



IDAJ中国  
GT-SUITE Team

IDAJ公司

# GT-SUITE 在燃料电池上的应用

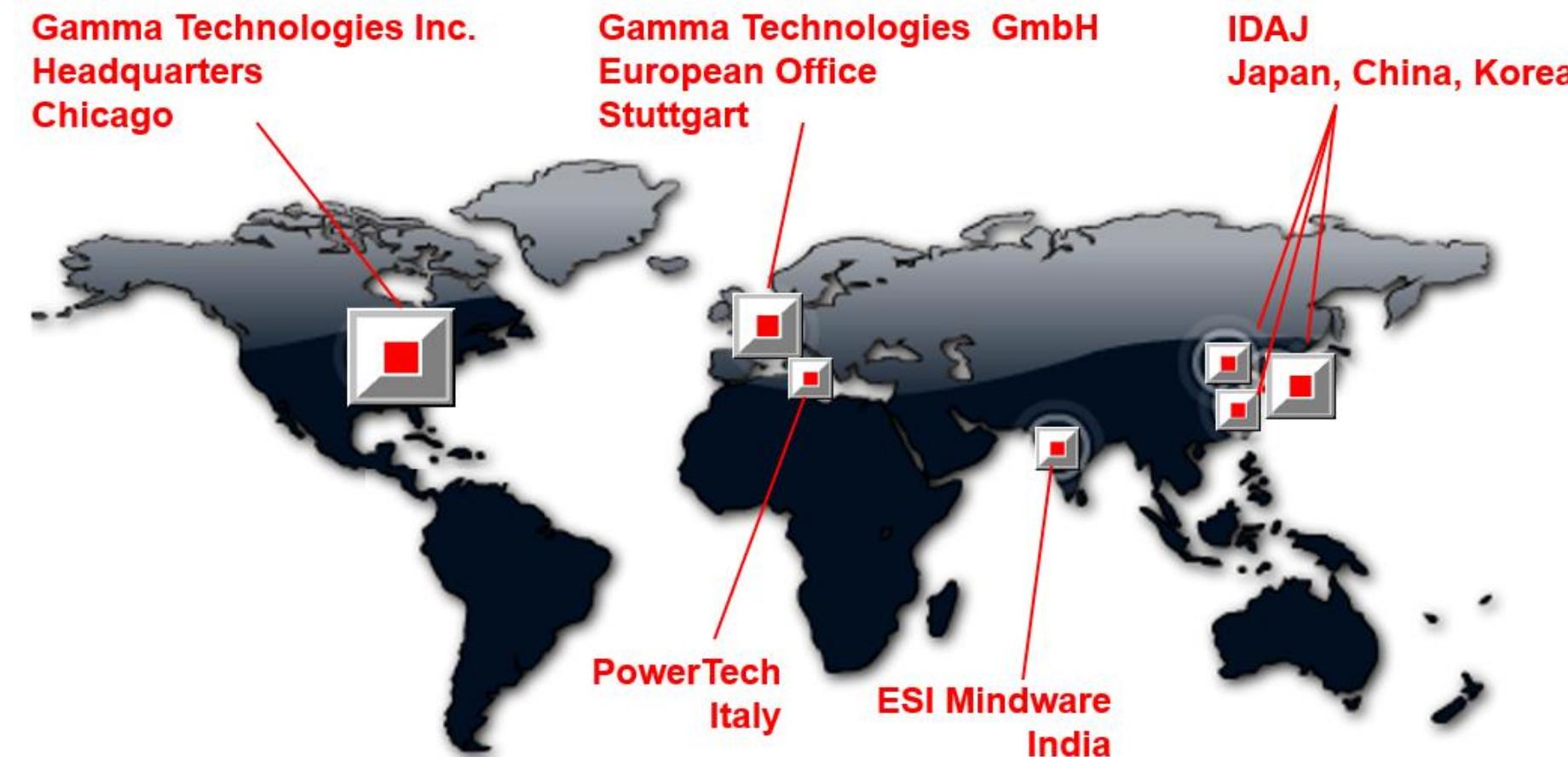
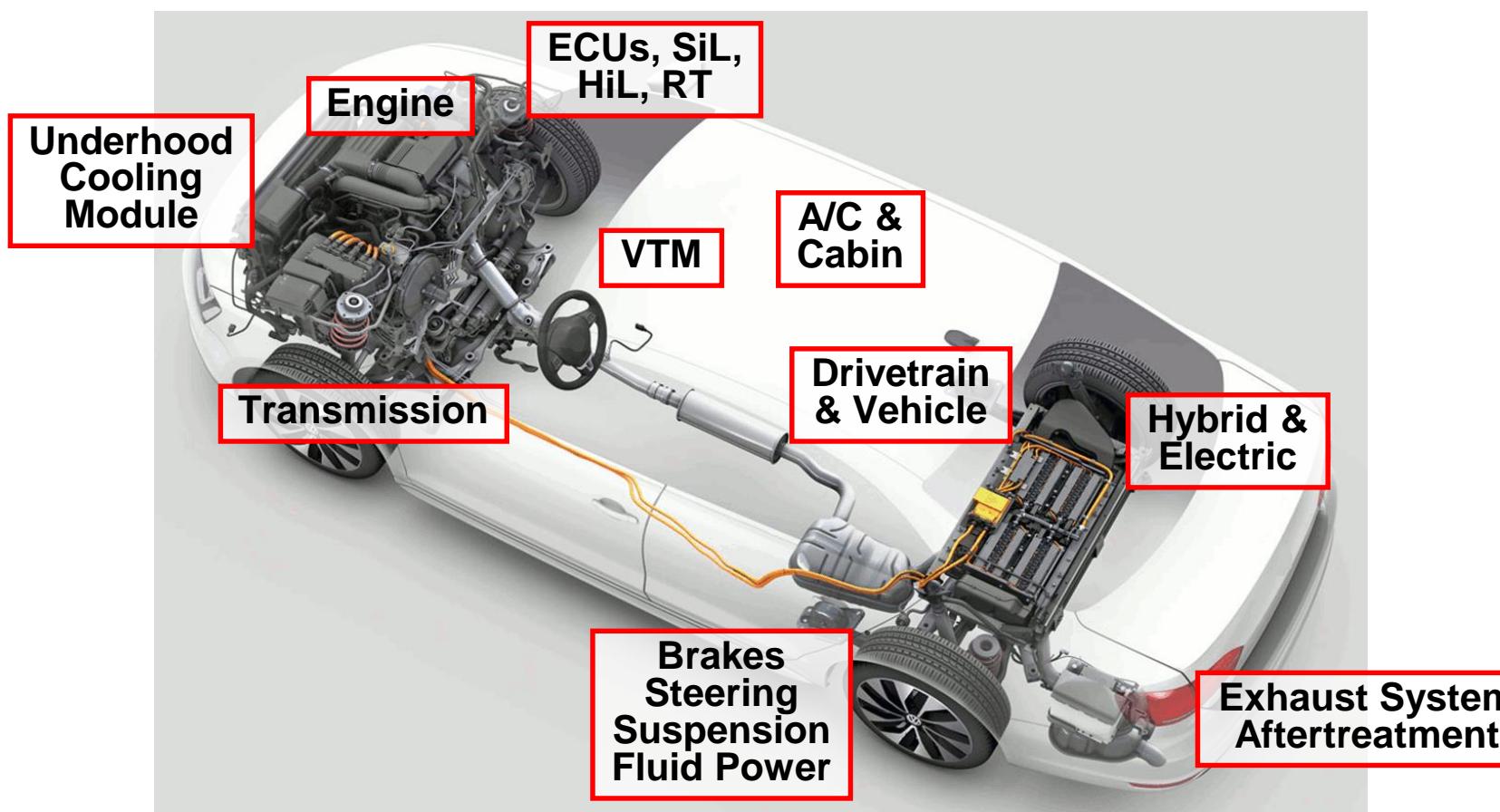
# 目录

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

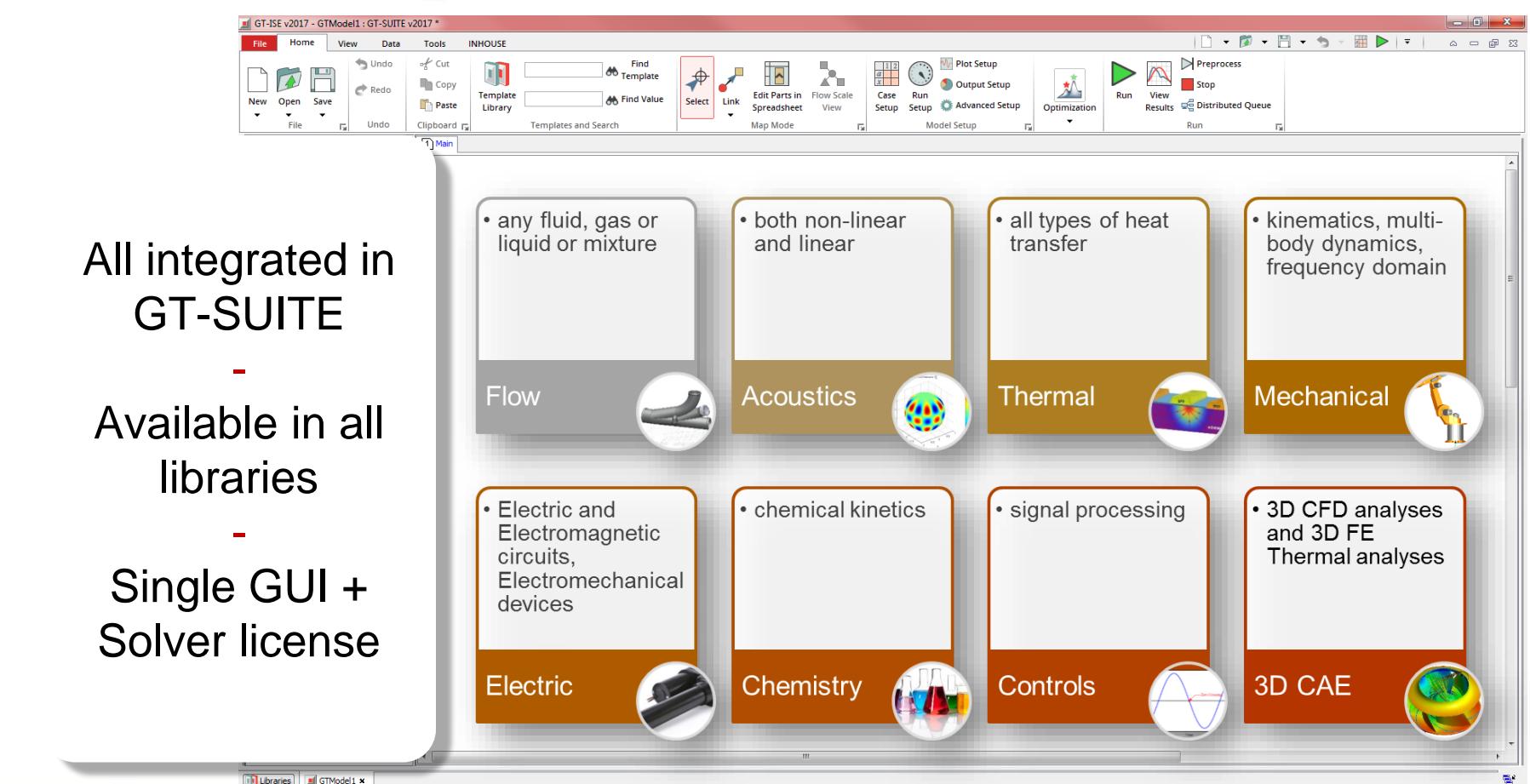
# GT-SUITE软件简介

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)



