



IDAJ公司

GT-SUITE 在燃料电池上的应用

IDAJ中国
GT-SUITE Team

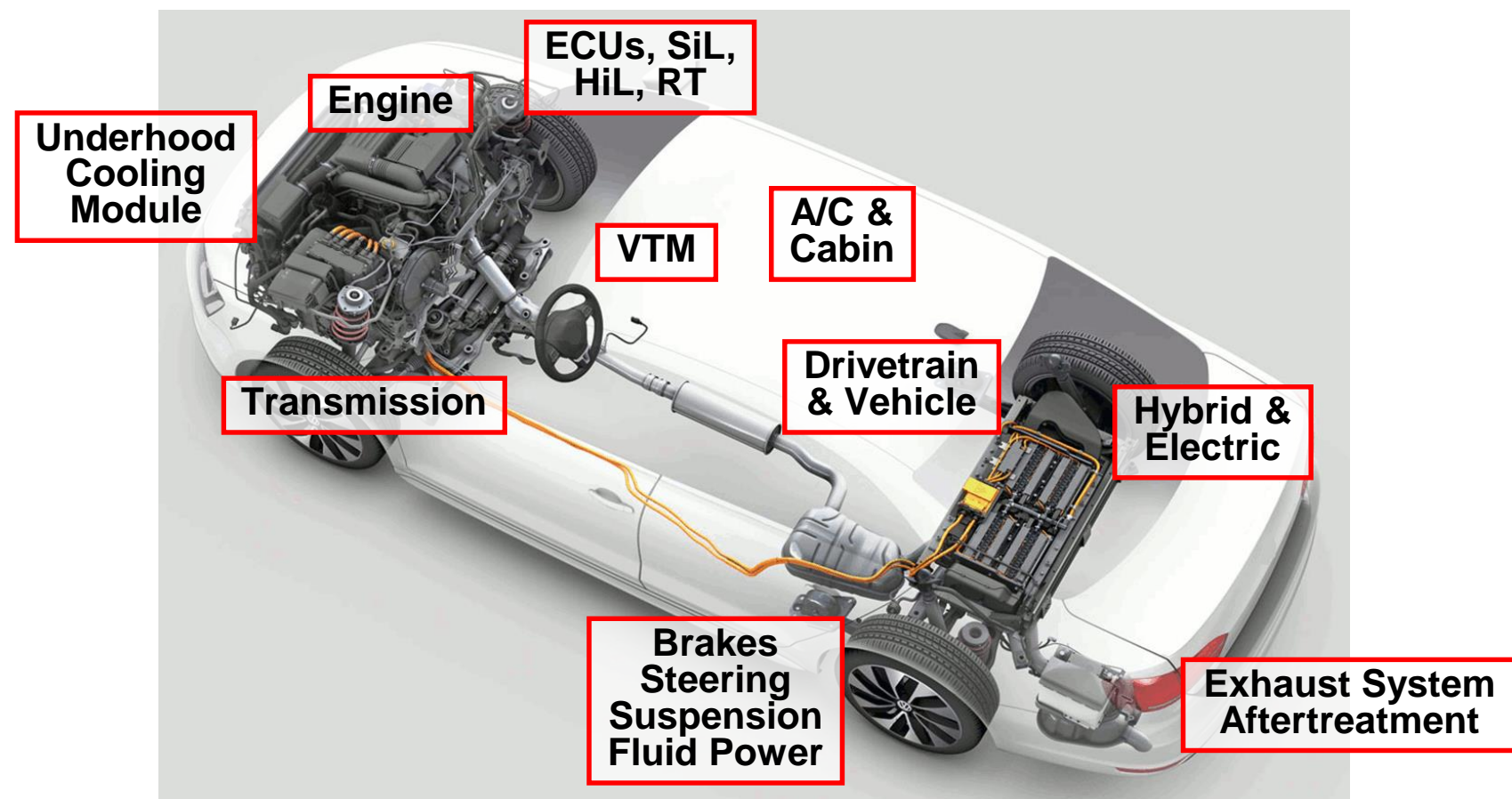
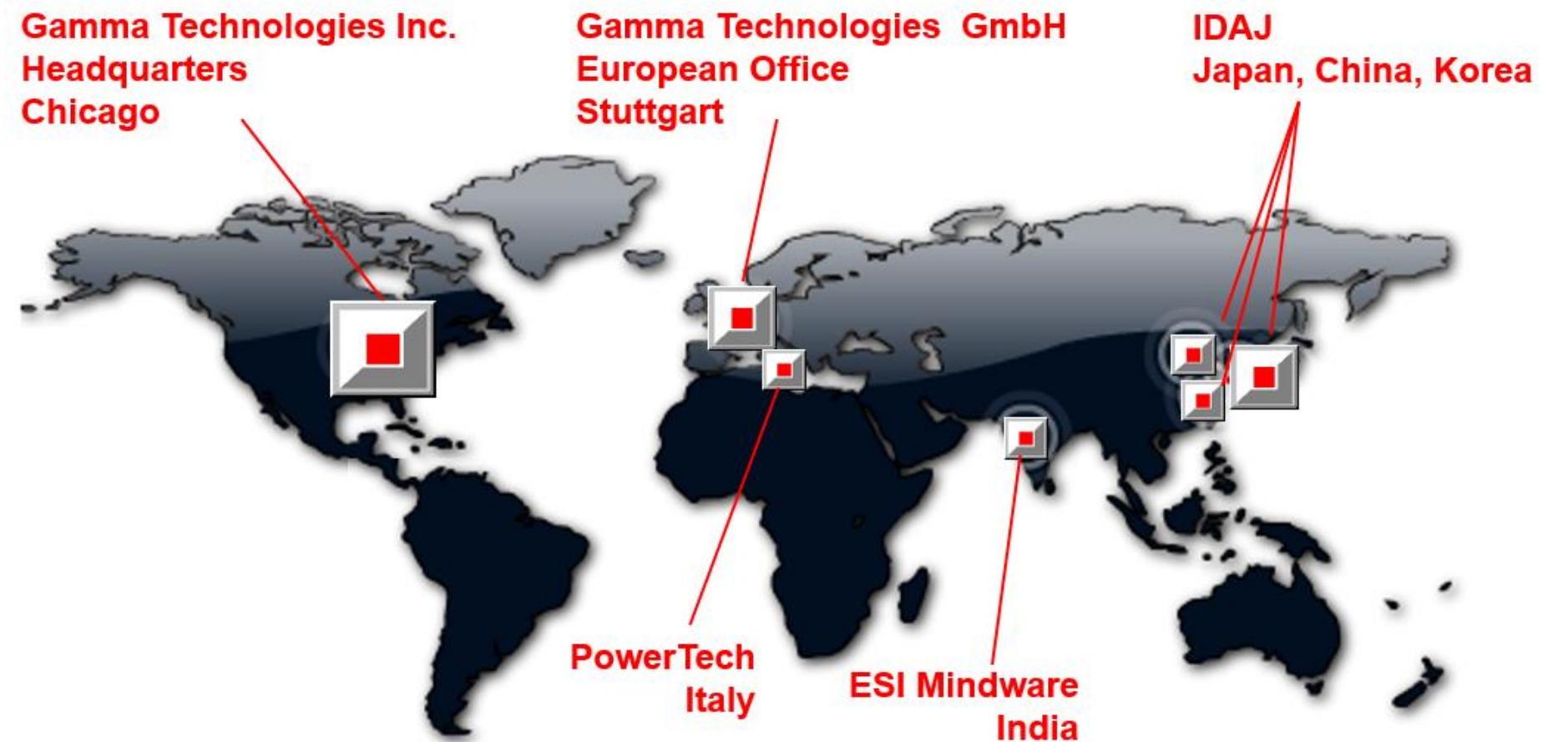
目录

1. 简介
2. 燃料电池简介
3. v2019功能回顾
4. 极化预测模拟
5. 组份渗透
6. 离散
7. 热管理
8. 系统平衡
9. 整车模拟

GT-SUITE软件简介

多物理系统级的CAE仿真平台

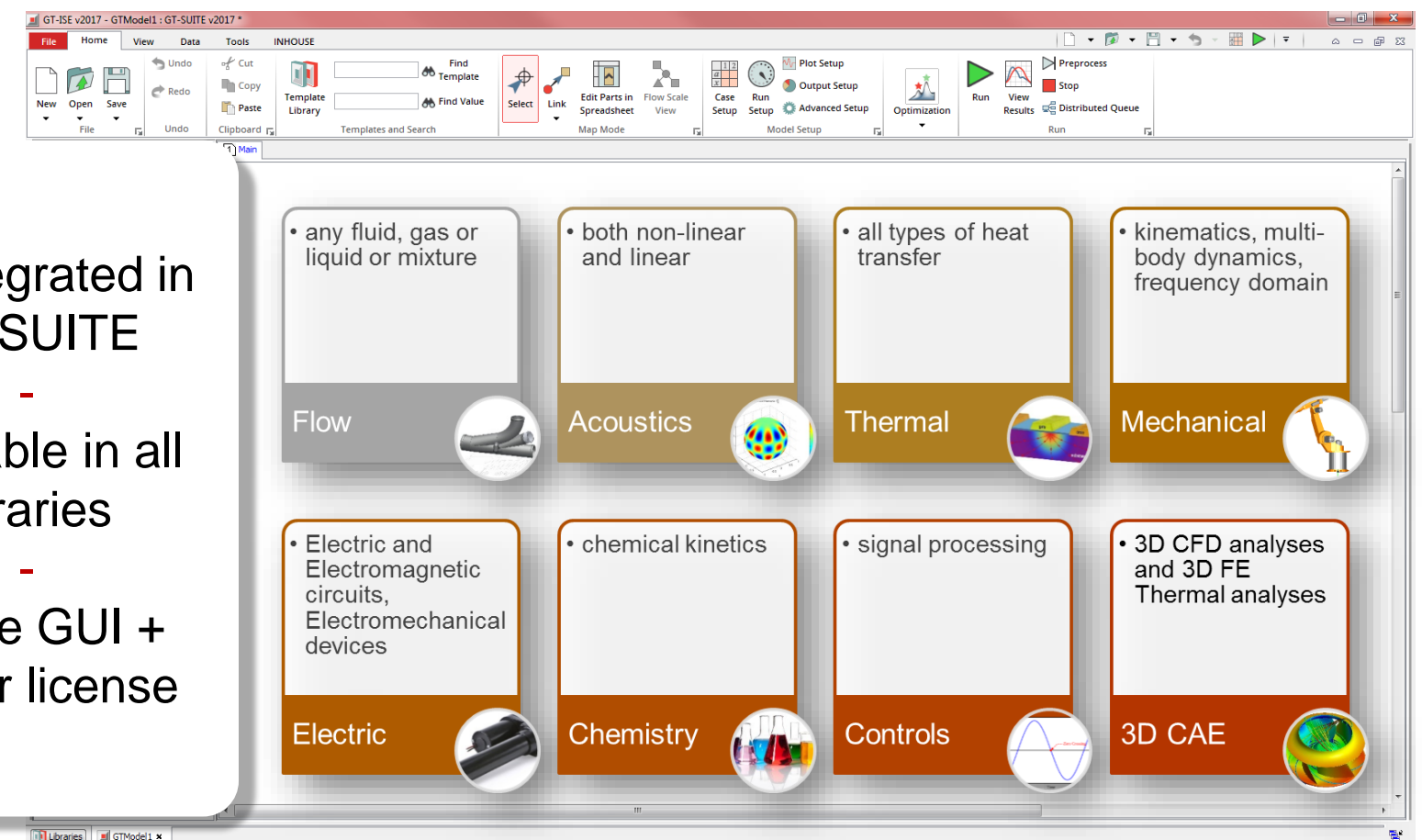
- 由美国Gamma Technologies公司开发
 - 公司总部在芝加哥；合作伙伴遍布全球
 - 关注于GT-SUITE的软件开发与支持



All integrated in
GT-SUITE

-
Available in all
libraries

-
Single GUI +
Solver license



全球超过600个用户在使用 (Automotive OEMs)

Chrysler
General Motors
Tesla
Faraday Future
Ford
Harley Davidson

Porsche
PSA
Renault
Daimler/AMG
Volkswagen Group
Volvo Cars
Audi/Lamborghini
Bentley
BMW
FCA/Ferrari
JLR
EC-POWER

Honda
Toyota
Nissan
Hyundai
Daewoo
Isuzu
Ssangyong
Mazda
Subaru
Suzuki
Yamaha
Dalian Diesel

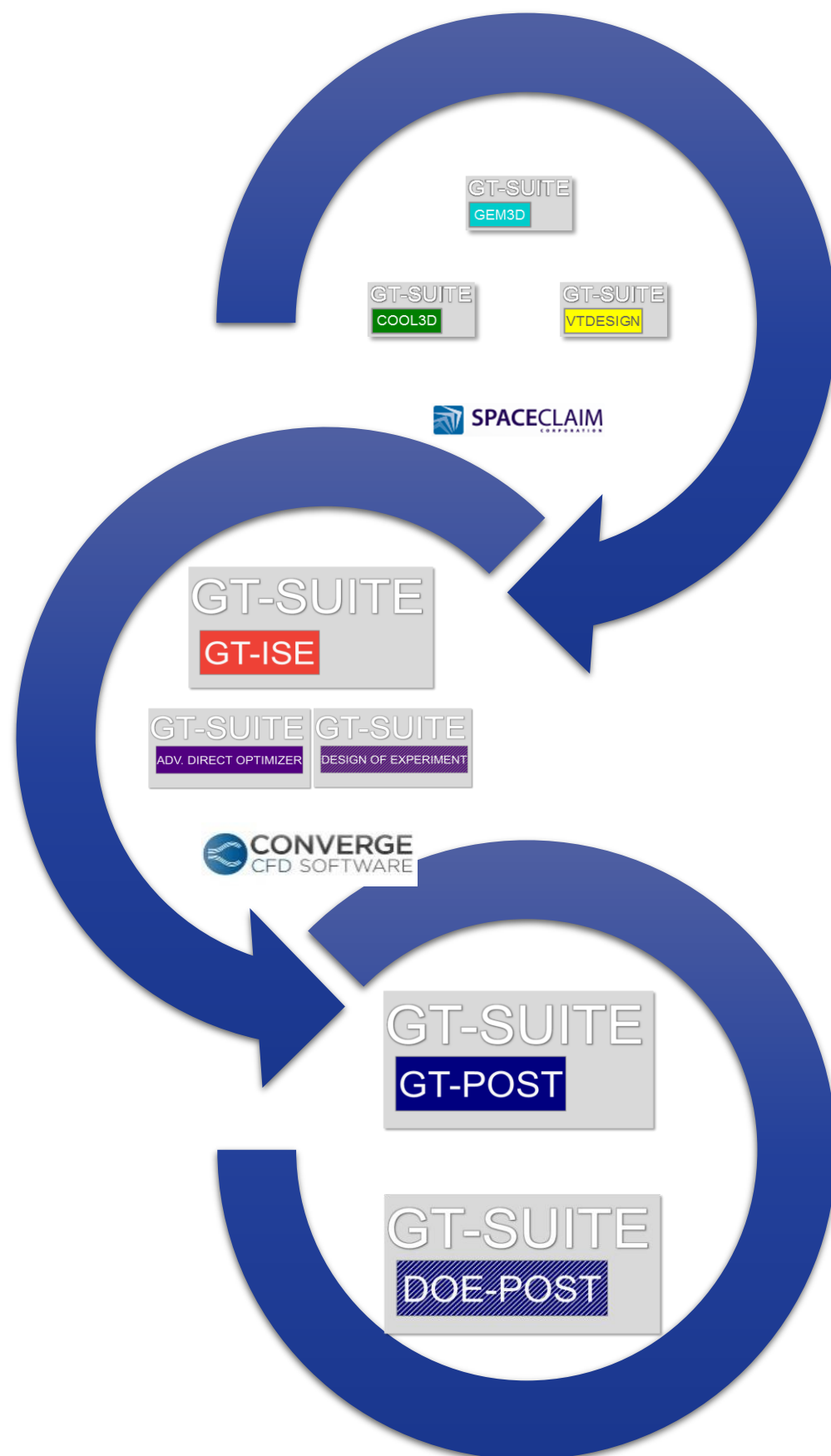
USING GT-SUITE FOR VEHICLE ELECTRIFICATION:



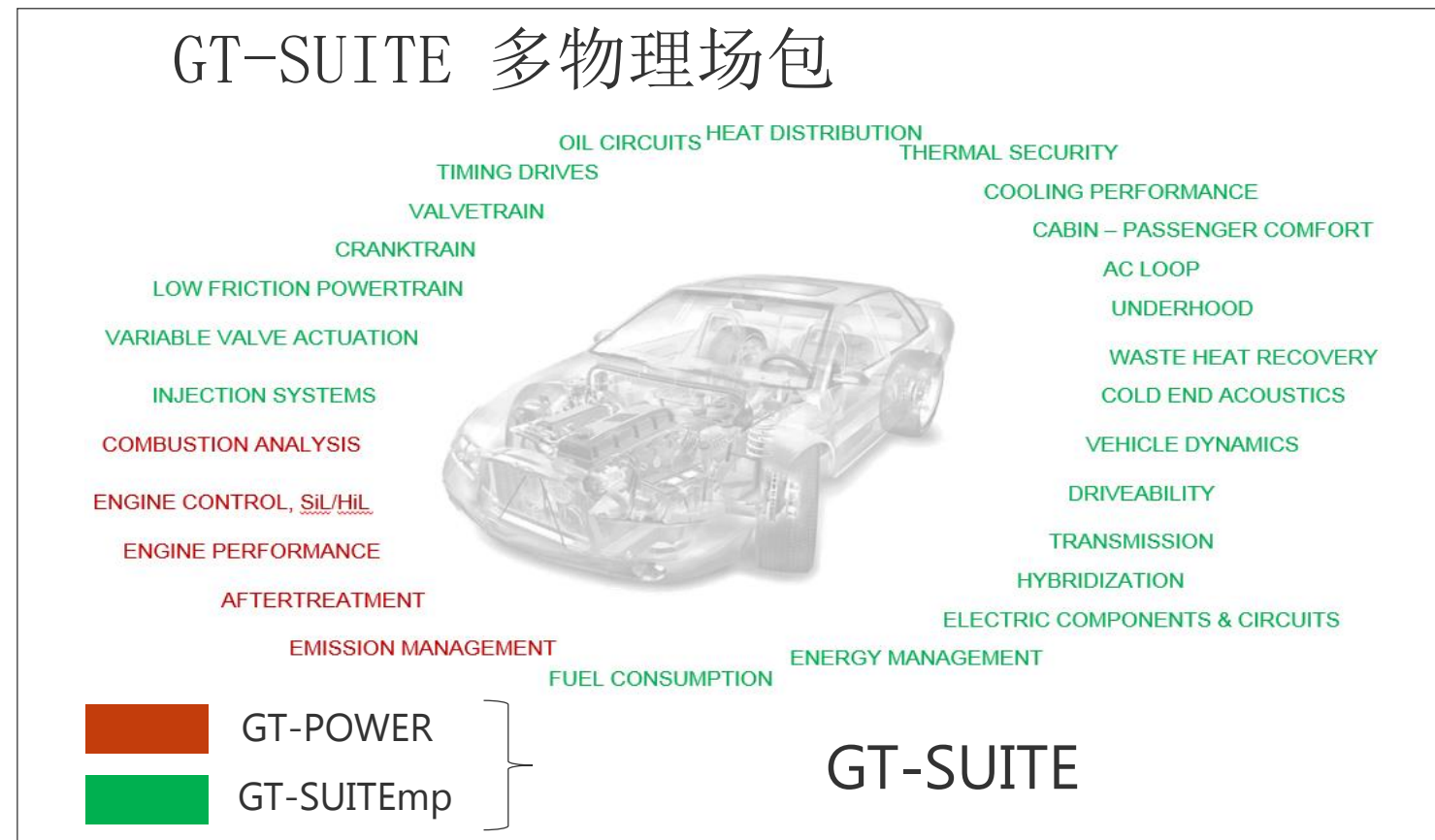
BOSCH

MAHLE





各种工具（前处理工具、建模环境、优化、后处理工具）是 GT-SUITE, GT-SUITEmp或 GT-POWER 的一部份



目录

1. 简介
2. 燃料电池简介
3. v2019功能回顾
4. 极化预测模拟
5. 组份渗透
6. 离散
7. 热管理
8. 系统平衡
9. 整车模拟

- 氢燃料在阳极氧化
- 氢离子(质子)穿过半透膜
- 电子通过外部电路转移, 产生电流
- 氢离子、电子和氧在阴极结合并发生反应
- 反应在电极之间产生电压

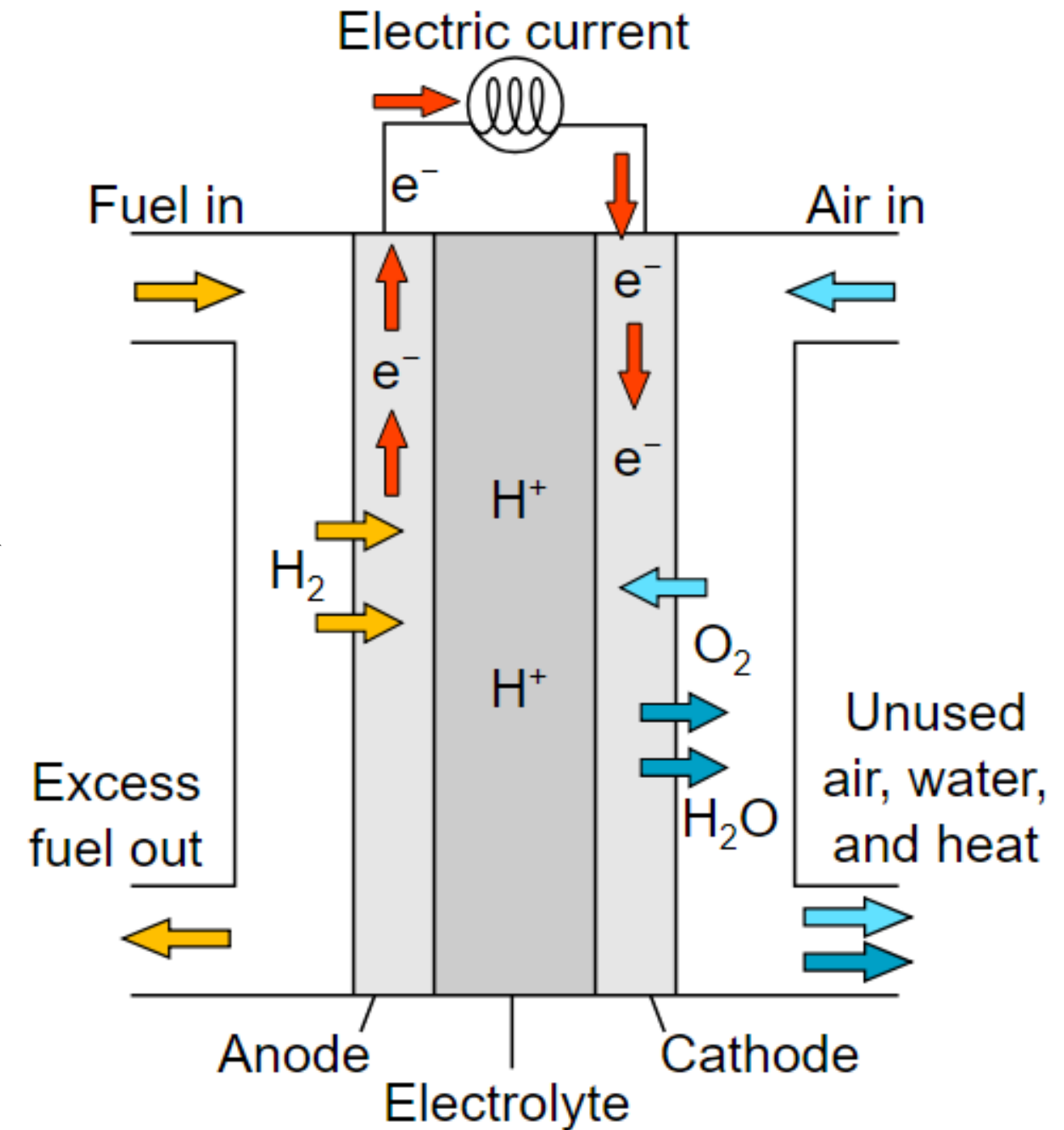


Image from Wikipedia

质子交换膜 (PEM) 燃料电池

■ 燃料电池的应用：

- 汽车推进 (电力到电机)
- BEV的续航里程扩展
- 固定电源

■ 优势：

- 高效
- 反应零排放
- 可再生能源产生氢的潜力

■ 挑战：

- 储氢及基础设施
- 成本

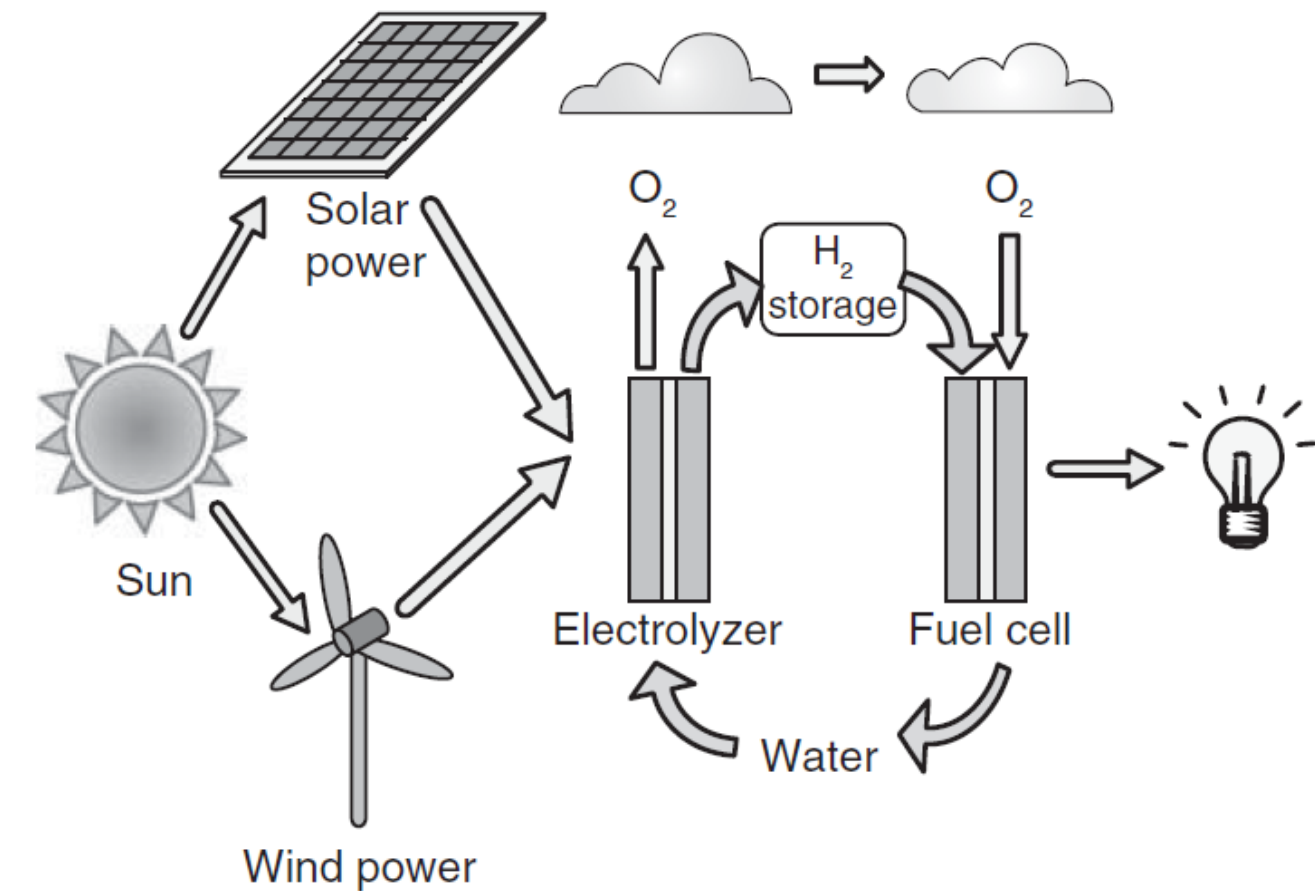


Figure 1.13. Schematic of hydrogen economy dream.

