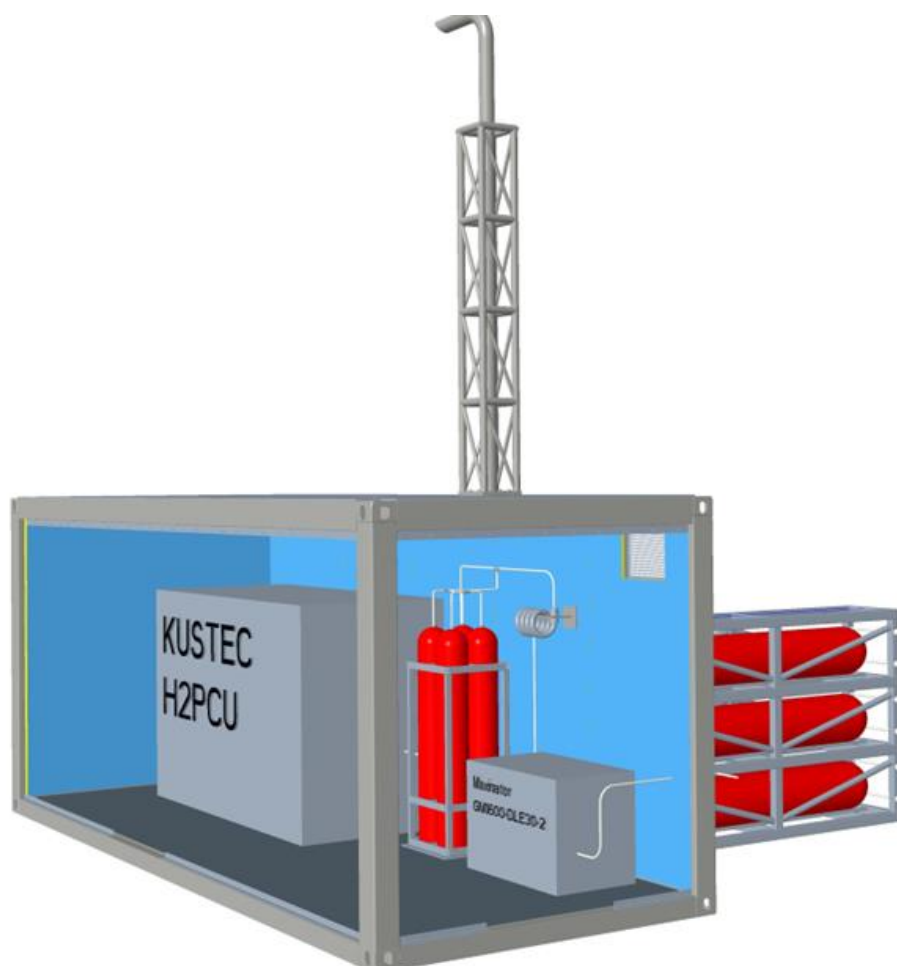


Komplexní 1D výpočetní model plnicí vodíkové stanice pro optimalizaci a ověřování koncepce a konstrukce



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

NÁZEV VÝSLEDKU

Komplexní 1D výpočetní model plnicí vodíkové stanice pro optimalizaci a ověřování koncepce
a konstrukce

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.

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.

Obsah

1	Úvod	6
2	Modelování vlastností vodíku	7
3	Výhody 1D simulace proudění ve vodíkových plnicích stanicích v GT-Suite	9
3.1	Výhody simulace v prostředí v GT-Suite	9
4	Plněná vozidla	12
4.1	Obecná struktura: Co musí mít model plněného vozidla	12
4.2	Model osobního vozidla (např. Toyota Mirai)	12
4.3	Model autobusu (např. Hyundai Elec City)	13
4.4	Model nákladního kamionu (např. Hyundai XCIENT)	13
4.5	Řízení přepínání mezi typy vozidel.....	13
5	Podklady pro vytvoření modelu.....	14
6	Konstrukční parametry plnicí stanice	16
6.1	Vlastnosti výstupních větví – modely vozidel	17
6.2	Možnosti zařazení 3D prvků do modelů	19
6.3	Sestavení a struktura modelu vodíkového hospodářství v GT-Suite	20
6.3.1	Část před vysokotlakým zásobníkem	20
6.3.2	Vysokotlaký zásobník (bufferová sekce)	21
6.3.3	Část za vysokotlakým zásobníkem (plnění nádrží vozidla)	22
6.4	Příklad nastavení proměnných veličin	23
7	Příklady výsledků.....	25
8	Použitá literatura	28
9	Seznam příloh.....	29
10	Seznam obrázků	30
11	Seznam tabulek.....	31

Abstrakt

Přechod od konvenčních paliv k alternativním zdrojům energie se zrychluje a vodík v něm zaujímá klíčovou roli při budoucí dekarbonizaci dopravy i průmyslu. Vodíkové technologie – včetně vodíkových spalovacích motorů a palivových článků – představují strategický prvek evropské i národní energetické transformace. Současně s tímto vývojem roste také poptávka po související infrastruktuře, zejména po efektivních a spolehlivých vodíkových plnicích stanicích.

Jednou z hlavních výzev při vývoji těchto stanic je zvládnutí složitých termodynamických jevů, které doprovázejí plnění vodíkových nádrží pod vysokým tlakem (až 700 bar). Přísné požadavky na bezpečnost, účinnost, rychlost plnění a minimalizaci tepelných ztrát vyžadují detailní analýzu proudění, tlakových ztrát, změn teploty a fázových jevů během celého procesu plnění. Tradiční přístupy založené na zjednodušených analytických modelech nebo empirických korelacích často již nestačí, zejména při vývoji nových koncepcí nebo optimalizaci stávajících technologií.

Z tohoto důvodu je nezbytné vytvořit komplexní 1D výpočetní model vodíkové plnicí stanice, který zahrnuje všechny klíčové prvky systému – od zásobníkových nádrží a kompresorů přes řídicí a bezpečnostní prvky až po výdejní část a vlastní nádrž vozidla. Takový model umožňuje nejen realistické simulace provozu, ale také rychlé testování alternativních konstrukčních řešení, vývoj řídicích strategií a ověřování koncepčních návrhů ještě před fyzickým prototypováním.

Klíčová slova: vodíkové technologie, vodíková infrastruktura, vodíková plnicí stanice, vysokotlaké plnění, termodynamika vodíku, 1D simulační model

Abstract

The transition from conventional fuels to alternative energy sources is accelerating, with hydrogen taking a central role in the future decarbonization of both transportation and industry. Hydrogen technologies—including hydrogen internal combustion engines and fuel cells—represent a strategic element of both European and national energy transformation efforts. Alongside this development, the demand for supporting infrastructure is also increasing, particularly for efficient and reliable hydrogen refueling stations.

One of the main challenges in developing such stations lies in managing the complex thermodynamic phenomena that occur during high-pressure hydrogen tank refueling (up to 700 bar). The stringent requirements for safety, efficiency, refueling speed, and minimizing thermal losses necessitate a detailed analysis of flow dynamics, pressure drops, temperature changes, and phase transitions during the filling process. Traditional approaches based on simplified analytical models or empirical correlations are often no longer sufficient, especially when developing new system concepts or optimizing existing technologies.

For this reason, it is essential to create a comprehensive 1D computational model of a hydrogen refueling station that incorporates all key elements of the system—from storage tanks and compressors to control and safety devices, and finally the dispenser and vehicle tank itself. Such a model enables not only realistic operation simulations but also rapid testing of alternative design solutions, development of control strategies, and validation of conceptual designs well before physical prototyping.

Keywords: hydrogen technologies, hydrogen infrastructure, hydrogen refueling station, high-pressure fueling, hydrogen thermodynamics, 1D simulation model

1 Úvod

V současné době dochází ke zrychlujícímu se přechodu od konvenčních paliv k alternativním zdrojům energie, přičemž vodík zaujímá klíčové místo v budoucí dekarbonizaci dopravy i průmyslu. Vodíkové technologie, včetně vodíkových spalovacích motorů a palivových článků, představují strategickou součást evropské i národní energetické transformace. Ruku v ruce s tímto vývojem roste i potřeba infrastruktury, zejména efektivních a spolehlivých **vodíkových plnicích stanic**.

Jednou z hlavních výzev při vývoji těchto stanic je zvládnutí složitých termodynamických jevů, jež provázejí plnění vodíkových nádrží pod vysokým tlakem (až 700 bar). Vysoké nároky na bezpečnost, účinnost, rychlost plnění i minimalizaci tepelných ztrát vyžadují **podrobnou analýzu dynamiky proudění, tlakových ztrát, teplotních změn a fázových přechodů** během plnění. Tradiční přístupy založené na jednoduchých analytických modelech nebo empirických korelacích již často nedostačují, zejména při vývoji nových koncepcí zařízení nebo při snaze o optimalizaci stávajících systémů.

Z tohoto důvodu je klíčové vytvořit **komplexní 1D výpočetní model vodíkové plnicí stanice**, který bude zahrnovat všechny důležité části řetězce – od zásobníků a kompresorů přes regulační a bezpečnostní prvky až po samotné plnicí rameno a nádrž vozidla. Takový model umožní nejen **simulaci reálného provozu**, ale také **rychlé testování alternativních konstrukčních řešení, vývoj regulačních strategií a ověření koncepčních návrhů ještě před jejich fyzickým prototypováním**.

Proč je tento model nezbytný:

- **Pro výzkum a vývoj:** Umožňuje ověřování hypotéz a návrhů bez nutnosti nákladných a časově náročných experimentů. Poskytuje hlubší porozumění vlivu jednotlivých parametrů na celý systém.
- **Pro průmyslové partnery a komerční využití:** Umožňuje zkrácení doby uvedení produktů na trh, optimalizaci nákladů a zvýšení bezpečnosti provozu. Podporuje také rozhodování při investicích do infrastruktury.
- **Pro standardizaci a legislativu:** Podporuje tvorbu technických směrnic a norem prostřednictvím validovaných a trasovatelných výsledků.
- **Pro digitální dvojče stanice:** Slouží jako základ pro online monitorování, prediktivní údržbu a chytré řízení stanic.