## USING GT-SUITE FOR VEHICLE ELECTRIFICATION:

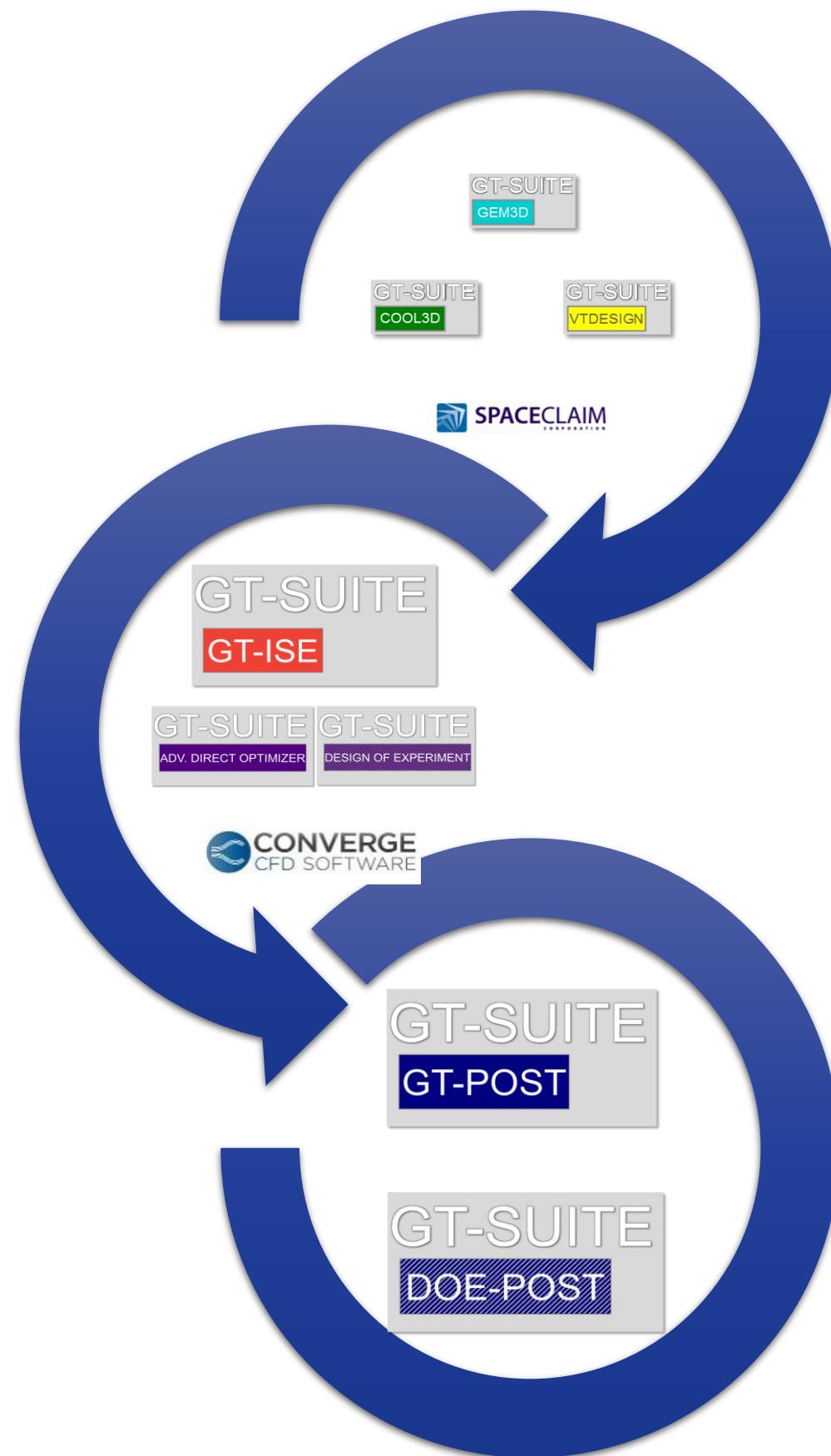


BOSCH

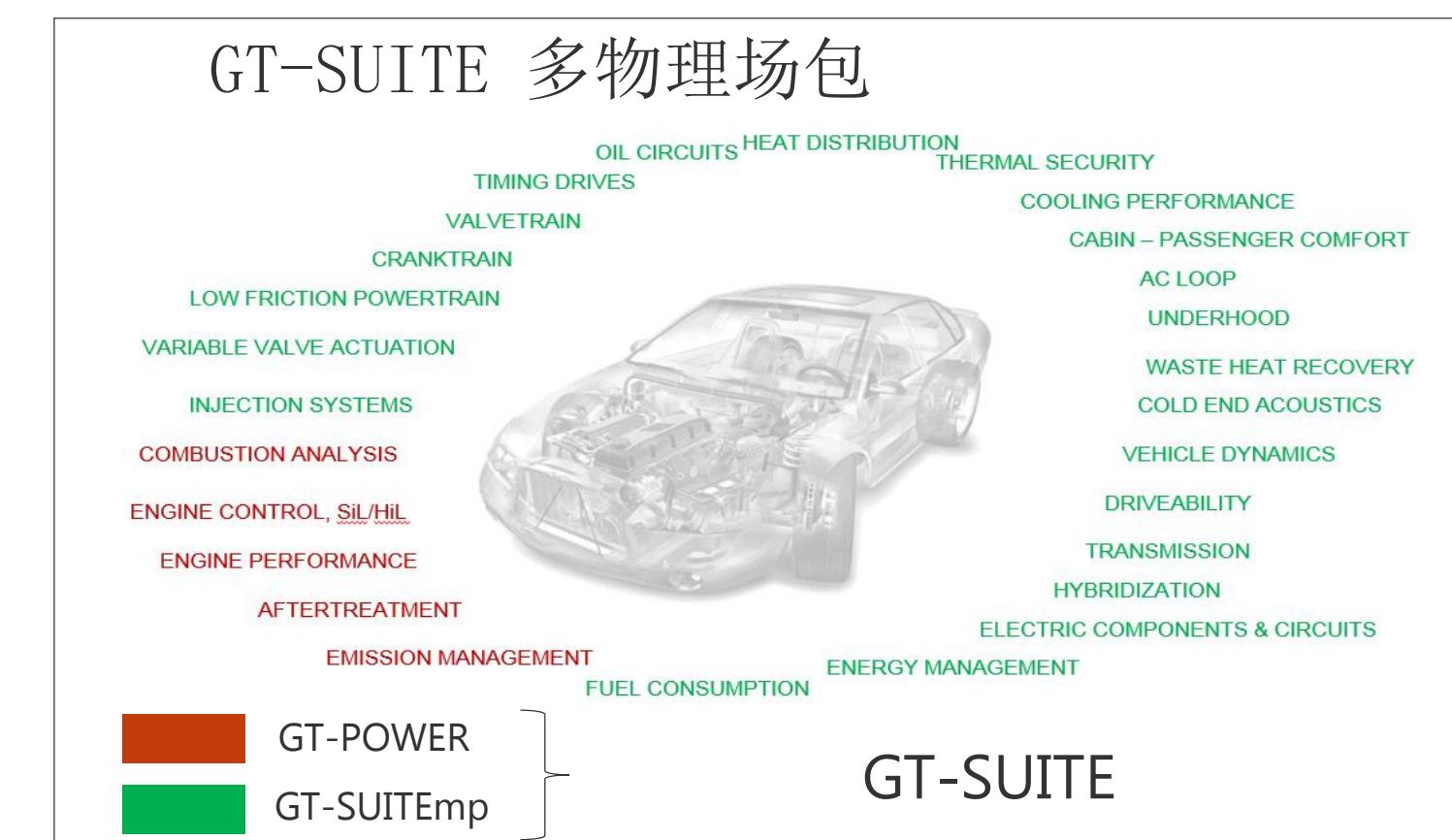
MAHLE



# GT-SUITE是什么：集成的工具包



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

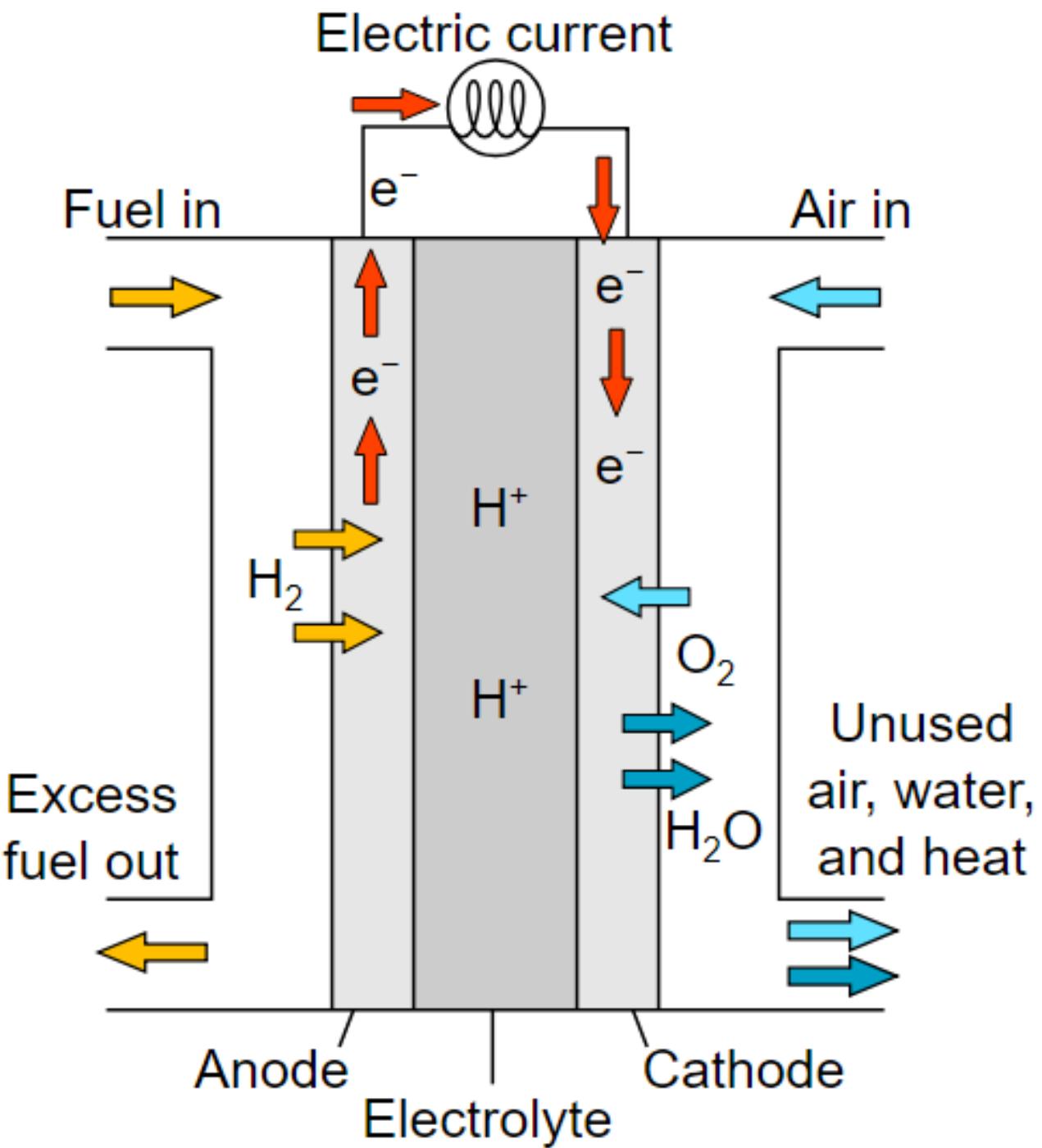


Image from Wikipedia

# 质子交换膜(PEM) 燃料电池

## ■ 燃料电池的应用：

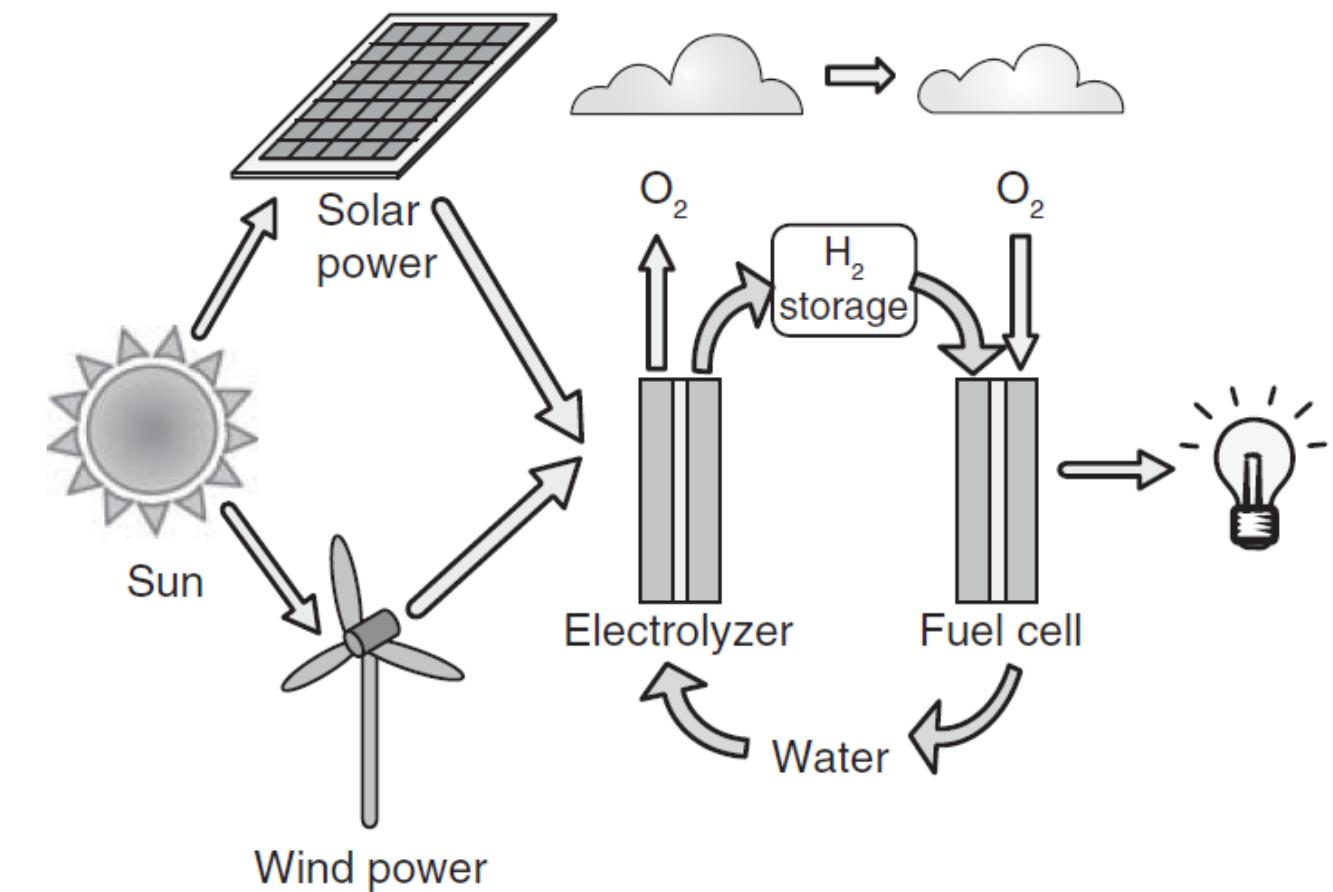
- 汽车推进(电力到电机)
- BEV的续航里程扩展
- 固定电源

## ■ 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.

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

# 目录

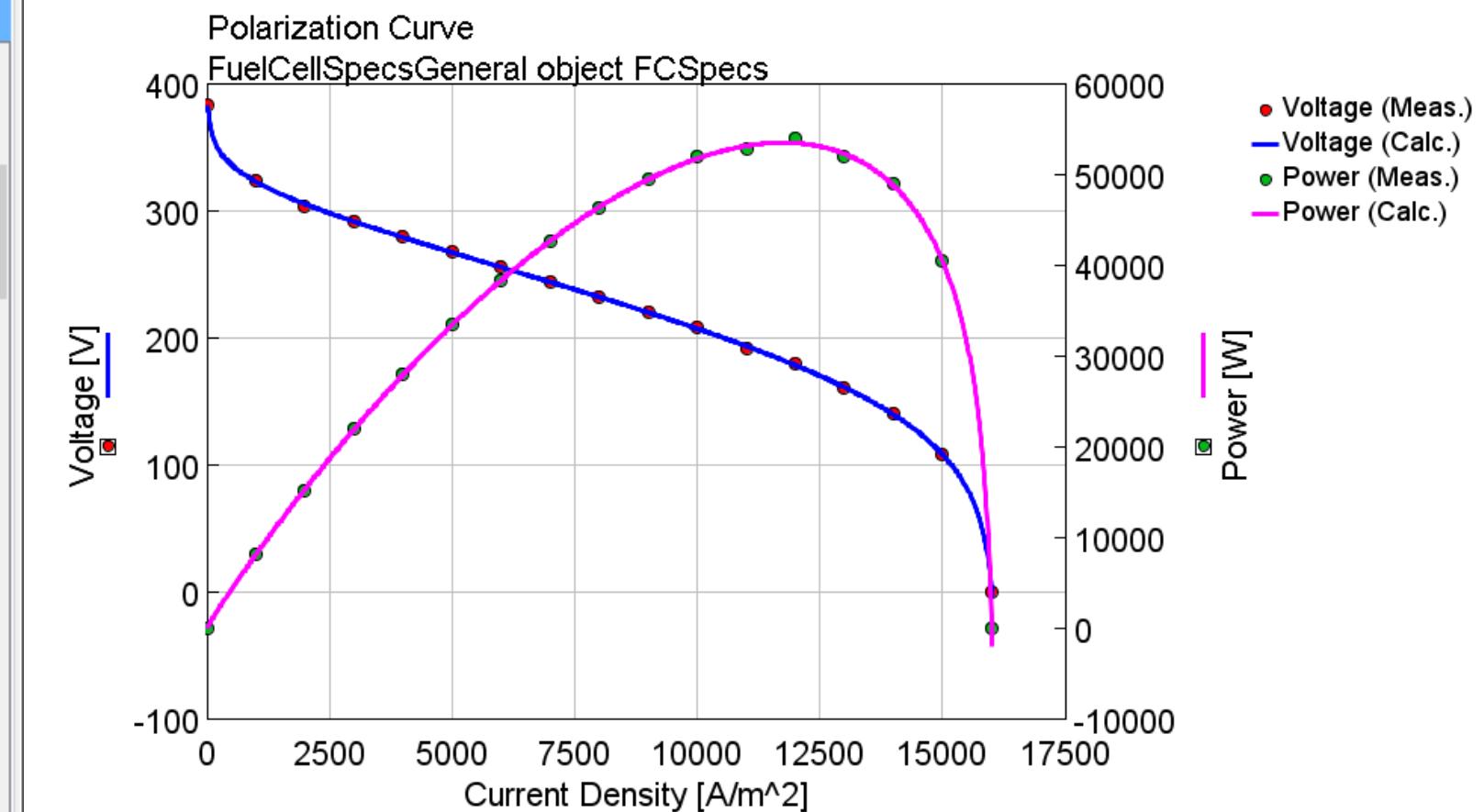
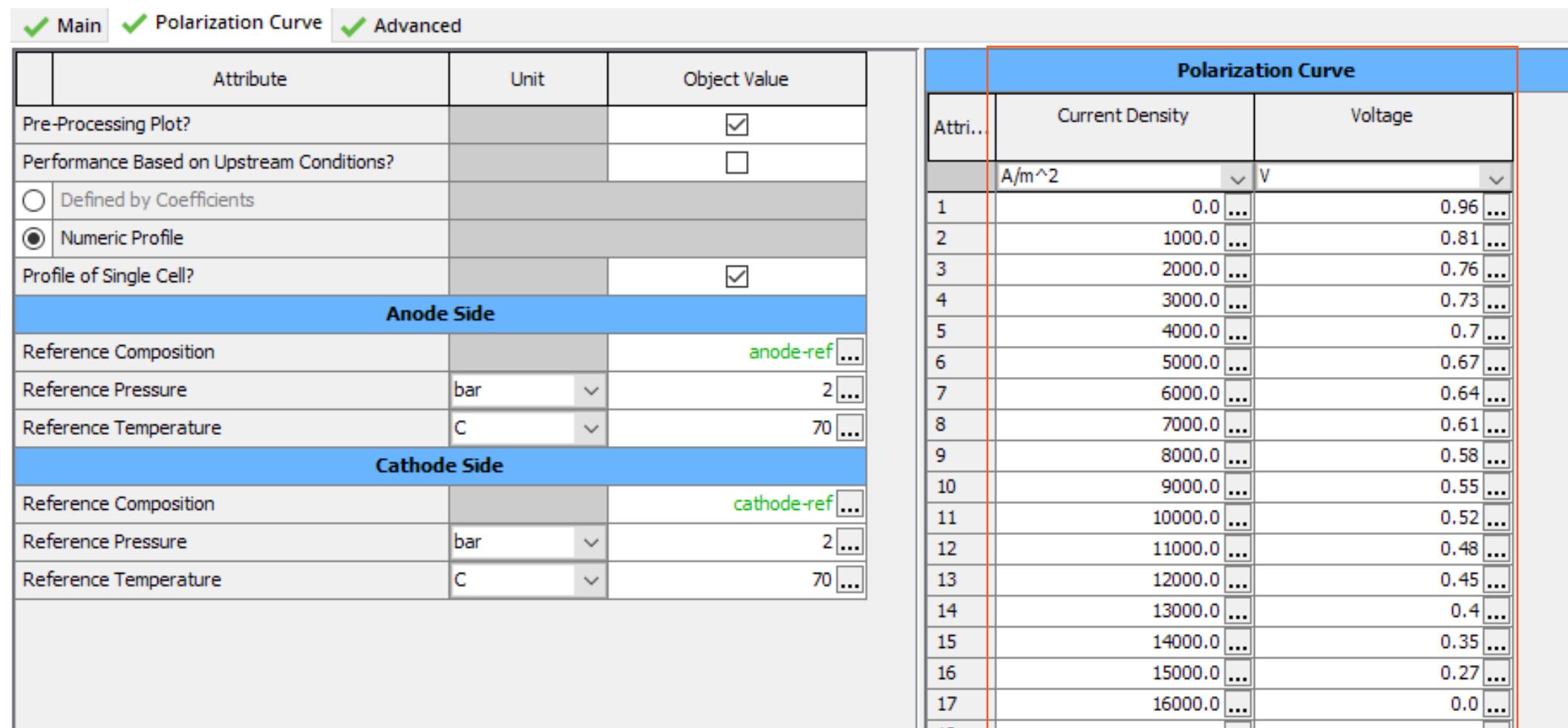