目录

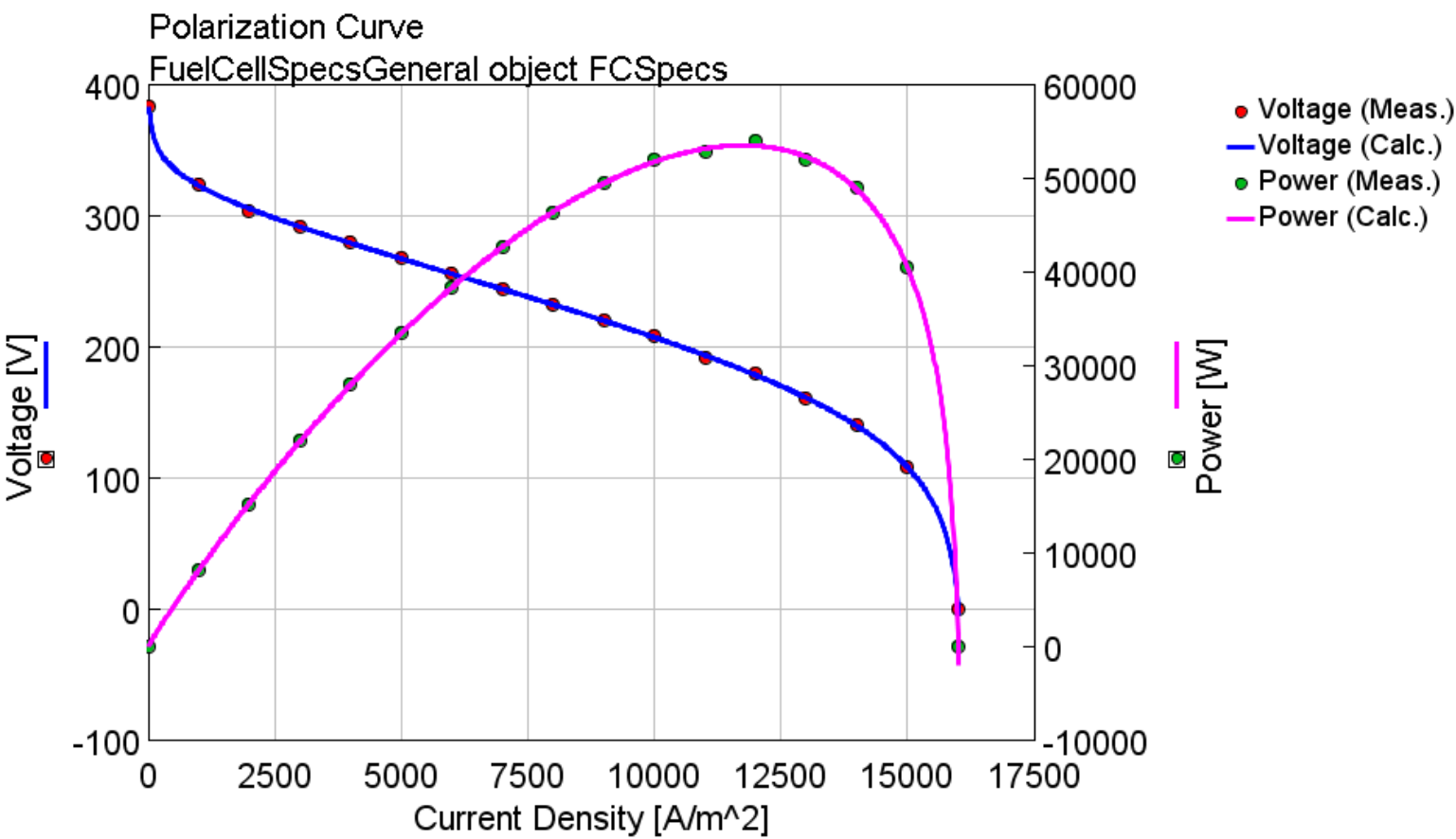
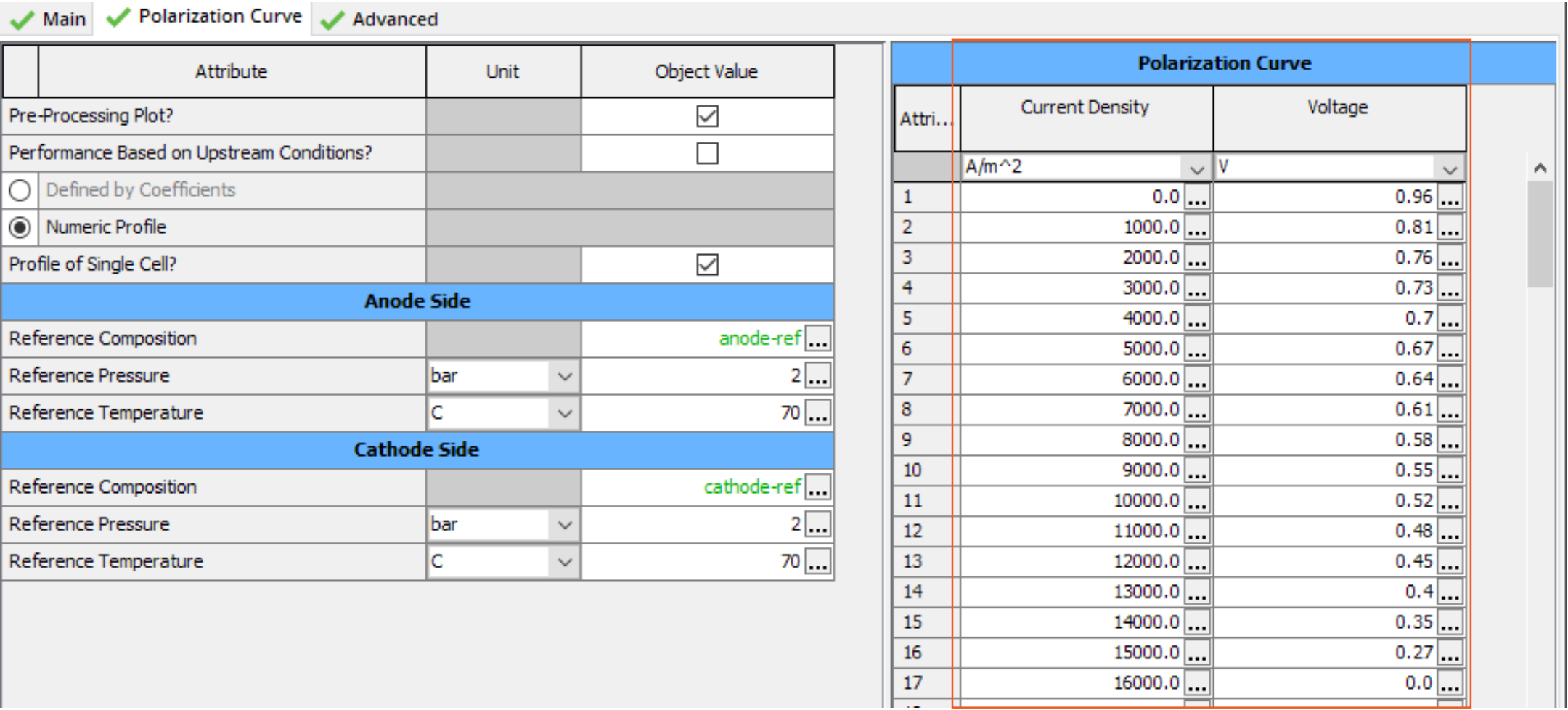
1. 简介
2. 燃料电池简介
3. v2019功能回顾
4. 极化预测模拟
5. 组份渗透
6. 离散
7. 热管理
8. 系统平衡
9. 整车模拟

■ 新模板:

- FuelCellPEM模板: 将流动、传质、传热、电合成一个模板
- FuelCellSpecsGeneral指针变量: 定义电化学性质

■ 极化曲线拟合 :

- 自动拟合出系数从数值曲线
- 基于参考条件



■ 通道的模拟可以处理成多个矩形管道


- 以前处理为简单的PipeRound
- 影响表面积的大小和导致传热的变化

■ 实现凝结

- 对水管理有影响和对传热产生影响

■ 冷却剂通道模型

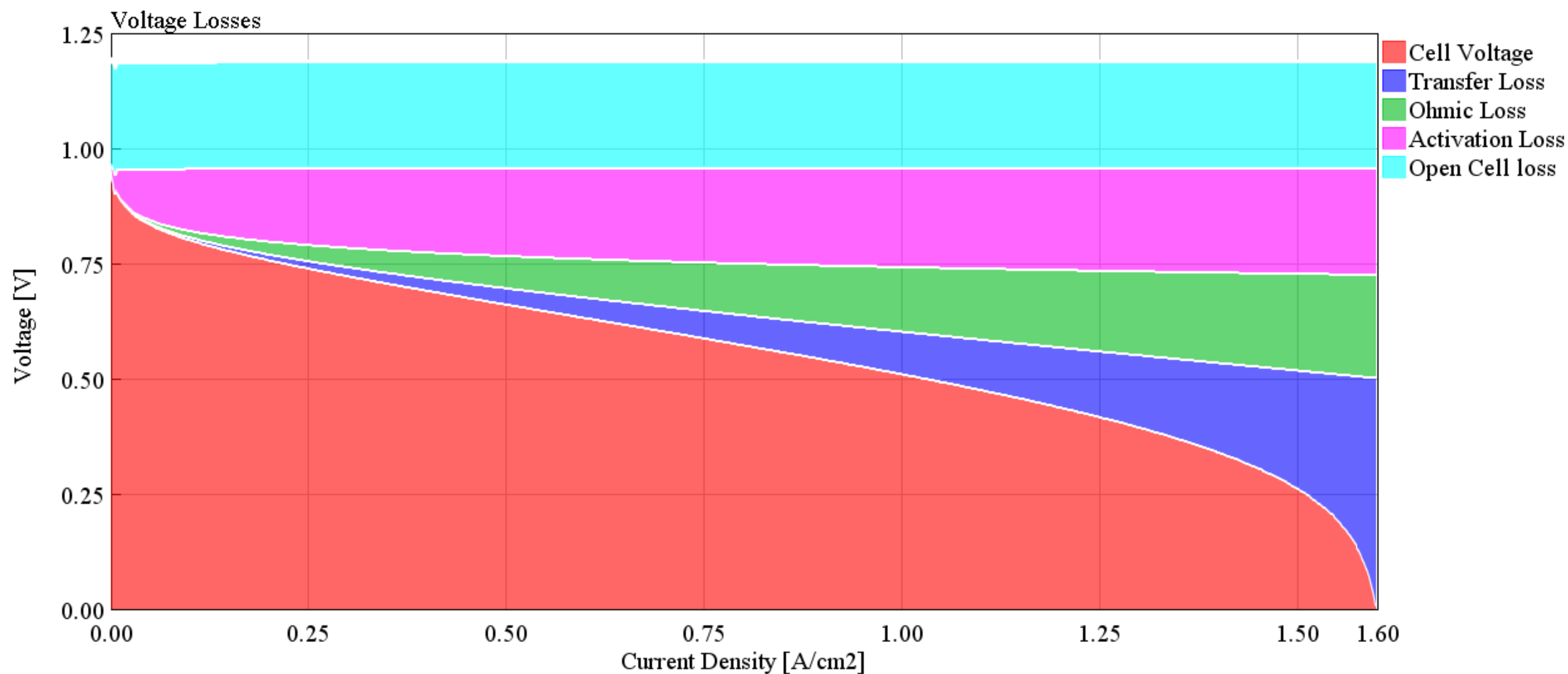
- 允许直接连接到冷却剂回路，而不是通过人工边界条件给定生成所有热量

<div>✓ Main ✓ Cathode ✓ Anode ✓ Coolant ✓ Discretization  Plots</div>		
Attribute	Unit	Object Value
Channel Shape		Rectangular ▾
Channel Height	mm ▾	1 ...
Channel Width	mm ▾	1 ...
Channel Length	mm ▾	200 ...
Total Number of Channels		2000 ...
Initial State		Air_Init ...
Pressure Drop Table		dP_air-table ...
Heat Transfer Multiplier		def (=1) ...
Condense/Evaporate Water Vapor		on_gas ▾

目录

1. 简介
2. 燃料电池简介
3. v2019功能回顾
4. 极化预测模拟
5. 组份渗透
6. 离散
7. 热管理
8. 系统平衡
9. 整车模拟

极化曲线 - 极化

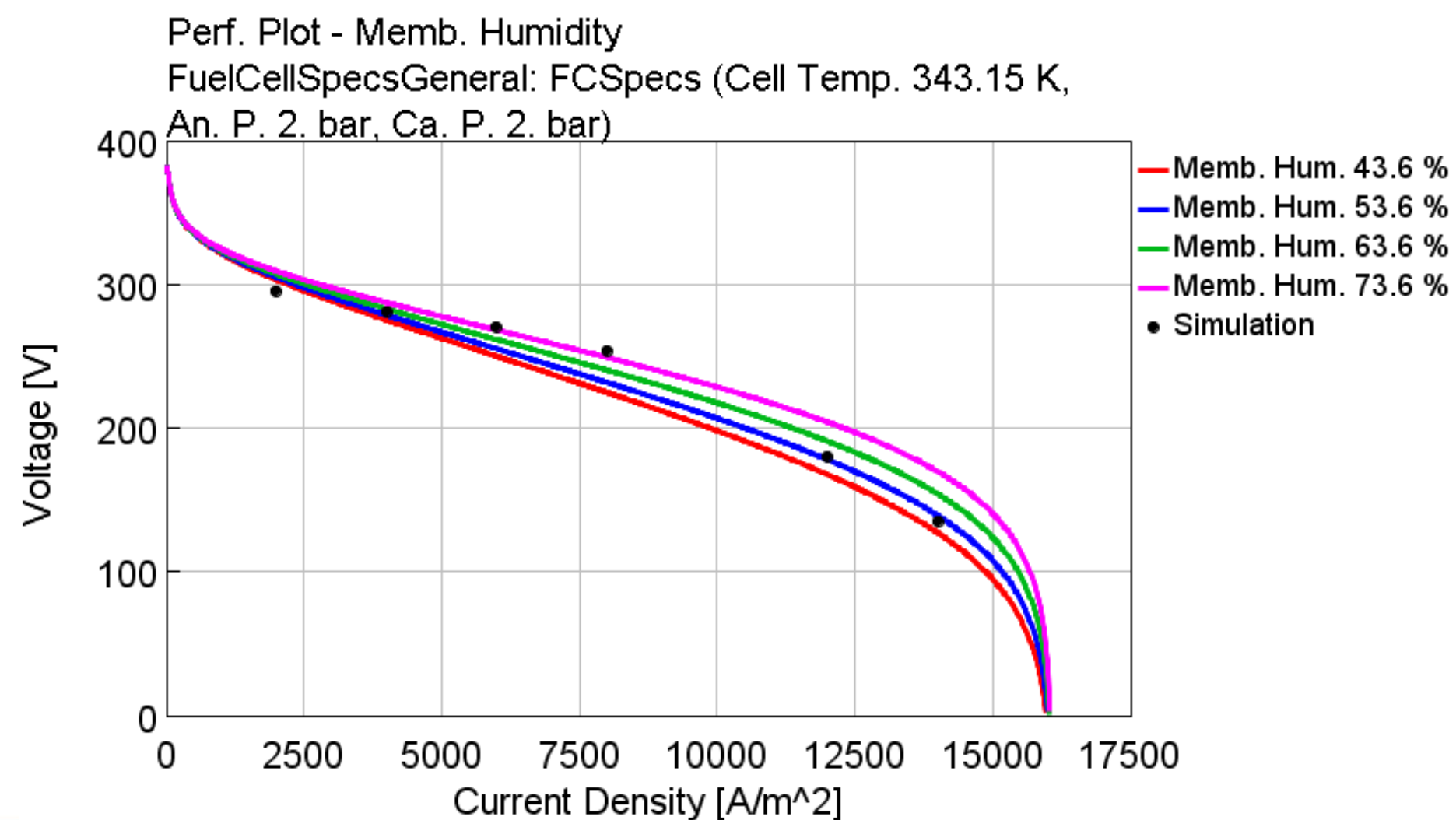
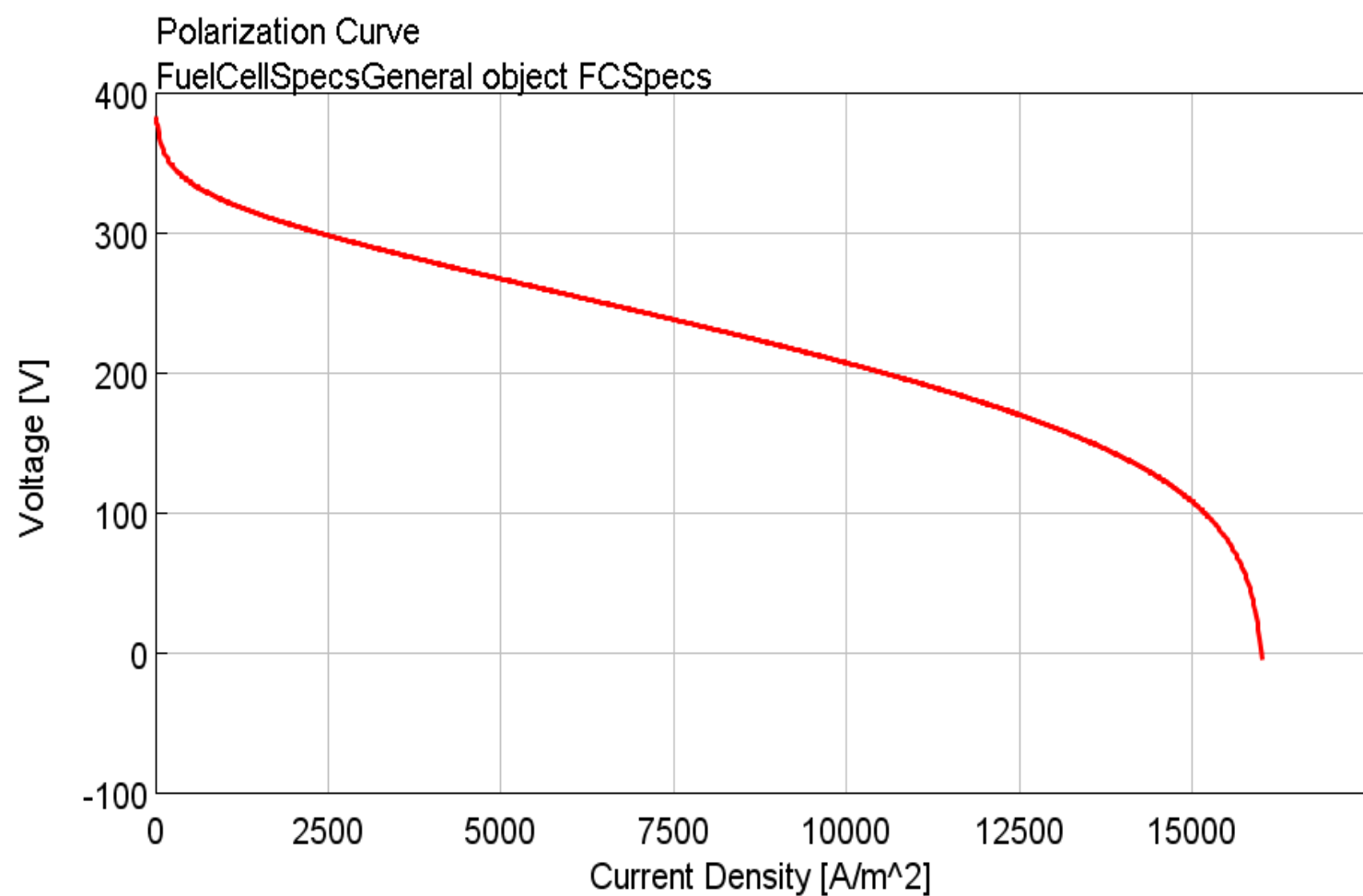


■ 欧姆极化

- 基于湿度和温度的欧姆电阻
- 对中/高电流密度下的性能有显著影响

■ 活化极化

- 根据温度、压力、组份浓度产生电流密度
- 对低电流密度下的性能有显著影响



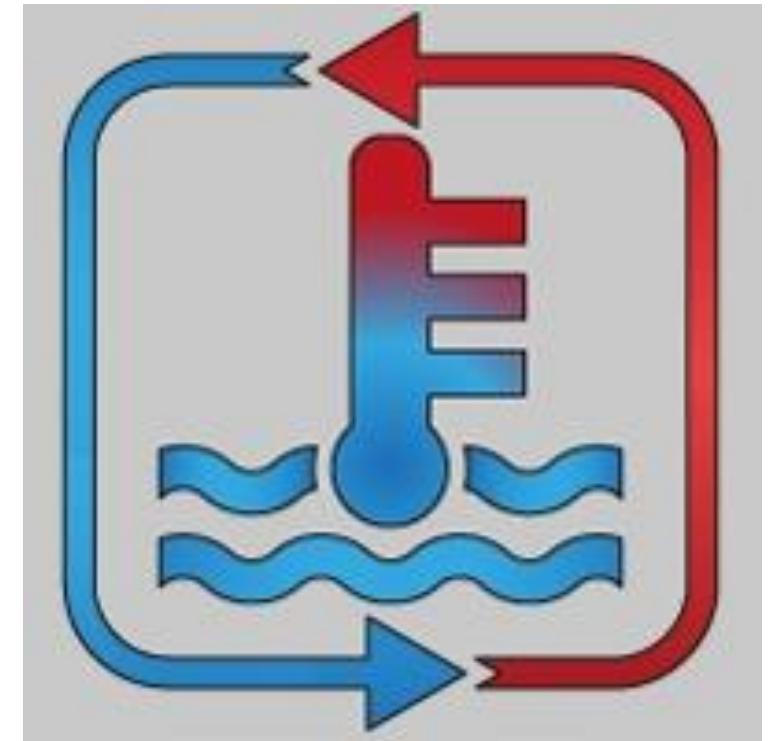
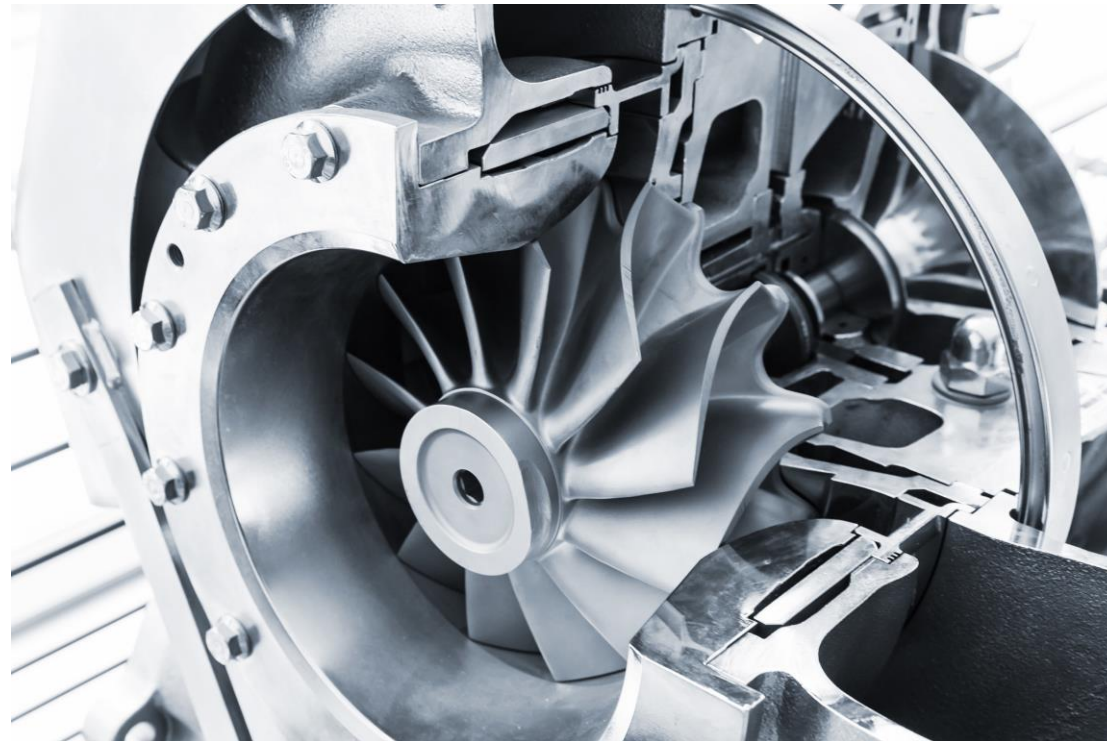
■ 对电流、电压和功率之间的关系有显著影响

■ 氢和氧的消耗率

- 压缩机匹配
- 氢泵或引射器匹配
- 化学当量控制
- 传到冷却液传热量
- 冷却泵匹配
- 散热器匹配
- 温度控制

■ 水管理

- 蒸发式加湿器
- 喷水



- 过电压（极化） 由反应动力学引起
- 必须克服活化能（ ΔG^{\ddagger} ） 去保持正向反应
- 氧还原反应主导活化极化, 氢的氧化反应可以忽略
- 电流密度： 运行工况点是在正向和反向反应速率的平衡状态

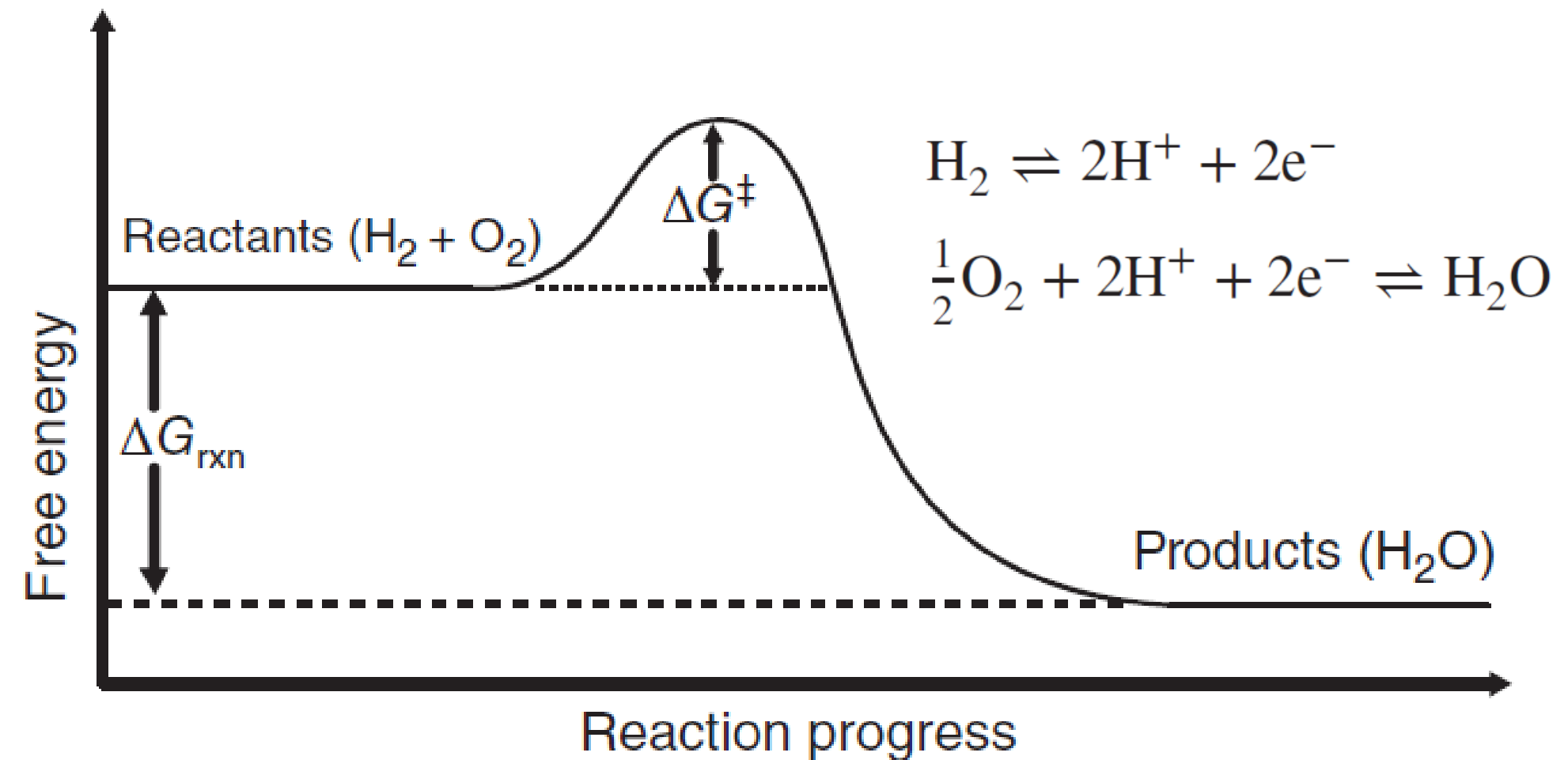
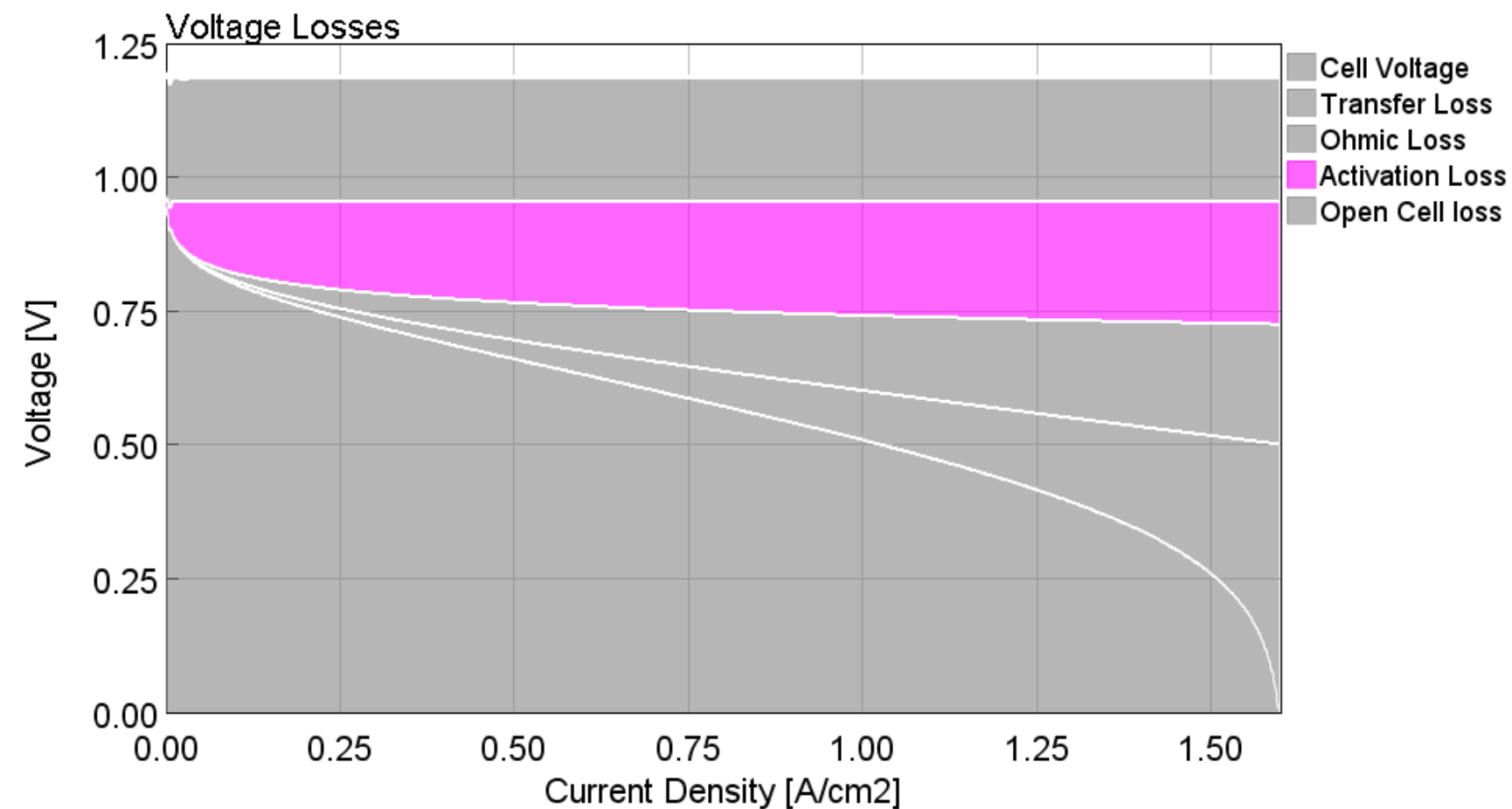
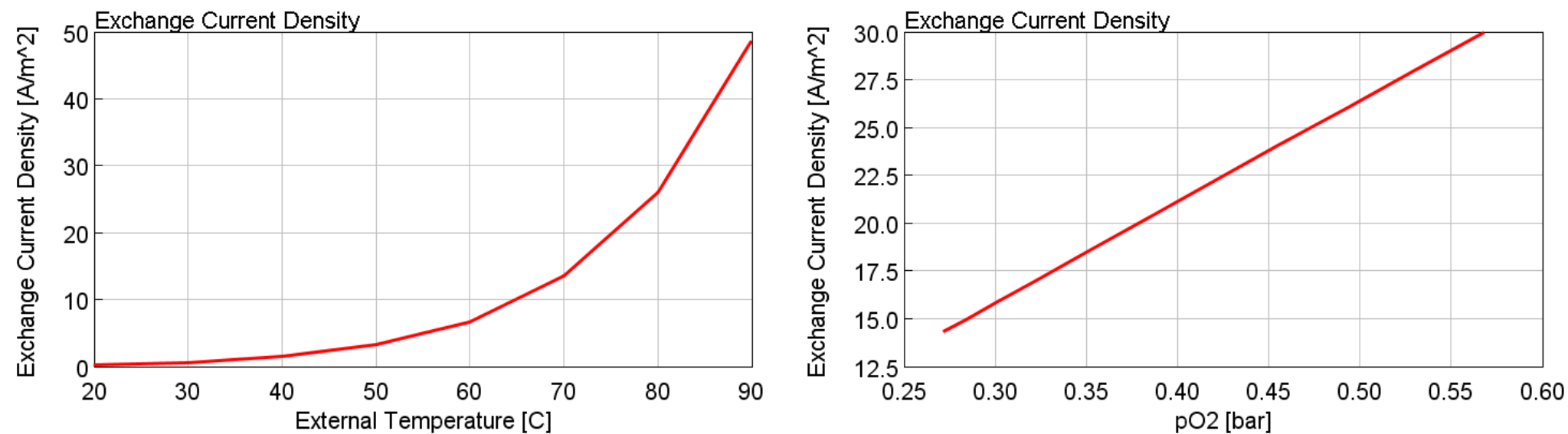


Image from O'Hayre, R., Cha, S.W., Colella, W.G., Prinz, F.B., *Fuel Cell Fundamentals* (Wiley 2016)

活化极化：电流密度

- 提供在参考条件下的 (P₀₂ 和 T_{cell}) 的交换电流密度 (i₀)
- i₀^{ref} a_c L_c 这一项由参考条件下来计算获得
- 交换电流密度和活化损失在每个时间步长更新计算，它们是 P₀₂ 和 T_{cell} 的函数



Butler-Volmer

$$i = i_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha F V_{act}}{RT} \right) - \exp \left(\frac{-(1 - \alpha) F V_{act}}{RT} \right) \right]$$