Výsledkem bude nástroj, který je možné využít jak při návrhu nových zařízení, tak při **simulaci provozních scénářů, krizových stavů nebo poruch**, a to jak v akademickém výzkumu, tak ve vývojových týmech průmyslových firem zabývajících se výstavbou nebo provozem vodíkových plnicích stanic.

Komplexní 1D model se tak stává **nezbytnou součástí inženýrského vývoje** v oblasti vodíkových technologií a důležitým prvkem v infrastrukturní transformaci, která je v souladu s evropskými i českými cíli udržitelné mobility a energetické soběstačnosti.

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, že modelujete vodík ve formě plynu pod vysokým tlakem (např. 350 nebo 700 bar), nebo dvoufázové proudění (např. kapalný a plyný 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
c_p, c_v (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 využit 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 Výhody 1D simulace proudění ve vodíkových plnicích stanicích v GT-Suite

GT-Suite umožňuje simulovat tok plyných médií v potrubních a regulačních systémech v **jednorozměrném (1D) rámci**, což přináší **optimální poměr mezi přesností a výpočetní náročností**. Konkrétně u **vodíkových plnicích stanic** má 1D simulace tyto klíčové výhody:

- **Rychlé a flexibilní simulace komplexních sítí,**
- Možnost modelovat **celý plnicí systém**: kompresory, potrubí, ventily, chladiče, zásobníky i vozidlovou nádrž.
- Lze snadno měnit parametry systému (tlak, teplota, geometrie) a sledovat dopady na **rychlost plnění, tepelné zatížení a spotřebu energie**.
- Umožňuje **sériové i paralelní** konfigurace zásobníků a **přepínání** větví podle tlakové logiky.
- **Dynamické řízení procesu (plnění/odlehčování).**
- GT-Suite umožňuje definovat **logiku plnění** na základě času, tlaku, hmotnosti, průtoku nebo teploty.
- Podpora **sekvenčního plnění** (např. T40–T30–T20) podle protokolu SAE J2601.
- Reálná simulace **zpětného ohřevu plynného H₂** během plnění vozidla (adiabatické stlačení a výměna tepla s okolím).
- **Tepelné chování systému.**
- Možnost detailního modelu tepelné kapacity potrubí a zařízení.
- Simulace vlivu **výměníků tepla a chladičů** před vstupem do nádrže – důležité pro **chlazení paliva při T40**.
- Lze integrovat **tepelné toky do okolí**, tedy vliv izolace, slunečního záření a akumulace tepla v systému.
- **Predikce naplněného množství a doby plnění.**
- Model umožňuje určit:
 - **čas potřebný k naplnění nádrže** na 350/700 bar,
 - **množství přenesené energie** (entalpie),
 - vliv **počátečního tlaku a teploty** vozidlové nádrže (např. letní vs. zimní podmínky),
 - přehřátí plynného H₂ – detekce, zda není dosažen teplotní limit ISO 19880-1.
- **Integrace s řídicí logikou (Control Objects).**
- V GT-Suite lze plně simulovat:
 - řídicí algoritmy ventilů (např. PID nebo look-up tabulku),
 - **zpětnou vazbu** na základě tlaků a teplot v různých bodech,
 - **bezpečnostní logiku** (vypnutí při překročení mezí).

3.1 Výhody simulace v prostředí v GT-Suite

Vysokotlaký vodík proudí rychle, má nízkou viskozitu a vysoký podíl stlačitelnosti – proto je **správná simulace tlakových ztrát** klíčová. GT-Suite nabízí:

1) Přesné výpočty pro stlačitelný plyn.

- GT-Suite řeší **základní rovnice hmotnosti, hybnosti a energie** s ohledem na **stlačitelnost plynů**.
- Zohledňuje **lokální ztráty** (ventily, ohyby, škrticí prvky) i **rozložení tlakových spádů v potrubí**.

2) Automatický výpočet Re, ztrátových součinitelů a M čísla

- GT-Suite dynamicky přepíná mezi laminárním a turbulentním prouděním.
- Vysoké rychlosti vodíku běžně dosahují **Machova čísla $> 0,3$** – GT-Suite zohledňuje i tyto efekty.
- Možnost zadání **vlastních K-faktorů** pro specifické armatury.

3) Rychlá optimalizace návrhu

- Možnost okamžitě analyzovat:
 - zda daný průměr potrubí nevede k neúnosné tlakové ztrátě,
 - jak změna průřezu, materiálu nebo povrchové drsnosti ovlivní celý proces.
- Možnost exportovat výsledky (průběh tlaku, teploty, průtoku) do tabulek, grafů nebo CSV pro následnou analýzu.

Shrnutí přínosů pro inženýrský návrh plnicí stanice, přínos a novost řešení:

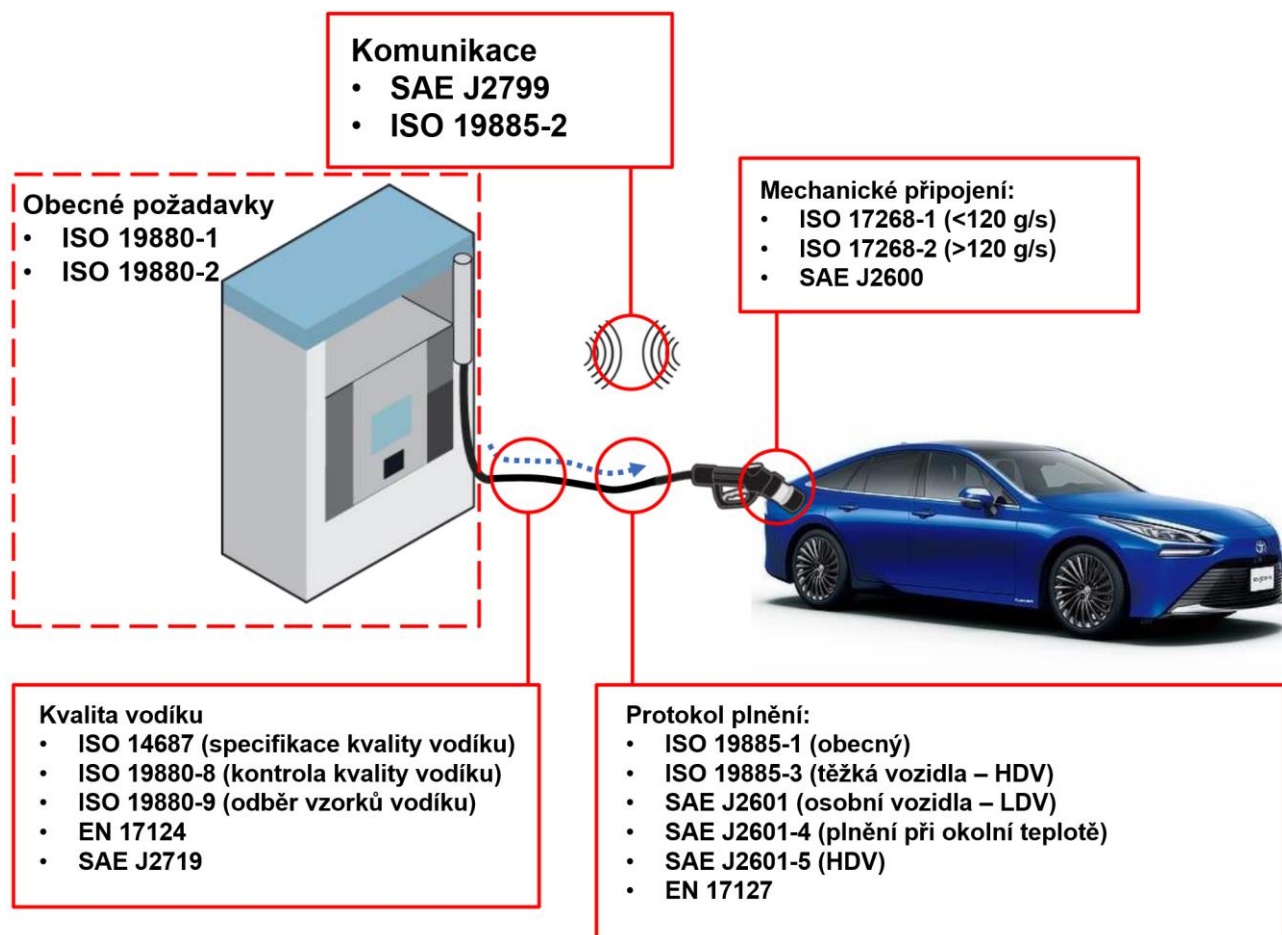
- Umožňuje **rychlý návrh a dimenzování** komponent.
- Identifikuje **úzká místa** (např. ventily, škrcení).
- Vyhodnocuje **vliv teplotního zatížení**.
- Umožňuje návrh **řízení a bezpečnostní logiky**.
- Lze simulovat **celodenní provoz se sérií plnění**.

Obrázek 1 ilustruje rozsáhlé požadavky kladené na vodíkové plnicí stanice vyplývající z platných norem, legislativních předpisů a doporučení. Plné dodržení všech těchto požadavků by si vyžádalo velmi komplexní a nákladné technologické řešení, proto se konkrétní konfigurace plnicí stanice zpravidla optimalizuje s ohledem na její účel a provozní scénář.

Z tohoto důvodu je vývoj univerzálního softwarového nástroje schopného obsáhnout veškeré možné varianty a provozní podmínky mimořádně náročný a jeho výsledek by byl nejistý z hlediska robustnosti a udržitelnosti.

