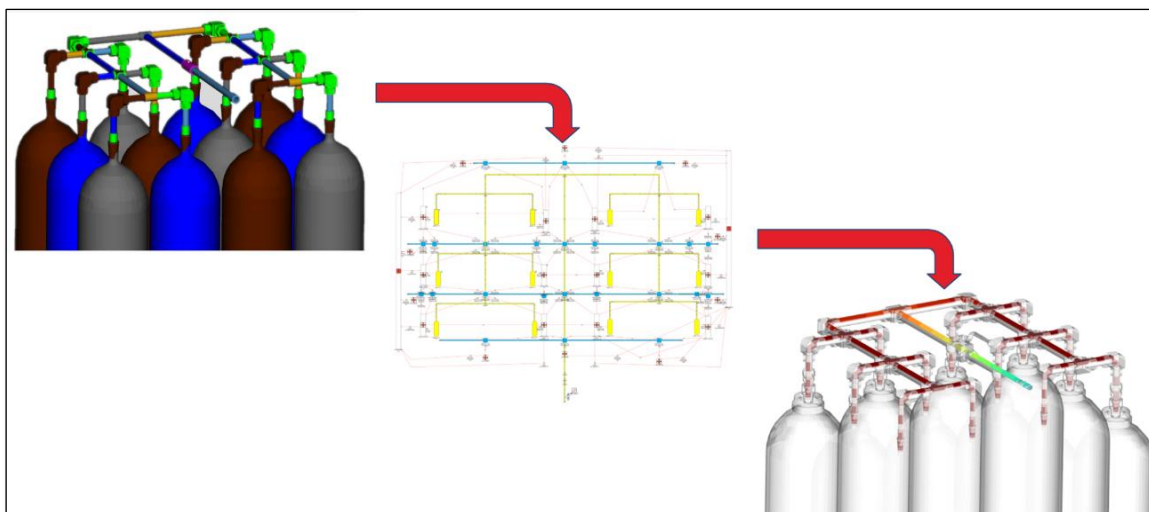


Počítačový model zařízení pro testování komponent pro rychlé plnění vozidel vodíkem



Tento výsledek je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci
Programu Národního centra kompetence

NÁZEV VÝSLEDKU

Počítačový model zařízení pro testování komponent pro rychlé plnění vozidel vodíkem

PROJEKT

Národní centrum vodíkové mobility (TN02000007)

NÁZEV DÍLČÍHO PROJEKTU

Provozní aspekty vodíkových plnicích stanic

ZPRACOVATEL

Vysoké učení technické v Brně

APT, spol. s r.o.

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

AUTORSKÝ TÝM

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně

Ing. Michael Bohm, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně

doc. Ing. Pavel Charvát, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně

Ing. Vladimír Dynda, CSc., APT, spol. s r.o.

Ing. Bronislav Vahalík, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Obsah

1	Úvod	6
2	Modelování vlastností vodíku	7
3	Koncepce testovacího zařízení.....	8
3.1	Typický testovací scénář	11
3.2	Hlavní výhody virtuálního stavu.....	11
4	Příklad výsledků	11
4.1	Příklad řešení kaskádového plnění	11
4.2	Testování redukčního ventilu.....	14
5	Použitá literatura	17
6	Seznam obrázků	18
7	Seznam tabulek.....	19

Abstrakt

Rozvoj infrastruktury pro vodíkovou mobilitu vyžaduje spolehlivé a výkonné plnicí stanice schopné doplnit nádrž vozidla na tlak 700 bar během několika minut, a současně dodržet přísné teplotní limity definované normou SAE J2601. Aby bylo možné bezpečně vyvíjet a kalibrovat nové ventily, chladiče a měřicí techniku pro vysoké průtoky ještě před stavbou fyzických prototypů, je nezbytný validovaný simulační nástroj. Tato zpráva shrnuje první fázi projektu zaměřeného na návrh koncepčního OD/1D modelu testovacího zařízení pro vodíkové plnění a na ověření klíčových fyzikálních modelů souvisejících s rychlým plněním.

Vodíkové plnicí stanice hrají zásadní roli při podpoře vozidel s palivovými články i vodíkovými spalovacími motory, protože umožňují rychlé doplňování stlačeného vodíku — obvykle na tlak 350 nebo 700 bar. Rychlé plnění vyvolává významné tepelné zatížení v důsledku komprese plynu a Joule–Thomsonova jevu; proto musí být vodík předchlazen přibližně na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, aby teplota v nádrži nepřekročila bezpečnostní limity ($\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ u kompozitních nádrží typu IV). Stabilního a bezpečného provozu lze dosáhnout pouze přesnou regulací tlaku, teploty a hmotnostního průtoku v souladu s normami, jako je SAE J2601.

Jednou z hlavních výzev je dosažení vysokých hmotnostních průtoků ($> 65\text{ g/s}$), které jsou nezbytné pro těžká vozidla, kde je nutné minimalizovat dobu plnění. Průtoky až do 300 g/s jsou limitovány tlakovými ztrátami v zásobníkových a výdejních vedeních, nedostatečnou standardizací komponent a rostoucím tepelným zatížením, které musí být odváděno vysoce účinnými chladicími systémy. Vyšší průtoky rovněž zvyšují energetické nároky na kompresi a předchlazování a kladou vysoké materiálové požadavky z důvodu rizika vodíkové křehkosti. Se zvyšujícím se množstvím přepravovaného vodíku roste také náročnost detekce úniků a komplexita bezpečnostních systémů. Tyto technické a ekonomické výzvy motivují pokračující výzkumné a vývojové aktivity, které podporují nové standardy, například SAE J2601/5 (2024), definující bezpečné a efektivní postupy rychlého plnění. Pokrok v oblasti kompresní techniky, tepelného managementu a výdejních systémů bude klíčový pro rychlé, bezpečné a ekonomicky životaschopné plnění vodíku, zejména u těžkých vozidel.

Klíčová slova: Vodíkové plnicí stanice, Rychlé plnění, SAE J2601 / SAE J2601-5, Vodíková infrastruktura, Hmotnostní průtok $65\text{--}300\text{ g/s}$, OD/1D simulace

Abstract

The development of hydrogen mobility infrastructure requires reliable high-performance refueling stations capable of filling a 700-bar vehicle tank within minutes while complying with strict temperature limits defined by SAE J2601. To enable safe development and calibration of new valves, chillers, and high-flow measurement equipment prior to constructing physical prototypes, a validated simulation tool is essential. This result summarizes the first phase of a project aimed at designing a conceptual 0D/1D model of a hydrogen refueling test rig and verifying key physical models relevant to fast filling.

Hydrogen refueling stations play a crucial role in supporting fuel-cell and hydrogen-combustion vehicles by enabling rapid dispensing of compressed hydrogen—typically at 350 or 700 bar. Fast filling induces significant thermal loads due to gas compression and Joule–Thomson effects; therefore, the hydrogen must be precooled to approximately $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to ensure that the tank temperature does not exceed safety limits ($\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ for Type IV tanks). Achieving stable and safe operation requires precise control of pressure, temperature, and mass flow rate according to standards such as SAE J2601.