1. 简介
2. 燃料电池简介
3. v2019功能回顾
4. 极化预测模拟
5. 组份渗透
6. 离散
7. 热管理
8. 系统平衡
9. 整车模拟

## ■ 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

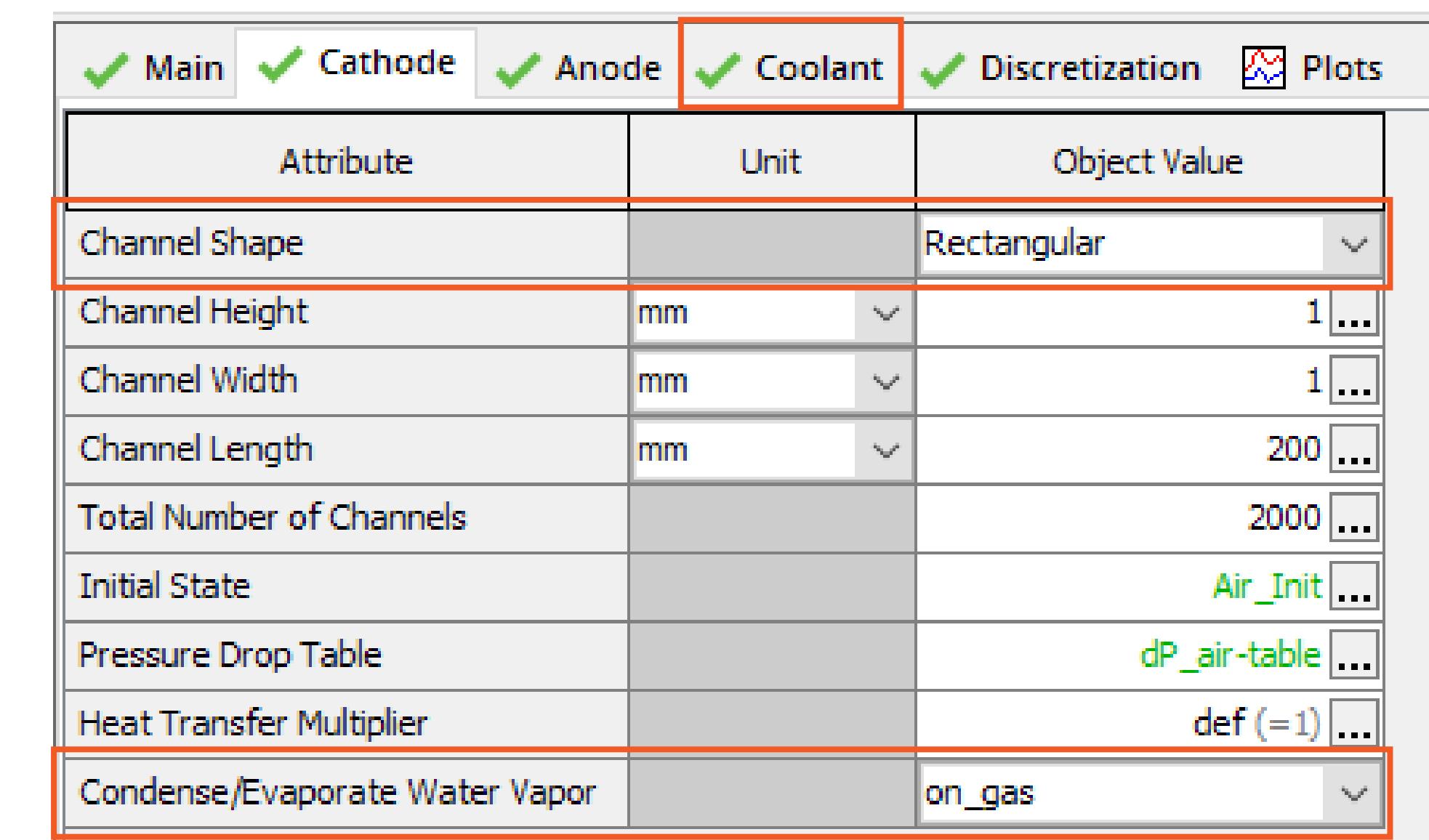
- 以前处理为简单的PipeRound
- 影响表面积的大小和导致传热的变化

## ■ 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

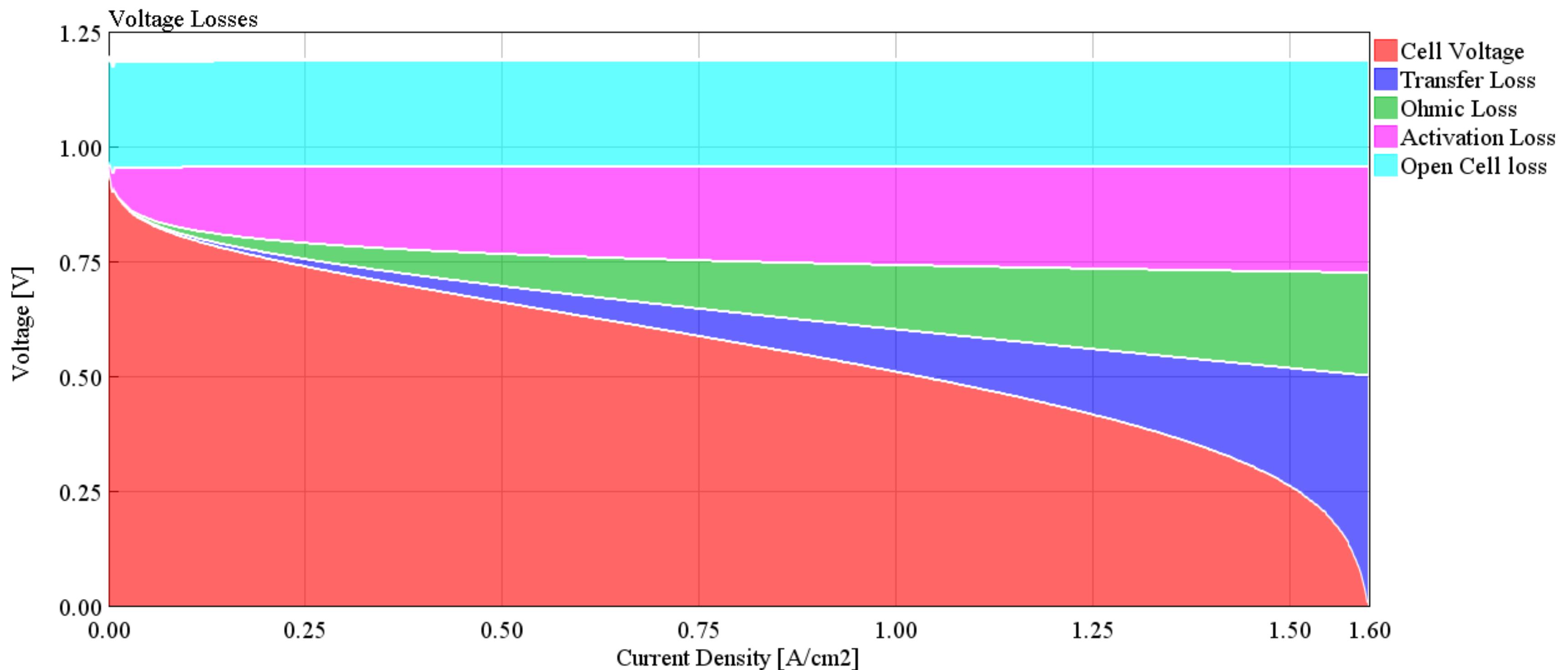


Attribute	Unit	Object Value
Channel Shape		Rectangular
Channel Height	mm	1
Channel Width	mm	1
Channel Length	mm	200
Total Number of Channels		2000
Initial State		Air_Init
Pressure Drop Table		dP_air-table
Heat Transfer Multiplier		def (=1)
Condense/Evaporate Water Vapor		on_gas