Tafel

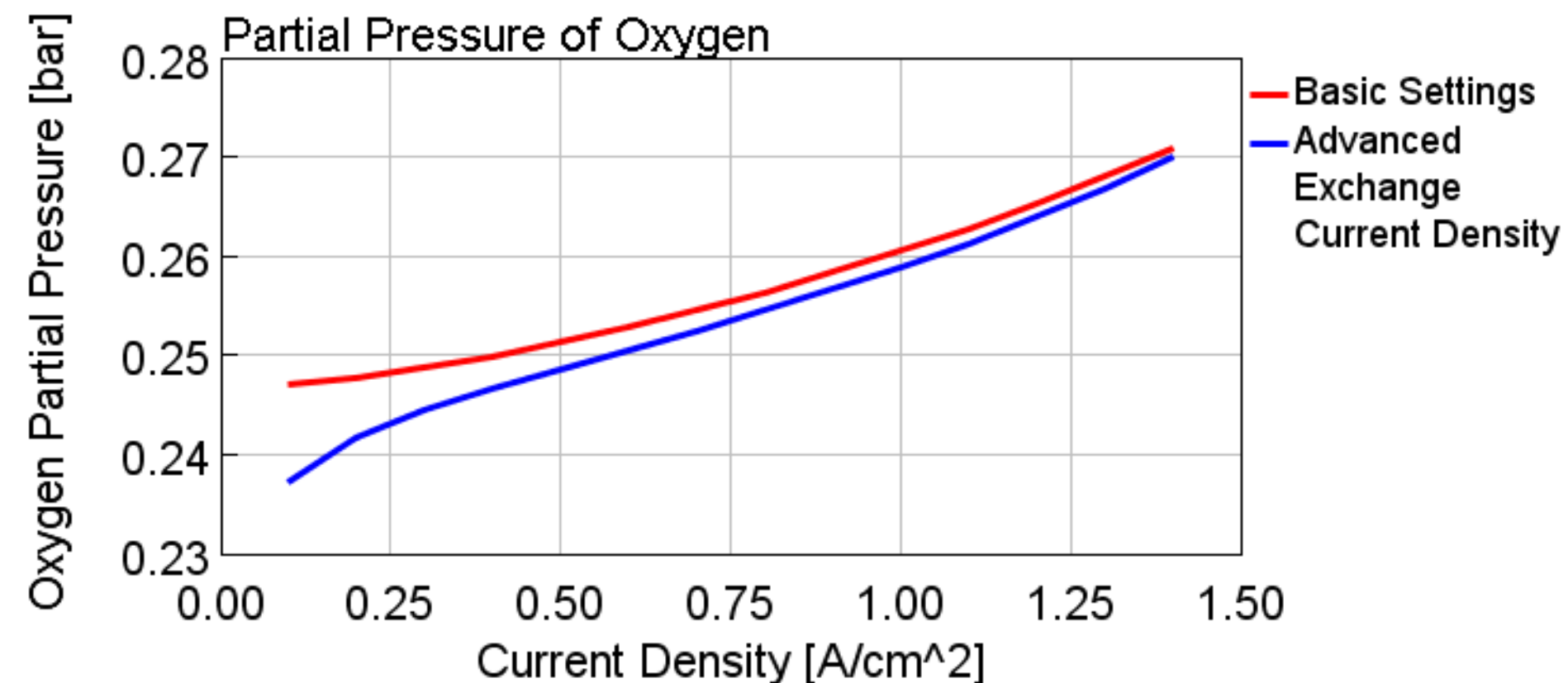
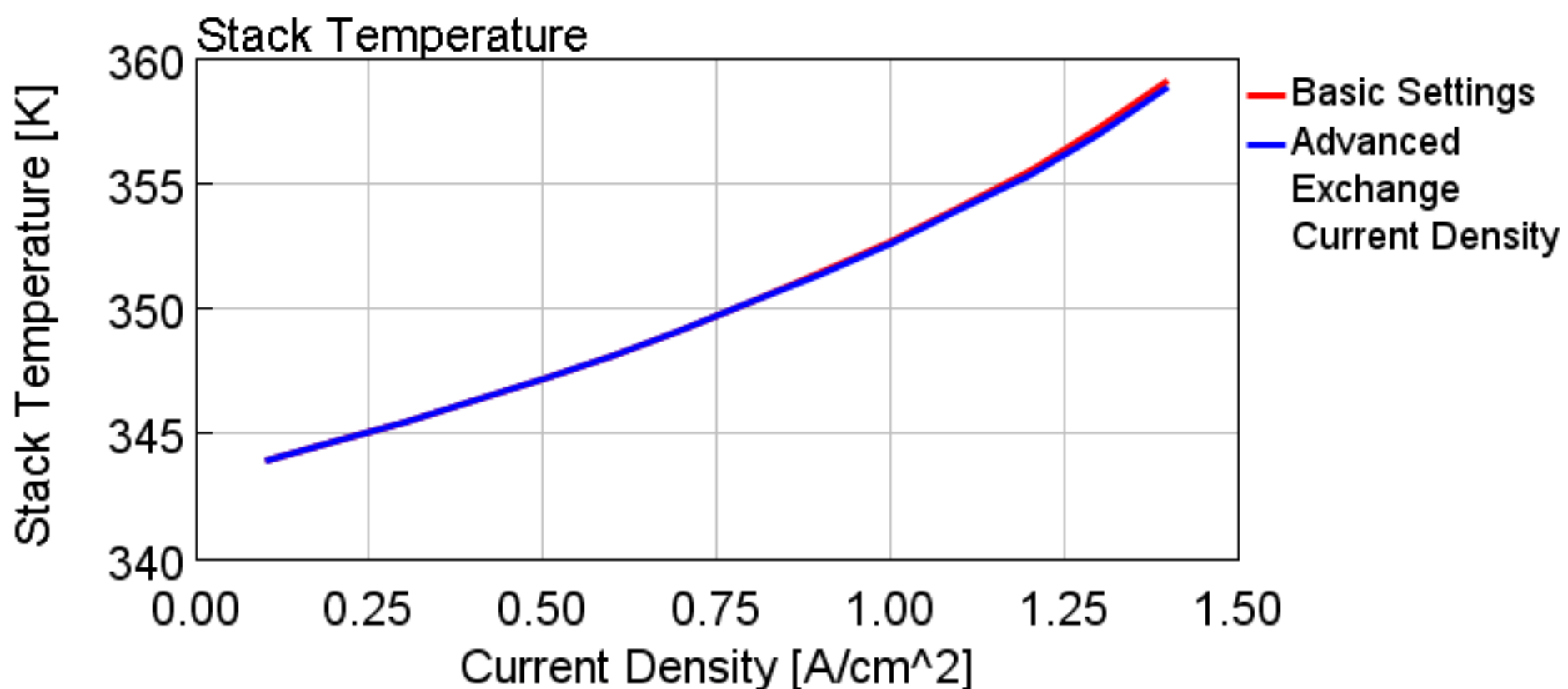
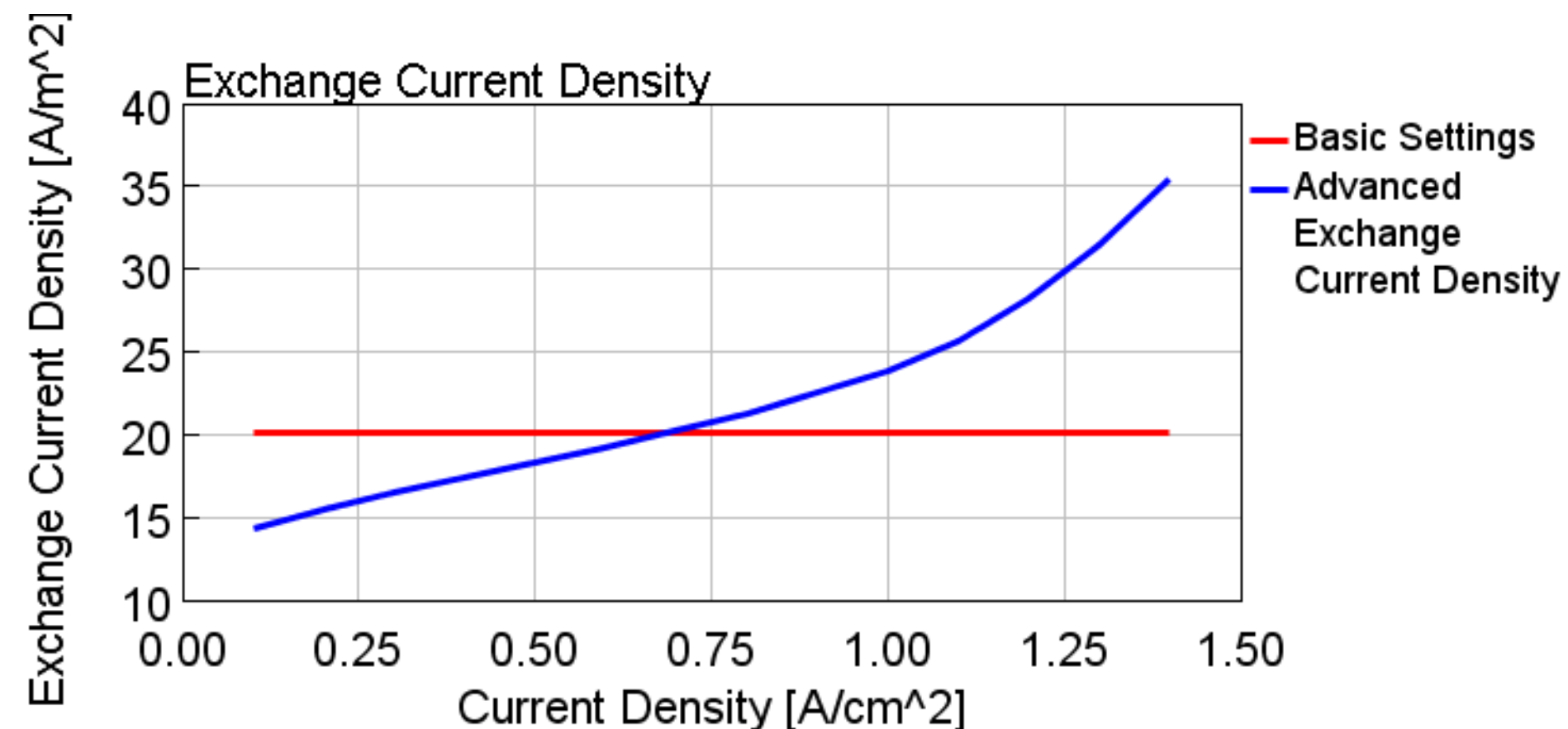
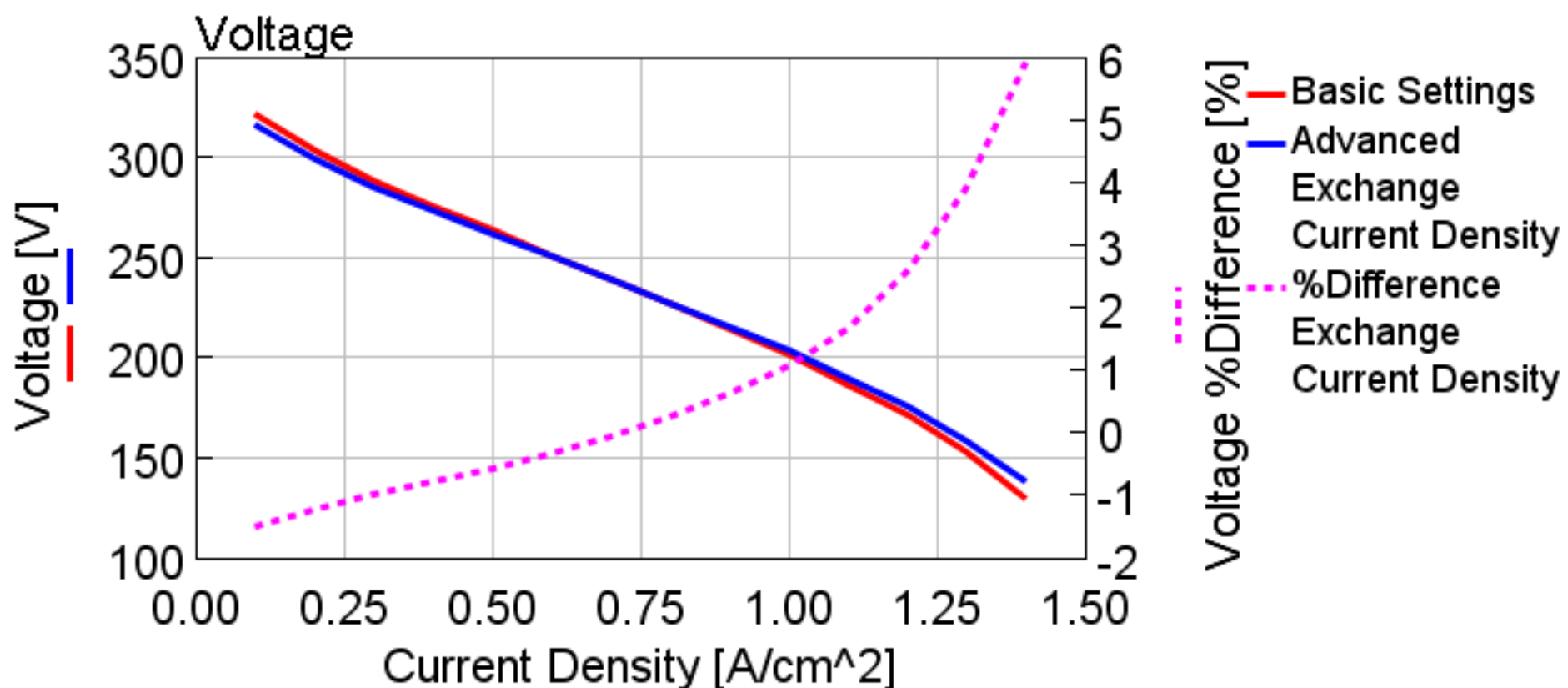
$$V_{act} = \begin{cases} \frac{R_{gas} \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \left(\frac{i}{i_0} \right) & i \leq i_0 / (1 - \alpha) \\ \frac{R_{gas} \cdot T}{2 \cdot \alpha \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) & i > i_0 / (1 - \alpha) \end{cases}$$

$$i_0 = i_0^{ref} a_c L_c \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^\gamma \left[\exp \left(\frac{E}{R} \right) \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{cell}} \right) \right]$$

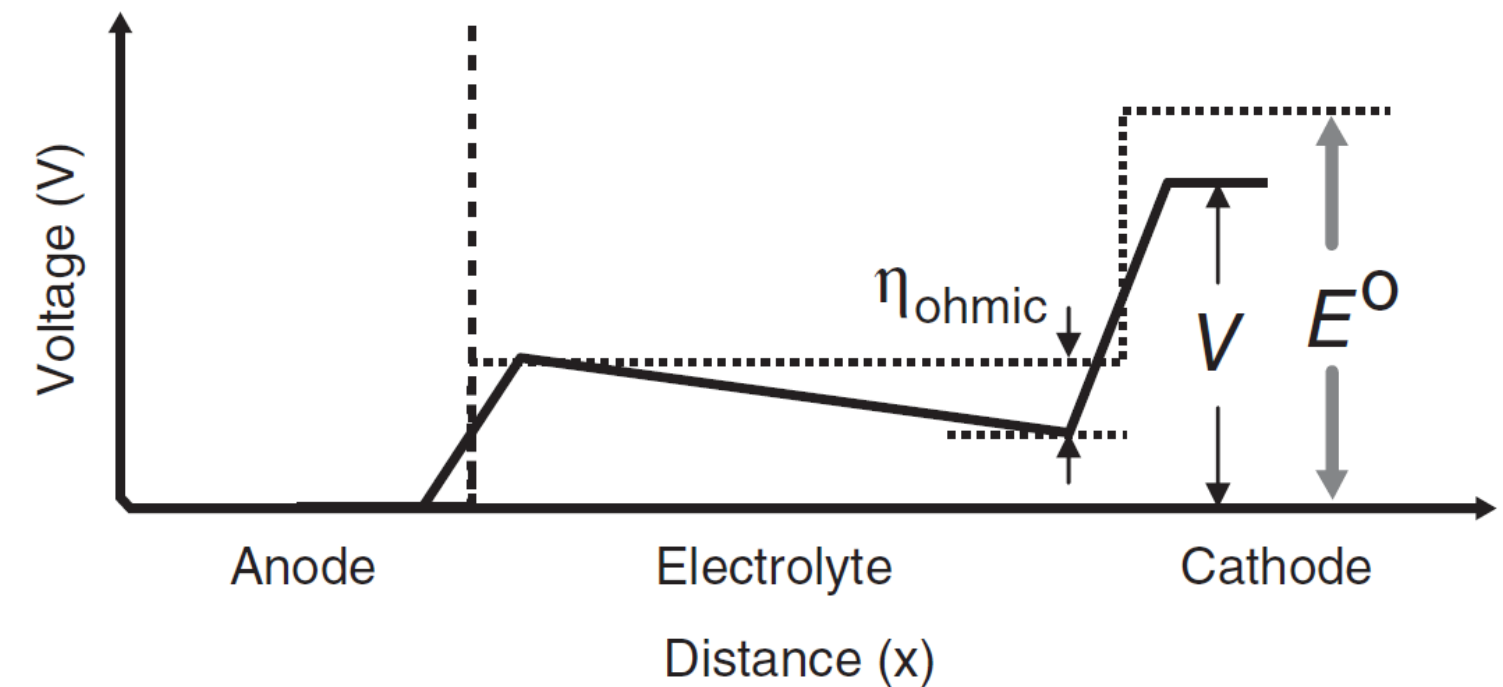
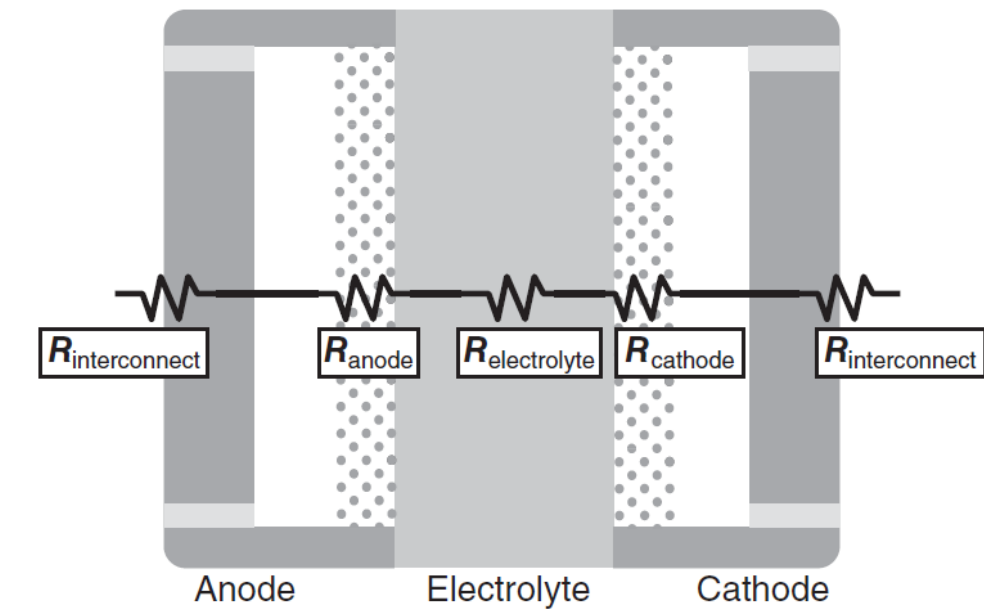
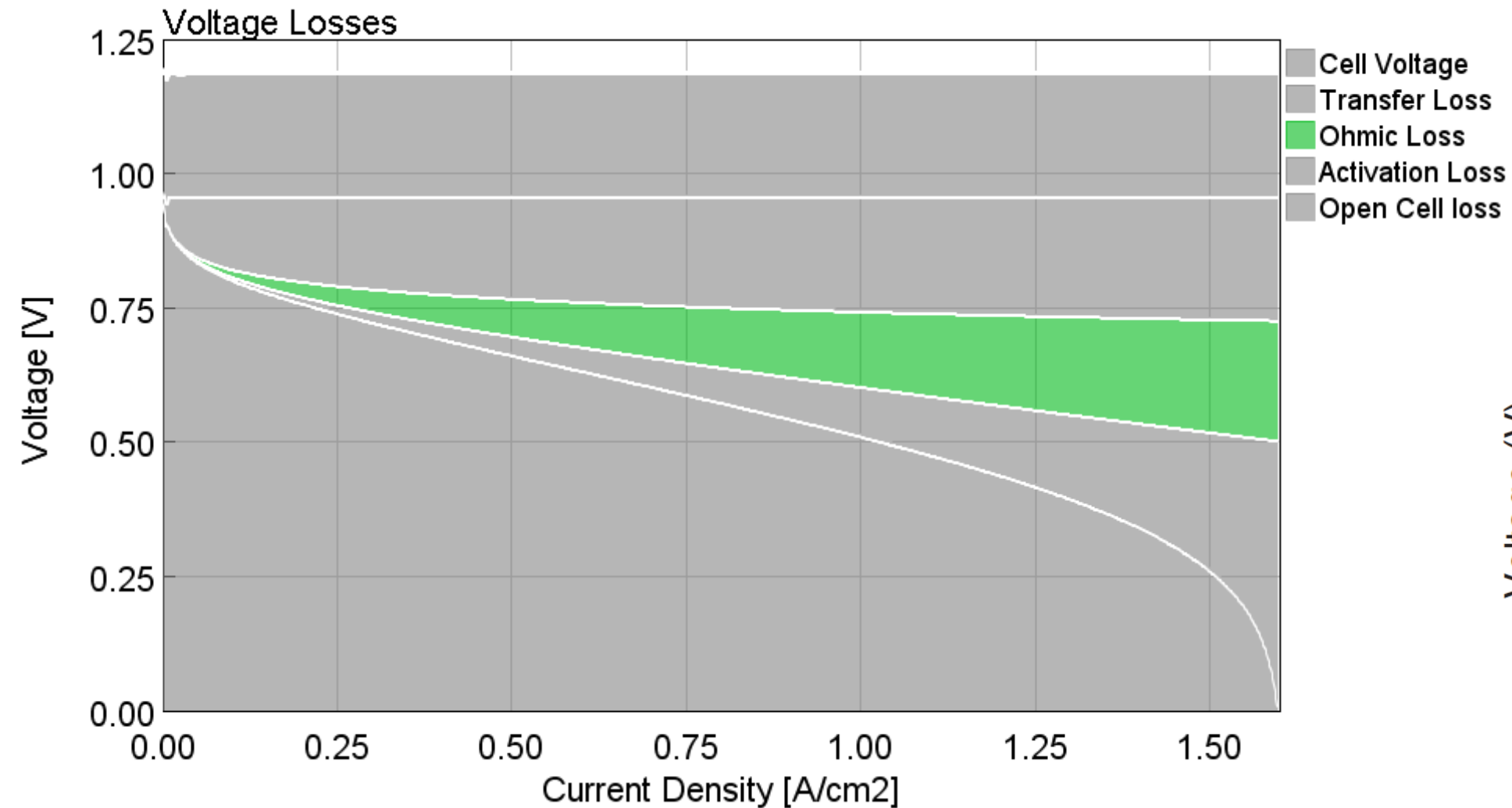
$$i_0^{ref} a_c L_c = \frac{i_0}{\left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^\gamma \left[\exp \left(\frac{E}{R} \right) \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{cell}} \right) \right]}$$

Murschenhofer, D., Kuzdas, D., Braun, S. and Jakubek, S., 2018. "A real-time capable quasi-2D proton exchange membrane fuel cell model. Energy conversion and management", 162, pp.159-175.

高级的交流电流密度模型的效果



- 所有的来源是：由氢离子(质子)电阻和电子跨膜电导及碳结构引起
- 电子电阻忽略
- 通过电解质的离子电阻占主导地位.



- 提供在参考条件 (T_{cell} , a_m) 下的欧姆电阻
- 姆电阻和欧姆极化在每一个时间步长进行分析, 它们是关于 T_{cell} 和 a_m 的函数

$$V_{ohm} = iR_{ohm}$$

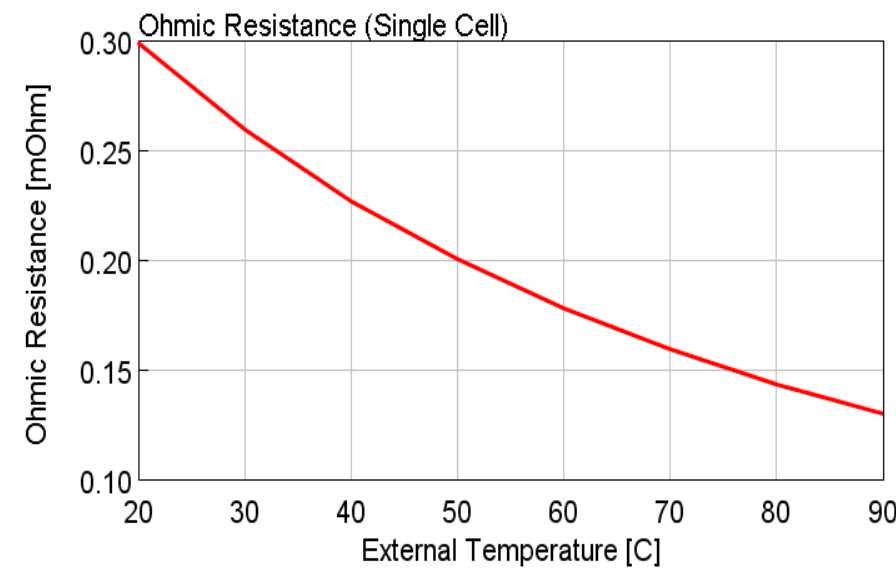
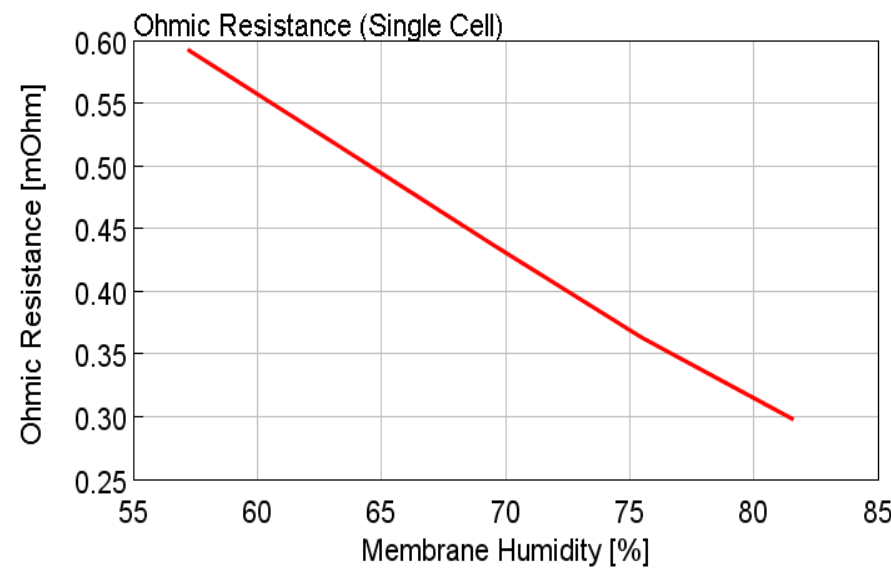
$$R_{ohm} = t_m / \sigma_m$$

$$\sigma_m = (b_{11}\lambda_m - b_{12}) \exp\left(b_2 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{cell}}\right)\right)$$

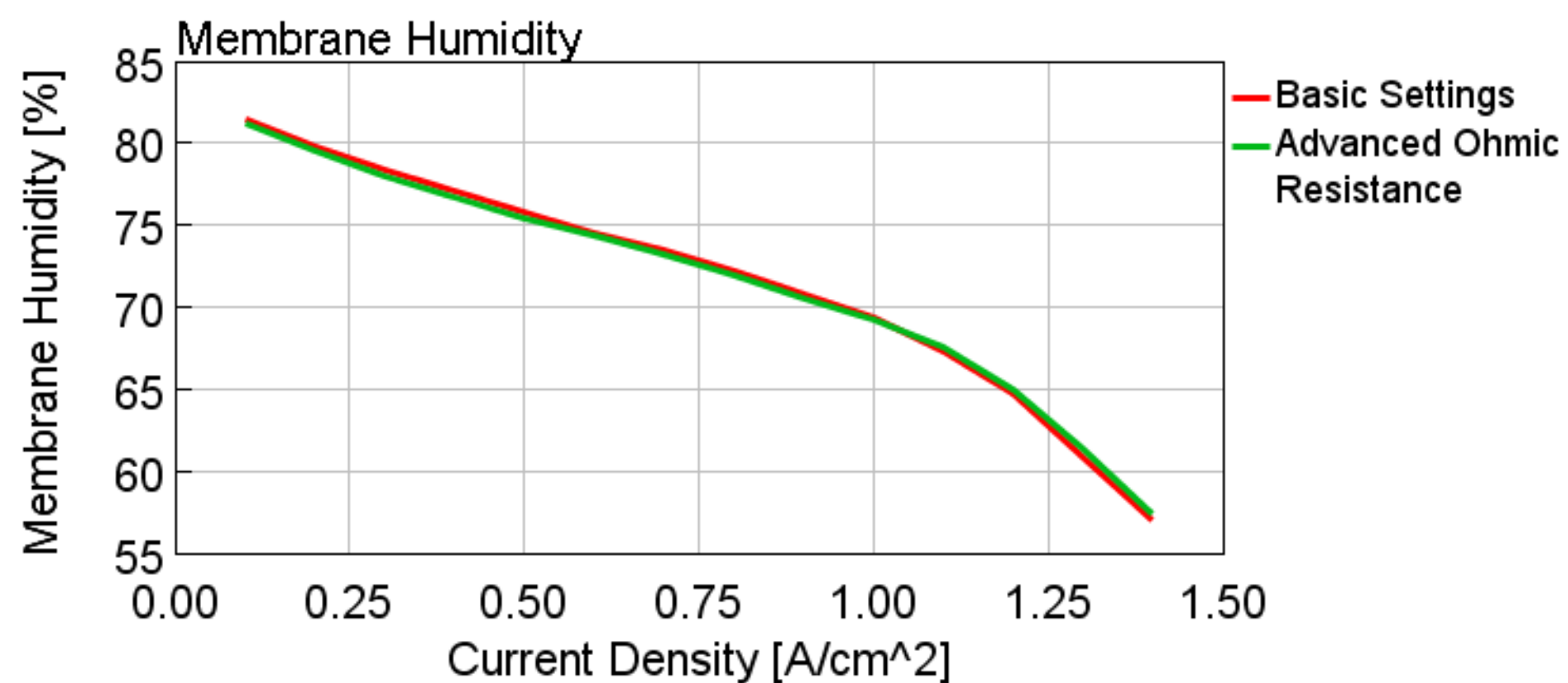
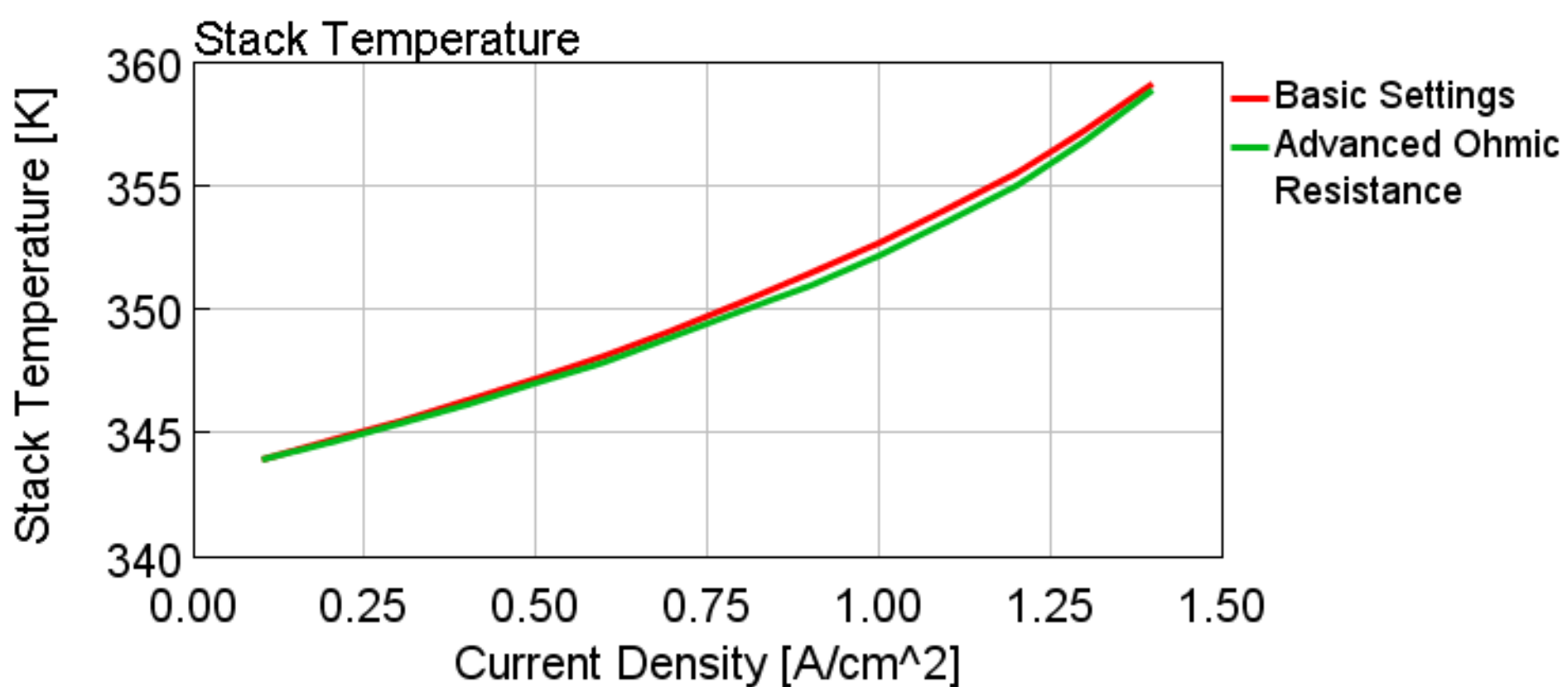
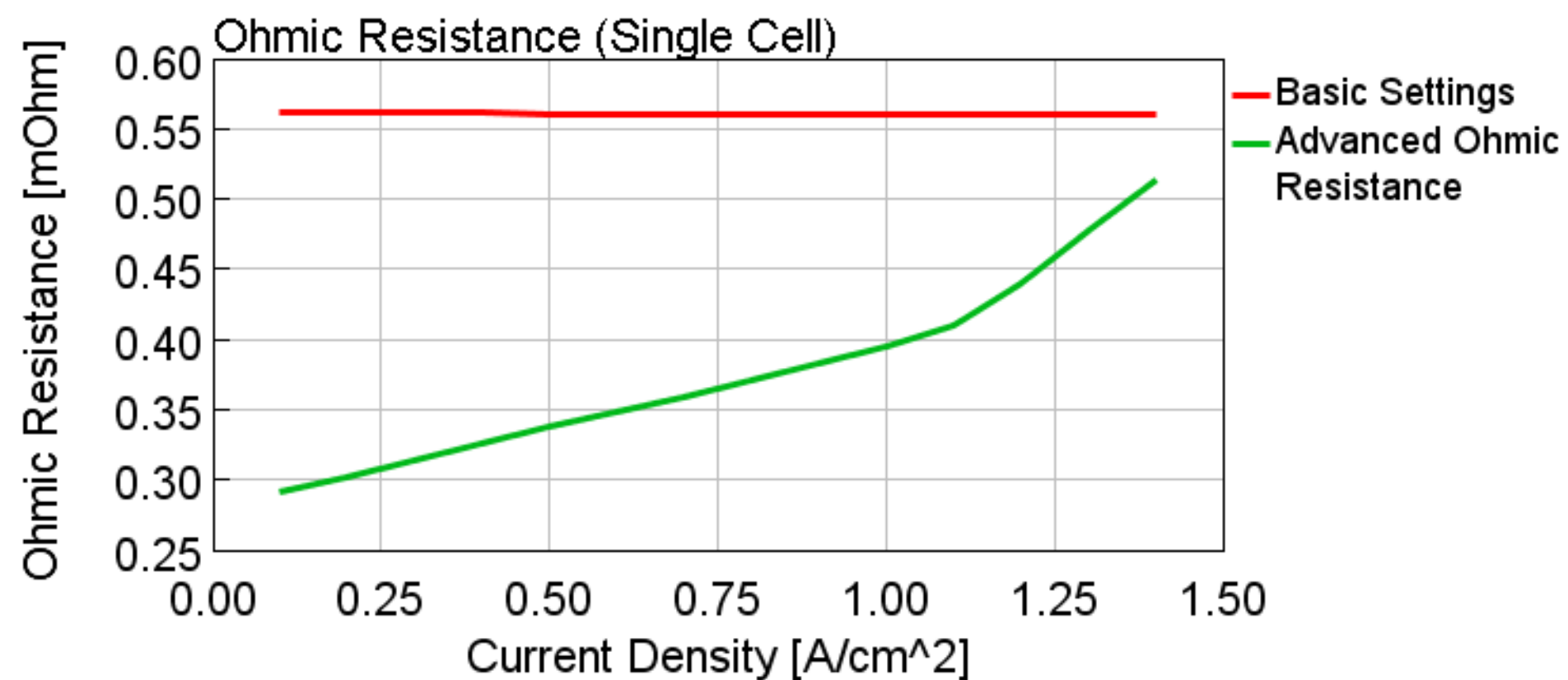
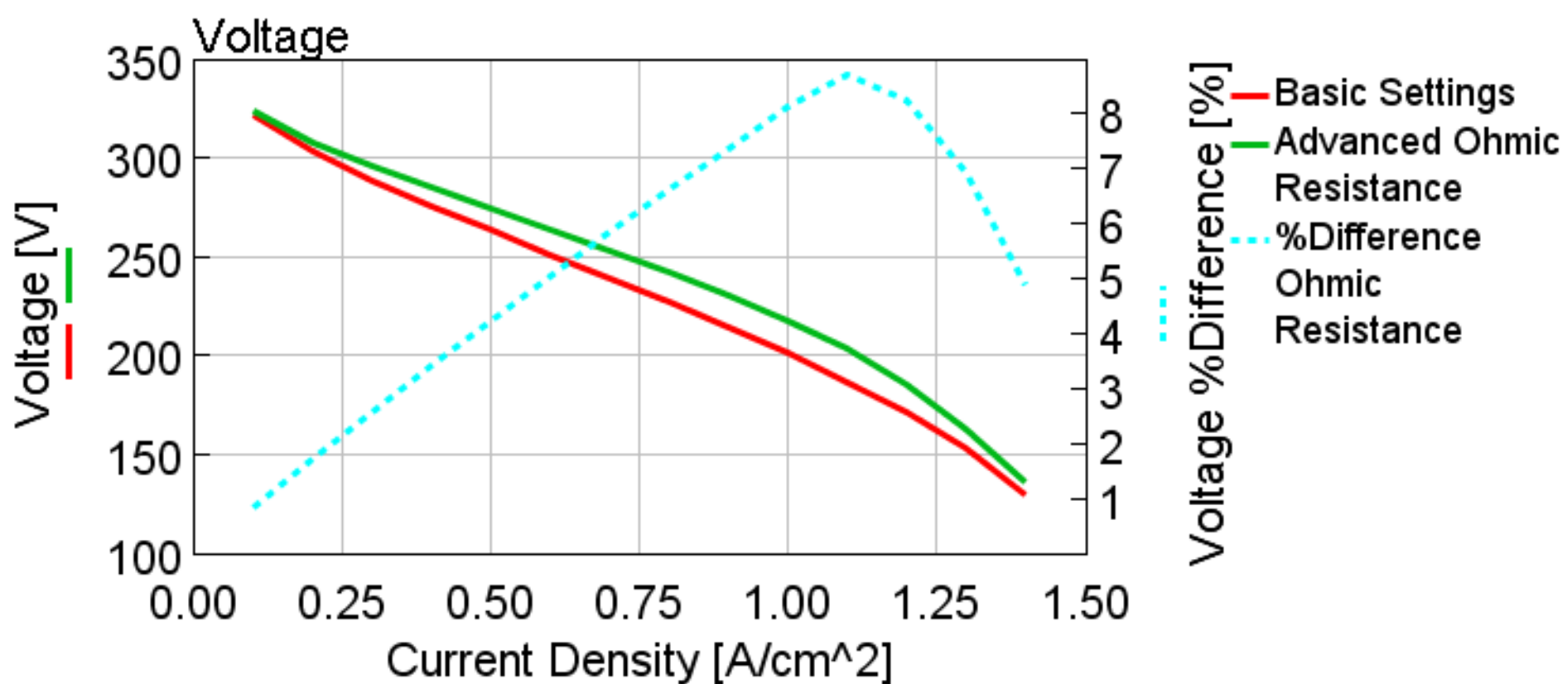
$$b_{11} = \left(\frac{t_m / R_{ohm}}{\exp\left(b_2 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{cell}}\right)\right)} + b_{12} \right) / \lambda_m$$

