



# Výroba vodivých vláken pomocí technologie drawing

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B3107 – Textil  
*Studijní obor:* 3106R016 – Textilní technologie, materiály a nanomateriály  
*Autor práce:* **Jan Gavura**  
*Vedoucí práce:* Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.



**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Gavura**  
Osobní číslo: **T13000312**  
Studijní program: **B3107 Textil**  
Studijní obor: **Textilní technologie, materiály a nanomateriály**  
Název tématu: **Výroba vodivých vláken pomocí technologie drawing**  
Zadávací katedra: **Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů**

**Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :**

- 1) Vypracování literární rešerše na dané téma
- 2) Obeznamení se s funkčností zařízení, nalezení ideálních podmínek pro optimální vytvoření vláken
- 3) Výběr vhodného polymeru a zvýšení vodivosti polymeru
- 4) Zpracování dosažených výsledků a vypracování závěru

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

- 1) DI VENTRA, Massimiliano, Stephane EVOY a James R HEFLIN. Introduction to nanoscale science and technology. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004, xiii, 611 p. ISBN 1402077203-.
- 2) SPERLING, L. Introduction to physical polymer science. 4th ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2006, xxx, 845 p. ISBN 047170606x.
- 3) FEYNMAN, Richard Phillips, Robert B LEIGHTON a Matthew SANDS. Feynmanovy přednášky z fyziky: revidované vydání s řešenými příklady. 2. vyd. Praha: Fragment, 2013, 3 sv. (xii, 732, 806, 435 s.). ISBN 978-80-253-1642-9.
- 4) Brown, P.J.; Stevens, K. Nanofibers and nanotechnology in textiles. Woodhead Publishing Limited, 2007. ISBN 978-1-84569-105-9.
- 5) RAMAKRISHNA, Seeram. An introduction to electrospinning and nanofibers. Hackensack, NJ: World Scientific, c2005, xi, 382 p. ISBN 98-125-6454-3.
- 6) RŮIČKOVÁ, Jana. Elektrostatické zvlákňování nanovláken. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004. ISBN 80-7083-867-1.
- 7) Elektronovým mikroskopem do nitra materiálů aneb jak vypadá jejich struktura. In: [Http://www.fzu.cz/](http://www.fzu.cz/) [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <http://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-anebjak-vypada-jejich-struktura>
- 8) MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. vyd. Brno: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
- 9) Úvod do obecné chemie. In: [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <http://www.fp.tul.cz/kch/sedlbauer/och.pdf>
- 10) Halliday D., Resnick R., Walker J. Fyzika, část 1 - 5. VUTIUM Brno a PROMETHEUS Praha, 2000. ISBN 80-214-1868-0.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.**

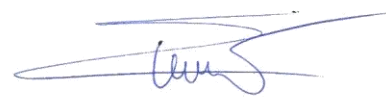
Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání bakalářské práce: **26. března 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2016**



Ing. Jana Drašarová, Ph.D.  
děkanka



prof. RNDr. David Lukáš, CSc.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 26. března 2015

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

**Poděkování:** Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Jířímu Chvojkovi Ph.D. za vynaložené úsilí, čas a cenné rady, které mi poskytoval před i v průběhu sepisování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Mgr. Kateřině Strnadové za instrukce ohledně ovládání mikromanipulátoru a práci v laboratoři a také děkuji Ing. Leošovi Beranovi Ph.D. za možnost měření elektrické vodivosti nanovláken na pikoampérmetru a za rady ohledně elektroniky. V neposlední řadě děkuji své rodině za možnost studovat na vysoké škole.

## ANOTACE

V dnešní době je zmenšování jednou z nejdůležitějších součástí při výrobě elektrotechniky.

V bioinženýrství se pracuje na výrobě elektricky vodivých polymerních nanovláken pro zlepšení adheze a proliferace buněk.

Cílem této práce je příprava několika polymerních roztoků z PCL a pomocí rozpouštědla označené jako experiment 831 vytvořit několik druhů koncentrací, tyto koncentrace následně zvláknit na mikromanipulátoru a testovat jejich elektrickou vodivost na pikoampérmetru. Poté vyhodnotit a sepsat naměřené hodnoty.

Nejprve byla pomocí technologie drawing vyrobena vlákna z PCL rozpuštěným v rozpouštědle 831. Tyto vzorky byly testovány na elektrickou vodivost na přístroji pikoampérmetr. Bylo vyrobeno několik testovaných koncentrací a zjišťovalo se, zda jsou vlákna elektricky vodivá a pokud ano, která koncentrace má nejlepší elektrickou vodivost.

Z prvních pokusů bylo patrné, že nanovlákná z PCL rozpuštěná v experimentu 831 elektrický proud vedou, ale jeho hodnoty jsou velice malé, téměř neměřitelné. Pro lepší elektrickou vodivost by bylo nutné použít jiných prostředků, jako jsou například uhlíkové nanotrubičky, jejichž elektrická vodivost je již dobře zdokumentovaná.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Drawing technologie

Elektricky vodivé polymery

Nanoelektronika

Tkáňové inženýrství

## **ANNOTATION**

Nowadays, it is reducing the size is one of the most important components in the production of electronics.

The bioengineering is working to produce electrically conductive polymeric nanofibers to improve the adhesion and proliferation of cells.

The aim of this work is the preparation of several polymer solutions of PCL and using solvents classified as an experiment 831 to create electrically conductive nanofibers.

First, using the technology of drawing fibers made of PCL dissolved in the solvent 831. These samples were tested for electrical conductivity per unit pikoamphermeter. It produced several concentrations tested and examined whether the fibers are electrically conductive and, if so, that the concentration has the best electrical conductivity.

From the first attempts it was clear that the PCL nanofibers dissolved in 831 experimental electric current lead, but his values are very small, almost immeasurable. For better electrical conductivity would be necessary to use other means, such as carbon nanotubes, whose electrical conductivity has been well documented.

## **KEY WORDS**

Drawing technology

Conductive polymers

Nanoelectronics

Tissue engineering

## **Seznam použitých zkratek**

°C – stupeň Celsia

A-ampér

Aj.-a jiné

Atd.- a tak dále

C-coloumb

cm-centimetr

I-elektrický proud

KCl-chlorid draselný

NaCl-chlorid sodný

PANI- polyanilin

PCL-polykaprolakton

PPY-polypyrol

R-elektrický odpor

SI-mezinárodně domluvená soustava jednotek fyzikálních veličin

Tt-teplota tání

Tv-teplota varu

U-značka elektrického napětí

V-volt



## Obsah

1 Úvod.....	13
2 Teoretická část .....	14
2.1 Technologie pro výrobu nanovláken .....	14
2.2 Drawing .....	14
2.2.1 Mikromanipulátor .....	16
2.3 Polymery.....	17
2.3.1 Konstituční jednotka.....	17
2.3.2 Monomer.....	17
2.3.3 Vznik polymerů .....	17
2.4 Tkáňové inženýrství.....	18
2.4.1 Materiály používané v tkáňovém inženýrství.....	19
2.4.2 Polykaprolakton .....	20
2.4.3 Polypyrol.....	21
2.4.1.3 Polyanilin .....	22
2.5 Elektrické veličiny .....	23
2.5.1 Elektrická vodivost .....	23
2.5.2 Elektrický odpor .....	24
2.5.3 Elektrický proud .....	25
2.5.4 Elektrické napětí .....	26
2.6 Zařízení na měření elektrických vlastností .....	27
2.6.1 Měření elektrických veličin .....	28
2.7 Elektrické vlastnosti lidské tkáně .....	29
2.8 Mikroelektronika a Nanoelektronika .....	30
2.9 Uhlíkové nanotrubic.....	31
2.10 Použité testovací metody .....	33
2.10.1 Pikoampérmetr.....	33
2.10.2 Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM).....	33
2.10.3 Podkladový stojan na nanášení nanovláken.....	36
3. Experimentální část.....	37
3.1 Použité materiály .....	37
3.1.1 Experiment 831 .....	37
3.2 Příprava polymerního roztoku .....	37
3.3 Postup výroby nanovláken.....	38
3.4 Experimenty.....	39
3.4.1 Experiment 1.....	39

3.4.2 Experiment 2.....	39
3.4.3 Experiment 3.....	42
3.4.4 Experiment 4.....	42
3.4.4 Experiment 5.....	42
3.4.5 Experiment 6.....	42
3.4.6 Výsledky .....	43
4. Diskuze - Další možnosti, jak zvýšit elektrickou vodivost.....	45
5. Závěr.....	46
6. Zdroje .....	48

## REŠERŠE

V dnešní době je zmenšování jednou z nejdůležitějších součástí při výrobě elektrotechniky. Příkladem mohou být počítače, které prošly za posledních 60 let radikálním zmenšením. Z tohoto důvodu je výroba a zvláknění elektricky vodivých polymerů krokem do budoucna.

Metodou elektrostatického zvláknování, lze vyrobit vrstvu z nanovláken. V této vrstvě nelze oddělit jednotlivá nanovlákná bez jejich poškození. Elektrostatické zvláknování neprodukuje jednotlivá nanovlákná jako technologie drawing. Tato technologie je založena na způsobu čerpání nanovláken z polymerní kapičky určitou rychlostí, v závislosti na typu polymeru. Největší výhodou této technologie je možnost studovat vlastnosti jednotlivých nanovláken. Použití jednotlivých nanovláken je možné v nano-optice, nano-elektronice, tkáňovém inženýrství a k výrobě přízí s přesně definovaným počtem nanovláken.[1] Technologie drawing je výhodná v nanášení jednotlivých vláken v požadovaném směru a v potřebné délce. V budoucnu by se díky této technologii mohli vyrábět nové součástky či nové výrobky.

Polymery jsou všeobecně známy jako izolanty (nevedou elektrický proud). Mají dobré mechanické vlastnosti a snadno se zpracovávají. Uplatňují se jako materiály izolující vodiče elektrického proudu, tepelné izolanty či vrstvy tlumící zvuk. Jejich předností je také nízká hustota, a proto se stále více využívají v oborech, kde je žádoucí malá hmotnost materiálu například v letecké technice či při výrobě obalových materiálů. Pro řadu aplikací lze funkční vlastnosti polymerů rozšířit přípravou kompozitů tj. polymerů obsahujících nejrůznější plniva.[14] Tak se dělají například fotocitlivé vrstvy pro xerografii a laserové tiskárny piezoelektrické a pyroelektrické detektory či tištěné fotoodpory. U kompozitů obsahující saze nebo práškový grafit se podařilo výrazně zvýšit elektrickou vodivost, takové materiály se hodí například pro výrobu lehkých plastových kanystrů na benzin – vodivý kompozit odvádí elektrostatický náboj, tudíž nehrozí vznícení těkavých par.[14]

Vodivé polymery byly vyrobeny poprvé v polovině 70. let 20. století. Jako nová generace organických materiálů, které mají jak elektrické, tak optické vlastnosti podobné kovům a anorganickým polovodičům, ale zároveň také vykazují atraktivní vlastnosti spojené s běžnými polymery, jako je snadná syntéza a flexibilita zpracování. Skutečnost, že některé tkáně reagují na elektrická pole a stimuly, učinily vodivé polymery atraktivní pro řadu biologických a lékařských aplikací.[15] Příkladem jsou polyacetylen, polypyrrol, polythiofen, polyanilin, polyfenylen, atd.[26]

# 1 Úvod

Elektricky vodivé polymery mají široké spektrum využití. Pokud se jedná o nebiodegradabilní polymery s elektricky vodivými příměsemi, tak ty se mohou použít jako sensory na snímání životních funkcí člověka. Komerčně se využívají například v německé firmě Bayer, která vyrábí fotografickou techniku. Přidávají se do antistatických vrstev, která pak brání elektrostatickým výbojům při rychlém přetáčení filmů.[14]. Dalším komerčním využitím jsou tzv. *Elektronické nosy* (přístroje pro analýzu vůní), v nichž jsou použity soubory čidel na bázi vodivých polymerů.[14] A jelikož je na dnešní trh s elektronickými součástkami vyvíjen tlak ohledně zmenšování, je výroba elektricky vodivých vláken krokem do budoucnosti. Elektricky vodivá nanovlákná by se mohla využít například při vyvíjení nových elektronických součástek.

Pokud se jedná o biodegradabilní polymery, tak ty se používají například ve zdravotnictví jako tzv. scaffolds pro nervové tkáně. V této době také probíhá výzkum na obnovu nervových tkání.

Zajistit přesné rozložení elektricky vodivého polymeru dokáže jen technologie drawing, navíc dokáže vlákno natáhnout do požadovaného směru v požadovaném počtu a v požadované délce.

V teoretické části bylo cílem popsat technologii drawing, nalézt využitelné polymery a nalézt látky, které zlepšují elektrickou vodivost polymerů.

V praktické části je popsáno ovládání a výroba nanovláken na mikromanipulátoru. Poté nalezení správné koncentrace polymeru s rozpouštědlem a pomocnými látkami tak, aby byl co možná nejlépe zvláknitelný a elektricky vodivý. Následně návrh a sestavení elektrického obvodu pro měření elektrické vodivosti.

