaktanty). Např. pro výše zmíněný systém celulózových a stříbrných nanočástic se může použít dioctylsulfosuccinate (DSS). Vliv přídavku DSS na povrchové napětí připravovaného inkoustu je patrný z Tabulky 6, stejně jako výsledná hodnota bezrozměrných kritérií, které jsou využívány pro hodnocení tisknutelnosti. Postupně lze dosáhnout hranice $4 < Z < 14$, která byla stanovená pro optimální proces tisku. [19]

Tabulka 6 Porovnání inkoustu CNC+stříbro se stejnými inkousty s přídavkem DSS. [19]

Suspence	DSS snižovač množství (hmot. %)	Viskozita (mPa·s)	Povrchové napětí (mN/m)	Rychlost kapky (m/s)	<i>Re</i>	<i>We</i>	<i>Z</i>
CNC–stříbro	0	1,2 +/- 0,3	50,1 +/- 0,7	15	43	133	20,4
DSS (0,05)	0,05	1,3 +/- 0,2	41,3 +/- 0,9	14	52	142	19,7
DSS (0,15)	0,15	1,9 +/- 0,4	29,1 +/- 0,1	14	71	101	13,3
DSS (0,2)	0,2	1,9 +/- 0,3	26,7 +/- 0,3	14	80	112	12,5

9.3 Celulóza jako podkladový materiál (substrát)

Absorpce inkoustu na neošetřeném tiskařském papíře vede často k problémům s kvalitou tisku. Namísto toho, aby inkoust zůstal na povrchu, tak se vsaje do substrátu. Někdy je tento efekt žádoucí, někdy je zapotřebí zachovat inkoust na substrátu. Toho lze dosáhnout, když bude substrát na povrchu hydrofilní a uvnitř substrátu hydrofobní. Jednou z možností je použití nano-fibrilární celulózy (NFC) jako ošetření povrchu substrátu pro tisk. [39]

Tím se zlepší kvalita tisku (ostřejší hrany tištěného vzoru) a to vede k možnosti tisknout vzory hustěji k sobě. Hmotnost vrstvy NFC se pohybuje od 2,0 do 5,0 g/m².

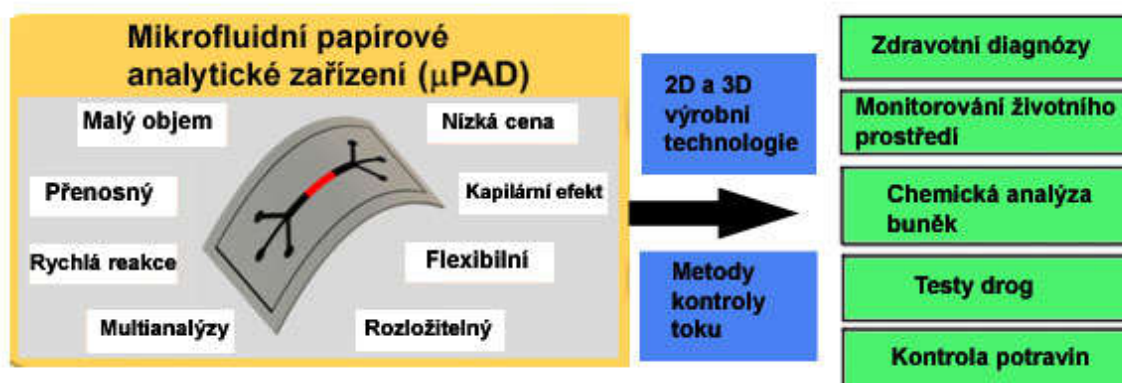
NFC se chová hydrofilně, avšak drží natištěnou kapku ve vysokém kontaktním úhlu. Vrstva NFC pomáhá nasáknout inkoust do vrstvy, ale nepustí inkoust dál do substrátu. [39].

9.3.1 Mikrofluidní-papírové analytické zařízení (Mikrofluidics paper-based analytical devices - μ PADs)

Testování za pomoci papírových indikátorů se datuje do počátku 18.století, kdy vznikl lakmusový test. O století později přišly papírové indikátory s hydrofobními materiály, kde reakční zóny byly tvořeny parafíny. Až v roce 2007 se začaly vyrábět papírové indikátory s mikrofluidikou jako alternativa pro zařízení na testování nemocí, drog a monitoring životního prostředí. Tím se na trh dostaly testy, jež byly dostupné, přenosné a v přírodě rozložitelné.[40]

Papírové indikátory mají tu hlavní výhodu, že využívají tzv. kapilární efekt. Není zapotřebí žádné pumpy a testovaná kapalina putuje po papírovém substrátu.

