



## Návod na laboratorní úlohu

### Modelování proudění vzduchu clonkou

**Název studijního předmětu:** Modelování a simulace technických systémů

**Vedoucí cvičení/experimentu:** Ing. Tomáš Pokorný a Doc. Ing. David Vrba, Ph.D.

**Anotace cvičení/experimentu:**

COMSOL Multiphysics je simulační program určený k řešení inženýrských úloh, který využívá metody konečných prvků. Jedná se o numerickou metodu pro řešení problémů popsaných parciálními diferenciálními rovnicemi, kdy dochází k diskretizaci původně spojitého kontrolního objemu a řešení diferenciálních rovnic probíhá pouze v uzlech vytvořené diskrétní sítě. V případě modulu výpočetní mechaniky tekutin jedná o Navier-Stokesovy rovnice.

V této úloze budeme simulovat ustálené nestlačitelné laminární proudění, což je nejjednodušší typ proudění, jaký lze v trubici kruhového průřezu o našem poloměru uvažovat. Pokud je proudění ustálené, pak žádná z veličin (rychlost, tlak, hustota, dynamická viskozita, atd.) není funkcí času. To matematicky znamená, že derivace veličin takového proudění podle času jsou rovny nule a po uplynutí jakkoli dlouhého časového intervalu bude proudění stejné jako na počátku daného časového intervalu. Když nazýváme proudění nestlačitelným, pak tím říkáme, že změna hustoty proudící tekutiny je menší než pět procent oproti klidové hodnotě. V případě spojení pojmů ustálené a nestlačitelné proudění platí, že změna hustoty podle prostorových souřadnic bude menší než pět procent a změna hustoty podle času musí být nulová. Laminární proudění je takové proudění, kdy síla vyvolaná dynamickou viskozitou je dostatečně velká na to, aby se částice tekutiny pohybovaly pouze ve směru normály na průřez trubice (platí při plně vyvinutém laminárním proudění). Takovéto proudění lze rychle a přesně simulovat.

**Protokol**

1. Zvládnutí základních principů práce s modulem výpočetní mechaniky tekutin programu COMSOL Multiphysics
2. Modelování 180°trubice, volba druhu proudění
3. V softwaru COMSOL Multiphysics vytvořte 2D model 180° trubce.
4. Přiřazení daných materiálů vymodelovaným částím, jejich parametrů a nastavení fyziky proudění.
5. Sledování výsledků simulací, tj. průběhů objemového průtoku a tlaku pro různé průměry trubice objemové průtoky

**Cíle cvičení/experimentu:**

Zvládnutí základních principů práce s modulem výpočetní mechaniky tekutin programu COMSOL Multiphysics. Vytvoření 2D modelu 180° trubice a hodnocení změn rychlosti proudění a tlaku v trubici pro různé průtoky a průměry trubice. Zhodnotit závislost objemového průtoku a změn tlaku pro proudění vzduchu skrze clonu pro:

- a) Různé tvary clony
- b) Různé průměry clony
- c) Různé druhy proudění

**Popis použitých zařízení/přístrojů:**

1. Výkonné pracovní stanice
2. Software COMSOL Multiphysics



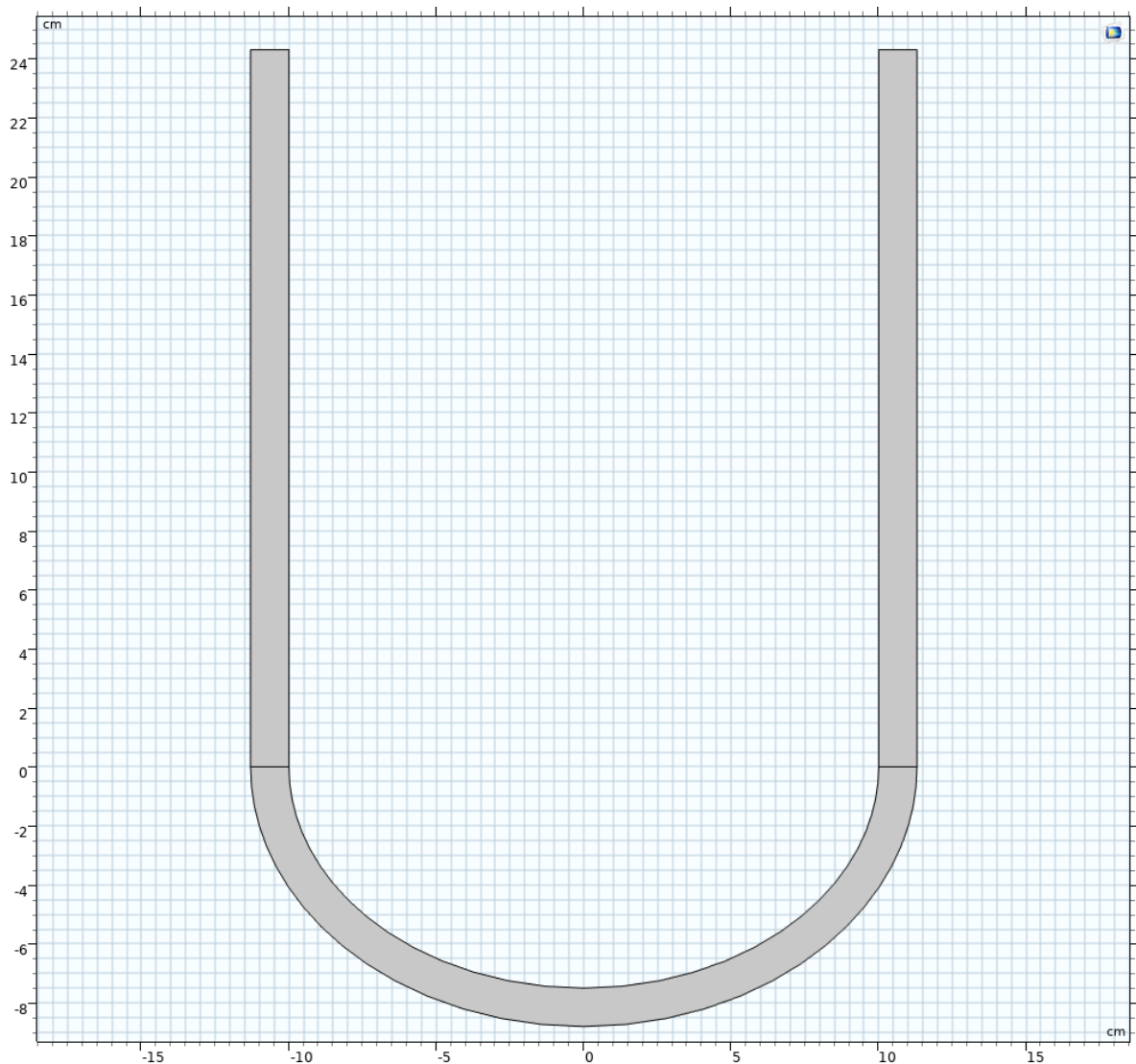
## Tvorba modelu v COMSOL Multiphysics:

Postup tvorby, nastavení, simulace a zobrazení výsledků modelu v programu COMSOL Multiphysics se skládá z několika kroků. Prvním je nadefinování počtu dimenzí modelu, volba fyziky či fyzik, které 2 budeme chtít simulovat a nastavení typu studie čili simulace, např. stacionární. Dalším krokem je vytvoření geometrie, tedy kontrolního objemu, v němž budeme hledat řešení soustavy diferenciálních rovnic. V podstatě se jedná o element, v němž chceme simulovat nějaký fyzikální děj (pro nás proudění tekutiny), může to být trubice, clonka (viz obrázek), prakticky cokoliv. Následuje volba materiálu, který bude náš kontrolní objem obsahovat. Materiál je třeba vybrat, z důvodu určení hodnot dalších parametrů v diferenciálních rovnicích. V případě modulu výpočetní mechaniky tekutin se jedná především o hustotu a dynamickou viskozitu tekutiny. Pokračuje se nastavením okrajových podmínek, počátečních hodnot a vytvořením sítě, v jejíž uzlech se budou diferenciální rovnice řešit pomocí metody konečných prvků. Posledními dvěma kroky je spuštění výpočtu simulace a zobrazení výsledků. U zobrazení výsledků se jedná o kritický bod, kdy je třeba rozeznat, zda výsledky odpovídají reálné situaci. V tuto chvíli je třeba si uvědomit, že COMSOL Multiphysics je pouze nástrojem usnadňujícím inženýrům práci a nikoli všespásným řešením daných problémů. Pokud inženýr nedokáže rozeznat, že výsledky simulace neodpovídají reálné situaci, pak je v jeho rukou i takto silný nástroj nepoužitelný. Proto je nutné být obeznámen s principy mechaniky tekutin a rovnicemi proudění.

V kartě Model Wizard si zvolte 2D geometrii. V sekci Fluid Flow zvolte fyziku: SinglePhase Flow a Laminar Flow. V dalším kroku vyberte studii: Stationary. Tlačítkem Done spustíte modelační prostředí Comsol Multiphysics.

### 1) Tvorba geometrie

Model se skládá z trubice s úhlem zakřivení 180° ve které se nachází vzduch. V modelu budeme postupně měnit objemový průtok od 10 do 100 L/min a budeme sledovat změnu rychlosti a tlaku v trubici. V okně Model Builder kliknutím pravým tlačítkem myši na sekci Geometry vyberte z nabídky požadovaný objekt (Rectangle, Circle). V okně Settings nastavte rozměry a pozici dle Obrázku 1. Klikněte na tlačítko Build. Ohyb trubice vytvořte pomocí operace Difference, kterou najdete kliknutím pravým tlačítkem myši na sekci Geometry v nabídce Booleans and Partions.



Obrázek 1.: Geometrie modelu 180° trubice

## 2) Přidání parametrů a proměnných

Hodnoty, které chceme v budoucnu pohodlně měnit nastavujeme parametricky. V okně Model Builder v sekci Global Definition v nabídce Parameters přidejte proměnnou pro průtok  $Q$  o hodnotě 10 [dm<sup>3</sup>/min]. Tuto hodnotu budeme později měnit. Dále nastavíme poloměr trubice  $R$  na 6 [mm].

V okně Model Builder v sekci Model 1 klikneme pravým tlačítkem na Definitions a přidáme Variables. V sekci Settings nastavíme proměnné  $S$  na hodnotu  $\pi \cdot (R^2)$  a  $V_{in}$  na  $Q/S$ .

## 3) Přidání materiálů

Pro celou trubici definujte materiál, kterým bude vzduch. V okně Model Builder pravým klikem na sekci Materials vyberte Add Material from Library. V sekci Add Material v rozbalovací nabídce Liquid and Gases najděte Air a materiál přidejte pro všechny části trubice.

#### 4) Nastavení fyziky

V okně Model Builder v sekci Laminar Flow najdete Navier Stokesovy rovnice. Ujistěte se, že v sekci Settings jsou označeny všechny části trubice, kde se budou Navier Stokesovy rovnice počítat. V sekci Compressibility nastavíme Machovo číslo menší než 0,3 (Compressible flow  $Ma < 0.3$ ), tak zajistíme, že se bude jednat o ustálený a izotermický průtok, účinky stlačitelnosti budou malé a lze použít zjednodušené nestlačitelné rovnice toku.

V sekci Fluid Properties nastavíme teplotu jako User Defined na 293,13 K (20°C) a zkontrolujeme, zda je nastavena Density a Viscosity From Material.

#### 5) Nastavení výstupu a vstupu trubice

V okně Model Builder klikneme pravým tlačítkem na sekci Laminar Flow a postupně přidáme Inlet a Outlet.

