



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

Bakalářská práce

Návrh speciálních hydraulických prvků

Design of special hydraulic elements

Terezie Škorpíková

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miloš Kašpárek

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Škorpíková** Jméno: **Terezie** Osobní číslo: **456157**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh speciálních hydraulických prvků

Název bakalářské práce anglicky:

Design of Special Hydraulic Elements

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte návrh několika geometrií Teslových ventilů dle dostupné literatury.
 2. Sestavte experimentální trať, na které bude možné měřit tlakové ztráty Teslových ventilů, a to v obou směrech zapojení Teslova ventilu.
 3. Proveďte měření tlakových ztrát.
- Rozsah práce: cca 30 stran včetně obrázků a příloh.

Seznam doporučené literatury:

NOSKIEVIČ, J. a kol.: Mechanika tekutin, SNTL, Praha, 1987
TRUONG, T-Q., NGUYEN, N-T.: Simulation and Optimization of Tesla Valves, Nanotech 2003, Vol.1, www.nsti.org, ISBN 0-9728422-0-9

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Miloš Kašpárek, ústav mechaniky tekutin a termodynamiky FS


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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **29.04.2019**


Ing. Miloš Kašpárek
podpis vedoucí(ho) práce

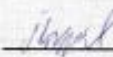

prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis odborníka(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studentky

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracovala samostatně s využitím odborné literatury a ostatních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu, jenž je součástí této práce.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

Podpis autora

Poděkování:

Ráda bych poděkovala zejména vedoucímu této bakalářské práce, Ing. Miloši Kašpárkovi, za ochotu, trpělivost a předání mnohých informací a rad. Dále děkuji paní Doc.Ing. Ludmile Novákové, Ph.D. a všem ostatním, kteří svými zkušenostmi s podobnými experimenty přispěli k řešení všech neočekávaných situací.

Anotační list

Jméno autora: Terezie Škorpíková

Název práce: Návrh speciálních hydraulických prvků

Title: Design of special hydraulic elements

Rok: 2018

Studijní program: Teoretický základ strojího inženýrství

Ústav: Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

Vedoucí práce: Ing. Miloš Kašpárek

Klíčová slova: Teslovy ventily, zpětný ventil, diodicita, tlakové ztráty, řízení toku, propustný směr, závěrný směr

Keywords: Tesla valve, check valve, diodicity, pressure drops, flow control, forward direction, reverse direction

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá tlakovými ztrátami při proudění ve speciálních hydraulických prvcích, Teslových ventilech. Teoretická část zahrnuje stručný úvod do problematiky hydraulických odporů a popis funkce Teslových ventilů. Praktická část se pak věnuje návrhu optimální geometrie Teslových ventilů, jejich výrobě a následně experimentálnímu ověření účinnosti v několika režimech proudění.

Abstract:

This bachelor thesis deals with pressure losses during flow in special hydraulic elements, Tesla valves. The theoretical part includes a brief introduction to the problems of hydraulic resistors and a description of the Tesla valve function. The practical part is devoted to the design of optimal geometry of Tesla valves, their production and subsequently experimental verification of efficiency in several flow modes.

Obsah

ÚVOD.....	8
1 Hydraulické ztráty	9
1.1 Třecí ztráty	9
1.2 Místní ztráty.....	10
1.2.1 Vstup do potrubí	10
1.2.2 Změna směru proudu (koleno, ohyb)	10
1.2.3 Ztráty náhlou změnou průřezu.....	11
1.2.4 Odpory v armaturách	12
1.2.5 Ztráty v rozvětvení a spojování potrubí	12
2 Teslový ventil	12
2.1 Optimalizace geometrie	13
2.1.1 Výpočet rozměrů Teslových ventilů	14
3 Výroba Teslových ventilů	16
3.1 Výroba kopyta.....	16
3.2 Výroba pevných modelů.....	17
3.3 Výroba pružných modelů	17
3.4 Vymývání kopyta	18
4 Měřicí trať.....	19
5 Kalibrace tlakových čidel	21
6 Kalibrace čerpadla	22
7 Průběh měření.....	23
8 Výsledky měření	24
8.1 Pružný Teslův ventil TV200.....	24
8.2 Pevný Teslův ventil TV200	26
8.3 Pružný Teslův ventil TV300.....	28
8.4 Pevný Teslův ventil TV300	29
8.5 Pružný Teslův ventil TV400.....	31
8.6 Pevný Teslův ventil TV400	32
8.7 Porovnání účinností pružných a pevných Teslových ventilů.....	34
8.7.1 TV200.....	34
8.7.2 TV300.....	34
8.7.3 TV400.....	35

8.7.4	Vizualizace	36
8.7.5	Shrnutí	39
9	Závěr	40
10	Seznam použitých symbolů a zkratek	41
11	Seznam obrázků a grafů	42
12	Seznam tabulek	43
13	Zdroje	44

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá prouděním tekutiny ve speciálním hydraulickém prvku, Teslově ventilu (TV). Motivací ke vzniku této práce byla snaha odstranit nežádoucí jev při hemodialýze, kterým jsou pulsy, vzniklé v důsledku využití peristaltického čerpadla, jakožto nevhodnějšího čerpadla pro čerpání krve. Během těchto pulsů dochází k navrácení části krve do těla pacienta jehlou, jejímž účelem je krev odebírat. Řešení tohoto problému, který vede ke snížení účinnosti, prodloužení trvání dialýzy a zvýšenému namáhání výstelky cév pacienta, je velice obtížné vzhledem k nutnosti zachování sterilního prostředí a vlastnostem krve, zejména kvůli její srážlivosti.

Cílem této bakalářské práce je dle dostupné literatury navrhnout takovou geometrii Teslových ventilů, která by co nejlépe blokovala zpětný chod tekutiny do těla pacienta, a ověřit jejich účinnost v určitých režimech měření, jenž simulují situaci proudění při mimotělním oběhu během hemodialýzy. Postup řešení zahrnuje návrh experimentální trati pro měření tlakových ztrát. Dále pak návrh geometrie ventilů, jejich výrobu a následně měření tlakových ztrát, ze kterých lze určit míru účinnosti. Každá z navržených geometrií je vyrobena v pevné a pružné modifikaci a v závěru je zhodnocen vliv pružnosti materiálu na účinnost ventilů. Jako pracovní kapalina je využit 40% roztok glycerinu a destilované vody, který je připraven dle návodu [12] tak, aby měl stejnou dynamickou viskozitu jako krev.

1 Hydraulické ztráty

Při proudění reálných tekutin vznikají v důsledku tření hydraulické odpory, které lze chápat jako síly působící proti pohybu částic tekutiny. Příčinou tohoto tření je viskozita tekutiny. Práce třecích sil způsobuje disipaci energie, která se nevratně přemění v jinou formu energie, nejčastěji tepelnou. Vzhledem k tomu, že tato změna je nevratná, lze mluvit o ztrátách. Vyjadřovat tyto ztráty pomocí změny teploty proudící tekutiny by bylo velmi obtížné, vzhledem k tomu, že oteplení je obvykle nepatrné. Proto se ustálilo vyjádření ztrát jako úbytek tlakové, polohové či kinetické energie. Obecně lze tedy ztráty vyjádřit vztahem (1.1), kde ζ je součinitel odporu.

$$e_z = \frac{p_z}{\rho} = g \cdot h_z = \zeta \cdot \frac{v^2}{2} \quad (1.1)$$

Dle způsobu vzniku lze ztráty dělit do dvou základních skupin a to na ztráty třecí a místní [6].

1.1 Třecí ztráty

Třecí ztráty jsou závislé na vlastnostech tekutiny (hustotě, dynamické viskozitě), ale také na vlastnostech potrubí (průřez, drsnost, délka). Tyto vlastnosti se s časem obvykle mění v důsledku mnohých faktorů, jako je koroze, která mění drsnost apod. Pro výpočet třecích ztrát se používá Weisbachův vztah (1.2), kde λ je součinitel třecích ztrát (1), d_h je hydraulický průměr potrubí (m), v je střední rychlost (m/s) a l je délka potrubí (m) [5].

$$e_z = \lambda \cdot \frac{l \cdot v^2}{2 \cdot d_h} \quad (1.2)$$

Hydraulický průměr je charakteristický rozměr, pro který platí vztah (1.3). V tomto vztahu představuje A průřez proudu tekutiny a o je takzvaný smočený obvod, tedy část průřezu potrubí, která je ve styku s proudící tekutinou [5].

$$d_h = \frac{4 \cdot A}{o} \quad (1.3)$$

Součinitel třecích ztrát λ je funkcí střední rychlosti, viskozity, průměru, délky, drsnosti potrubí, času a mnoha dalších parametrů. Správné určení je pro výpočet velmi důležité a ke zjednodušení se využívá teorie podobnosti, pomocí níž lze počet nezávisle proměnných snížit. Pro oblast laminárního proudění se uvádí vztah (1.4) a pro oblast turbulentního proudění pak vztah (1.5). Hranice mezi laminárním a turbulentním prouděním není pevně dána a v různých pramenech se liší [5].

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad \text{pro } Re = 2000 \text{ až } 3000 \quad (1.4)$$

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad \text{pro } Re > 5000 \quad (1.5)$$

Třecí ztráty jsou zpravidla oproti lokálním ztrátám zanedbatelné. Velkou roli však hrají v dlouhých potrubích [7].

1.2 Místní ztráty

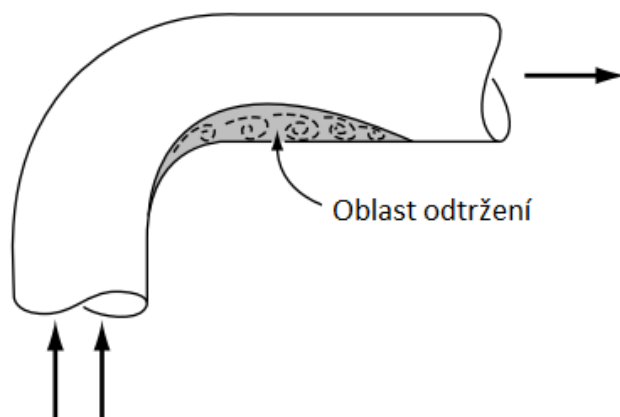
Ve většině potrubních sítí jsou kromě rovných úseků i různá kolena, změny průřezu, měřicí zařízení či uzavírací prvky apod. Každá taková část potrubí vyvolá změnu vektoru rychlosti proudění, což je doprovázeno vznikem víru, případně odtržením proudu spojené s rozptylem energie. Velikost místní ztráty je dána opět vztahem (1.1), kde ztrátový součinitel závisí na geometrii místní ztráty a při nižších hodnotách Reynoldsova čísla i na velikosti Re . Mezi místní ztráty patří následující [4][5]:

1.2.1 Vstup do potrubí

Při vstupu do potrubí se ztrátový součinitel pohybuje od hodnoty 0,03, pro dokonale zaoblený vstup, až do hodnot větších než 1, které jsou typické pro Bordův nátrubek, tedy nátrubek zasunutý do nádoby [5].

1.2.2 Změna směru proudu (koleno, ohyb)

Částice se v ohybu pohybují po šroubovici, v příčném řezu se vytváří dva víry opačného směru a za ohybem pak dochází k odtržení proudu. U ostrohranných ohybů dochází k odtržení proudu na vnější i vnitřní straně, zatímco u zaobleného ohybu se proud odtrhne pouze na vnitřní straně, jak je vidět na obrázku 1. V uvolněné oblasti, vzniklé odtržením, vznikají víry. Ztrátový součinitel je závislý na velikosti změny směru proudu a na relativním poloměru zakřivení R/d . Obvykle je součinitel určován experimentálně [4][5].



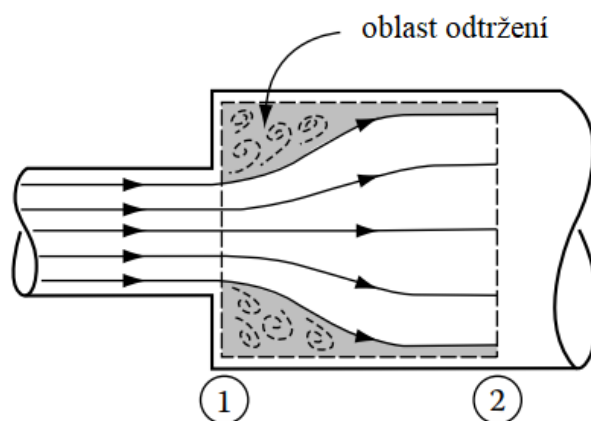
Obrázek 1: Oblast odtržení proudu v koleni - převzato z [8]

1.2.3 Ztráty náhlou změnou průřezu

Ztráty náhlou změnou průřezu vznikají v důsledku změny rychlosti proudění v daném místě. Tato změna velikosti rychlosti je spojena s rozptylem energie [4].

1.2.3.1 Náhlé rozšíření

Ztráta náhlým rozšířením je známá pod názvem Bordova ztráta. Teoreticky by v místě rozšíření měla ihned poklesnout střední rychlost a vzrůst tlak, jak popisuje rovnice kontinuity. Ve skutečnosti však v místě rozšíření dojde k utržení proudu a vzniku vírů a pokles rychlosti, stejně jako vzrůst tlaku, bude méně patrný, než ukazuje teorie. Održený proud tekutiny bude v čase postupně opět sledovat stěny potrubí, jak je vidět na obrázku 2 [5].



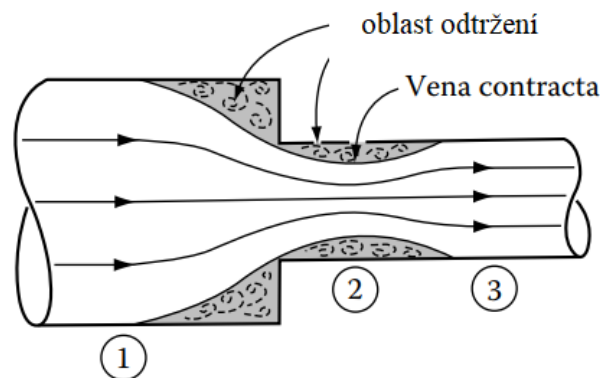
Obrázek 2: Náhlé rozšíření průřezu - převzato z [8]

Velikost součinitele odporu Bordovy ztráty je dána vztahem (1.6). Tento vztah je vztažen k průtokové rychlosti v_1 [4].

$$\zeta_1 = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (1.6)$$

1.2.3.2 Náhlé zúžení

V důsledku náhlého zúžení průřezu dochází ke zrychlení proudící tekutiny. Setrvačné síly v tomto místě převažují nad silami vazkými, což vede k odtržení proudu a vzniku vířivých oblastí, které můžeme vidět na obrázku 3 [5].



Obrázek 3: Náhlé zúžení průřezu - převzato z [8]

Velikost tlakové ztráty v místě náhlého zúžení je dána vztahem (1.7).

$$\zeta_1 = \left(\frac{A_1}{A_2} - 1 \right) \cdot \frac{A_1}{A_2} \quad (1.7)$$

1.2.4 Odpory v armaturách

Pojem armatury zahrnuje prvky potrubních sítí, jako jsou ventily, šoupátka, kohouty a klapky. Obecně tyto prvky slouží k uzavření či k regulaci průtoku a tlaku v potrubí. Hydraulický odpor, který musí proudění překonat, je způsoben převážně vířením. Ztrátový součinitel se obvykle vztahuje k rychlosti na jmenovitém průměru a je určován experimentálně nebo jej udává výrobce [4][6].