Výhodou prostředí GT-Suite je v tomto kontextu jeho flexibilita – umožňuje vytvoření základního, relativně univerzálního modelu plnicí stanice, který lze následně přizpůsobit konkrétní konfiguraci

na základě výkresové dokumentace, technických specifikací jednotlivých komponent a implementovaných řídicích algoritmů.



OBRÁZEK 1 POŽADAVKY NA VODÍKOVÉ PLNÍCI STANICE

4 Plněná vozidla

Přidání modelů **vozidel plněných vodíkem** (např. Toyota Mirai, vodíkové kamiony nebo autobusy) k modelu **vodíkové plnicí stanice** v prostředí **GT-Suite** je klíčové pro simulaci **reálného provozu stanice**. Umožňuje testovat výkon, dobu plnění, zatížení stanice a řízení přepínání mezi zásobníky při různých typech vozidel.

Níže je podrobný postup, jak byly tyto modely sestaveny a co všechno je uvažováno.

4.1 Obecná struktura: Co musí mít model plněného vozidla

TABULKA 2 CO MUSÍ OBSAHOVAT MODEL VOZIDLA Z HLEDISKA PLNĚNÍ

Komponenta	Popis
Nádrž na H ₂	tlaková nádoba (např. CHSS), obvykle 350 nebo 700 bar
Termodynamické vlastnosti plynu	použití FluidRefrigerant pro plyn H ₂ s databází REFPROP
Objem nádrže	celkový objem [litrů], důležité pro dobu plnění
Počáteční stav	tlak a teplota vodíku na začátku plnění
Výměna tepla	teplo vedené stěnou nádrže a ochlazování během plnění
Logika ukončení plnění	např. dosažení 700 bar, dosažení teplotního limitu, přenosové omezení

4.2 Model osobního vozidla (např. Toyota Mirai)

Toyota Mirai:

- **Tlaková nádrž:** 700 bar
- **Objem H₂ nádrže:** cca 122,4 L (5–5,6 kg H₂)
- **Počáteční tlak:** typicky 10–150 bar
- **Protokol plnění:** SAE J2601 (T40)

GT-Suite:

- použijeme Tank objekt s:
 - objemem 122.4 L,
 - Fluid = Hydrogen,
 - Refprop Gas Model = True,
 - počátečním stavem T = 293 K, p = 100 bar.
- připojeno potrubí z plnicí hadice s FlowSplit nebo Orifice.
- definuj Control Valve (pro otevření/zavření toku).
- použij Wall Heat Transfer blok pro simulaci ohřevu nádrže.

4.3 Model autobusu (např. Hyundai Elec City)

- **Tlaková nádrž:** 350 bar
- **Objem H₂ nádrží:** cca 8–10 nádrží po 180 L → až 1440 L
- **Počáteční tlak:** nízký (např. 10–50 bar)
- **Protokol plnění:** SAE J2601-2 (komerční vozidla, T40 nebo T30)

GT-Suite:

- Použito několik Tank bloků paralelně (nebo jeden větší blok s vyšší kapacitou).
- Modelujeme Multiport Junction pro rozvětvení přívodu.
- Vstupní potrubí bude mít větší průměr a pomalejší plnění.
- Simulujeme větší tepelné ztráty, ale pomalejší růst teploty.

4.4 Model nákladního kamionu (např. Hyundai XCIENT)

- **Tlaková nádrž:** většinou 700 bar
- **Kapacita:** až 70–80 kg H₂ (až 30–35 kg na jednu nádrž)
- **Počet nádrží:** více paralelních nádrží (např. 10× 350 L)
- **Plnění:** dlouhé, více etap, vyšší zatížení stanice

GT-Suite:

- Použije se větší objem nádrže (např. 3000–4000 L).
- Definuje vysoké průtoky a potřebu několika etap plnění.
- Přidán Heat Soak efekt (zpoždění tepelného vyrovnání).
- Možné přidat měření overfill (dočasné přeplnění s očekávaným poklesem teploty).

4.5 Řízení přepínání mezi typy vozidel

V simulačním modelu můžete pomocí tabulek nastavit:

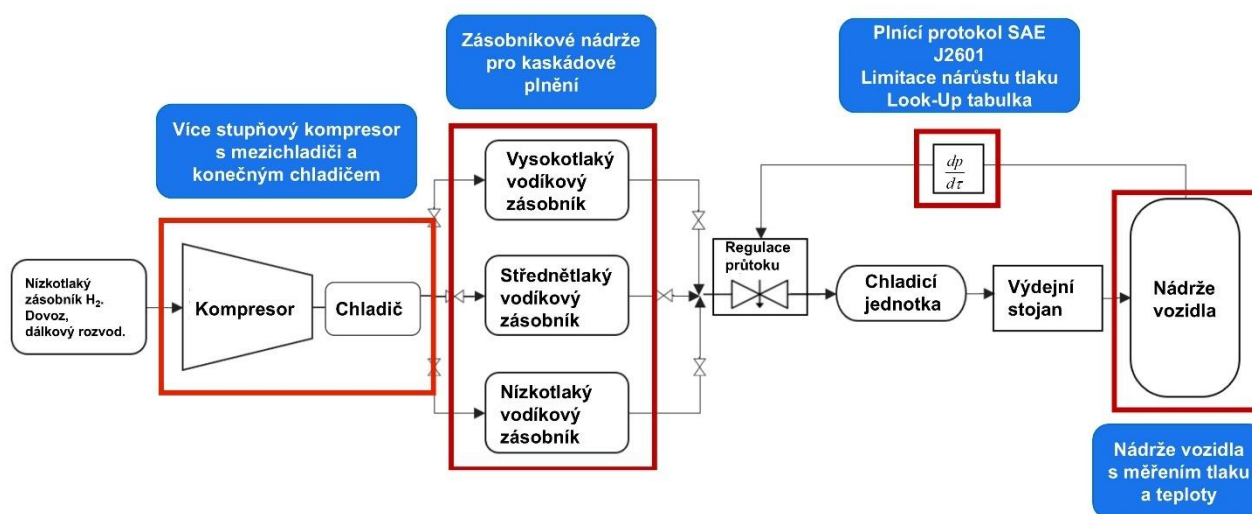
- sekvenční plnění více vozidel,
- přepínat mezi osobním, autobusovým a kamionovým modelem
- sledovat pokles tlaku v zásobníku a výběr plnicí větve,
- přidat skript v Control Objects nebo Case Control pro různé scénáře.

Co můžeme sledovat u každého vozidla

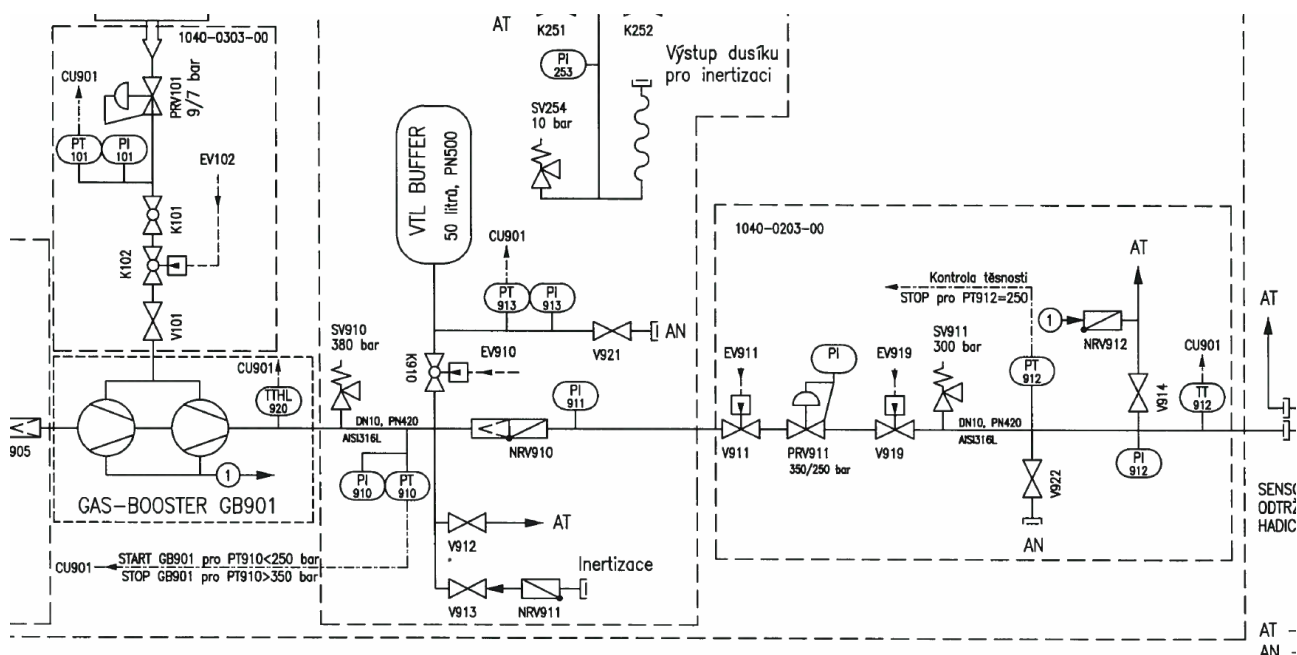
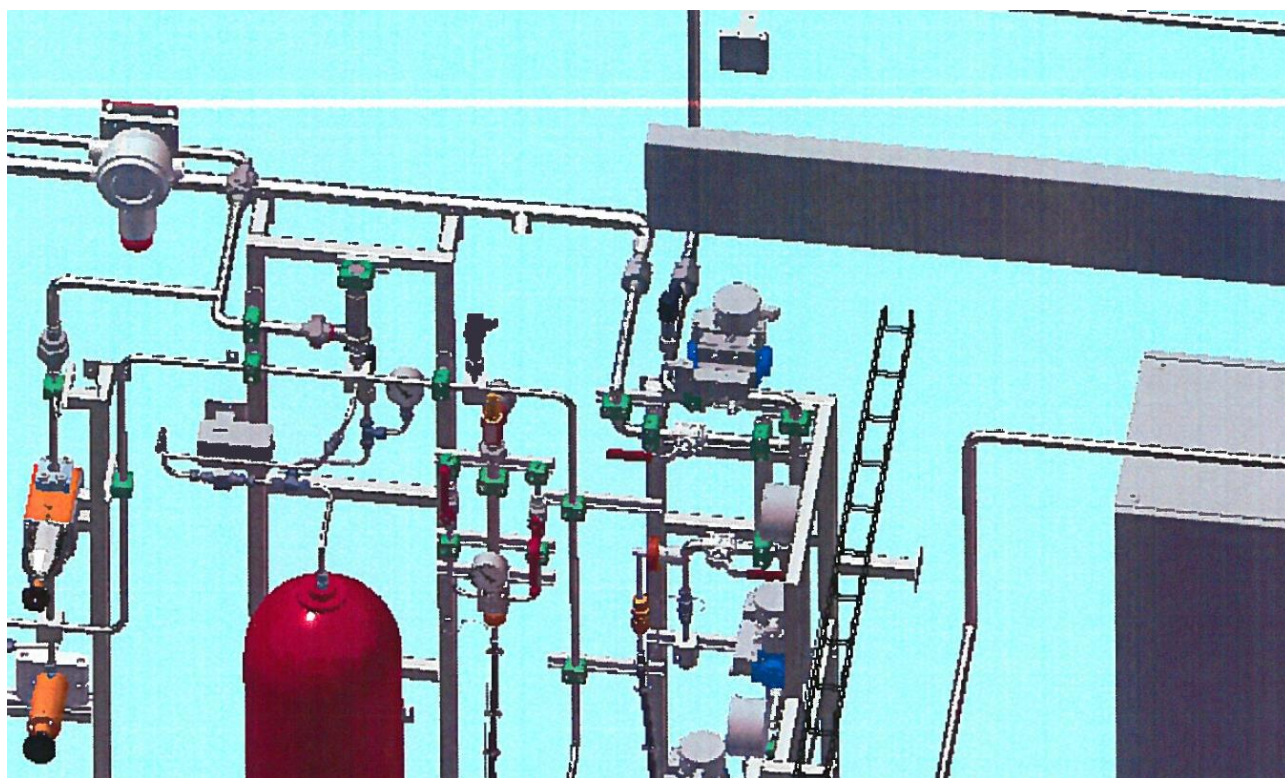
- **Teplota plynu:** růst kvůli adiabatickému stlačení
- **Tlak:** dosažení 350 nebo 700 bar
- **Hmotnost:** množství natankovaného H₂ [kg]
- **Doba plnění:** typicky 3–10 minut
- **Tepelný tok:** vliv chlazení, stěn a okolí
- **Přesnost plnění:** Overfill logika podle SAE J2601