V sekci Settings pro Inlet přidáme část trubice, která představuje vstup. V Settings dále nastavíme Laminar inflow. V sekci Laminar Inflow vybereme Average velocity a parametr  $U_{av}$  nastavíme na  $V_{in}$  m/s

V sekci Settings pro Outlet přidáme část trubice, která představuje výstup. V Settings dále nastavíme Pressure na hodnotu  $p_0$  na hodnotu 0. Tak zajistíme že na výstupu trubice bude nulový tlak.

#### 6) Mesh – diskretizace modelu

Jelikož COMSOL k výpočtu používá řešení diferenciálních rovnic pomocí metody konečných prvků (FEM), je potřeba celý model diskretizovat na konečný počet prvků, tedy vytvořit síť, ve které v uzlových bodech dochází k řešení diferenciálních rovnic. COMSOL využívá k této diskretizaci ve 2D elementy tvaru trojúhelníku o určité velikosti. U 2D modelů můžeme umožnit COMSOLu si tuto velikost kontrolovat samostatně (physics controlled mesh) bez potřeby, aby uživatel tyto velikosti definoval. Je zřejmé, že čím menší velikosti elementu sítě, tím výpočetněji náročnější, ale o to věrohodnější výsledky dostáváme.

V okně Model Builder a sekci Mesh nadefinujete mesh type Physics-controlled mesh; Element size: Extra Fine.

#### 7) Definice okrajových podmínek a spuštění simulace

V okně Model Builder v sekci Study klikneme na tlačítko Compute spustíme simulaci.

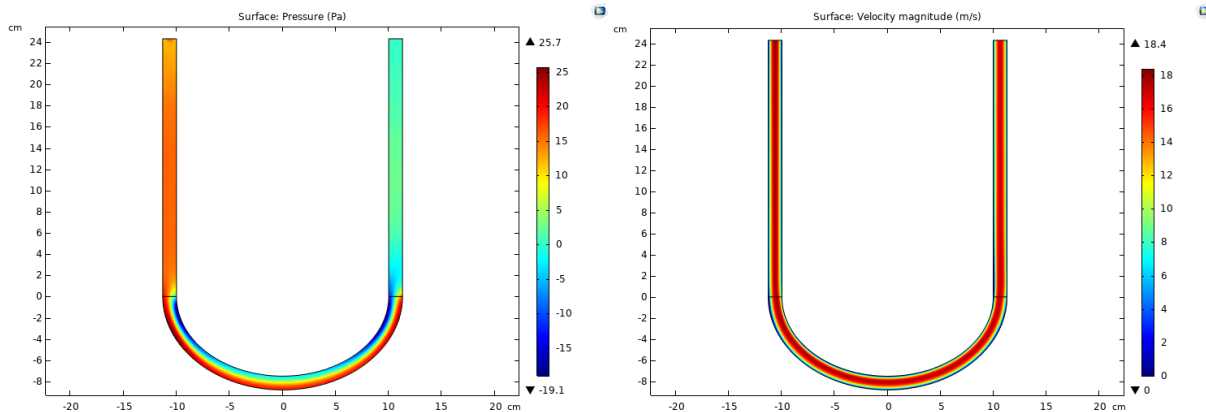
## Zhodnocení výsledků:

V okně Model Builder v sekci Results si zobrazíme rychlost (Velocity) a tlak (Pressure).

Postupně měňte objemový průtok od 10 do 100 L/min a sledujte změnu tlaku a rychlosti v trubici.

V okně Model Builder klikem pravým tlačítkem na Results přidejte 1D Plot Group a zobrazte průběh rychlosti a tlaku na stěně trubice.

Postupně měňte velikost trubice a sledujte změnu tlaku a rychlosti v trubici.



Obrázek 2: Ukázka výsledků pro tlak a průtok v trubici.

Všechny obrázky jsou autorským dílem.