1.2.5 Ztráty v rozvětvení a spojování potrubí

Příčinou těchto ztrát jsou odtržené oblasti proudu, vznikající při změně směru a průřezu proudů. K těmto ztrátám se přidávají ztráty způsobené vírovými strukturami, které vznikají při styku dvou proudů s různou rychlostí [6].

2 Teslovy ventily

Teslův ventil je zpětný ventil bez mechanicky pohyblivých částí, který pasivně řídí tok kapaliny. Používá se v potrubních systémech převážně mikroskopických rozměrů. Ve větším měřítku jej jako první použil a zkoumal roku 1920 Nikola Tesla, po němž byl pojmenován. Svým vynálezem v podobě TV řazených do série, chtěl vyřešit problém při přeměně mechanické energie na energii proudění tekutiny. Tento problém spočívá ve vzniku pulsů. V TV viděl řešení jak problematiky pulsů, tak řady dalších potíží, které vznikají při proudění korozivní či horké tekutiny potrubím. Další velkou výhodou byla cenová dostupnost výroby [2][3].

TV má díky své specifické geometrii tlakovou ztrátu závislou na směru proudění. Podle velikosti tlakové ztráty pak lze směr proudění s menší tlakovou ztrátou nazvat směrem dopředným a naopak, směr závěrný bude charakterizován větší tlakovou ztrátou. TV tedy můžeme přirovnat k diodám, u nichž je rozlišován směr propustný a nepropustný.

Vzhledem k této analogii byl hlavní parametr, jenž určuje účinnost TV, nazván diodicita [1][2].

Diodicita vyjadřuje poměr mezi tlakovou ztrátou ve směru dopředném a závěrném. Je dána vztahem (2.1), kde Δp_r vyjadřuje tlakovou ztrátu v závěrném (reverse) směru, Δp_f ve směru dopředném (forward) a \dot{V} vyjadřuje celý objemový průtok ventilem [1][2].

$$di = \frac{\Delta p_r}{\Delta p_f} \bigg|_{\dot{V}} \quad (2.1)$$

Ze vztahu (2.1) vyplývá, že čím větší bude hodnota diodicity, tím účinněji bude TV blokovat proud v závěrném směru. Při zkoumání tlakového spádu jedním TV můžeme očekávat hodnotu diodicity v rozmezí od 1,1-1,8. Vyšších hodnot lze dosáhnout řazením ventilů do série [1][2].

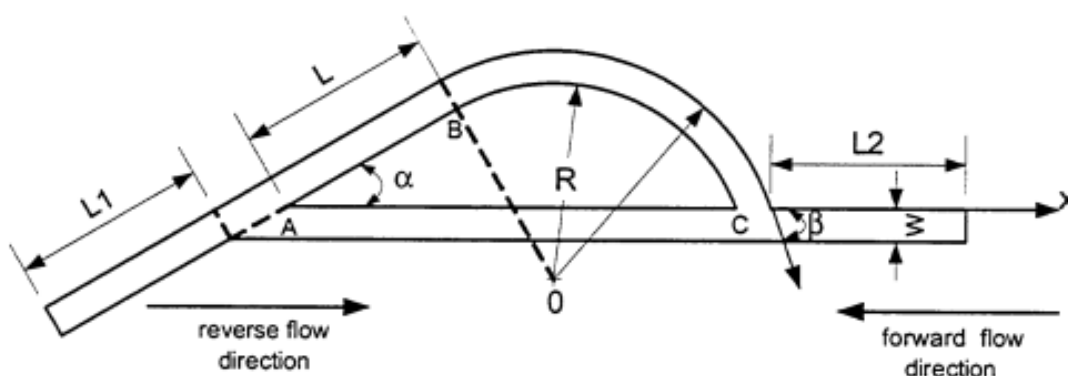
Diodicitu ovlivňuje řada parametrů, zejména pak geometrie, objemový průtok a s tím související Reynoldsovo podobnostní číslo dáno vztahem (2.2), kde ρ je hustota, V je průměrná rychlost, d_h je hydraulický průměr a μ vyjadřuje dynamickou viskozitu [1].

$$Re = \rho \cdot \frac{V \cdot d_h}{\mu} \quad (2.2)$$

Bylo zjištěno, že pro malé hodnoty Reynoldsova čísla ($Re < 500$) je diodicita přímo úměrná objemovému průtoku [2]. V experimentální části této práce se Reynoldsova čísla budou pohybovat v okolí hodnoty 500.

2.1 Optimalizace geometrie

Výpočetní vztahy, které byly pro experiment použity, vychází z numerické studie, Simulation and Optimization of Tesla Valves, T-Q. Truonga a N-T. Nguyena [1]. Tato studie se zabývá optimalizací Teslových ventilů mikroskopických rozměrů. Optimalizaci ventilů pro tento experiment byla provedena podle této literatury právě proto, že se jedná o jediný dostupný zdroj, který se touto tematikou zabývá.



Obrázek 4: Geometrie Teslova ventilu - převzato z [1]

Účinnost Teslova ventilu posuzujeme pomocí diodicity, jejíž fyzikální význam byl již vysvětlen. Diodicitu lze ovlivnit vhodnou volbou geometrie, která je dána následujícími parametry: průměr kanálku W , vstupní a výstupní rozběhová délka L_1 a L_2 , úhel α , délka přímé části ventilu L a poloměr vnitřní křivky R [1].

Diodicita je nepřímo úměrná poloměru R . Proto je vhodné volit co nejmenší možný poloměr, který je dán vztahem:

$$R_{min} = L \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2.3)$$

Vztah mezi diodicitou a poloměrem lze vysvětlit na základě velikosti úhlu β . Zmenšíme-li poloměr R , dojde ke zvětšení úhlu β , který reguluje množství tekutiny proudící dopředným směrem do zakřivené části. V tomto směru tedy dochází k menším tlakovým ztrátám než ve směru závěrném. V závěrném směru pak pomáhá větší úhel β blokování proudu v přímé části [1].

Velikost úhlu α a délku L určují vztahy:

$$\alpha_{opt} = -0,033 \cdot Re + 69,4 \quad (2.4)$$

$$\left(\frac{L}{W}\right)_{opt} = 0,007 \cdot Re + 0,58 \quad (2.5)$$

Velikost délky L_1 a L_2 je třeba volit takovou, aby bylo proudění na vstupu a výstupu plně vyvinuté. Plně vyvinutým prouděním se myslí takové proudění, které má parabolický rychlostní profil odpovídající laminárnímu proudění.

Při vstupu do trubky má tekutina rychlostní profil odpovídající dokonalé tekutině. Teprve stykem kapaliny se stěnou se částice začnou zbrzdňovat a vytvářet tečná napětí od viskozity mezi jednotlivými vrstvami proudu. V určité vzdálenosti od vstupu do trubice pak můžeme mluvit o plně vyvinutém proudění a vzdálenost, na které se vyvíjí rychlostní profil, se nazývá rozběhová dráha. Pro rozběhovou dráhu je v literatuře uváděno více výrazů, mezi něž patří například Schillerův vztah (2.6) [4].

$$\frac{x_r}{d} \geq 0,025 \cdot Re \quad (2.6)$$

2.1.1 Výpočet rozměrů Teslových ventilů

Výše uvedené vztahy poskytují širokou škálu různých geometrií ventilů. Tato práce bude omezena na geometrie, které by reálně mohly být zakomponovány do hemodialyzační trati. Krev bude v experimentu nahrazena 40% roztokem glycerinu a vody, geometrii však volíme

takovou, aby byla optimální pro proudění krve. Výpočet tedy bude vycházet z hodnot pro krev o teplotě 37°C¹.

V tabulce 2.1 jsou uvedeny vstupní parametry pro návrh geometrií ventilů.

Tabulka 2.1 – Vstupní parametry

Název veličiny	Hodnota	Jednotka
Objemový průtok \dot{V}	200,300,400	[ml/min]
Hustota krve ρ při 37°C	1050	[kg/m ³]
Dynamická viskozita μ při 37°C	3,5·10 ⁻³	[Pa.s]
Průměr kanálku d	4	[mm]

2.1.1.1 Příklad výpočtu:

$$\dot{V} = 200 \frac{\text{ml}}{\text{min}} = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,004^2}{4} = 1,257 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{3,33 \cdot 10^{-6}}{1,26 \cdot 10^{-5}} = 0,265 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_h}{\mu} = \frac{1050 \cdot 0,265 \cdot 0,004}{0,0035} = 318,3$$

$$\alpha_{opt} = -0,033 \cdot Re + 69,4 = -0,033 \cdot 318,3 + 69,4 = 58,89^\circ$$

$$\left(\frac{L}{d}\right)_{opt} = 0,007 \cdot Re + 0,58$$

$$\rightarrow L = (0,007 \cdot Re + 0,58) \cdot d = (0,007 \cdot 318,3 + 0,58) \cdot 0,004 = 0,011 \text{ m}$$

$$R_{min} = L \cdot \tan \frac{\alpha}{2} = 0,011 \cdot \tan \frac{58,89^\circ}{2} = 0,064 \text{ mm}$$

$$\frac{x_r}{d} \geq 0,025 \cdot Re \rightarrow x_r \geq 0,025 \cdot Re \cdot d = 0,025 \cdot 318,3 \cdot 0,004 = 0,032 \text{ m}$$

Velikost rozběhové délky je x_r , která odpovídá rozměrům L_1 a L_2 , je pouze orientační, protože plně vyvinuté proudění je třeba zajistit i pro ostatní režimy, ve kterých budou ventily testovány. Proto byla zvolena rozběhová délka L_1 a L_2 na 10 cm.

¹ Vstupní veličiny, které jsou uvedeny v tabulce 2.1, jsou čerpány z literatury, kterou lze v seznamu literatury nalézt pod číslem [9], [10] a [11].

V následující tabulce, tabulce 2.2, jsou shrnuty navržené geometrie.

Tabulka 2.2 – Optimální geometrie ventilů pro dané objemové průtoky

Q[ml/min]	Re	α [°]	L [m]	R min [m]
200	318,3	58,89	0,011	0,0064
300	477,5	53,6	0,016	0,0079
400	636,6	48,4	0,02	0,0091

3 Výroba Teslových ventilů

Každá ze tří navržených geometrií TV byla vyrobena ve dvou modifikacích a to jako ventil pružný a pevný. Výroba sestává z několika kroků, které se v některých fázích liší u pružné a pevné modifikace.

3.1 Výroba kopyta

Pro obě modifikace bylo potřeba vyrobit rozpustné kopyto, které představuje geometrii TV. Při modelování kopyta byl použit 3D modelovací program Solid Edge ST10. Tento model byl vytisknut ze škrubu na 3D tiskárně ORIGINAL PRUSA i3 MK2. Kopyto pak bylo třeba důkladně vyhladit, aby nebyly znatelné jednotlivé vrstvy tisku. Tyto nerovnosti by mohly výrazně ovlivňovat proudění, a to zejména v takto malých rozměrech ventilů.

Prvním krokem při vyhlazování bylo broušení jemným brusným papírem. Poté bylo kopyto natřeno škrubem rozpuštěným ve vodě a ponecháno volně na vzduchu, dokud nebylo zcela suché. Tato metoda se ukázala jako nejefektivnější. Původní pokusy, jako natírání modelů vodou, ředěným lepidlem Herkules či klovatinou, nesplňovaly požadavky na jakost povrchu nebo docházelo k reakci s materiálem modelu za vzniku matného, neprůhledného povrchu uvnitř ventilu.

Takto zhotovené kopyto, které vidíme na obrázku 5, bylo dále použito pro výrobu pevných i pružných modifikací TV.



Obrázek 5: Škrobové kopyto TV

3.2 Výroba pevných modelů

Pevné ventily byly vyrobeny z epoxidové pryskyřice, aby byly průhledné a bylo možné kontrolovat dokonalé zavodnění celé trati v průběhu experimentu.

Pro lití pryskyřice byly vytvořeny formy z lukoprenu. Lukopren je silikonový materiál, který nachází řadu uplatnění zejména ve stavebnictví. Pro tuto aplikaci je vhodný zejména díky tomu, že vytváří hladký povrch a nijak chemicky nereaguje s pryskyřicí, což umožňuje pryskyřicový odlitek z formy vyjmout. Tato hmota byla dle pokynů výrobce naředěna přiloženým katalyzátorem a nalita do předem připravené formy, která byla vytištěna na 3D tiskárně. V ručně litém lukoprenu by bylo mnoho vzduchových bublin, proto byly naplněné formy vakuovány. Po uschnutí byly lukoprenové krabičky vyjmuty z formy. Do takto připravené formy byl umístěn ventil. Takto upevněný ventil byl následně zalit do pryskyřice. Pryskyřice bylo opět nutné několikrát vakuovat.

3.3 Výroba pružných modelů

Na výrobu pružných modelů nebylo třeba vytvářet krabičku. Výroba však byla dosti problematická a časově velmi náročná.

Vyhlazené kopyto bylo namáčeno do plastidipu. Ukázalo se, že i samotné namáčení není v případě tak specifické geometrie, jako jsou Teslovy ventily, jednoduchá záležitost. Největší nepříjemností bylo nerovnoměrné schnutí materiálu, které způsobovalo hromadění materiálu na spodní části TV. Aby se včas tomuto jevu předešlo a byla zajištěna rovnoměrná tloušťka stěny, bylo nutné ventil tahat co nejpomaleji a kontinuálně. Toho bylo dosaženo pomocí krokového motoru. V průběhu bylo třeba dohlížet a ručně odstraňovat nedostatky, jako bubliny a silnější vrstva materiálu v očku ventilu. Takto zhotovené modely

poté volně schly zhruba 1 hodinu. První vrstva plastidipu, jež se na první pohled jevila jako dostačující, se v průběhu schnutí smrštila a bylo nutné všechny ventily namočit podruhé. Hotový pružný Teslův ventil můžeme vidět na obrázku 6.