Jedním z možností výroby μ PADs je inkoustový tisk. Výhodou je, že k tisku je zapotřebí pouze speciálně upravená tiskárna pro inkoustový tisk. Jako inkoust se používají hydrofobní inkousty a UV-tvrditelné akrylátové inkousty.



Obrázek 23 Vlastnosti a použití μ PADs.[40]

Mezi hydrofobní inkousty se nejčastěji používají AKD-heptany (Alkyl keton dimer). AKD lze nanášet namáčením nebo tisknutím na papír. Obě metody mají přibližně stejné výsledky v rámci ochrany papíru vůči nasákavosti vodou. Po nanesení AKD na papír je nezbytné tvrzení v peci při 100°C po dobu 8 minut.[40]

Hydrofobní sol-gel na bázi methylsilsequioxanu (MSQ) mají výhodu nad AKD v odolnosti vůči rozpouštědlům (MSQ) odolávající glycerolu, toluenu a dimethylsulfoxid (DMSO). Avšak jak vosky, AKD, tak MSQ nejsou odolné vůči alkoholům. Na druhou stranu MSQ je daleko vhodnější pro inkoustový tisk tím, že nezanáší hlavu a zásobník tiskárny.

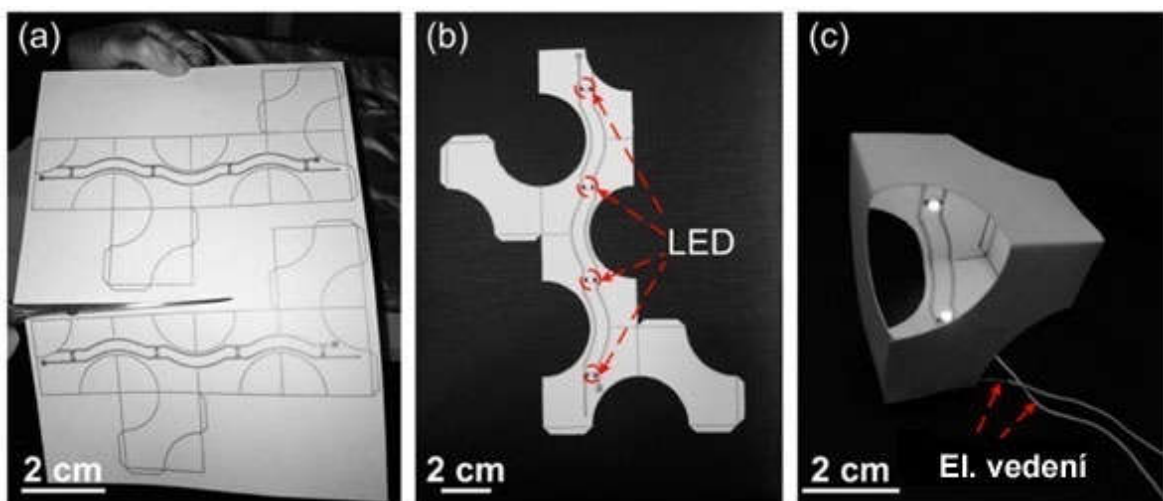
9.3.2 Flexibilní elektronický obvod

Papír je levný, ekologický, lehký, široce používaný materiál, na který lze za pomoci inkoustového tisku nanést elektronické obvody. Výhodou papíru je také flexibilita. Tímto způsobem natištěný obvod můžeme na papíře stříhat nebo ohýbat do 3D modelů.

Kritickým místem jsou záhyby obvodů. V místech ohybů vznikají praskliny, které snižují elektrickou vodivost obvodu. Právě zde nachází své využití celulózové nanokrystaly (CNC), které snižují náchylnost inkoustů na praskliny při ohýbání a tím zvyšují mechanickou odolnost. Také zlepšují odolnost inkoustů vůči oxidaci.[41]

Oproti μ PADs, kde se využívá nasákavosti papírového substrátu, tak se před tiskem elektronických obvodů upravuje povrch substrátu, aby se inkoust nenasákl příliš hluboko do substrátu. Po tisku funkčních elektronických obvodů se někdy vyžaduje vytvrzování inkoustu tepelným procesem. Záleží však na složení inkoustu.