$$\lambda_m = \begin{cases} 0.043 + 17.81a_m - 39.85a_m^2 + 36a_m^3, & 0 \leq a_m \leq 1 \\ \min(16, 14 + 1.4(a_m - 1)), & 1 < a_m \end{cases}$$

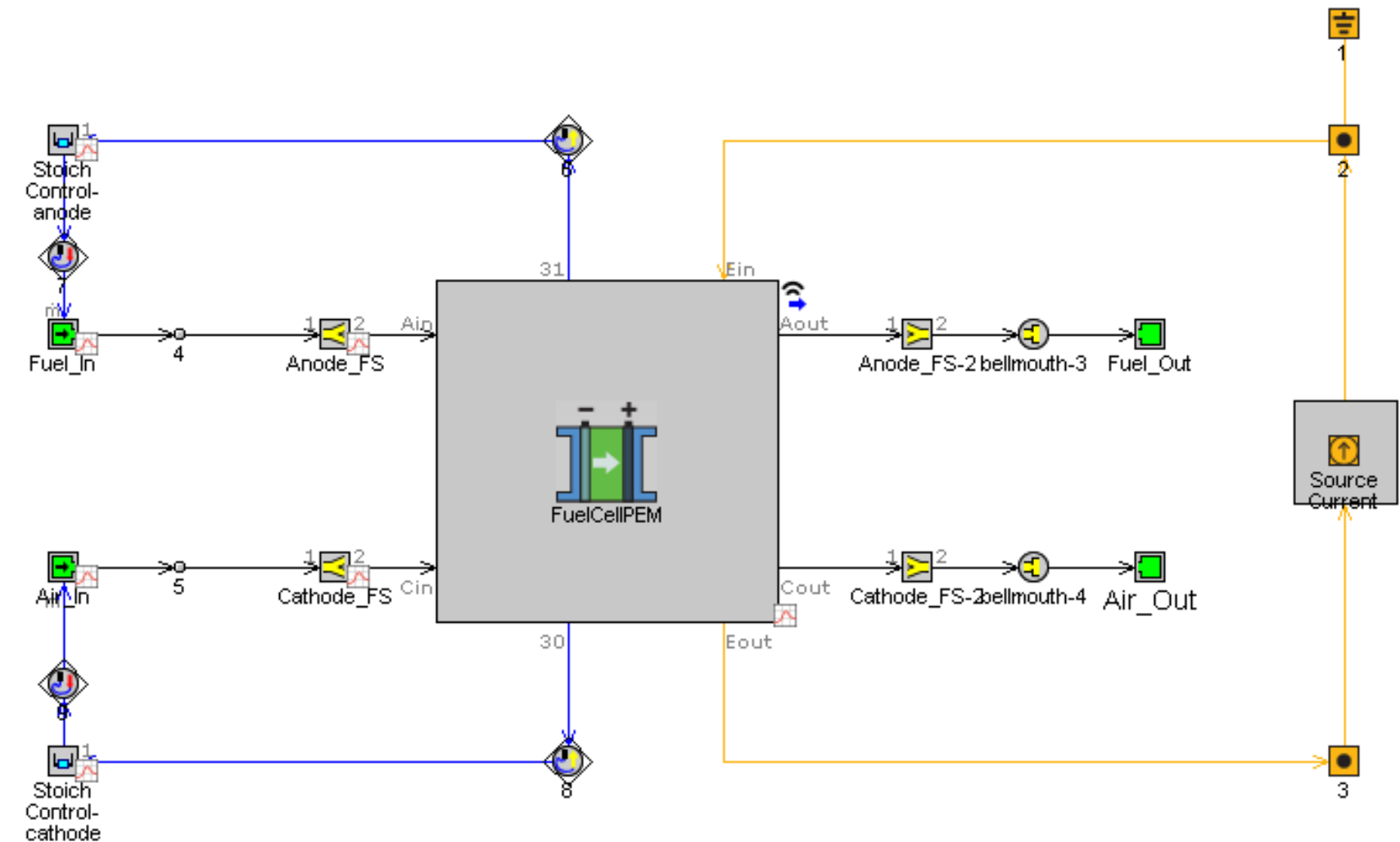
$$a_m = \frac{p_{H_2O}}{p_{sat}}$$

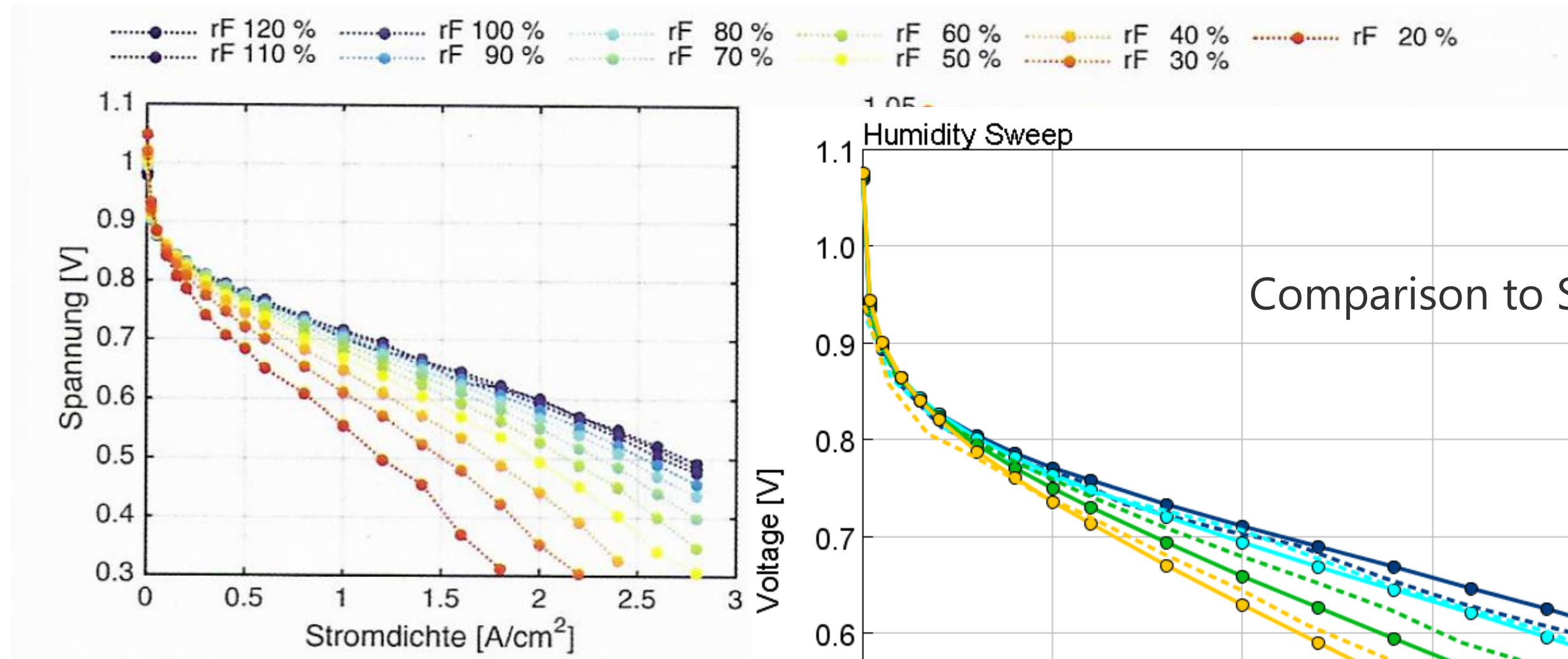


Springer, T.E., Zawodzinski, T.A. and Gottesfeld, S., 1991. "Polymer electrolyte fuel cell model". Journal of the electrochemical society, 138(8), pp.2334-2342.

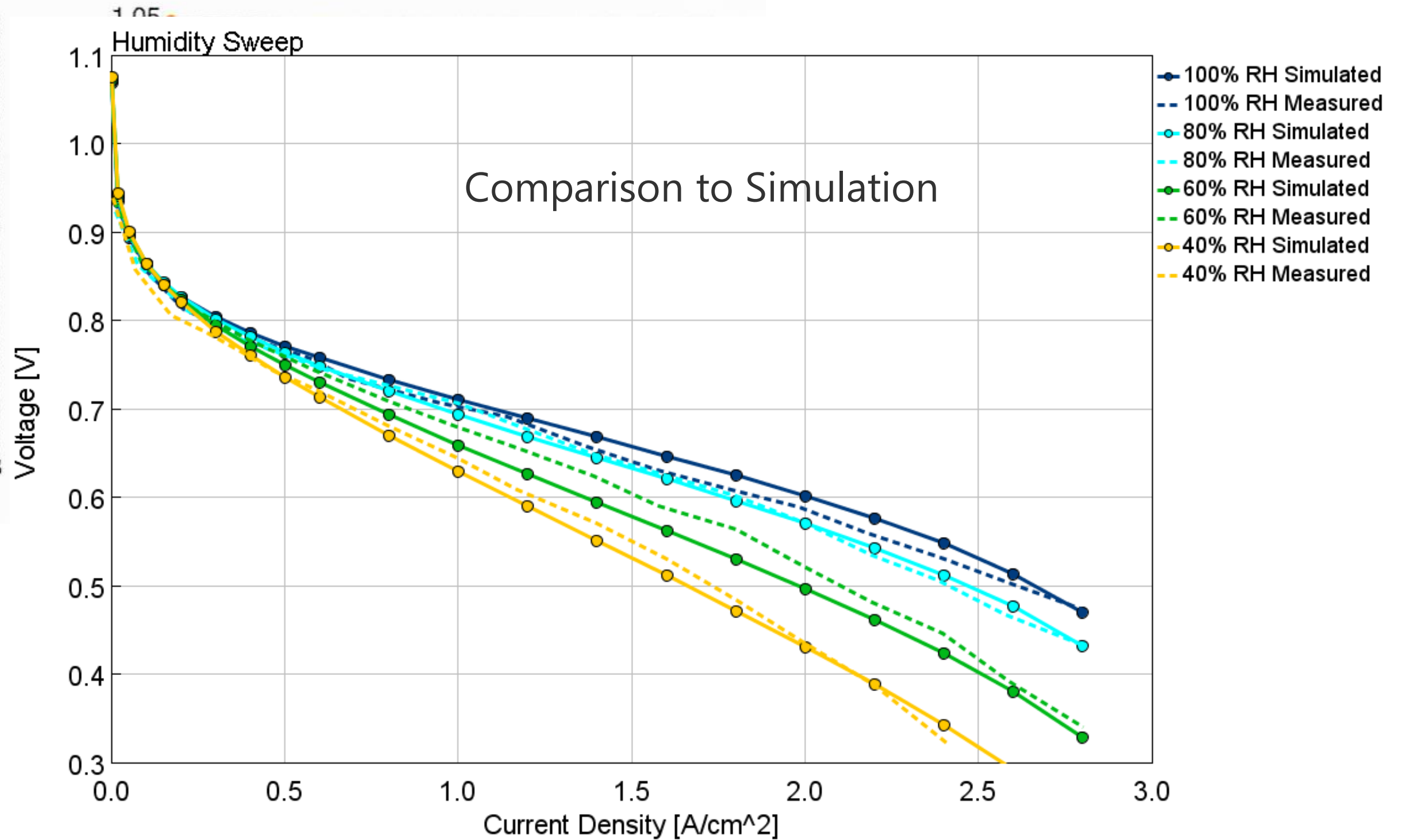


- 扫描变化入口气体的相对湿度
- 在每一个相对湿度条件下，测量电压 vs. 电流密度
- 高 ($\lambda = 9$) 化学计量学用于减轻影响的水产生反应
- 阴极和阳极进口的湿度相等，以减少水的渗透
- 恒定的入口温度 (80°C)
- 压力大约为 $\sim 1.3\text{ bar}$ ，与入口流量相关

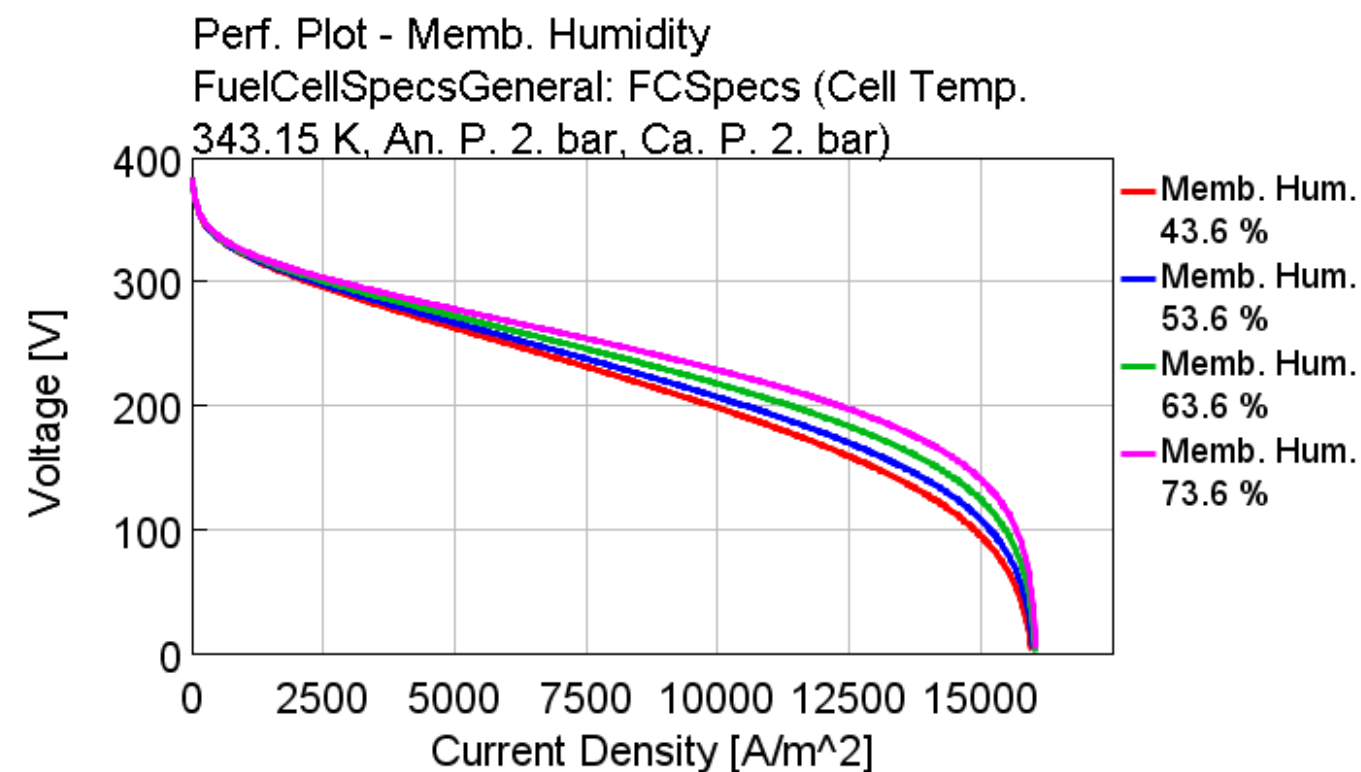
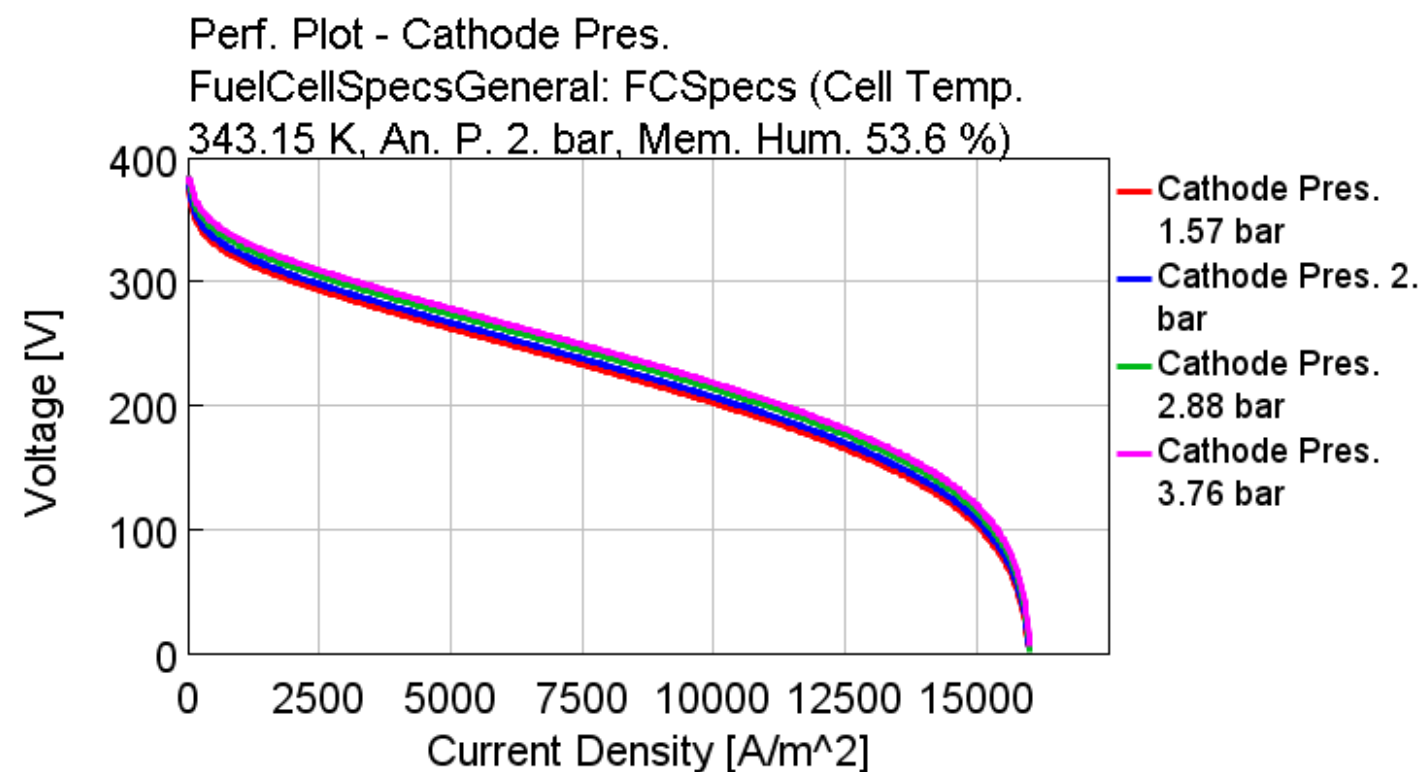
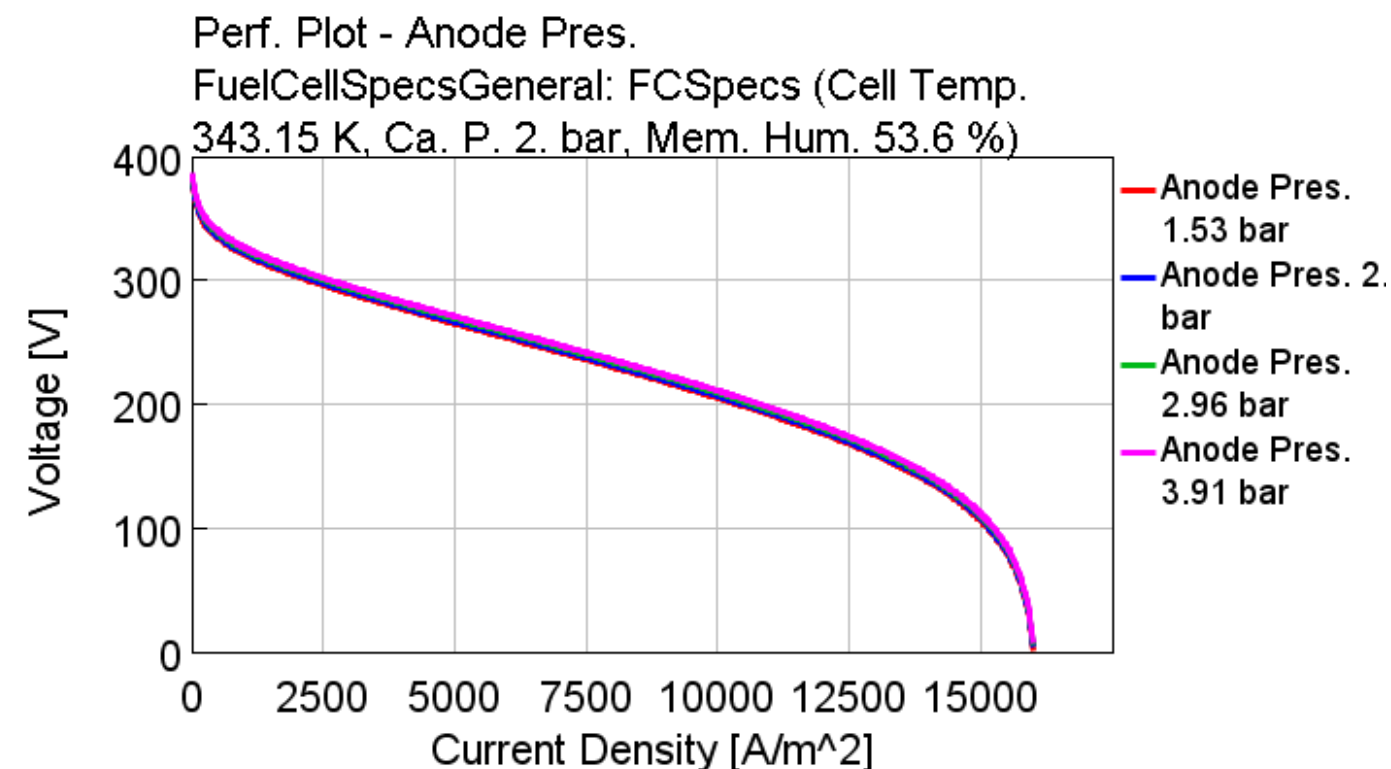
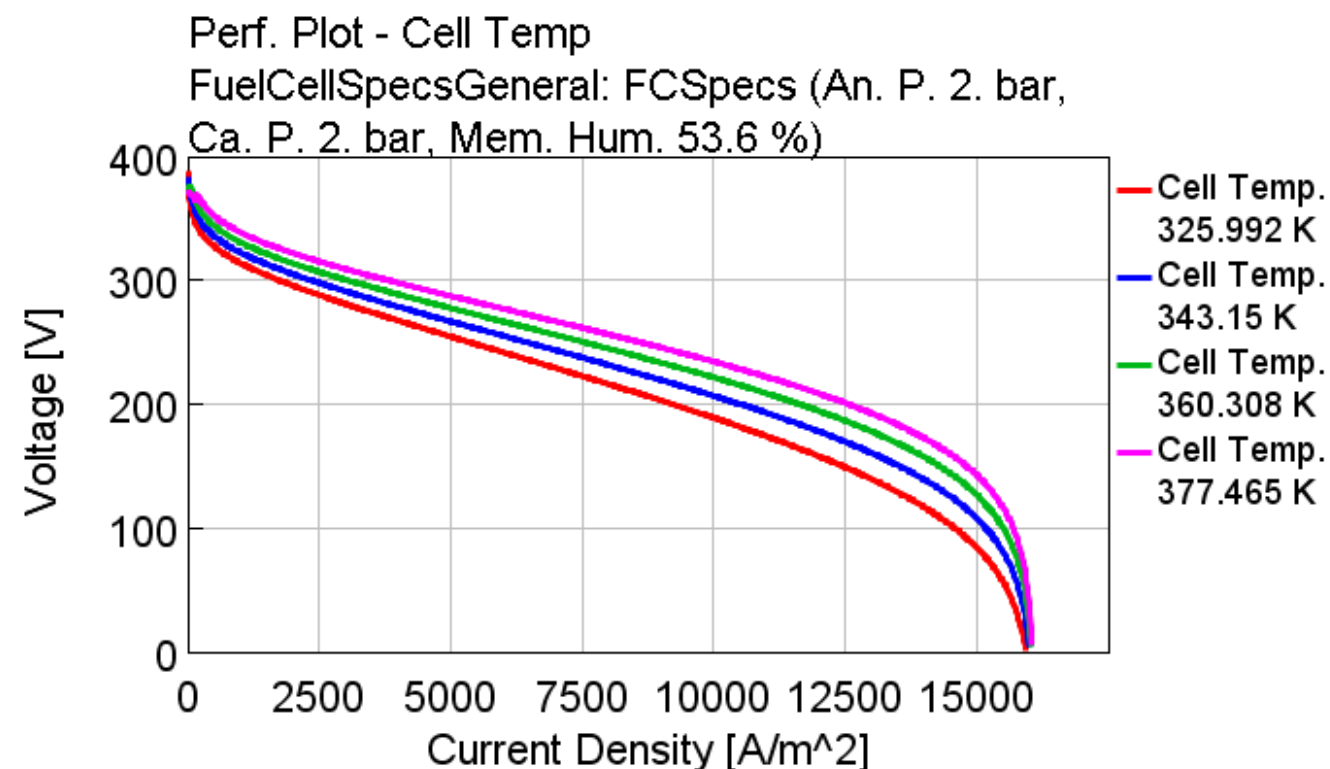