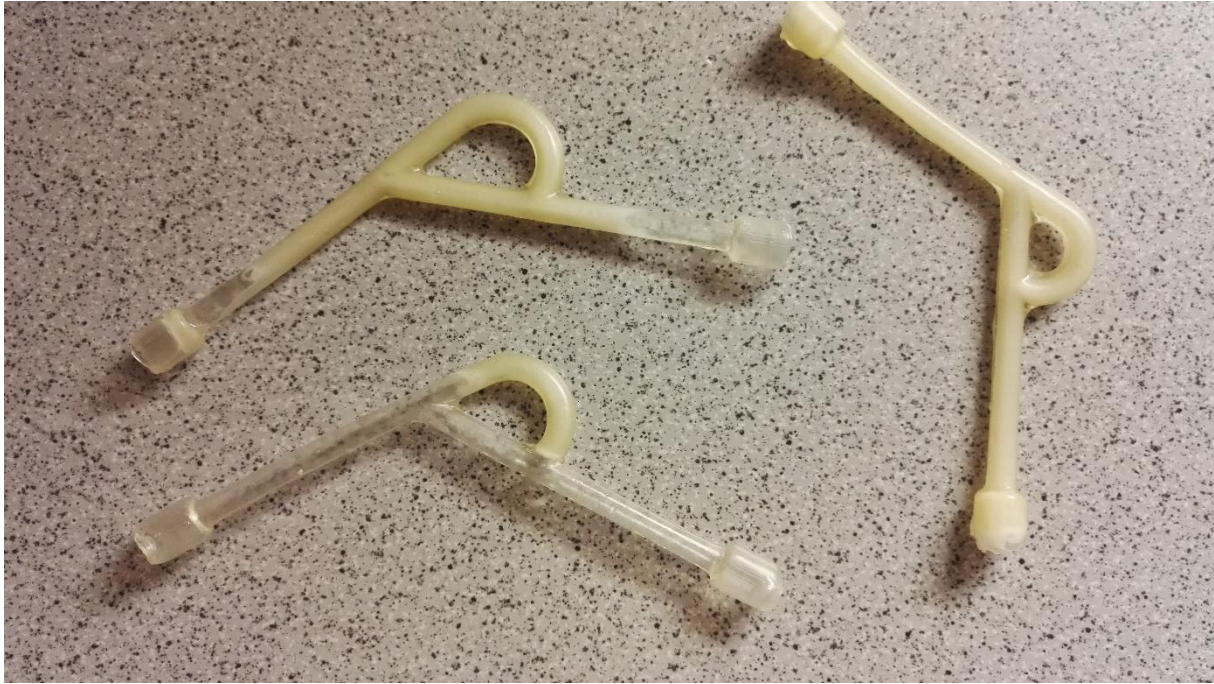
Obrázek 6: Pružný TV

3.4 Vymývání kopyta

Nejobtížnější část výroby pružných i pevných modelů spočívala ve vymývání kopyta. Modely byly vymývány proudem vody, která byla dovnitř vháněna pomocí čerpadla tenkou jehlou. Tento proces trval několik hodin a bylo nutné do procesu zasahovat i mechanicky. Nejšetrnější metoda spočívala v kombinaci následujících kroků. Zaprvé je třeba nechat škrob co nejvíce nabobtnat teplou vodou. Takto změkklou část pak lze odstranit jemným štětcem a dočistit proudem vody.

Problém nastal v zahnuté části modelu, která není přístupná žádnému mechanickému zásahu. Zde jsme museli spoléhat na proud vody, který škrob vymývá rychlostí zhruba 1 cm za hodinu.

Na obrázku 7 lze na třech různých geometriích TV vidět, jak vymývání kopyta probíhalo u pružných modelů.



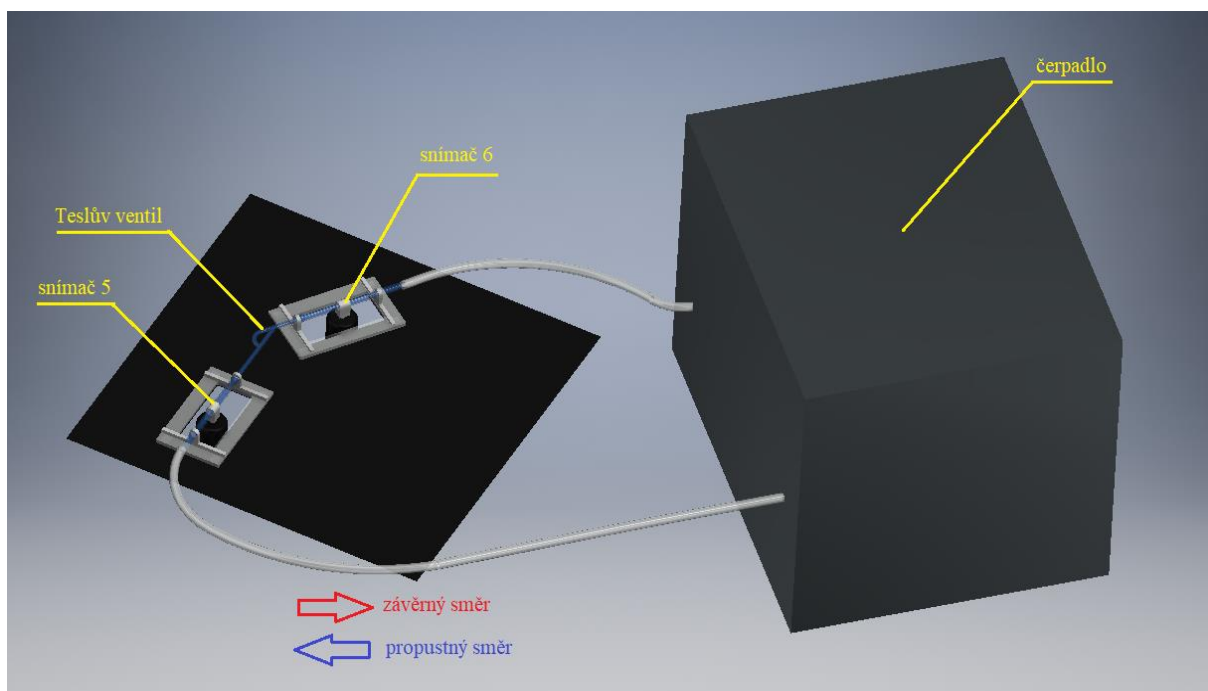
Obrázek 7: Vymývání pružných TV

Zkušenosť tedy ukázala, že nejrychlejším způsobem by bylo, opatřit bužírku či jinou tenkou hadičku po obvodu štětinkami. Dutinkou by bylo možné vhnět teplou vodu o teplotě okolo 40-50°C a současně mechanicky čistit i místa, která nejsou přístupná neohebným nástrojům.

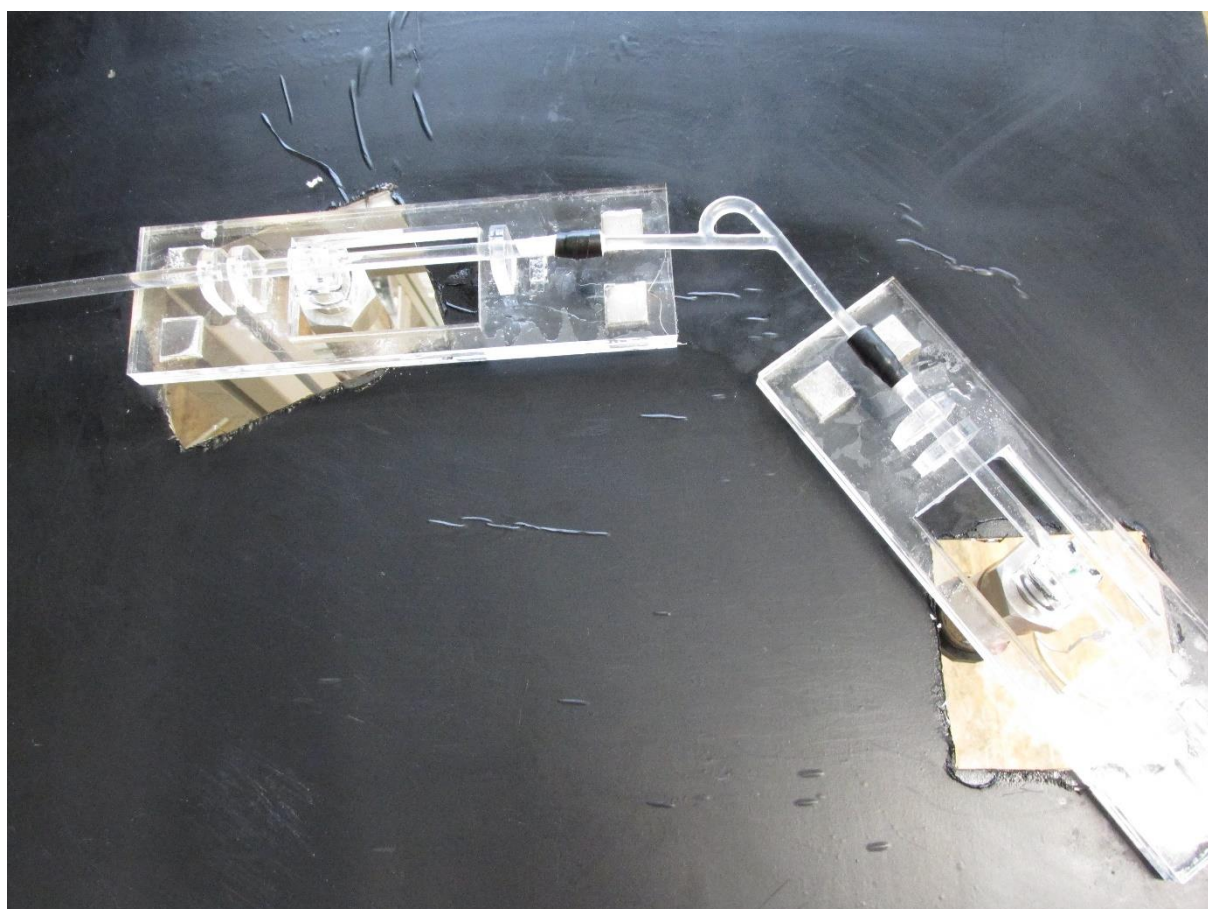
4 Měřicí trať

Měřicí trať pro měření tlakových ztrát sestává ze dvou tlakových čidel, umístěných před vstupem a za výstupem Teslova ventilu, ze samotného ventilu, rotametry a kontinuálního čerpadla. Vzhledem k tomu, že TV mají různou geometrii, bylo třeba trať navrhnout tak, aby s ní bylo možné libovolně manipulovat. K tomu posloužila magnetická deska, na kterou lze celou trať upevnit pomocí stojánků, opatřených magnetem. Tato deska byla opatřena otvory, díky kterým bylo možné umístit tlaková čidla svisle pod měřeným úsekem.

Schéma měřicí trati můžeme vidět na obrázku 8 a na obrázku 9 je měřicí trať vyfocena přímo v laboratoři.



Obrázek 8: Schéma měřicí trati



Obrázek 9: Fotografie měřicí trati

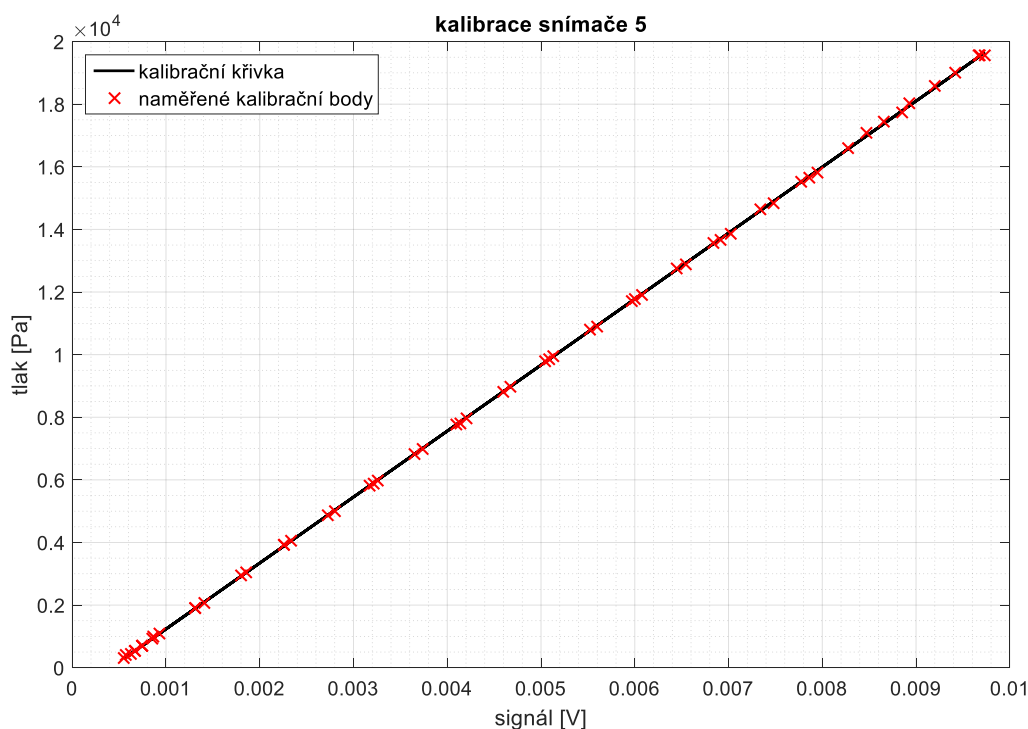
5 Kalibrace tlakových čidel

Před samotným měřením bylo nutné kalibrovat tlaková čidla. Pro měření byla využita 2 barová tlaková čidla, označená jako snímač 5 a 6. Výstupní signál čidel byl zpracován pomocí skriptu vytvořeném v programu Matlab. Pomocí tohoto skriptu bylo možné přiřadit signál čidel ke známé hodnotě tlaku, která byla získána odečtením hladiny destilované vody v odměrném válci, na jehož dně byl snímač umístěn.

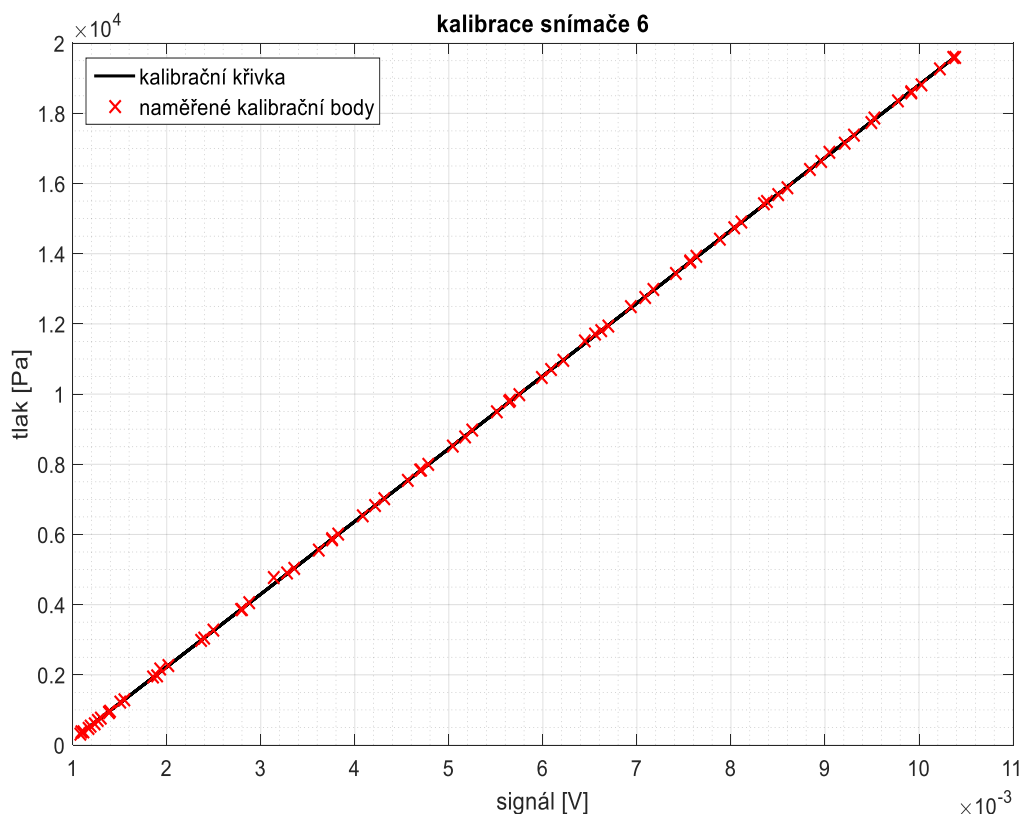
Do válce byla postupně přilévána voda a odečítána výška hladiny. Z těchto hodnot, při známé hodnotě hustoty vody za daných podmínek, lze určit tlak na dno válce a to ze vztahu (5.1), kde h je výška hladiny, ρ hustota vody a g je gravitační zrychlení.

$$p = h \cdot \rho \cdot g \quad (5.1)$$

K takto odečteným hodnotám tlaku pak bylo možné přiřadit i příslušný výstupní signály snímačů. Závislost výstupního signálu tlakových čidel na hydrostatickém tlaku ve válci znázorňují grafy na obrázcích 10 a 11. Jejich závislost je lineární a proto bylo možné proložit tyto hodnoty lineární regresní přímkou. Během samotného měření tlakových ztrát TV pak program zaznamenal signál snímačů a pomocí těchto rovnic k nim přiřadil správnou hodnotu tlaku v daném místě měření.



