

PRŮTOK KAPALINY PLOŠNOU VLÁKENNOU VRSTVOU

Dembická Lenka

Sekce – TEXTIL,

Fakulta textilní, 2. ročník

Navazující magisterský studijní program – TEXTILNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Nanovláknenné materiály jsou ve tkáňovém inženýrství využívány jako podpůrné struktury umožňující růst buněk a regeneraci tkání. Klíčovou roli přitom hraje transport kapaliny zajišťující přísun živin a odvod metabolitů. Po implantaci jsou tyto materiály vystaveny mechanickému zatížení, které může jejich transportní vlastnosti ovlivnit. Cílem práce bylo navrhnout a experimentálně ověřit aparaturu pro měření průtoku kapaliny plošnou vláknennou vrstvou v rovině materiálu při definovaném zatížení. Pomocí navržené metody byly testovány nanovláknenné materiály připravené elektrickým zvlákňováním. Byla zjištěna nelineární závislost průtoku na hydrostatickém tlaku. Se zvyšujícím se zatížením vzorku docházelo k poklesu průtoku. Vyšší plošná hmotnost materiálu vedla k nižšímu průtoku. Navržená metoda umožňuje studovat tok kapaliny v rovině materiálu za podmínek bližších reálnému stavu po implantaci, a tím se odlišuje od metod prezentovaných v literatuře.

Klíčová slova: měření průtoku kapalin, nanovláknenné materiály, průtok kapaliny v rovině při zatížení, tkáňové inženýrství

Úvod

Porézní prostředí je tvořeno pevnou maticí a prázdným prostorem. Pro popis proudění tekutin v těchto strukturách se sleduje propustnost a hydraulická vodivost, které zohledňují hnací sílu procesu [1]. Hydraulická vodivost zastupuje rychlost proudění tekutin při daném hydraulickém gradientu a zahrnuje vlastnosti materiálu i proudící tekutiny. Propustnost je naopak materiálovou charakteristikou závislou na jeho struktuře [2].

Metody testování lze rozdělit na experimentální, analytické modely a numerické simulace. Studium průtoku plošnými vláknennými vrstvami je důležité v technických i medicínských aplikacích, například u textilních výztuží, geotextilií nebo scaffoldů podporujících růst buněk. Do této skupiny se řadí rovněž nanovláknenné materiály. Proliferace buněk je přitom ovlivněna schopností transportu živin strukturou scaffoldu [3]. Pro nanovláknenné scaffoldy dosud neexistuje jednotný standard testování.

Norma *ASTM F2952-22* specifikuje stanovení střední Darcyovské hydraulické vodivosti pro scaffoldy, ale i přesto vznikají nová experimentální řešení, která se snaží zohlednit charakter těchto materiálů. Společným znakem většiny metod je, že vzorek je umístěn do trubice a tekutina jím proudí v radiálním směru. Tento přístup však neodpovídá reálným podmínkám po implantaci.

V nativním prostředí je materiál saturován, v kontaktu s mezibuněčnou hmotou a současně vystaven mechanickému působení okolních tkání. Vzhledem ke stlačitelnosti nanovláknenných materiálů dochází ke změnám porozity, tloušťky i transportních vlastností [4], což běžné metody nezohledňují. V literatuře jsou pro nanovláknenné materiály popsány metody využívající čerpadla [5] s kapalinami i plyny [6]. Dále přístupy založené na vzlínivosti materiálu [7] nebo numerických simulacích [8].

V experimentální části je navržena aparatura pro měření průtoku kapaliny plošnou nanovláknennou vrstvou v rovině materiálu při definovaném mechanickém zatížení. Cílem bylo navrhnout aparaturu, experimentálně stanovit průtok kapaliny v rovině na vybraných nanovláknenných materiálech připravených elektrickým zvlákňováním a analyzovat vliv mechanického zatížení a plošné hmotnosti na transportní vlastnosti.

Experimentální část

1 Materiály a metody

Pro testování byly využity nanovláknenné materiály vyrobené prostřednictvím elektrického zvlákňování. Použité polymery představovaly polyamid 6 (PA6), polykaprolakton (PCL) a kyselinu polymléčnou (PLA). *Tabulka 1* zobrazuje popis z hlediska koncentrace roztoků a technologii výroby jednotlivých materiálů.

Tabulka 1: Testované nanovláknenné materiály

označení materiálu	roztok polymeru	rozpuštědlový systém	technologie výroby
PA6	12 hm.% PA6	kys. mravenčí/kys. octová (1/1)	bezjehlové elektrostatické zvlákňování
PCL	10 hm.% PCL	chloroform/ethanol/kys. octová (8/1/1)	bezjehlové elektrostatické zvlákňování
PLA_AC	10 hm.% PLA	kys. mravenčí/kys. octová/acetón (1/1/1)	střídavé elektrické zvlákňování
PLA_DC	10 hm.% PLA	kys. mravenčí/kys. octová/acetón (1/1/1)	bezjehlové elektrostatické zvlákňování

1.1 Plošná hmotnost

Plošná hmotnost byla stanovena zvážením čtverce materiálu o straně 10 cm. Měření bylo provedeno třikrát.

1.2 Stanovení tloušťky

V návaznosti na studie [9, 10] věnující se charakterizaci nanovláknenných materiálů byl použit digitální tloušťkoměr INSIZER (INSIZE Co., Ltd., Čína) s přesností 5 μm . Měření tloušťky materiálů bylo prováděno na náhodných místech.