Elektronické obvody natištěné na papírovém substrátu lze využít jako způsob produkce elektroniky, jež je určena pro krátkodobé použití jako např. obalové materiály. [42][6]



Obrázek 24 Natištěná flexibilní elektronika na papírovém podkladu.[42]

Flexibilní elektronika natištěná na papíře jako podkladovém substrátě má několik užitečných vlastností:

- biologická rozložitelnost
- kapilární efekt (u μ PADs)
- hořlavost (snazší likvidace odpadu)
- flexibilita (jako tlakové senzory lidské kůži)

- piezoelektrický jev (inkoustovým tiskem lze vytvořit piezoelektrický nano-generátor)
- porézní materiál (lze využít pro průchod plynů)[43]

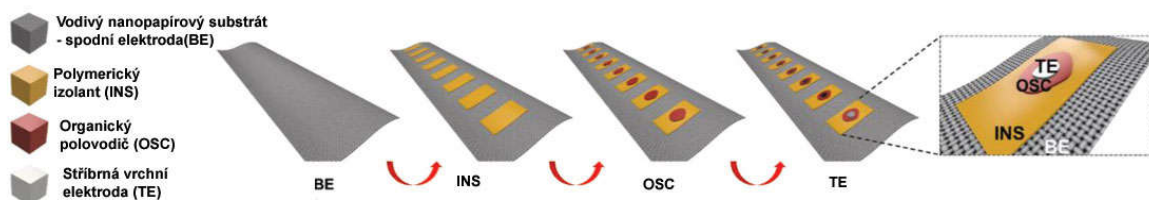
9.3.3 Celulózové nano-papírové diody jako indikátor NO₂

Oxid dusičitý patří mezi hlavní znečišťující složky z výfukových plynů. Senzory detekující NO₂ jsou však těžké, rozměrné a vyžadují zdroj elektrického napětí. Dioda v podobě organického polovodiče interaguje s NO₂ při citlivostní odezvě 4%ppm za pokojové teploty.

Dioda se skládá z:

- spodní elektroda (celulózový nano-papír)
- polymerický izolant (natištěný inkoustovým tiskem)
- organický polovodič
- stříbrná vrchní elektroda

Dioda je charakteristická tím, že elektrický proud může téct pouze jedním směrem. Celulózový nano-papír vznikl kombinací celulózových nano-fibril s poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonates) (PEDOT:PSS) a mnohostěnnými uhlíkovými nanotrubicemi (MWCNT). Materiály spolu tvoří spodní elektrodu. Izolační vrstva diody skládající se z poly(4-vinylphenol), epoxidové pryskyřice a amorfnní siliky, byla natištěna inkoustovým tiskem. Na tuto vrstvu byla nanesená vrstva organického polovodiče SP400 Merck a na to horní elektroda ze stříbra.[44]

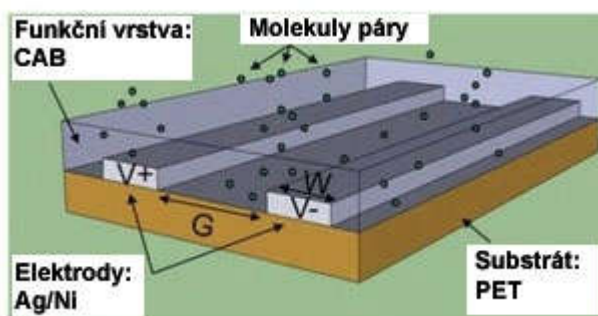


Obrázek 25 Celulózová nano-papírová dioda jako indikátor NO₂. [44]

Tímto způsobem získáme senzor z celulózových nano-vláken, který indikuje přítomnost NO₂ změnou procházejícího elektrického proudu diodou.

9.3.4 Snímač vlhkosti

Do tzv. Mikro-elektro-mechanických systémů (MEMS) lze zařadit i snímače vlhkosti. Používají se dvě vodivé elektrody (buď ze zlata nebo stříbra) mezi kterými se nachází funkční vrstva z celulóзовého acetát butyrátu (CAB). Inkoust je založený na roztoku CAB v hexyl-acetátu. Obrázek snímače vlhkosti je znázorněn na Obrázku 26.