Measured Data from Paper



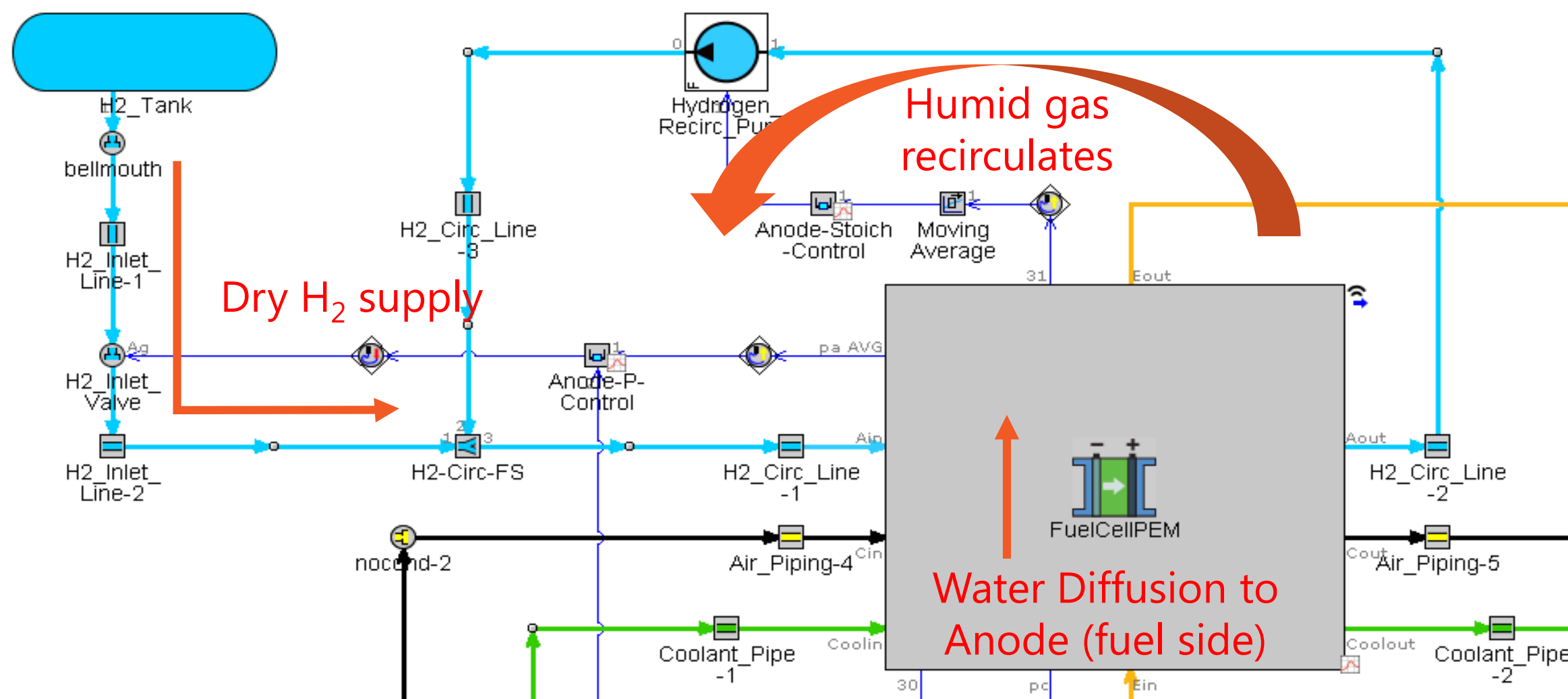
■ 遍历分析各种主要影响因素对极化曲线的影响



目录

1. 简介
2. 燃料电池简介
3. v2019功能回顾
4. 极化预测模拟
5. 组份渗透
6. 离散
7. 热管理
8. 系统平衡
9. 整车模拟

- 电渗透阻力: 水分子和质子一起被从膜的阳极拉到阴极
- 反向扩散: 水根据浓度在膜上扩散
- 影响膜的水管理和膜的加湿
- 维持阳极侧水化的重要机理



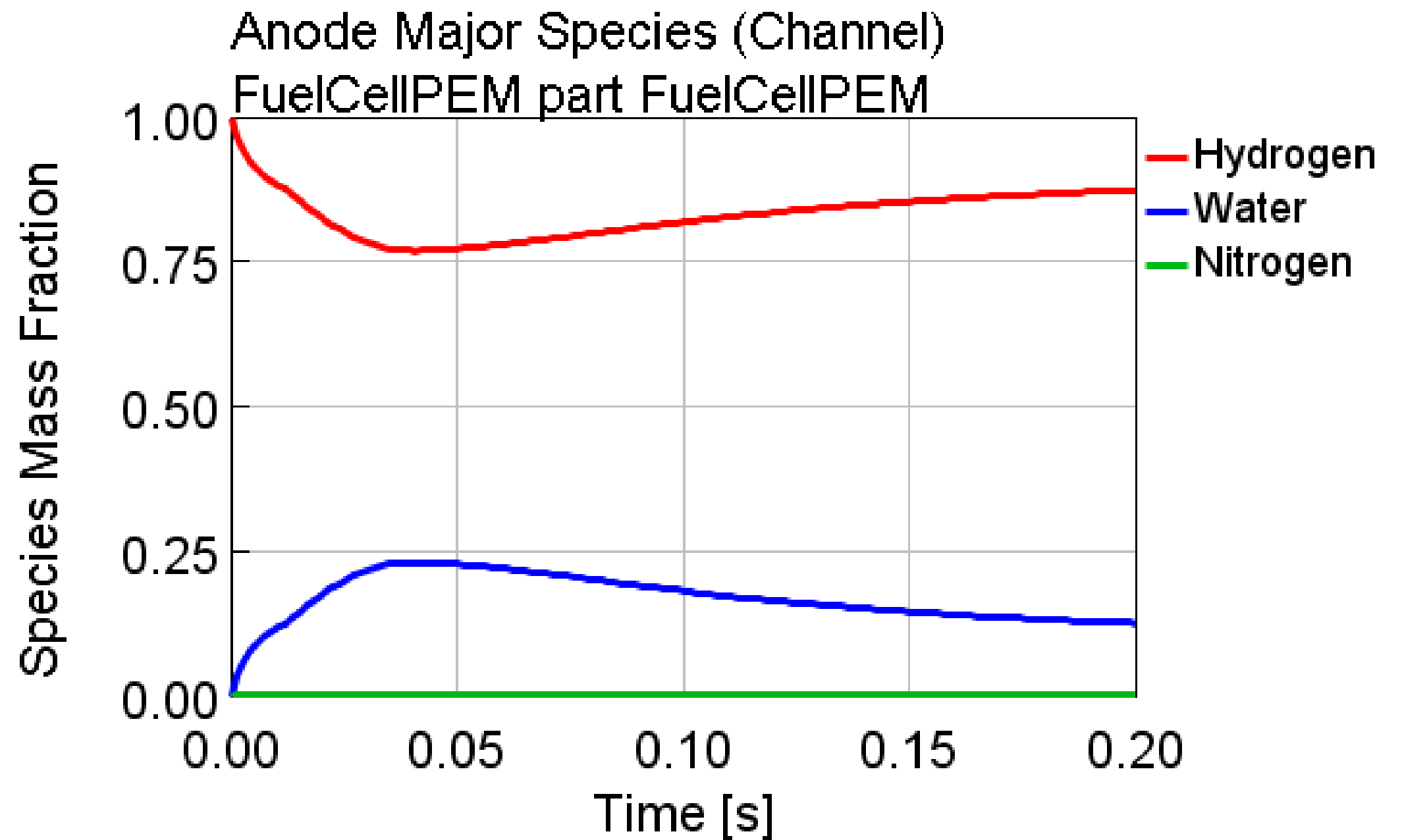
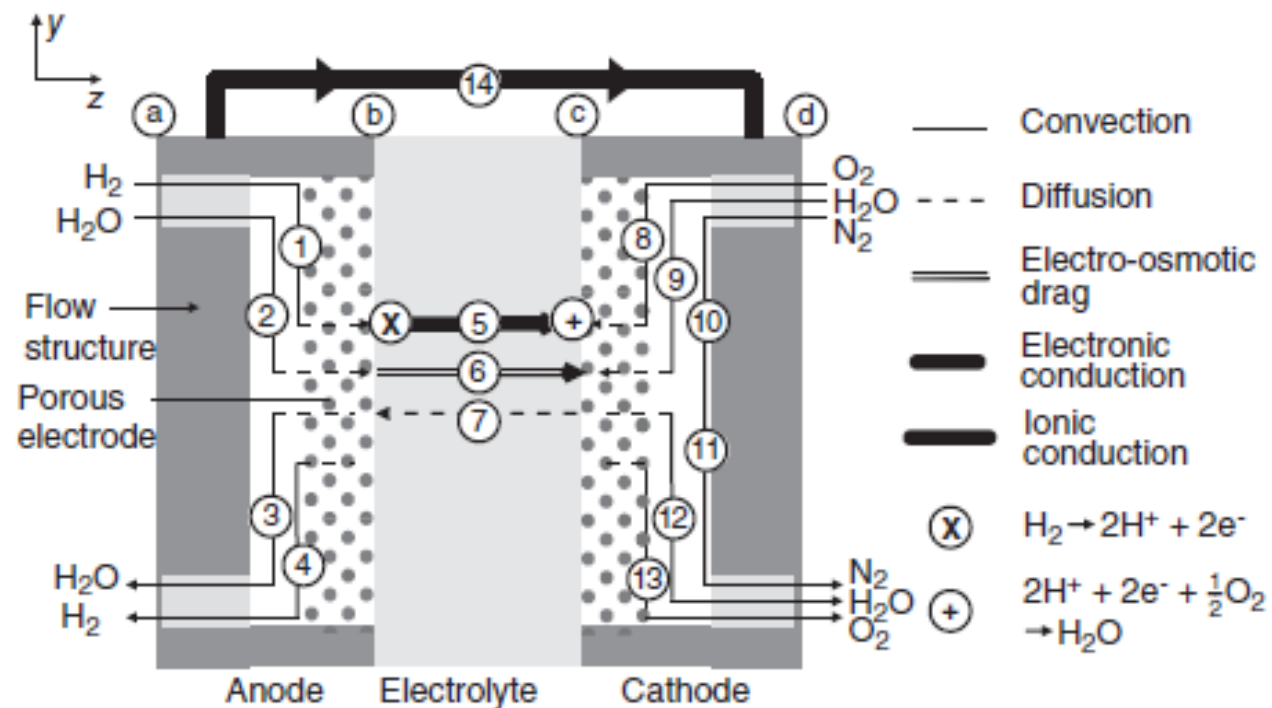
$$N_w = N_{w,electro-osmotic} - N_{w,diffusion}$$

$$N_w = n_{sat} \frac{i}{F} - D_w \frac{dc_w}{dy}$$

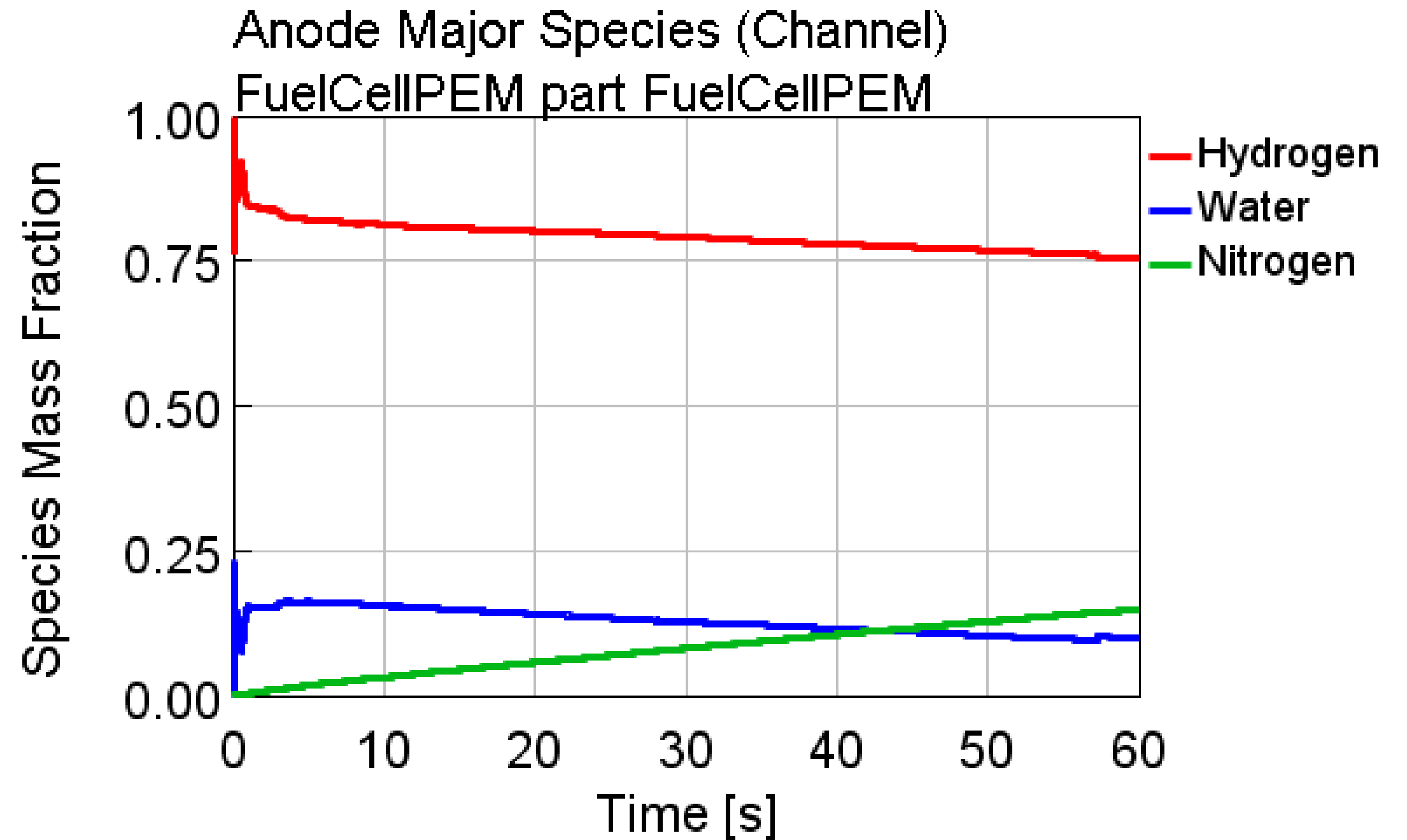
$$n_{sat} = 0.0029\lambda_m^2 + 0.05\lambda_m$$

$$D_w = f(\lambda_m, T_{cell})$$

$$c_w = f(\lambda, \rho_{m,dry}, M_{m,dry})$$



- 跨膜扩散
- 增加阳极中惰性气体的量，降低电压
- 随着时间的推移，氢气再循环回路会累积氮气并影响设备的性能
- 系统应定期清洗
- 启用特定标记

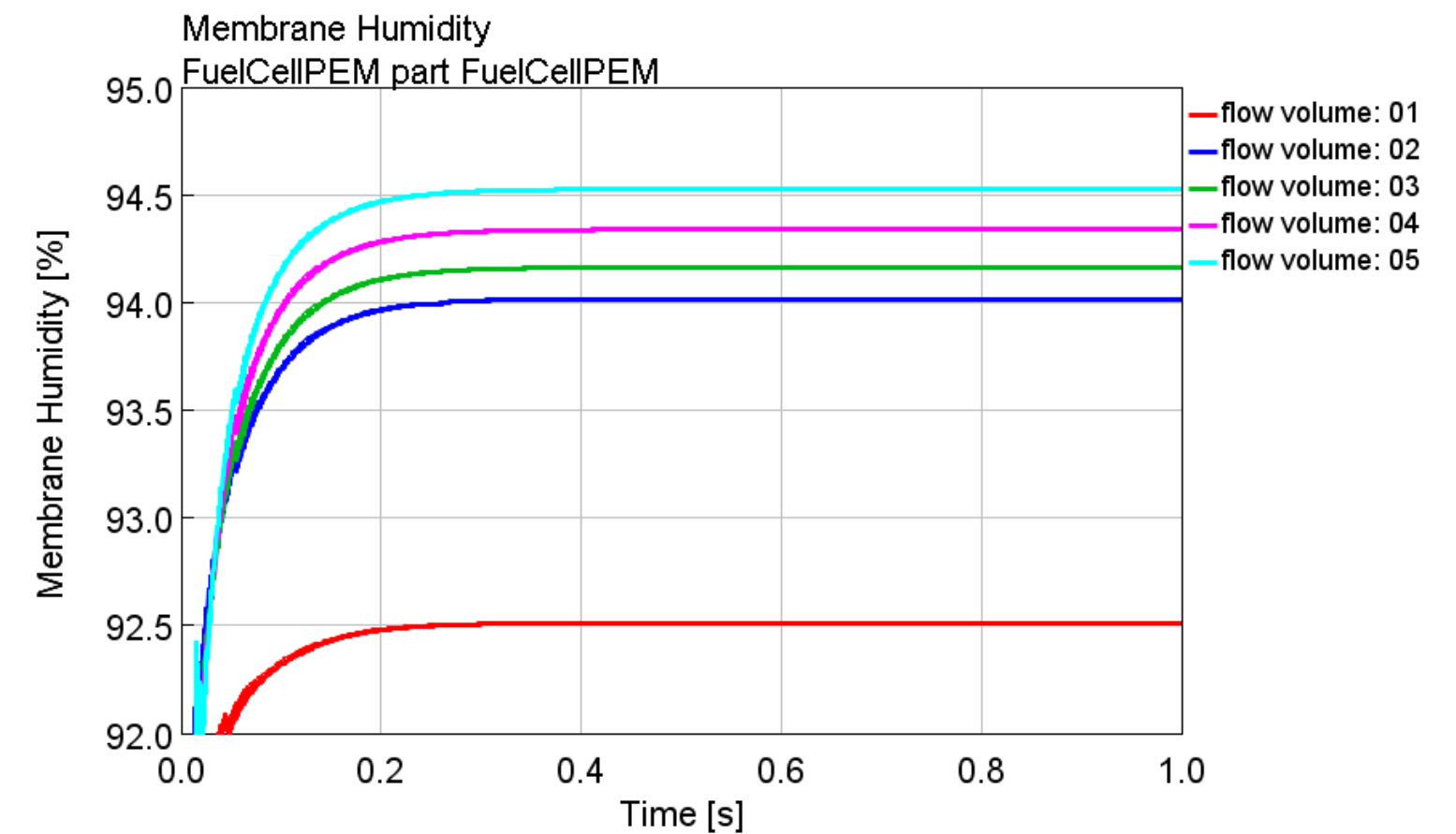
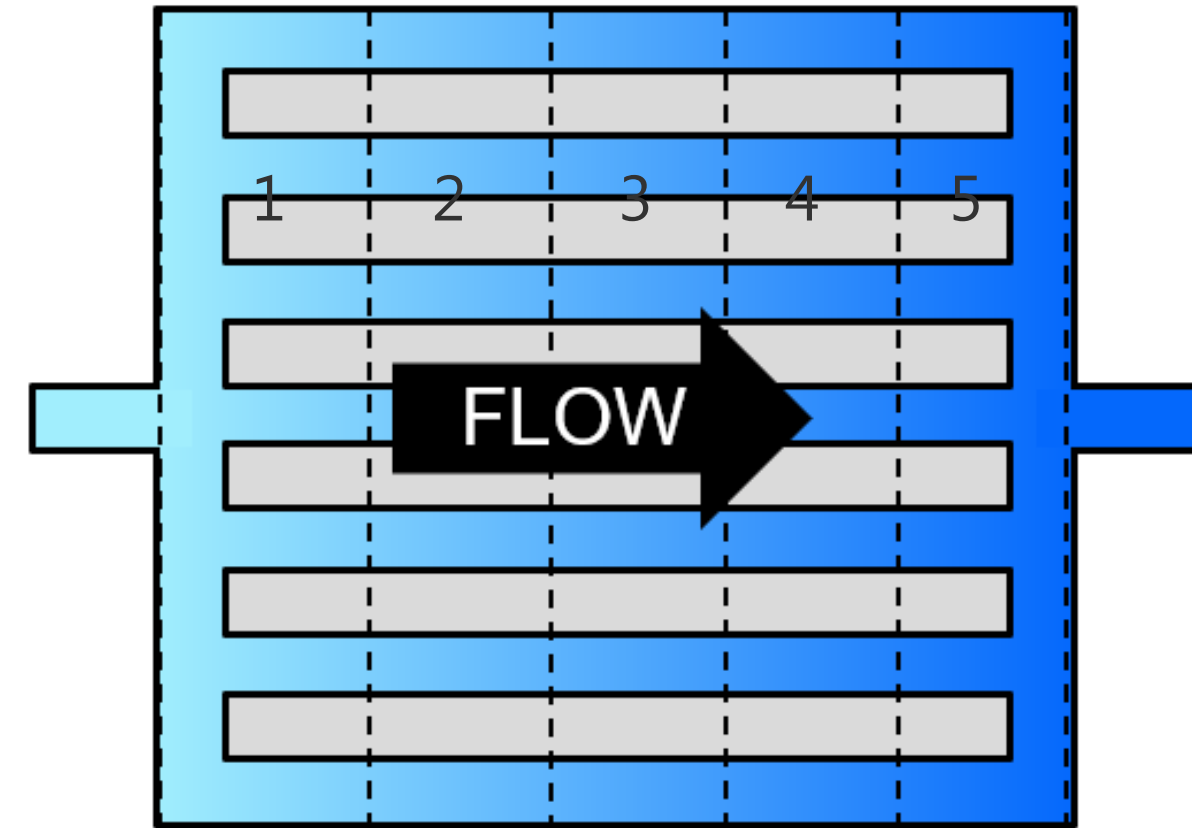


目录

1. 简介
2. 燃料电池简介
3. v2019功能回顾
4. 极化预测模拟
5. 组份渗透
6. 离散
7. 热管理
8. 系统平衡
9. 整车模拟

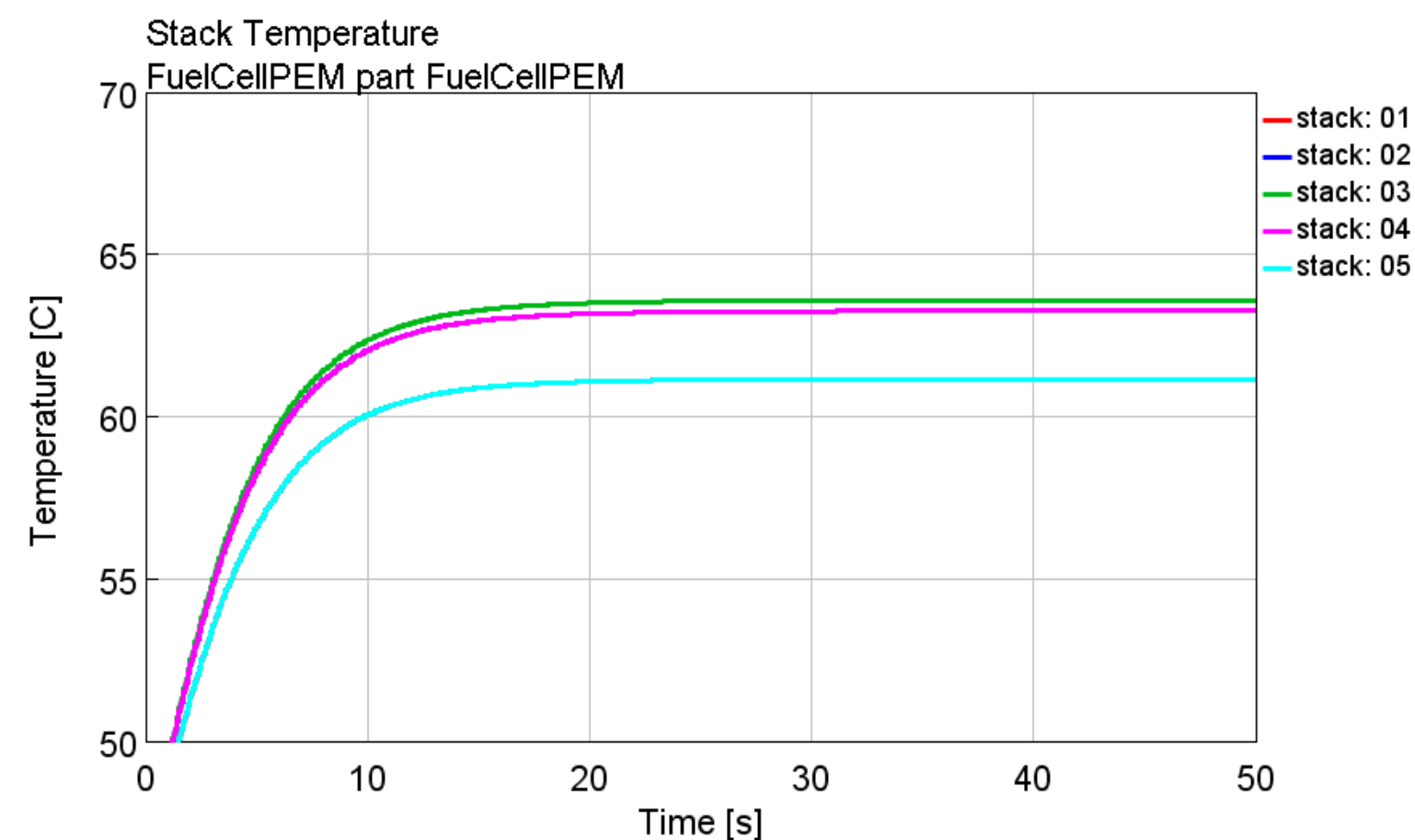
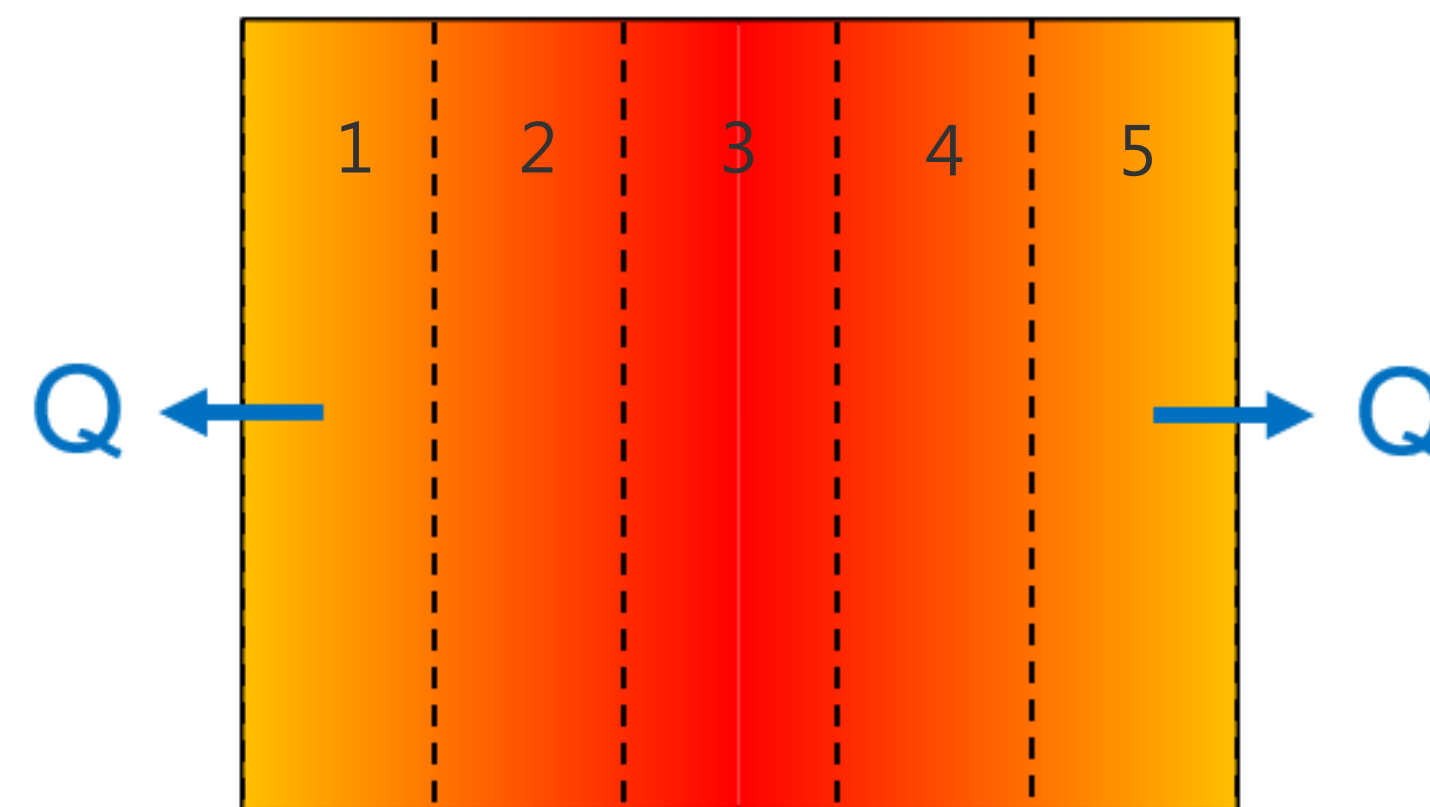
■ 沿流动方向离散化

- 将通道分解为多个子卷
- 独立分析每个部分的性能
- 化学反应会产生沿流动方向的浓度梯度和湿度梯度
- 影响电压和电流之间的关系



■ 沿电堆方向进行离散

- 将电堆分解为多个单元组
- 每组电芯都将热量传到冷却液
- 只有两端的电池会向周围环境散发热量
- 热阻将电池组分开，沿电堆方向形成温度梯度
- 影响散热以及电压与电流的关系

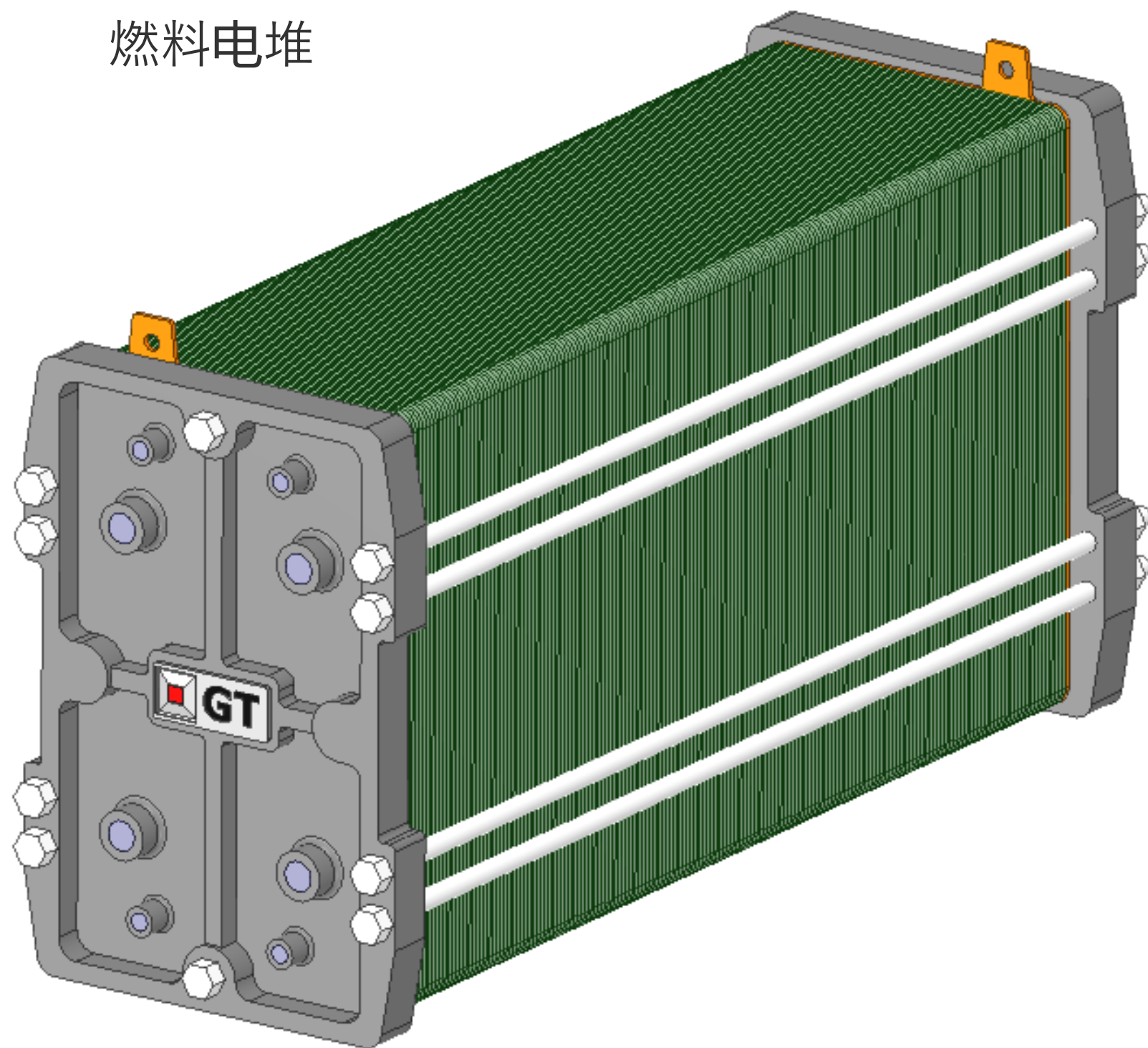


目录

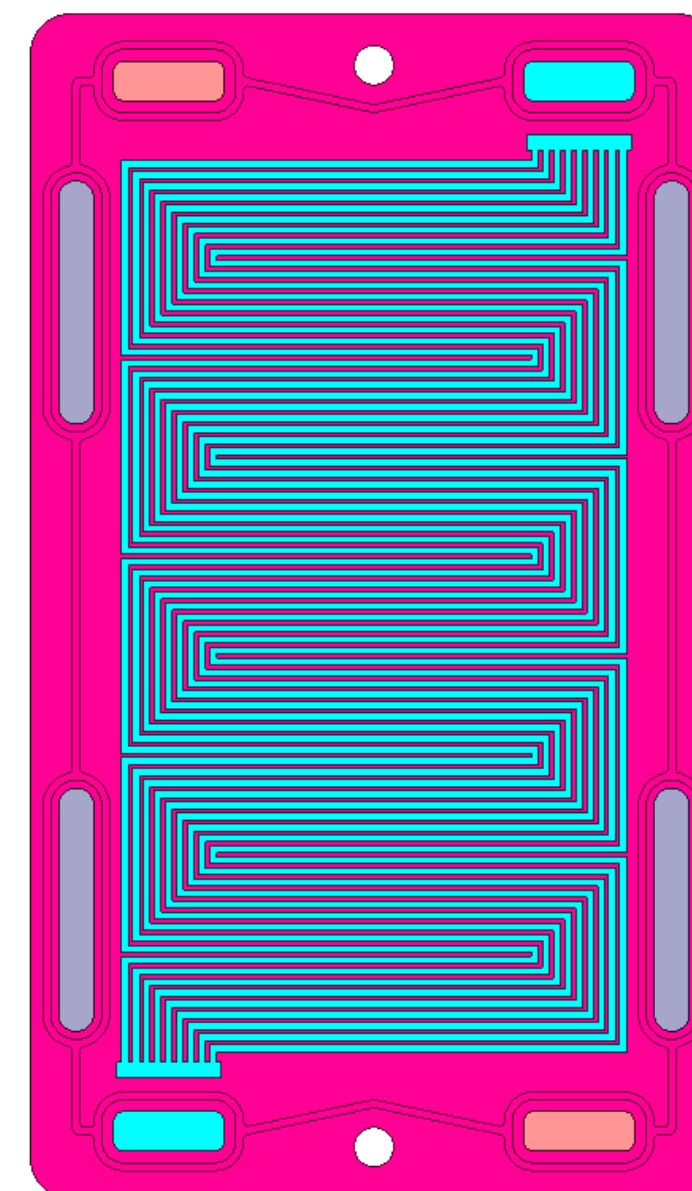
1. 简介
2. 燃料电池简介
3. v2019功能回顾
4. 极化预测模拟
5. 组份渗透
6. 离散
7. 热管理
8. 系统平衡
9. 整车模拟