Cílem práce bylo sepsat rešerši na dané téma, obeznámit se s funkcí zařízení mikromanipulátoru, nalezení ideálních podmínek pro optimální vytvoření vláken, výběr vhodného polymeru a zvýšení jeho elektrické vodivosti a zpracovat dosažené výsledky.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Technologie pro výrobu nanovláken

Existuje mnoho technologií pro výrobu nanovláken. Velice jednoduchou technologií pro výrobu nanovláken je elektrospinning. Elektrospinning neboli elektrostatické zvlákňování je technologie na výrobu nanovláken z roztoku. Pokud se nanovlákná vyrábí z taveniny, tak se technologie nazývá melt elektrospinning. Vlákná vyrobená touto technologií jsou velice jemná a jejich rozměry se pohybují od desítek nanometrů  $10^{-9}$  až po několik mikrometrů  $10^{-6}$ . [19]. Tato technologie využívá k výrobě nanovláken dvou elektrod k tvorbě elektrického pole. Toto elektrické pole tvoří z polymerního roztoku nabitě pole, které je přitahováno k druhé elektrodě.[19] V prostoru mezi elektrodami se začne kapka polymeru natahovat a formovat se do tvaru proudu. Mezi elektrodami se také z polymerního roztoku odpaří rozpouštědlo a polymer už ve formě vlákna se zachytává na druhé elektrodě, která se nazývá kolektor.[19]

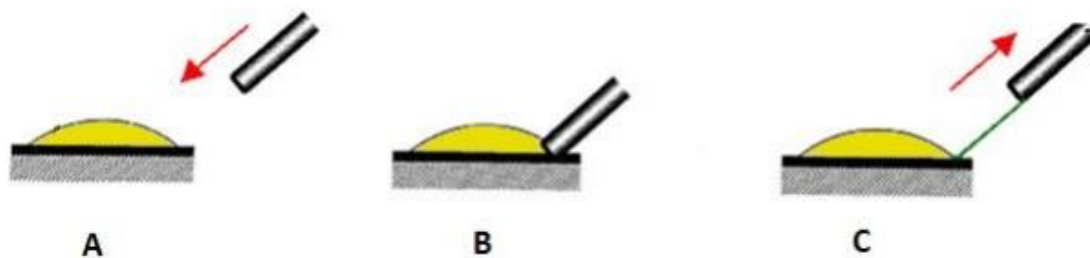
Do elektrospinningu se řadí technologie zvlákňování z jehly, zvlákňování z kovového hrotu, nanospider, bubble spinning aj..

Úplně jinou technologií na výrobu nanovláken je technologie drawing. Tato technologie využívá mikropipetu, která se namočí do kapky polymerního roztoku a následným pohybem pryč z kapky tvoří nanovlákná.

### 2.2 Drawing

Drawing je technologie pro výrobu jednotlivých nanovláken. Hlavní výhodou je prodloužení vláken jednotlivě, což může vést ke 100% orientaci nanovláken v požadované délce (až desítky cm), což vede k velkému využití hlavně u nano-optiky, nano-elektroniky a v tkáňovém inženýrství.

Existuje několik způsobů jak vyrobit jednotlivé nanovlákná, ta nejjednodušší je na obr. 1. kde se na podkladový papír nanese kapka polymerního roztoku (A). Mikropipeta se poté přesune dolů k okraji kapky (B) díky kontaktu a zpětnému pohybu mikropipety je vlákno vytaženo z polymerní kapky určitou rychlostí v závislosti na typu polymeru (C). Tekutý polymer se formuje ve vlákno. Výsledný průřez závisí na přesném složení materiálu, rychlosti odtahu a rychlosti odpařování rozpouštědla. [1]



**Obrázek 1** - Ilustrace základního procesu výroby nanovláken pomocí technologie drawing [Zdroj: Drawing a single nanofibre over hundreds of microns. Europhysics letters]

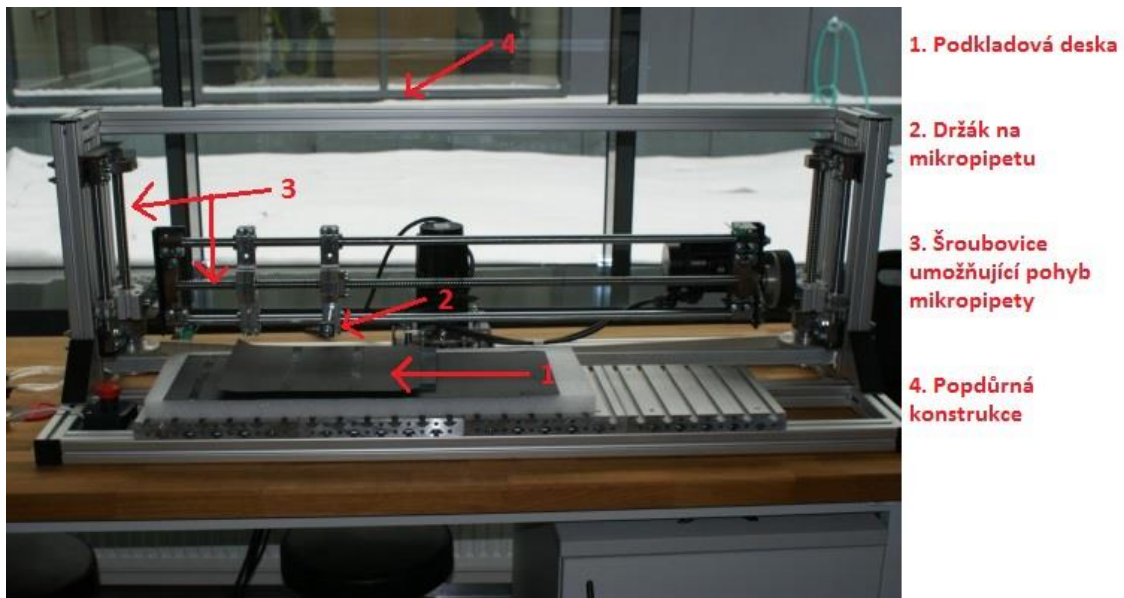
Z jednotlivé kapky lze proces i několikrát opakovat. S postupným časem ovšem dochází k vypařování rozpouštědla a mění se tak viskozita roztoku a s ní spojené horší vlastnosti vlákna odolávat na něj působícím silám a deformaci. [3]

Tento postup pro výrobu nanovláken je realizován pomocí mikropipety. Nicméně je zde možnost vyrábět nanovláknem pomocí přístroje zvaného mikromanipulátor[1]

Zařízení mikromanipulátor dokáže pomocí elementu, který se pohybuje po předepsané dráze a předepsanou rychlostí vytáhnout jednotlivé mikro nebo nanovláknem určité délky, kterou lze též předem definovat. Dále toto zařízení dokáže v jednom kroku vyrobit vláknennou strukturu o předepsaném počtu paralelních vláken nebo připravit předepsaný počet nanovláken pro další zpracování například do vláknenných struktur podobných přízím. Hlavním přínosem pro potenciálního je výše zmíněná možnost velké flexibility zařízení a v podstatě skutečnost, že současnými zařízeními nelze vyrobit jednotlivá vlákna anebo struktury, které jsou z těchto vláken vytvořeny. Na základě výroby přesně definovaných struktur, které lze tímto zařízením vyrobit, lze i přesně definovat následnou funkčnost hotového výrobku. V současné době je zařízení mikromanipulátor postaveno pro laboratorní použití a jsou prováděny laboratorní zkoušky výroby individuálních nanovláken pro různé polymerní roztoky. Na základě těchto zkoušek budou vytipovány roztoky, které budou testovány z hlediska optimalizace procesu. Zkoušky se sestávají z hledání vhodných parametrů roztoků a vhodných parametrů nastavitelných na zařízení mikromanipulátor.[4]

### 2.2.1 Mikromanipulátor

Mikromanipulátor může nabývat několika různých podob. Základní podoba je dvouosý stroj, který může vyrábět vlákna jen v jednom směru. Existuje i vylepšený tříosý stroj, který dokáže vyrábět i kolmá vlákna k již už vyrobeným. Základním pohybem je samotné dlužení vlákna, kde se mikropipeta ponoří do kapky polymeru a následným pohybem ven z kapky vytvoří vlákno. Pomocné pohyby, jako ukládání vlákna a jejich paralelní rozmístování při přípravě přízí jsou možné při integrování dalších řízených os. Základní mikromanipulátor je tak 2-osý až 3-osý s jednou z os zpravidla delší. Parametry a provedení mechanismu os je libovolné a jejich typ a dimenzování je předurčeno typem dlužených polymerů.[4]



**Obrázek 2** Mikromanipulátor sestavený na bázi ozubených řemenů  
[Zdroj:[http://cxi.tul.cz/pdf/technologie\\_tazeni\\_mikromanipulator.pdf](http://cxi.tul.cz/pdf/technologie_tazeni_mikromanipulator.pdf)]

## 2.3 Polymery

Polymer je látka, která je tvořena molekulami (makromolekulami), pro které je charakteristické mnohonásobné opakování jednoho nebo více druhů atomů nebo skupin atomů (konstitučních jednotek) navzájem spojených v tak velkém počtu, že existuje řada vlastností, které se zdatelně nezmění přidáním nebo odebráním jedné nebo více konstitučních jednotek. [17]

### 2.3.1 Konstituční jednotka

Atom nebo skupina atomů, které jsou přítomné v molekulách polymeru nebo oligomeru.[17]

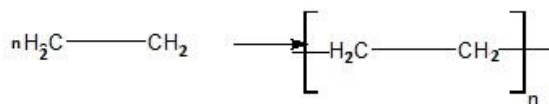
Opakující se konstituční jednotka je nejmenší konstituční jednotka, jejímž opakováním je popsán regulární polymer.[17]

### 2.3.2 Monomer

Sloučenina tvořená molekulami, z nichž každá může poskytnout jednu nebo více konstitučních jednotek.[17]

Monomerní jednotka (mér) je největší konstituční jednotka vznikající v průběhu polymerizace z jediné molekuly monomeru.

Například polymerizací ethenu vzniká polyethylen, kde monomerní jednotkou je  $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$  a opakující se konstituční jednotkou je  $-\text{CH}_2-$ . Viz. obrázek č 3.



Obrázek 3 Polymerizace ethenu za vzniku polyethylenu [Zdroj: Jan Gavura – program ChemSketch (Freeware)]

### 2.3.3 Vznik polymerů

Polymer vzniká tzv. polymerizací, nebo-li řetězovou polyreakcí. V řetězové polyreakci vznikají makromolekuly mnohonásobně opakovanou adicí molekul monomeru na růstová centra. Růstovými centry jsou vysoce reaktivní meziprodukty:



radikály, ionty nebo komplexní sloučeniny. Každá řetězová polyreakce je souhrnem několika elementárních reakcí. Hlavními dílčími reakcemi jsou *iniciace*, *růst řetězce (propagace)* a *končení růstu řetězce (terminace)*. V iniciační reakci se molekula monomeru (M) aktivuje působením iniciátoru (I) resp. produktem jeho rozkladu, nebo dodáním vhodné formy energie. Tak vzniká reaktivním meziproduct, tzv. reaktivní nebo růstové centrum polymerizace. [17]



Na toto centrum se v růstové (propagační) reakci adují molekuly monomeru tak, že se v každém růstovém kroku aktivní centrum přesouvá na poslední připojenou monomerní jednotku.



Je logické, že pro vznik makromolekul se musí tato adice mnohonásobně opakovat.[17]

Růst makromolekul je ukončen zánikem růstového centra v terminační reakci. Způsob zániku růstových center je závislý na podmínkách polymerizace.[17]

### Základní typy polymerizací

**Tabulka 1** Základní typy polymerací [Zdroj: Jan Gavura 2016]

Řetězové polymerizace	Stupňovité polymerizace
Radikálové	Polykondenzace
Iontové: aniontové, kationtové	Polyadice
Polymerizace za otevření kruhu	
Koordinační polymerizace	

## 2.4 Tkáňové inženýrství

Tělo se dokáže regenerovat (uzdravovat) samo, až do určitého poškození, kdy je nutný zákrok lékařů. Zatím se tělní náhrady řešily pomocí transplantací. Pokud se jedná o kloubní náhradu, tak ty se vyrábějí z kovu. Když se jedná o tkáňovou náhradu, tak ta by mohla být z vlastního těla (autotransplantace), z druhé osoby (allograft), a nebo dokonce ze zvířete (xenograft). Nevýhodou těchto transplantací může být

nedostupnost některých náhrad, které mohou být životně důležité, nedohledatelnost dobrého dárce, možnost že tělo odmítne náhradu a možnost přenosu onemocnění. Těmto problémům a jejich řešením se věnuje tkáňové inženýrství. [20]

Tkáňové inženýrství kombinuje znalosti z několika oborů jako je medicína, technologie a biologie. Používá se pro léčení poškozených tkání, výrobu nových tkání či výrobu celých orgánů, které se poté dají implantovat do těla a plní funkci orgánu, který nahrazuje (umělé plíce, umělá játra, aj.). Zabývá se vlivem různých materiálů na organismus, kde je velice důležitá biokompatibilita (materiál nesmí být toxický pro tělo a nesmí mít nežádoucí účinky na organismus) a dále například biodegradabilita (je žádoucí aby materiál sloužící jako nosič se po nějaké době sám rozložil a nebyla tak nutná operace k jeho odstranění) [20]

Elektrická stimulace podporuje dělení buněk, migraci, diferenciaci, rychlost růstu a orientaci růstu – reakcí buněk na elektrické pole je kolmý růst. [45]  $E = 0,1 - 10$  V/cm v extracelulárním roztoku [45]

#### *2.4.1 Materiály používané v tkáňovém inženýrství*

Tato kapitola se věnuje materiálům používaných v tkáňovém inženýrství, zejména těm, které byly použity v experimentální části. V tkáňovém inženýrství se používá mnoho různých syntetických i přírodních materiálů pro sešívání vnitřních orgánů, přípravu implantátů nebo jako tzv. scaffoldy (nosiče). Na tyto nosiče jsou kladeny nejrůznější požadavky. Mezi tyto požadavky patří biokompatibilita, biodegradabilita, mechanické vlastnosti a architektura nosiče.