# 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



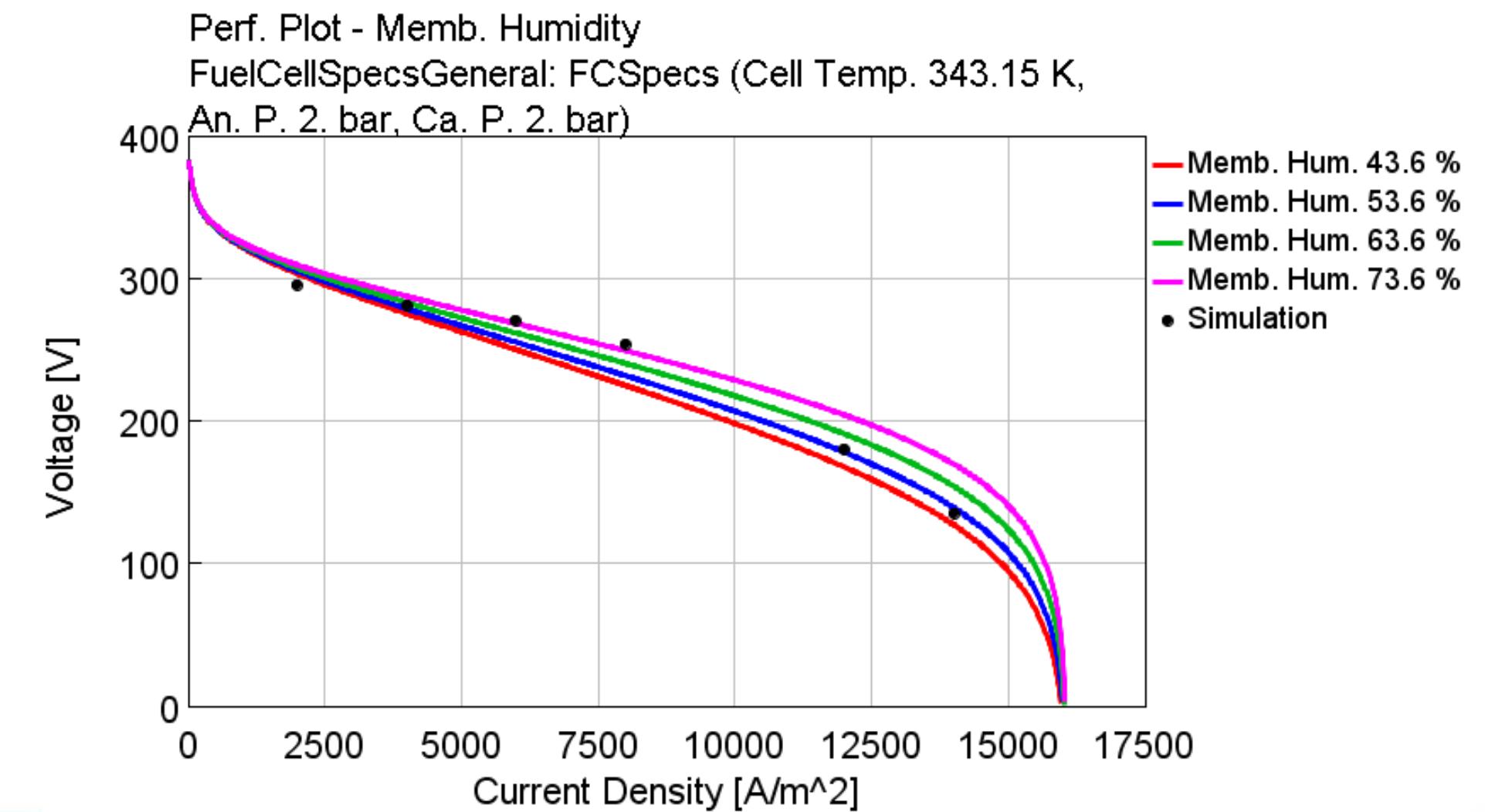
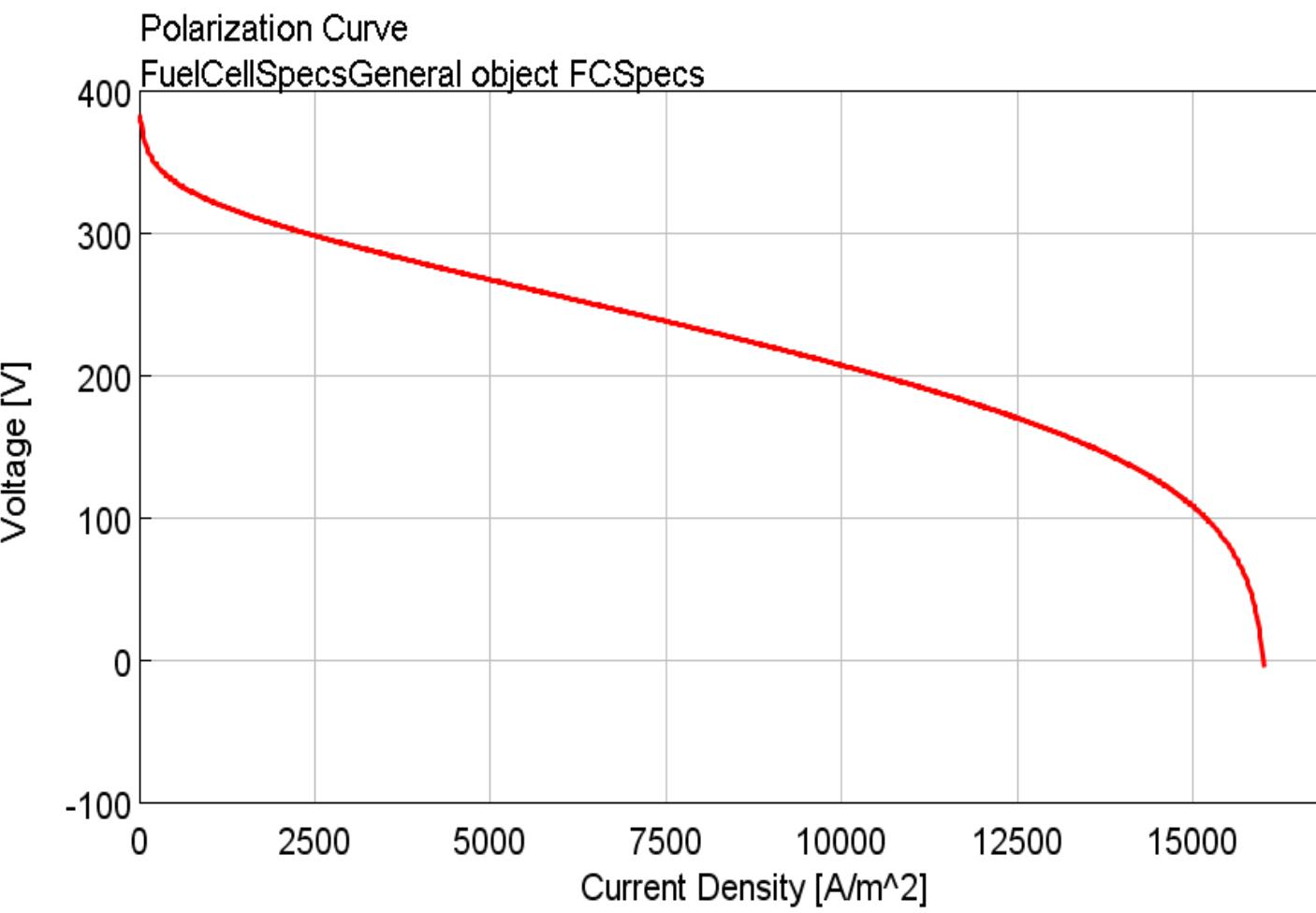
# 极化预测模拟

## ■ 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

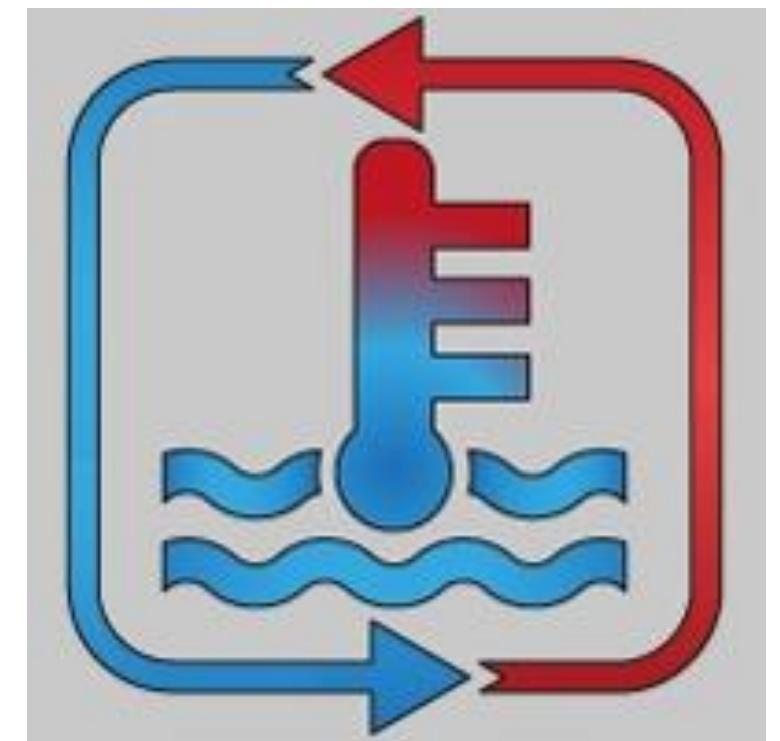
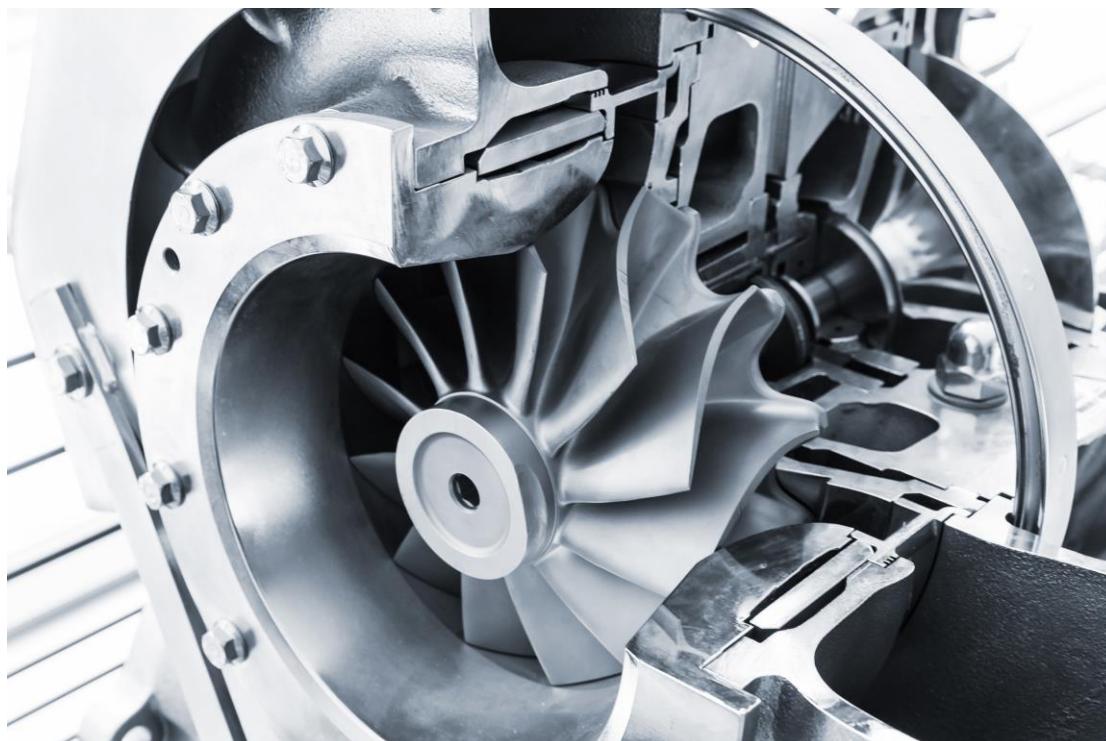


# 极化预测模拟

■ 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

# 活化极化：电流密度

- 过电压（极化）由反应动力学引起
- 必须克服活化能 ( $\Delta G^{++}$ ) 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