5 Podklady pro vytvoření modelu

Pro vytvoření **modelu vodíkové plnicí stanice v GT-Suite** potřebujeme sadu technických a fyzikálních podkladů, které pokrývají **geometrii, konstrukční řešení, řídicí logiku i termodynamické a transportní vlastnosti vodíku**. Na obrázku 2 je základní návrh plnicí stanice, ze které vychází vyvíjené modely plnicích stanic. V rámci vývoje modelů jsme se soustředili zejména na tyto čtyři základní bloky plnicí stanice. Důvodem je i momentálně nedostatek informací o výstupní chladicí jednotce a výdejním stojanu.



OBRÁZEK 2 ZÁKLADNÍ BLOKOVÉ SCHÉMA PLNÍČÍ STANICE

**OBRÁZEK 3 PŘÍKLAD PODKLADŮ VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE****OBRÁZEK 4 PŘÍKLAD POKLADŮ KONSTRUKČNÍ MODEL**

Největší časovou i odbornou náročnost při tvorbě 1D modelu v GT-Suite představuje převod kompletní výkresové dokumentace do funkčního schématu. Nejprve je nutné z 3D CAD dat nebo detailních výkresů extrahovat geometrické charakteristiky – délky, průměry, průřezy, objemy a hmotnosti jednotlivých dílů – a převést je do posloupnosti potrubí, komor, článků a rotačních komponent, se kterými GT-Suite pracuje (obrázek 2 a3). Současně se k těmto objektům přiřazují

materiálové vlastnosti (hustota, tepelná vodivost, drsnost povrchu) a ztrátové koeficienty, aby model správně popisoval proudění, tlakové ztráty a přestup tepla.

Dalším krokem je parametrizace jednotlivých prvků podle dat dodaných výrobcí – typicky jde o mapy kompresorů, charakteristiky škrticích clon, tlakových ventilů. Tyto datasheety se načítají jako tzv. maps (např. COMPRESSOR_MAP) či jako vícerozměrné lookup tables (např. průtok vs. tlakový rozdíl vs. otáčky) a vkládají se do odpovídajících komponent v modelu.

Jakmile je geometrie a parametrizace kompletní, následuje definice řídicích strategií. Regulace v GT-Suite se obvykle realizuje pomocí vestavěných bloků typu CONTROL nebo externě připojených Simulink co-simulation souborů. V jednodušších případech postačí klasické PID regulátory (pro řízení tlaku přepíňování, teploty vstupního vzduchu či otáček E-kompresoru). Složitější logiku – například řízení na základě více stavových veličin nebo adaptivní strategii v různých provozních režimech – lze implementovat jako look-up tabulky navázané na provozní body (otáčky motoru, zatížení, teplota chladicí kapaliny). V neposlední řadě se definují spouštěcí podmínky, časové profily vstupních veličin a konečné kritérium sběru výsledků, aby bylo možné model nejen spustit, ale i automatizovaně kalibrovat a validovat dle experimentálních dat.

6 Konstrukční parametry plnicí stanice

- **Zásobníky vodíku (High Pressure Storage - HPS):**
 - počet zásobníků (např. 3–6),
 - objem jednoho zásobníku [l],
 - maximální provozní tlak (např. 900 bar),
 - počáteční tlak a teplota (např. 200 bar, 20 °C),
 - materiál (kvůli tepelným kapacitám, tepelné vodivosti),
 - způsob zapojení: paralelně nebo kaskádově (T1, T2, T3...).
- **Kompresorová jednotka (pokud není zásobník plněn externě):**
 - typ kompresoru (pístový, membránový, turbo),
 - výstupní tlak,
 - průtočná kapacita [Nm³/h],
 - elektrický příkon a účinnost,
 - mezichladiče, ventilace, chlazení.

Regulační prvky a vedení:

- délky a průměry potrubí [m, mm],
- materiál (ocel, nerez, kompozit),
- ventily a škrticí prvky (orifice, control valve),
- tlakové ztráty (K-faktory, minor losses),
- přítomnost filtrace, bezpečnostních ventilů.

Chlazení (pro T40, T30 varianty):

- způsob chlazení: výměník, suchý chladič, předchlazení média,
- minimální teplota výstupního H₂ (např. -40 °C pro T40),
- teplosměnné plochy a součinitel přestupu tepla.

6.1 Vlastnosti výstupních větví – modely vozidel

Pro každou výstupní větev:

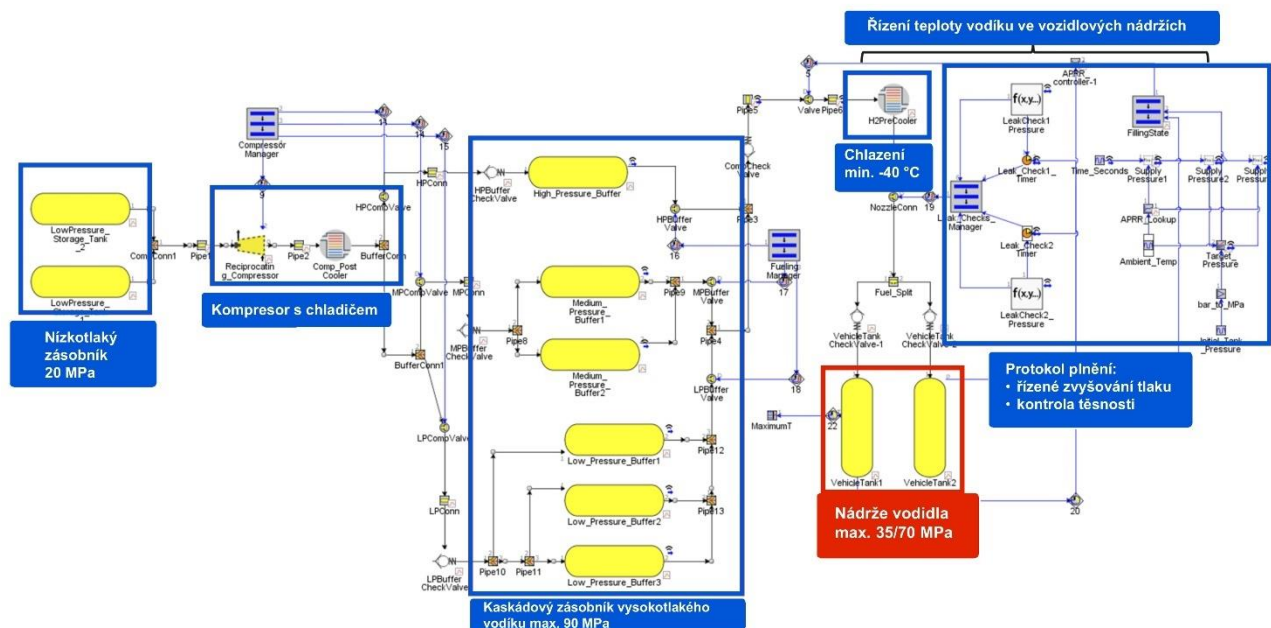
- typ koncového odběratele (osobní, autobus, kamion),
- objem tlakové nádrže,
- cílový tlak plnění (700 bar, 350 bar),
- počáteční tlak a teplota v nádrži vozidla,
- typ protokolu (SAE J2601, apod.),
- maximální teplota v nádrži (85 °C),
- průměr výstupního potrubí, ventil, hadice.