One of the major challenges is delivering high mass-flow rates ($> 65\text{ g/s}$) required for heavy-duty applications, where fill time must be minimized. Achieving flows up to 300 g/s is limited by pressure losses in storage and dispensing lines, insufficiently standardized components, and the increasing thermal load that must be removed by highly efficient cooling systems. Elevated flow rates also increase energy demand for compression and precooling and impose strict material requirements due to hydrogen embrittlement risks. As transported hydrogen quantities grow, leak detection and safety system complexity also intensify. These technical and economic challenges motivate ongoing R&D efforts, supported by emerging standards such as SAE J2601/5 (2024), which define safe and efficient fast-filling procedures. Advances in compression, thermal management, and dispensing technology will be crucial for delivering fast, safe, and economically viable hydrogen refueling—especially for heavy-duty vehicles.

Keywords: Hydrogen refueling stations, Fast filling, SAE J2601 / SAE J2601-5, Hydrogen infrastructure, Mass-flow rate $65\text{--}300\text{ g/s}$, 0D/1D simulation

1 Úvod

Rozvoj infrastruktury pro vodíkovou mobilitu vyžaduje spolehlivé a vysoce výkonné plnicí stanice, schopné doplnit nádrž osobního vozidla na tlak 700 bar během několika minut při současném dodržení přísných teplotních limitů definovaných normou SAE J2601. Aby bylo možné nové ventily, chladiče či měřicí techniku pro rychlé plnění bezpečně vyvíjet a kalibrovat ještě před výstavbou prototypové stanice, je nezbytné disponovat ověřeným simulačním nástrojem. Výstupem práce je popis počítačového modelu zařízení pro testování komponent určených pro rychlé plnění vozidel vodíkem. Model již byl úspěšně využit při návrhu koncepčního (0D/1D) modelu testovacího zařízení a umožnil ověřit klíčové fyzikální modely procesů rychlého plnění vodíku.

Vodíkové plnicí stanice představují klíčový prvek podpory elektrických vozidel s palivovými články i vozidel se spalovacími motory na vodík, neboť zajišťují doplňování stlačeného vodíku – typicky na tlak 350 nebo 700 bar – do nádrží vozidel. Musí přitom zajistit nejen rychlé plnění, ale i bezpečný a energeticky efektivní provoz srovnatelný s konvenčními čerpacími stanicemi. Rychlé plnění vyvolává značné tepelné zatížení v důsledku stlačování plynu a Joule–Thomsonova jevu, a proto je nutné médium předchlazovat přibližně na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, aby teplota v nádrži nepřekročila bezpečnostní limit (typicky $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro kompozitní zásobníky). Vlastní výdej probíhá prostřednictvím výdejní pistole s řídicím systémem, který v souladu s příslušnými normami (např. SAE J2601) reguluje tlak, teplotu a hmotnostní průtok vodíku.

Jednou z největších výzev vodíkových plnicích stanic je spolehlivá a bezpečná realizace **vysokých** plnicích průtoků ($> 65\text{ g/s}$), nezbytných pro těžká vozidla, jako jsou nákladní automobily a autobusy, kde je třeba minimalizovat dobu plnění. Klíčovým problémem pro dosažení hmotnostních průtoků 65 g/s až 300 g/s je zvládnutí tlakových ztrát v celém skladovacím a výdejním systému. Zatímco standardní průtoky pro osobní vozidla nepřesahují 60 g/s , cílové hodnoty se stále častěji posouvají k 300 g/s . Tyto vysoké průtoky výrazně zvyšují tepelné zatížení, a proto jsou zapotřebí vysoce účinné chladičské okruhy a pokročilé výměníky tepla, které udrží teplotu v bezpečném rozmezí [1]. Řízení tlaku a průtoku vyžaduje přesné nastavení tlakové rampy (dle SAE J2601/5 pro $60\text{--}300\text{ g/s}$), aby se minimalizovaly tlakové propady a nestability průtoku. Zvýšené hmotnostní průtoky zvyšují ztráty tlaku v potrubí i armaturách, což komplikuje udržení předepsané rampy podle SAE J2601/5. Stále chybí komerčně dostupné, standardizované komponenty (hadice, ventily, pistole) schopné dlouhodobě pracovat při průtocích nad 65 g/s a tlaku 70 MPa , což brzdí interoperabilitu mezi stanicemi a vozidly. Vyšší průtoky rovněž výrazně zvyšují energetické nároky stanice – zejména na kompresi a předchlazování – a tím i provozní náklady a uhlíkovou stopu „well-to-wheel“. Materiálové požadavky se při vysokém tlaku a nízké teplotě dále zpřísňují, protože komponenty musí odolávat vodíkové křehkosti a dalším degradačním mechanismům. Se zvyšujícím se množstvím přepravovaného vodíku stoupají i nároky na detekci úniků a rychlou reakci, což zvyšuje komplexitu bezpečnostních systémů a náklady celé infrastruktury.

Tyto technické a ekonomické výzvy jsou předmětem intenzivního výzkumu a vývoje. Standardizační aktivity, vedené zejména organizací SAE International (např. SAE J2601/5, 2024), definují bezpečné a efektivní postupy pro rychlé plnění vodíku. Pokrok v oblasti kompresní techniky, chlazení

a výdejních systémů bude zásadní pro rychlé, bezpečné a ekonomicky rentabilní plnění vodíku, zejména v těžké dopravě.

2 Modelování vlastností vodíku

Pro správnou simulaci chování vodíku v potrubí, kompresoru a zásobnících je použit **FluidRefrigerant template**, což je typ šablony v GT-Suite určený pro detailní modelování plynů a kapalin s využitím pokročilých termodynamických dat.

Vlastnosti vodíku (např. hustota, entalpie, viskozita) jsou v tomto případě vypočítávány na základě dat z **REFPROP** databáze (oficiální databáze vlastností tekutin vyvíjená americkým NIST) a pomocí rovnice stavu podle Maxwella, která poskytuje přesný popis chování vodíku zejména při vysokých tlacích nebo v oblasti fázových změn.

Tato metoda je doporučeným přístupem v případě modelování vodíku ve formě plynu pod vysokým tlakem (např. 350 nebo 700 bar), nebo dvoufázové proudění (např. kapalný a plynný vodík v systému kryogenního plnění).

REFPROP (Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database), vyvíjený americkým NIST, patří k **nejpřesnějším nástrojům pro výpočet fyzikálních vlastností vodíku**. REFPROP poskytuje teplotně a tlakově závislé transportní vlastnosti, což je zásadní např. pro CFD nebo 1D simulace proudění.

TABULKA 1: TERMODYNAMICKÉ VLASTNOSTI VODÍKU

Veličina	Popis
T (teplota)	K
P (tlak)	Pa, bar
ρ (hustota)	kg/m ³
h (entalpie)	J/kg
s (entropie)	J/kg·K
u (vnitřní energie)	J/kg
cp, cv (měrné tepelné kapacity)	J/kg·K
Z (kompresibilitní faktor)	indikace odchylky od ideálního plynu
μ (viskozita)	Pa·s
λ (tepelná vodivost)	W/m·K
σ (povrchové napětí)	pouze pro kapaliny
Difúzní koeficienty	Pro směsi (např. H ₂ +N ₂)

Tyto vlastnosti jsou důležité např. pro návrh:

- kompresorů a expanzních turbín,

- zásobníků na vodík (vysokotlaké i kryogenní),
- plnicích a dávkovacích systémů,
- palivových článků a spalovacích motorů na H₂,
- simulace proudění v potrubí, ventilech, výměnících,
- návrh **chladičů a izolací**,
- optimalizaci plnicích procesů.