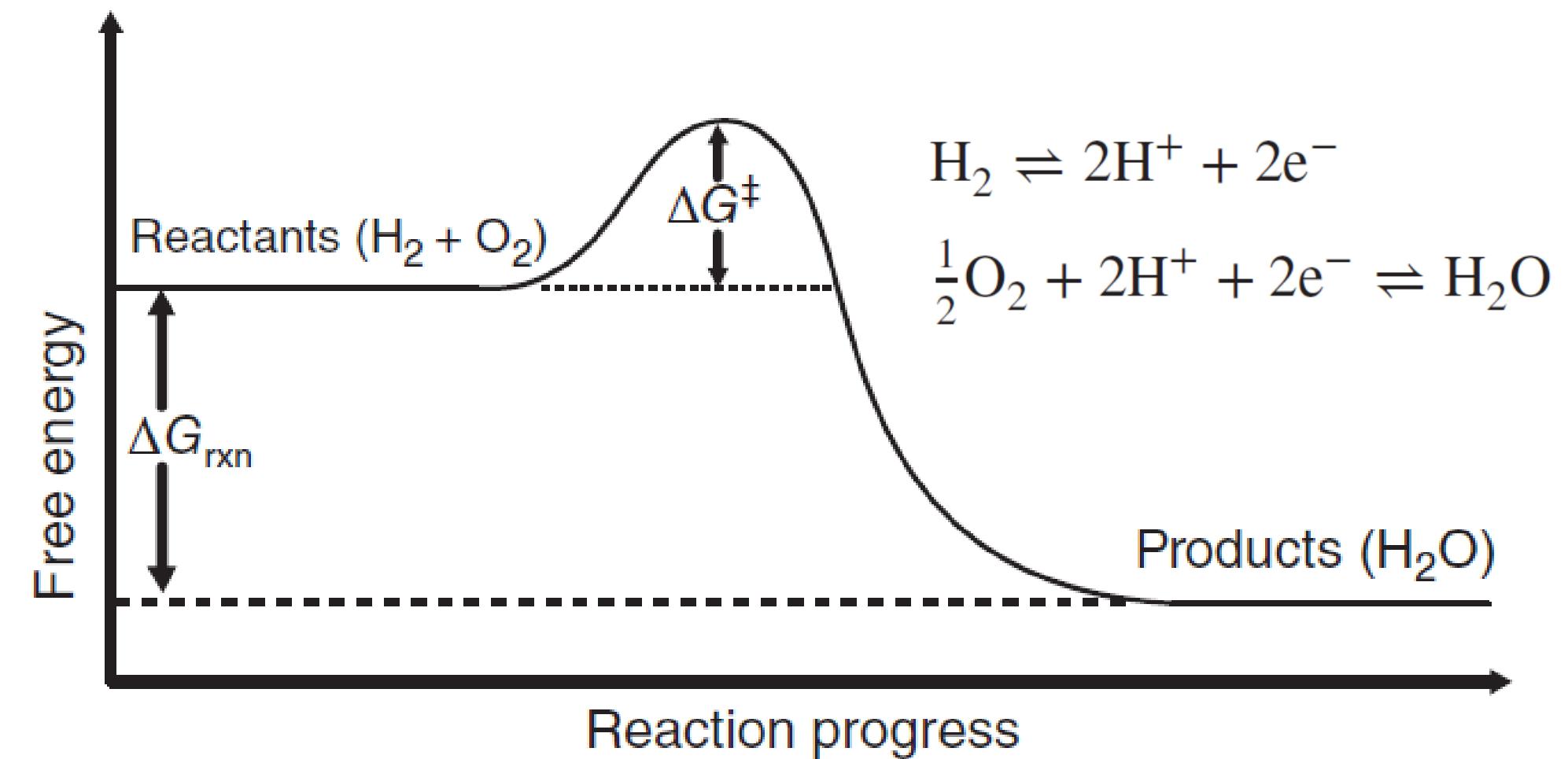
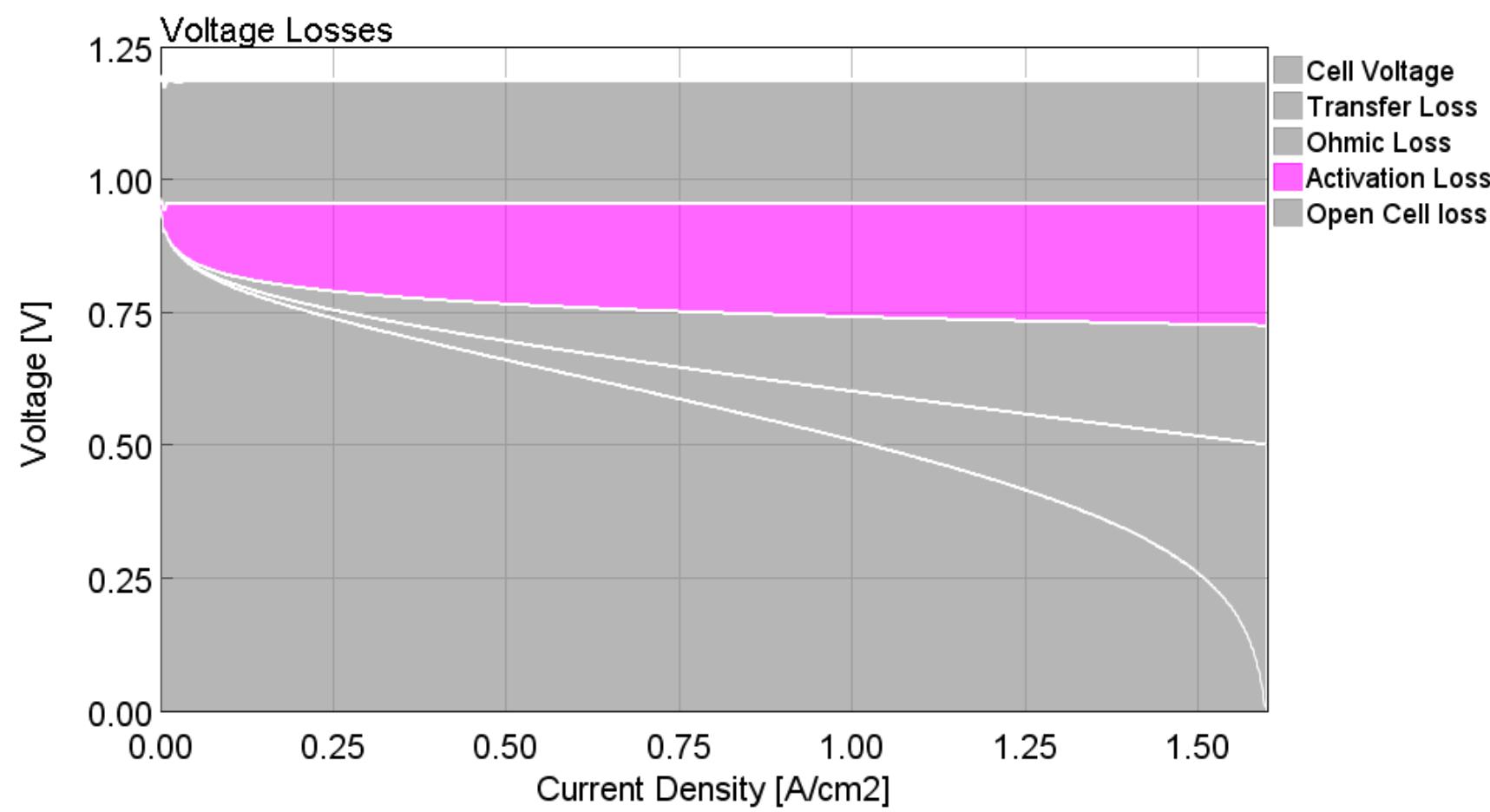
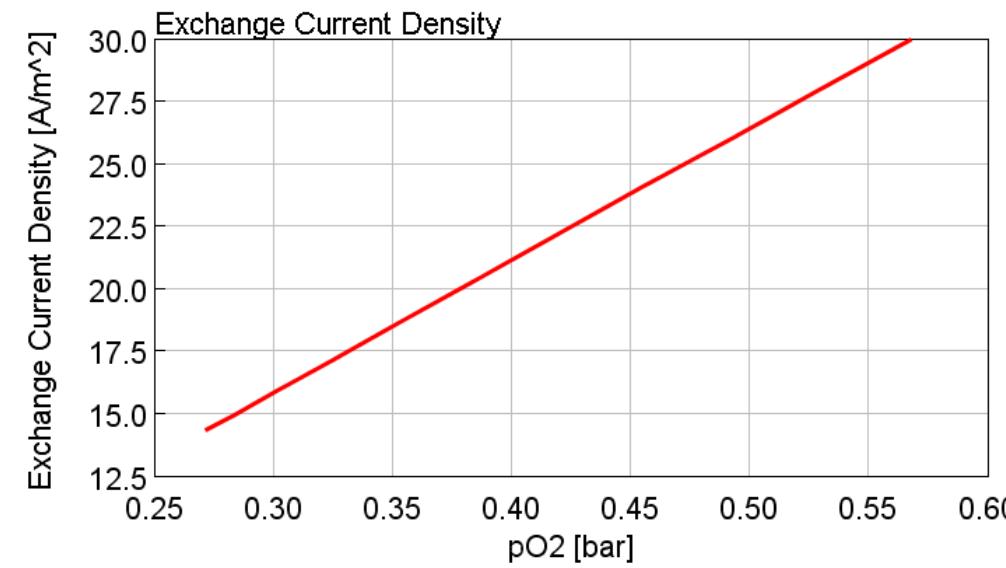
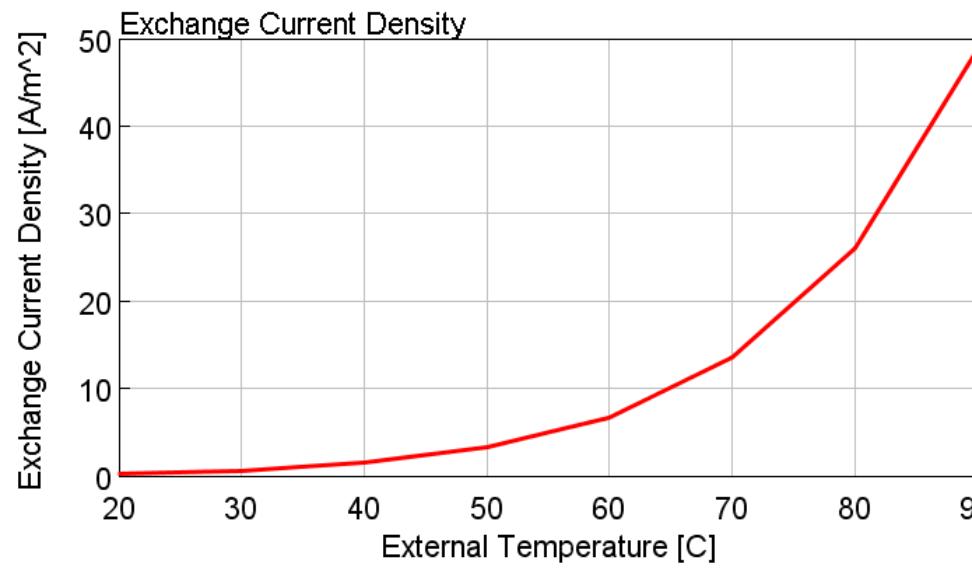


Image from O'Hare, R., Cha, S.W., Colella, W.G., Prinz, F.B., *Fuel Cell Fundamentals* (Wiley 2016)

# 活化极化：电流密度

- 提供在参考条件下的 ( $P_{O_2}$  和  $T_{cell}$ ) 的交换电流密度 ( $i_0$ )
- $i_0^{ref} a_c L_c$  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  $P_{O_2}$  和  $T_{cell}$  的函数