##### 1. Biokompatibilita

Je to úplně první kritérium, které se u těchto materiálů vyhodnocuje. Buňky musí na materiál adherovat a plnit svoji normální funkci, dále by měly být schopné migrovat a množit se. Po implantaci by tento materiál měl vyvolat minimální imunitní reakci, aby se předešlo zánětům nebo dokonce odmítnutí.[23]

##### 2. Biodegradabilita

Neboli biologická rozložitelnost. Cílem tkáňového inženýrství je, aby buňky byly schopny nosič, který není určen jako trvalá náhrada, za určený čas nahradit, aby se nemusel operativně nahrazovat a buňky byly schopny si vytvořit vlastní

extracelulární matrix. Vedlejší produkty této degradace musí být netoxické a musí být schopny opustit tělo bez vlivů na ostatní orgány. [23]

### 3. Mechanické vlastnosti

V nejlepším případě by měl mít nosič mechanické vlastnosti podobné originální tkáni a zároveň musí být natolik pevný, aby umožnil chirurgickou manipulaci.[23]

### 4. Architektura nosiče

Nejdůležitější vlastností je, aby měl nosič co nejvhodnější poréznost pro zajištění buněčné penetrace a přísunu živin do buněk.[23]

## 2.4.2 *Polykaprolakton*

Je to biologicky odbouratelný alifatický polyester s nízkým bodem tání (kolem 59°C) a nízkou teplotou skelného přechodu (-72°C). To zajišťuje pružnost při tělesné teplotě. Nepochází z obnovitelných zdrojů, ale ze surovin petrochemického průmyslu.[25]

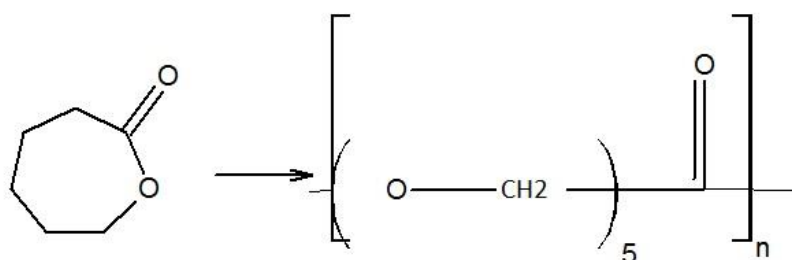
Polymerace PCL probíhá za otevření cyklu  $\epsilon$ -kaprolaktonu[23]. Přípravuje se nejčastěji koordinačně-inzerční popř. aniontovou či kationtovou polymerací. Díky přítomnosti esterových vazeb ve svých makromolekulách však může být asimilován a následně mineralizován různými druhy mikroorganismů jako jsou bakterie, plísňe, kvasinky nebo houby, které se běžně vyskytují v přírodě.[25] Degradace je způsobena hydrolytickým rozštěpením esterových vazeb v řetězci, ten se tak rozštěpí na menší fragmenty, ty jsou pohlceny při fagocytoze.[24][23]

Poly( $\epsilon$ -kaprolakton) je významný také z hlediska biokompatibility s živým organismem a z tohoto důvodu bylo jeho použití směřováno do oblasti biomedicíny.[25] Je hojně používán ve tkáňovém inženýrství pro svou biokompatibilitu, biodegradabilitu a nulovou toxicitu.[24] Omezením širšího využití materiálů z čistého polymeru v této oblasti je ale relativně dlouhá doba resorpce (uvolnění a vstřebání) dočasných implantátů. Řada studií vedených *in vivo* a *in vitro* prokázala, že lidské tělo zřejmě neumí produkovat extracelulární enzymy, které by katalyzovaly degradaci PCL řetězců.[25] V první fázi tedy probíhá pouze hydrolytická degradace implantovaného materiálu na bázi poly( $\epsilon$ -kaprolaktonu), která trvá v závislosti na jeho výchozí molekulové hmotnosti řádově roky. Je zřejmé, že pro každou z oblastí aplikace je kromě znalosti a řízení fyzikálně-

mechanických vlastností přes zpracovatelsky dostupné technologie, nutná také znalost kontrolovatelné

degradace tohoto polymeru.[25]

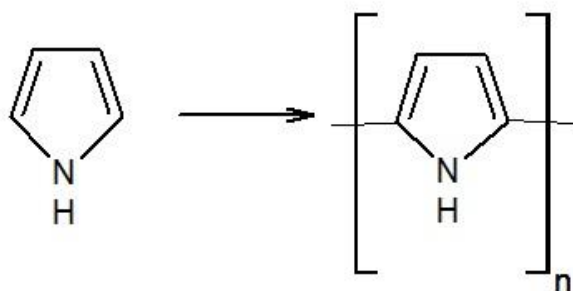
Nevýhodou může být hydrofobnost, která může také za poměrně dlouhou dobu degradace.[23]



**Obrázek 4** Postup výroby PCL z  $\epsilon$ -polykaprolaktonu [Zdroj: Jan Gavura Program ChemSketch (Freeware)]

### 2.4.3 Polypyrol

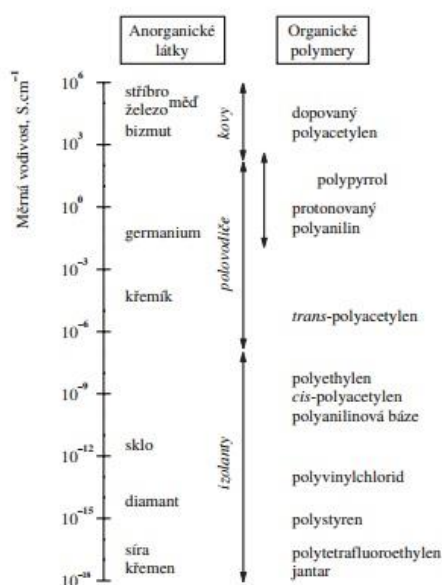
Polypyrol je elektricky vodivý polymer.[26] Jenž se vyrábí radikálovou polymerací pyrrolu. Pyrrol je heterocyklická bezbarvá tekutina s teplotou tání  $T_t = -24^\circ\text{C}$  a s teplotou varu  $T_v = 131^\circ\text{C}$ , silně lámající světlo, lehčí než voda a ve vodě málo rozpustná. Pyrrol má charakteristickou vůni podobnou chloroformu, ve styku se vzduchem rychle tmavne. V přírodě se nalézá pyrrol a jeho homology v černouhelném dehtu a v produktech suché destilace látek obsahující bílkoviny (kosti, rohovina, želatina atd.), a to zejména v kostním oleji. [27] Polymerace probíhá radikálovým mechanismem. Nejprve vlivem oxidačního činidla nebo elektrického pole dojde ke vzniku pyrrolového radikálu, který reaguje s dalšími radikály, či molekulami pyrrolu a vzniká řetězec polymeru. Jeho délka velmi závisí na postupu a podmínkách polymerace. Obecně existují dva postupy – metoda elektrochemická a metoda chemická. Elektrochemickou metodou sice lze připravit polypyrol s vyšší elektrickou vodivostí, ale příprava je složitější a náchylnější na správné provedení a podmínky.[27]



**Obrázek 5** vzorec pyrrolu a polypyrrolu[Zdroj: Jan Gavura – program ChemSketch (Freeware)]

### 2.4.1.3 Polyanilin

Polyanilin je elektricky vodivý polymer.[26] Polyanilin je pravděpodobně nejstarším syntetickým polymerem, který kdy člověk vůbec připravil. Anilin byl jako produkt pyrolytické destilace indiga získán v roce 1826 německým chemikem Unverdorbenem. [27] Konduktivita polyanilinu a příbuzné anilinové černi pohybující se v řádu jednotek (S/cm) je srovnatelná s měrnou vodivostí běžných polovodičů (obrázek 8) a byla známa již v šedesátých letech. Nevyvolala však zvýšenou pozornost, protože materiálů vedoucích ve větší či menší míře elektrický proud byla známa celá řada. Rostoucí zájem o vodivé polymery se projevil až na konci sedmdesátých let dvacátého století po publikování prací o polyacetylenu budoucími laureáty Nobelovy ceny za chemii. [27]



**Obrázek 6** Měrná elektrická vodivost vybraných anorganických látek a anorganických polymerů

## 2.5 Elektrické veličiny

### 2.5.1 Elektrická vodivost

Je fyzikální veličina, která popisuje schopnost dobře vést elektrický proud. Označuje se písmenem ( $G$ ) a její jednotkou je siemens - (S). Je to převrácená hodnota k odporu ( $R$ )  $G (S = \Omega^{-1})$ . Veličiny  $R$  a  $G$  jsou závislé na velikosti tělesa, jeho délce  $l$  a průřezu  $S$ , proto celkový elektrický odpor dřevěného tělesa je dán vztahem

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} [\Omega] \quad (\text{Rovnice 1})$$

$\rho$  - měrný elektrický odpor ( $\Omega \cdot m$ )

Převrácenou hodnotu měrného odporu  $\gamma = \rho^{-1}$  nazýváme měrnou elektrickou vodivostí ( $S \cdot m^{-1}$ ). Rozlišujeme měrný vnitřní a povrchový odpor, resp. vodivost. Měrný vnitřní odpor se rovná poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty uvnitř vzorku a číselně se rovná odporu při průchodu elektrického proudu přes dvě proti sobě postavené stěny jednotkové krychle. Měrný povrchový odpor se rovná poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty na povrchu vzorku a číselně se rovná odporu čtverce libovolného rozměru na povrchu dřeva při průchodu elektrického proudu přes dvě protilehlé strany tohoto čtverce. [40]

Pro výpočet elektrické vodivosti je zapotřebí znát elektrický proud, který protéká vodičem ( $I$ ), který se dosazuje v základních jednotkách, ampérech - (A). Dále je potřeba znát elektrické napětí na koncích vodiče ( $U$ ), které se dosazuje ve voltech - (V)

$$G = \frac{I}{U} [S] \quad (\text{Rovnice 2})$$

$$G = \frac{1}{R} [S] \quad (\text{Rovnice 3})$$

V kovech je způsobena volnými „vodivostními“ elektrony. Proto tuto vodivost nazýváme elektronovou vodivostí.[33] Pokud se jedná o kapaliny ve svém čistém stavu, jsou z většiny špatnými vodiči elektrického proudu. Například destilovaná voda je velmi dobrým izolantem, což je způsobeno tím, že neobsahuje dostatečný počet volně

pohyblivých nabitých částic. Přidáme-li do vody látku (např.: NaCl, KCl...), která se v ní rozštěpí na pohyblivé ionty, vznikne vodivý roztok – elektrolyt.[33]

Elektrická vodivost uhlíkové monovrstvy je trochu jiná než u normálních vodičů. Elektrony jsou zde uvězněny ve 2D prostoru, mají obrovskou pohyblivost, nejvyšší naměřená pohyblivost byla okolo  $200\,000\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ . Vyšší hodnoty pohyblivosti nebyly u žádného jiného materiálu doposud sledovány. Z toho vyplývá velice dobrá elektrická vodivost.[34] Elektrická vodivost je také závislá na hladině pH (záporný dekadický logaritmus koncentrace vodíkových kationtů ve zředěném vodném roztoku).[39] Neboť ionty  $\text{H}^+$  a  $\text{OH}^-$  ovlivňující hodnotu pH se vyznačují značně vyšší pohyblivostí než ostatní ionty.[39]

Polymery mají kostru se střídajícími se jednoduchými a dvojitými vazbami, obě vazby obsahují silnou  $\sigma$ -vazbu, ale jen dvojitě mají i  $\pi$ -vazby. P-orbitaly v  $\pi$ -vazbách se překrývají a tím umožňují elektronovou delokalizaci a volný pohyb mezi atomy. Při syntéze je polymer v oxidovaném tedy vodivém stavu a v přítomnosti dopovací molekuly je náboj neutralizovaný. Podobně dopant přináší náboj do systému odebráním nebo přidáním elektronů do řetězce a vytvořením tzv. polaronu nebo bipolaronu, které přecházejí z jedné polymerní jednotky do druhé což je často nazývané jako tzv. elektronový „hopping“, a které po dodání napětí, putují po řetězci a tvoří elektrický proud.[40]

### 2.5.2 Elektrický odpor

Jestliže ke koncům měděné a skleněné tyče stejného průřezu přiložíme stejné napětí, naměříme velmi odlišené proudy. Je to způsobeno tím, že měděná a skleněná tyč mají různý elektrický odpor. Odpor neboli rezistenci mezi libovolnými dvěma body vodiče určíme tak, že přiložíme napětí (U) mezi tyto body a změříme proud (I), který vodičem prochází.[13]

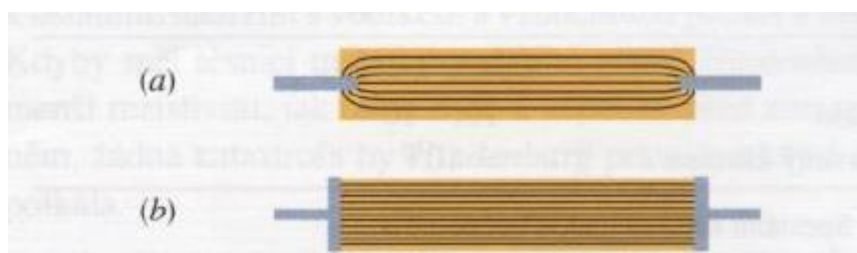
$$R = \frac{U}{I} [\Omega] \quad (\text{Rovnice 4})$$

Ze vzorce číslo 2 plyne, že jednotkou odporu v soustavě SI je volt na ampér. Tato jednotka se vyskytuje tak často, že dostala svůj vlastní název ohm (označení  $\Omega$ ). Tedy

$$1\Omega = 1\text{V} \cdot \text{A}^{-1} [13]$$

Součástka, jejíž funkcí v elektrickém obvodu je vytvářet určitý odpor, se nazývá rezistor.[13] Pro dané napětí platí, že čím větší je odpor, který proudu klade vodič, tím menší proud vodičem prochází. Je zřejmé, že odpor je vlastnost rezistoru. Převrácenou hodnotou odporu je vodivost (konduktance).[13]

Odpor vodiče může být ovlivněn způsobem, jakým je k němu napětí přiloženo. Na obrázku č. 3 můžeme vidět, jak totéž napětí může být přiloženo k vodiči dvěma různými způsoby. Jak napovídá hustota proudových čar, bude proud a tedy i naměřený odpor v obou případech jiný.[13]



**Obrázek 7** Dva způsoby jak přiložit napětí k vodivé tyči (a) naměřený odpor je větší (b) naměřený odpor je menší [Zdroj: HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2000, viii, s. 578-888, [69]

Dále může být odpor ovlivněn rezistivitou (měrným odporem) materiálu, označovanou  $\rho$  a definovanou vztahem

$$\rho = \frac{E}{J} [\Omega \cdot m] \quad (\text{Rovnice 4})$$

Jednotkou rezistivity v SI je  $\Omega \cdot m$ . [13]

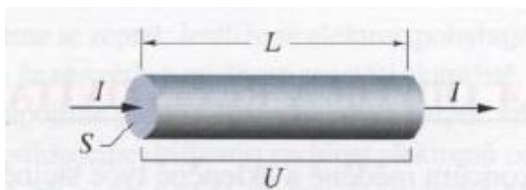
Známe-li rezistivitu látky, můžeme vypočítat odpor vodiče z této látky vyrobeného. Nechť  $S$  je průřez vodiče,  $L$  jeho délka a nechť mezi jeho konci je napětí  $U$  (obr. 4)

### 2.5.3 Elektrický proud

Elektrický proud je uspořádaný pohyb elektricky nabitých částic (většinou se jedná o záporně nabitě částice). Tento jev si můžeme představit jako zahradní hadici, kterou protéká voda, kde molekuly vody představují jednotlivé elektricky nabitě částice.