Je využívána **MBWR (Modified Benedict-Webb-Rubin)** rovnice pro širší rozsah, je to **empirická rovnice stavů**, která poskytuje velmi přesný popis termodynamického chování **reálných plynů**, zejména při vysokých tlacích a teplotách, včetně fázových přechodů. Pro vodík je nejlepším řešením do tlaku přes 1000 bar v rozsahu teplot 14 K až 1000 K. MBWR rovnice má tvar:

$$P = \rho RT + \left(B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} \right) \rho^2 + (bRT - a) \rho^3 + a\alpha \rho^6 + \frac{c\rho^3}{T^2} (1 + \gamma \rho^2) e^{-\gamma \rho^2}$$

kde:

- P = tlak,
- ρ = hustota,
- T = teplota,
- R = plynová konstanta,
- Ostatní jsou látkové konstanty určené fitováním experimentálních dat.

Tato rovnice je schopna přesně popsat plynné, kapalně i dvoufázové oblasti.

Právě využít tohoto přístupu je unikátní a poskytuje velice přesné výsledky při vyšší výpočtové náročnosti. Vzhledem k tomu, že je využit převážně 1D přístup je to stále časově přijatelné. Bylo testováno i řešení založené na freewarovém řešení CoolProp, ale výsledky nebyly uspokojivé.

3 Koncepce testovacího zařízení

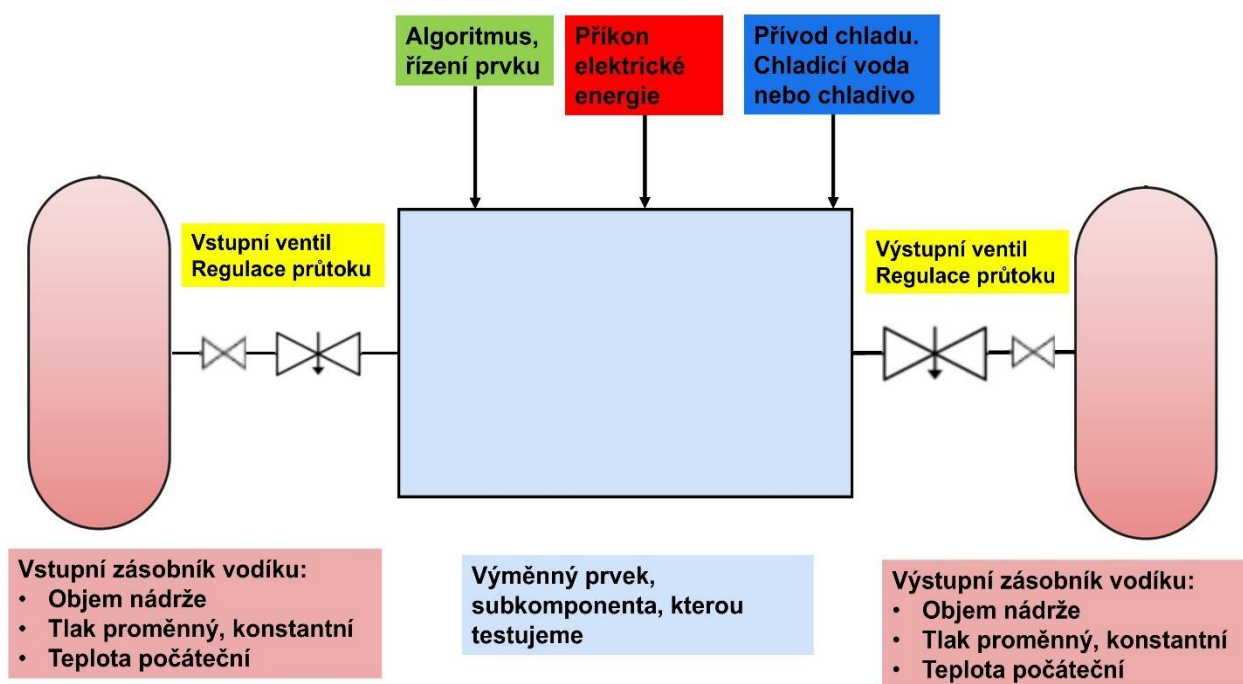
Cílem navrhovaného počítačového model zařízení pro testování komponent pro rychlé plnění vozidel vodíkem je umožnit vývoj a validaci komponent plnicích stanic vodíku – armatur, kompresorů, výměníků či hadic – až do tlaků 900 bar, hmotnostních průtoků 300 g·s⁻¹ a teplot -40 °C až 85 °C, aniž by bylo třeba stavět nákladné fyzické zkušební pracoviště. V GT-Suite jsme proto vytvořili idealizovanou, ale dostatečně věrnou topologii, která se skládá ze čtyř navazujících částí: zdrojové nádrže, testovací sekce („cartridge“), regulačního prvku a přijímací nádrže.

Zdrojová nádrž reprezentuje buď banku tlakových lahví, tube-trailer, nebo dokonce napájení z vodíkovodu. Její počáteční stav – objem, tlak a teplota – lze zvolit libovolně; navíc ji lze provozovat v režimu konstantního tlaku, čímž se simuluje prakticky neomezený zdroj. Na ni navazuje testovací sekce: zde uživatel jednoduše vkládá model právě zkoušené komponenty (ventil, škrticí clonu, e-kompresor, chladič apod.). Každý prvek je načten jako samostatný submodel s vlastními mapami charakteristik, takže výměna komponenty znamená pouhou výměnu souboru, nikoli přepracování celé sítě.

Za testovaným prvkem je umístěn regulační ventil, jehož chování řídí PID algoritmus nebo look-up tabulka; tím lze nastavit libovolnou tlakovou rampu, průtok či teplotní profil, které norma SAE J2601 vyžaduje. Poslední částí je přijímací nádrž, která může představovat nádrž vozidla, jednoduchý testovací válec, a nebo – pokud nastavíme nulový tlak – výtok do volné atmosféry. U všech nádrží jsou definovány materiálové vlastnosti stěn, takže GT-Suite počítá i přestup tepla do okolí a průběh teploty stěny při rychlém plnění.

Virtuální stav lze provozovat v několika režimech bez jakékoli změny hardwaru. Při kaskádovém plnění se zdrojová nádrž chová jako banka dvou až tří lahví, které se automaticky přepínají a minimalizují ztráty expanzí. Při kritickém škrcení naopak nastavíme testovací sekci na škrticí trysku a sledujeme vznik sonického proudění a tlakových rázů. Chceme-li studovat účinnost e-kompresoru, vložíme jeho mapu, přidáme elektrický pohon a zkoumáme spotřebu i odvod tepla. Stejný model lze použít i pro simulaci stálého odběru z vodíkovodu s konstantním tlakem.

Veškeré veličiny – tlak, teplota, průtok, entalpie, příkon kompresoru či výkon výměníku – se ukládají jako časové řady. Uživatel tak z jedné simulace získá délku plnicího cyklu, teplotní špičky v plynu i na stěně, energetickou účinnost stanice ($\text{kWh kg}^{-1} \text{H}_2$) a další klíčové ukazatele. Součástí modelu jsou také bezpečnostní hlídače: pokud tlak překročí mez, teplota stěny kompozitní nádrže stoupne nad 85°C nebo rychlost nárůstu tlaku přesáhne $10 \text{ bar}\cdot\text{s}^{-1}$, simulace vygeneruje alarm a uloží detailní diagnózu.



OBRAZEK 1: SCHÉMA VIRTUÁLNÍHO TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

Virtuální stav tak odstraňuje rizika práce s fyzickým vodíkem, zkracuje vývojové iterace z týdnů na minuty a dává konstruktérům možnost rychle porovnávat varianty – například různé topologie chladiče, délky hadic či průměr škrticích trysek – ještě předtím, než objednájí jediný prototyp. Následné kroky zahrnují kalibraci modelu podle experimentálních dat, rozšíření knihovny

testovacích komponent a nasazení automatizovaného plánování experimentů, které umožní optimalizovat parametry stanice s ohledem na čas plnění, energetickou bilanci i bezpečnostní rezervy.