Obrázek 10: Kalibrace snímače 5



Obrázek 11: Kalibrace snímače 6

Ke kalibraci tlakových čidel byla využita destilovaná voda, jakožto neekonomičtější a nejjednodušší varianta, přestože k samotnému měření byl využit roztok glycerinu a destilované vody. Na kalibraci snímačů nemá tento fakt žádný vliv, a to protože tlaková čidla dávají pro daný tlak vždy stejný výstupní signál.

6 Kalibrace čerpadla

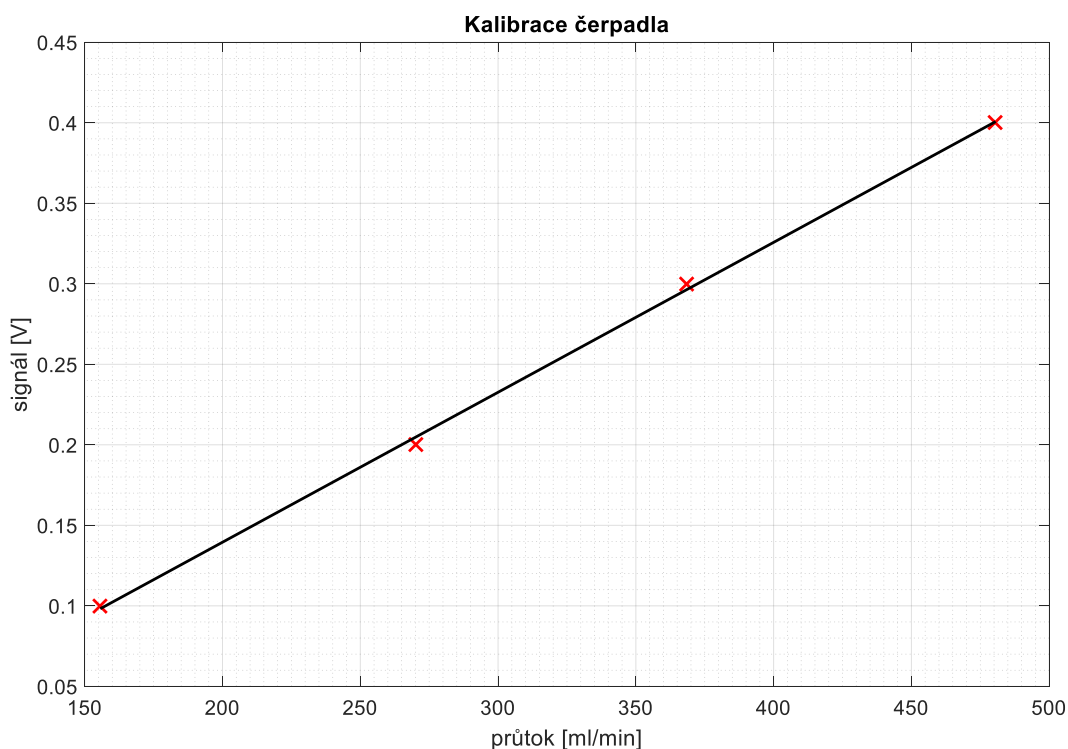
Ke kalibraci průtoku čerpadla byl využit odměrný válec a stopky. Na čerpadle byla nastavena hodnota napětí, kterému bylo třeba přiřadit odpovídající průtok. Průtok lze určit jednoduchým způsobem jako objem tekutiny, který za jednotku času proteče čerpadlem.

Čerpadlo čerpalo roztok vody a glycerinu takové koncentrace, jaká odpovídá koncentraci při samotném měření, do odměrného válce po dobu jedné minuty, následně byl odečten objem tekutiny a ze vztahu (6.1) určen objemový průtok. Takto byly naměřeny čtyři objemové průtoky, které odpovídaly čtyřem různým hodnotám napětí. Tyto čtyři hodnoty byly graficky zpracovány a proloženy lineární funkcí, jejíž rovnice popisuje závislost mezi napětím

a průtokem čerpadla. Grafické znázornění kalibrace je vidět na obrázku 12.

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad (6.1)$$

Je důležité zmínit, že kalibrace proběhla ve výšce odpovídající umístění měřicí trati, aby nedošlo ke zvýšení či snížení průtoku v důsledku hydrostatického tlaku. Tato kalibrace, přestože se zdá být poměrně jednoduchá a možná i zastaralá, se ukázala tou nejpraktičtější vzhledem k dostupným měřicím přístrojům. Pomocí této metody bylo odstraněno několik problémů souvisejících zejména s viskozitou roztoku, která znemožňovala využití jiných průtokoměrů cejchovaných na průtok vody.



Obrázek 12: Kalibrace průtoku čerpadla

7 Průběh měření

Měření tlakových ztrát Teslových ventilů bylo realizováno na měřicí trati, která byla popsána v kapitole 4. V průběhu bylo nutné zajistit co největší možnou vzdálenost jednotlivých částí trati, aby nedocházelo k rušení signálů tlakových čidel elektrickými zařízeními. Samotná čidla pak byla napájena ze dvou 12 voltových baterií.

Tlaková čidla byla umístěna před vstupem a za výstupem TV. Výstup čidel byl zpracován pomocí skriptu v programu Matlab. Tento skript vyhodnocoval signál snímače 5 a 6, jako tlak p5 a p6, a jejich rozdíl, tedy tlakovou ztrátu. Právě velikost tlakové ztráty byla pro tento experiment nejpodstatnější. Každý z ventilů byl podroben měření v pěti průtokových režimech v dopředném a v závěrném směru. Tyto režimy odpovídaly průtokům $150 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, $200 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, $300 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, $400 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ a $500 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$. Volba těchto průtoků byla závislá na průtocích, pro které byly jednotlivé geometrie navrženy. Jedná se o průtoky $200 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, $300 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ a $400 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$. Každý režim byl změřen třikrát, za prvé kvůli přesnosti, za druhé kvůli kontrole během samotného měření. Z každého měření byly zaznamenány hodnoty tlakové ztráty, které byly následně graficky zpracovány.

8 Výsledky měření

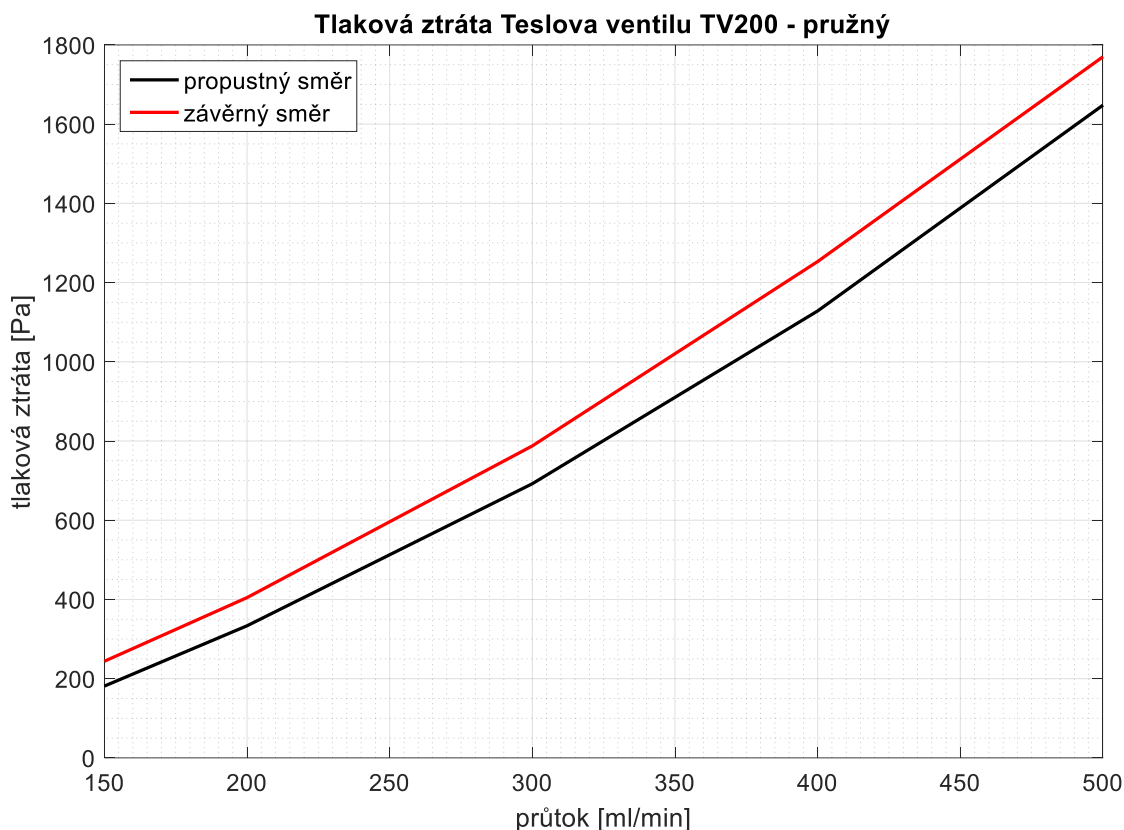
Výsledky měření již na první pohled vykazovaly podobné chování, jak bylo předpokládáno při jejich návrhu. Tlakové ztráty se zvyšovaly s rostoucím průtokem a byly vyšší v závěrném směru. Každý z ventilů tedy byl schopen blokovat proud v závěrném směru. Vyhodnocení však přineslo i závěry, které nebylo jednoduché předem odhadnout. Pro úplnost zde budou uvedeny výsledky všech měření, což znamená, že pro každý z ventilů zde bude graficky vynesena závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku a závislost diodicity, též na objemovém průtoku.

Názorně pak děj probíhající v Teslových ventilech zachycuje vizualizace uvedená na konci této kapitoly.

Pro lepší přehled byly Teslovy ventily označeny zkratkou výsledků TVx, kde x představuje průtok, pro který byl ventil navržen. TV200 tedy znamená, že Teslův ventil byl navržen pro průtok $200 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$, TV300 pro průtok $300 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ atd. Dle článku [1], ze kterého byly geometrie navrhovány, by účinnost ventilu měla být nejvyšší právě pro tento průtok.

8.1 Pružný Teslův ventil TV200

Na obrázku 13 je vidět závislost tlakové ztráty na průtoku pružného Teslova ventilu navrženého pro průtok $200 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$, a to ve směru propustném (černá křivka) a závěrném (červená křivka). Můžeme zde vidět, že tlaková ztráta se zvyšujícím se průtokem roste a že je větší v závěrném směru, což potvrzuje předpoklady. V propustném směru se tlaková ztráta pohybuje v rozmezí od 189 Pa do 1651 Pa, zatímco ve směru závěrném se jedná o rozmezí 210-1760 Pa.



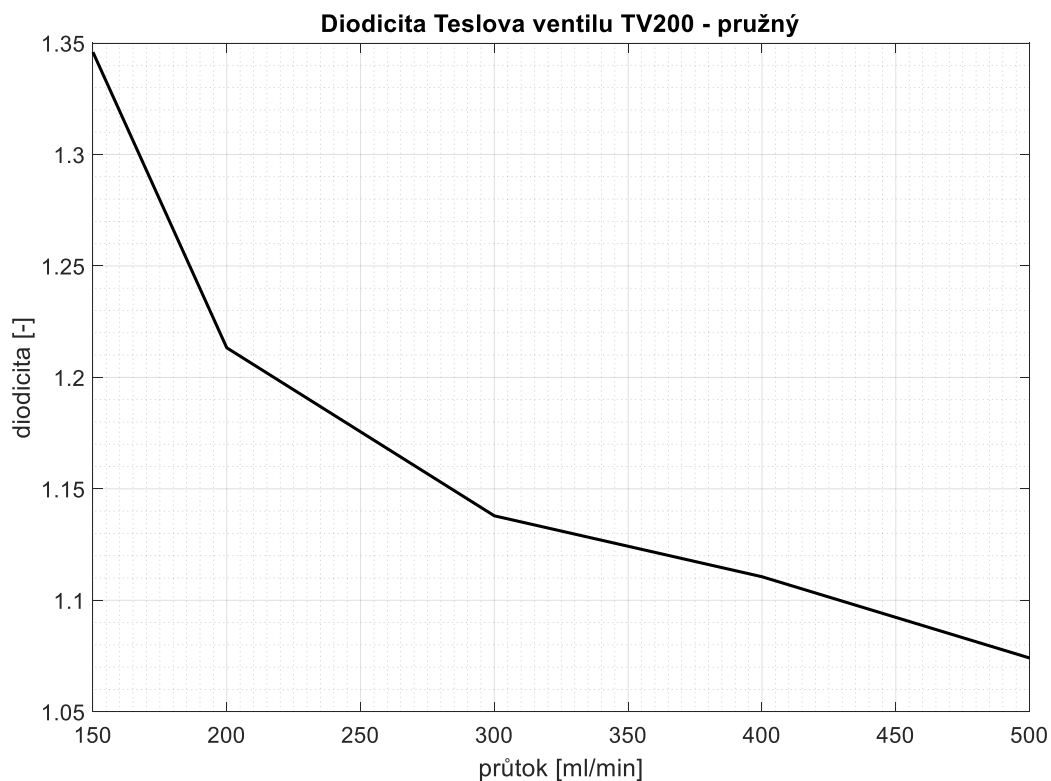
Obrázek 13: Tlakové ztráty pružného TV200

Tento ventil je tedy zřejmě schopen upřednostňovat proud v propustném směru. Z návrhu lze očekávat, že tento směr proudění bude nejvíce upřednostňován při průtoku $200 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$.

O míře účinnosti pro jednotlivé režimy se lze přesvědčit pomocí diodicity. Závislost diodicity na průtoku můžeme vidět na obrázku 14.

Z průběhu diodicity v závislosti na průtoku je patrné, že tento ventil se z hlediska průběhu diodicity nechová podle očekávání. Vykazuje vyšší diodicitu pro průtok $150 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ než pro průtok $200 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$. Pro vyšší průtoky pak diodicita klesá.

Z tohoto měření tedy vyplývá, že pružný TV200 je nejúčinnější pro průtok $150 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, kde vykazuje diodicitu 1,345. Tato hodnota odpovídá předpokladu, že se diodicita navržených ventilů bude pohybovat v rozmezí od 1,1-1,8. Tomuto předpokladu odpovídá ventil i při průtocích do $431 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$. Měření při vyšších průtocích ukázalo, že ventil vykazuje diodicitu nižší než 1,1 a není tedy vhodné jej v těchto režimech využívat.