Elektrické proudy se vyskytují všude kolem nás, od obrovských proudů při úderu blesku až k nepatrným proudům v nervových vláknech, které řídí pohyby našich svalů.[13]





**Obrázek 8** Napětí  $U$  přiložené mezi konce vodiče o délce  $L$  a průřezu  $S$  způsobí, že vodičem prochází proud  $I$   
 [Zdroj: HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2000, viii, s. 578-888, [700] s.]

Abychom mohli říci, že určitou plochou prochází elektrický proud, musí vzniknout výsledný tok náboje touto plochou. Jako například v tomto případě.[13]

Volné, vodivostní elektrony se v izolovaném kusu měděného drátu chaoticky pohybují rychlostí řádově  $10^6 \text{ m/s}^{-1}$ . Představíme-li si rovinu protínající takový drát, budou elektrony rovinou procházet v obou směrech miliardkrát za sekundu. Žádný výsledný tok náboje nevzniká, a žádný proud drátem tedy neprochází. Připojíme-li však konce drátu k baterii, i její malé napětí mírně upřednostní tok elektronů v jednom směru, takže vyvolá výsledný tok náboje průřezem drátu a drátem tedy začne procházet elektrický proud.[13]

Jednotkou proudu v soustavě SI je coulomb za sekundu a tato jednotka se nazývá ampér (A):  $1 \text{ ampér} = 1 \text{ A} = 1 \text{ C} \cdot \text{s}^{-1}$ . Ampér je jednou za základních jednotek SI.[13]

Vzorec pro výpočet elektrického proudu vycházející z Coulombova zákona je:

$$I = \frac{U}{R} [\text{A}] \quad (\text{Rovnice 5})$$

#### 2.5.4 Elektrické napětí

Elektrické napětí je definováno jako práce vykonaná elektrickými (nebo jinými) silami při přemístování kladného jednotkového elektrického náboje mezi dvěma body v prostoru.

Elektrické napětí je rozdíl elektrických potenciálů ve dvou zvolených bodech v prostoru.[21]

Elektrické napětí je dáno vztahem:

$$U = R * I [\text{V}] \quad (\text{Rovnice 6})$$

## 2.6 Zařízení na měření elektrických vlastností

Do skupiny těchto zařízení patří ampérmetr, voltmetr, wattmetr, ohmmetr, multimetr, aj.. Elektrické měření představuje poznávací proces, jehož prvořadým cílem je zjištění výskytu a velikosti měřené veličiny. V poznávacím procesu měření využíváme známých poznatků o fyzikálních jevech a zákonech. Základní elektrické veličiny (např.  $U$  a  $I$ ) určují kvalitativně i kvantitativně nejen stav elektrických obvodů, ale i nejrůznějších objektů. U těchto objektů měříme neelektrické fyzikální veličiny (např. tlak, teplotu, rychlost.). Neelektrické fyzikální veličiny lze poměrně snadno převést na elektrické veličiny, tedy na elektrické signály, které jsou nositeli informace. Velikost, popř. číselnou hodnotu měřené veličiny, udává měřicí přístroj, který měřenou veličinu porovnává s jednotkou příslušné veličiny.[22]

Elektrické měření obsahuje:

- *Objekt měření:* U objektu, na kterém provádíme měření, zjišťujeme jednu nebo více měřených veličin, např. proud  $I$ , nebo napětí  $U$ . Jestli zjišťujeme hodnotu neelektrické veličiny, je nutné ji převést vhodným snímačem na elektrickou veličinu (např. měření teploty, tlaku, atd.)
- *Metoda měření:* Pro přesné zjištění hodnoty měřené veličiny zvolíme vhodnou metodu měření. Pro měření použijeme odpovídající fyzikální zákon.
- *Měřicí zařízení:* Pomocí měřicího zařízení zjistíme hodnotu měřené veličiny. Je to například voltmetr, wattmetr, ampérmetr, osciloskop atd. Je nutné zajistit vhodné propojení objektu měření s měřicím zařízením, aby při měření nedocházelo k chybám.[22]

Rozdělení elektrického měření dle účelu:

- *Laboratorní měření:* Těmito měřeními se hledají a ověřují fyzikální vlastnosti a jevy
- *Technické měření:* Při těchto měřeních probíhá hodnocení, zkoušení, prověřování různých elektrických zařízení (například motory).
- *Provozní měření:* Provozním měřením se průběžně sleduje, popř. řídí výrobní proces v různých továrnách nebo provozech.[22]

-

### 2.6.1 Měření elektrických veličin

Mezi elektrické veličiny patří elektrický proud, elektrické napětí, odpor, elektrický výkon, elektrická energie aj.

#### 1. Měření elektrického napětí

Přístroje na měření elektrického napětí se nazývají voltmetry. Zapojují se vždy paralelně k měřenému obvodu.

Značka voltmetru: V

Připojení voltmetru ovlivní měřený obvod. Aby byla chyba měření co nejmenší, je potřeba zajistit co největší vnitřní odpor  $R_iV$  voltmetru. Voltmetry pro střídavá napětí měří ustálené střídavé napětí, které se charakterizuje efektivní hodnotou napětí. Elektromechanické střídavé voltmetry mají stupnici cejchovanou v efektivních hodnotách.

#### 2. Měření elektrického proudu

Přístroje pro měření elektrického proudu se nazývají ampérmetry. Zapojují se vždy do série s měřeným obvodem

Značka ampérmetru: A

Připojení ampérmetru ovlivní poměry měřeného obvodu. Aby byla chyba měření co nejmenší, je potřeba zajistit co nejmenší vnitřní odpor  $R_iA$  ampérmetru.

#### 3. Měření elektrického výkonu

Pro měření činného výkonu se používají wattmetry, které využívají elektromechanické nebo elektronické principy

Značka wattmetru: W

Výkon na spotřebiči v zapojení el. obvodu se střídavým nebo stejnosměrným zdrojem napětí lze určit pomocí nepřímé nebo přímé metody:

**Nepřímá metoda:** Změří se napětí na voltmetru a proud, protékající ampérmetrem. Elektrický výkon stejnosměrného proudu ve spotřebiči se stanoví součinem napětí  $U_V$  na spotřebiči a procházejícím proudem  $I_Z$ . Tuto metodu lze

použit i ve střídavém obvodu, pokud víme, že  $\cos \phi = 1$ . (tzn. v el. obvodu je zapojen jen odporový spotřebič)

**Přímá metoda:** Pro měření činného výkonu spotřebiče napájeného ze střídavého zdroje napětí použijeme wattmetr. Wattmetry jsou přístroje, které mají 2 měřící obvody. Proudový měřící obvod (proudová cívka) a napěťový měřící obvod (napěťová cívka). Napěťová cívka wattmetru se v elektrickém obvodu zapojuje paralelně ke spotřebiči, proudová cívka se zapojuje sériově se spotřebičem

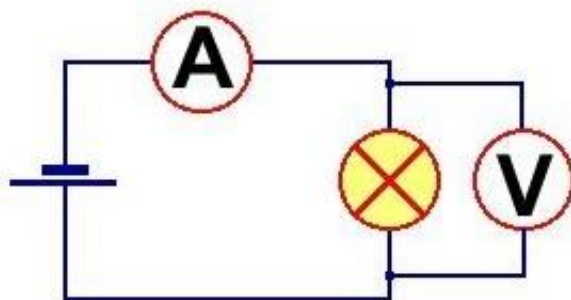
#### 4. Měření odporu

Existuje mnoho metod měření odporů. Nejznámější a nejrozšířenější metodou je měření odporu pomocí ohmetrů. Pro měření odporu lze použít i další metody:

**Měření odporu pomocí ohmetru:** Ohmetr je měřící přístroj udávající velikost měřeného odporu přímo v ohmech. Ve většině případů se jedná o součást tzv. víceúčelových měřících přístrojů - multimetrů.

**Ohmova (nepřímá) metoda:** Využívá Ohmova zákona, podle kterého je měřený odpor ve stejnosměrném obvodu:  $R_x = \frac{U_x}{I_x}$

kde:  $U_x$  úbytek napětí na měřeném odporu  $I_x$  proud procházející měřeným odporem Pro tuto metodu je nutné použití dvou měřících přístrojů: V-metru a A-metru [22]



**Obrázek 9** Základní zapojení ampérmetru (A) a voltmetru (V) [Zdroj: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/2-4.>]

## 2.7 Elektrické vlastnosti lidské tkáně

Spolupráce biologů a fyziků vedla k velkým objevům jako je například využití radioaktivních izotopů, ozařování nádorů či vytvoření postupů při kontaminaci oblasti

radioaktivním materiálem. Bylo zjištěno, že mnoho životních funkcí je spojeno se šířením elektrického impulsu. Případný zásah elektrickým proudem může tyto funkce narušit.[43]

Převážnou část orgánů a tělních tekutin tvoří materiály, které můžeme z hlediska elektrické vodivosti klasifikovat jako dielektrika. Velmi významnou veličinou je kožní odpor, který hraje důležitou roli při určení množství elektrického proudu procházejícího dalšími orgány (srdcem). V případě průchodu elektrického proudu přes srdce může dojít k fibrilaci, která může resultovat ve smrt. Většina veličin spojených s lidským tělem je dosti subjektivních a může se u různých jedinců lišit. Kožní odpor mezi pravou a levou rukou při napětí  $U=50V$  a v suchém prostředí je asi  $R=10k\Omega$ . Tato hodnota je silně závislá na vlhkosti okolního prostředí, vlhkosti kůže a hodnotě přiloženého napětí. Již při napětí  $U=220V$  klesá hodnota kožního odporu na  $R=5k\Omega$ . Pokud se jedinec nachází v prostředí s vlhkým vzduchem, hodnota kožního odporu při stejném napětí klesá asi na  $R=1k\Omega$ . Nachází-li se jedinec ve vodě, kožní odpor při napětí  $U=220V$  je již pouze  $R=500\Omega$  .[43][44]

Tělesné tekutiny dosahují rezistivity okolo  $\rho=0,8 - 1,3\Omega\cdot m$  . Rezistivita svalů se pohybuje okolo  $\rho=3\Omega\cdot m$  , zatímco rezistivita tukové tkáně dosahuje hodnoty  $\rho=10 - 30\Omega\cdot m$  . Z hlediska rezistivity mají kosti podobné vlastnosti jako tuková tkáň, jejich rezistivita může být také až  $\rho=10 - 30\Omega\cdot m$  . [44]

## 2.8 Mikroelektronika a Nanoelektronika

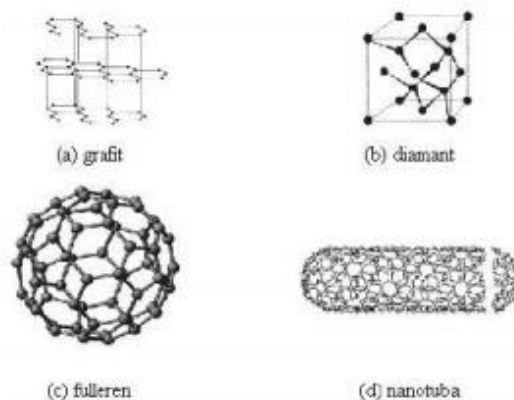
Výraz nanosystém je spojen s molekulární technologií a nanotechnologií, s prvky NEMS (Nano-Electro-Mechanical-Systems), aplikacemi uhlíkových nanotrubiček (nanotubes devices) a bionikou. Typickou součástí mikrotechnologií a nanotechnologií jsou aplikace nových fyzikálních principů, inteligentní materiály a moderní výrobní procesy. Nanosystémy a mikrosystémy jsou charakterizovány komplexním řešením vytvořeným na čipu.[38] Mikrotechnologie a nanotechnologie výrazně mění výrobní technologii materiálů, součástek a systémů. Výrobní proces může být realizován v principu dvěma cestami: odshora dolů a odzdola nahoru (top-down, bottom-up). První cesta (odshora dolů) je typická pro makro- a mikrotechnologické procesy. Metoda odzdola nahoru je přirozenou cestou “růstu věcí”. V současné době je tato metoda použitelná v chemii a v biologii, jako cesta skládání objektů z molekul. [38]

V devadesátých letech se hovořilo o limitu  $10^8$  až  $10^9$  prvků na jednom čipu. V současnosti považujeme za reálné překročení hodnoty  $10^{12}$  prvků na čipu a čip s plochou velikosti stovek  $\text{mm}^2$ . Minimální rozměr struktury je roven limitu pro tunelový přechod elektronu ( $\sim 2 \text{ nm}$ ).[38]