TABULKA 2: KONCEPČNÍ ARCHITEKTURA MODELU

Blok	Popis	Klíčové volitelné parametry
Nádrž A (zdroj)	Reprezentuje buffer, tube-trailer nebo vodíkovod.	V_A , p_A , T_A (Ize zapnout regulaci na konstantní tlak – simulace nekonečného zdroje).
Testovací sekce („cartridge“) B	Uživatel zde vyměňuje zkoušený komponent: ventil, škrticí clonu, chladič, e-kompresor, hadici...	Otvor pro vkládání šablon, každý prvek má vlastní mapy (K-factory, kompresorové mapy, účinnostní pole výměníku).
Řídicí prvek C	Redukční ventil/škrticí ventil řízený PID, fuzzy logikou nebo look-up tabulkou (případně externí Simulink).	Set-point: p_{Down} , T_{Down} , $\dot{m}_{\text{Target}}$, parametry PID (K_P , K_I , K_D), hysteréze.
Nádrž D (příjemce)	Nahrazuje nádrž vozidla, testovací válec, případně „volný prostor“ ($p = 1$ bar).	V_D , $p_{D,\text{start}}$, $T_{D,\text{start}}$, materiál stěny (pro výpočet T_{wall}).

TABULKA 3: REŽIMY PROVOZU

Režim	Účel	Klíčové nastavení
Kaskádové plnění	Simulace čerpací stanice s více bankami.	Nádrž A nastavena na „TankGroup“ → sekvenční přepínání.
Kritické škrcení	Test armatury $>65 \text{ g s}^{-1}$	Throttle element + Sonic choked flow + Δp monitoring.
Modul e-kompresor	Test účinnosti kompresoru + rekuperace tepla.	Cartridge = <i>Compressor map</i> + elektrický pohon; přídavný chladič.
Vydatnost vodíkovodu	Stálý $\dot{m}$ z trubního vedení.	Nádrž A: <i>Constant pressure</i> + <i>MassSource</i> .
Odlehčovací ventil	Ověření bezpečnostního bloku.	Cartridge = PRD (pressure relief device) při 900 bar.

Tabulka 4: POST-PROCESSING A KPI

Kategorie	Výstupy	Vyhodnocení
Termodynamika	$p(t)$, $T(t)$, $\dot{m}(t)$, $h(t)$ v každém uzlu	Ověření SAE J2601 ($\Delta T < +85 \text{ }^\circ\text{C}$)
Energetika	Příkon kompresoru, $\dot{Q}$ ve výměníku	$\text{kWh kg}^{-1} \text{ H}_2$, COP chladicího okruhu
Bezpečnost	Peak p , Peak T_{wall} , Δp ramp rate	ISO 19880-1
Doba cyklu	t_{fill} , idle time, duty cycle	Návrh kapacity stanice

3.1 Typický testovací scénář

Inicializace: $V_A = 250 \text{ l}$, $p_A = 450 \text{ bar}$, $T_A = 25 \text{ °C}$; $V_D = 50 \text{ l}$, $p_D = 20 \text{ bar}$, $T_D = -40 \text{ °C}$.

Cartridge: vkládá se nový výměník spirálového typu ($UA = 3,5 \text{ kW K}^{-1}$).

Kontrolér: ramp-up $\dot{m} = 120 \text{ g s}^{-1}$ řízený look-up tabulkou: p_D vs dp/dt .

Simulace 0-400 s: sledování p , T obou nádrží, ΔT přes výměník, práce kompresoru.

Výstup: Report s křivkami a tabulkou KPI; porovnání s předchozí cartridge.

3.2 Hlavní výhody virtuálního stavu

Nulová rizika: žádný vysokotlaký vodík v laboratoři.

Rychlé iterace: výměna komponent = změna submodelu; výsledek během minut.

Škálovatelnost: od LDV (60 g s^{-1}) až po HDV (300 g s^{-1}) beze změny hardwaru.

Nízké náklady: jediné investice = licence GT-Suite a inženýrský čas.

Validace před fyzickým testem: vyselektuje nevyhovující koncepty, sníží počet prototypů.

4 Příklad výsledků

4.1 Příklad řešení kaskádového plnění

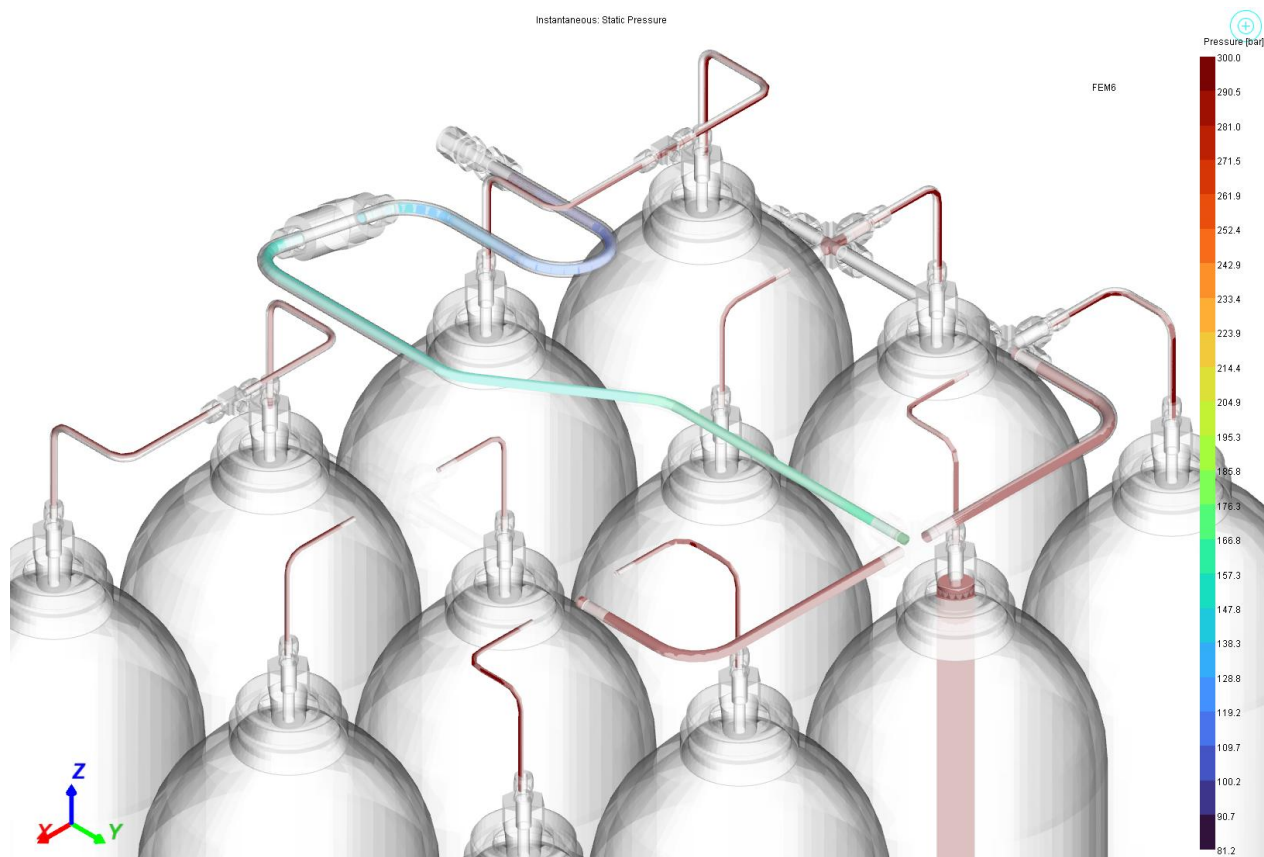
1D simulace jsou velmi rychlou a efektivní metodou pro výpočet tlakových ztrát a parametrů proudění v komplexních systémech, jako jsou například plnicí stanice na vodík.