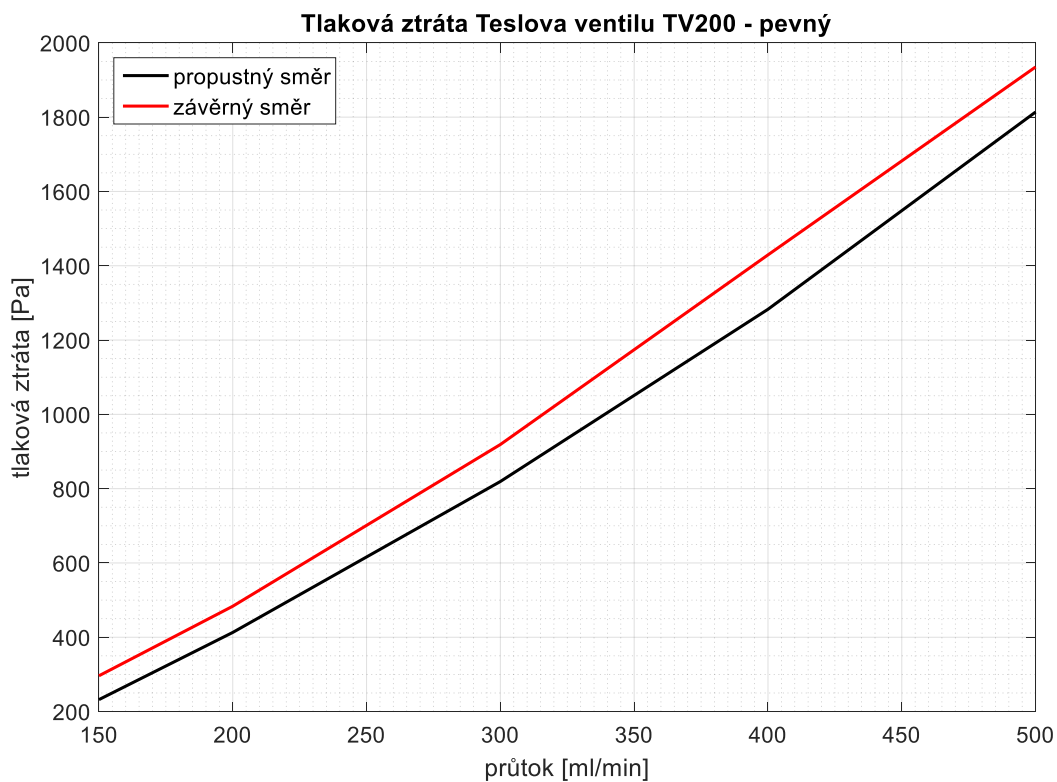


Obrázek 14: Diodicita pružného TV200

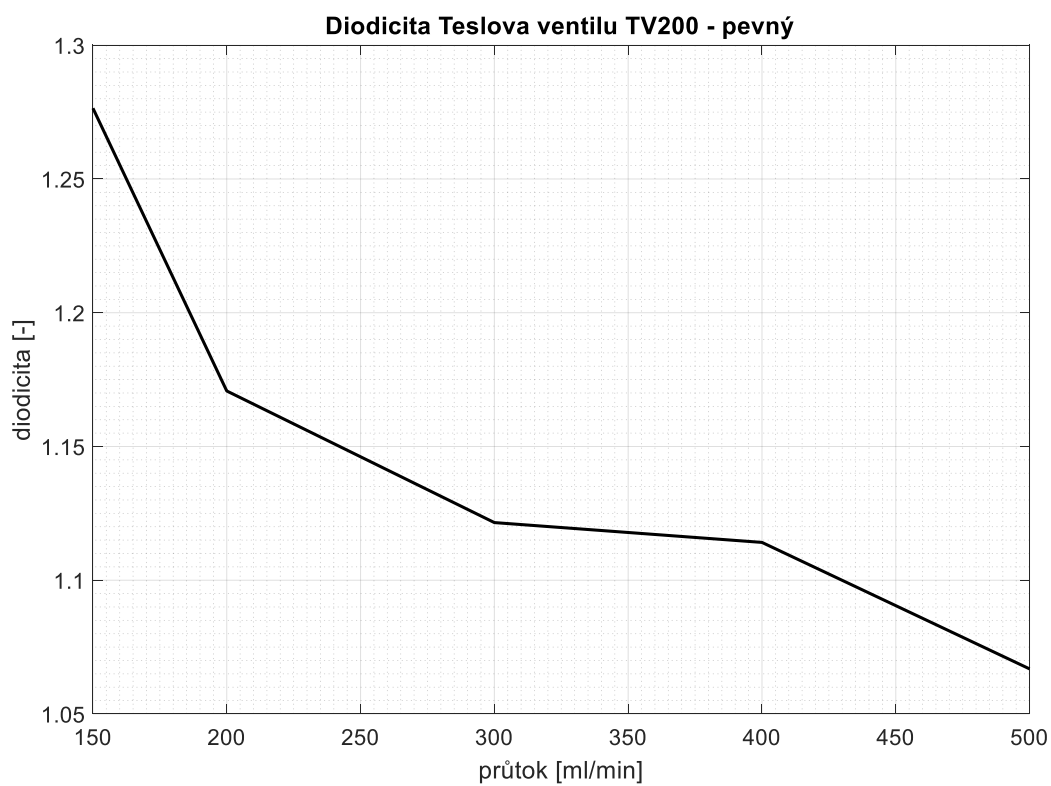
8.2 Pevný Teslův ventil TV200

Na obrázku 15 můžeme vidět průběh tlakové ztráty pevného TV200. Na první pohled vykazuje podobné chování jako TV200 pružný. Je třeba si povšimnout, že tlaková ztráta pevného ventilu je v obou směrech vyšší než u pružného ventilu. Pro propustný směr se pohybuje od 235 Pa do 1810 Pa a pro směr závěrný od 295 Pa do 1929 Pa. Tento fakt však nenapovídá nic o vyšší či nižší účinnosti jednoho z ventilů. Porovnání těchto dvou se bude věnovat samostatná kapitola.

Účinnost pevných ventilů, popsána diodicitou, je vynesena v závislosti na průtoku na obrázku číslo 16 je vidět, že diodicita se pohybuje v rozmezí 1,065-1,275. Opět je účinnost ventilu nejvyšší pro nejnižší průtok $150 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$. Znovu se také ukazuje, že předpokládanému rozmezí diodicity odpovídají průtoky do $430 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$.



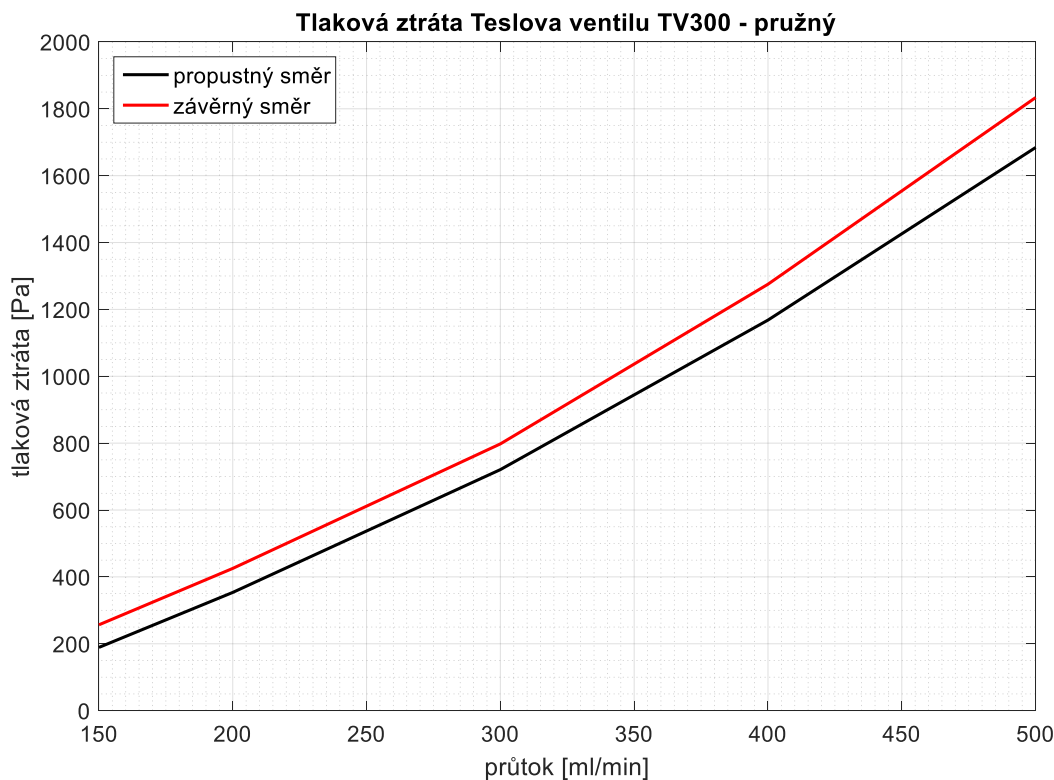
Obrázek 15: Tlakové ztráty pevného TV200



Obrázek 16: Diodicita pevného TV200

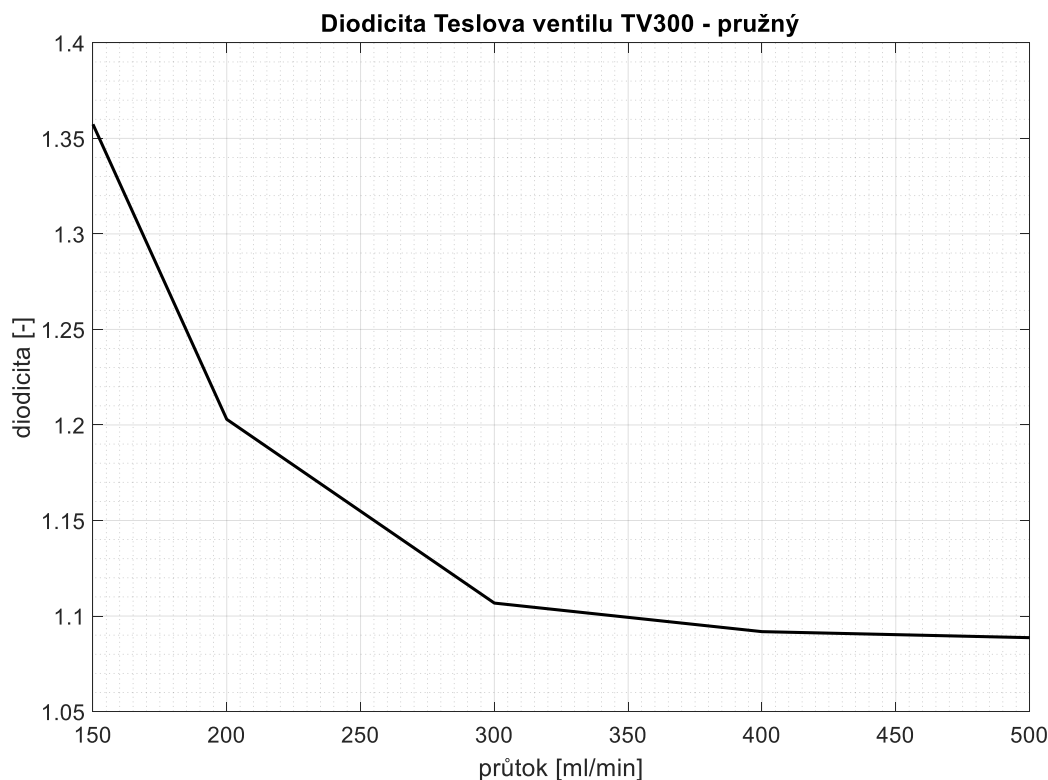
8.3 Pružný Teslův ventil TV300

Na obrázku 17 můžeme vidět průběh tlakové ztráty pružných TV300 v propustném a závěrném směru. Tlakové ztráty v propustném směru se pohybují v rozmezí 198-1668 Pa a jsou opět nižší než ztráty ve směru závěrném, jež se pohybují od 250 Pa do 1830 Pa.



Obrázek 17: Tlakové ztráty pružného TV300

Obrázek 18 znázorňuje grafickou závislost diodicity pružného TV300 na průtoku. Tato geometrie vykazuje nejvyšší diodicitu, konkrétně hodnotu 1,358, pro průtok 150 ml.min⁻¹. Dále výrazně klesá až do průtoku 300 ml.min⁻¹, kde se pokles výrazně zpomaluje. Od průtoku 400 ml.min⁻¹ se průběh jeví téměř konstantním. Je tedy zřejmé, že tato geometrie ventilu není optimální pro průtoky vyšší, než 300 ml.min⁻¹, a to z toho důvodu, že diodicitu se zde pohybuje okolo hodnoty 1,11 a pomalu klesá až na 1,09. V režimu, pro který byl tento ventil navržen, se tedy nacházíme na spodní hranici předpokládané účinnosti TV.