Řídící logika

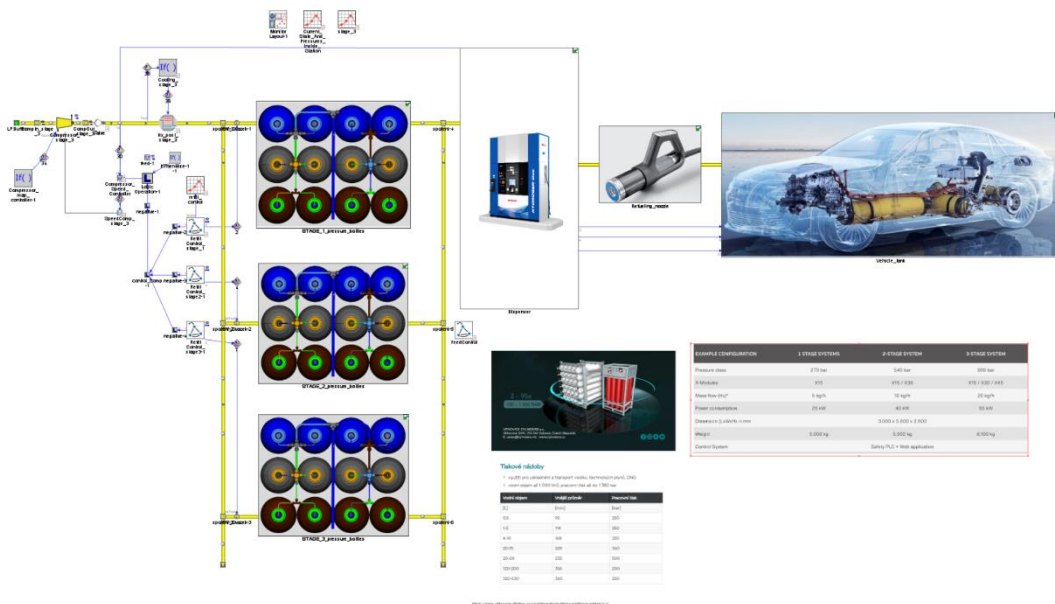
- algoritmus přepínání mezi zásobníky (kaskádní plnění),
- regulační ventil: otevření na základě tlaku nebo času,
- bezpečnostní logika:
 - vypnutí při dosažení mezí tlaku nebo teploty,
 - řízení průtoku (look-up podle SAE J2601),
- případně model komunikace s ECU vozidla (pro T40 s komunikací) – zde momentálně nemáme informace pro realizaci.

Možnými výstupy simulace jsou:

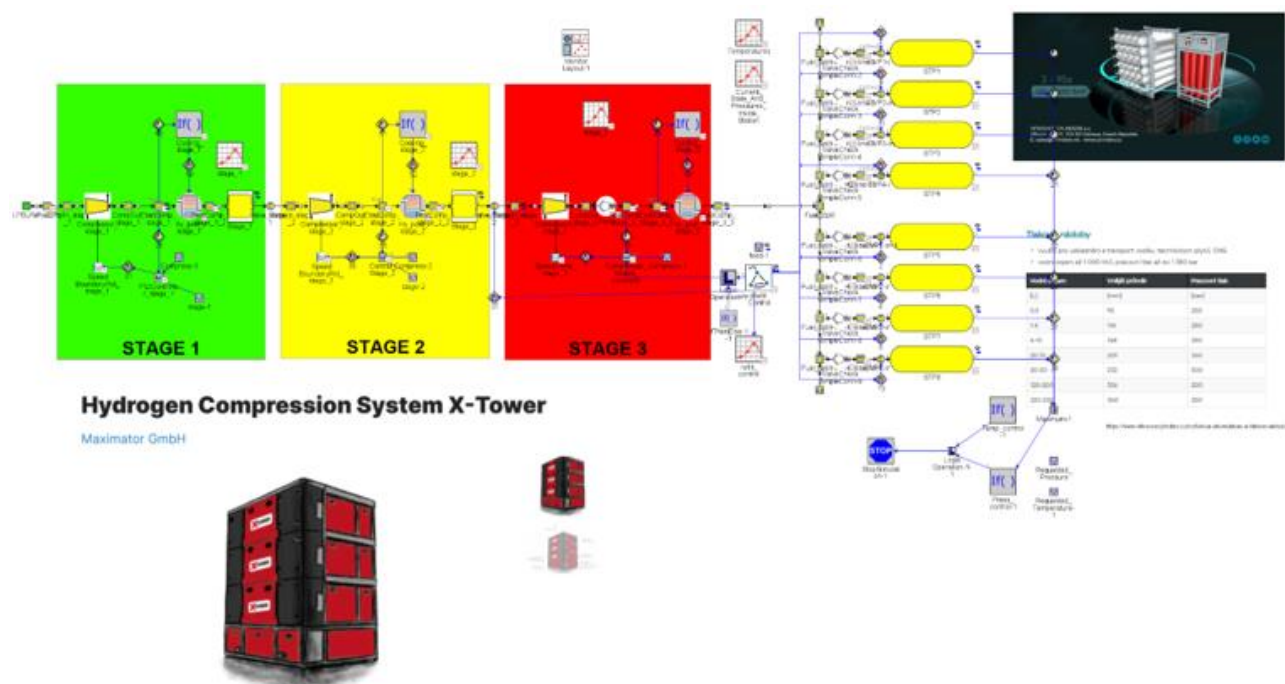
- tlak, teplota, hmotnost plynu,
- entalpie, tok energie,
- tok přes ventily, tepelný tok do okolí,
- čas plnění.



OBRÁZEK 5 ŠABLONA PODROBNÉHO MODELU PLNÍČÍ STANICE



OBRÁZEK 6 PŘÍKLAD DALŠÍ ŠABLONY MODELU PLNÍČÍ STANICE

**OBRÁZEK 7 ŠABLONA MODELU S TŘISTUPŇOVÝM KOMPRESOREM**

6.2 Možnosti zařazení 3D prvků do modelů

GT-Suite je sice primárně koncipován pro 0D/1D simulace – tedy pro rychlé, objemově či potrubně orientované modelování proudění, chemických reakcí a přestupu tepla –, nicméně vývojáři postupně rozšířili jeho možnosti tak, aby uživatel nebyl limitován jen jednoduchými prvkovými reprezentacemi. Klíčovým mezikrokem mezi čistě 1D popisem a plnohodnotným 3D CFD je vestavěný pre-/post-procesor GEM 3D, který umí z importovaného CAD modelu (STEP, Parasolid, STL) buď:

Polo-automaticky vygenerovat 1D síť – tj. „rozpadnout“ na sekvenci rour, komor a ztrátových prvků; tím se radikálně zkrátí doba výpočtu, aniž by se ztratily klíčové tlakové ztráty a setrvačné efekty.

Vytvořit hrubou 3D FEA/CFD síť – typicky tetraedrální či polyhedrální – pokud je potřeba zachytit lokální přestup tepla, strmé gradienty nebo akustické jevy, které 1D model nepostihne.

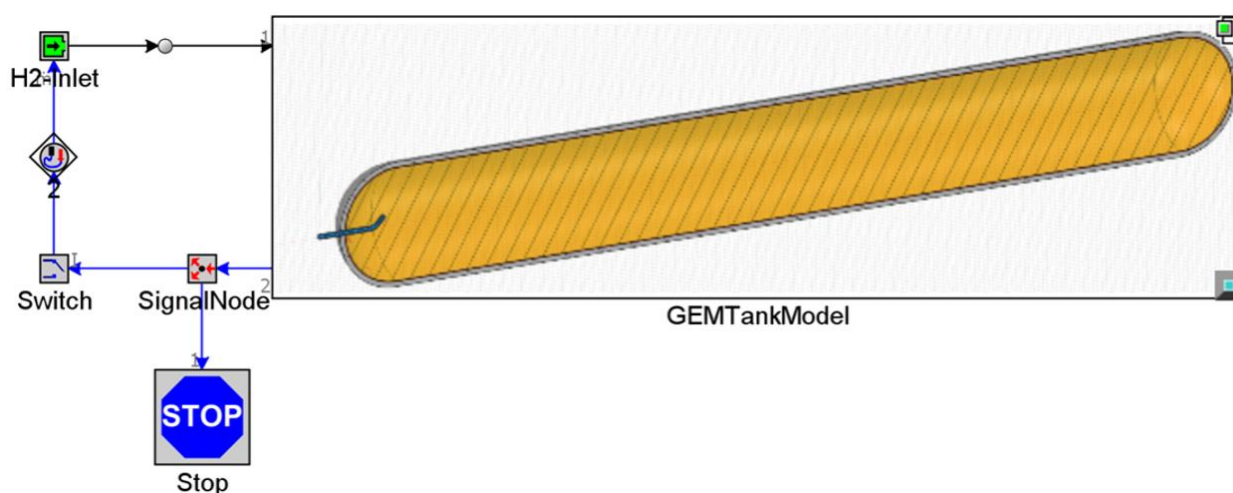
Díky této hybridní filosofii lze v jednom projektu kombinovat rychlé 1D reprezentace (dálková potrubí, výměníky) s detailně řešenými 3D partiiemi (nádrže). Přesto má 3D režim v GT-Suite určitá omezení: u velmi rozměrných objemů, jako jsou tlakové nádrže či akumulární zásobníky, se počet elementů a požadavky na RAM rychle zvyšují, takže pro tyto komponenty se i nadále doporučuje zjednodušená 0D/1D reprezentace.