1.3 Skenovací elektronová mikroskopie

Pro zobrazení mikroskopické struktury byl využit skenovací elektronový mikroskop TESCAN VEGA 3, SB Easy Probe (TESCAN GROUP, a.s., Česko). Příprava vzorků zahrnovala pozlacení v naprašovačce Quorum Q150R ES (Quorum Technologies Ltd., Velká Británie). Urychlovací napětí bylo 3 kV a 10 kV.

1.4 Průměry vláken

Pomocí softwaru Fiji (Image J) (National Institutes of Health, USA) byly na snímcích z elektronového mikroskopu stanoveny průměry vláken na základě 300 měření pro každý materiál.

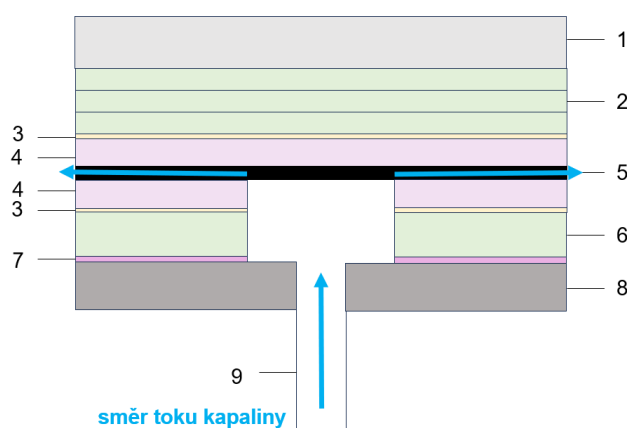
1.5 Metoda měření průtoku kapalin vláknennou vrstvou v rovině

Obrázek 1 zobrazuje měřicí aparaturu. Na laboratorní stojan (5) byl pomocí křížové svorky (7) připevněn varný kruh (1), do kterého byla umístěna destička pro přívod kapaliny (2). Na tuto destičku byl umístěn testovaný vzorek (3), který byl shora zatížen krycí destičkou (4) se zátěží (10). Pomocí křížové svorky (8) byla na držák (6) uchycena injekční stříkačka spojená s hadičkou (9), která ústila do destičky pro přívod kapaliny (2).



Obrázek 1: Schéma aparatury

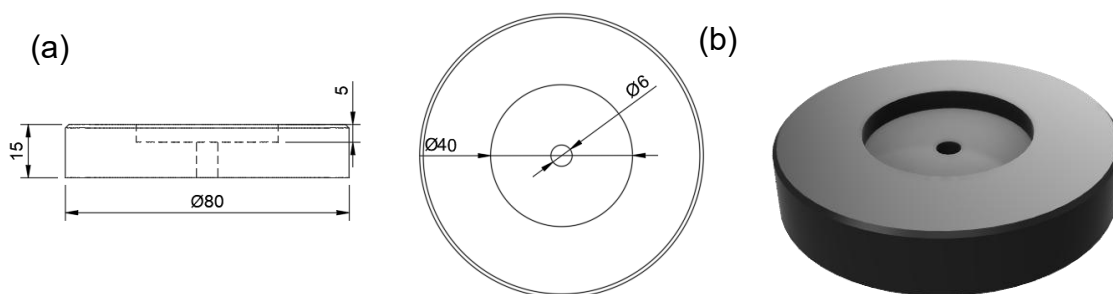
Obrázek 2 zobrazuje schéma řezem aparatury pro stanovení průtoku kapaliny v rovině vzorku s barevným odlišením dle komponent. 1 zastupuje zátěž, 2 krycí destičky z PMMA, 3 lepicí pásku, 4 silikonový plát, 5 testovaný materiál, 6 mezikruží z PMMA, 7 tmelící silikon, 8 destičku pro přívod kapaliny, 9 hadičku pro přívod kapaliny. Rovněž je naznačen směr toku kapaliny v systému.



Obrázek 2: Ilustrativní schéma řezu aparaturou

1.5.1. DESTIČKA PRO PŘÍVOD KAPALINY A KRYCÍ DESTIČKA

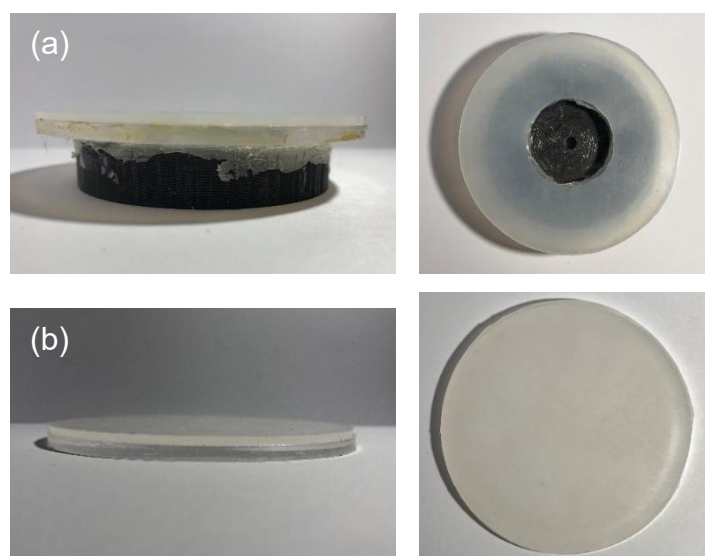
Pomocí softwaru Autodesk Fusion (Autodesk Inc., USA) byl vytvořen 3D model destičky přivádějící kapalinu, viz obrázek 3. Následně byla vytištěna metodou FDM 3D tisku z PETG.