Obrázek 26 Znárodnění částí snímače vlhkosti.[45]

Snímače vlhkosti fungují na principu změny kapacitance ve funkčním kapacitátoru mezi elektrodami.[45]

Lze použít inkousty uvedené v tabulce č.7, která obsahuje přehled inkoustů, jež obsahují CAB. V tomto případě inkousty obsahují CAB 553-0.4 nebo CAB 551-0.01, které jsou komerčně dostupné od firmy Eastman. [46]

Tabulka 7 Příklady inkoustů s CAB. [46]

Složka	(hmot. %)					
	Inkoust 1	Inkoust 2	Inkoust 3	Inkoust 4	Inkoust 5	Inkoust 6
Metyl-etyl-ke-ton	76,4	75,2	70,7	71,45	77,15	72,5
Etanol	13,6	13,3	1,3	1,3	13,6	13
Isopropanol	0	0	12,3	12,5	0	0
1-methoxy-2-propyl acetát	0	0	3	3	0	0
CAB 553-0,4	5,75	5,75	4,75	4,75	5,75	1,25
CAB 551-0,01	0	0	0	0	0	9
Zirkonium propionát	0,75	1,5	1,5	1,5	0	0,75
Erkamar 3360	0	0,75	0,75	0	0	0
SMA 1000	0	0	1,5	1,5	0	0
Tetrabutyl-amonium bromid	1	1	1,5	1,5	1	1
Uhlíkový černý pigment	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

ZÁVĚR

Technologie inkoustového tisku, ať už ve formě kontinuálního tisku nebo tisku kapky na požádání, umožňuje cílenou depozici funkčních materiálů s vysokým rozlišením. Členění inkoustového tisku, stejně jako hlavní druhy inkoustů a jejich nejvýznamnější parametry (vlastnosti) byly popsány v první části práce. Ovšem ne všechny materiály jsou vhodné pro materiálový inkoustový tisk, a tak lze tisknutelnost daného inkoustu vyhodnotit pomocí bezrozměrných kritérií. U polymerů může docházet k ucpávání trysek dlouhými makromolekulami a vysokou viskozitou inkoustu. Pro hodnocení tisknutelnosti se využívá hodnoty Z čísla, které by mělo být v rozmezí $4 < Z < 14$.

Použití technologie inkoustového tisku může zahrnovat i celulózu v různých funkcích. Celulóza představuje nejhojněji zastoupený obnovitelný biopolymer v přírodě. Mezi její hlavní vlastnosti lze například zahrnout dostupnost, obnovitelnost, bio rozložitelnost a jiné. Může být tedy vyhledávána jako náhrada za syntetické materiály, čímž lze dosáhnout nižší zátěže pro životní prostředí. Existuje celá řada druhů a způsobů získávání celulózy, které byly popsány v druhé části předložené práce. Největším problémem stále ostává zpracování celulózy. Bylo popsáno, že celulózu lze rozpustit za použití iontové kapaliny, anorganických komplexů kovů nebo anorganických hydrátů roztavených solí. Lze tak připravit inkoust na bázi celulózy.

V poslední části bylo demonstrováno použití celulózy jednak jako funkčního inkoustu a jednak jako lehce a cenově dostupného substrátu. V prvním případě bylo zjištěno, že lze tisknout inkousty s obsahem celulózových nanokrystalů. Celulózu lze použít i jako příměs do inkoustu, čímž lze dosáhnout snížení obsahu kovových částic v inkoustu při zachování stejné či lepší elektrické vodivosti natištěného vzorce. Celulózu lze efektivně využít i jako substrát pro tištěnou elektroniku. Bylo ukázáno, že celulózu lze použít při přípravě flexibilního integrovaného elektrického obvodu, mikro-fluidního papírového analytického zařízení, různých senzorů (například indikátor NO_2 či snímač vlhkosti). Nízké náklady, tisk s vysokým rozlišením a biologická rozložitelnost indikátorů vytvořených inkoustem s obsahem celulózy zvyšuje jejich potenciální využití do budoucna.

Názornými demonstracemi použití celulózy jako inkoustu i jako substrátu bylo dosaženo splnění stanoveného cíle práce. Avšak, v práci lze dále pokračovat, a to jednak ve smyslu samotné přípravy a tisku inkoustů na bázi celulózy (rozpouštěcí systém, funkční inkoust), a jednak ve smyslu přípravy samotného funkčního zařízení (například obvodu či senzoru).