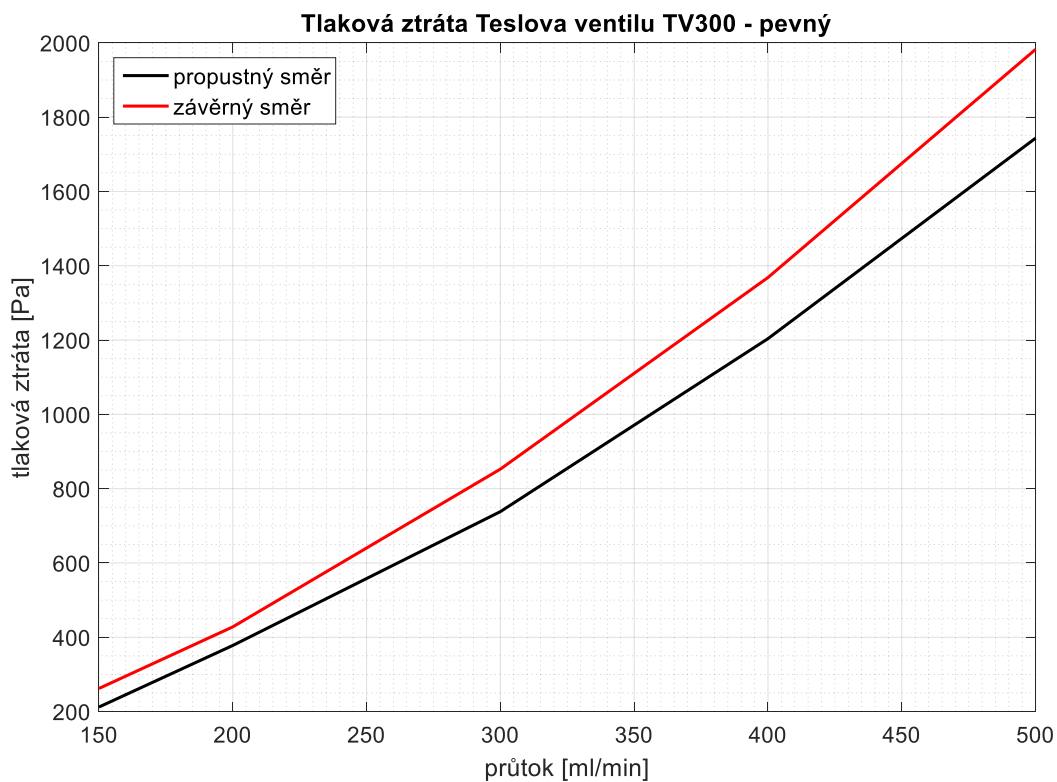


Obrázek 18: Diodicita pružného TV300

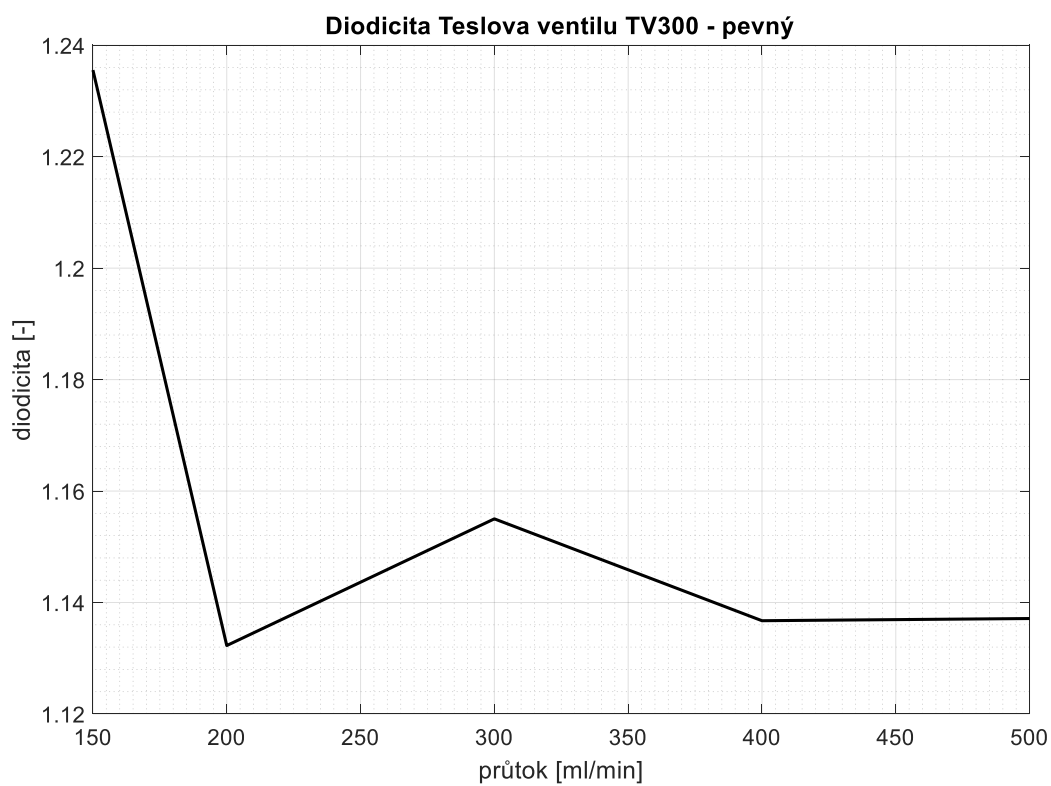
8.4 Pevný Teslův ventil TV300

Závislost tlakové ztráty na průtoku TV300 je graficky znázorněna na obrázku číslo 19. V závěrném směru vykazuje tato geometrie vyšší tlakové ztráty než ve směru propustném. Propustnému směru opět náleží černá křivka, která stoupá z hodnoty 210 Pa na hodnotu 1749 Pa. Závěrný směr pak znázorňuje křivka červená, jež stoupá z hodnoty 226 Pa a při průtoku $500 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ dosahuje tlakové ztráty 1975 Pa.

Obrázek číslo 20 ukazuje grafickou závislost diodicity na režimu měření, tedy na objemovém průtoku. Opět je účinnost ventilu nejvyšší pro průtok $150 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$. Dosahuje zde hodnoty 1,235. Do průtoku $200 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ strmě klesá a dosahuje svého minima, tedy hodnoty 1,132. Z této hodnoty pak diodicita stoupá a pro průtok $300 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ vykazuje geometrie diodicitu 1,155. Dále diodicita opět klesá. Tato geometrie se tedy v rozmezí měřených režimů pohybuje na diodicitě v rozmezí 1,1-1,8, její účinnost však není příliš vysoká pro žádný měřený průtok.



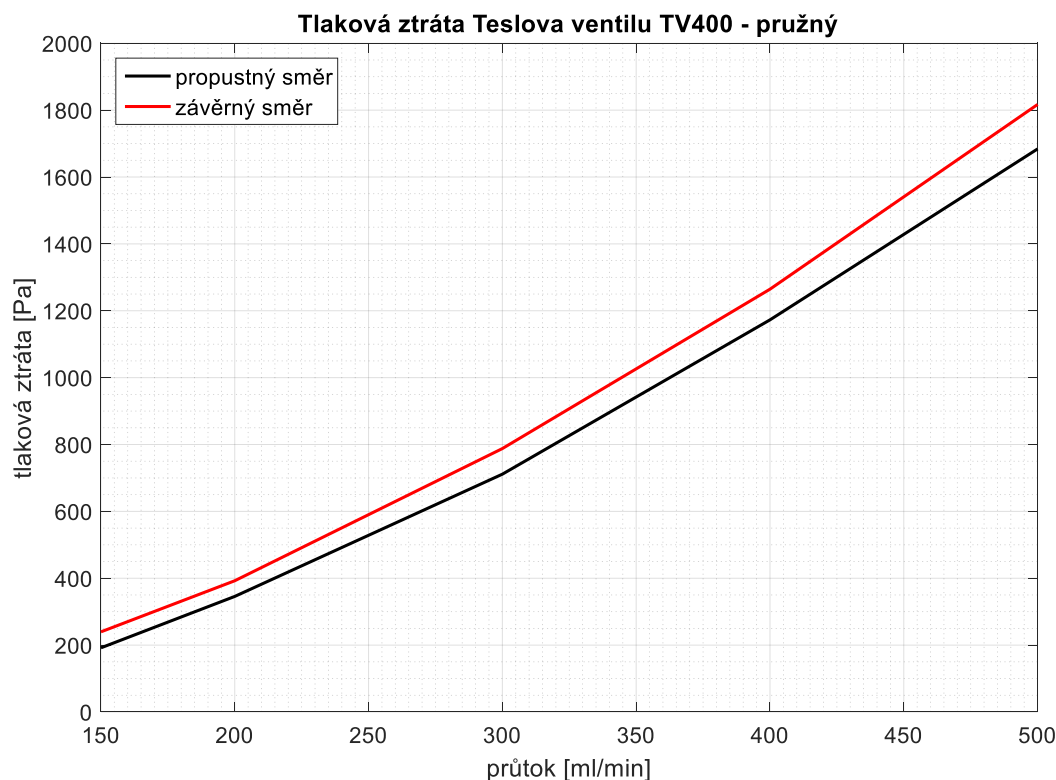
Obrázek 19: Tlakové ztráty pevného TV300



Obrázek 20: Diodicita pevného TV300

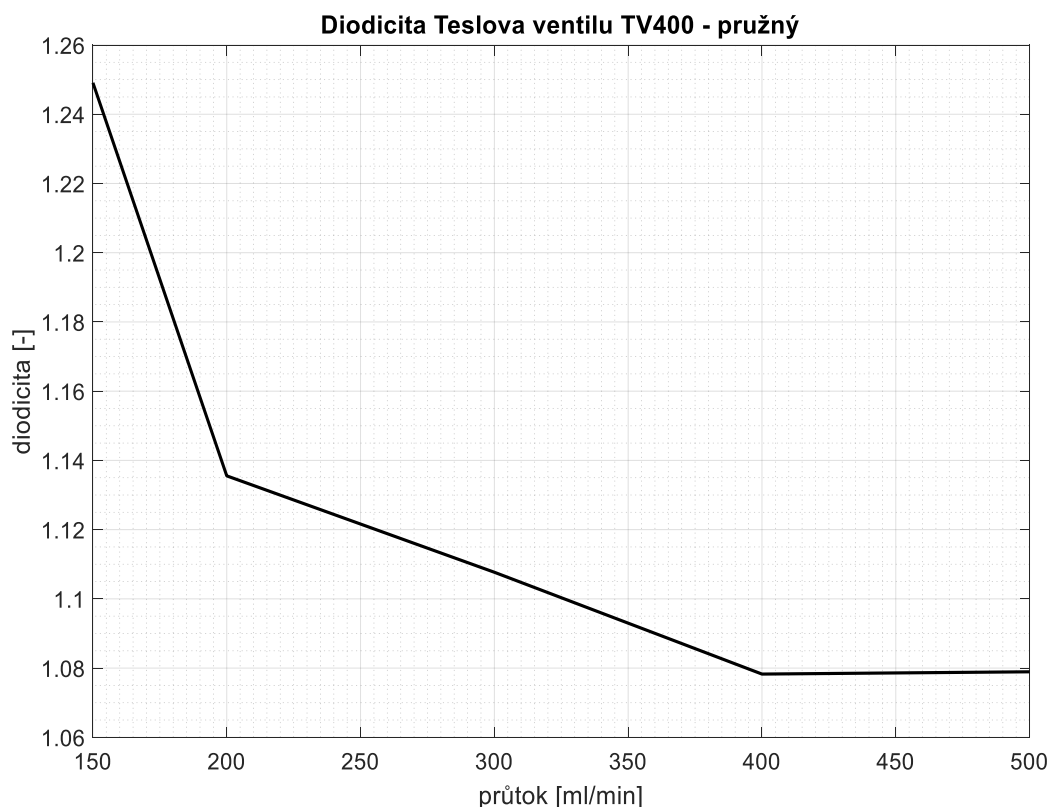
8.5 Pružný Teslův ventil TV400

Grafickou závislost tlakových ztrát na režimu měření můžeme vidět na obrázku číslo 21. Nejnižší tlakovou ztrátu vykazuje tato geometrie pro nejnižší průtok. V závěrném směru je pro průtok $150 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ velikost ztráty rovna 225 Pa a ve směru propustném 198 Pa. S rostoucím průtokem pak ztráty rostou až do hodnot 1810 Pa pro směr závěrný a 1675 Pa pro propustný.



Obrázek 21: Tlakové ztráty pružného TV400

Průběh diodicity pružného TV400 zachycuje obrázek číslo 22. Opět geometrie vykazuje nejvyšší účinnost pro průtok $150 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$. Nabývá zde hodnoty 1,25. S rostoucím průtokem účinnost ventilu klesá. Od průtoku $400 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$, na který byla geometrie optimalizována, se pokles výrazně snižuje a velikost diodicity se ustaluje na hodnotě 1,079. Účinnost ventilu je tedy velmi nízká vzhledem k tomu, že diodicita nedosahuje ani nejnižší předpokládané hodnoty 1,1. Využití tohoto ventilu pro vyšší průtoky tedy není optimální.

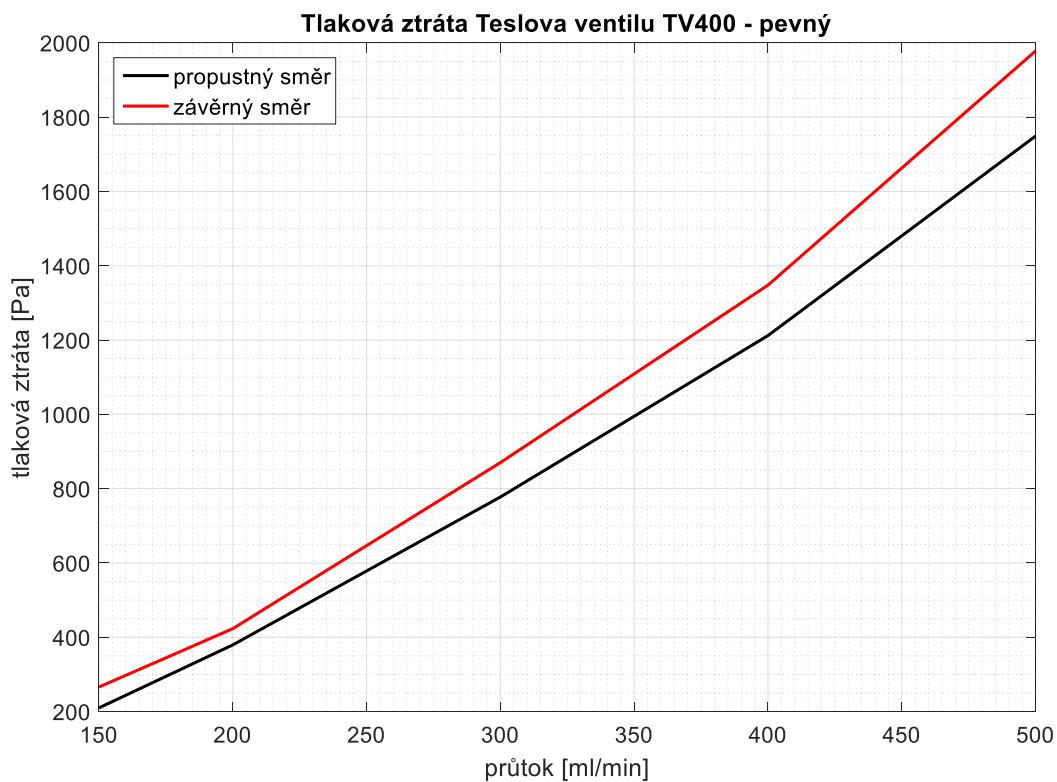


Obrázek 22: Diodicita pružného TV400

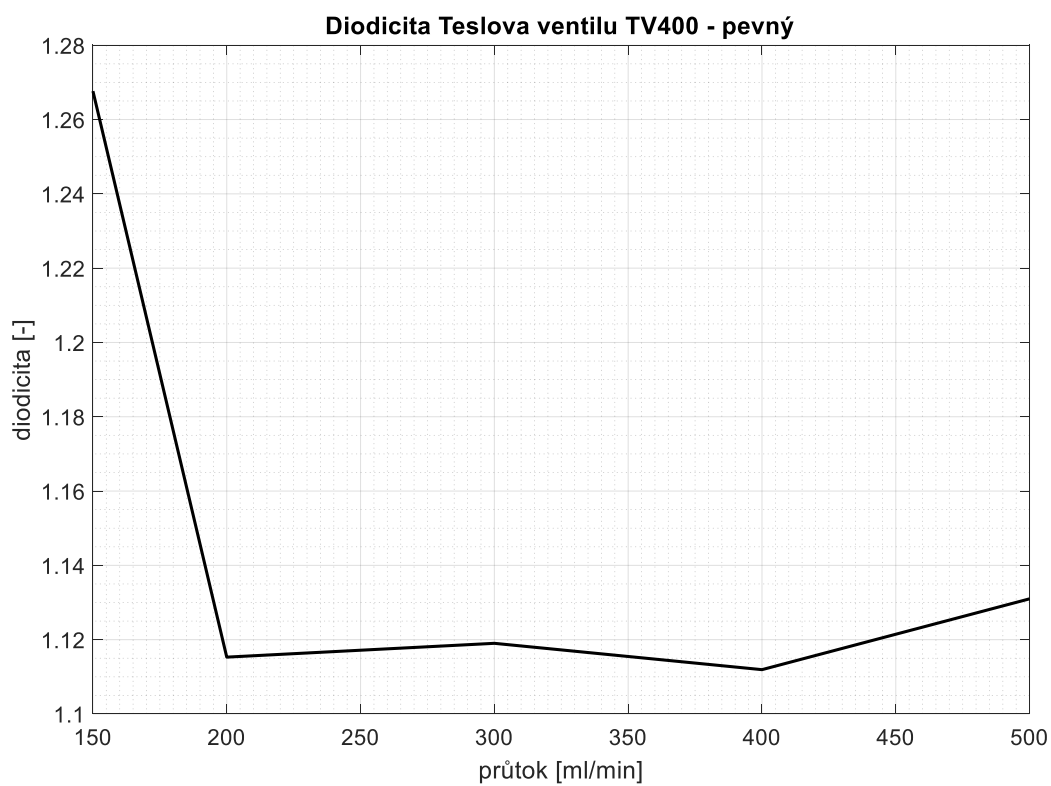
8.6 Pevný Teslův ventil TV400

Pevná geometrie optimalizovaná pro průtok $400 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ má velikost tlakové ztráty v propustném směru rovnou 200 Pa a ve směru závěrném 275 Pa . S rostoucím průtokem opět roste až do 1700 Pa pro směr propustný a 1975 Pa pro směr závěrný. Průběh ztrát je graficky znázorněn na obrázku 23.