Typický pracovní postup:

- **Import CAD → GEM 3D:** načtení objemu, rozdělení na „fluid“ a „solid“ zóny, definice filtrů pro automatickou extrakci 1D kanálů.

- **Parametrizace:** přiřazení materiálů, drsností, konduktivit a map (kompresory, ventily) podle datasheetů výrobců.
- **Hybridizace sítě:** volba, které části zůstanou 1D a které se převedou do 3D FEA/CFD domén; nastavení rozhraní (co-simulation interface).
- **Řídicí logika:** implementace PID regulátorů, look-up tabulek a logických bloků pro ventily, škrticí klapky či elektrické pohony.
- **Validace a kalibrace:** porovnání výsledků s měřením, doladění ztrátových koeficientů a tepelných kapacit.

Na obrázek 8 je demonstrováno právě takové hybridní řešení pro zásobníkové nádrže.



OBRÁZEK 8 PŘÍKLAD 3D PRVKU NÁDRŽE

6.3 Sestavení a struktura modelu vodíkového hospodářství v GT-Suite

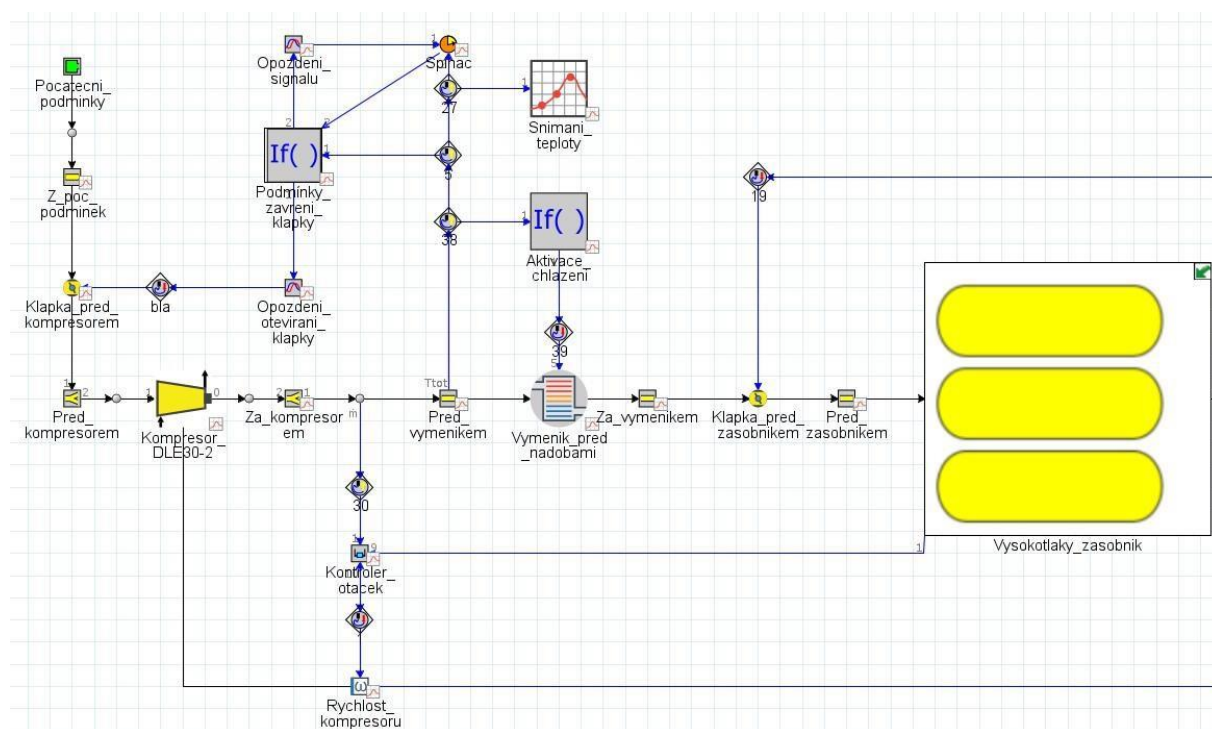
Před samotnou simulací je nezbytné podrobně vystavět digitální model celého vodíkového hospodářství. V GT-Suite to znamená definovat jednak **průtokové prvky** (potrubí, ventily, škrticí prvky, chladiče) a jednak **objemové komponenty** (tlakové nádoby, výměníky) tak, aby odpovídaly skutečnému provoznímu uspořádání. Současně je nutné do topologie zapojit **snímače a řídicí signály**, které zajišťují měření klíčových stavových veličin (tlak, teplota, hmotnostní průtok) a umožňují implementovat regulační strategii. Výsledné schéma je z důvodu přehlednosti rozděleno do tří logických bloků: **část s nízkotlakým zásobníkem a kompresorem, vysokotlaký zásobník a část za vysokotlakým zásobníkem, tedy plnicí zařízení.**

6.3.1 Část před vysokotlakým zásobníkem

Vstupní okrajové podmínky jsou nastaveny na tlak 20 bar a teplotu 20 °C, což představuje nejnejpříznivější stav sání kompresoru. Vodík je nejprve veden přes **uzavírací klapku před kompresorem**, jejíž stav řídí blok *IF* s podmínkou „**Podmínky zavření klapky**“. Tento blok sleduje výstupní teplotu kompresoru a zajišťuje kaskádovité (diskontinuální) stlačování: překročí-li teplota 100 °C, kompresor ještě 20 s doběhne a poté se vypne až do okamžiku, kdy výstupní teplota klesne

pod 80 °C. Tím se modelově reprodukuje skutečná ochrana stroje před nadměrným tepelným namáháním.

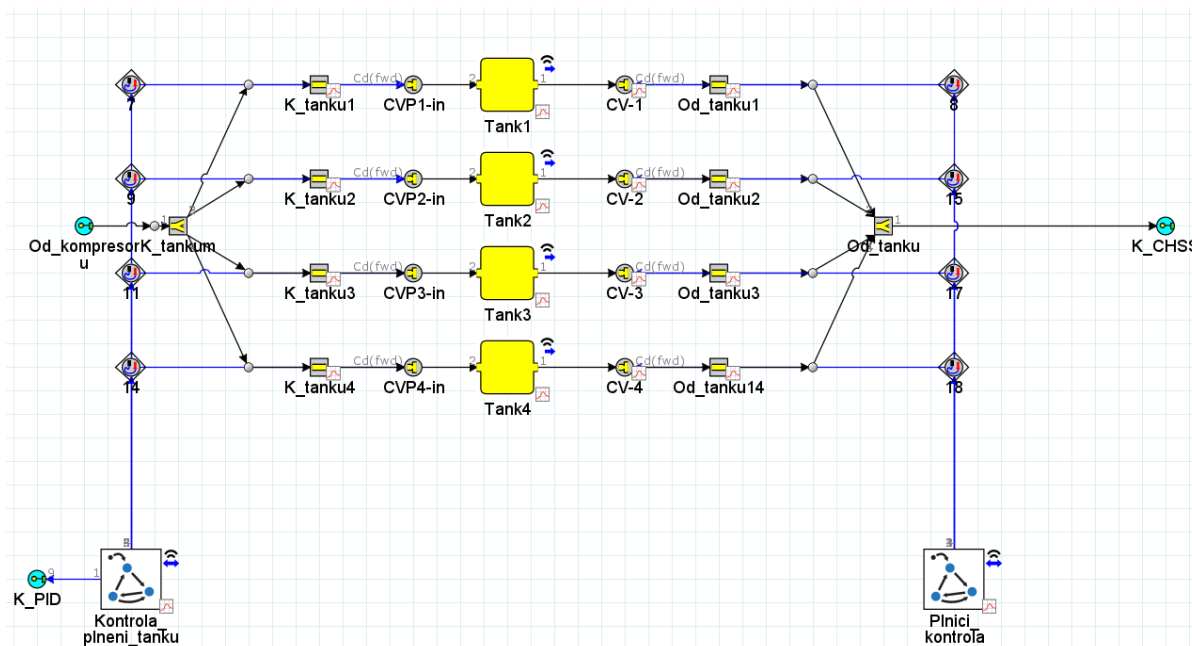
Po kompresi proudí vodík do **mezilehlého výměníku tepla**, který jej ochladí pod 60 °C – limit daný provozními podmínkami vysokotlakých nádob. Bezprostředně za výměníkem je osazen druhý uzavírací ventil (*Klapka před zásobníkem*), jenž brání proudění do zásobníku během plnění nádrže vozidla, a naopak se otevírá, pokud je potřeba obnovit tlak.