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CALVERT, Paul. Inkjet Printing for Materials and Devices. *Chemistry of Materials* [online]. 2001, vol. 13, no. 10, s. 3299-3305. ISSN 0897-4756. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1021/cm0101632>.
- [2] HINKS, John. The History of Printing and Print Culture: Contexts and Controversies. *Midland History* [online]. 2020, vol. 45, no. 2, s. 134-144. ISSN 0047-729X. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0047729X.2020.1767970>.
- [3] HOATH, Stephen D. *Fundamentals of inkjet printing* [online]. 2016. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany. ISBN: 978-3-527-33785-89
- [4] MAGHASSI, Shlomo. *The Chemistry of Inkjet Inks*. 2010. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.. Singapore. ISBN-13 978-981-281-821-8
- [5] HU, Guohua et al. Functional inks and printing of two-dimensional materials. *Chemical Society Reviews* [online]. 2018, vol. 47, no. 9, s. 3265-33. ISSN 0306-0012. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29667676>.
- [6] BARRAS, R. et al. Printable cellulose-based electroconductive composites for sensing elements in paper electronics. *Flexible and Printed Electronics* [online]. 2017, vol. 2, no. 1, s. 14006. ISSN 2058-8585. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-8585/aa5ef9>.
- [7] BOHRA, Hemant et al. *Coating formulations for digital printing; applications of phase-change inks color appearance of substrates and prints view project printed electronics view project COATING FORMULATIONS FOR DIGITAL PRINTING; APPLICATIONS OF PHASE-CHANGE INKS* [online].
- [8] PECAROVICOVA, Alexandra. BHIDE, Hrishikesh. FLEMING, Paul.D. PEKAROVIC, Jan. *Phase-change Inks*. leden 2003. Journal of Coatings Technology. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF02697924>
- [9] RAUT, N.C..AL-SHAMERY, K. *Inkjet printing metals on flexible materials for plastic and paper electronics*. Royal society of chemistry.2018. DOI:10.1039/C7TC04804A

- [10] ABDULAGATOV, I. Imutdin. ASSAEL, Marc. *Hydrothermal Experimental Data*. Kap. 6: Viscosity. 2008. John Wiley&Sons, Ltd. ISBN:9780470094655
- [11] VLACHOPOULOS, John a Nickolas POLYCHRONOPOULOS. *Applied polymer rheology*[online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. , 2011 Basic Concepts in Polymer Melt Rheology and Their Importance in Processing. . 1-27 s. ISBN 047041670X. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118140611.ch1>.
- [12] WILLENBACHER, N. a K. GEORGIEVA. *Rheology of disperse systems* [online].
- [13] CARNICER, V. et al. Microfluidic rheology: A new approach to measure viscosity of ceramic suspensions at extremely high shear rates. *Open Ceramics* [online]. 2021, vol. 5, s. 100052. ISSN 2666-5395. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceram.2020.100052>.
- [14] SIMPSON, Melissa M. a William S. JANNA. *Newtonian and non-newtonian fluids: Velocity profiles, viscosity data, and laminar flow friction factor equations for flow in a circular duct* [online]. ASME DC, Jan 01, 2008. 173-180 s. Dostupné z: <https://asmedigitalcollection.asme.org/IMECE/proceedings/IMECE2008/48708/173/336891>.
- [15] ZHANG, Huiru. *Rheological Method for Determination Molecular Weight and Molecular Weight Distribution. Material Science and Technology*. 2012. ISBN 978-953-51-0193-2. In-Tech. Dostupné na: <http://www.intechopen.com/books/materials-science-and-technology/rheological-method-for-determining-molecular-weight-and-molecular-weight-distribution>
- [16] BUSH, John W. M. *New trends in the physics and mechanics of biological systems*[online]. Oxford: Oxford University Press. , 2011 Surface tension. . 27 s. ISBN 0199605831. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199605835.003.0002>.
- [17] LAURÉN, Susanna. *Surface Tension measurement by DuNoüy ring method*. [online]. 2020. BiolinScientific. Dostupné z: <https://www.biolinscientific.com/blog/surface-tension-measurement-by-du-no%C3%BCy-ring-method>