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

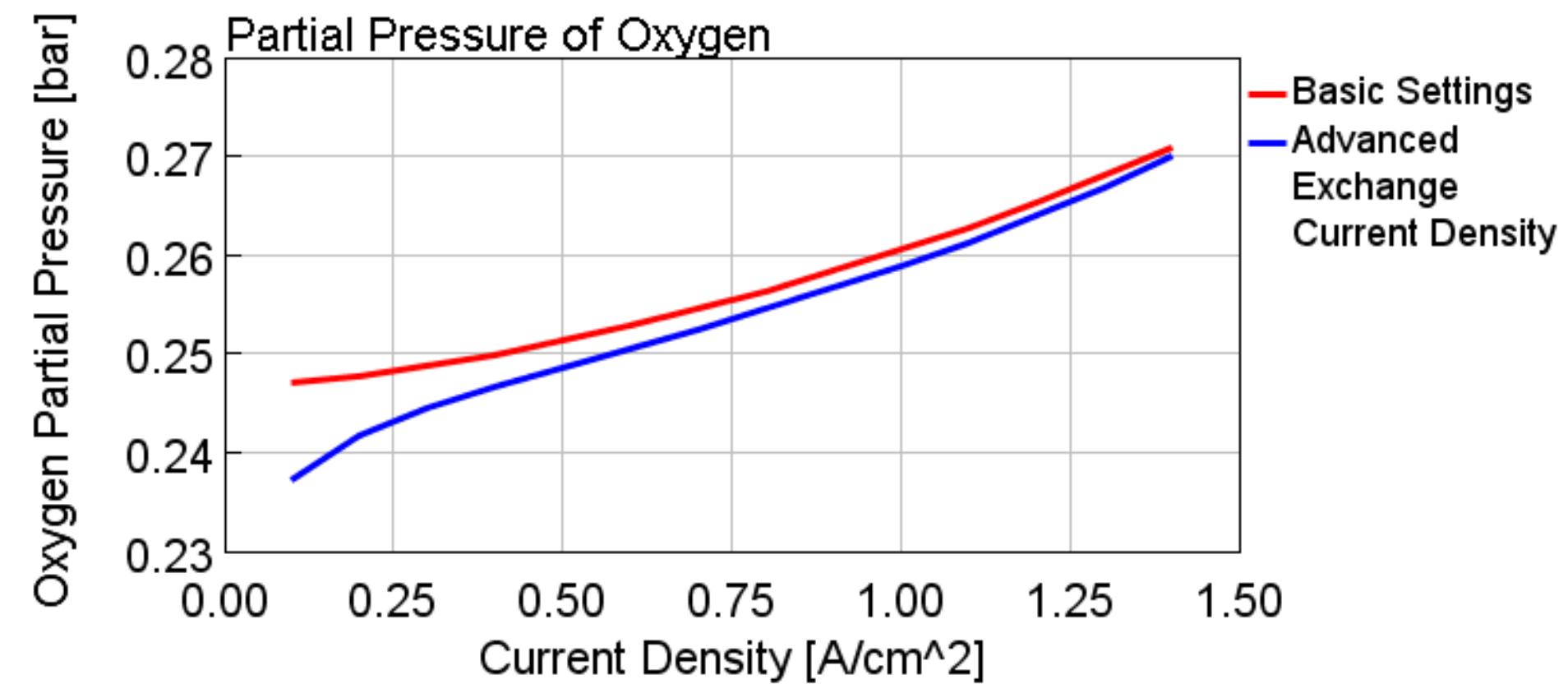
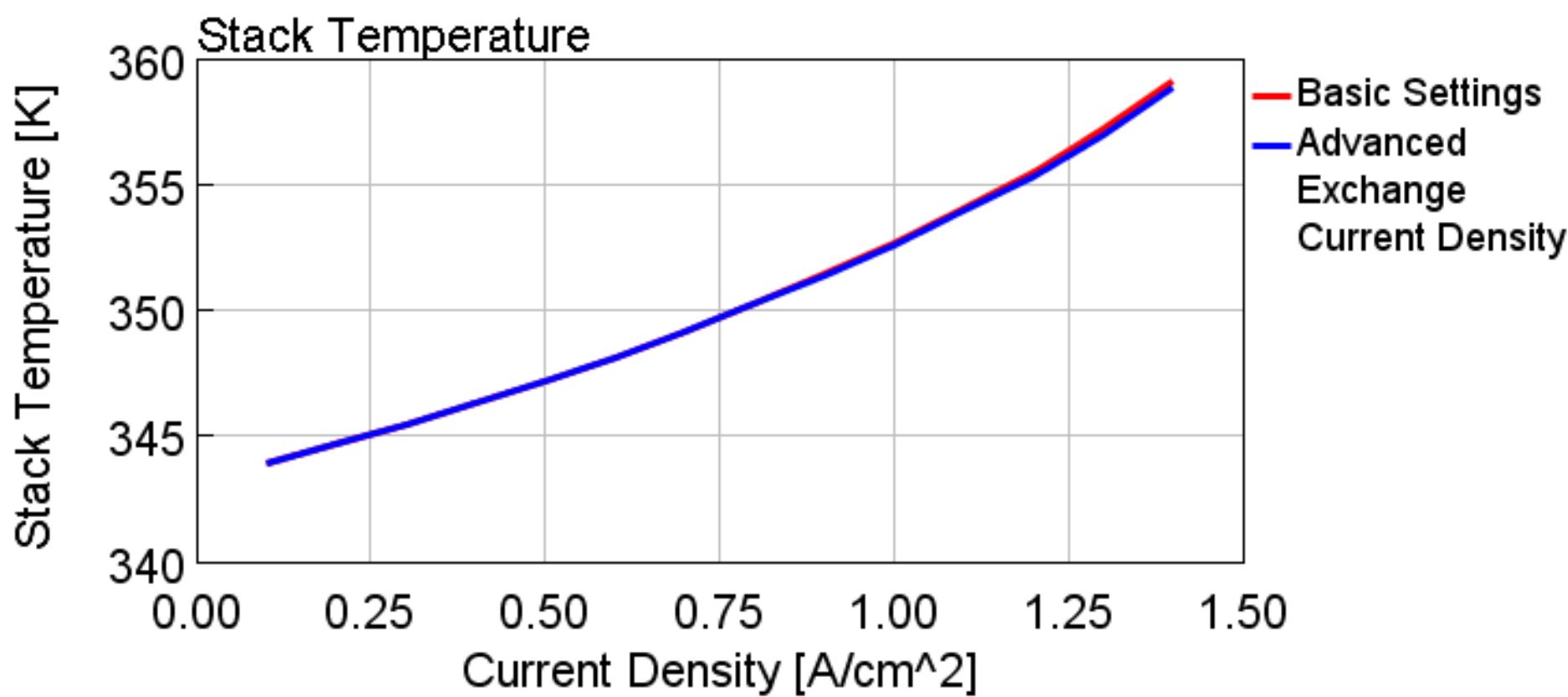
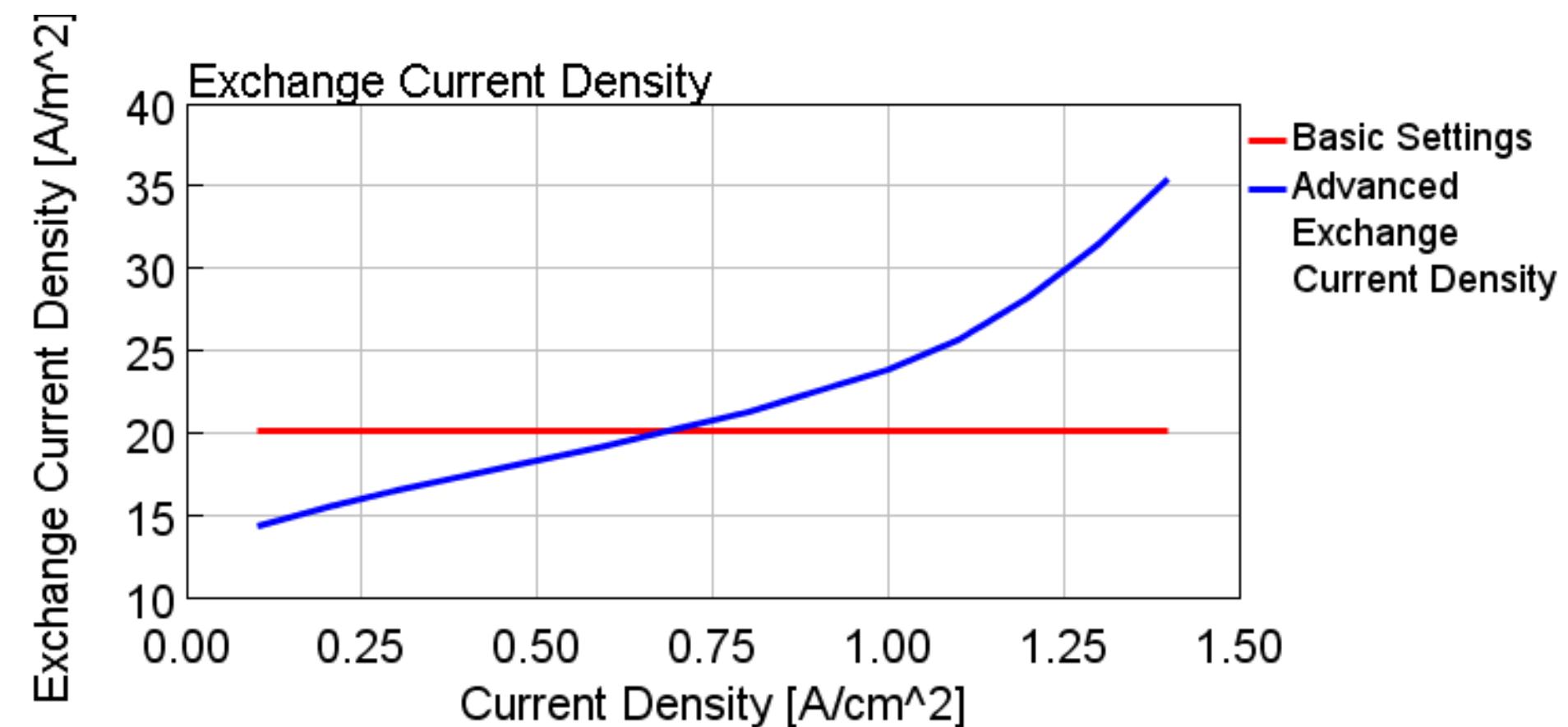
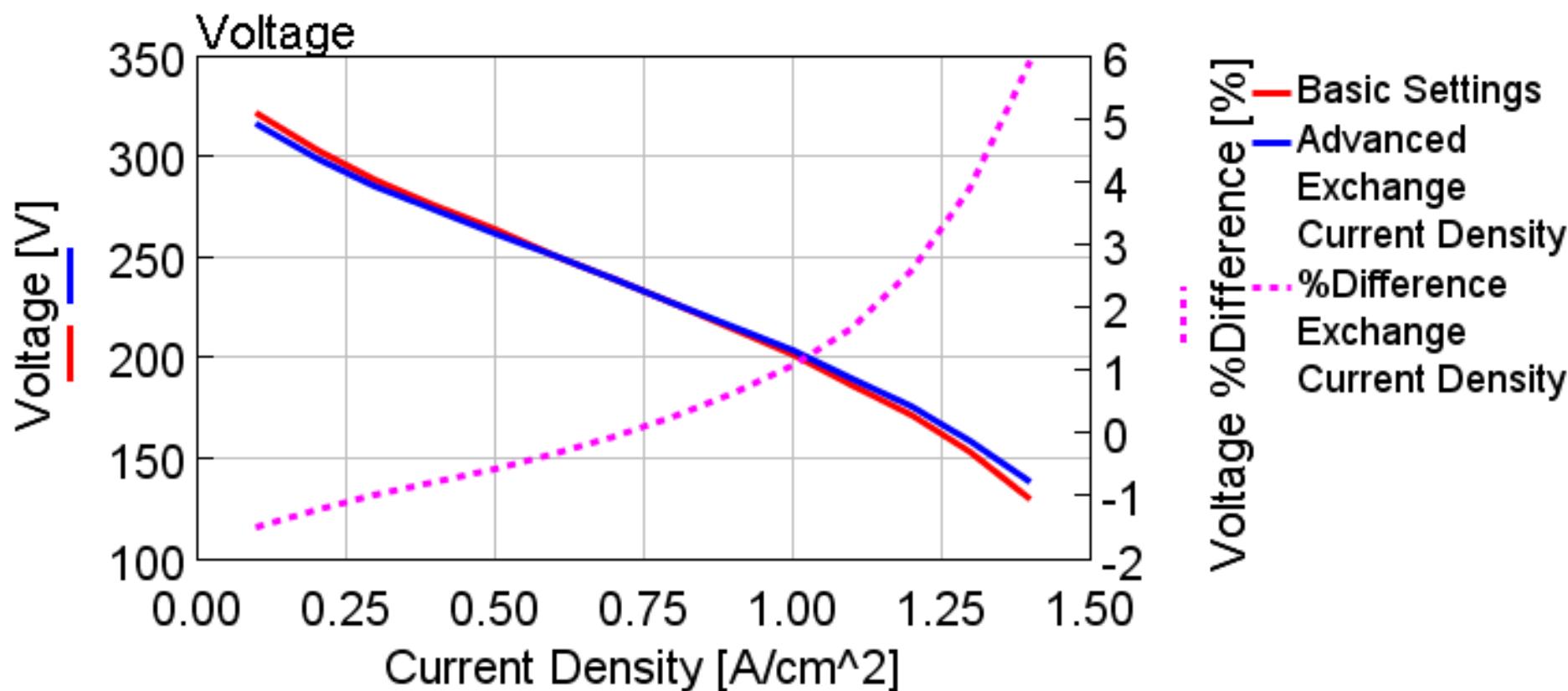
$$V_{act} = \begin{cases} \frac{R_{gas} \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \left( \frac{i}{i_0} \right) & i \leq i_0/(1-\alpha) \\ \frac{R_{gas} \cdot T}{2 \cdot \alpha \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) & i > i_0/(1-\alpha) \end{cases}$$

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

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

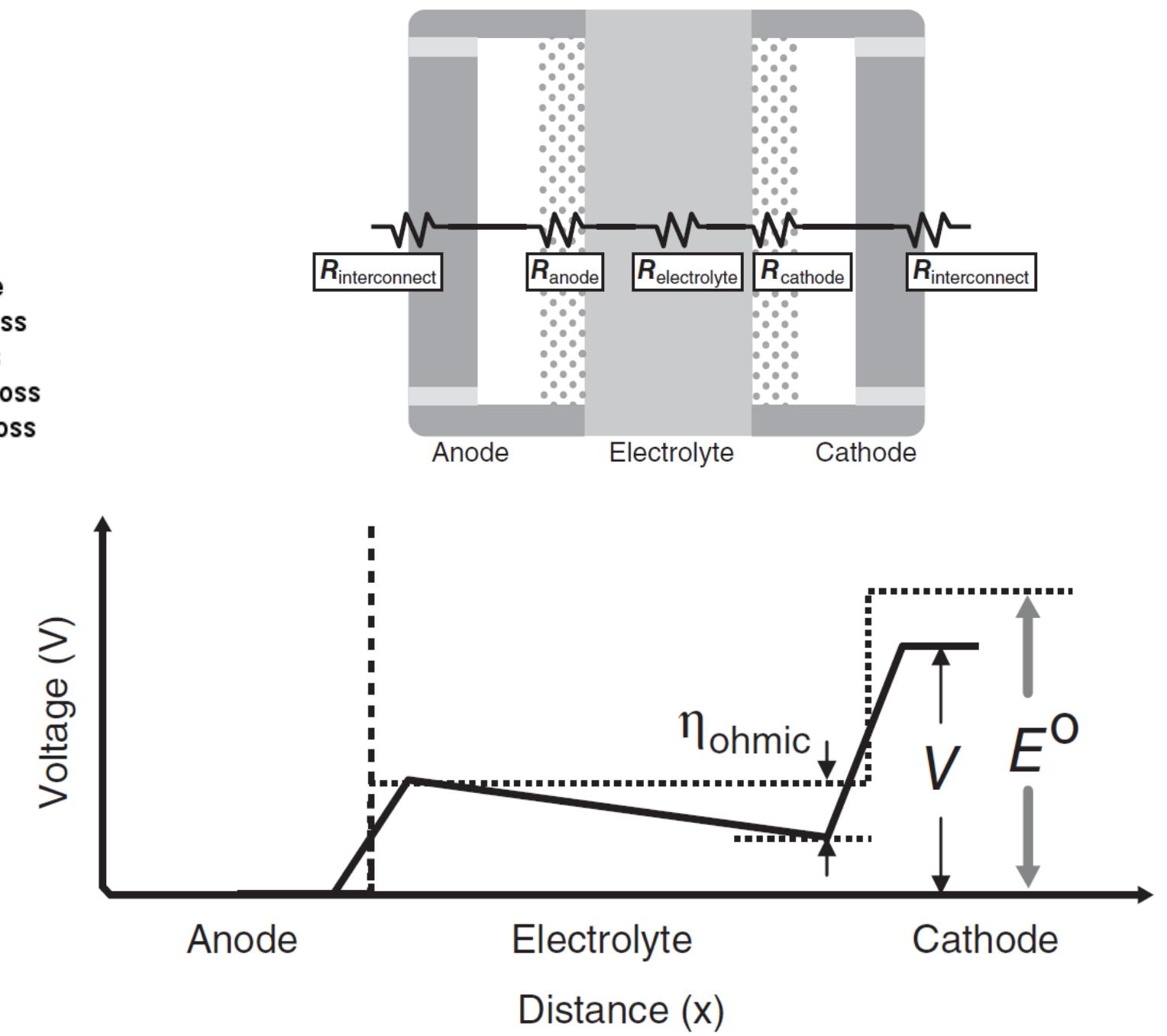
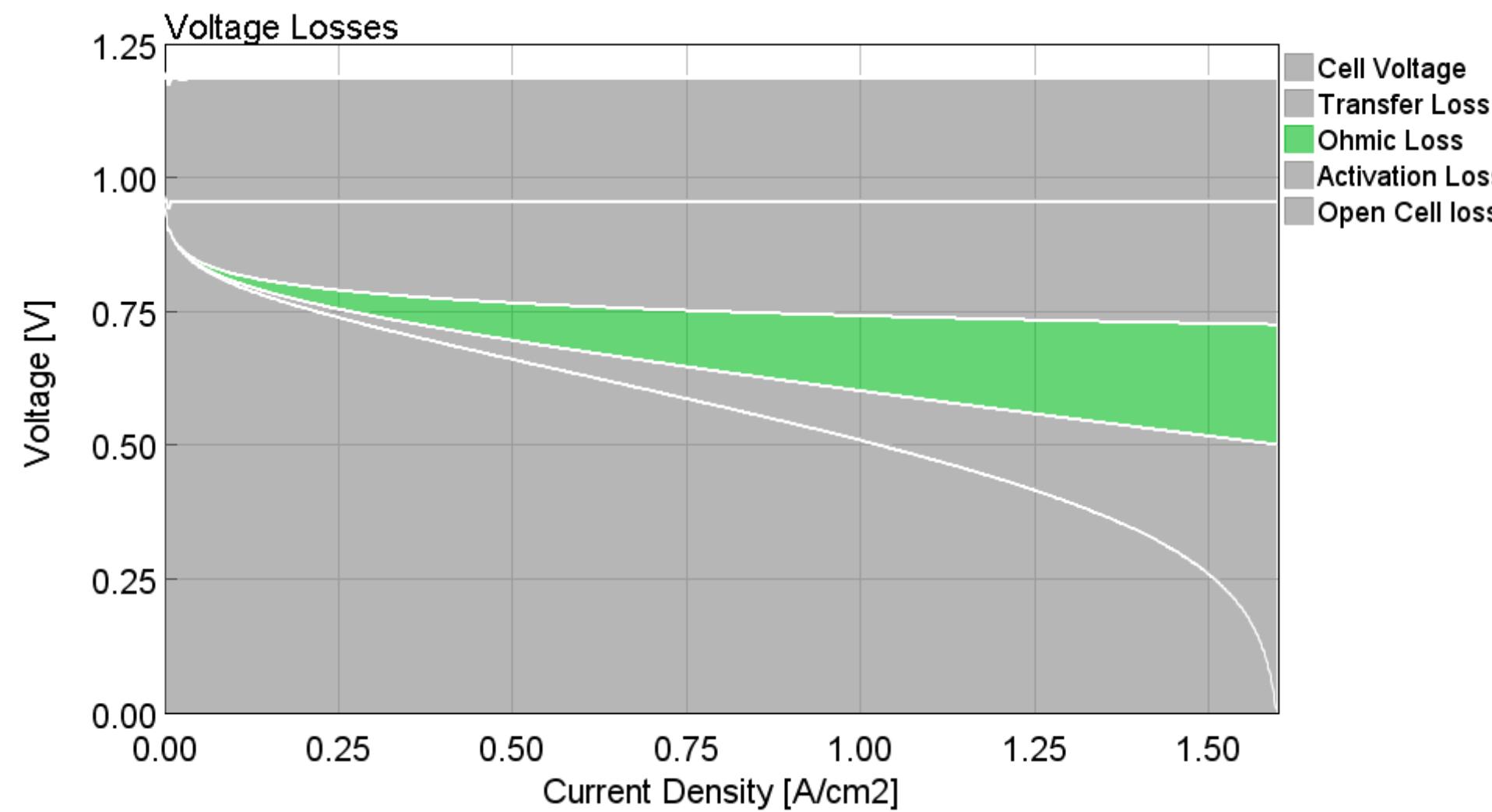
Murschenhofer, D., Kuzdas, D., Braun, S. and Jakubek, S., 2018. "A real-time capable quasi-2D proton exchange membrane fuel cell model. Energy conversion and management", 162, 159-175.