OBRÁZEK 9 ZOBRAZENÍ ČÁSTI MODELU PŘED VYSOKOTLAKÝM ZÁSOBNÍKEM

6.3.2 Vysokotlaký zásobník (bufferová sekce)

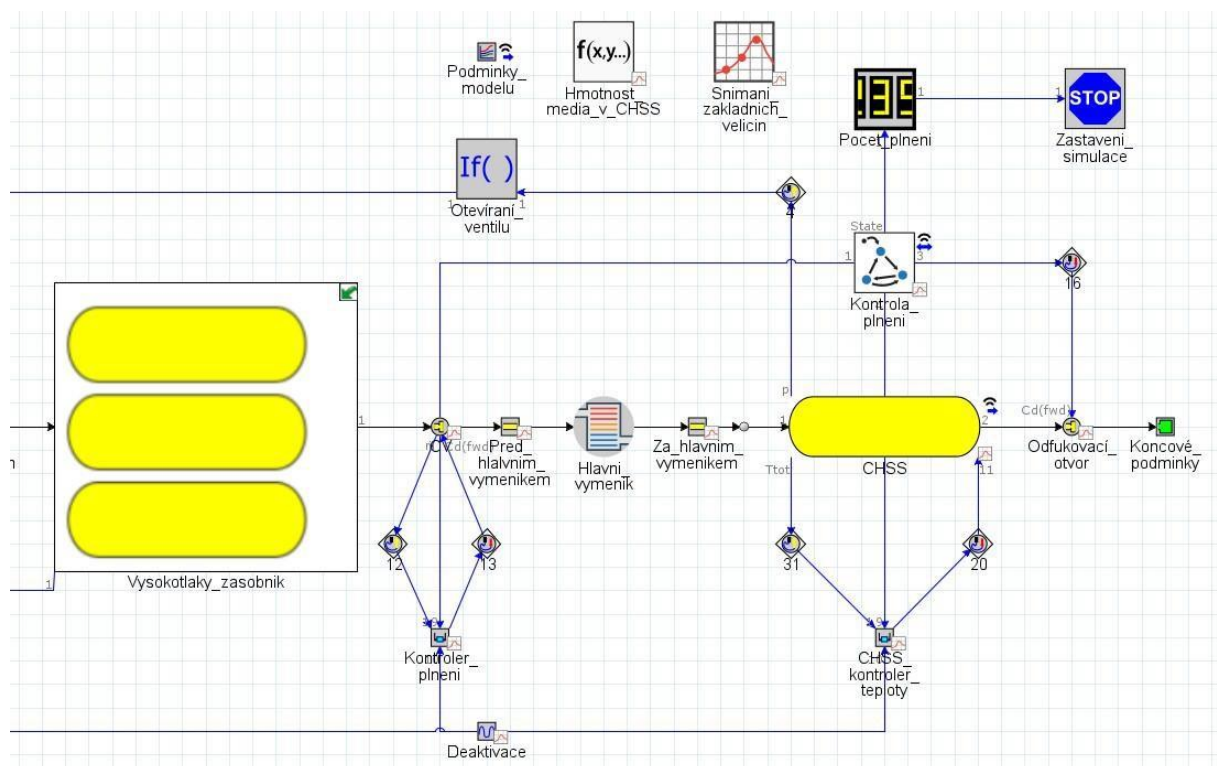
Samotný vysokotlaký zásobník má **koncepci „buffer cascade“**, ale existuje více možností. Ke každé sekci jsou přiřazeny snímače „**Kontrola plnění tanku**“ a „**Plnicí kontrola**“, které v reálném čase vyhodnocují tlak i odhadovanou hmotnost vodíku. Řídící logika na základě těchto údajů určuje, v jakém pořadí se nádoby doplňují nebo naopak vybírají – typicky se nejprve vyčerpává nádoba s nejnižším tlakem, aby se minimalizovaly ztráty expanzí a zajistilo rovnoměrné opotřebení soustavy.

**OBRÁZEK 10 MODEL VYSOKOTLAKÉHO ZÁSObNÍKU**

6.3.3 Část za vysokotlakým zásobníkem (plnění nádrží vozidla)

Za bufferem navazuje **chladicí okruh** reprezentovaný hlavním výměníkem, který snižuje teplotu proudícího vodíku na -40 °C dle SAE J2601. Ochlazené médium poté vstupuje do **koncové tlakové nádoby** (palivová nádrž vozidla). Průběh plnění i zastavení simulace hlídají prvky „**Kontrola plnění**“, „**Počet plnění**“ a „**Zastavení simulace**“.

Klíčovou roli zde hraje *IF* blok „**Otevírání ventilu**“, který koordinuje stav klapky před kompresorem. Logika zamezuje souběhu dvou činností – kompresního zdvihu a rychlého plnění nádrže – aby nedocházelo k nadměrnému hydraulickému rázu v potrubí a k nežádoucím tlakovým špičkám. Jakmile tlak v nádrži dosáhne cílové hodnoty, ventil se opět otevře a kompresor může obnovit tlak v bufferu na 450 bar.

**OBRÁZEK 11 ČÁST MODELU ZA VYSOKOTLAKÝM ZÁSOBNÍKEM**

6.4 Příklad nastavení proměnných veličin

Správné nadefinování proměnných veličin je klíčové pro správnou simulaci vodíkového hospodářství v GT-Suite. V této fázi je nutné určit:

1. **Počáteční podmínky** – vstupní tlak a teplota vodíku, počáteční tlak v každé nádobě vysokotlakého zásobníku, počáteční stav CHSS nádrže.
2. **Geometrické parametry** – délky, průměry a drsnosti potrubí; objemy a tepelné kapacity tlakových nádob; plocha a účinnost výměníků tepla.
3. **Provozní a řídicí konstanty** – referenční tlaky, mezní teploty, otáčky kompresoru, intervaly plnění a hranice pro spouštění / vypínání regulačních prvků.

Hlavní

Doplneni

Tlakove nádoby

Design of Experiments

All

Hlavní

Parameter	Unit	Description	Case 1
Case On/Off		Check Box to Turn Case On	☒
Case Label		Unique Text for Plot Legends	Base_Case
Pocet_plneni		Pocet naplnenych tlakovych nadob	2
Doba_simulace	h	Maximalni doba simulace	12
Pocatecni podminky			
Pocatecni_tlak	bar	Pocatecni tlak vodiku	20
Pocatecni_teploata	C	Pocatecni teploata vodiku	20
Pocatecni_teploata_CHSS	K	Pocatecni teploata nadoby CHSS	233.15
Geometricke parametry			
Prumer_potrubí	mm	Prumer potrubí	17.48
dx	mm	Diskretizacni delka	500
CHSS Parametry			
Objem_CHSS	L	Objem CHSS	50
Pocatecni_tlak_CHSS	bar	Pocatecni tlak v CHSS	5
Plnici_tlak	bar	Tlak plneni	350
Teploata_chladiva_ve_vymeniku	C	Teploata chladiva ve vymeniku	-70
Teplotni parametry			
Maximalni_teploata_nadob	C	Maximalni teploata nadob a potrubí po kompresi	60
Venkovni_teploata	C	Venkovni teploata	20
Plnici parametry			
Prutok_kompresoru	g/s	Cilovy prutok kompresoru	4.2
Prutok_pri_plneni_nadoby_CHSS	g/s	Prutok pri plneni nadoby CHSS	4.2
Cas_mezi_plnenimi	s	Cas mezi plnenimi	25200

OBRÁZEK 12 PŘÍKLAD NASTAVOVÁNÍ PARAMETRŮ MODELU A VÝPOČTU

Pečlivé nastavení proměnných veličin – od počátečních stavů přes geometrii až po provozní limity – tvoří základ spolehlivého modelu. Díky přesně definovaným mezím může regulační logika (IF-bloky, PID regulátory, look-up tabulky) dynamicky řídit plnění, chránit kompresor před přehřátím a současně garantovat bezpečný tlakový i teplotní profil celého vodíkového hospodářství.

Tímto postupem vzniká základ pro **kompletní digitální dvojče vodíkového hospodářství**, které umožňuje vyhodnotit dynamiku tlaku, teplotní profily, tepelné zatížení kompresoru i tepelnou bilanci výměníků v plném časovém průběhu typického plnicího cyklu. Nastavené senzory a regulační bloky zároveň poskytují základ pro navazující optimalizaci – ať už jde o zkrácení časů mezi jednotlivými kompresními takty, zvýšení teplotní účinnosti chlazení, nebo ladění plnicí strategie podle odlišných objemů koncových nádrží.

7 Příklady výsledků

GT-Suite ukládá všechny vypočtené i vstupní veličiny do časových řad. Ty lze exportovat (CSV, Excel, MATLAB) nebo rovnou prohlížet v GT-Post jako grafy, tabulky či animovaná schémata. Níže je přehled nejčastěji sledovaných kategorií a příkladů konkrétních výsledků.