Obrázek 3: Destička pro přívod kapaliny (rozměry v mm) (a), model destičky (b)

Jak ukazuje *obrázek 4a*, na tento díl byla následně pomocí acetátového tmelícího silikonu (Den Braven Czech and Slovak, a.s., Česko) nalepena kruhová destička z polymethylmethakrylátu (3DM Group Sp. z o.o., Polsko). Sklíčko z PMMA bylo připevněno pomocí oboustranné lepicí pásky o tloušťce 0,15 mm s akrylátovým lepidlem (3M Company, USA) k silikonové desce (ADITEG s.r.o., Česko) pro eliminaci nerovností povrchu o tloušťce 2 mm a tvrdosti 60 ± 5 Shore, která je schválena Úřadem pro kontrolu potravin a léčiv jako potravinářská pryž.

V kontaktu s nanovlákněným materiálem byla krycí destička. Tato kontaktní destička byla pokryta obdobně jako destička pro přívod vody (společně s PMMA destičkou) silikonovou deskou pomocí lepicí pásky pro eliminaci vlivu nerovností, viz *obrázek 4b*.



Obrázek 4: Destička z PMMA se silikonovou deskou přilepenou na destičce pro přívod kapaliny (a), plná krycí destička (b)

1.5.2. PRINCIP MĚŘENÍ

Měření bylo založeno na snímání klesající hladiny kapaliny kamerou. Pro záznam byla použita videokamera Panasonic (SDR-H40) s CCD snímačem s efektivním rozlišením 380 000 pixelů. Odečtení dosažení hladiny bylo prováděno manuálně ze záznamu. Tímto způsobem byl stanoven čas potřebný pro pokles v definovaném intervalu, ve kterém byl známý objem kapaliny. Následně byl stanoven ze známých parametrů objemový průtok v závislosti na hydrostatickém tlaku. K průtoku docházelo při definovaném zatížení vzorku.

1.5.3. METODIKA MĚŘENÍ

V první řadě byla destička pro přívod vody na varném kruhu vyrovnána do rovinné polohy vodováhou. Dále docházelo ke korekci upevnění svorky s držákem pro injekci do potřebné výšky od plochy, na kterou byl vzorek ukládán. Poté byla do soustavy nalita kapalina tak, aby byl naplněn žlábek v destičce pro přívod kapaliny a hladina kapaliny lícovala úroveň plochy pro položení vzorku.

Pro testování byl využíván kruhový vzorek o průměru 10 cm, který byl umístěn na testovací destičku bez předchozích úprav. Při vložení vzorku na destičku docházelo ke kontaktu s kapalinou. Vzorek byl následně překryt krycí destičkou, která na kontaktní straně rovněž jako plocha, na níž byl položen, byla opatřena silikonovým povrchem. Na tuto sestavu byly umístěny další dvě PMMA kruhové destičky o tloušťce 4 mm. Navrch byla položena zátěž.

Hadička byla poté sevřena a do injekční stříkačky bylo dávkováno příslušné množství kapaliny. Dále byly odstraněny vzduchové mezery z hadičky, které se přidáním kapaliny vytvořily. Při dosažení počáteční hranice pro sledování daného intervalu, v návaznosti na požadovanou výšku hladiny určující hydrostatický tlak byl spuštěn videozáznam, resp. započal odečet času. Kamera byla umístěna na stativu s vodováhu.

Snímaný obraz zachycoval daný interval poklesu kapaliny. Měření bylo ukončeno ve chvíli, kdy bylo dosaženo dolní hranice sledovaného intervalu. Za nulovou hodnotu byla považována úroveň vzorku na destičce pro přívod kapaliny.

2 Výsledky a diskuze

2.1 Kvantifikace testovaných nanovlákných vrstev

2.1.1 Plošná hmotnost

Plošná hmotnost byla měřena třikrát na sledovaných materiálech. *Tabulka 2* obsahuje výsledné průměrné hodnoty se směrodatnou odchylkou.

Tabulka 2: Plošná hmotnost materiálů

materiál	$\bar{x} \pm SD$ [g/m ²]
PA6	2,96 ± 0,14
PCL	16,08 ± 0,17
PLA_AC	13,99 ± 0,47
PLA_DC	19,99 ± 1,42

2.1.2 Tloušťka materiálů

Tabulka 3 zobrazuje výsledné statistické údaje pro tloušťku jednotlivých materiálů. Nejnižší tloušťky dosahoval materiál PA6 (23 ± 7 μm), který vykazoval nejvyšší variační koeficient (31 %). Nejvyšší tloušťku vykazoval vzorek PCL (168 ± 38 μm). Materiály PLA_AC a PLA_DC vykazovaly podstatně nižší variační koeficienty v porovnání s ostatními materiály.

Tabulka 3: Tloušťka materiálů

materiál	$\bar{x} \pm SD$ [μm]	v [%]	95% IS [μm]
PA6	23 ± 7	31	(19;40)
PCL	168 ± 38	23	(146;181)
PLA_AC	121 ± 18	15	(110;130)
PLA_DC	140 ± 14	10	(132;146)