## 2.9 Uhlíkové nanotrubičky

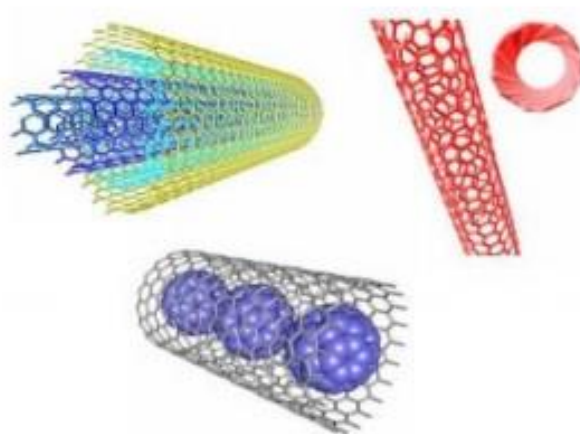
Nejvíce se na světě uhlík nachází ve formě grafitu, je to lehká, vrstevnatá a pevná látka, která dobře vede elektrický proud. V podmínkách vysokých tlaků a teplot uhlík tvoří diamant, což je nejpevnější přírodní látka. Atomy uhlíku jsou přítomné v tetraedrálním uspořádání. Dalšími formami čistého uhlíku jsou fullerény, grafeny, ... [30]

Pro zlepšení elektrické vodivosti by se do roztoku mohly přidat i uhlíkové nanotrubičky. Jsou to duté trubice tvořené šestiúhelníky. Existují dva druhy – jeden s otevřenými konci a druhý, který má konce uzavřené, jsou velice dobře elektricky vodivé a nejlépe vodivé z jiných různých uspořádání uhlíku.[29] Nanotrubičky jsou jedním z mechanicky nejpevnějších materiálů. Jejich vysoká pevnost, tuhost a modul pružnosti jim definují ideální mechanické vlastnosti, které se užívají v nanokompozitních materiálech. [30]



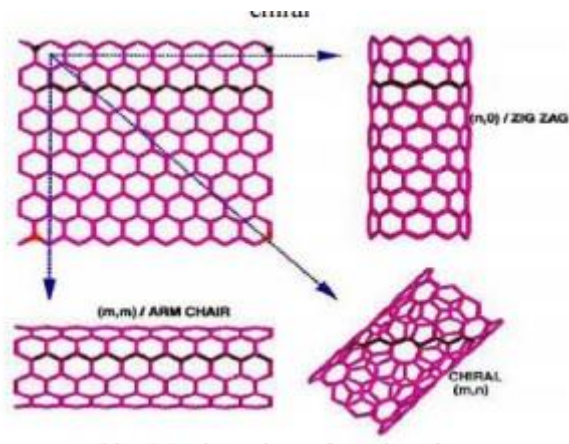
**Obrázek 10** Typy čistého uhlíku [Zdroj: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacia/pages/archiv/transfer/21-2011/pdf/192-197.pdf>]

Prvními zkoumanými a objevenými nanotrubicemi byly vícevrstvé (MWCNT- multi-walled carbon nanotubes), které se skládají ze dvou nebo více grafitových vrstev, které jsou od sebe vzdáleny 0,34nm. Grafitové vrstvy jsou stočeny do válce, přičemž vnitřní část tvoří volný prostor. Průměr MWCNT se pohybuje mezi 2-25nm, vnitřní prostor má rozměr 1-8nm a délka se pohybuje v nanometrech.[30] Dalším typem jsou jednovrstvé (SWCNT- single-walled carbon nanotubes), jedná se o jednu vrstvu grafitu stočenou do válce, která má průměr mezi 1-2nm. Délka může dosahovat až několika mikrometrů.[30] Dalším specifickým typem jsou dvouvrstvé nanotrubice (DWCNT – dual-walled carbon nanotubes) a tzv. peapod



**Obrázek 11** Druhy uhlíkových nanotrubic – vícevrstvé MWCNT, jednovrstvé SWCNT a peapod

Všechny druhy nanotrubic mají fyzikální vlastnosti pevných látek. Struktura CNT se dosahuje srolováním grafenu (jednoatomová rovina grafitu) do tvaru válce. V závislosti od směru rolování rozlišujeme 3 typy CNT mřížek: armchair, zigzag a chiral, znázorněné na obr. č. 11[30]



**Obrázek 12** Srolování grafénu do válce [Zdroj: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacia/pages/archiv/transfer/21-2011/pdf/192-197.pdf>]

## 2.10 Použité testovací metody

K vyhodnocení výsledků bylo zapotřebí použití specifických přístrojů. Kvůli velice malému průměru nanovláken se očekával veliký elektrický odpor a obyčejné multimetry nebyly schopné hodnotu naměřit. Proto byl použit k měření elektrického odporu pikoampérmetr.

### 2.10.1 Pikoampérmetr

Pikoampérmetr je ampérmetr postavený na funkci měření proudu elektrometrem. Ve srovnání s elektrometrem má pikoampérmetr stejné malé napěťové zatížení, stejnou nebo vyšší rychlost, menší citlivost a nižší cenu. Pikoampérmetry mohou mít zabudovaný napěťový zdroj. S tímto uspořádáním můžeme měřit velké odpory.[35] Pokud známe odpor měřené látky, můžeme dle rovnice 1 jednoduše dopočítat výslednou elektrickou vodivost.

### 2.10.2 Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM)

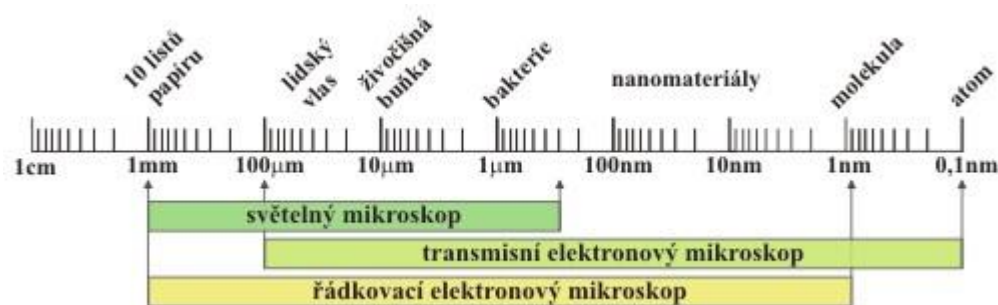
Elektronový mikroskop je v principu (elektronovou) obdobou optického (fotonového) mikroskopu. Optické čočky jsou nahrazeny elektromagnetickými čočkami a místo fotonů jsou ke zkoumání objektu použity elektrony. Problém optického mikroskopu je v tom, že s klesající vlnovou délkou použitého světla klesá i velikost použitelného zvětšení. U optického mikroskopu je hranice nejmenších pozorovatelných



detailů jednoznačně určena jako polovina vlnové délky použitého světelného záření. Naproti tomu vlnové délky urychlených elektronů jsou o mnoho řádů menší než vlnové délky fotonů viditelného světla. Proto má elektronový mikroskop mnohem vyšší rozlišovací schopnost a může tak dosáhnout mnohem vyššího zvětšení (až 1 000 000×). [36] Rastrovací elektronový mikroskop slouží k prohlížení povrchových detailů buněk, vláken a dalších struktur. Pracuje na principu ohybu a lomu elektronového paprsku v elektromagnetickém poli. [31] Rastrovací, nebo také řádkovací, či skenovací elektronová mikroskopie využívá svazku elektronů urychlených napětím ke snímání povrchu vzorků. Zmíněné snímání probíhá nepřímo prostřednictvím sekundárních (SE) a zpětně odražených (BSE) elektronů dopadajících na detektor. Výsledkem je trojrozměrný obraz povrchu vzorku vznikající po řádcích.[32]

Rozlišujeme 4 skupiny elektronů opouštějících povrch vzorku

- *zpětně odražené elektrony* - poskytují informaci o topografii (reliéfu) vzorku a o materiálovém složení. Jejich rozlišovací schopnost je 50-200nm.
- *sekundární elektrony* - poskytují informaci převážně topografickou. Rozlišovací schopnost je 5-15 nm. • *augerovy elektrony* - jsou vyraženy z materiálu a zjištěním jejich energie lze provádět prvkovou (kvalitativní) analýzu.
- *primární elektrony* - detekují se jako u transmisního elektronového mikroskopu (0,5 nm).[31]

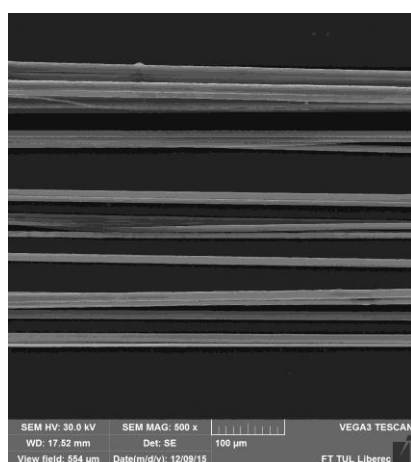


**Obrázek 13** Typická velikost objektů, které lze pozorovat elektronovým mikroskopem. Pro srovnání je uveden i rozsah světelného mikroskopu. [Zdroj: <http://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>]



**Obrázek 14** Schématické znázornění principu transmisního (vlevo) a řádkovacího (vpravo) elektronového mikroskopu. [Zdroj: <http://www.fzu.cz/popularizace/electronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>]

Příprava vzorku pro analýzu elektronovým mikroskopem spočívá v tom, že se pokryje tenkou vrstvou těžkého kovu a poté se po něm přejíždí (řádkuje) svazkem elektronů pomocí elektromagnetického vinutí. Zobrazení preparátu je založeno na principu televizní obrazovky. Po stínítku obrazovky se pohybuje synchronně paprsek, běžící po povrchu preparátu a druhý elektronový paprsek, jehož intenzita je dána signálem z fotonásobiče. Obraz se snímá z obrazovky s krátkým dosvitem pomocí fotografického přístroje. Přímé pozorování se provádí na druhé obrazovce, jejíž doba dosvitu je mnohonásobně delší, takže pozorovatel vidí trojrozměrný obraz. [31]



**Obrázek 15** Snímek nanovláken vyrobených na mikromanipulátoru pořízený na SEM [Zdroj: Jan Gavura]

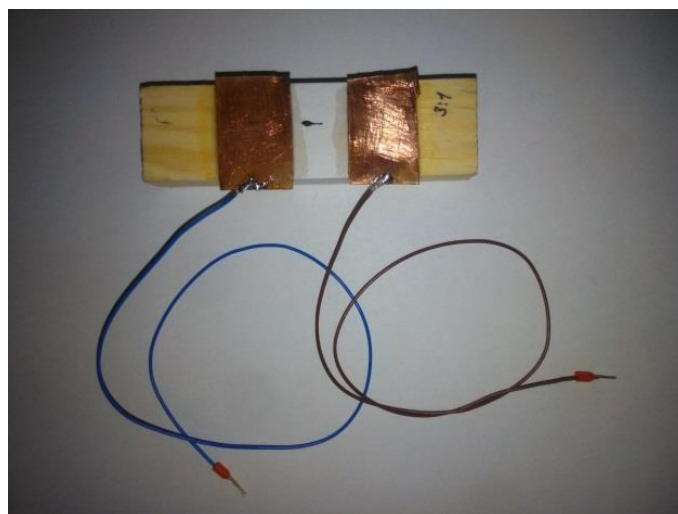
### 2.10.3 Podkladový stojan na nanášení nanovláken

K měření elektrické vodivosti nanovláken bylo zapotřebí sestavit speciální stojan, na který by mohly být nanášeny nanovláken a dal by se uchytit v mikromanipulátoru tak, aniž by ho poškodil. Tento stojan byl sestaven autorem bakalářské práce. Skládá se z nevodivé dřevěné desky, která tvoří oporu. Dřevo se v celém rozsahu vlhkosti chová jako dielektrikum - je izolantem v suchém stavu[12]. Proto se nebylo třeba obávat, že by mohla konstrukce nějakým způsobem ovlivňovat výslednou elektrickou vodivost nanovláken. Na tuto desku byly přilepeny dva měděné plíšky. Měď je kov s velkou elektrickou vodivostí, ze kterého se sestavují vodiče, kabely, vinutí elektrických strojů apod..[35]. Mezi kovy s nejlepší elektrickou vodivostí patří na první místo stříbro, na druhé pak měď, na třetím místě je zlato a pak hliník. Rezistivita mědi se pohybuje okolo  $0,0172(\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m})$ . Výhodou mědi je její relativně nízká cena oproti stříbru a zlatu.

Pro součástky se nejvíce používá elektrovodná měď, která se získává elektrolytickou rafinací surové hutní mědi. Musí obsahovat nejméně 99.9% Cu a Ag. Vyznačuje se velkou vodivostí a velkou odolností vůči korozi. Mezi její další přednosti patří dobré kontaktní vlastnosti, výborná tvárnost za studena i za tepla a dobrá spojovatelnost (např. pájením).[35]

Díky těmto vlastnostem byla nejlepším kandidátem na použití k měření elektrické vodivosti nanovláken.

K těmto plíškům byl připájen vodič, pomocí kterého se vzorek měřil na pikoampérmetru



Obrázek 16 Podkladový stojan na nanášení nanovláken

### **3. Experimentální část**

Popisuje přípravu polymerních roztoků a jejich zvláknění na mikromanipulátoru pomocí technologie drawing. Dále popisuje sestavení a používání podkladové desky na měření elektrické vodivosti, práci s pikoampérmetrem a schopnosti vláken přenášet elektrický proud. Obsahuje také celkové vyhodnocení elektrické vodivosti jednotlivých polymerních roztoků a z nich vytvořených vláken.

#### **3.1 Použité materiály**

Pro práci byl vybrán polymer Polykaprolakton (PCL)  $M_n=80\,000$  od firmy Aldrich, PCode: 1002020721, jakožto nejvhodnější polymer, kterým disponovala laboratoř na KNT. PCL se rozpouštěl modifikovaným chloroformem. Chloroform byl modifikován polyanilinem za vzniku polyanilinové disperze. Tato disperze dostala označení experiment 831.