Simulační model představuje vodíkovou plnicí stanici s rychlým plněním, založenou na parametrech reálné stanice umístěné ve Vítkovicích v České republice. Modelovaný minimální požadovaný hmotnostní průtok v tomto případě činí $60 \text{ g H}_2/\text{s}$. Prezentované výsledky byly získány pomocí simulací v softwaru GT-Suite s využitím zásuvného modulu GEM-3D.

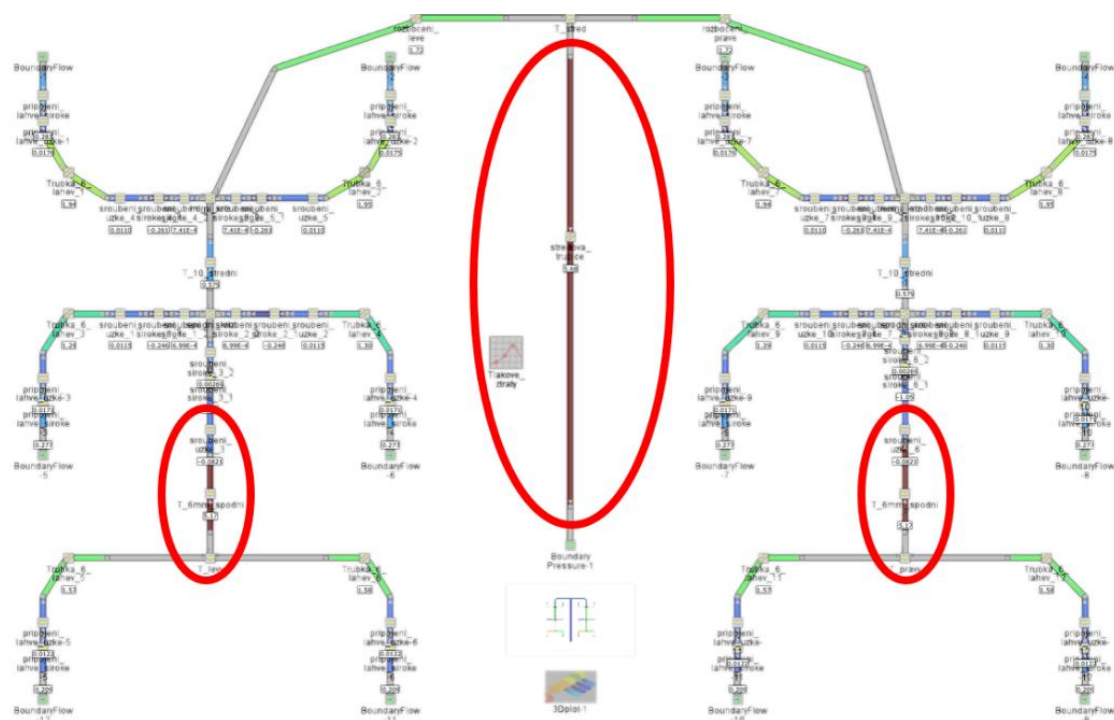
Simulace byly prováděny pro různé podmínky, jako jsou počáteční a okolní podmínky a počáteční tlak v plněné nádrži. Analyzovanou částí byl sběrač propojující všechny lahve do jednoho výstupního potrubí. Simulace probíhaly v rozsahu hmotnostního průtoku vodíku na výstupu mezi 60 a 300 g/s a při počátečních tlacích v lahvích mezi 150 a 300 bar . Počáteční tlak v plněné nádrži byl nastaven na 5 bar . Cílem bylo analyzovat celé potrubí a identifikovat nejkritičtější místa z hlediska tlakových ztrát.

Vytvoření modelu pro analýzu tlakových ztrát vyžadovalo převod 3D geometrie potrubí do 1D simulační domény pomocí nástroje GEM-3D. Z této geometrie byl následně vytvořen simulační model, který lze využívat v prostředí GT-Suite. Převedená geometrie je znázorněna na následujícím obrázku 2.

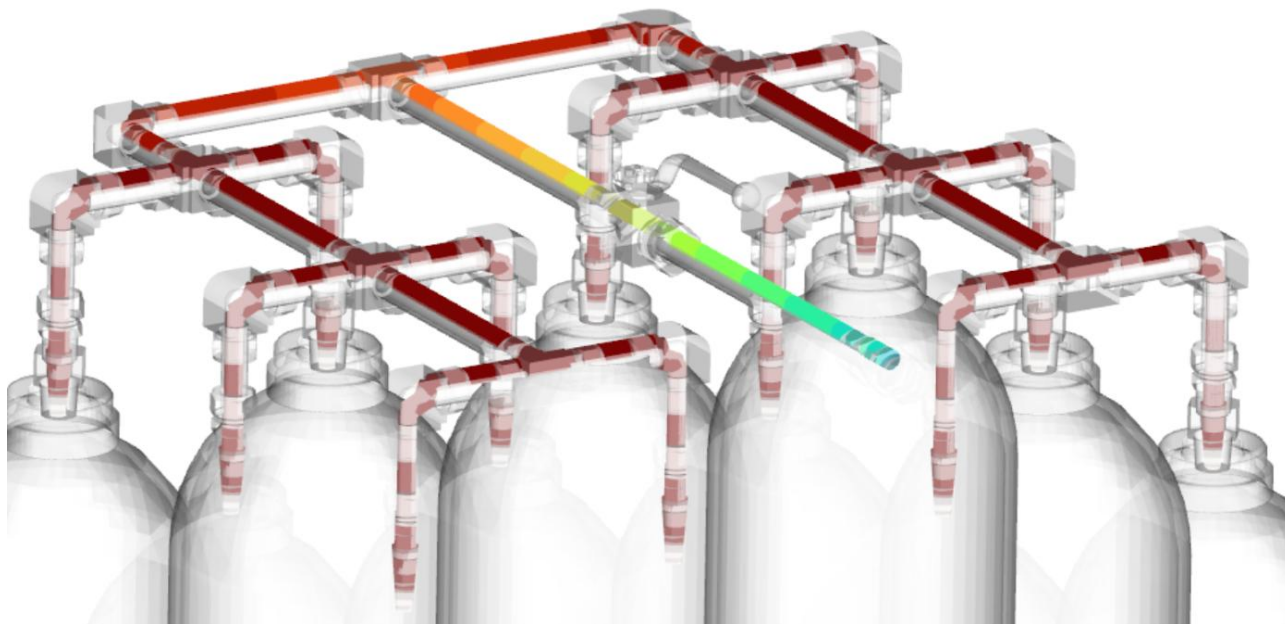
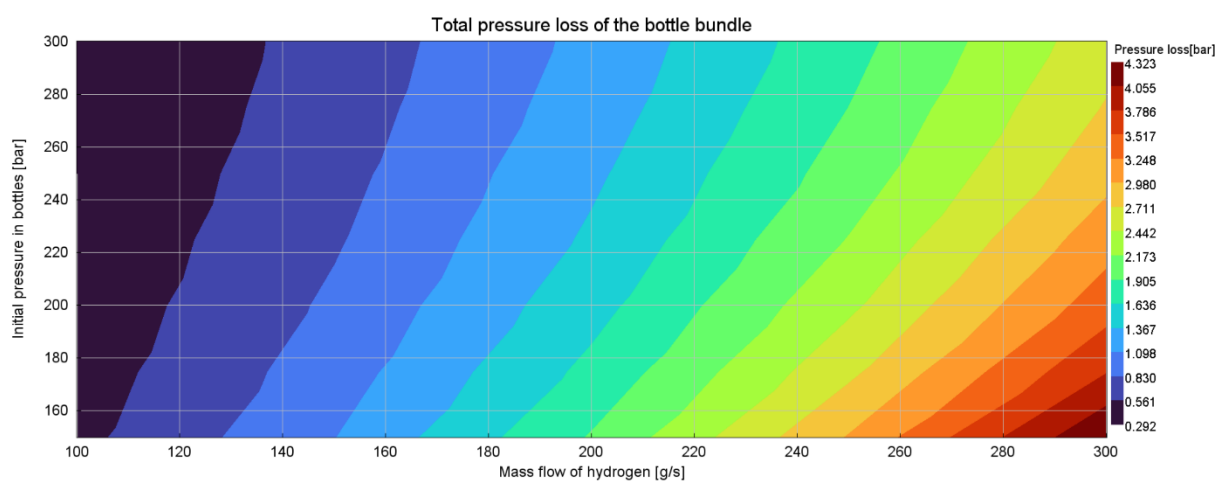
První návrh modelu svazku se skládal z trubek o průměru 6 mm , které byly následně napojeny na širší trubku o průměru 12 mm (viz obrázek 3). Tato trubka vedla středem svazku a byla tvarována tak, aby výstupní přípojka svazku byla ve požadované poloze (jak horizontálně, tak vertikálně).