在GT-SPACECLAIM中的3D模型

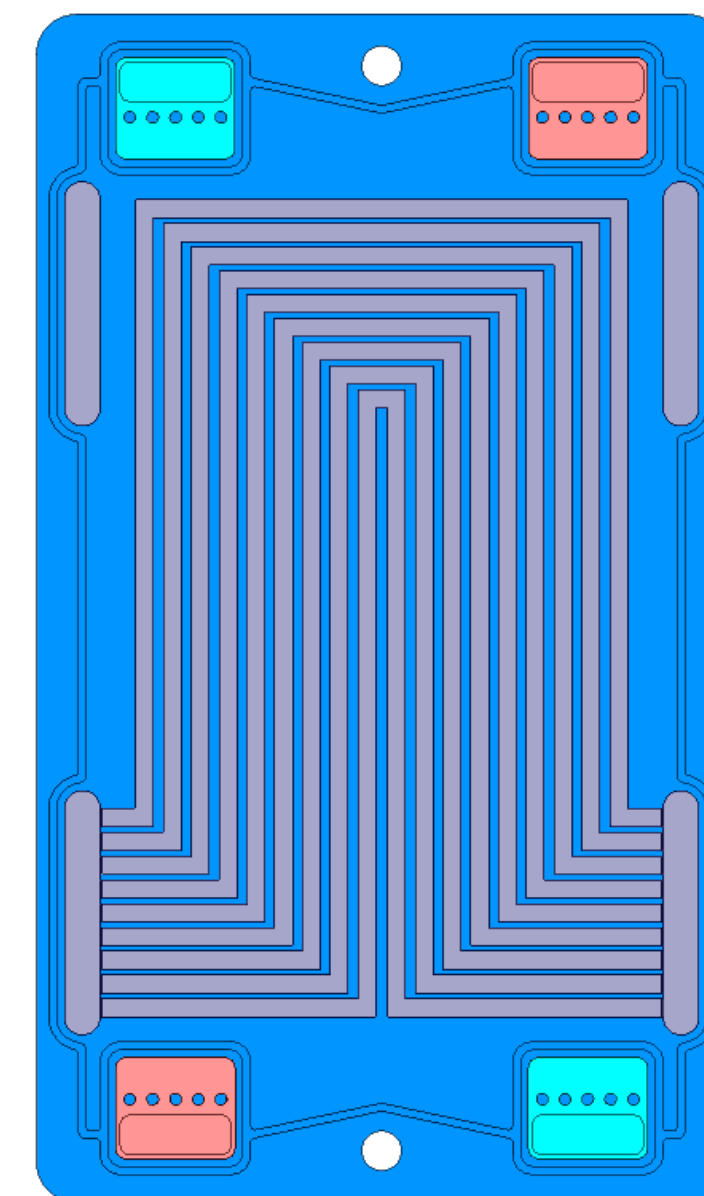
燃料电池堆



双极板中的流体通道

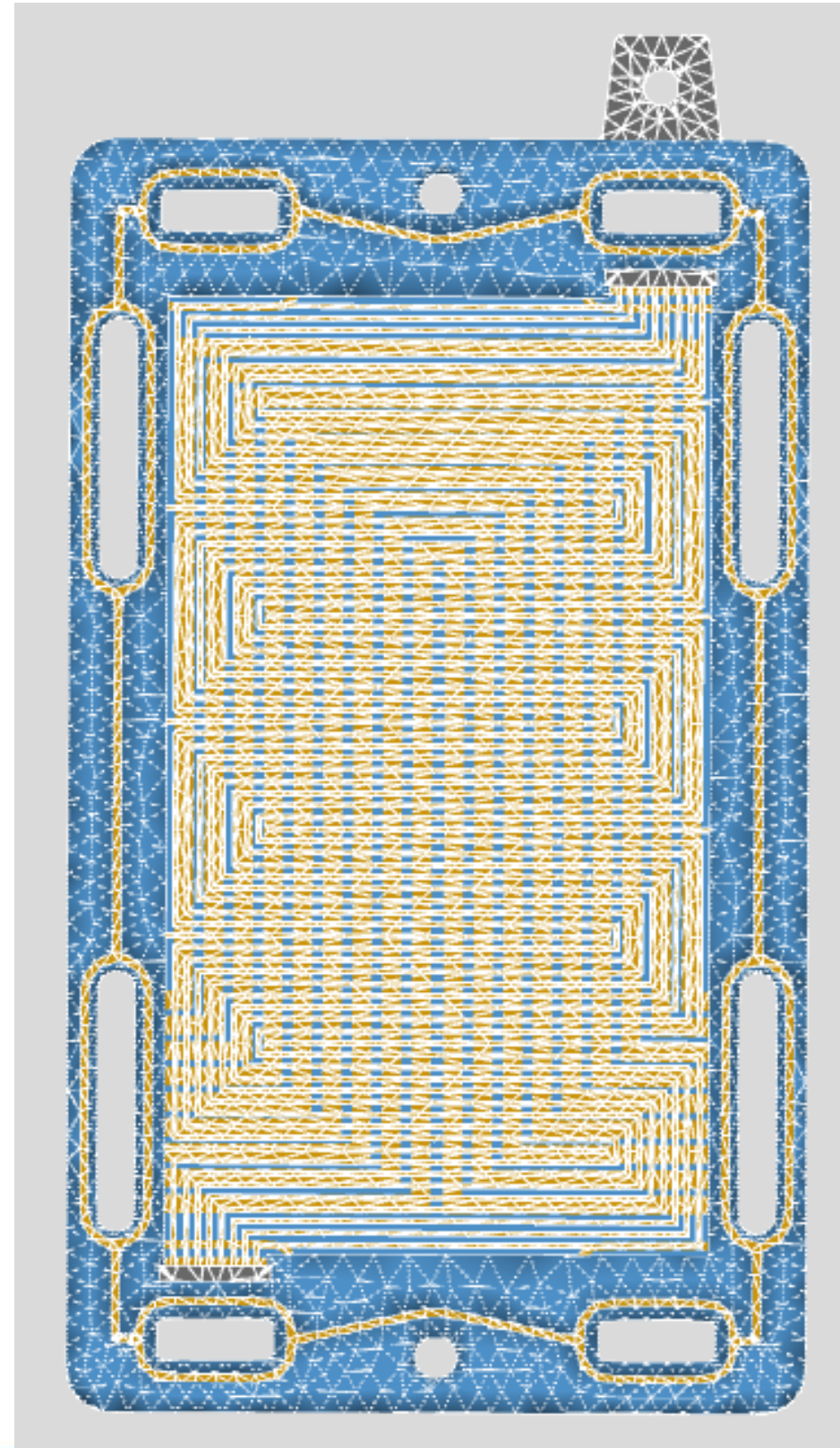


双极板中的冷却通道

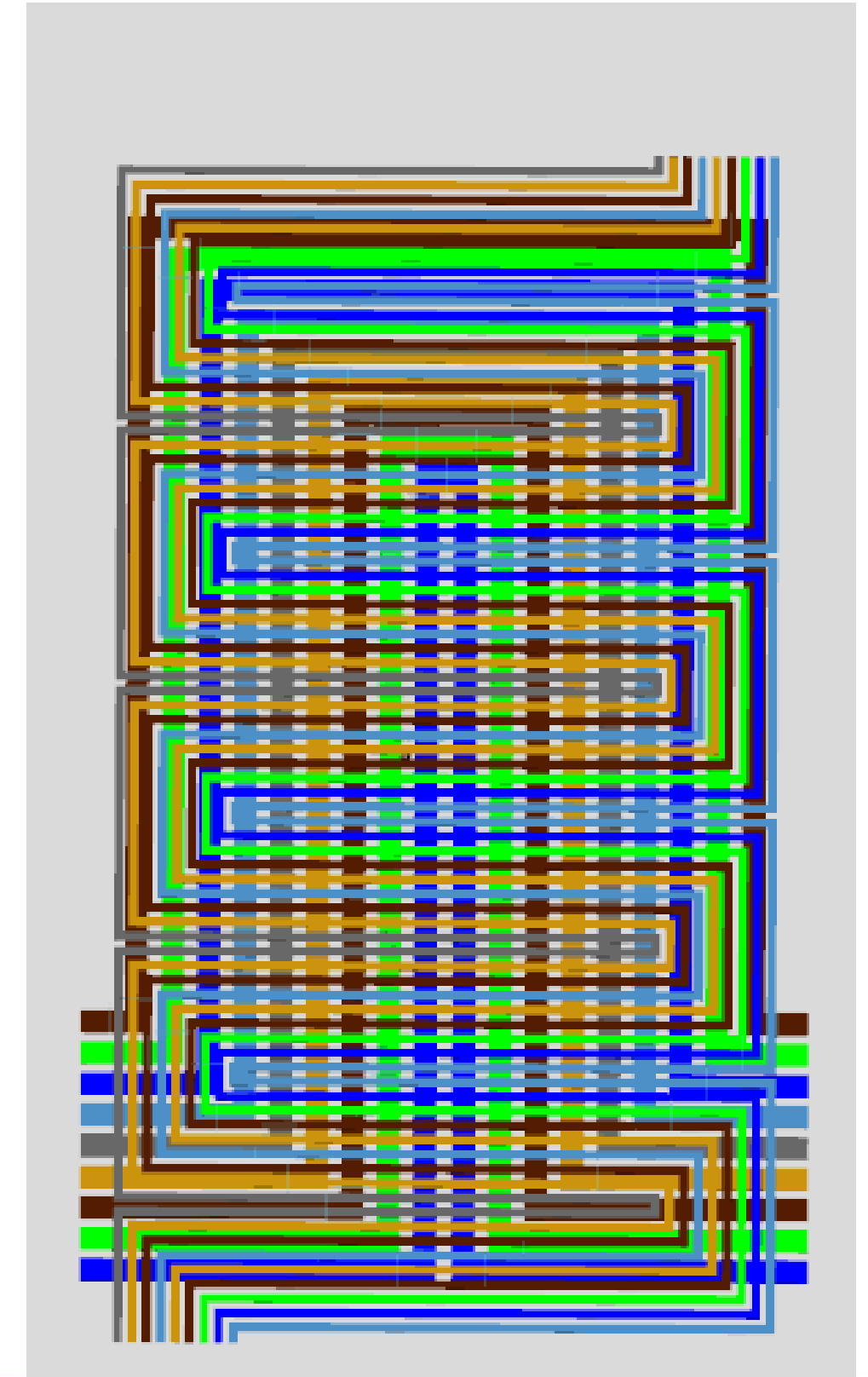


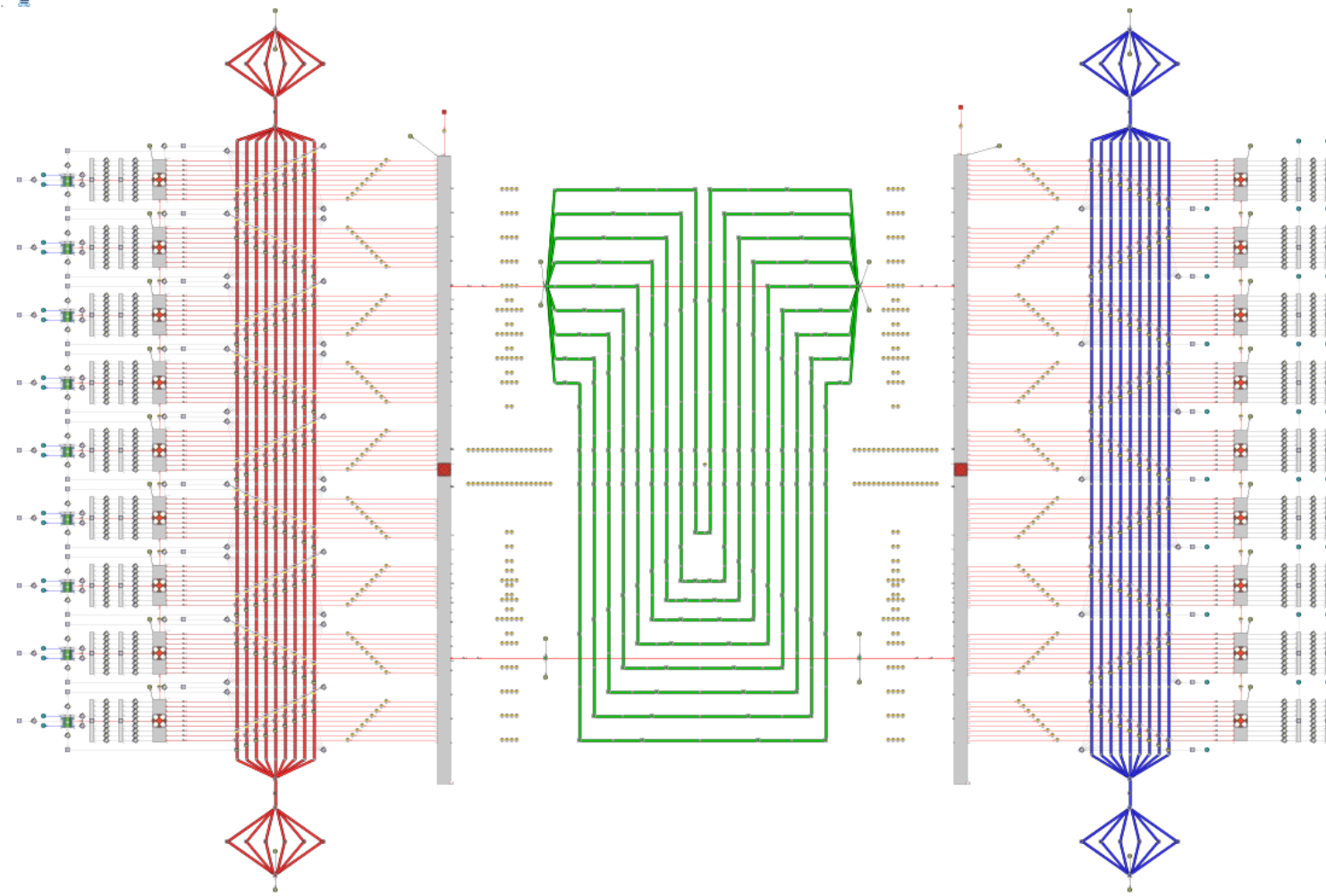
- 直接从CAD创建有限元热模型
- 离散流体通道为GEMSolidFlowVol1部件
- 自动连新年好流体部件与热的网格
- 电极流体回路连接到双极板热网格的反应侧面
- 冷却液流动回路通过中间的双极板热网格

FE 热网格

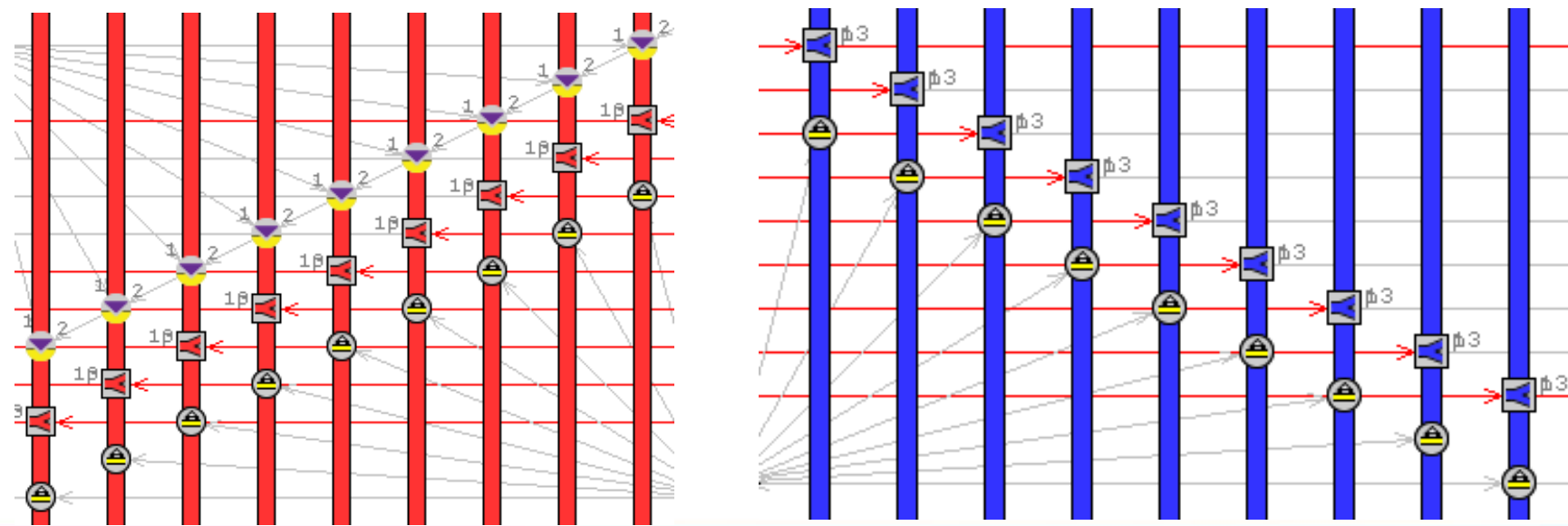


流体通道

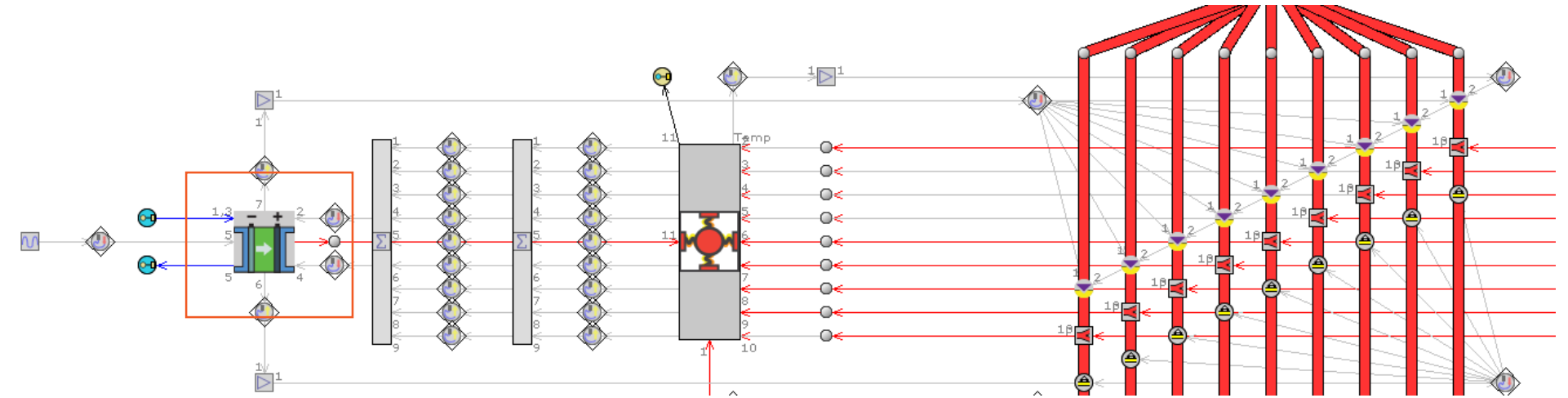




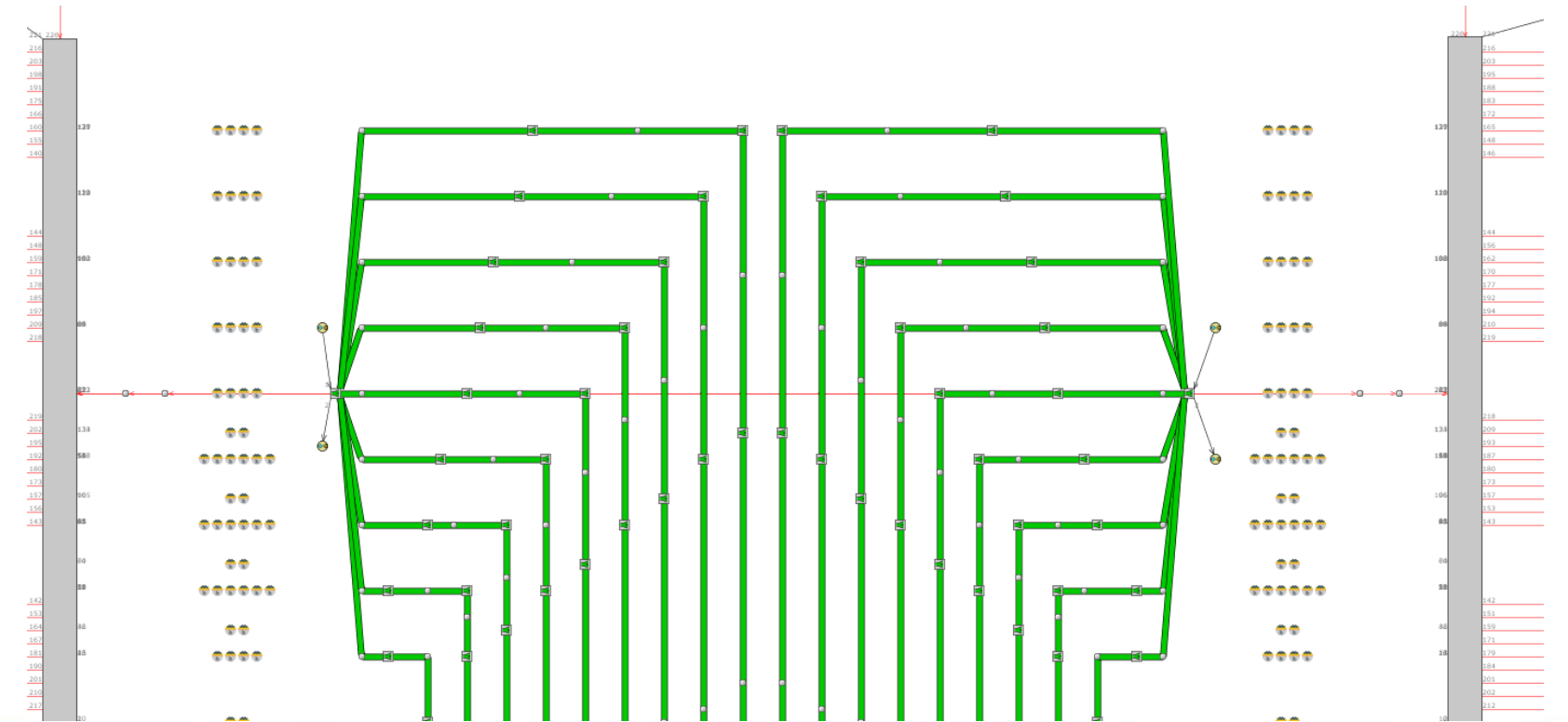
基于化学反应进行组份的处理

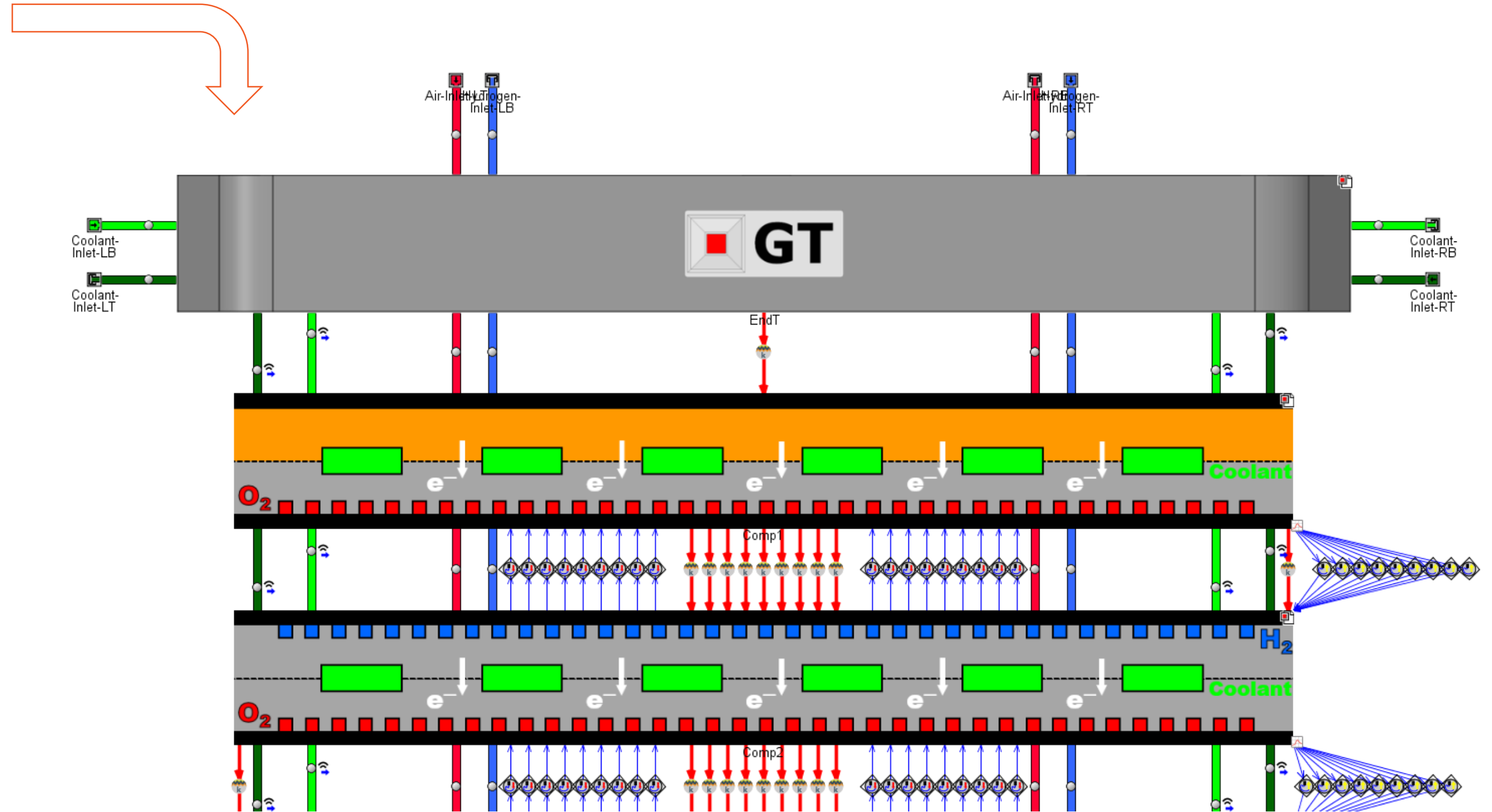
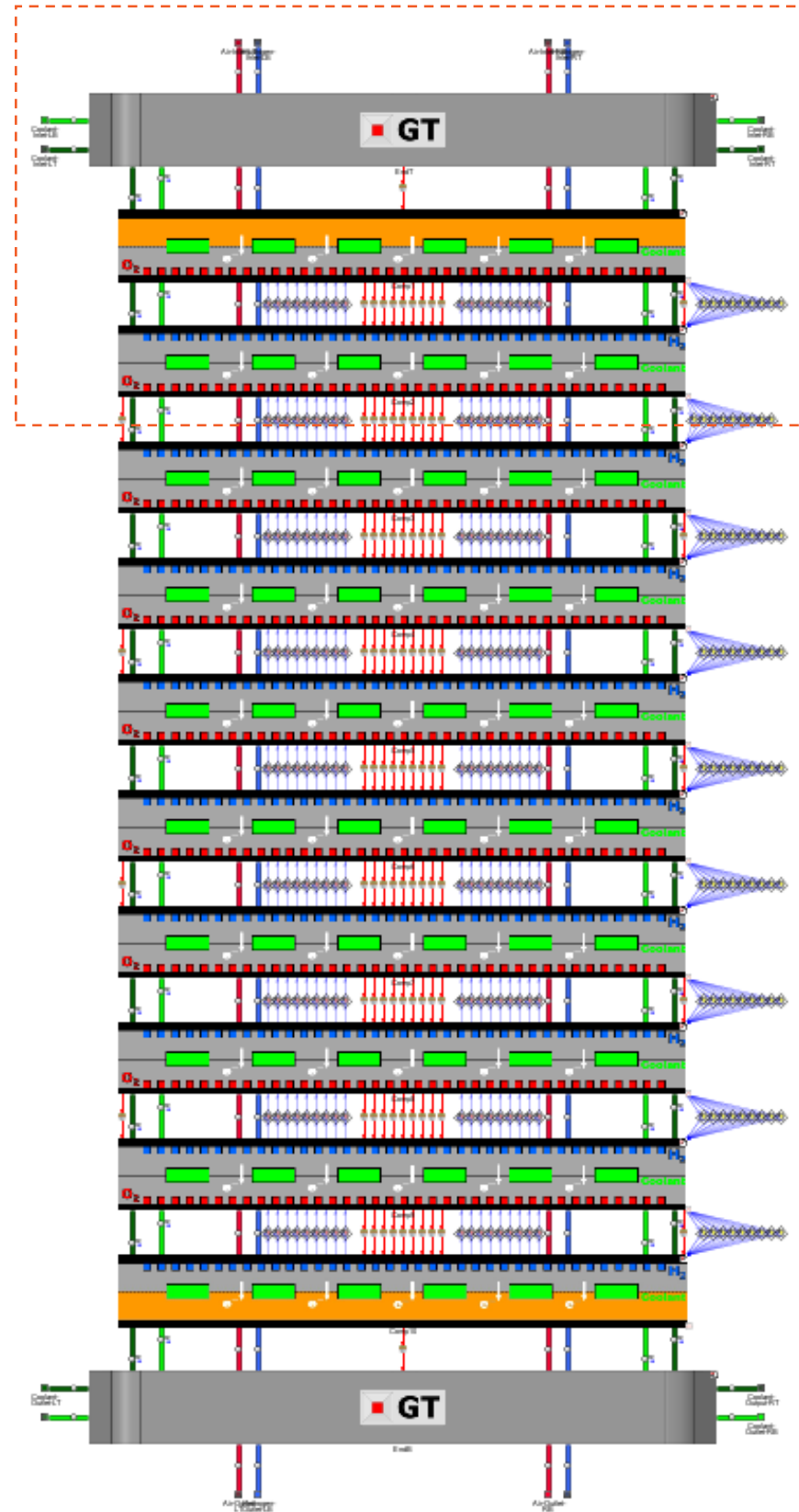