##### *3.1.1 Experiment 831*

Jedná se o polyanilinovou disperzi v chloroformu, z níž byla oddělena vodná fáze (PCL se ve vodě sráží). Koloidy obsahují asi 2% váh. polyanilinu a asi 4%váh. surfaktantu (povrchově aktivní látka snižující povrchové napětí – zamezuje srážení) AOT (sodium di-2-ethyl-hexyl-sulphosuccinate) [41][42]. Jedná se o tmavě zelenou disperzi.

#### **3.2 Příprava polymerního roztoku**

Na vytvoření polymerního roztoku bylo použito PCL  $M_n=80\,000$ . Polykaprolakton je sám o sobě elektricky nevodivý, tak bylo zapotřebí do rozpouštědla (chloroformu) přidat polyanilin, který je už elektricky vodivý a měl by zvýšit elektrickou vodivost nanovlákn. Pro tyto účely bylo použito rozpouštědlo značené jako

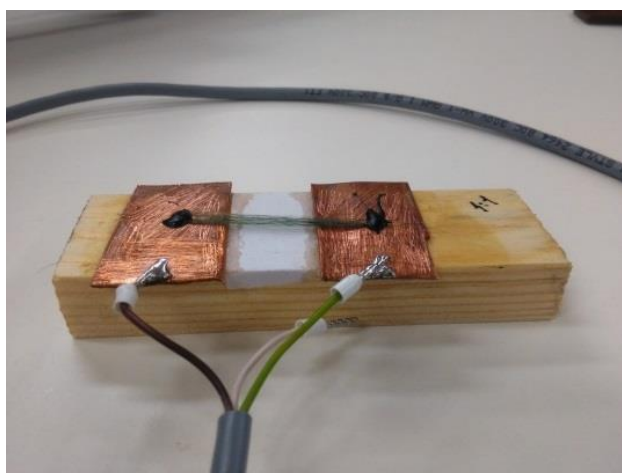
experiment 831. Pro porovnávání byla použita jednotná koncentrace polymeru v rozpouštědle, a to vždy 12%, jelikož jde o dobře zvláknitelnou koncentraci na mikromanipulátoru. Pro přípravu 5g roztoku se do vialky navážilo 0,6g PCL, a to bylo doplněno 4,4g rozpouštědla. Tento roztok byl do druhého dne míchán na magnetické míchače, při pokojové teplotě dokud nevznikla struktura podobná medu.

### 3.3 Postup výroby nanovláken

Namíchaný roztok ve vialce byl přemístěn pomocí malé injekční stříkačky do zásobníku injekční stříkačky u mikromanipulátoru. Do zásobníku byla zandána zátka a na ní byl napojen kompresor, který zajišťoval rovnoměrné nanášení polymeru při procesu zvláknování a také zajišťoval, aby každé natažené vlákno mělo stejný obsah rozpouštědla.

Po této přípravě se na podkladovou desku nalepily pomocí oboustranné lepicí pásky dva body, na které mohla injekční stříkačka bezpečně dosednout, aniž by se poškodila. Dále byl na podkladovou desku umístěn stojan pro sběr nanovláken.

Následně se spustil program v počítači, ve kterém šly nastavit parametry pro výrobu nanovláken (rychlost tahání, vzdálenost tahání, místo a výška dosedu jehly,...). Po nastavení potřebných paramterů se mohl program spustit a mikromanipulátor začal pracovat. Při jednom cyklu vyrobil 50 nanovláken. Proto bylo nutné udělat 10 cyklů, aby se mohlo testovat na 500 nanovlákech.



**Obrázek 17** Vzorek 500 nanovláken připravených pro testování na pikoampérmetru [Zdroj: Jan Gavura]

## 3.4 Experimenty

V této kapitole jsou popsány jednotlivé experimenty, jejich příprava, zvláknění a následné měření jejich elektrického odporu, z kterého se dle rovnice 3 vypočítá elektrická vodivost. Na konci jsou uvedeny tabulky, které jednotlivé elektrické vodivosti nanovláken porovnávají mezi sebou.

### 3.4.1 Experiment 1

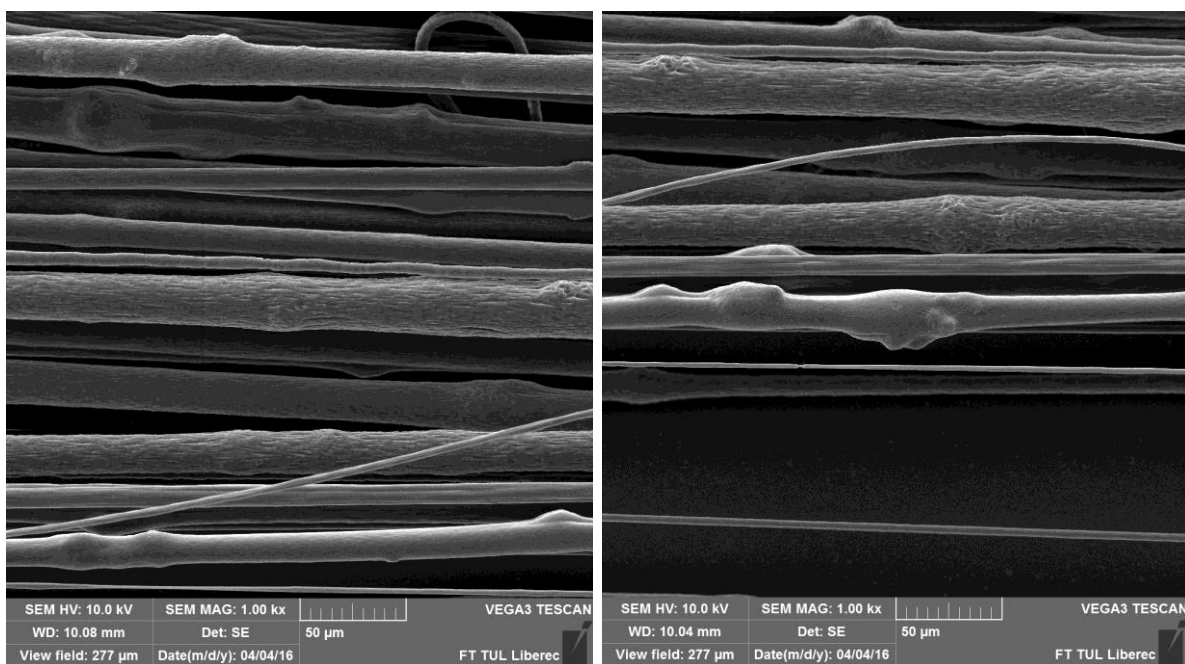
První vytvořený roztok byl 12%hm PCL 80 000, který byl rozpuštěn v nezředěném experimentu 831. Tento roztok byl přes noc míchán na magnetickém míchadlu až do jeho úplného rozpuštění. Poté byl roztok zvlákněn na mikromanipulátoru. Tato vlákna se vyznačovala hrudkovitostí a rychlým vysycháním rozpouštědla, což vedlo k trhání nanovláken při dlužení. U tohoto experimentu nebyla možnost měření elektrického odporu, kvůli špatnému zvláknění. Proto byly pro další experimenty zvoleny jiné podmínky a to takové, že experiment 831 byl ředěn chloroformem, aby roztok netvořil hrudky a aby se nanovláknena netrhala a byla možnost vytvoření přesného množství nanovláken.

### 3.4.2 Experiment 2

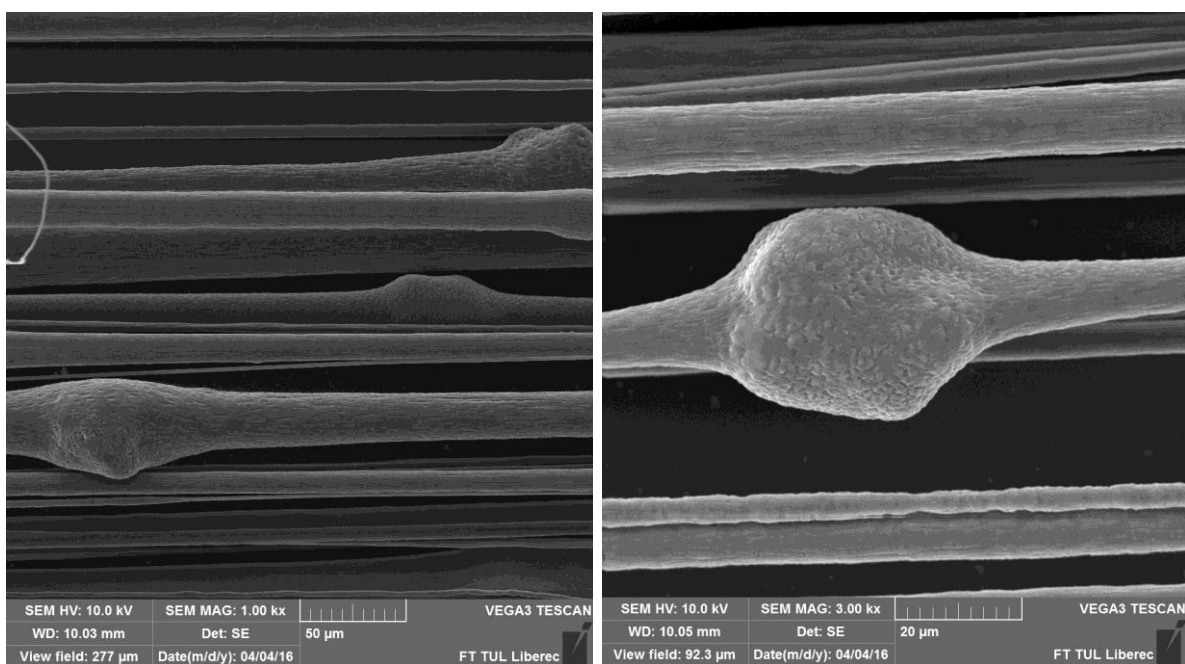
Pro experiment 2 byl opět zvolen 12%hm roztok PCL 80 000. Ovšem experiment 831 byl ředěn chloroformem nejdříve 1:1 a poté 3:1 (3 díly experimentu 831 a 1 díl chloroformu). Tyto roztoky byly opět míchány do druhého dne na magnetickém míchadlu. Druhý den proběhlo jejich zvláknění na mikromanipulátoru, roztoky již hrudkovaly méně či vůbec. Bylo nataženo 500 vláken od každého roztoku na podkladovou desku. Tato vlákna byla poté měřena na elektrický odpor a na elektrickou vodivost. Měření u obou vzorků prokázalo, že elektrický odpor vláken je v řádech desítkách megaohmů. Roztok, na který bylo použito rozpouštědlo 3:1, mělo elektrický odpor  $20\text{M}\Omega$ , z tohoto lze vypočítat elektrickou vodivost. Elektrická vodivost 500 nanovláken je  $5 \times 10^{-8}\text{S}$ . Elektrická vodivost jednoho nanovláknena tedy je  $1 \times 10^{-10}\text{S}$ . U roztoku, kde bylo použito rozpouštědlo 1:1, byl naměřený elektrický odpor  $26\text{M}\Omega$ . Elektrická vodivost 500 nanovláken je  $3,84 \times 10^{-8}\text{S}$ . Elektrická vodivost jednoho nanovláknena je tedy  $7,69 \times 10^{-11}\text{S}$ . Elektrická vodivost nanovláken byla prokázána a pohybuje se v rozmezí stovek pikosiemens. Tato malá elektrická vodivost může být

způsobena velkou vzdáleností jednotlivých částic PANI, což může být způsobeno malou koncentrací PANI v roztoku.

Po naměření elektrické vodivosti nanovláken byl proveden experiment na měření elektrické vodivosti experimentu 831. Již tento roztok má elektrický odpor 5,2 M $\Omega$  což se rovná  $1,92 \times 10^{-7}$  S. Poté se měřil elektrický odpor experimentu 831, u kterého se přes noc nechal vypařit chloroform. Elektrický odpor vypařeného experimentu 831 byl 172 k $\Omega$ . Z tohoto vychází, že elektrická vodivost je  $5,81 \times 10^{-6}$  S.



Obrázek 18 SEM snímky nanovláken v poměru 1:1 zvětšeny 1000x [Zdroj: Jan Gavura 2016]



Obrázek 19 SEM snímky nanovláken v poměru 3:1, vlevo zvětšen 1000x, vpravo 3000x [Zdroj: Jan Gavura 2016]



### *3.4.3 Experiment 3*

Pro získání větší elektrické vodivosti byl snížen obsah chloroformu a zvýšil se poměr experimentu 831. Byl tedy vytvořen 12hm% roztok PCL v experimentu 831 v poměru 9:1 s chloroformem. Opět byl vzorek do druhého dne míchán na magnetickém míchadle. Bylo zvlákněno 500 nanovláken. Následně byl změřen jejich elektrický odpor, který byl na použitém přístroji neměřitelný.

Proto byl celý experiment se vzorkem 9:1 udělán znovu, jestli nedošlo při jeho výrobě k pochybením. I tento druhý pokus dopadl negativně a naměřený elektrický odpor byl  $38\text{M}\Omega$ . (přesahoval hodnoty vzorků 1:1 a 3:1).

### *3.4.4 Experiment 4*

K ještě většímu navýšení elektrické vodivosti se vytvořil roztok v poměru 27:1. Kde 27 dílů tvořil experiment 831 a 1 díl tvořil chloroform. Vzorek byl do druhého dne míchán na magnetickém míchadlu a poté byl zvlákněn na mikromanipulátoru. Zvláknění probíhalo velice dobře. Opět bylo vyrobeno 500 nanovláken. Odpor tohoto vzorku byl neměřitelný, proto byl vyroben ještě jednou, ale i tento druhý vzorek měl neměřitelný elektrický odpor na použitých měřicích zařízeních.