Diodicita, která napovídá o míře účinnosti, je v závislosti na průtoku vynesena na obrázku číslo 24. Nejvyšší hodnoty, $1,2655$, dosahuje pro průtok $150 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ a dále strmě klesá. Pro průtok $200 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ nabývá hodnoty $1,115$ a začíná vykazovat téměř konstantní charakter. Lze si povšimnout, že od průtoku $400 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ je vidět nepatrný nárůst. Tento ventil sice vykazuje diodicitu v rozmezí $1,1-1,8$ ve všech měřených režimech, ale pohybuje se okolo spodní hranice. Okolo spodní hranice se pohybuje i při průtoku, na které je ventil optimalizován. Dosahuje zde dokonce své minimální účinnosti, tedy diodicity rovné $1,112$.



Obrázek 23: Tlakové ztráty pevného TV400



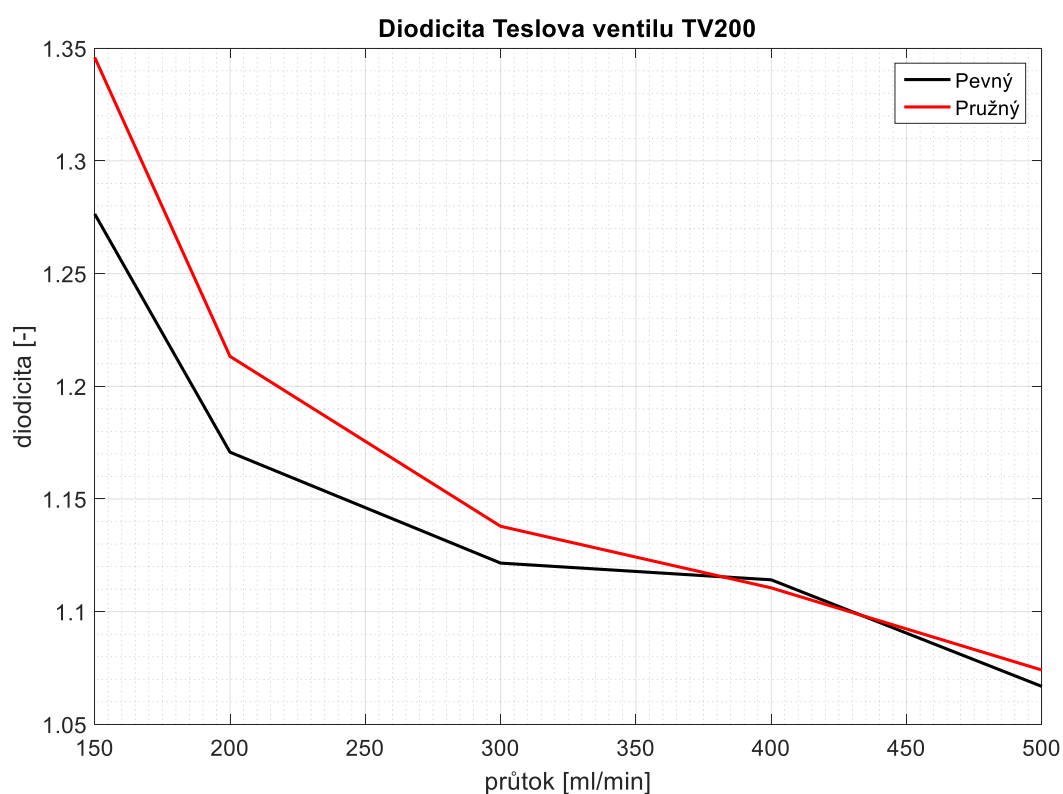
Obrázek 24: Diodicita pevného TV400

8.7 Porovnání účinností pružných a pevných Teslových ventilů

Pro názornost je zde uvedena samostatná kapitola, která je zaměřena na porovnání pružné a pevné varianty jednotlivých geometrií z hlediska jejich diodicity.

8.7.1 TV200

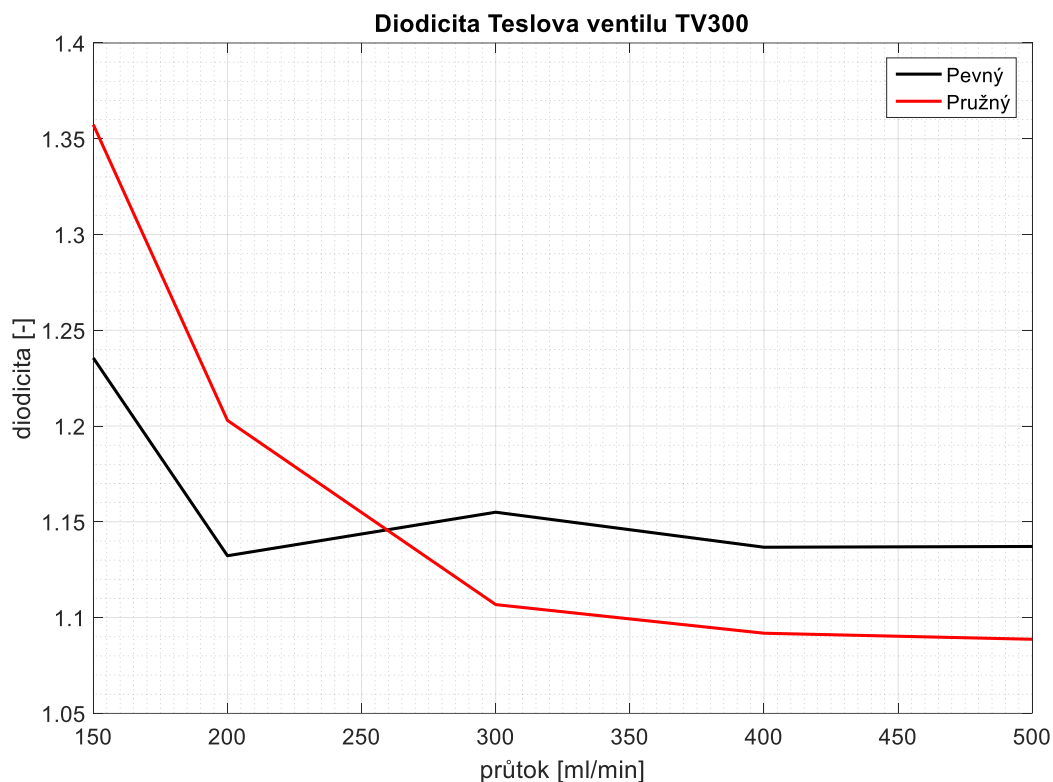
Obrázek 25 graficky znázorňuje závislost diodicity TV200 pro ventil pružný (červeně) a pevný (černě). Obecně lze pro tuto geometrii konstatovat, že pružný ventil dosahuje vyšší účinnosti ve všech měřených režimech vyjma průtoku $400 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$. Je zřejmé, že obě modifikace splňují požadavky na velikost diodicity do průtoku $430 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$, tedy že se pohybují nad diodicitou rovnou 1,1. Pro vyšší průtoky by pravděpodobně TV200 oba nevyhovovaly. Ukazuje se tedy, že při této geometrii je vhodné volit pružnou variantu ventilu.



Obrázek 25: Srovnání účinnosti pružného a pevného TV200

8.7.2 TV300

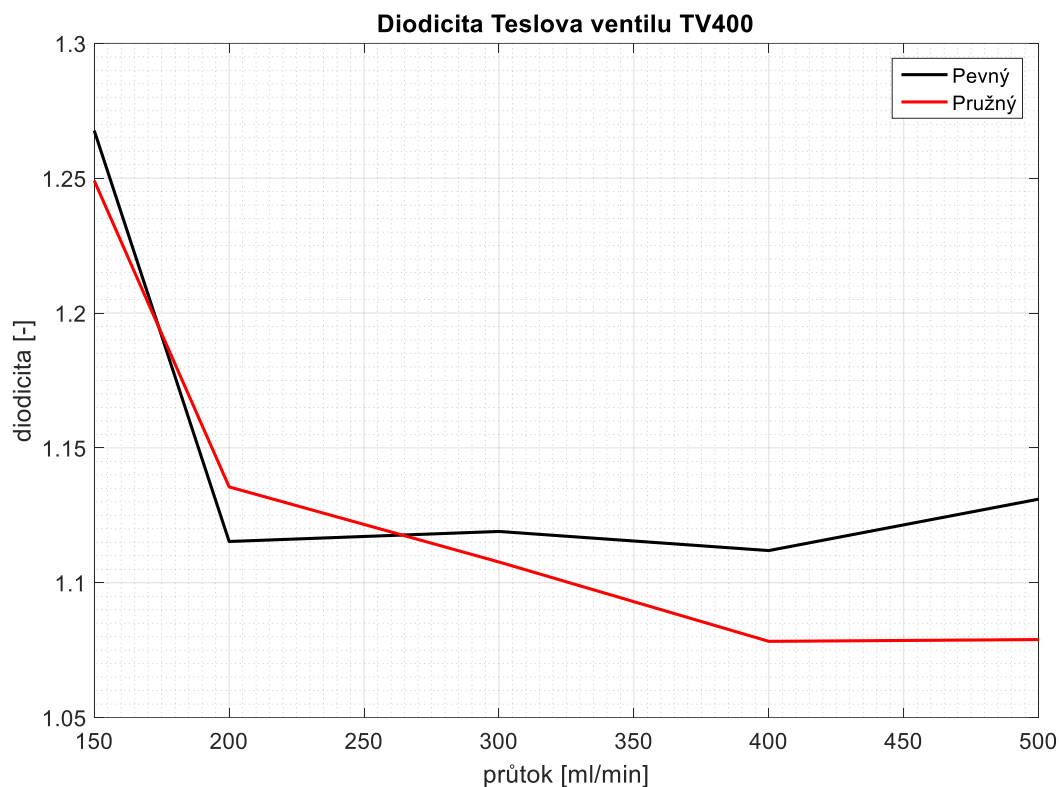
Geometrie TV300 vykazuje vyšší účinnost pružného ventilu do průtoku okolo $260 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$. Od tohoto průtoku má vyšší účinnost pevný ventil. Zlom však nastává již při průtoku $200 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$, kde je důležité si povšimnout, že zatímco diodicita pružného ventilu stále klesá, pružný ventil dosahuje své minimální účinnosti a diodicita začíná pozvolna růst. Při průtoku $300 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ je tedy účinnější ventil pevný a pružný ventil je v této oblasti nepoužitelný, protože jeho účinnost klesla pod nejnižší předpokládanou hodnotu. Tento průběh graficky znázorňuje obrázek číslo 26.



Obrázek 26: Srovnání účinnosti pružného a pevného TV 300

8.7.3 TV400

Obrázek 27 zachycuje závislost diodicity pružného a pevného TV400 na průtoku. Tato geometrie vykazuje od průtoku $260 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ vyšší účinnost v pevném provedení. Zatímco od průtoku $200 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ diodicita pružného ventilu stále klesá, pevný ventil zachovává téměř konstantní hodnotu. Průtok $400 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$, na který je ventil optimalizován, neznámá pro diodicitu žádný zásadní zlom. Podstatné však je, že pevný TV je v této oblasti použitelný, zatímco pružnému TV poklesla hodnota diodicity pod požadovanou spodní hranici 1,1.



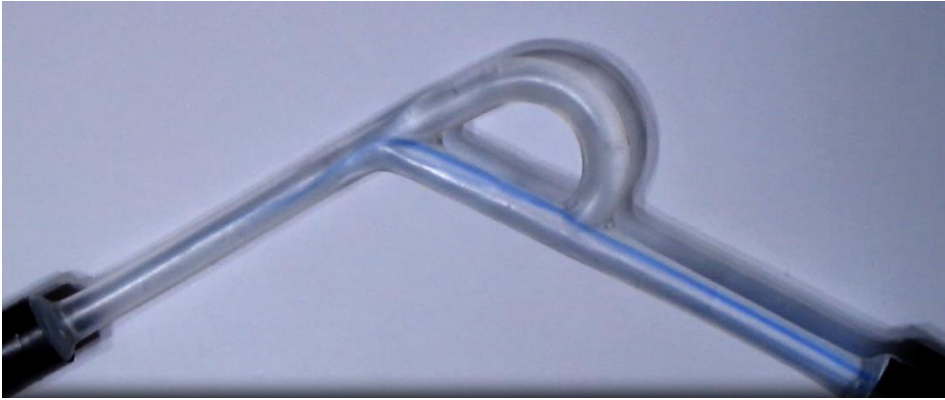
Obrázek 27: Srovnání účinnosti pružného a pevného TV400

8.7.4 Vizualizace

Pro názornější představu o proudění v TV může posloužit následující jednoduchá vizualizace. Před vstupem proudu do ventilu bylo do roztoku vpraveno malé množství inkoustu, který jej zbarvil a umožnil tak zaznamenat děje uvnitř TV.

Obrázky 28-31 znázorňují proudění v propustném směru. Na prvním snímku lze vidět, že proud upřednostňuje vstup do přímé části ventilu. Až na třetím snímku se můžeme přesvědčit, že proudění kvůli poklesu tlaku v zahnuté části ventilu dospěje i do této části. V místě, kde se pod úhlem α setkávají dvě přímé části TV, místě které značíme písmenem A (viz obrázek 4), se tedy setkají dva proudy stejného směru. Nedochozí zde k žádné blokaci proudu, což potvrzuje, že pojmenování „propustný směr“ je odpovídající.

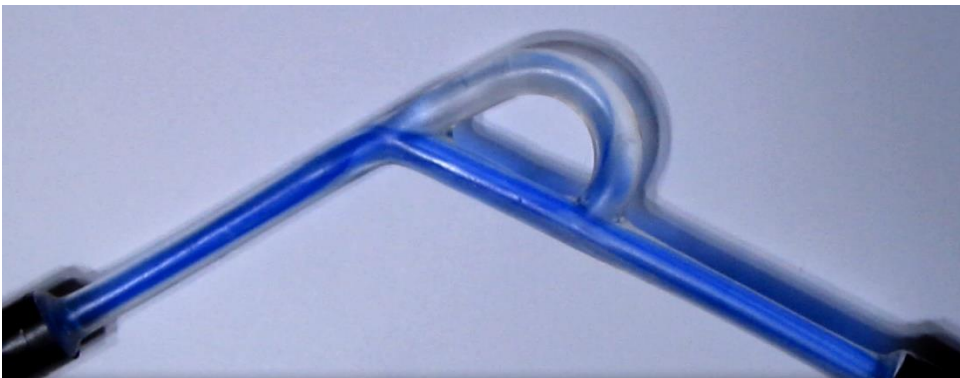
Obrázky 32-35 znázorňují proudění ve směru závěrném. Na prvním snímku můžeme vidět, že v místě, označeném písmenem A, dochází k rozdělení proudu do dvou větví, přičemž majoritní proud pokračuje přímou částí do části zahnuté. V bodě C pak dochází ke zpomalení proudu v přímé části proudem, který přichází z části zahnuté. Je zřejmé, že o tom do jaké míry bude proud v této části blokován, bude rozhodovat velikost úhlu β .