# 高级的交流电流密度模型的效果



# 欧姆极化: 欧姆电阻

- 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

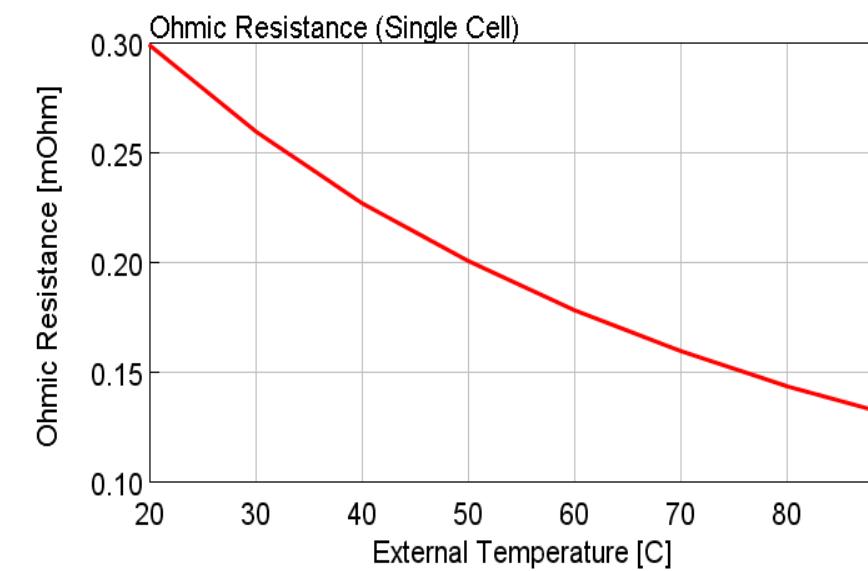
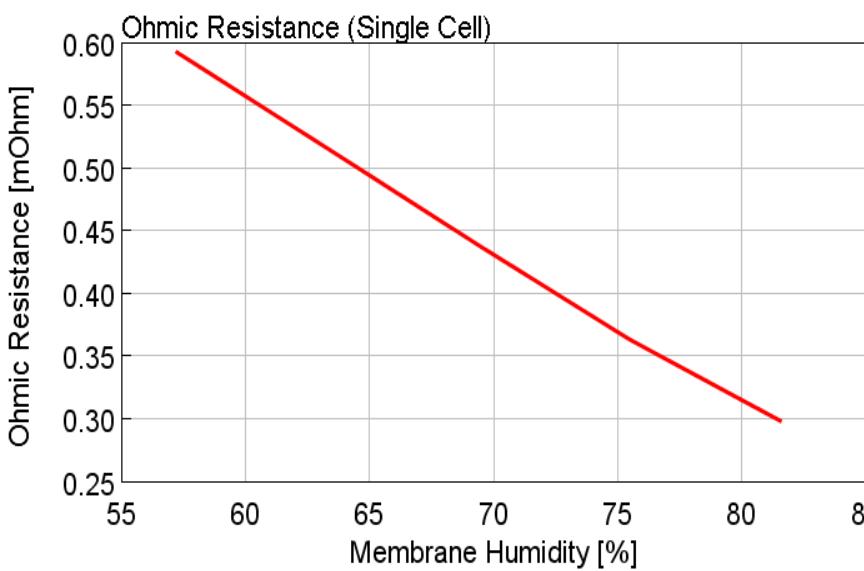
$$V_{ohm} = iR_{ohm}$$

- 欧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

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

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

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

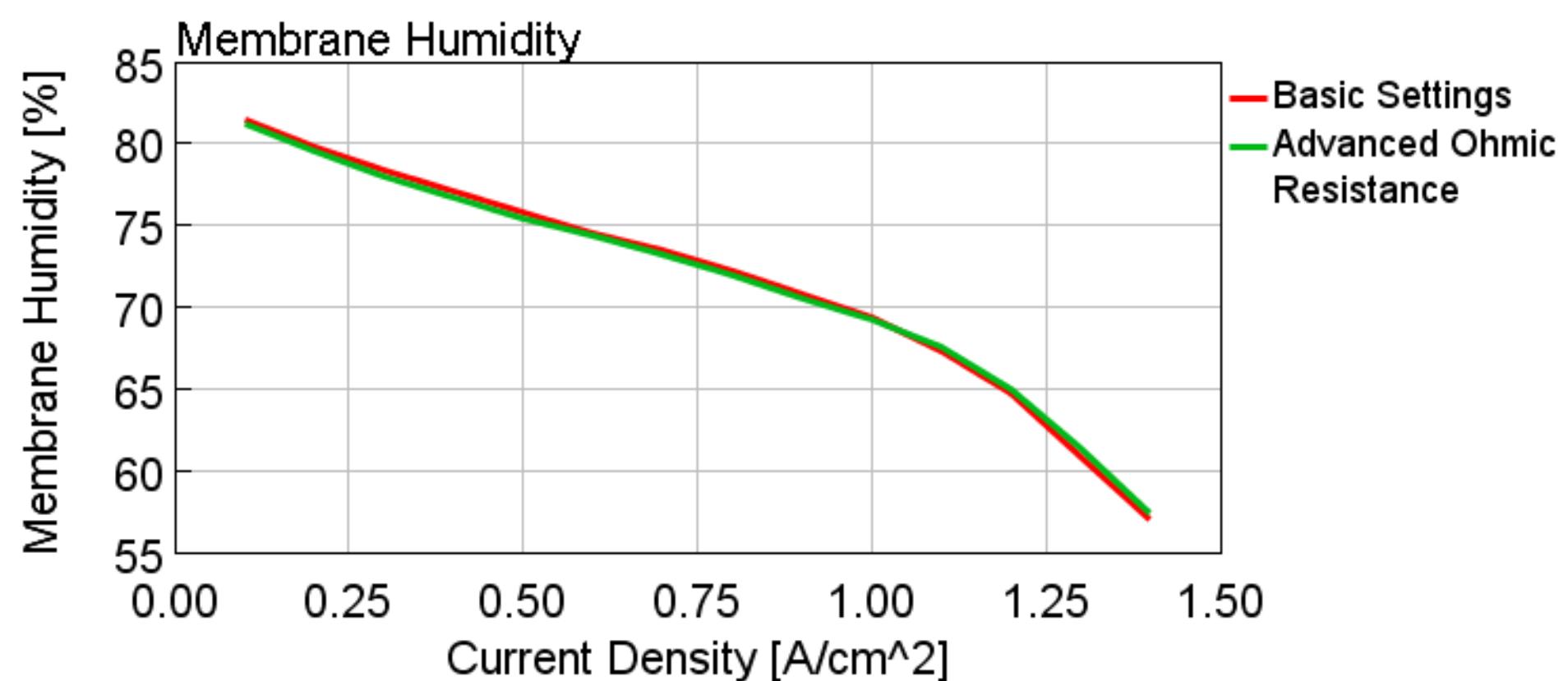
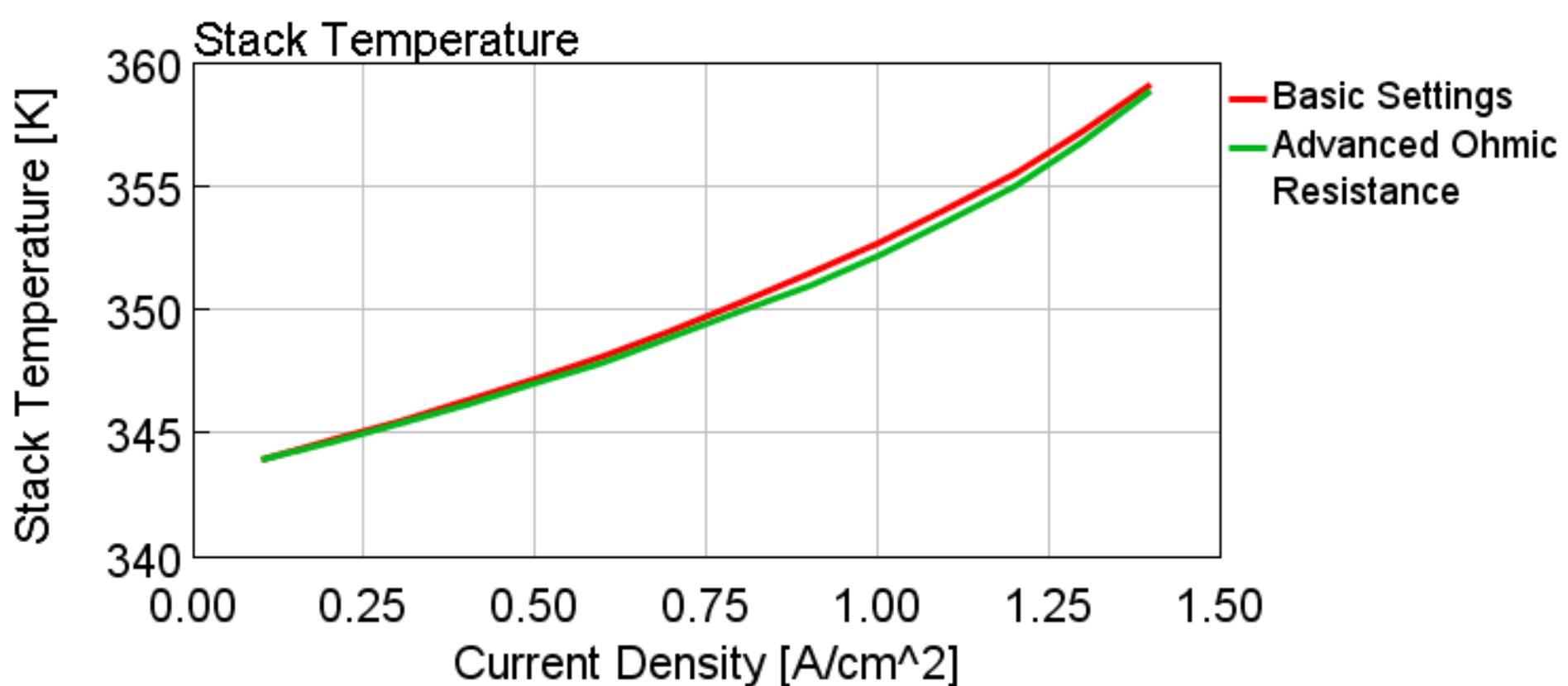
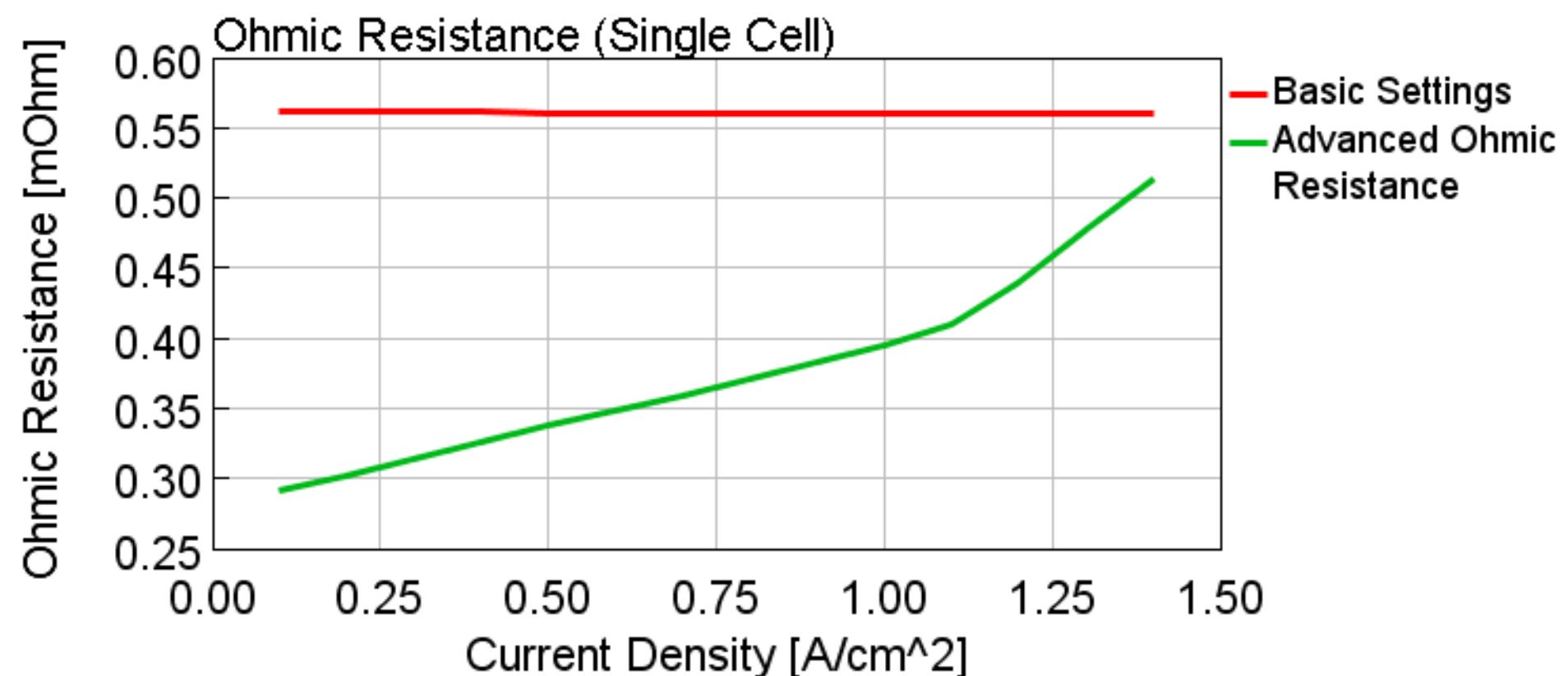
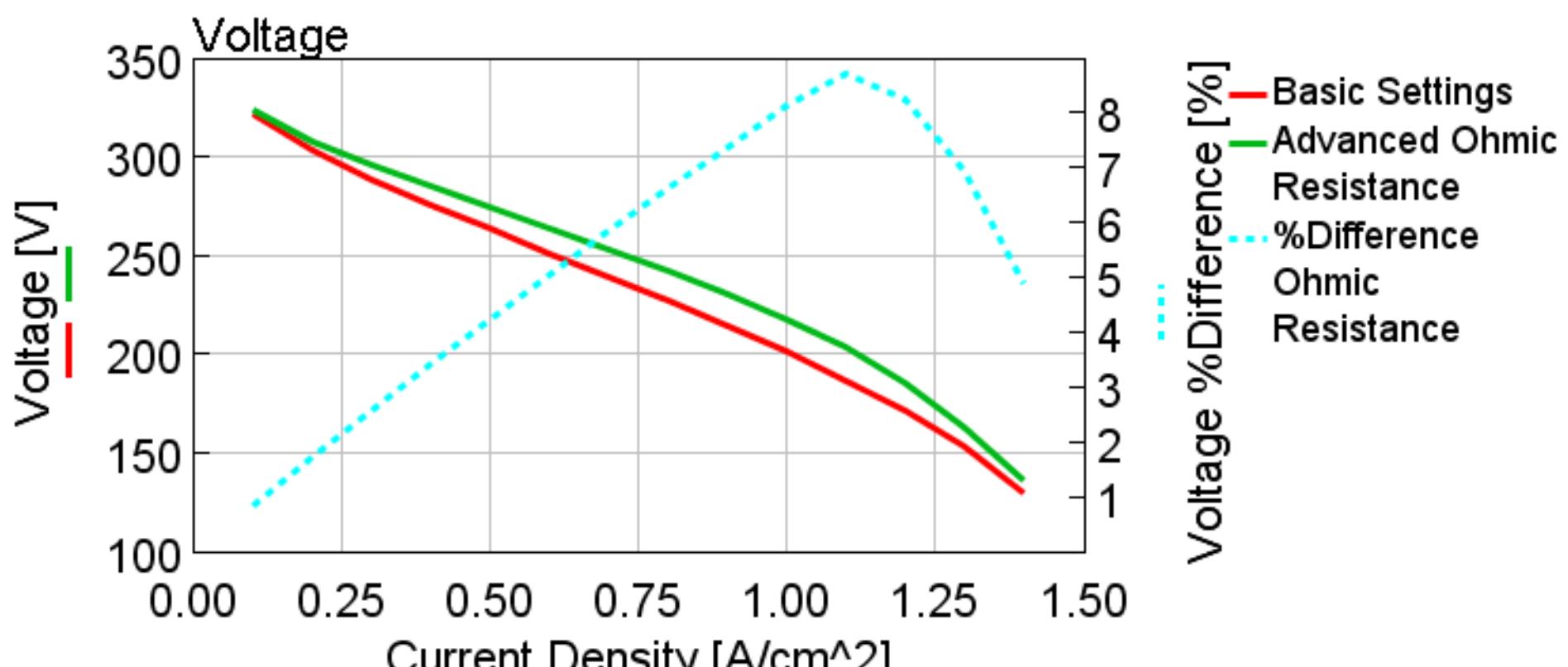