### *3.4.4 Experiment 5*

Poslední zkoumaný vzorek byl poměr 81:1. Tento vzorek obsahoval už pouze 0,054g přidaného chloroformu k čistému experimentu 831. Tento roztok nebylo možné standartním postupem zvláknit. Docházelo k ucpávání injekční stříkačky, trhání nanovláken a hrudkování. Proběhl i pokus s rozšířenou injekční stříkačkou, ale i tato se ucpávala a bylo nutné ji po několika úvratích čistit. Proto tento vzorek nebylo možné testovat na elektrický odpor.

### *3.4.5 Experiment 6*

Nejmenší naměřený odpor měl poměr 3:1. Následný poměr 9:1 měl elektrický odpor větší. Byla vytvořena hypotéza, že větší koncentrace tvoří větší počet hrudek (elektricky vodivých částic na nanovlákně), které jsou od sebe vzdáleny na větší vzdálenost, než je vzdálenost pro přenos elektrického náboje. K potvrzení této

hypotézy, byl vytvořen experiment, ve kterém se testovaly další dva poměry, a to 4:1 a 6:1. Tyto poměry byly vytvořeny a zvlákněny stejným způsobem jako ostatní poměry.

Naměřený elektrický odpor 500 nanovláken poměru 4:1 byl  $18\text{M}\Omega$ . Vzorek zvlákněval velice dobře. Naměřený elektrický odpor poměru 6:1 byl  $28\text{M}\Omega$ . Z těchto pokusů vyplývá, že hypotéza je pravdivá a větší koncentrace experimentu 831 v roztoku tvoří hrudky elektricky vodivých částic, které jsou od sebe vzdáleny více, než je vzdálenost pro přenos elektrického náboje.

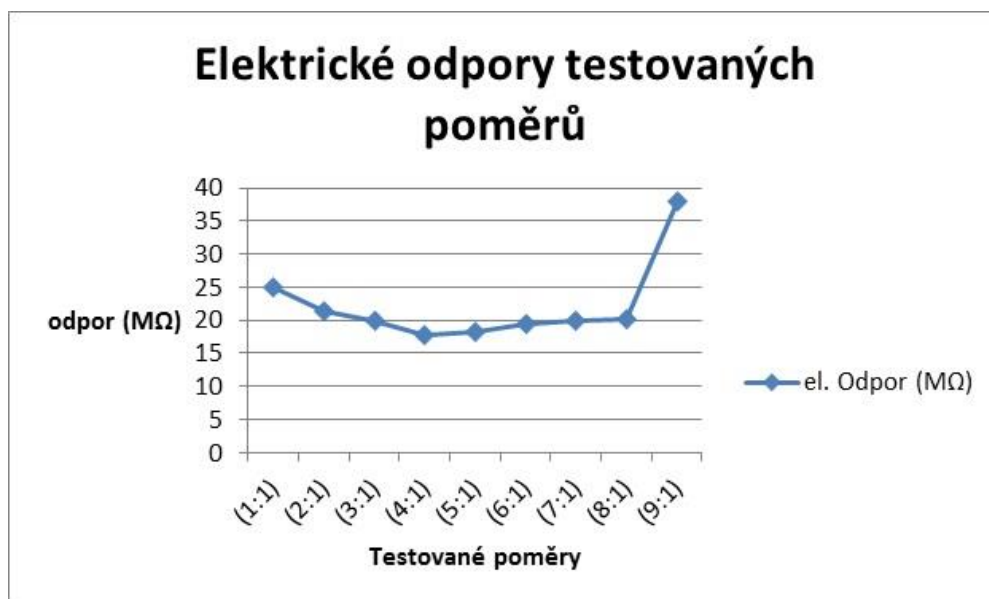
Pro potvrzení hypotézy byla dodělána řada poměrů, jejichž výsledky jsou uvedeny v kapitole 3.4.6 *Výsledky*. Tyto poměry byly vyrobeny a zvlákněny a měřeny stejnou technologií jako poměry předchozí. U zvláknění a měření nenastal žádný problém.

Dále se porovnávala elektrická vodivost vzorku, ve kterém nebyl obsažen experiment 831. Byl to vzorek z 12%hm PCL v chloroformu. Na tomto vzorku nebyla prokázána elektrická vodivost.

### 3.4.6 Výsledky

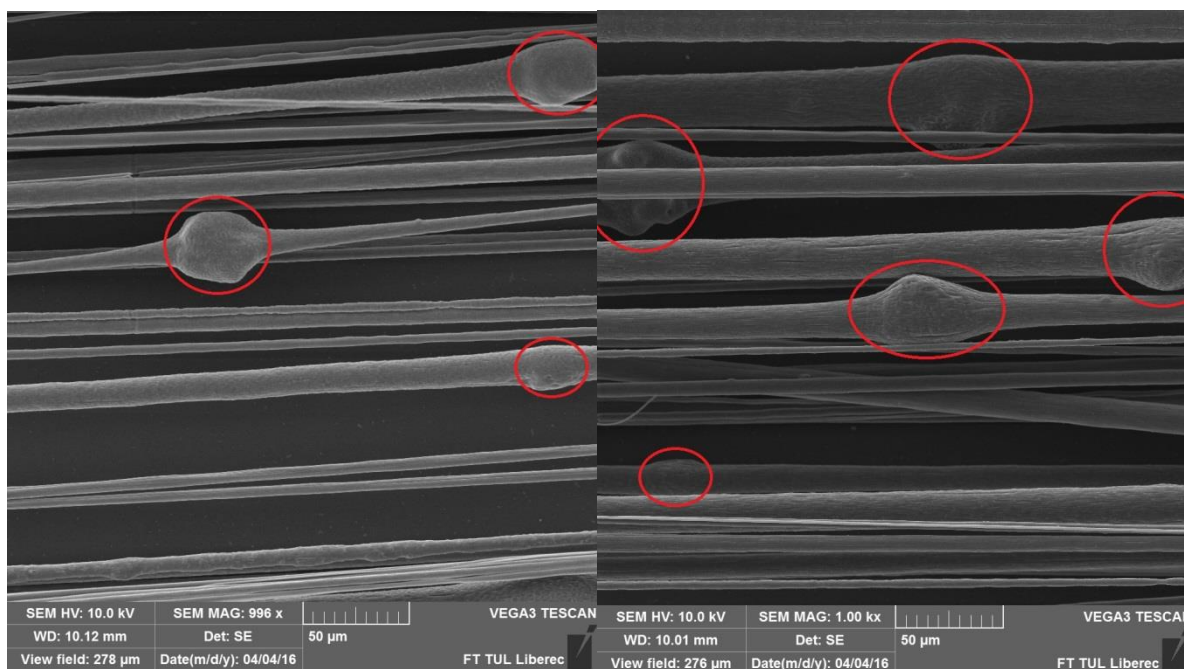
**Tabulka 2** Měřené poměry a jejich elektrické vlastnosti[Zdroj: Jan Gavura 2016]

Vzorky	el. odpor (MΩ)	el. vodivost (S)
1:1	26	$3,84 \times 10^{-8}$
2:1	21,3	$4,69 \times 10^{-8}$
3:1	20	$5 \times 10^{-8}$
4:1	17,7	$5,64 \times 10^{-8}$
5:1	18,3	$5,46 \times 10^{-8}$
6:1	19,5	$5,12 \times 10^{-8}$
7:1	19,9	$5,03 \times 10^{-8}$
8:1	20,2	$4,95 \times 10^{-8}$
9:1	38	$2,63 \times 10^{-8}$
27:1	neměřitelný	neznámá
81:1	nezvláknitelný	nezvláknitelný

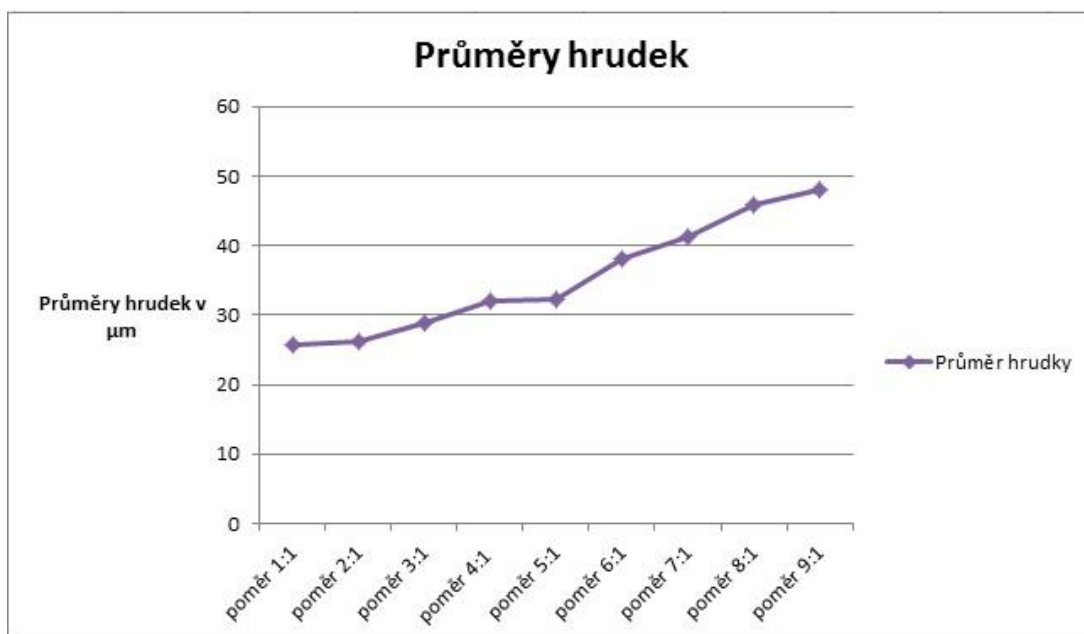


**Graf 1** Znárodnění elektrických odporů jednotlivých poměrů [Zdroj: Jan Gavura 2016]

Dále byly zkoumány průměry korálek na nanovlákněch v jednotlivých poměrech. Tyto korálky obsahovaly elektricky vodivou složku, která se srazila a nebyla tedy rovnoměrně rozvrstvena do celého nanovlákná. Vyhodnocení proběhlo v programu NIS Elements, do kterého byly nahrány snímky nanovláken z SEM. V tomto programu byly měřeny průměry hrudek a následně byl v programu Microsoft Excel vypočítán jejich průměr a z průměrů hrudek byl sestaven graf. *Graf 2*.



**Obrázek 20** Hrudky na nanovlákněch [Zdroj: Jan Gavura 2016]



**Graf 2** Průměry korálků na nanovláčkách [Zdroj: Jan Gavura 2016]

Na *Grafu 2* lze pozorovat, že se zvyšujícím poměrem se průměr korálků zvětšuje. Tyto korálky se objevovaly na nanovláčkách nahodile a dle pozorování zhoršovaly elektricky vodivé vlastnosti nanovláken.

#### 4. Diskuze - Další možnosti, jak zvýšit elektrickou vodivost

Pro zlepšení elektrické vodivosti by se do rozpouštědla mohly přidat uhlíkové nanotrubičky, jejichž elektrická vodivost, mechanické vlastnosti atd. jsou popsány v kapitole 2.9 *Uhlíkové nanotrubičky*. Dále by bylo možné zvýšit obsah PANI v rozpouštědle nebo zmenšit obsah surfaktantu AOT (zde by byla možnost srážení). Dále pak vyrobit nanovláčka z PCL rozpuštěným v chloroformu a poté na nanovláčka nanést vrstvu PANI, která by zajišťovala konstantní vrstvu elektricky vodivého polymeru PANI na povrchu nanovláčka. Takto se elektricky vodivá nanovláčka již vyrábí na FT TUL, ale na pokrytí se používá jiný elektricky vodivý polymer a to PPY, jehož vlastnosti jsou popsány v kapitole 2.4.3 *Polypyrol*.

Další možností je dopovat PANI dopantem Sulphonová kyselina. Dopantové plyny jsou zdrojem řízených nečistot používaných k modifikaci lokálních elektrických vlastností polovodičových materiálů. Konkrétně dopant přispívá buď deficitem elektronů (p-dopant) nebo přebytkem elektronů (n-dopant) k lokální struktuře molekulární krystalické mřížky, což naopak mění vodivost materiálu. Dopanty se dodávají v

kapalném, pevném a plynném skupenství. Dopanty se používají v epitaxiálním nanášení, difúzi a implantaci iontů. [45][46]

## 5. Závěr

V rámci této bakalářské práce byly splněny všechny podmínky a zásady pro vypracování. Pro měření elektrického odporu nanovláken byl vyroben stojan, na který se nanášela nanovlákná. Díky tomuto stojanu pak mohl být měřen elektrický odpor nanovláken, z kterého se dle *Rovnice 3* vypočítala elektrická vodivost. Jelikož nebylo možné z důvodu trhání a tvoření hrudek na nanovlákněch použít nezředěnou polyanilinovou disperzi, která má označení jako experiment 831 (*kapitola 3.1.1 Experiment 831*), bylo nutné vyhledat vhodnou koncentraci disperze a chloroformu, která zaručovala co největší elektrickou vodivost, ale zároveň se při zvláknění netrhala. Byla tedy určena řada několika koncentrací, a to 1:1,2:1, 3:1,4:1, 5:1, 6:1, 7:1, 8:1, 9:1, 27:1 a 81:1, které byly vždy den předem připraveny a přes noc míchány na magnetickém míchadle. Druhý den byly zvlákněny na mikromanipulátoru a poté byl měřen jejich elektrický odpor. Největší koncentrace, která byla ještě zvláknitelná na mikromanipulátoru, byla 27:1 (27 dílů polyanilinové disperze ku 1 dílu chloroformu). Poměr 81:1 se ukázal jako nezvláknitelný (stejnou technologií a postupem jako ostatní poměry). Při tažení se tento poměr choval stejně jako nezředěná PANI disperze, tvořil hrudky, nanovlákná se trhala a roztok ucpával injekční stříkačku, kterou bylo nutné po pár úvratích čistit. Proběhl i experiment s rozšířenou injekční stříkačkou, ovšem tato se také ucpávala.