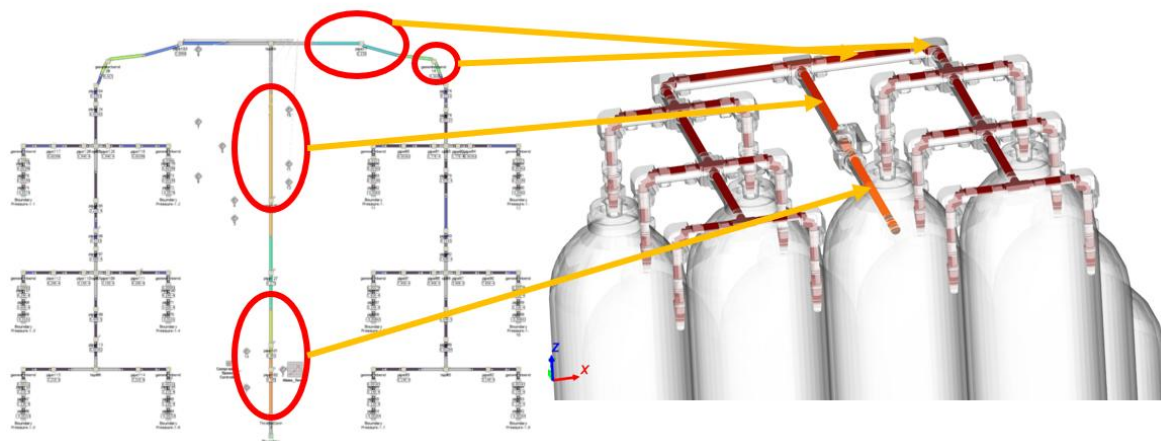
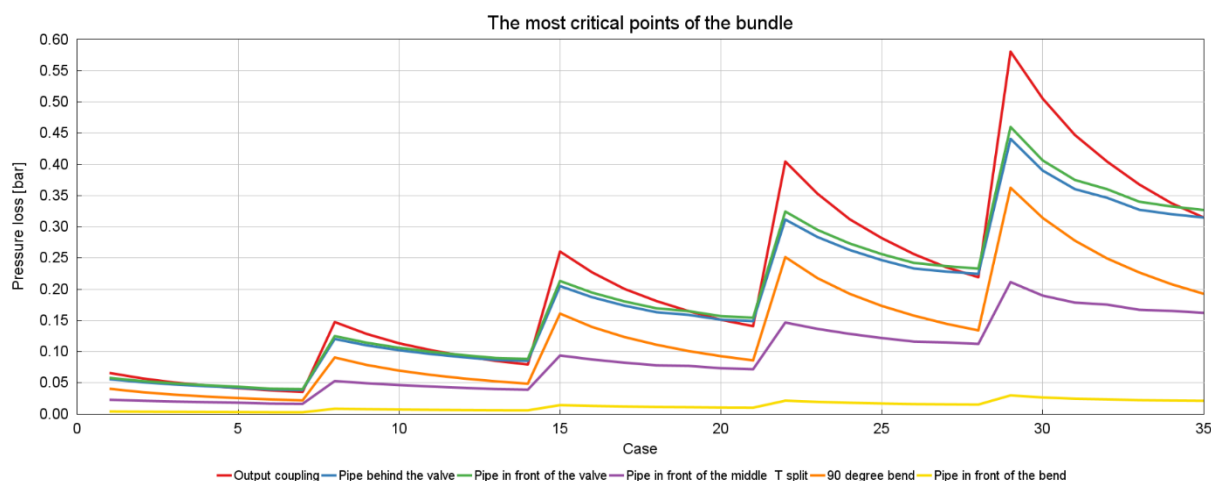