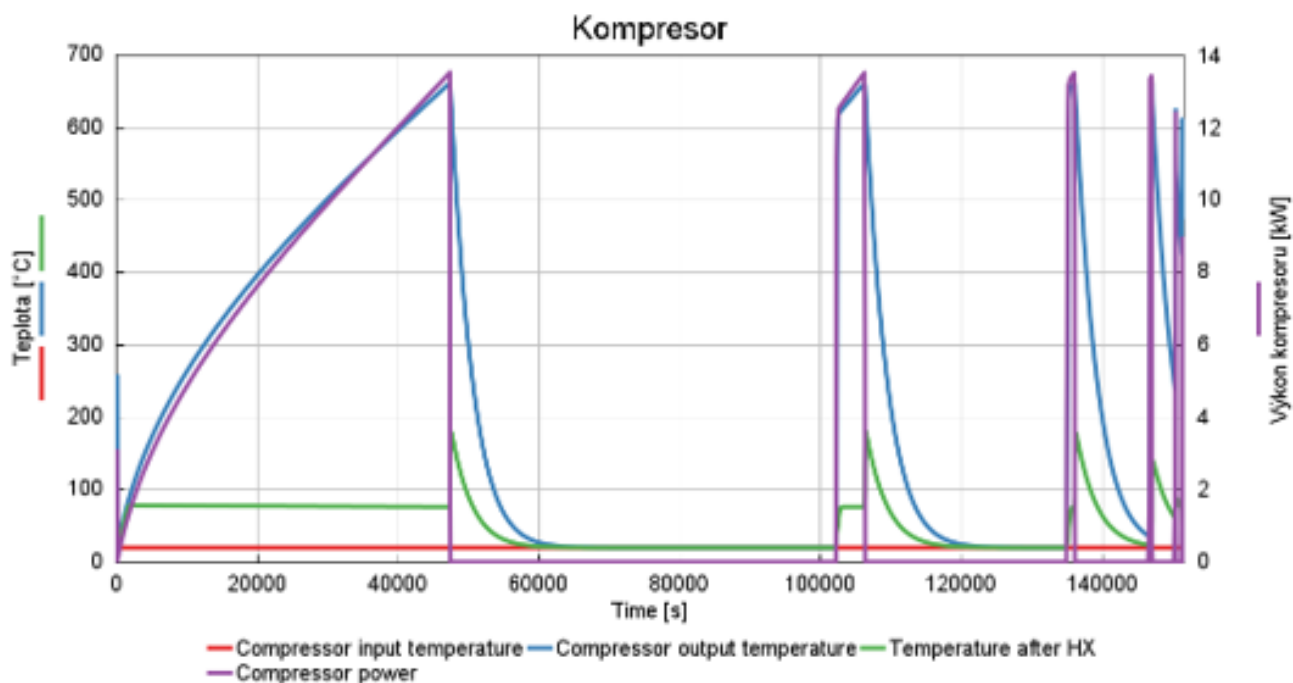
TABULKA 3 PŘÍKLAD VÝSTUPŮ SIMULACÍ

Kategorie výstupu	Typické veličiny (časová závislost)	K čemu slouží
Tlakové poměry	absolutní a diferenční tlak v potrubí, nádržích a ventilech; tlakové rázy, průběh plnění vozidla	ověření přetlakových limitů – návrh kaskády vysokotlakých lahví
Teplotní pole	teplota plynu v potrubí, ve stěně, v kompresoru a výměnících; teplotní gradienty	dimenzování chladičů – kontrola kondenzace/embrittlementu
Průtoky	hmotnostní a objemový průtok; Reynoldsovo číslo; Machovo číslo v tryskách	výpočet doby plnění – ladění škrticích prvků, trysek a ventilů
Hmotnost a zásoba H₂	okamžitá a kumulativní hmotnost vodíku v každé nádobě; vyteklý/načerpaný náboj	balance stanic (kg H ₂ /den) – verifikace kaskádového algoritmu
Energetická bilance	kompresorový příkon, isentropická účinnost, práce kompresoru; tepelné ztráty ve výměnících	dimenzování elektrického příkonu – ekonomika provozu
Řídicí signály	stav ventilu (0/90 °), PWM kompresoru, logické výstupy IF bloků	testování logiky, ladění hysterezí
Bezpečnostní metriky	rychlost nárůstu tlaku (bar s ⁻¹), teplota stěny vs. limit materiálu, počet překročení alarmu	validace souladu s ISO 19880, SAE J2601
Odvozené KPI	průměrná rychlost plnění (kg min ⁻¹), specifická spotřeba energie (kWh kg ⁻¹ H ₂), doba cyklu, disponibilita bufferu	porovnání variant kompresorů, výměníků, strategií

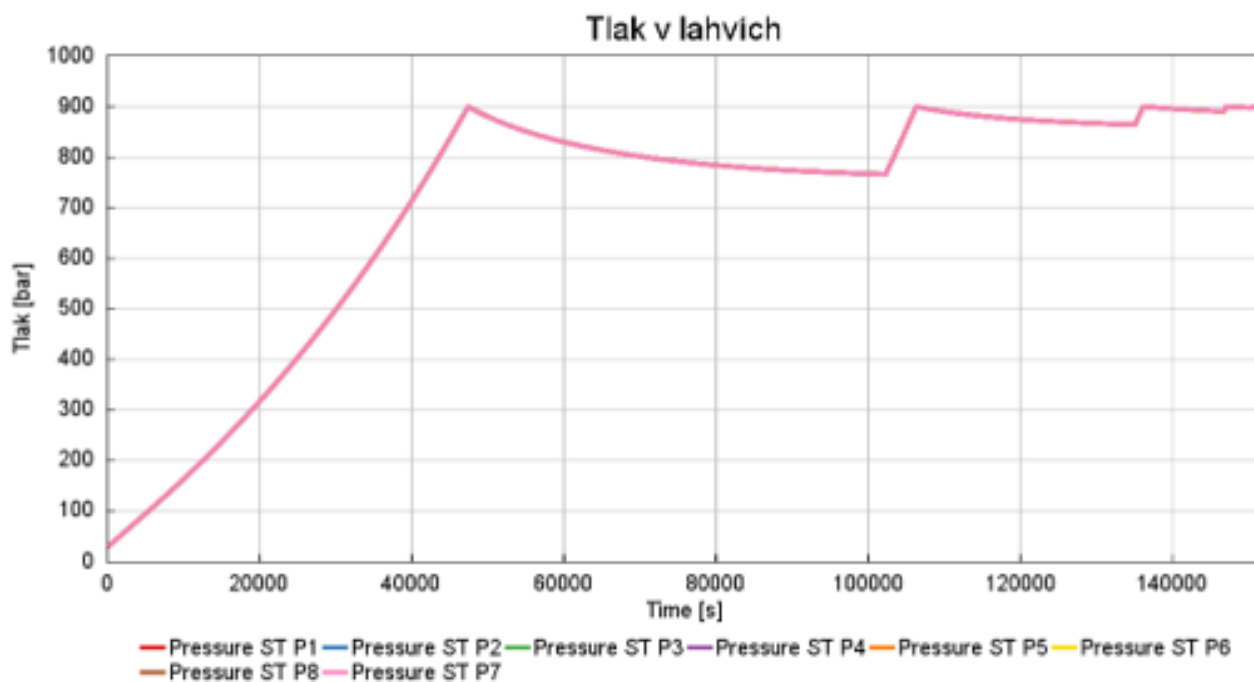
Každý 1D prvek (potrubí, nádrž, výměník) má interní „senzory“:

- **Node-Pressure** – tlak ve zvolené buňce potrubí
- **Node-Temperature** – plyn, stěna, chladio
- **Mass-Flow & Velocity** – na definovaných face-platech
- **Heat-Flux** – přestup tepla mezi plynem a stěnou

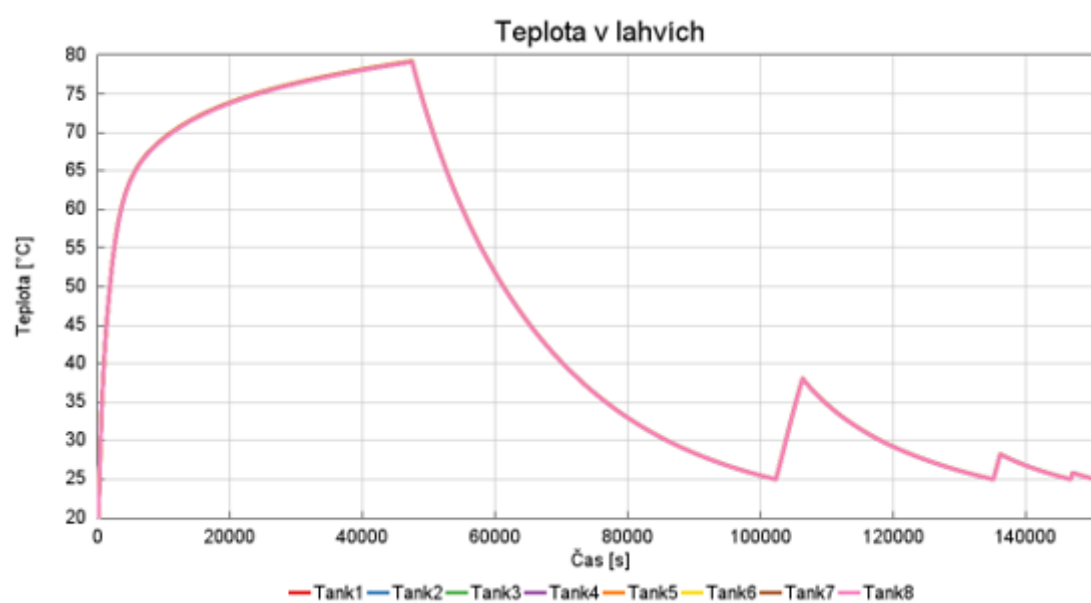
Tyto signály můžete libovolně přidávat do *Output Request* a poté zobrazit jako separátní křivky, P-T diagram či 2D mapu (čas × délka potrubí).



OBRÁZEK 13 PŘÍKLAD VELIČIN KOMPRESORU



OBRÁZEK 14 PŘÍKLAD PRŮBĚHU TLAKU



OBRÁZEK 15 PŘÍKLAD PRŮBĚHU TEPLOT

8 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

9 Seznam příloh

[Sablona parametru plnící stanice.xlsx](#)

10 Seznam obrázků

Obrázek 1 Požadavky na vodíkové plnicí stanice	11
Obrázek 2 Základní blokové schéma plnicí stanice	14
Obrázek 3 Příklad podkladů výkresová dokumentace	15
Obrázek 4 PŘÍKLAD POKLADŮ konstrukční model	15
Obrázek 5 Šablona podrobného modelu plnicí stanice	18
Obrázek 6 Příklad další šablony modelu plnicí stanice	18
Obrázek 7 Šablona modelu s třístupňovým kompresorem	19
Obrázek 8 Příklad 3D prvku nádrže	20
Obrázek 9 Zobrazení části modelu před vysokotlakým zásobníkem	21
Obrázek 10 Model vysokotlakého zásobníku	22
Obrázek 11 Část modelu za vysokotlakým zásobníkem	23
Obrázek 12 Příklad nastavování parametrů modelu a výpočtu	24
Obrázek 13 Příklad veličin kompresoru	26
Obrázek 14 Příklad Průběhu tlaku	26
Obrázek 15 Příklad průběhu teplot	27

11 Seznam tabulek

Tabulka 1 Termodynamické vlastnosti vodíku.....	7
Tabulka 2 Co musí obsahovat model vozidla z hlediska plnění.....	12
Tabulka 3 Příklad výstupů simulací.....	25