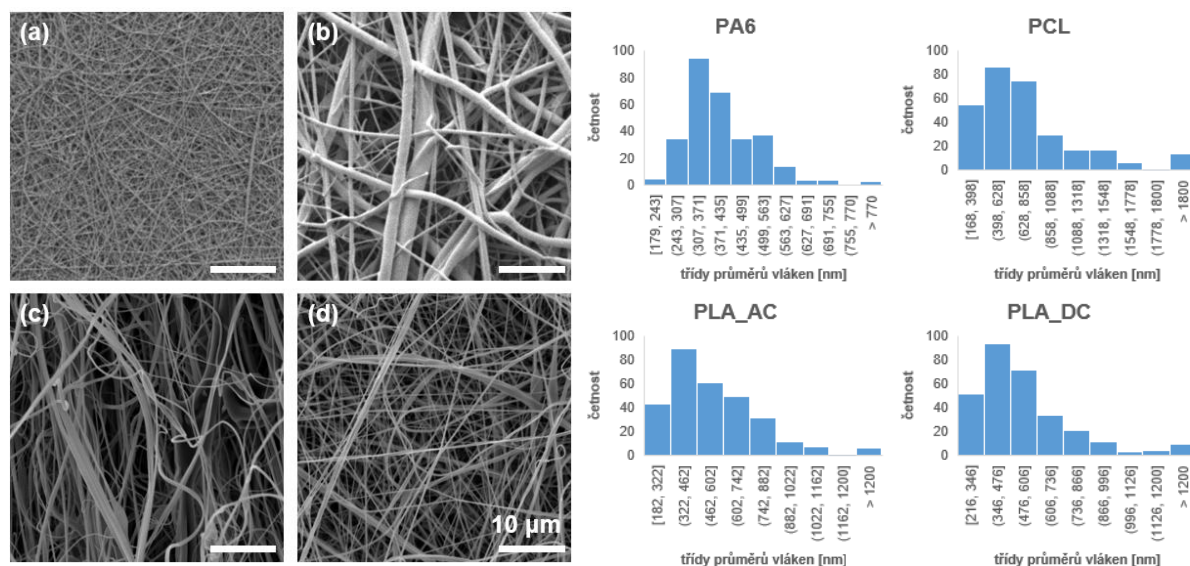
2.1.3 Skenovací elektronová mikroskopie a průměry vláken

Obrázek 5 zachycuje snímky z elektronové mikroskopie nanovlákných vrstev při zvětšení 5000x zobrazující jejich morfologii. Materiály PA6, PLA_DC a PCL byly vyrobeny prostřednictvím elektrostatického zvláknování. Pro výrobu PLA_AC bylo využito střídavé elektrické zvláknování. Všechny vzorky byly nanášeny na podkladovou spunbond polypropylenovou netkanou textilii.

Snímky ukazují odlišnou morfologii dle použité technologie s ohledem na nadýchanost vrstvy a zvlnění vláken ze střídavého elektrického zvláknování (materiál PLA_AC) oproti elektrostaticky zvlákněným vrstvám. Všechny vzorky neobsahovaly defektní struktury a byly makroskopicky i mikroskopicky homogenní.

Z pořízených SEM snímků o zvětšení 2000x a 5000x byly stanoveny průměry vláken na základě 300 hodnot od každého materiálu. *Obrázek 5* zobrazuje také histogramy s absolutní četností průměrů vláken materiálů.

U PA6 byla nejvyšší četnost vláken ve třídě (307;371) nm. Materiál PCL vykazoval nejširší distribuci, nejvyšší zastoupení bylo ve třídě (398;628) nm, avšak byla zde také hojně zastoupena vlákna s průměrem vyšším než 1000 nm. U PLA_AC byla nejvyšší četnost průměrů vláken zastoupena ve třídě (322;462) nm, u PLA_DC (346;476) nm.



Obrázek 5: SEM snímky materiálů PA6 (a), PCL (b), PLA_AC (c), PLA_DC (d) zvětšení 5000x; Histogramy průměrů vláken jednotlivých materiálů, n = 300

2.2 Metoda měření průtoku kapalin plošnou vláknennou vrstvou v rovině

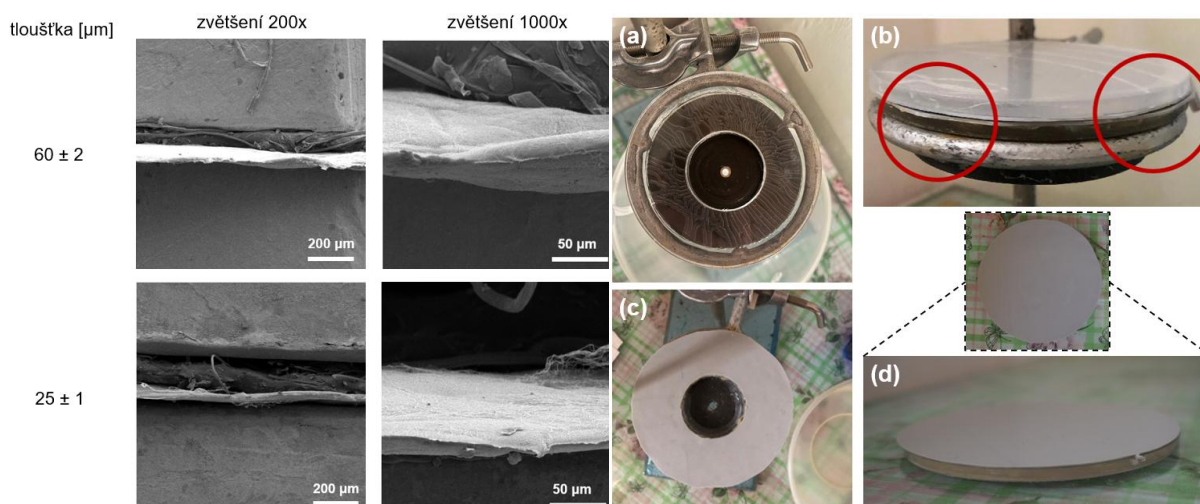
2.2.1 Zajištění reprodukovatelnosti výsledků

Při sestavování aparatury byl zaznamenán nežádoucí tok mezi krycí destičkou a destičkou pro přívod kapaliny. Tento jev byl přisuzován nerovnostem povrchů a nedokonalému kontaktu mezi přiléhajícími deskami.