- [18] MCKINLEY, Gareth H. a Michael RENARDY. *Wolfgang von ohnesorge* [online]. AIP Publishing, 2011. ISBN 1070-6631.
- [19] HOENG, Fanny et al. Inkjet printing of nanocellulose-silver ink onto nanocellulose coated cardboard. *RSC Advances* [online]. 2017, vol. 7, no. 25, s. 15372-15381. ISSN 2046-2069.
- [20] URUBA, Václav. On Reynolds number physical interpretation. *AIP Conference Proceedings* [online]. 2018, vol. 2000, no. 1. ISSN 0094-243X. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5049926>.
- [21] MAKHLOUF, Abdel S. H. a Dieter SCHARNWEBER. *Handbook of nanoceramic and nanocomposite coatings and materials* [online]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. ISBN 9780127999470. Dostupné z: [https://ebookcentral.proquest.com/lib/\[SITE_ID\]/detail.action?docID=2046424](https://ebookcentral.proquest.com/lib/[SITE_ID]/detail.action?docID=2046424).
- [22] KHOSHNEVISAN, Kamyar a Mohammad BARKHI. *Zeta potential* [online]. Unpublished, 2015. Dostupné z: <https://explore.openaire.eu/search/other?orpid==datacite=:01334c00f7ffc55c1abaa1b4d6b9546c>.
- [23] ISIK, Mehmet, Haritz SARDON a David MECERREYES. Ionic Liquids and Cellulose: Dissolution, Chemical Modification and Preparation of New Cellulosic Materials. *International Journal of Molecular Sciences* [online]. 2014, vol. 15, no. 7, s. 11922-11940. ISSN 1422-0067. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25000264>.
- [24] Ujjwala Supe. Source and application of cellulose and pectin lyase – A review. *Research Journal of Pharmacy and Technology* [online]. 2020, vol. 13, no. 11, s. 5635-5641. ISSN 0974-3618. Dostupné z: <https://search.proquest.com/docview/2466061306>.
- [25] MEDRONHO, Bruno a Björn LINDMAN. Brief overview on cellulose dissolution/regeneration interactions and mechanisms. *Advances in Colloid and Interface Science* [online]. 2015, vol. 222, no. Online 28 May 2014, s. 502-508. ISSN 0001-8686. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2014.05.004>.

- [26] OLSSON, Carina. [online]. IntechOpen. , 2013 Direct Dissolution of Cellulose : Background, Means and Applications. ISBN 9535111833. Dostupné z: <https://openresearchlibrary.org/viewer/e64003fd-994b-474f-b89a-473fa30987e2>.
- [27] SEN, Sanghamitra, James D. MARTIN a Dimitris S. ARGYROPOULOS. Review of Cellulose Non-Derivatizing Solvent Interactions with Emphasis on Activity in Inorganic Molten Salt Hydrates. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* [online]. 2013, vol. 1, no. 8, s. 858-870. ISSN 2168-0485. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1021/sc400085a>.
- [28] MEENATCHI, B., V. RENUGA a A. MANIKANDAN. Cellulose dissolution and regeneration using various imidazolium based protic ionic liquids. *Journal of Molecular Liquids* [online]. 2017, vol. 238, s. 582-588. ISSN 0167-7322. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2016.05.008>.
- [29] STOLARSKA, Olga et al. Mixtures of ionic liquids as more efficient media for cellulose dissolution. *Carbohydrate Polymers* [online]. 2017, vol. 178, s. 277-285. ISSN 0144-8617. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.025>.
- [30] OLSSON, Carina. [online]. IntechOpen. , 2013 Direct Dissolution of Cellulose : Background, Means and Applications. ISBN 9535111833. Dostupné z: <https://openresearchlibrary.org/viewer/e64003fd-994b-474f-b89a-473fa30987e2>.
- [31] SEN, Sanghamitra, James D. MARTIN a Dimitris S. ARGYROPOULOS. Review of Cellulose Non-Derivatizing Solvent Interactions with Emphasis on Activity in Inorganic Molten Salt Hydrates. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* [online]. 2013, vol. 1, no. 8, s. 858-870. ISSN 2168-0485. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1021/sc400085a>.
- [32] XIE, Shaoqu. ZHANG, Xiao. WALCOTT, Michael P. LIN, Hongfei. *Applications of Cellulose Nanocrystals: A Review*. 2018. Engineered Science. ISSN: 2576-988X. Dostupné z: <http://www.espublisher.com/journals/articlehtml/engineered-science/Applications-of-Cellulose-Nanocrystals-A-Review>
- [33] HEINZE, Thomas, Omar A. E. SEOUD a Andreas KOSCHELLA. *Springer series on polymer and composite materials cellulose derivatives synthesis, structure, and properties* [online].