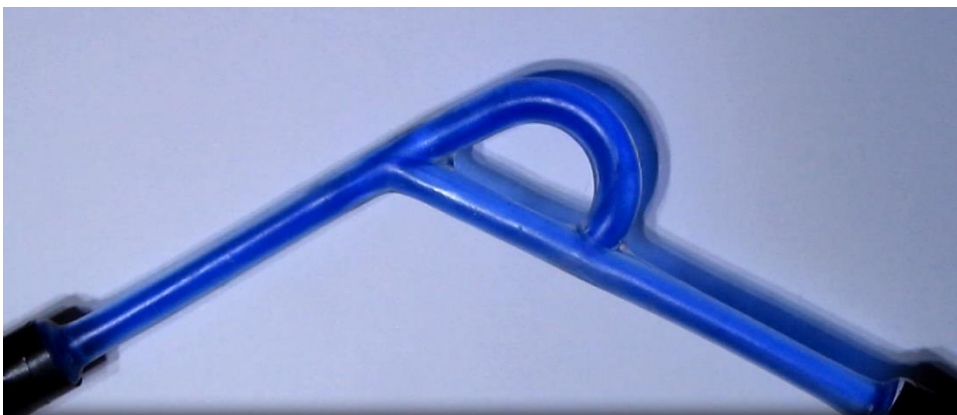
Obrázek 28: Snímek 1, propustný směr



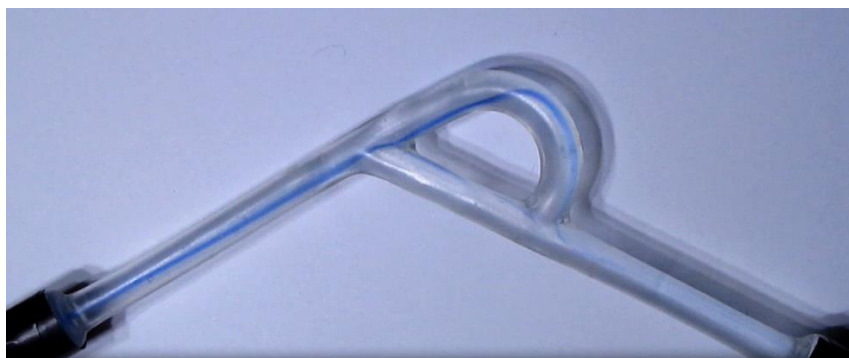
Obrázek 29: Snímek 2, propustný směr



Obrázek 30: Snímek 3, propustný směr



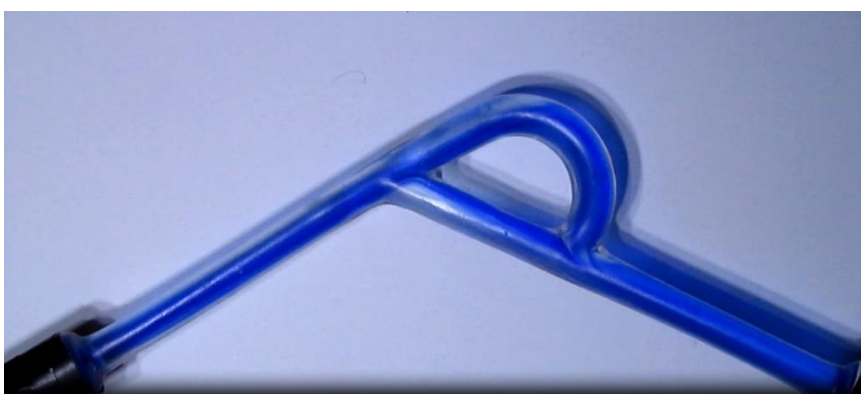
Obrázek 31: Snímek 4, propustný směr



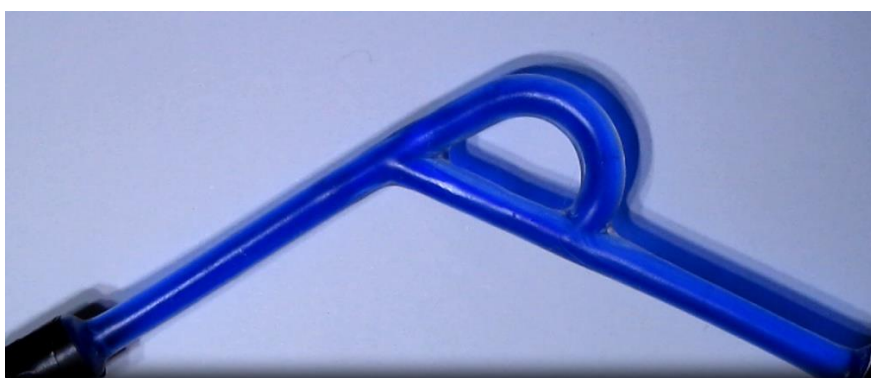
Obrázek 32: Snímek 1, závěrný směr



Obrázek 33: Snímek 2, závěrný směr



Obrázek 34: Snímek 3, závěrný směr



Obrázek 35: Snímek 4, závěrný směr

8.7.5 Shrnutí

V tabulkách 8.1 a 8.2 jsou zaznamenány podstatné hodnoty diodicity. Těmito hodnotami jsou: minimální a maximální diodicita pro měřené režimy a diodicita příslušící režimu, pro který byl daný ventil navržen. Tabulka 11.1 obsahuje hodnoty pružných variant jednotlivých geometrií, tabulka 11.2 pak pevných variant.

Tabulka 8.1 - Pružné TV

Geom.	d_i pro $\dot{V} = \dot{V}_n$	$d_{i_{min}}$	\dot{V} pro $d_{i_{min}}$ [ml/min]	$d_{i_{max}}$	\dot{V} pro $d_{i_{max}}$ [ml/min]
TV200	1,215	1,065	500	1,345	150
TV300	1,18	1,09	500	1,36	150
TV400	1,079	1,079	500	1,245	150

Tabulka 8.2- Pevné TV

Geom.	d_i pro $\dot{V} = \dot{V}_n$	$d_{i_{min}}$	\dot{V} pro $d_{i_{min}}$ [ml/min]	$d_{i_{max}}$	\dot{V} pro $d_{i_{max}}$ [ml/min]
TV200	1,17	1,065	500	1,275	150
TV300	1,155	1,132	200	1,235	150
TV400	1,112	1,112	400	1,2655	150

9 Závěr

V této bakalářské práci byly dle literatury navrženy tři geometrie speciálních hydraulických prvků, Teslových ventilů. Tyto geometrie byly vyrobeny vždy ve dvou modifikacích, pružné a pevné. Dále byla sestavena plně funkční měřicí trať, na které bylo možné měřit tlakové ztráty. Ventily byly podrobeny měření tlakových ztrát v propustném a závěrném směru v pěti průtokových režimech, které odpovídaly průtokům při hemodialýze. Tlakové ztráty pak byly graficky zpracovány v závislosti na režimu měření. Dále byla vyhodnocována diodicita jednotlivých ventilů, též v závislosti na objemovém průtoku, tedy režimu měření.

Měření ukázalo, že všechny TV ventily byly funkční, tedy upřednostňovaly proud v propustném směru. O tom se lze přesvědčit z obrázků 13; 15; 17; 19; 21 a 23, které zachycují závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku a na kterých lze vidět, že v závěrném směru je tlaková ztráta větší než ve směru propustném. O míře účinnosti jednotlivých ventilů se pak můžeme přesvědčit na obrázcích 14; 16; 18; 20; 22 a 24. Lepší přehled však poskytují shrnující tabulky 8.1 a 8.2.

Všechna uvedená srovnání ukázala, že zatímco pružné TV vykazují s rostoucím průtokem klesající diodicitu, pevné TV obvykle strmě klesají mezi průtokem 150-200 ml.min⁻¹ a dále začíná účinnost nepatrně stoupat nebo se ustalovat na určité hodnotě diodicity. Vysvětlení tohoto jevu pravděpodobně spočívá v tom, že s rostoucím průtokem se začíná výrazněji projevat pružnost materiálu, která umožní zvětšení průtoku nepatrným zvětšením svého průměru. K tomuto jevu bude docházet zejména v závěrném směru, ve kterém pevný ventil klade proudu větší odpor. Výrazně tedy poklesne tlaková ztráta v závěrném směru, což vede ke snížení diodicity. Lze tedy očekávat, že při správném návrhu geometrie je vhodné pro malé průtoky zvážit aplikaci pružných ventilů a pro větší průtoky upřednostnit pevnou geometrii.

Při návrhu optimální geometrie ventilů bylo předpokládáno, že v daném průtokovém režimu, ze kterého se při návrhu vycházelo, bude ventil vykazovat nejvyšší účinnost. Ukázalo se, že ani jeden z ventilů takové chování nevykazoval. Všechny TV vykazovaly nejvyšší účinnost pro průtokový režim 150 ml.min⁻¹. Nejvyšší účinnosti je pro nejmenší průtok dosaženo pravděpodobně kvůli tomu, že optimální geometrie byla navržena dle vztahů pro mikroskopické Teslovy ventily. Zvláštní pozornost je třeba věnovat pružnému TV400, který dokonce dosahoval minimální diodicity při průtoku 400 ml.min⁻¹. Tento fakt by nemusel bránit v jeho využití pro daný průtokový režim, ovšem pokud ventil vykazuje diodicitu menší než 1,1, není vhodné o jeho aplikaci uvažovat, jelikož s největší pravděpodobností existuje vhodnější volba geometrie.

Závěrem této práce je třeba konstatovat, že optimalizace dle vztahů, jež jsou uvedeny v numerické studii [1], není zcela vhodná pro toto využití, neboť nebylo dosaženo nejvyšší účinnosti pro předpokládané režimy. Jak pružné tak pevné geometrie TV200, TV300 a pevný TV400 však vykazovaly diodicitu větší než 1,1 ve svých optimálních průtokových režimech a proto není důvod, proč jejich aplikaci nezávažovat. Účinnost těchto ventilů by se dala zvýšit například sériovým řazením TV, což může být námětem pro další experiment, který by však přesahoval rámec bakalářské práce.

10 Seznam použitých symbolů a zkratek

Značení	Název veličiny	Jednotka
e_z	měrná ztrátová energie	$J.kg^{-1}$
ρ	hustota	$kg.m^{-3}$
g	gravitační zrychlení	$m.s^{-2}$
v	rychlost	$m.s^{-1}$
ζ	součinitel odporu	1
λ	součinitel třecích ztrát	1
l, L	délka	m
d_h	hydraulický průměr	m
A	obsah	m^2
o	smočený obvod	m
Re	Reynoldsovo číslo	1
di	diodicita	1
Δp	tlaková ztráta	Pa
\dot{V}	objemový průtok	$ml.min^{-1}$
V	objem	m^3
μ	dynamická viskozita	$Pa.s$
x_r	rozběhová délka	m
D	průměr	m
H	výška	m
P	tlak	Pa
T	čas	s

11 Seznam obrázků a grafů

Obrázek 1: Oblast odtržení proudu v koleni - převzato z [8]	10
Obrázek 2: Náhlé rozšíření průřezu - převzato z [8]	11
Obrázek 3: Náhlé zúžení průřezu - převzato z [8]	12
Obrázek 4: Geometrie Teslova ventilu - převzato z [1].....	13
Obrázek 5: Škrobové kopyto TV	17
Obrázek 6: Pružný TV	18
Obrázek 7: Vymývání pružných TV	19
Obrázek 8: Schéma měřicí trati	20
Obrázek 9: Fotografie měřicí trati	20
Obrázek 10: Kalibrace snímače 5	21
Obrázek 11: Kalibrace snímače 6	22
Obrázek 12: Kalibrace průtoku čerpadla.....	23
Obrázek 13: Tlakové ztráty pružného TV200	25
Obrázek 14:Diodicita pružného TV200	26
Obrázek 15: Tlakové ztráty pevného TV200	27
Obrázek 16: Diodicita pevného TV200.....	27
Obrázek 17: Tlakové ztráty pružného TV300	28
Obrázek 18: Diodicita pružného TV300.....	29
Obrázek 19: Tlakové ztráty pevného TV300	30
Obrázek 20: Diodicita pevného TV300.....	30
Obrázek 21: Tlakové ztráty pružného TV400	31
Obrázek 22:Diodicita pružného TV400	32
Obrázek 23: Tlakové ztráty pevného TV400	33
Obrázek 24: Diodicita pevného TV400.....	33
Obrázek 25: Srovnání účinnosti pružného a pevného TV200	34
Obrázek 26: Srovnání účinnosti pružného a pevného TV 300	35
Obrázek 27: Srovnání účinnosti pružného a pevného TV400	36
Obrázek 28: Snímek 1, propustný směr	37
Obrázek 29: Snímek 2, propustný směr	37
Obrázek 30: Snímek 3, propustný směr	37
Obrázek 31: Snímek 4, propustný směr	37
Obrázek 32: Snímek 1, závěrný směr	38
Obrázek 33: Snímek 2, závěrný směr	38
Obrázek 34: Snímek 3, závěrný směr	38
Obrázek 35: Snímek 4, závěrný směr	38

12 Seznam tabulek

Tabulka 2.1 – Vstupní parametry.....	15
Tabulka 2.2 – Optimální geometrie ventilů pro dané objemové průtoky	16
Tabulka 8.1 - Pružné TV	39
Tabulka 8.2- Pevné TV	39

13 Zdroje

[1] TRUONG, T-Q., NGUYEN, N-T. : Simulation and Optimization of Tesla Valves, Nanotech 2003, Vol.1, www.nsti.org, ISBN 0-9728422-0-9

[2] Thompson SM, Paudel BJ, Jamal TT, Walters DK. Numerical Investigation of Multistaged Tesla Valves. ASME. J. Fluids Eng. 2014;136(8):081102-081102-9. doi:10.1115/1.4026620.ISSN 0098-2202. Dostupné také z: <http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?doi=10.1115/1.4026620>

[3] TESLA, Nikola. *Valvular conduit*. 1916. United States of America. 79,703. Uděleno 3.2.1920. Zapsáno 21.2.1916.

[4] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL, 1987

[5] JEŽEK, Jan et al. *Mechanika tekutin*. 3. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 8001016153;9788001016152

[6] NOŽIČKA, Jiří. *Mechanika tekutin*. Praha: ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02865-8.

[7] TESAŘ, Václav. *Mechanika tekutin pro 4-leté studijní obory*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1990. ISBN 80-01-00206-3

[8] JANNA, William S. *Introduction to fluid mechanics*. 4th ed. Boca Raton: CRC, 2010. ISBN 978-1-4200-8524-2

[9] BUREŠ, Jiří, *Dynamická viskozita*. In: ConVERTER [online]. [cit. 2018-08-05].

Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/dynamicka-viskozita.htm>

[10] *Stavy hmoty: Kapaliny a kapalně krystalické* [online], In: . [cit. 2018-08-05].

Dostupné z: <https://old.vscht.cz/anl/matejka/Chemie05-stavyhmoty-kapaliny.pdf>

[11] Příspěvatelé WikiSkript, *Hemodialýza* [online], 2016, Datum poslední revize 2. 04. 2016, 07:29 UTC, [citováno 5. 08. 2018].

Dostupné také z:

<https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Hemodial%C3%BDza&oldid=344075>

[12] *Physical Properties of Glycerine and Its Solutions* [online], [cit. 2018-08-08].

Dostupné z:

http://www.aciscience.org/docs/physical_properties_of_glycerine_and_its_solutions.pdf