Na základě analýzy příčných řezů materiálu PA6 (viz *obrázek 6*), který byl pro počáteční testování využíván, nebyl na vrstvě shledán důvod, který by byl příčinou tvorby nerovnosti a nedoléhání podložek při stlačení. Z tohoto důvodu byly destičky v kontaktních plochách se vzorkem opatřeny silikonovým plátem s cílem vyrovnání plochy.

Obrázek 6 zobrazuje původní destičku bez silikonového plátu (a), zde docházelo k nežádoucímu průtoku důsledkem nedoléhání ploch. Dále jsou zobrazeny destičky pokryté silikonovým plátem přilepené tmelícím silikonem (b, c, d). *Obrázek 6 b* obsahuje vyznačené nedoléhající části, které byly způsobeny vysokou viskozitou tmelícího silikonu prvně využitého pro lepení, která bránila tvorbě rovnoměrné vrstvy.

Rovněž byla testována alternativa adheziva v podobě Pattex Chemoprén Extrém (Henkel ČR spol. s.r.o.), který však nevykazoval dobrou adhezi mezi PMMA a silikonem. Konečná podoba představovala využití oboustranné lepicí pásky, která zajistila homogenní povrch a doléhání ploch destiček. Tím došlo k zamezení nežádoucího průtoku po vrstvě mezi deskami. V případě, kdy nebyl do aparatury vložen testovaný materiál, nebyl průtok kapaliny zaznamenán po sledovanou dobu 3 hodin.



Obrázek 6: SEM snímky příčného řezu materiálu PA6; Zobrazení kontaktních ploch destiček zapříčiňujících tok v důsledku nerovnosti povrchu

2.2.2 Vliv zatížení na průtok

Byl sledován vliv zatížení vzorku na objemový průtok v závislosti na hydrostatickém tlaku. Tabulka 4 zobrazuje tlaky působící na vzorek ve spojitosti s použitou zátěží. Testování probíhalo na charakterizovaných materiálech PA6, PCL, PLA_AC a PLA_DC.

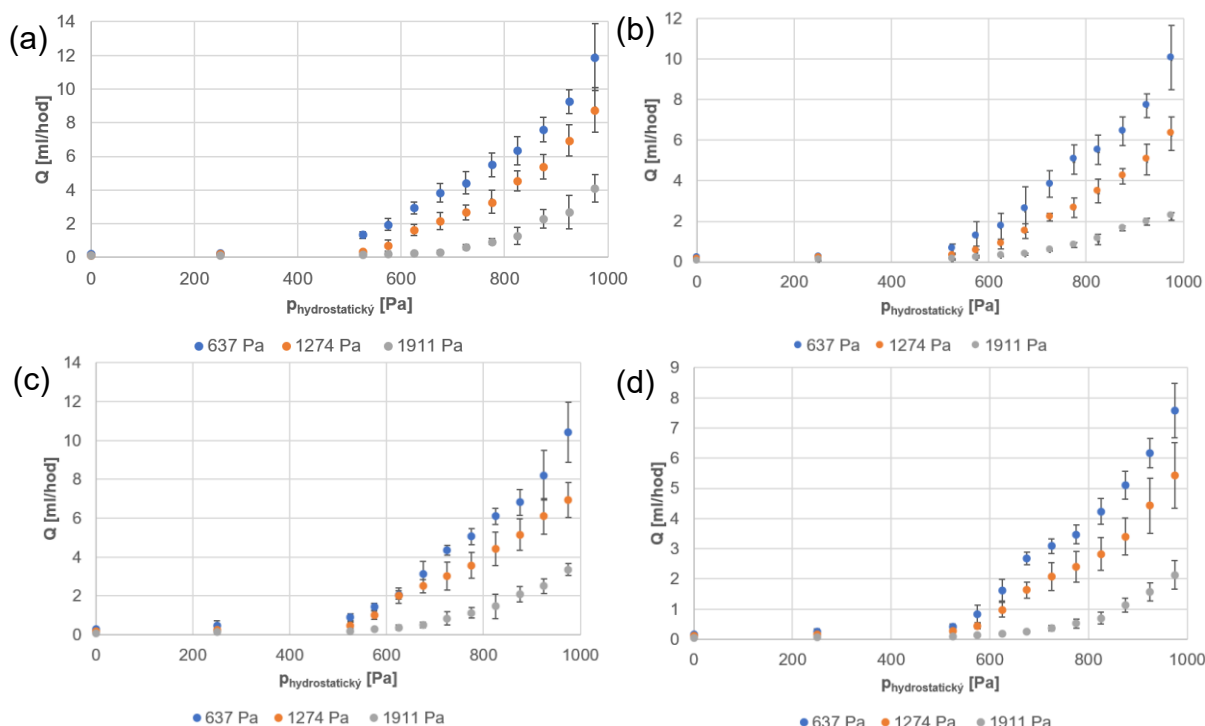
Tabulka 4: Zobrazení působícího tlaku na vzorek při daném zatížení

zatížení [kg]	síla [N]	plocha vzorku [m ²]	tlak zátěže [Pa]
0,5	5	0,00785	637
1	10	0,00785	1274
1,5	15	0,00785	1911