- [34] LIU, Shan et al. *Comparison of the effects of microcrystalline cellulose and cellulose nanocrystals on Fe₃O₄/C nanocomposites high mechanical and recoverable hydrogel for tissue replacement view project colloidal liquid crystals view project comparison of the effects of microcrystalline cellulose and cellulose nanocrystals on Fe₃O₄/C nanocomposites* [online].
- [35] VOLD, Inger Mari Nygard. *Comparison of Microfibrillated cellulose and Nanocrystalline cellulose*. Exilva[online]. Dec 27, 2016[cit. 2021-05-05] Dostupné z: <https://www.exilva.com/blog/comparison-of-microfibrillated-cellulose-and-nanocrystalline-cellulose>
- [36] EREMEEVA, Elena et al. *Printing of Colorful Cellulose Nanocrystalline Patterns Visible in Linearly Polarized Light*. *ACS Applied Materials & Interfaces* [online]. 2020, vol. 12, no. 40, s. 45145-45154. ISSN 1944-8244. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.0c11846>.
- [37] YANG, Yong et al. *Preparation and Applications of the Cellulose Nanocrystal*. *International Journal of Polymer Science* [online]. 2019, vol. 2019, s. 1-10. ISSN 1687-9422. Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.1155/2019/1767028>.
- [38] BARRAS, R. et al. *Printable cellulose-based electroconductive composites for sensing elements in paper electronics*. *Flexible and Printed Electronics* [online]. 2017, vol. 2, no. 1, s. 14006. ISSN 2058-8585. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-8585/aa5ef9>.
- [39] LUU, W. T., D. W. BOUSFIELD a John KETTLE. *Application of nano-fibrillated cellulose as a paper surface treatment for inkjet printing* [online]. 2011 Dostupné z: <https://cris.vtt.fi/en/publications/ad76953c-89c2-453b-aa2d-10a117376889>.
- [40] EZEL, Ahsen et al. *Paper surface application with AKD-heptane solution making suitable for biomedical devices* [online].
- [41] WONG, Danny. LEE, Jihyun. LIU, Lei. PARK, Simon S. *Flexibility Enhancements of hybrid copper inks with cellulose nanocrystals*. listopad 2020. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. DOI: 10.1007/s40684-020-00278-4

- [42] WANG, Yan et al. Paper-Based Inkjet-Printed Flexible Electronic Circuits. *ACS Applied Materials & Interfaces* [online]. 2016, vol. 8, no. 39, s. 26112-26118. ISSN 1944-8244. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.6b06704>.
- [43] ZHANG, Yan et al. *Flexible electronics based on micro/nanostructured paper* [online]. Wiley, 2018. ISBN 0935-9648.
- [44] CONTI, Silvia. MARTINEZ-DOMINGO, Carme. LAY, Makara. TERÉS, Lluís. VILASECA, Fabiola. RAMON, Eloi. *Nanopaper-based Organic Inkjet-printed Diodes*. 2.4.2020. Advanced Materials Technologies. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. DOI: 10.1002/admt.201900773
- [45] LAU, Gih-Keong. SHRESTHA, Milan. *Ink-jet Printing of Micro-electro-mechanical systems (MEMS)*. 2017. PMC US National Library of Medicine National Institutes of Health. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6190480/#B16-micromachines-08-00194>
- [46] KYRIACOU, Andrew. HARRIES, Josephine. FORTES DE, Andrade. *Ink Composition for Inkjet printing*. USA. Patentový spis. 20200199388. Dostupné z: <https://www.freepatentsonline.com/y2020/0199388.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	plocha desky
AKD	alkyl keton dimer
CAB	celulózový acetát butyrát
c-CNC	celulózové nanokrystaly s karbonylovými skupinami
CIJ	kontinuální tisk
CMC	roztok karboxymetylové celulózy
CNC	celulózové nanokrystaly
DMSO	dimethylsulfoxid
DOD	kapka na požádání
DSS	dioctylsulfosuccinate
F	smyková síla
h	vzdálenost mezi deskami
L	charakteristická délková velikost (průměr trysky)
MCC	mikro-krytalická celulóza
MEMS	mikro-elektrické-mechanické systémy
MOD	dekompozice metalově-organického inkoustu
MSQ	methyilsilsequioxan
MWCNT	mnoho-stěnné uhlíkové nanotrubičky
NFC	nano-celulózové vlákna; nano-fibrilární celulóza
NP	inkoust metalických nanočástic
Oh	Ohnesorgovo číslo
PET	polyethyléntereftalát
PTFE	polytetrafluoretylén
PZT	sloučenina olova, zirkonia a titanu
R2	plocha molekuly

Re	Reynoldsovo číslo
s-CNC	celulóзовé nanokrystaly se sulfo-skupinami
SMCC	silicová mikrokrytalická celulóza
U	celková kohezní energie molekuly
u	rychlost toku
We	Weberovo číslo
$\dot{\gamma}$	rychlost smykové deformace
η	viskozita
θ	kontaktní úhel mezi kapkou a substrátem
μ PADs	mikrofluidní-papírové analytické zařízení
ν	kinetická viskozita kapaliny
ρ	hustota kapaliny
σ	povrchové napětí
$\sigma_{(i-v)}$	rozdíl mezifázového napětí mezi inkoustem a párou
$\sigma_{(s-i)}$	rozdíl mezifázového napětí mezi substrátem a inkoustem
σ_{sv}	rozdíl mezifázového napětí mezi substrátem a párou
τ	smykové napětí