OBRÁZEK 2: MODEL SVAZKU VODÍKOVÝCH LAHVÍ



OBRÁZEK 3: NEJKRITIČTĚJŠÍ MÍSTA PŮVODNÍHO NÁVRHU SVAZKU LAHVÍ

**OBRAZEK 4: UPRAVENÝ SVAZEK LAHVÍ****OBRAZEK 5: CELKOVÁ TLAKOVÁ ZTRÁTA SVAZKU LAHVÍ**

**OBRAZEK 6: UMÍSTĚNÍ NEJKRITICKĚJŠÍCH MÍST SVAZKU****OBRAZEK 7: NEJKRITICKĚJŠÍ MÍSTA SVAZKU**

4.2 Testování redukčního ventilu

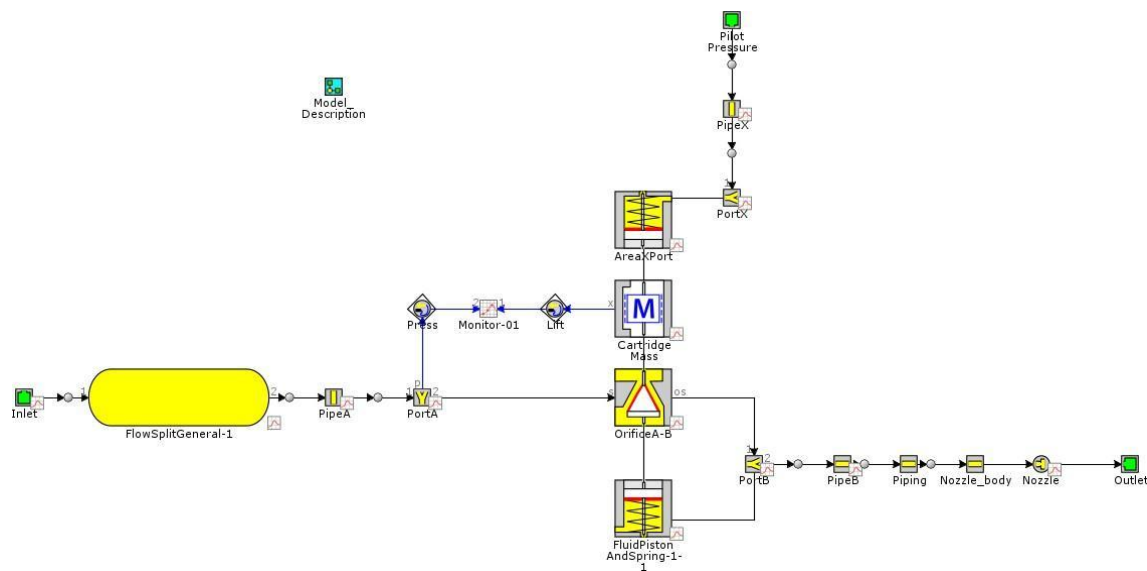
K ověření chování regulátoru tlaku je využito programu GT suite, simulační model se skládá z nádrže o objemu 250 l, dále samotného regulátoru tlaku, který se v programu sestává z jednotlivých komponentů. Tento model se snaží co nejpřesněji napodobit navržený ventil, v části ventilu s velkou pružinou je atmosférický tlak. Po redukčním ventilu je zařazeno potrubí a plyn volně expanduje do atmosféry, tedy není simulován odběr hnacím ústrojím.

Průměrný tlak za regulátorem dosahuje 10,47 MPa. Průměrná teplota se při průchodu regulátorem zvýšila o 10 °C, přičemž teplota osciluje mezi 308 až 312 K. Průměrné množství dodaného paliva dosahuje 6 g/s, což odpovídá 0,26 l/s, toto množství je více než dostatečné pro pohon osobního automobilu, obvyklý odběr hnacích ústrojí se pohybuje okolo 3 g/s.

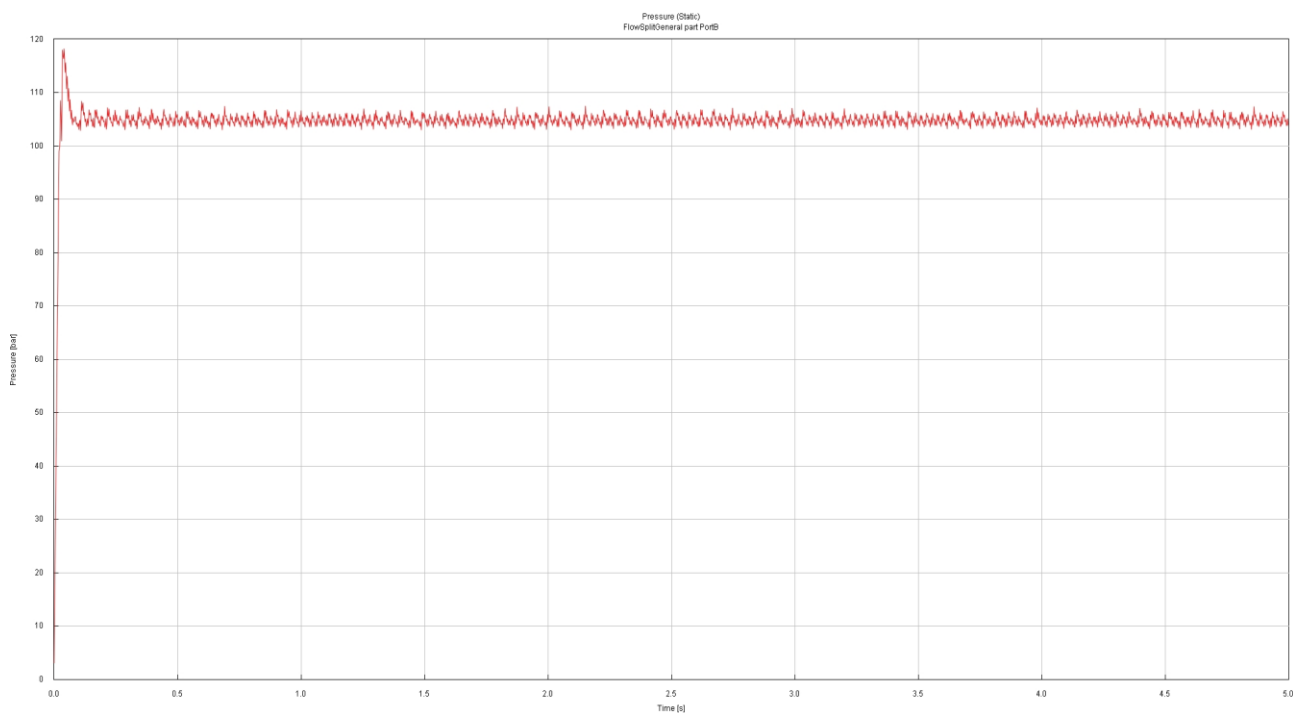
Mezi další užitečné informace patří zjištění pohybu pístu, který se pohybuje v rozmezí 0 až 0,1 mm, dále síla vyvíjená vrchní tlačnou pružinou dosahuje nižších rozdílů sil, než se předpokládalo v návrhových výpočtech, amplitudové napětí tedy bude v realitě dosahovat nižších hodnot, u malé

tlačné pružiny lze předpokládat i nižší smykové napětí, tedy ještě vyšší bezpečnost. Dále lze z výsledků z programu GT suite usuzovat, že únavové napětí všech komponentů bude nižší, než se předpokládalo.

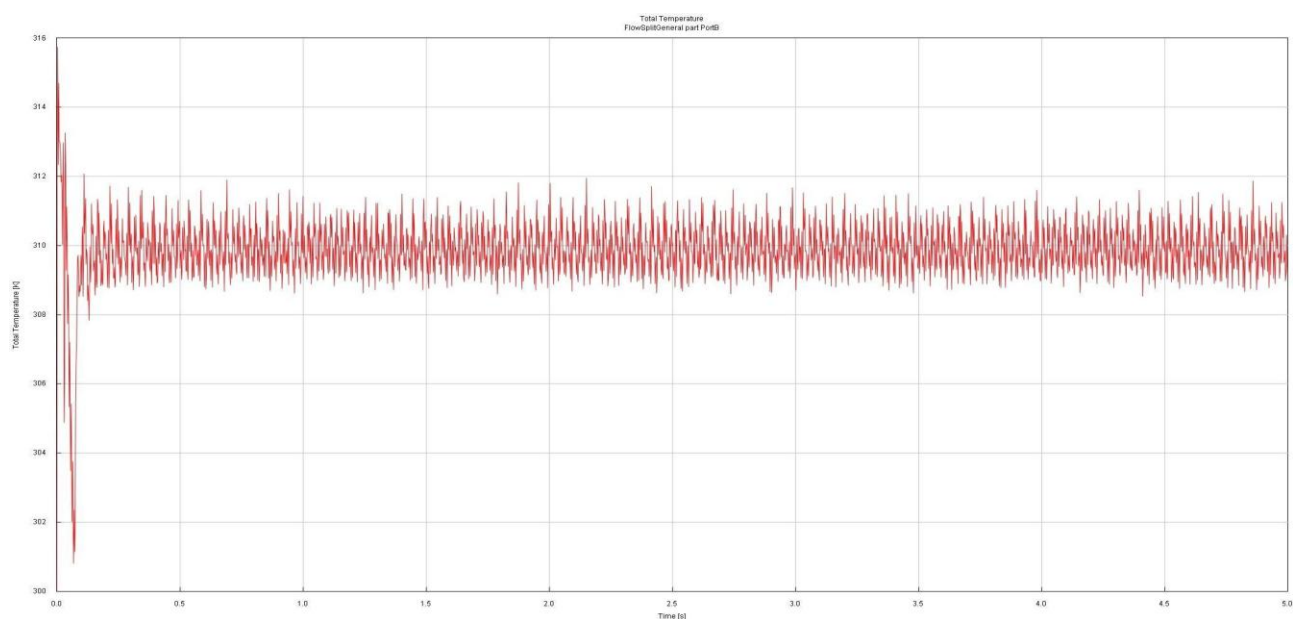
Regulace tlaku vodíku probíhá prostřednictvím nastavovacího kolečka, kterým se upravuje předpětí pružiny. Měření teploty a tlaku vodíku po průchodu redukčním ventilem je vhodné umístit až do potrubí za ventil, především z důvodů pulzací, ke kterým dochází ve ventilu při škrcení vodíku.