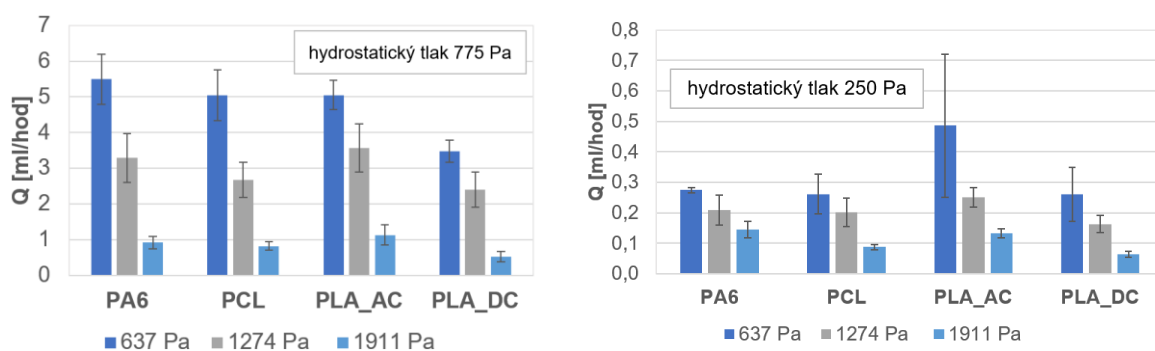
Obrázek 7 zobrazuje graf závislosti průtoku na hydrostatickém tlaku pro testované materiály při jednotlivých tlacích (637 Pa, 1274 Pa, 1911 Pa) působících na vzorek během měření. Pro každé bylo provedeno pět opakování, v grafu je zobrazena průměrná hodnota se směrodatnou odchylkou.

Je patrné, že s klesajícím hydrostatickým tlakem docházelo k poklesu průtoku kapaliny materiálem. Rovněž je zřejmé, že vyšší tlak vyvolaný zátěží vede k nižšímu průtoku, což bylo pozorováno u všech materiálů. Avšak je patrná nelinearita závislosti průtoku na hydrostatickém tlaku. To lze spojit s principem měření. Měření probíhalo s klesající hladinou, docházelo tak ke snižování hydrostatického tlaku umožňující proudění kapaliny. Na vzorek zároveň působil konstantní tlak. Zatížení způsobovalo stlačení materiálu. Na materiálu se mohla formovat stabilní vrstva kapaliny, která by toto chování mohla zapříčiňovat.

Obrázek 8 zobrazuje výši průtoku při hydrostatickém tlaku 775 Pa a 250 Pa při jednotlivých tlacích vyvolaných zátěží vzorku při měření. Je zřejmé, že vyšší zátěž vede k nižšímu průtoku u všech materiálů. Při hydrostatickém tlaku 250 Pa je patrné, že u PA6 se průtok při tlaku ze zátěže 1274 Pa a 1911 Pa směrem ke směrodatným odchylkám neliší. Stejnou situaci lze sledovat u PCL, kde není patrný rozdíl mezi průtokem při 637 Pa a 1274 Pa směrem ke statistickému zpracování, rovněž je tento trend u PLA_AC a PLA_DC. Tato tendence se projevila s klesajícím hydrostatickým tlakem.



Obrázek 7: Graf závislosti průtoku na hydrostatickém tlaku pro PA6 (a), PCL (b), PLA_AC (c), PLA_DC (d) při daných tlacích zátěže, $n = 5$



Obrázek 8: Graf zobrazení průtoku při hydrostatickém tlaku 775 Pa a 250 Pa u testovaných materiálů při daných tlacích zátěže, $n = 5$

2.2.2.1 Vliv plošné hmotnosti na průtok

Dále byl sledován vliv plošné hmotnosti na objemový průtok. Testování probíhalo při konstantním tlaku 1274 Pa vyvolaném zatížením vzorku.

Obrázek 9a zobrazuje závislost objemového průtoku na hydrostatickém tlaku při konstantním tlaku na vzorek 1274 Pa pro jednotlivé materiály PA6, PCL, PLA_AC a PLA_DC. V legendě je uveden aritmetický průměr plošné hmotnosti testovaného materiálu. Před označením vrstvy je uveden počet vrstev testovaného materiálu, na jehož základě byla určena plošná hmotnost v souvislosti s průměrnou plošnou hmotností materiálu pro dosažení série vzorků.