Předpoklad byl ten, že se se zvyšujícím se poměrem elektricky vodivé disperze, bude zvyšovat i elektrická vodivost. Tento předpoklad se nepotvrdil a u zvlákněných testovaných vzorků byl pozorován jev, že se od určité hranice zvýšení elektricky vodivé disperze, zvyšoval i elektrický odpor (zmenšovala se elektrická vodivost). Proto byl vytvořen další předpoklad, že za zvyšování elektrického odporu můžou defekty na nanovlákněch ve formě hrudek, které byly sledovány na snímcích ze SEM.

Defekty byly analyzovány v programu NIS Elements, byl měřen jejich průměr a vzdálenost jednotlivých defektů od sebe. Dále byla sledována závislost a předpoklad, zda se defekty budou zvětšovat se zvyšováním koncentrace (PANI disperze a chloroformu). Z naměřených dat bylo zjištěno, že se se zvýšením koncentrace, zvyšuje i

průměr defektů. Tyto defekty dle výsledků obsahují elektricky vodivé částice a jelikož byly tyto částice ve formě aglomerátů hrudek, tak nebyly rovnoměrně rozloženy na nanovlákních a zhoršovaly celkovou elektrickou vodivost. Proto od určité hranice zvýšení koncentrace PANI disperze, klesala elektrická vodivost.

Nejlepší elektrickou vodivost (nejmenší elektrický odpor) měl poměr 4:1, jehož elektrický odpor byl  $17,7\text{M}\Omega$ , což se rovná  $5,64 \times 10^{-8}\text{S}$ . Nejnižší naměřenou hodnotu elektrické vodivosti měl poměr 9:1, jehož elektrický odpor byl  $38\text{M}\Omega$ , což je  $2,63 \times 10^{-8}\text{S}$ . Nejhůře zvláknitelný poměr byl 27:1, jehož elektrický odpor již nebyl měřitelný.

Malá elektrická vodivost testovaných vzorků může být zapříčiněna nízkou koncentrací PANI v disperzi. Koncentrace PANI byla také limitována možností nechtěné agregace již v experimentu 831. Větší vzdáleností elektricky vodivých částic v roztoku než je kritická vzdálenost pro přenos elektrického náboje nebo malá pohyblivost elektronu v nanovlákně, může být příčinou nízké elektrické vodivosti.

## 6. Zdroje

- [1] BAJÁKOVÁ, Jana, Jiří CHALOUPEK a David LUKÁŠ. □DRAWING“-  
*PRODUCTION OF INDIVIDUAL NANOFIBERS BY EXPERIMENTAL  
METHOD* [online]. 2014 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z:  
[http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:O49p6gy2lMoJ:nanocon2012.tanger.cz/files/proceedings/nanocon\\_11/lists/papers/1140.pdf+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:O49p6gy2lMoJ:nanocon2012.tanger.cz/files/proceedings/nanocon_11/lists/papers/1140.pdf+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz)
- [2] NAIN, Amrinder S., Joanna C. WONG, Cristina AMON a Metin SITTI. Drawing suspended polymer micro-/nanofibers using glass micropipettes. *Applied Physics Letters* [online]. 2006, roč. 89, č. 18, s. 183105 [vid. 17. března 2015]. ISSN 00036951. Dostupné z: doi:10.1063/1.2372694
- [3] Ondarçuhu T., Joachim C.: Drawing a single nanofibre over hundreds of microns. *Europhysics letters*, 42 (2), pp. 215-220, (1998)
- [4] *Technologie tažení individuálních nano/mikrovláken-mikromanipulátor* [online]. : 3 [cit. 2015-10-06]. Dostupné z:  
[http://cxi.tul.cz/pdf/technologie\\_tazeni\\_mikromanipulator.pdf](http://cxi.tul.cz/pdf/technologie_tazeni_mikromanipulator.pdf)
- [5] DOC. ING. EVA KOŠŤÁKOVÁ, PH.D. Electrospinning - introduction. In: [online]. B.m. [vid. 7. květen 2015]. Dostupné z:  
[https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/2264/course/section/865/Prezentace2\\_electrospinning%20-%20introduction%20EN.pdf](https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/2264/course/section/865/Prezentace2_electrospinning%20-%20introduction%20EN.pdf)
- [6] SUBBIAH, Thandavamoorthy, G. S. BHAT, R. W. TOCK, S. PARAMESWARAN a S. S. RAMKUMAR. Electrospinning of nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2005, roč. 96, č. 2, s. 557–569 [vid. 6. dubna 2015]. ISSN 0021-8995, 1097-4628. Dostupné z: doi:10.1002/app.21481

[7] HUANG, Zheng-Ming, Y.-Z. ZHANG, M. KOTAKI a S. RAMAKRISHNA. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology* [online]. 2003, roč. 63, č. 15, s. 2223–2253 [vid. 7. duben 2015]. ISSN 02663538. Dostupné z: doi:10.1016/S0266-3538(03)00178-7

[8] DOC. ING. EVA KOŠŤÁKOVÁ, PH.D. Úvod do elektrostatického zvlákňování. In: [online]. B.m. [vid. 7. květen 2015]. Dostupné z: [https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/689/course/section/267/Prednáška%20%206\\_TNA\\_E.Kostakova%20KNT%20CFT%20TUL.pdf](https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/689/course/section/267/Prednáška%20%206_TNA_E.Kostakova%20KNT%20CFT%20TUL.pdf)

[9] *Technologie nanospider* [online]. [vid. 13. duben 2015]. Dostupné z: <http://www.elmarco.cz/technologie/technologie/>

[10] Baji A. et al.: Electrospinning of polymer nanofibers: Effects on oriented morphology, structures and tensile properties. *Composites Science and Technology*, 70 (2010) 703 – 718.

[11] Subbiah T et al.: Electrospinning of Nanofibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 96 (2005) 557 – 569.

[12] *Elektrické vlastnosti dřeva* [online]. 2014 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=9183;lang=cz](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9183;lang=cz)

[13] HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2000, viii, s. 578-888, [34] s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.

[14] PROKEŠ, Jan, Stanislav NEŠPŮREK a Jaroslav STEJSKAL. *Vodivé polymery: Inteligentní materiály pro nové století*[online]. : 4 [cit. 2015-10-25]. Dostupné z: <http://www.cts.cuni.cz/vesmir>



- [15] JENKINS, A (ed.), Nathalie K. GUIMARDA, Natalia GOMEZ a Christine E. SCHMIDT. *Progress in polymer science: Conducting polymers in biomedical engineering*. 2007. Oxford: Pergamon Press, 1971, 3 sv. ISBN 0079-6700.
- [16] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. vyd. Brno: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
- [17] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007, 207 s. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [18] Čičmanec, P., *Všeobecná fyzika 2, Elektrina a magnetismus*, Bratislava: Alfa a SNTL, 1980.
- [19] Tucker, N. a kol. (2012) “*The History of the Science and Technology of Electrospinning from 1600 to 1995*” *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* Special issue – Fibers
- [20] CHEN, Qizhi, Shuling LIANG a George A. THOUAS. Elastomeric biomaterials for tissue engineering. *Progress in Polymer Science* [online]. 2013, roč. 38, č. 3-4, s. 584–671 [vid. 12. listopad 2014]. ISSN 00796700. Dostupné z: doi:10.1016/j.progpolymsci.2012.05.003
- [21] *ELEKTRICKÝ PROUD A FYZIKÁLNÍ JEDNOTKY* [online]. 2008 [cit. 2009-06-08]. Dostupný z WWW: <[http://www.simopt.cz/energyweb/web/index.php?display\\_page=2&subitem=1&ee\\_chapter=5.1.3](http://www.simopt.cz/energyweb/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=5.1.3)>.
- [22] VRÁNA, Václav, Jan VAŇUŠ a Vítězslav STÝSKAL. *Elektrická měření* [online]. 2002, , 19 [cit. 2016-01-26].
- [23] O'BRIEN, Fergal J. Biomaterials and scaffolds for tissue engineering. *Materials Today* [online]. 2011, roč. 14, č. 3, s. 88–95 [vid. 28. leden 2016]. ISSN 13697021. Dostupné z: doi:10.1016/S1369-7021(11)70058-X

- [23] ALI, S.A.M., S.-P. ZHONG, P.J. DOHERTY a D.F. WILLIAMS. Mechanisms of polymer degradation in implantable devices. *Biomaterials* [online]. 1993, roč. 14, č. 9, s. 648–656 [vid. 28. leden 2016]. ISSN 01429612. Dostupné z: doi:10.1016/0142-9612(93)90063-8
- [24] PATRÍCIO, T., M. DOMINGOS, A. GLORIA a P. BÁRTOLO. Characterisation of PCL and PCL/PLA Scaffolds for Tissue Engineering. *Procedia CIRP* [online]. 2013, roč. 5, s. 110–114 [vid. 28. leden 2016]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2013.01.022
- [25] *Polykaprolakton-biodegradabilní polyester* [online]. 2012 [cit. 2016-02-08]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/polykaprolakton-biodegradabilni-polyester>
- [26] Jaroslav Stejskal, Jan Prokeš a Mária Omastová. POLYANILIN A POLYPYRROL ñ DVA PŘEDSTAVITELÉ VODIVÝCH POLYMERŮ. *Chemické listy* [online]. 2001, , 9 [cit. 2016-02-08]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/archiv/2001/08-PDF/484-492.pdf>
- [27] KOMZÍK, Václav. *Heterocyklické sloučeniny* [online]. [cit. 2016-02-08]. Dostupné z: [http://uoch.vscht.cz/files/uzel/0006592/Heterocyklicke\\_slouceniny.pdf](http://uoch.vscht.cz/files/uzel/0006592/Heterocyklicke_slouceniny.pdf)
- [28] KRABICOVÁ, Ilona. *PŘÍPRAVA TKÁŇOVÉHO NOSIČE PRO NÁHRADU NERVOVÉ TKÁNĚ (MÍŠNÍ LÉZE)*. Liberec, 2015. Bakalářská práce. Technická univerzita Liberec. Vedoucí práce Věra Jenčová.
- [29] *Carbon - Periodic table of videos* [online]. In: . The University of Nottingham [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.periodicvideos.com/videos/006.htm>
- [30] GREŠKOVIČ, František a Bronislav DULEBA. *Uhlíkové nanotrubičky: Materiál pre budúcnosť* [online]. Košice, 2011, , 6 [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: <http://www.sjf.tuke.sk/transfervinovacii/pages/archiv/transfervinovacii/21-2011/pdf/192-197.pdf>

- [31] CHVÁTALOVÁ, Lucie. *Elektronové mikroskopy* [online]. [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: [http://www.fch.vutbr.cz/~zmeskal/obring/presentace\\_2003/20\\_elektronove\\_mikroskopy.pdf](http://www.fch.vutbr.cz/~zmeskal/obring/presentace_2003/20_elektronove_mikroskopy.pdf)
- [32] *Sample-Electron Interaction for SEM* [online]. [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: <http://www.nanoscience.com/products/sem/technology-overview/sample-electron-interaction/>
- [33] *Vedení elektrického proudu v kapalinách a plynech* [online]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika\\_2/F2\\_01.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_2/F2_01.pdf)
- [34] HAVRÁNEK, Miroslav. *Zajímavé vlastnosti uhlíku: Týdeník věnovaný aktualitám a novinkám z fyziky a astronomie.* [online]. [cit. 2016-02-22]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008\\_08\\_mat.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_08_mat.php)
- [35] ŠOT, Jan. *NÍZKOUROVŇOVÁ MĚŘENÍ PRO ZJISTĚNÍ KONCENTRACE VZDUŠNÝCH IONTŮ.* Brno, 2012. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing- Zdeněk Roubal.
- [36] *Elektronový mikroskop* [online]. 2014 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: [http://www.wikiskripta.eu/index.php/Elektronový\\_mikroskop](http://www.wikiskripta.eu/index.php/Elektronový_mikroskop)
- [37] *Elektricky vodivé materiály* [online]. 2014, , 54 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: [http://user.unob.cz/leuchter/3\\_PŘ\\_BAK\\_VODIČE.pdf](http://user.unob.cz/leuchter/3_PŘ_BAK_VODIČE.pdf)
- [38] MUSIL, Vladislav. *Mikroelektronika a nanoelektronika* [online]. 2014, , 9 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2005/05/musil.pdf>
- [39] *PH-definice, vzorce* [online]. 2014 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://www.aristoteles.cz/chemie/ph/ph-vzorce-definice.php>
- [40] LEŠUNDÁK, Pavol. *Polyanilin a jeho využití v tkáňovém inženýrství.* Brno, 2014. Bakalářská práce. MASARYKOVA UNIVERZITA PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA ÚSTAV EXPERIMENTÁLNÍ BIOLOGIE. Vedoucí práce Mgr. Jiří Pacherník, Ph.D.

[41] BORON, Walter F, BOULPAEP, Emile L (ed.). *Medical physiology: a cellular and molecular approach*. 2nd ed., International ed. Philadelphia, PA: Saunders/Elsevier, c2009. ISBN 08-089-2360-9.

[42] HENTSCH, M, P MENOUD, L STEINER, E FLASCHEL a A RENKEN. *Optimization of the surfactant AOT concentration in a reverse micellar extraction process* [online]. Switzerland, 1992 [cit. 2016-03-22]. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02439326#page-1>

[43] TOMÁŠ, Martin. *Dielektrika: Elektrické vlastnosti lidských tkání* [online]. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2016-03-23]. Dostupné z: <http://dielektrika.kvalitne.cz/biol.html>

[44] Hrazdíra, I. a kol.: *Biofyzika*. 1. vyd. Praha: Avicenum, 1983. 364 s.

[45] HUŤKA, Jan. *Aplikace vodivých polymerů, scaffoldů pro nervové tkáňové inženýrství: Úvod do molekulárního designu* [online]. Technická univerzita v Liberci, 2014 [cit. 2016-03-23].

[46] *Dopanty* [online]. [cit. 2016-03-23]. Dostupné z: <http://www.siad.com/repceca/pagina.asp?m=4&id=242>