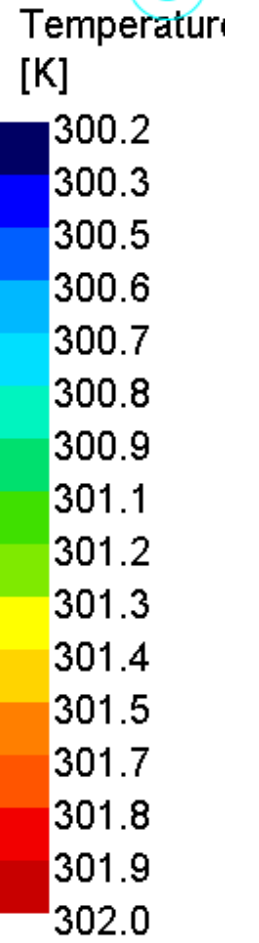
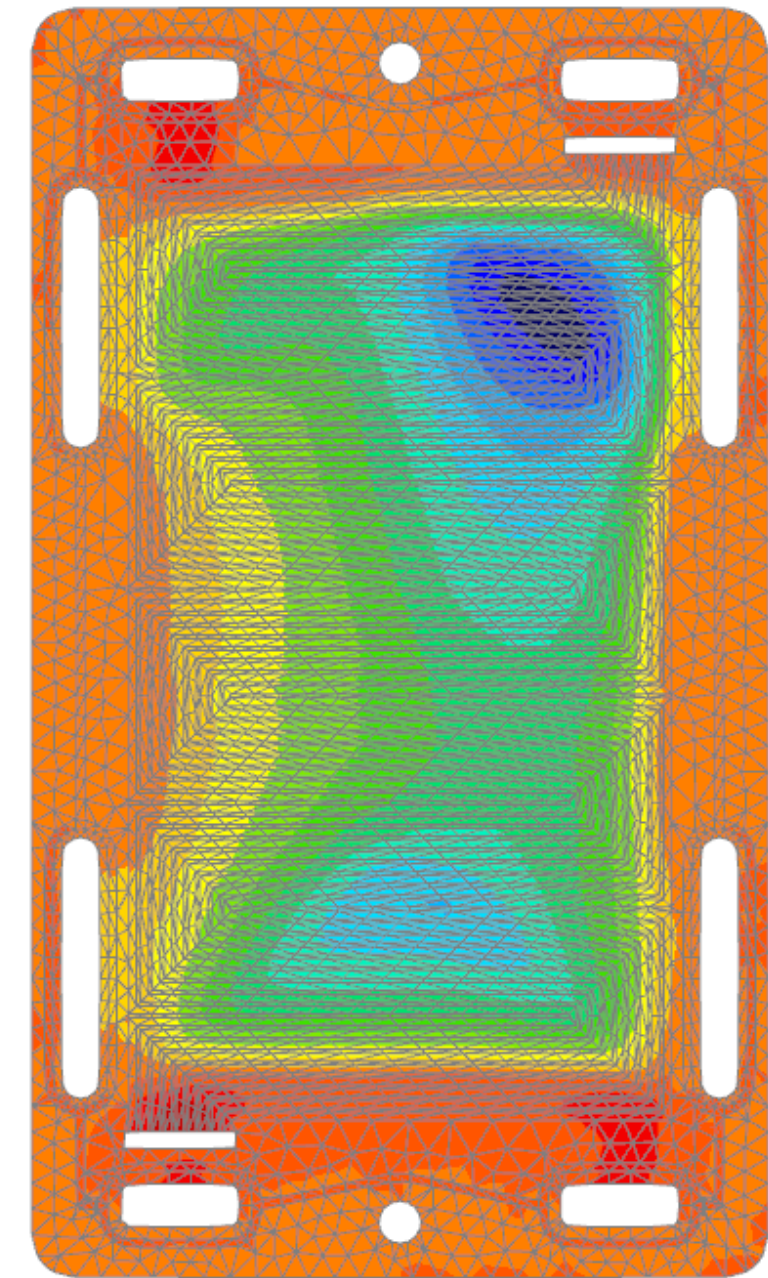
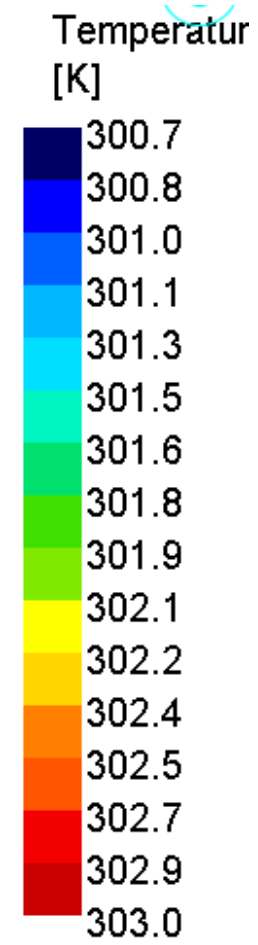
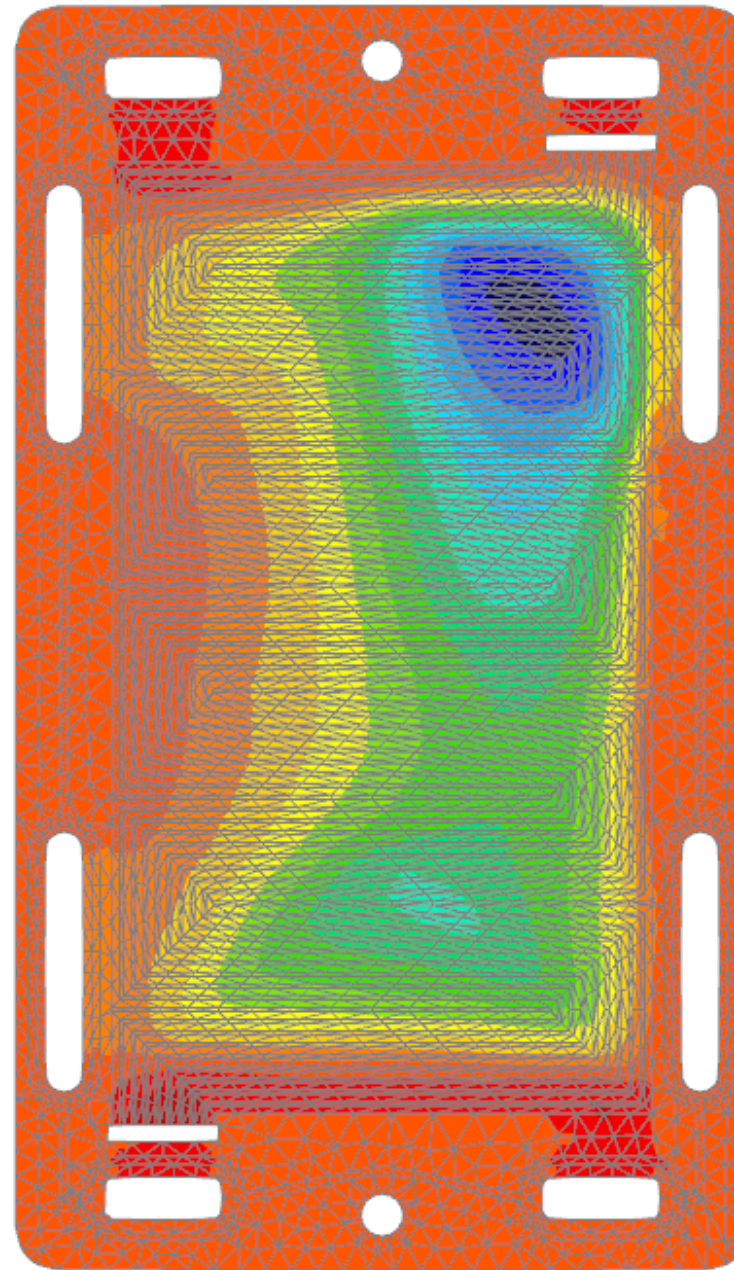
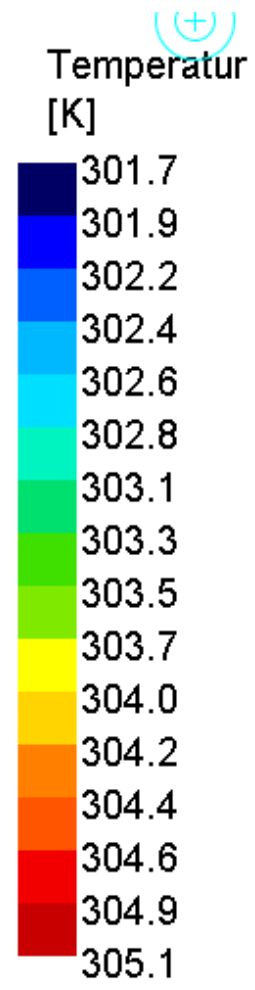
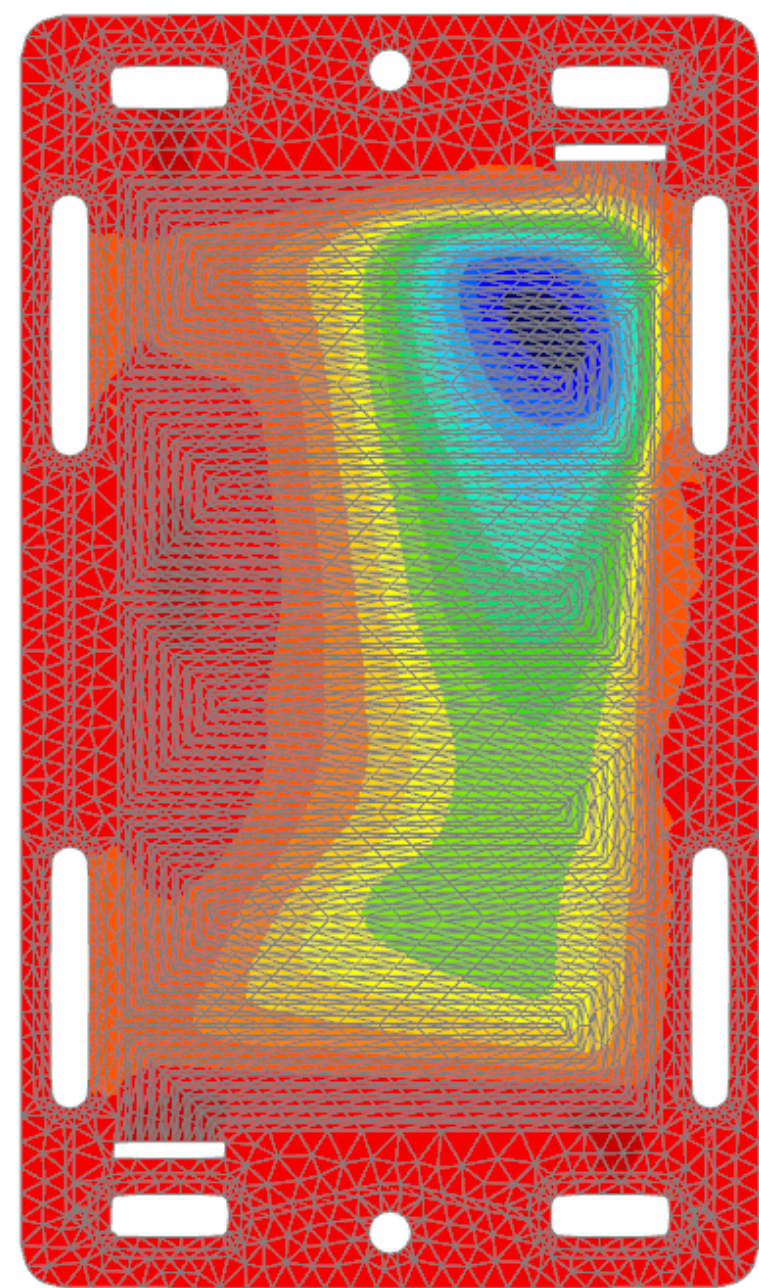
FuelCellPEMSystem 模板考虑流体和热质量的相互反应去预测反应过程



双极板的质量与流体之间传热







Mass Flow Rate : 2.5, 5, 10 g/s per Cooling Plate



目录

1. 简介
2. 燃料电池简介
3. v2019功能回顾
4. 极化预测模拟
5. 组份渗透
6. 离散
7. 热管理
8. 系统平衡
9. 整车模拟

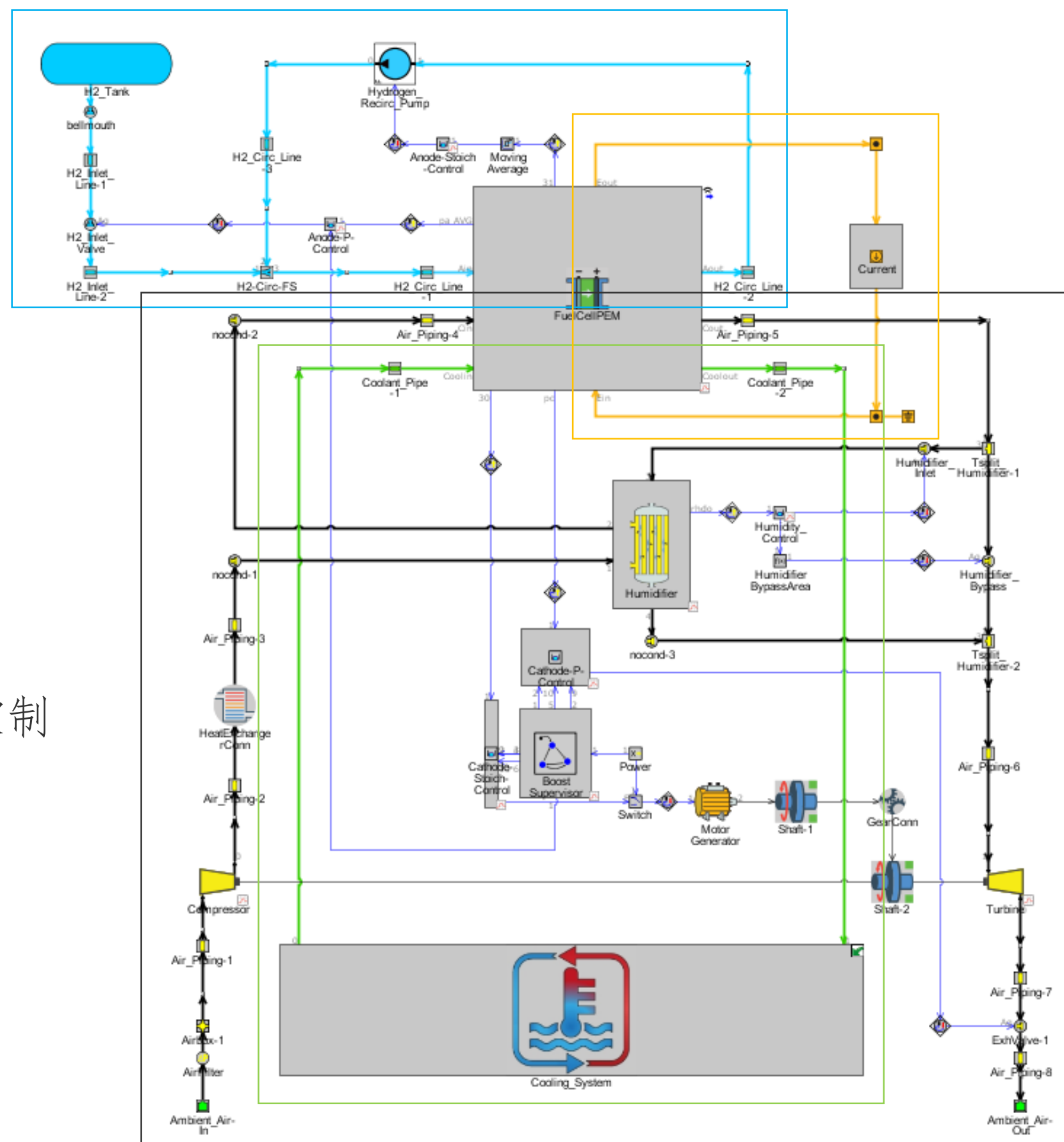
新的算例：燃料电池详细的系统级模型

氢罐及其回路

电的回路

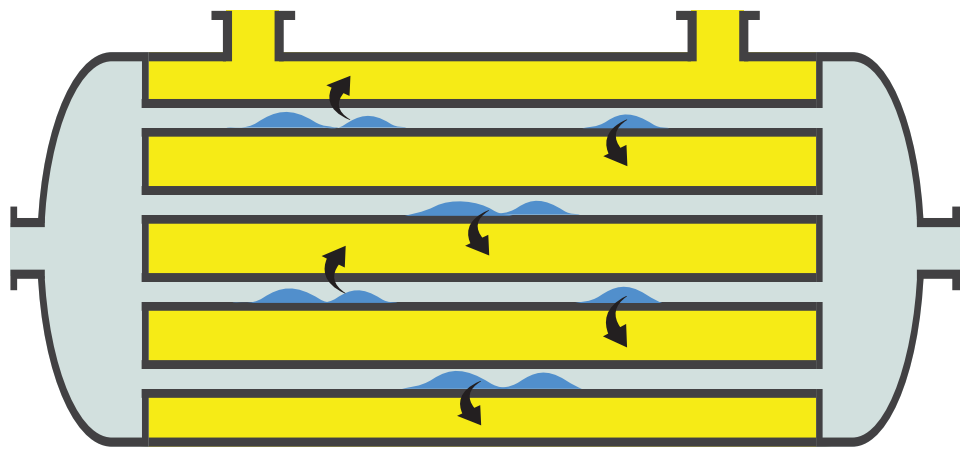
冷却系统

空气压缩和湿度控制

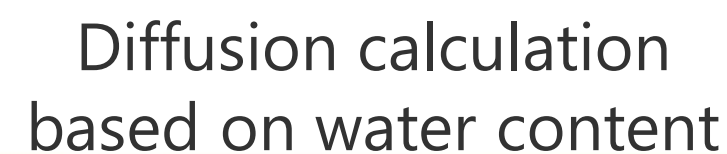


新的模板- 加湿器

- 气到气的加湿器
- 燃料电池常见空气处理系统
- 使用反应产生的水来加湿入口空气
- 管壳布置
- 水通过膜从潮湿的排气扩散到干燥的入口空气
- 假设Nafion管材料
- 包括简单的传热模型

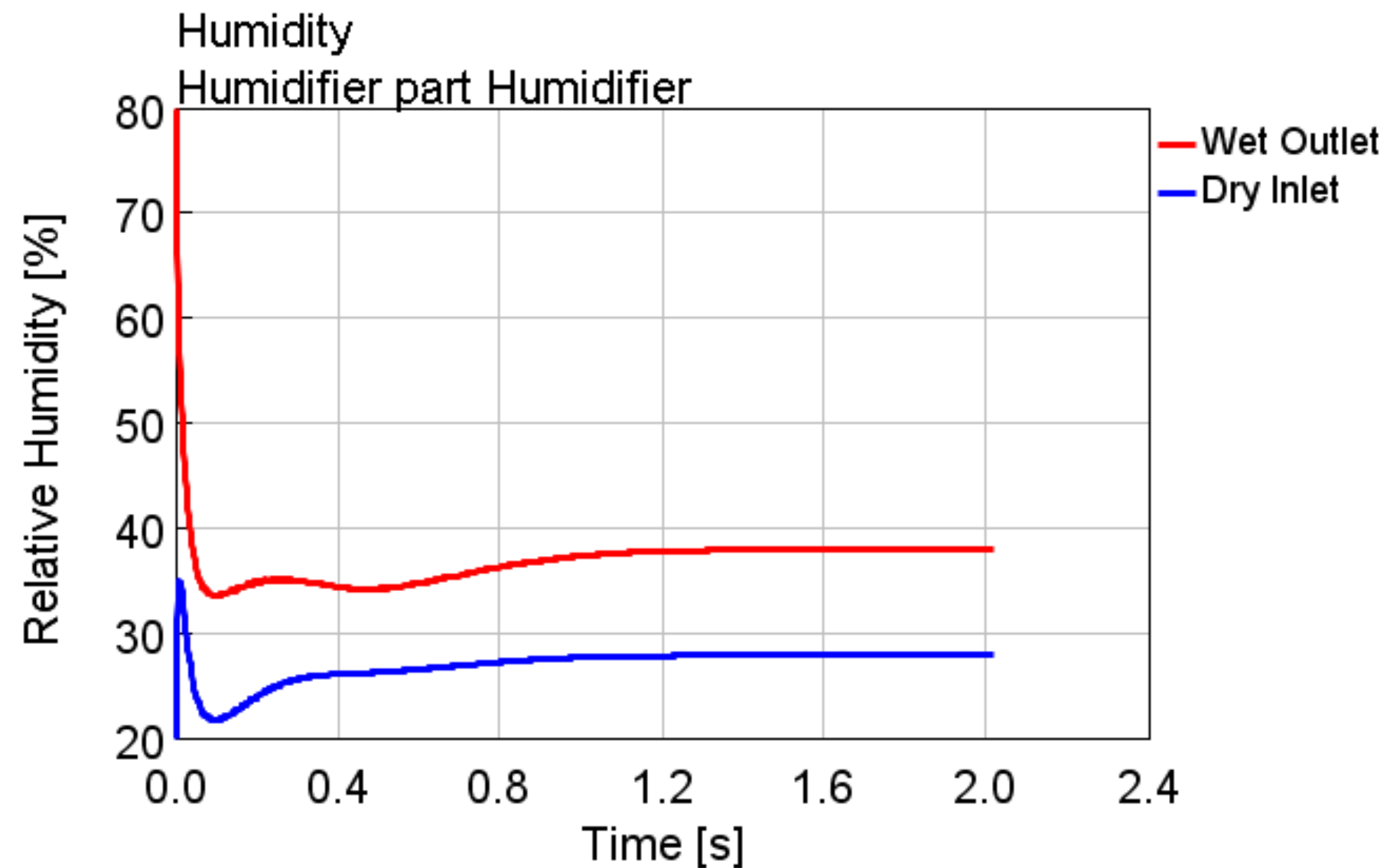


<div> <div>✓ Main</div> <div>✓ GT-POST Output</div> </div>		
Attribute	Unit	Object Value
Geometry		
Inner Diameter of Shell (dry side)	mm	200
Inner Diameter of Tube (wet side)	mm	1.5
Tube Membrane Thickness	mm	0.2
Number of Tubes		7000
Length	mm	500
Dry Side Initial State		Cathode_Init
Wet Side Initial State		Cathode_Init
Multipliers		
Water Transfer Multiplier		1
Heat Transfer Multiplier		1
Dry Side Friction Multiplier		1
Wet Side Friction Multiplier		1

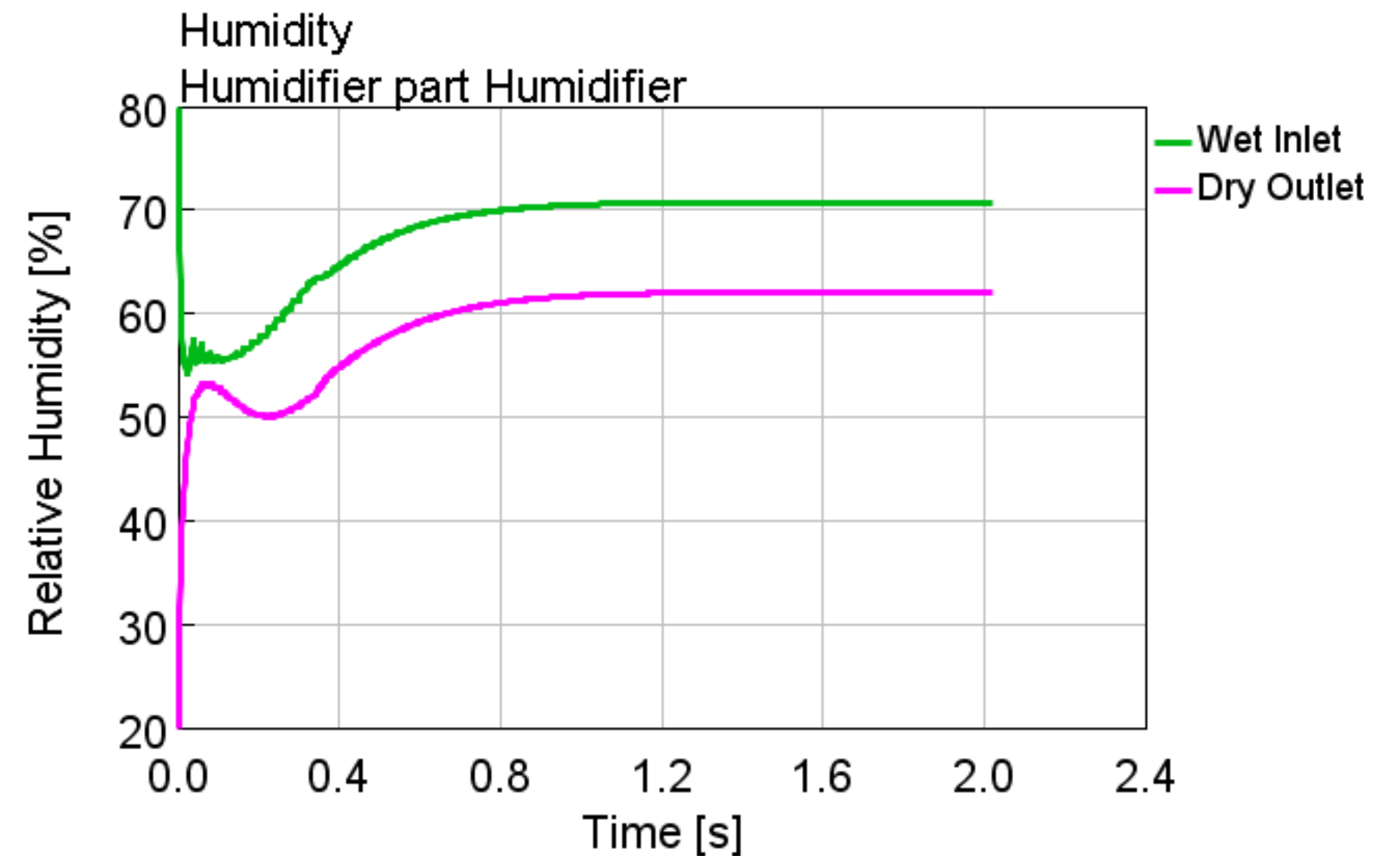


新的模板- 加湿器

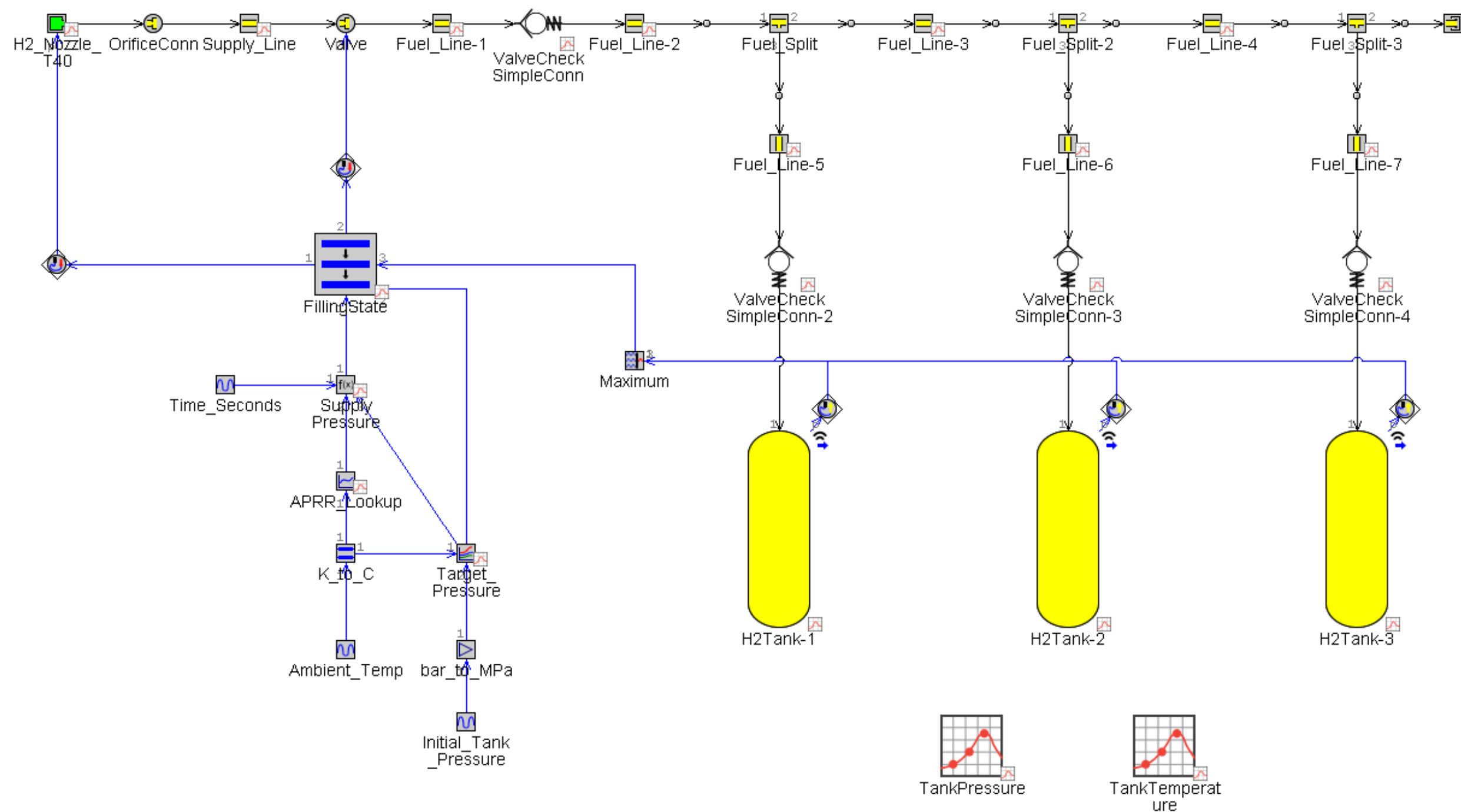
- “干”空气以20%相对湿度进入加湿器
- “湿”空气以80%相对湿度进入加湿器