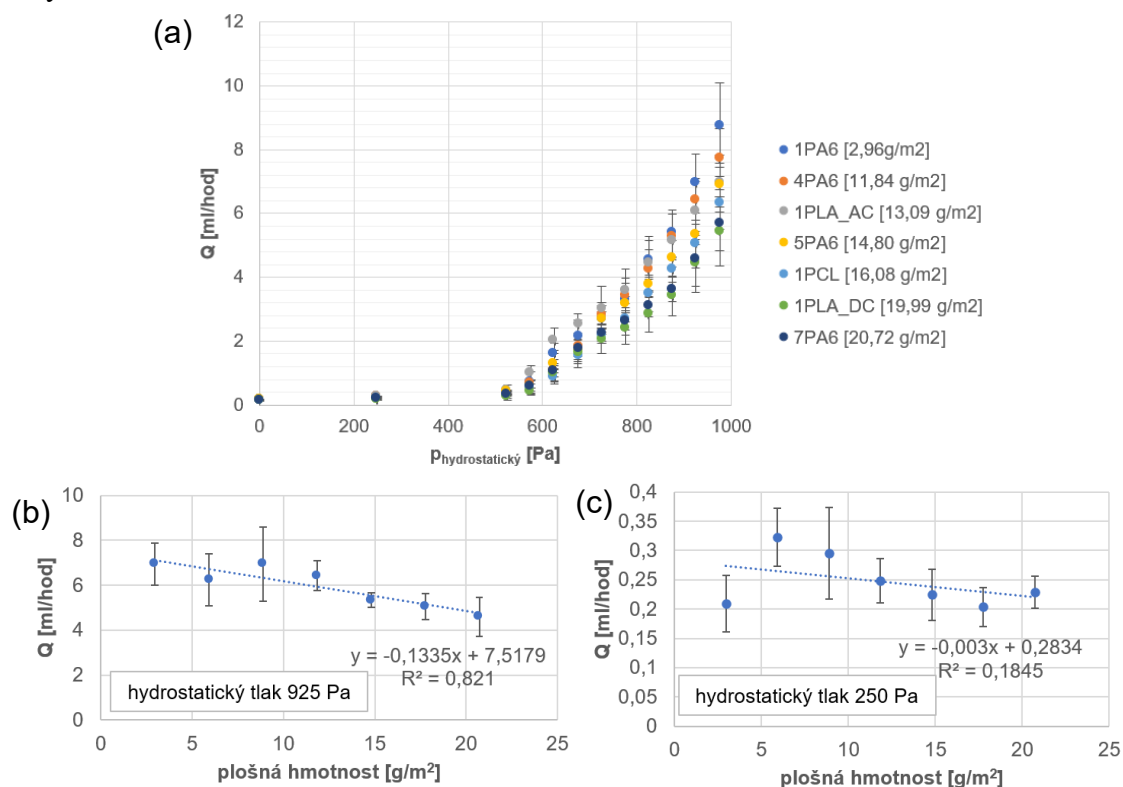
Dále obrázek 9b, c zobrazuje grafy vyjadřující závislost průtoku na plošné hmotnosti při jednotlivých hydrostatických tlacích pro materiál PA6. Testování probíhalo na více vrstvách materiálu, přičemž plošná hmotnost byla určena jako násobek průměrné plošné hmotnosti jedné vrstvy.

Obrázek 9b zobrazuje graf závislosti průtoku na plošné hmotnosti pro PA6 při hydrostatickém tlaku 925 Pa a tlaku zátěže 1274 Pa. Optimálním proložením naměřených bodů

přímkou byl koeficient determinance roven 82,10 %, což značí silnou lineární závislost vynesných veličin.

Obrázek 9c zobrazuje závislosti objemového průtoku na plošné hmotnosti při nižším hydrostatickém tlaku 250 Pa. V tomto případě byl koeficient determinance 18,45 %. Je zřejmé, že rozdíly mezi hodnotami průtoku jsou vzhledem ke směrodatným odchylkám minimální.

Z uvedených výsledků vyplývá, že závislost mezi objemovým průtokem a plošnou hmotností závisí na hydrostatickém tlaku. S klesajícím hydrostatickým tlakem dochází ke snížení lineární závislosti i rozdílů mezi hodnotami průtoku vzhledem ke směrodatným odchylkám.



Obrázek 9: Graf závislosti průtoku na hydrostatickém tlaku pro materiály odlišných plošných hmotností při tlaku vyvolaného zátěží na vzorek 1274 Pa (a), graf závislosti objemového průtoku na plošné hmotnosti při hydrostatickém tlaku 925 Pa a 250 Pa pro materiál PA6 při tlaku zátěže 1274 Pa, $n = 5$

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout, sestavit a optimalizovat aparaturu pro měření průtoku kapaliny plošnou vláknennou vrstvou v rovině při definovaném zatížení vzorku. Metoda byla navržena s ohledem na využití nanovláknenných materiálů ve tkáňovém inženýrství. Otestovány byly čtyři nanovláknenné materiály vyrobené pomocí elektrického zvlákňování. Průtok byl stanoven při třech hodnotách tlaku (637 Pa, 1274 Pa a 1911 Pa) působících na vzorek, které byly zvoleny pro ověření navržené metodiky.

Z naměřených dat vyplývá, že závislost průtoku na hydrostatickém tlaku nemá lineární charakter. Jev může souviset s tvorbou stabilní vrstvy kapaliny na povrchu materiálu. V průběhu měření docházelo k postupnému poklesu hydrostatického tlaku důsledkem snižování hladiny kapaliny v trubici. Přítomnost stabilní vrstvy by mohla vést ke zvětšení průměru nanovláken a submikronových vláken, čímž by se zvýšilo zaplnění, snížila porozita i průtok. Tento princip stabilní vrstvy je popisován ve spojení s pevnými povrchy [11, 12], ale paralelu lze nalézt i v teorii barvení textilií, kde se hovoří o hraniční difuzní vrstvě, která tvoří

bariéru vůči průniku barviva, jejíž tloušťka je nepřímo úměrná rychlosti proudění barvicí lázně [13].

V průběhu byl sledován také vliv zatížení a plošné hmotnosti na průtok. Se zvyšujícím se tlakem působícím na vzorek docházelo ke snižování průtoku. S poklesem hydrostatického tlaku byly rozdíly ve středních hodnotách průtoku v určitých případech vzhledem ke směrodatným odchylkám zanedbatelné.

Vliv plošné hmotnosti byl podrobně sledován u materiálu PA6 při tlaku 1274 Pa vyvolaného zátěží. Se zvyšující se plošnou hmotností klesal průtok, avšak tato závislost závisí také na hydrostatickém tlaku. S klesajícím hydrostatickým tlakem docházelo ke snižování lineární závislosti a rozdílů mezi hodnotami průtoku s ohledem na směrodatné odchylky.