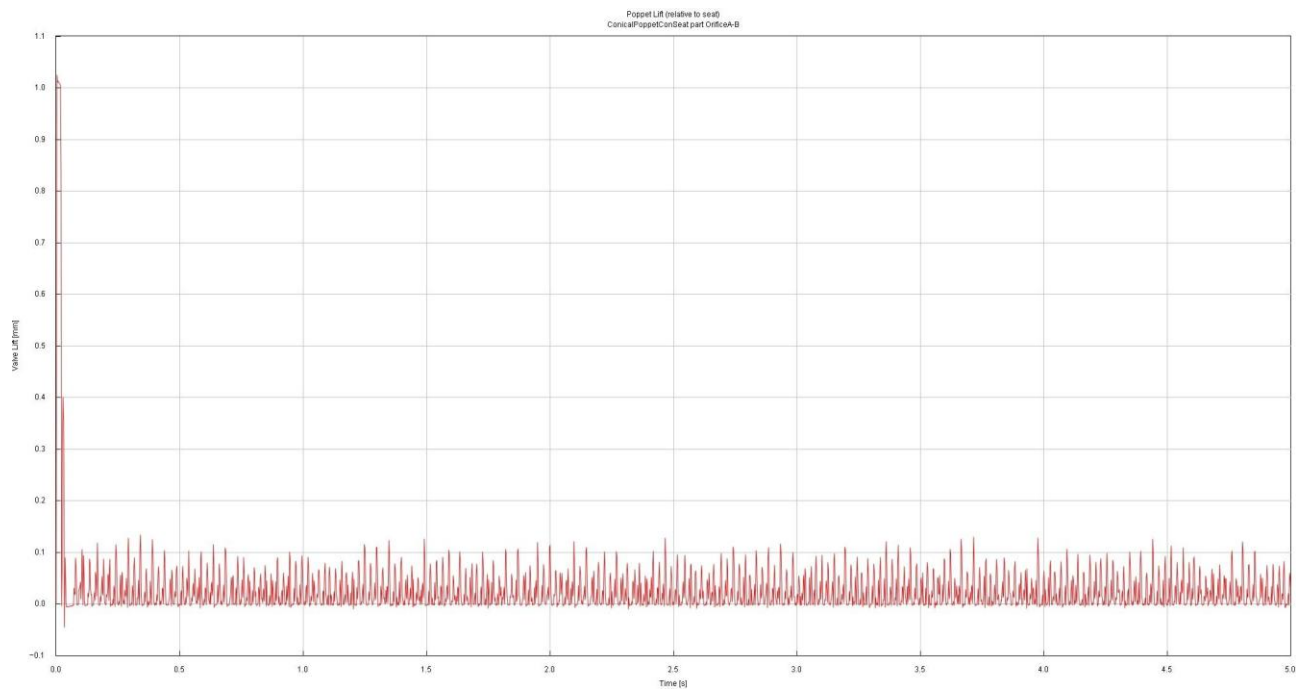
OBRAZEK 8: MODEL V PROGRAMU GT SUITE



OBRAZEK 9: PRŮBĚH TLAKU PŘI PRŮCHODU REDUKČNÍM VENTILEM



OBRÁZEK 10: PRŮBĚH TEPLOTY PŘI PRŮCHODU REDUKČNÍM VENTILEM



OBRÁZEK 11: POHYB PÍSTU REGULÁTORU

5 Použitá literatura

- [1] NREL (National Renewable Energy Laboratory). (průběžně aktualizováno). Hydrogen Fueling Infrastructure Analysis. [Online]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/hydrogen/hydrogen-infrastructure-analysis.html>
- [2] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Hydrogen Fueling Infrastructure Analysis. 2025. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/hydrogen/hydrogen-infrastructure-analysis>
- [3] Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles. Warrendale: SAE International, 2020. Dostupné z: https://www.sae.org/standards/content/j2601_202005/
- [4] Quong, S. High Pressure, High Flow Rate Dispenser and Nozzle Assembly for Heavy Duty Vehicles. Electricore, Inc., 2023. Dostupné z: https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review23/ta049_quong_2023_o-pdf.pdf
- [5] SAE International. SAE J2601/5: High-Flow Prescriptive Fueling Protocols for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles. Warrendale: SAE International, 2025. Dostupné z: https://www.sae.org/standards/content/j2601/5_202502/
- [6] KLELL, Manfred, EICHLSEDER, Helmut a TRATTNER, Alexander. Hydrogen In Automotive Engineering. Graz : Springer, 2023. ISBN 978-3-658-35060-4
- [7] SAE INTERNATIONAL. Standard for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen
- [8] Vehicles [online]. 3. 2023, 108 s. [cit. 2025-02-26]. Dostupné také z: https://doi.org/10.4271/J2579_202301
- [9] SAE INTERNATIONAL. Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles [online]. 5. 2020, 11 s. [cit. 2025-02-26]. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/J2719_202003

6 Seznam obrázků

Obrázek 1: SCHÉMA VIRTUÁLNÍHO TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ.....	9
Obrázek 2: MODEL SVAZKU VODÍKOVÝCH LAHVÍ.....	12
Obrázek 3: NEJKRITIČTĚJŠÍ MÍSTA PŮVODNÍHO NÁVRHU SVAZKU LAHVÍ	12
Obrázek 4: UPRAVENÝ SVAZEK LAHVÍ.....	13
Obrázek 5: CELKOVÁ TLAKOVÁ ZTRÁTA SVAZKU LAHVÍ	13
Obrázek 6: UMÍSTĚNÍ NEJKRITIČTĚJŠÍCH MÍST SVAZKU	14
Obrázek 7: NEJKRITIČTĚJŠÍ MÍSTA SVAZKU	14
Obrázek 8: MODEL V PROGRAMU GT SUITE.....	15
Obrázek 9: PRŮBĚH TLAKU PŘI PRŮCHODU REDUKČNÍM VENTILEM	15
Obrázek 10: PRŮBĚH TEPLoty PŘI PRŮCHODU REDUKČNÍM VENTILEM.....	16
Obrázek 11: POHYB PÍSTU REGULÁTORU	16

7 Seznam tabulek

Tabulka 1: TERMODYNAMICKÉ VLASTNOSTI VODÍKU	7
Tabulka 2: KONCEPČNÍ ARCHITEKTURA MODELU	10
Tabulka 3: REŽIMY PROVOZU	10
Tabulka 4: POST-PROCESSING A KPI	10