SEZNAM POUŽITÉ TERMINOLOGIE

barvivo	látku rozpustná ve vodě či jiném rozpouštědle, která udává barvu inkoustu
funkční plocha	natištěná plocha s různými funkcemi jinými než vizuálními
kapka	vytrysknutá kapka inkoustu z hlavy tiskárny
obrazec (vzor, motiv)	vizuální natištěná plocha sloužící pouze svým tvarem
pigment	nerozpustná zpravidla anorganická látka udávající barvu inkoustu
povlakování	nanesení ochranné vrstvy zamezující negativním vlivům změnit požadované vlastnosti obrazců a funkčních ploch
sběrníkový okap	sběrač nepoužitých kapek pro tisk pro opětovné použití inkoustu, používá se u souvislého tisku (CIJ)
spékání	zahřátí materiálu na vysokou teplotu, ale nikoliv nad bod tání. Tím dojde k splynutí zpravidla práškových částic
substrát	podkladový materiál, na který je prováděn tisk inkoustem
tisk	proces přenosu inkoustu na substrát
tryska	tubusová část hlavy o průměru v řádech mikronů, skrze kterou je vytlačován inkoust ven z hlavy

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Princip kontinuálního tisku (překresleno podle: [3])	13
Obrázek 2 Princip trysky s tepelným způsobem tvorby kapky. (Překresleno podle:[3])	15
Obrázek 3 Princip fungování trysky s piezoelektrickým krystalem (Překresleno dle: [3]).	16
Obrázek 4 Princip viskozity.[11]	21
Obrázek 5 Graf závislosti viskozity na rychlosti smykové deformace.[12]	22
Obrázek 6 Porovnání různých druhů tisků v závislosti viskozity na rychlosti smykové deformace.[5]	23
Obrázek 7 Jednotlivé etapy měření povrchového napětí kroužkovou metodou DuNoüy.[17]	24
Obrázek 8 Ilustrace smáčení substrátu kapalinou.[5]	25
Obrázek 9 Znázornění Sternovy vrstvy a elektrické dvojvrstvy pro měření Zeta-potenciálu.[22]	27
Obrázek 10 Tisk inkoustu na kartón a řez natisknuté kapky.[19]	28
Obrázek 11 Princip vzniku prstencového efektu. K odpařování dochází především na okrajích. To vytváří tok kapaliny směrem od středu k okraji.[5]	29
Obrázek 12 Tisk inkoustu na PET.[19]	29
Obrázek 13 Smáčivost inkoustu na PET a řez natištěné kapky. Vznik prstencového efektu.[19]	29
Obrázek 14 Inkoust na kartónu ošetřený vrstvou CNC.[19]	30
Obrázek 15 Řez natištěnou kapku a smáčení povrchu kartónu ošetřeného vrstvou CNC.[19]	30
Obrázek 16 Strukturní vzorec celulózy. [23]	31
Obrázek 17 Znázornění vodíkových sil mezi molekulami celulózy. [25]	32
Obrázek 18 Vztahy mezi jednotlivými formami celulózy a jejich vzniku.[24]	33
Obrázek 19 Struktura celulózového vlákna.[23]	33
Obrázek 20 a) MCC, b) CNC [35]	36
Obrázek 21 Schéma procesu mikrofluidizace.[36]	37
Obrázek 22 Graf závislosti Oh na Re čísla pro inkousty s obsahem CNC.[36]	39
Obrázek 23 Vlastnosti a použití μ PADs.[40]	42
Obrázek 24 Natištěná flexibilní elektronika na papírovém podkladu.[42]	43
Obrázek 25 Celulózová nano-papírová dioda jako indikátor NO_2 .[44]	44
Obrázek 26 Znázornění částí snímače vlhkosti.[45]	45

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Srovnání složení inkoustů pro jednotlivé druhy tisku.[5].....	17
Tabulka 2 Přírodní zdroje celulózy a jejich složení.[33]	34
Tabulka 3 Vlastnosti vodných suspenzí pro s-CNC a c-CNC.[36]	39
Tabulka 4 Reologické parametry s-CNC při hustotě inkoustu 1020kg/m^3 .[36].....	39
Tabulka 5 Vlastnosti různých inkoustů obsahující CNC a stříbro.[19].....	40
Tabulka 6 Porovnání inkoustu CNC+stříbro se stejnými inkousty s přídavkem DSS.[19].	41
Tabulka 7 Příklady inkoustů s CAB. [46].....	45