- “干”空气出口加湿器在 >60% RH
- “湿”空气出口加湿器湿度 <40%RH

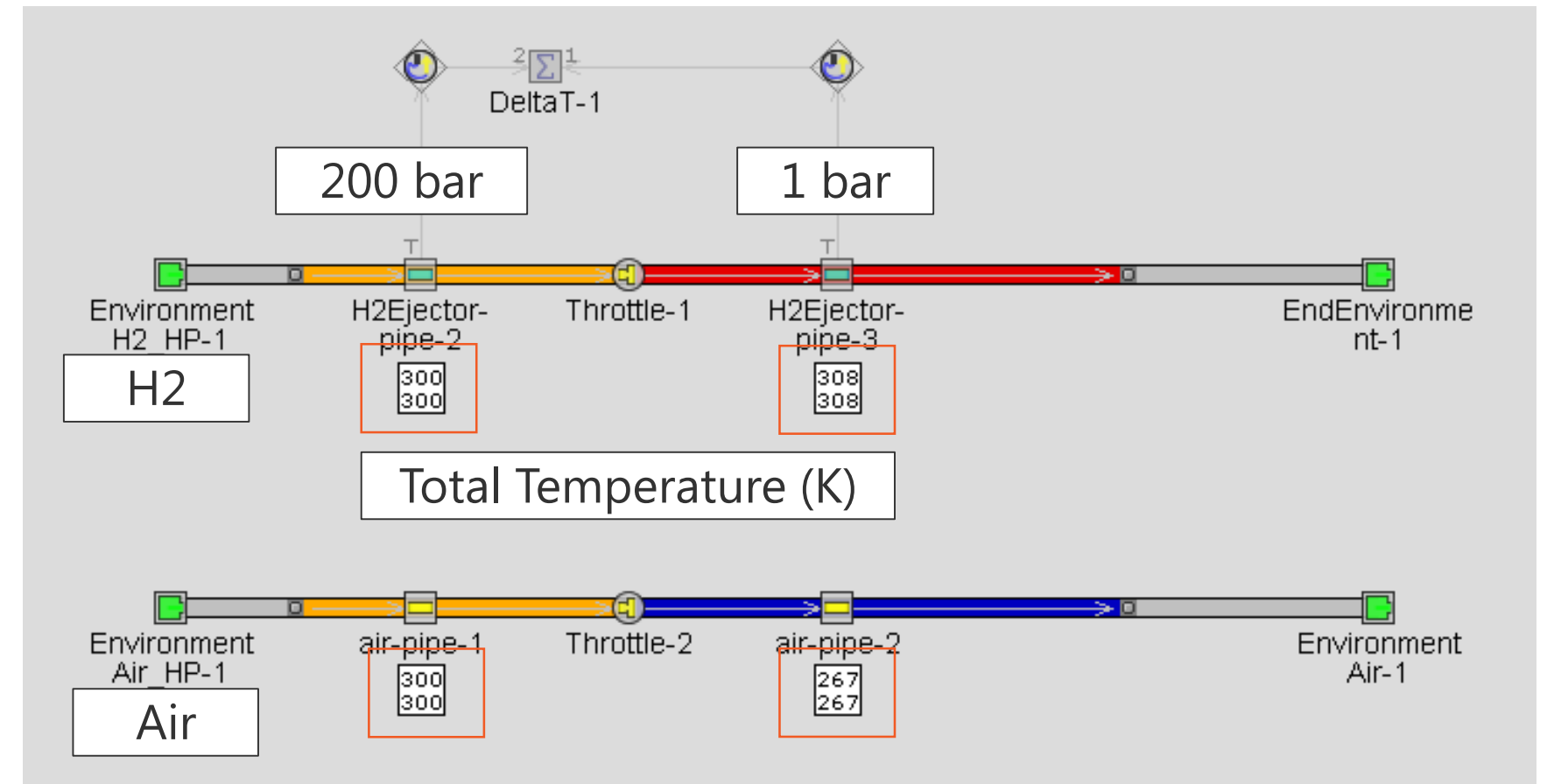
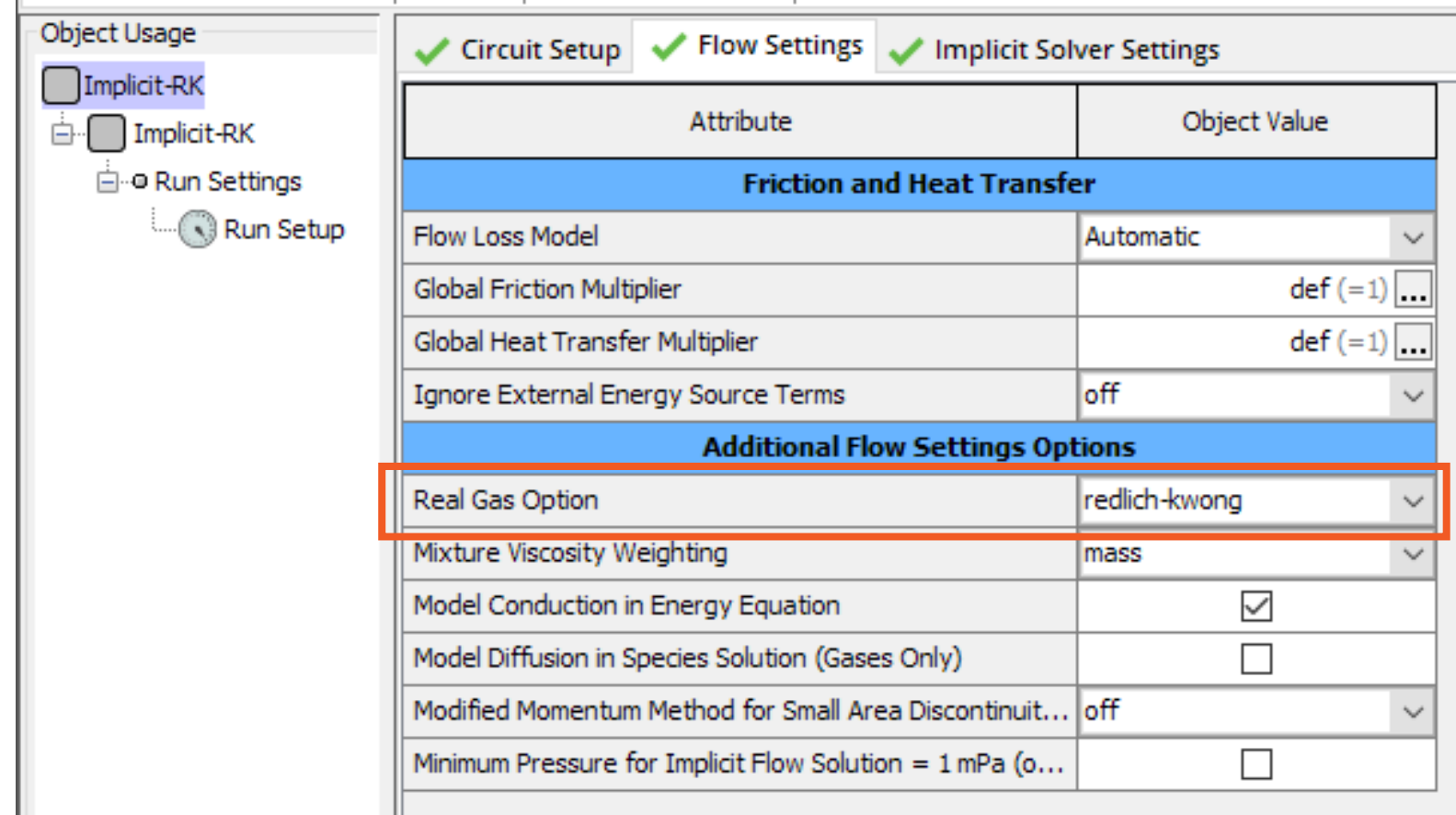


- 压缩和冷冻氢供应的终端环境
- 根据SAE J2601, 喷嘴压力以平均压力变化率 (APRR) 增加
- 目标压力和APRR取决于初始罐压和环境温度
- 当储罐达到目标压力并开始冷却时, 阀门关闭



实际气体模拟 - Joule Thomson 效应

- Redlich-Kwong状态方程来模拟实际气体特性
- 能体现焦耳-汤姆逊效应了
- 建议在氢发生较大膨胀时使用 (~20 bar)
- 只需带有很小的计算代价
- 只需激活特定求解对象

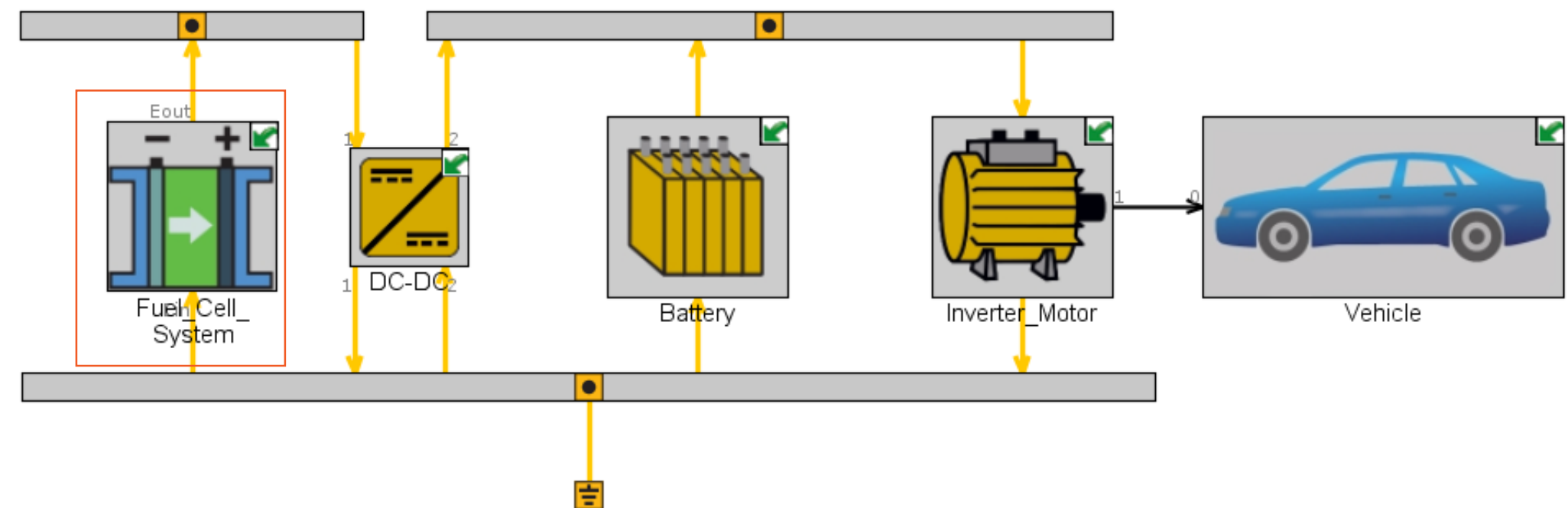
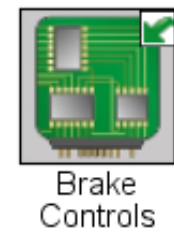
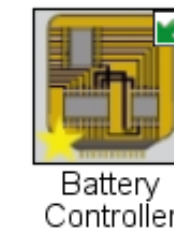
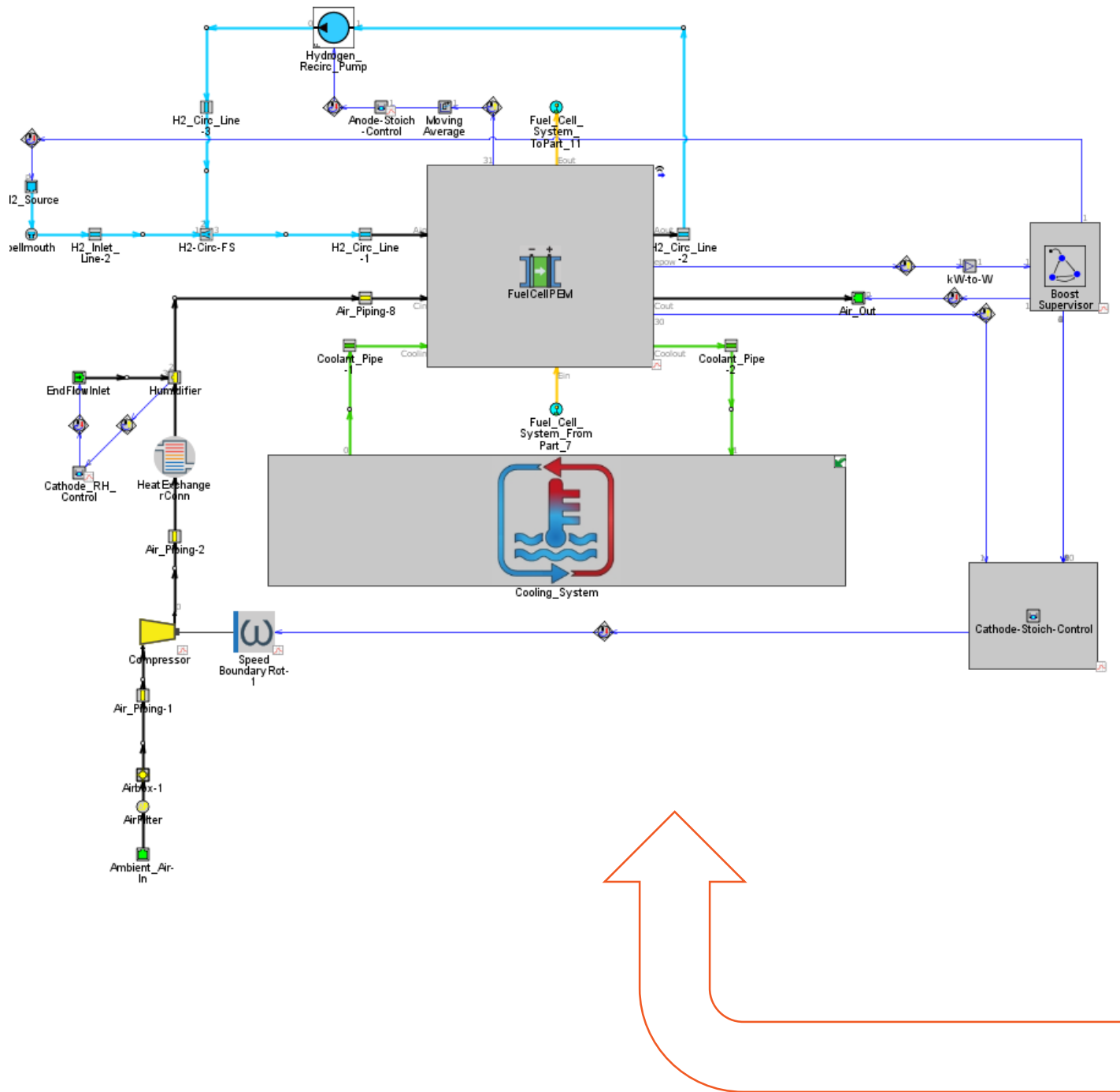


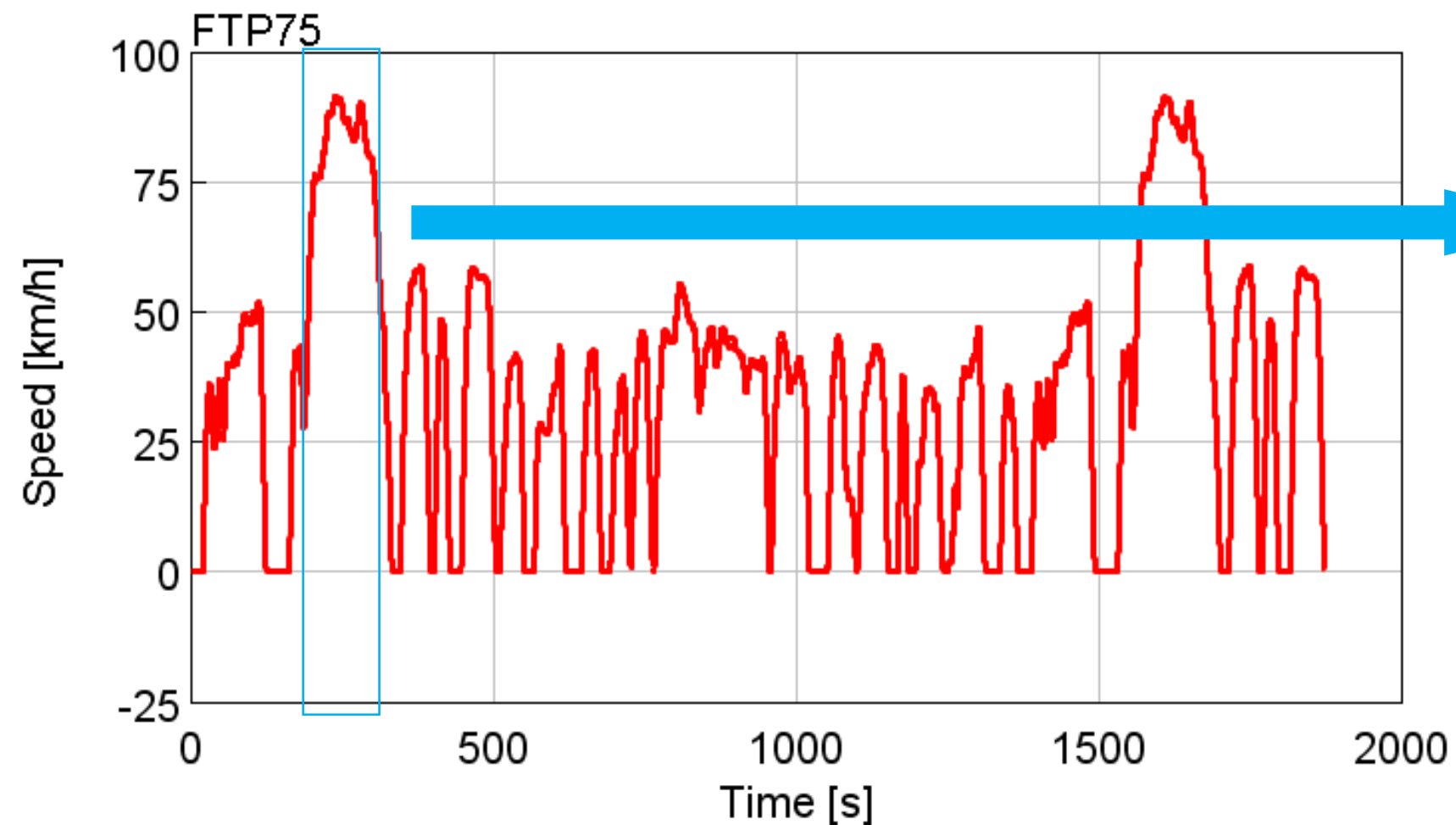
目录

1. 简介
2. 燃料电池简介
3. v2019功能回顾
4. 极化预测模拟
5. 组份渗透
6. 离散
7. 热管理
8. 系统平衡
9. 整车模拟

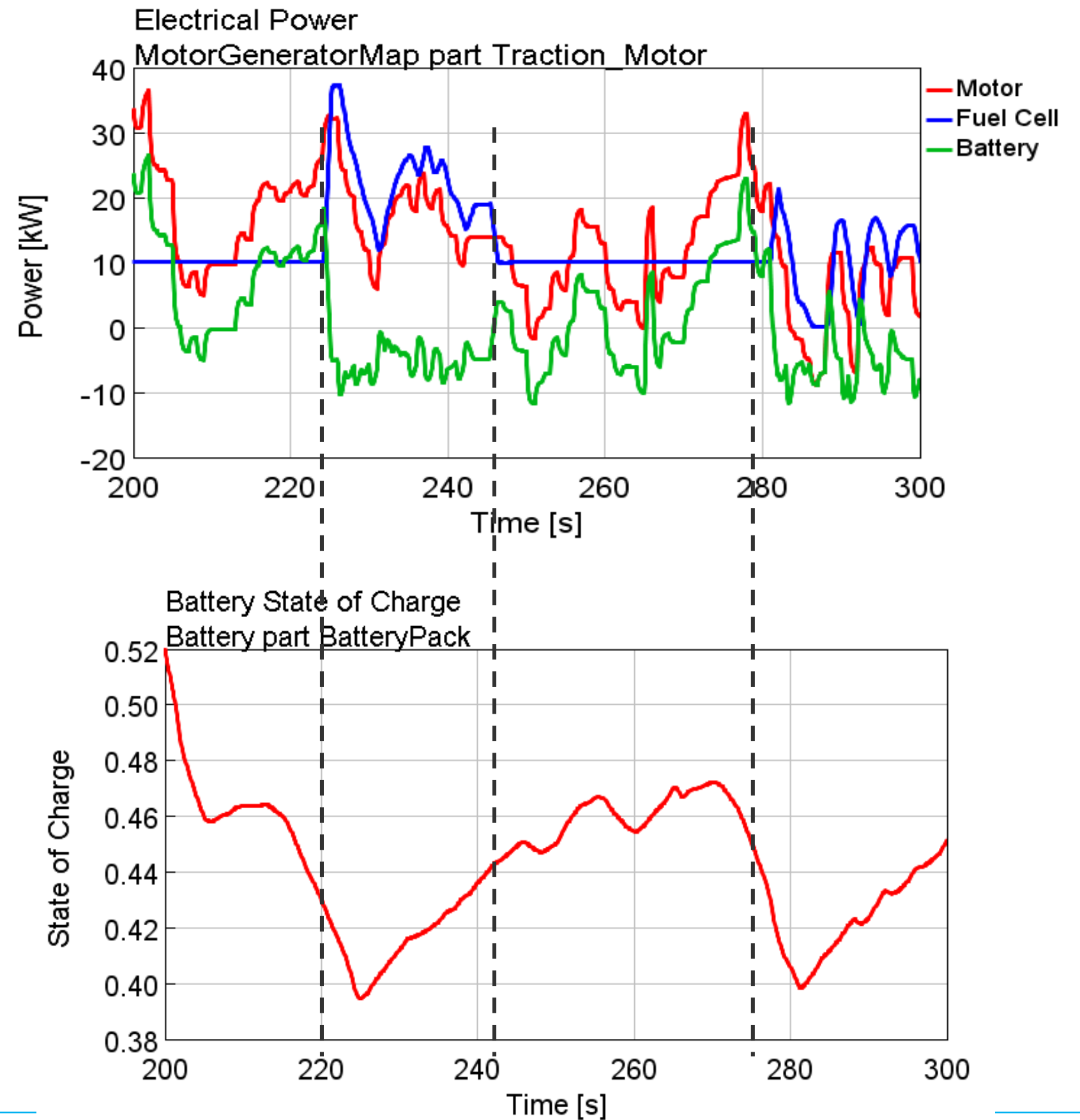
带有电气连接的车辆模型

- 直流-直流转换器的电气连接
- 燃料电池为电机提供动力，并可为电池充电
- 电池可满足快速增长的需求或大的总负荷要求
- 全面的驱动循环分析
- 采用隐式求解器用于快速运行 (12x faster than RT)





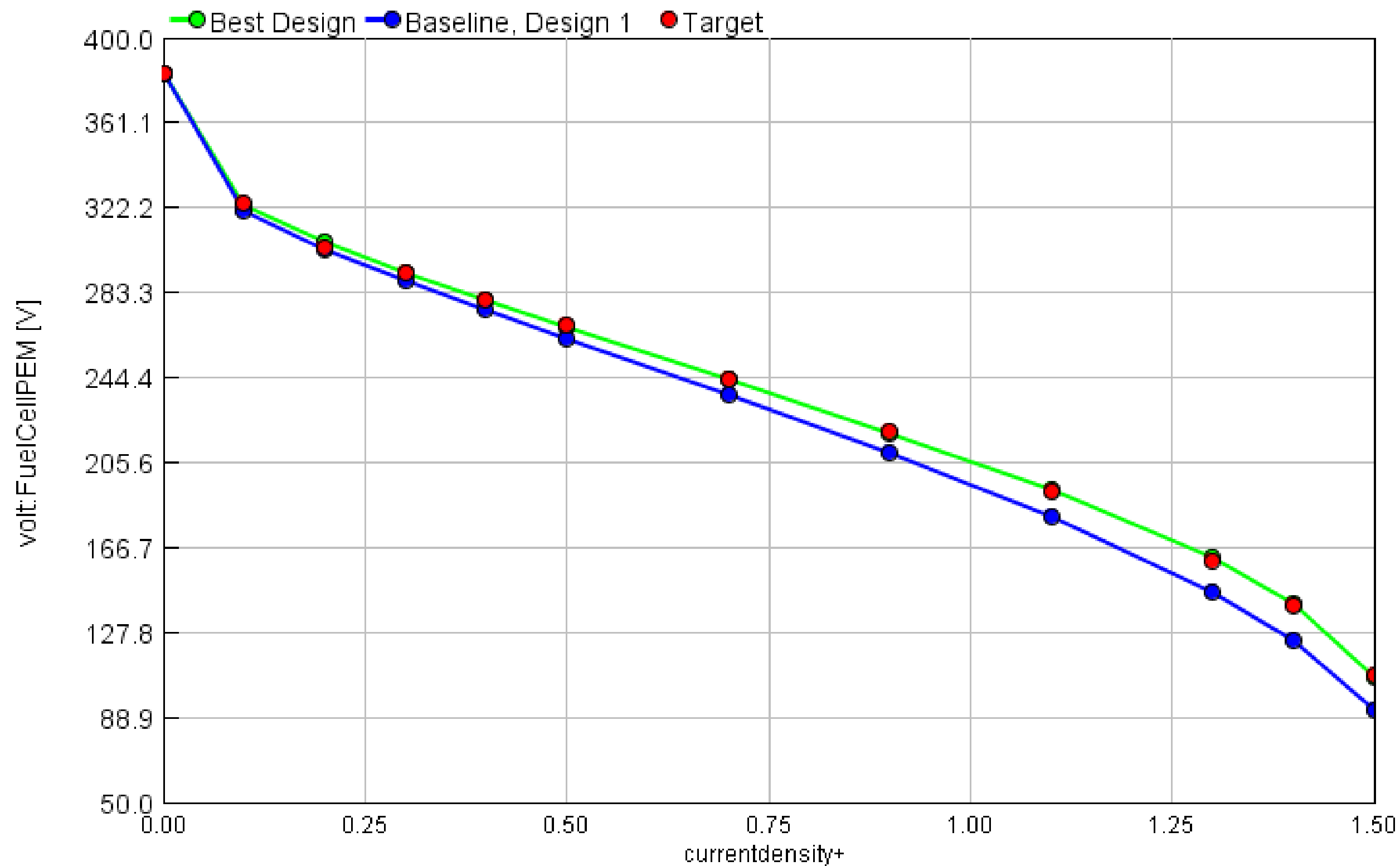
- 200s - 225s: 燃料电池运行在名义上的10kW
- 225s - 245s: 当电机需要额外的负载和电池SOC < 0.4时, 燃料电池的功率就会增加
- 245s - 280s: 燃料电池运行在名义功率10kW
- 280s - 300s: 当不需要的电驱动时 (+ 制动能量回收), 燃料电池功率下降,



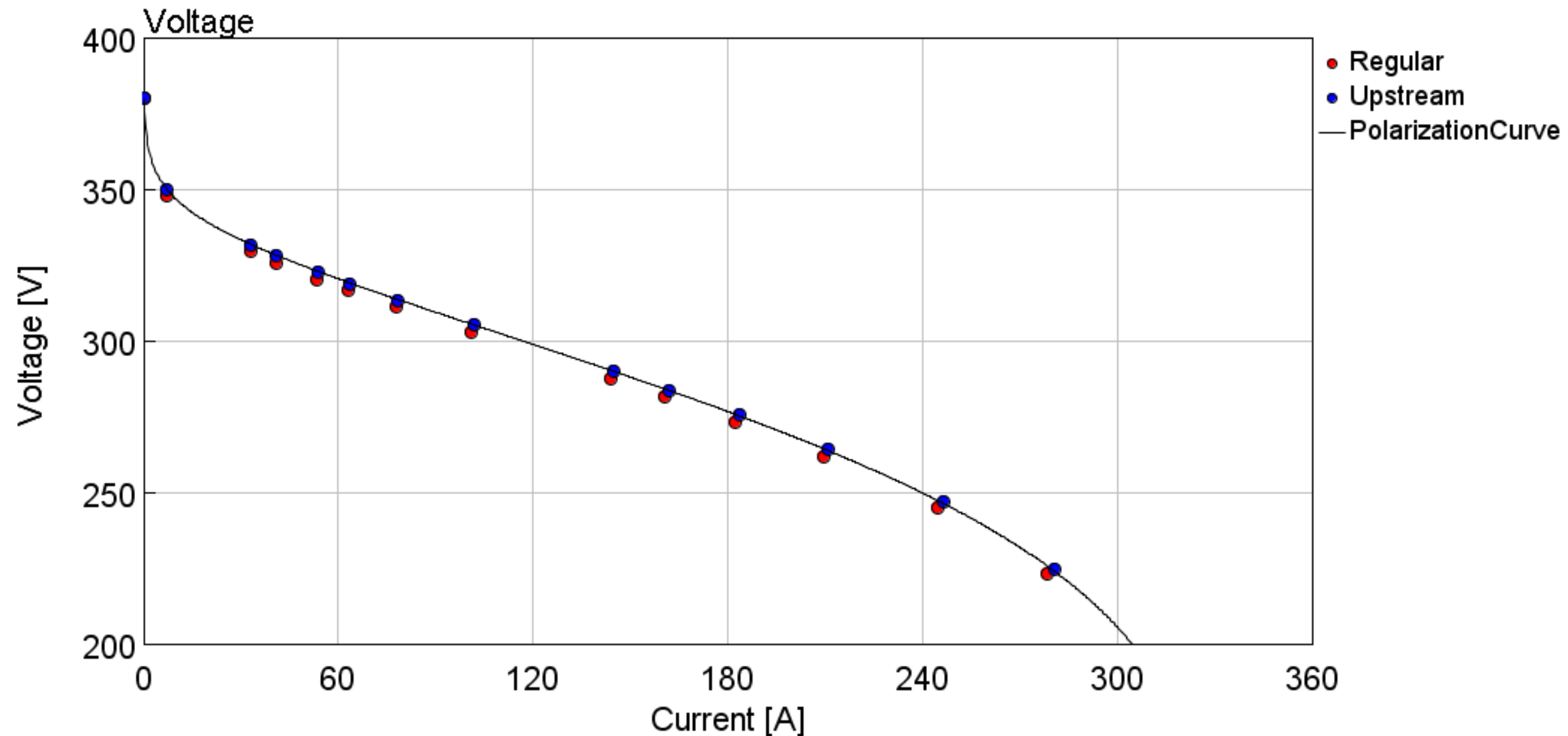
附录:其他新功能

-

新的算例模型：燃料电池校准

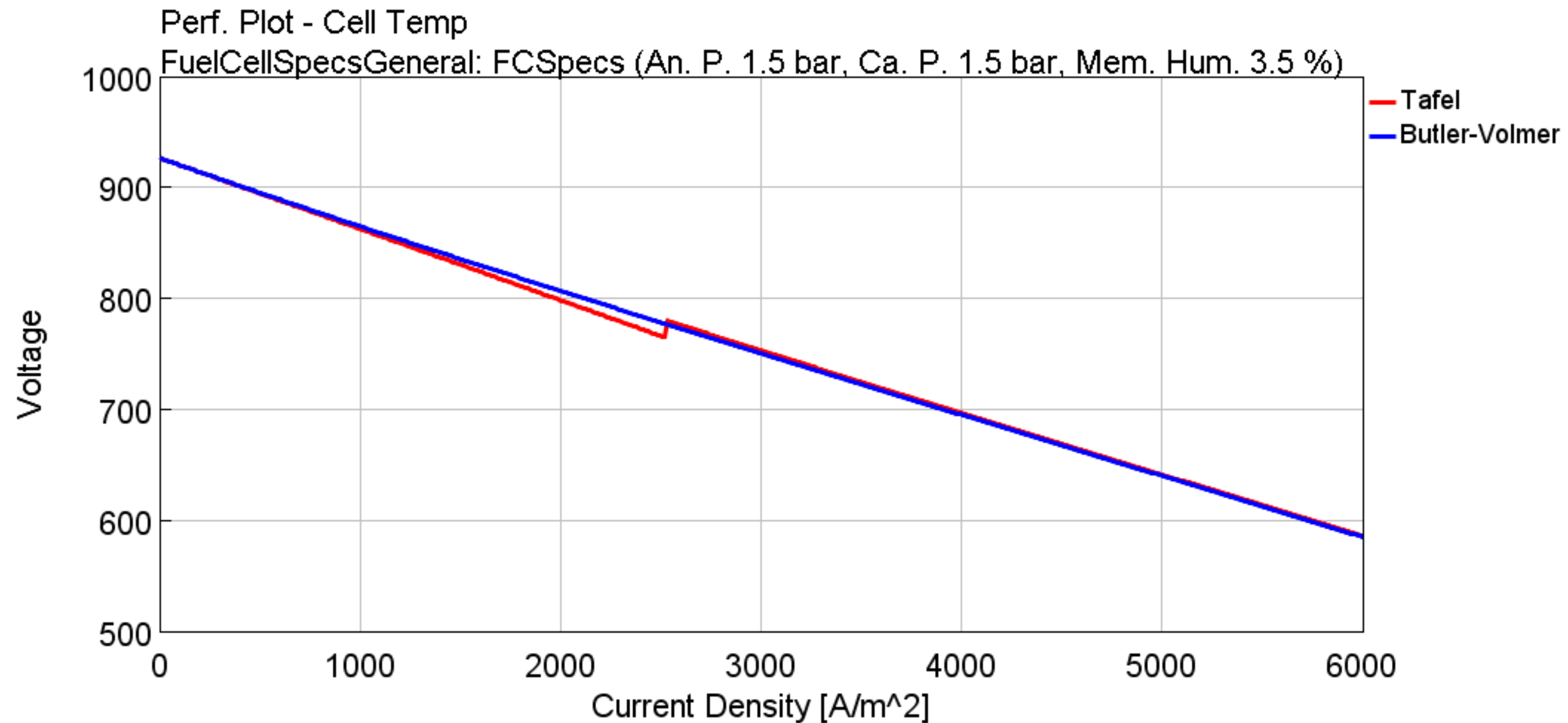


- 复选框，使计算基于燃料电池上游的条件，而不是燃料电池内部
- 如果试图在相同的参考条件下重现极化曲线会更有用



巴特勒-沃尔默方程用于极化损失

- 从塔费尔方程中消除潜在的不连续
- 只需花费较小的计算代价 (~10%)
- 在FuelCellSpecsGeneral中启用复选框



要点总结

- GT-SUIET有最新的燃料电池模板
- 对于燃料电池有先进的功能
 - 极化曲线预测计算
 - 组份预测
 - 内部离散
 - 考虑实际气体物性
 - 热管理分析
- 模板丰富
 - 能同时实现多物理模拟，并考虑多物理场之间相互影响
 - 可以考虑空调系统、整车、电池与电机冷却回路、乘员舱、动力舱回路等
- 是进行燃料电池车辆整车级仿真最理想工具

感谢倾听
期待与您的进一步合作 😊



扫一扫关注官方微信
获得第一手巡展报告下载资讯

联系我们

- web: <https://www.idaj.cn/>
- e-mail: support@idaj.cn
- Tel: 021-50588290; 010-65881497