Metoda pro stanovení propustnosti nanovlákných materiálů v práci [14] využívala tlakoměry. Průtok zde byl stanovován gravimetricky, materiál byl volně uložen v testovací komoře. V porovnání s ní navržená metoda v této práci se soustředí na průtok v rovině vzorku při zatížení, bez potřeby specializovaného zařízení. Výhodou je možnost simulace zatížení odpovídajícího reálným podmínkám po implantaci materiálu, což je pro medicínské aplikace vhodné.

Vzhledem k proměnným veličinám v podobě hydrostatického tlaku a průtoku je dosažení hodnoty propustnosti komplikované. Metoda však umožňuje jednoduché porovnání průtoku při definovaných podmínkách mezi jednotlivými materiály. Přínosem je simulace zatížení, která lépe odpovídá podmínkám po implantaci ve srovnání s používanými metodami zaměřenými na stanovení propustnosti a hydraulické vodivosti.

Dále by bylo možné propojit naměřená data o materiálech, a tak získat informace o struktuře materiálu v průběhu testování. Vytvoření modelu, který by umožnil predikovat chování materiálu při zvolených podmínkách (zatížení, hydrostatickém tlaku), by vedlo k eliminaci řady experimentálních měření a možnosti odhadnout strukturní parametry materiálu při daných podmínkách (zatížení, hydrostatickém tlaku).

Literatura

- [1] NI, Tianlong; Lingxue KONG; Zongli XIE; Jiuyang LIN a Shuaifei ZHAO. Flux vs. permeability: How to effectively evaluate mass transfer performance of membranes in oil-water separation. online. *Journal of Water Process Engineering*, roč. 49 (2022), s. 103119. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103119>.
- [2] SHACKELFORD, C.D. Geoenvironmental Engineering. online. In: SHACKELFORD, C.D. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, s. B9780124095489054245. Elsevier, 2013. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.05424-5>.
- [3] BOTCHWEY, Edward A.; Melissa A. DUPREE; Solomon R. POLLACK; Elliot M. LEVINE a Cato T. LAURENCIN. Tissue engineered bone: Measurement of nutrient transport in three-dimensional matrices. online. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, roč. 67A (2003), č. 1, s. 357–367. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/jbm.a.10111>.
- [4] CHOONG, Looh Tchuin; Matthew M. MANNARINO; Sandip BASU a Gregory C. RUTLEDGE. Compressibility of electrospun fiber mats. online. *Journal of Materials Science*, roč. 48 (2013), č. 22, s. 7827–7836. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7528-x>.
- [5] GROSSMANN, Swen; Stefan SIEWERT; Robert OTT; Klaus-Peter SCHMITZ; Stefanie KOHSE et al. Standardized technique of water permeability measurement for biomedical applications. online. *Current Directions in Biomedical Engineering*, roč. 4 (2018), č. 1, s. 633–636. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/cdbme-2018-0152>.
- [6] ZHUANG, Luwen; S Majid HASSANIZADEH a Chao-Zhong QIN. Experimental determination of in-plane permeability of nonwoven thin fibrous materials. online. *Textile Research Journal*, roč. 93 (2023), č. 19–20, s. 4656–4661. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/00405175231181089>.
- [7] CALLEGARI, Gerardo; Ilya TYOMKIN; Konstantin G. KORNEV; Alexander V. NEIMARK a You-Lo HSIEH. Absorption and transport properties of ultra-fine cellulose webs. online. *Journal of Colloid and Interface Science*, roč. 353 (2011), č. 1, s. 290–293. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.09.015>.
- [8] AZIMIAN, Mehdi; Matin NADERI; Parham SOLTANI; Liping CHENG; Keivan NADERI et al. Experimental and CFD analysis of fluid flow through nanofiber filter media. online. *Scientific Reports*, roč. 14 (2024), č. 1, s. 16128. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67066-x>.
- [9] ALTUNTUĞ CESUR, Merve İlkay; Bilgen OSMAN; Elif TÜMAY ÖZER; Dilayda KANMAZ; Mehmet BAYKARA et al. Preparation and characterization of latanoprost-loaded PVA nanofibers as an ocular drug delivery system for glaucoma treatment. online. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, roč. 73 (2024), č. 9, s. 761–770. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00914037.2023.2213387>.
- [10] KIMURA, Vanessa Tiemi; Maria Helena Ambrosio ZANIN a Shu Hui WANG. Influence of thickness on the properties of electrospun PCL/gelatin nanofiber scaffolds. online. *Polymer Bulletin*, roč. 81 (2024), č. 10, s. 9347–9361. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05159-3>.
- [11] HONG, Ying-Jhan; Lin-Ai TAI; Hung-Jen CHEN; Pin CHANG; Chung-Shi YANG et al. Stable water layers on solid surfaces. online. *Physical Chemistry Chemical Physics*, roč. 18 (2016), č. 8, s. 5905–5909. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/C5CP07866K>.
- [12] GÄDING, J.; V. DELLA BALDA; J. LAN; J. KONRAD; M. IANNUZZI et al. The role of the water contact layer on hydration and transport at solid/liquid interfaces. online. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, roč. 121 (2024), č. 38, s. e2407877121. Dostupné z: <https://doi.org/10.1073/pnas.2407877121>.
- [13] ETTERS, J.N. Kinetics of dye sorption: effect of dye bath flow on dyeing uniformity. roč. 84 (1995), č. 1.
- [14] KLÁPŠTOVÁ, Andrea. *Nanovlákný drenážní implantát pro léčbu glaukomového onemocnění*. Disertační práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2024.