$$\lambda_m = \begin{cases} 0.043 + 17.81a_m - 39.85a_m^2 + 36a_m^3, & 0 \leq a_m \leq 1 \\ \min(16, 14 + 1.4(a_m - 1)), & 1 < a_m \end{cases}$$

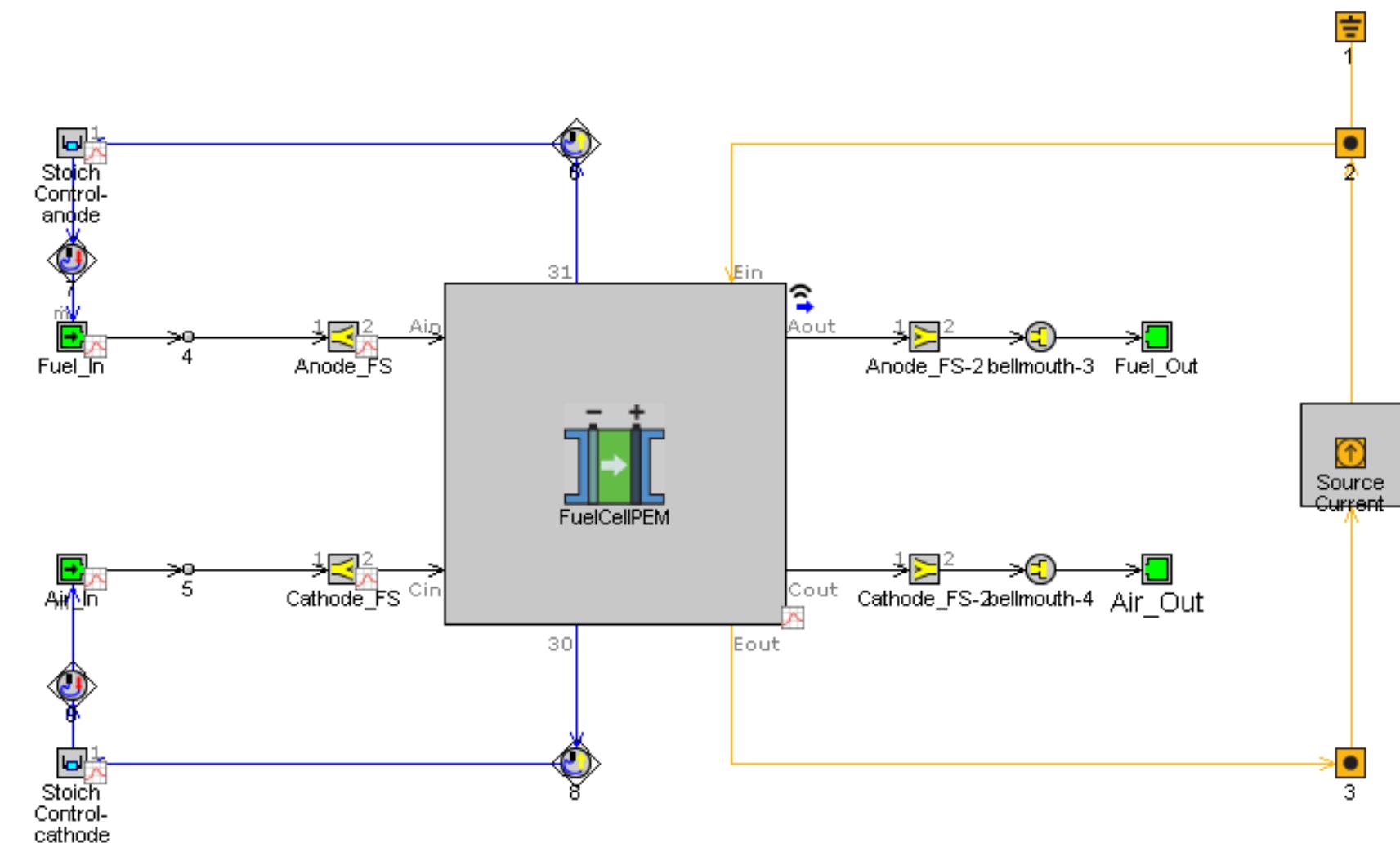
$$a_m = \frac{p_{H_2O}}{p_{sat}}$$

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.

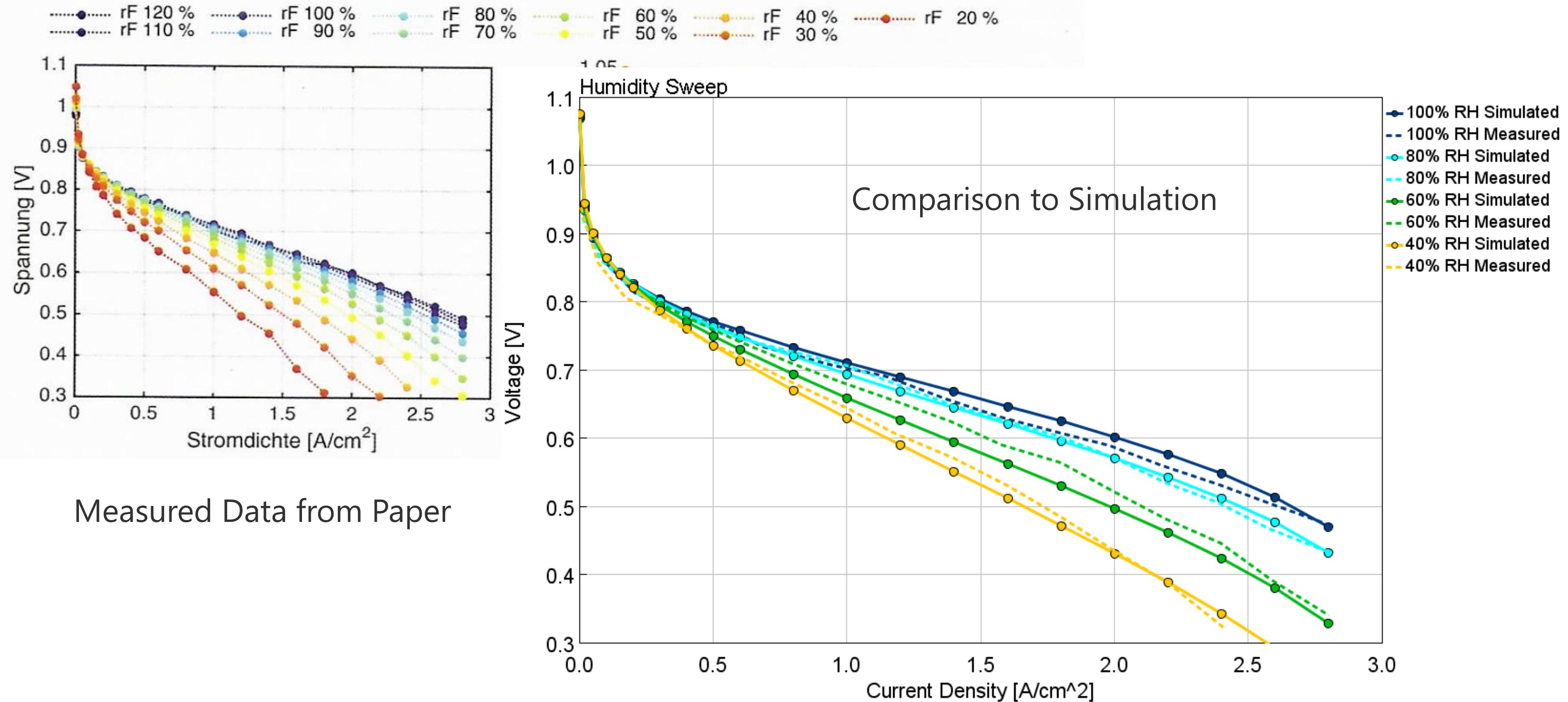
# 先进的欧姆电阻模型



- 扫掠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  $\sim 1.3$  bar，与入口流量相关

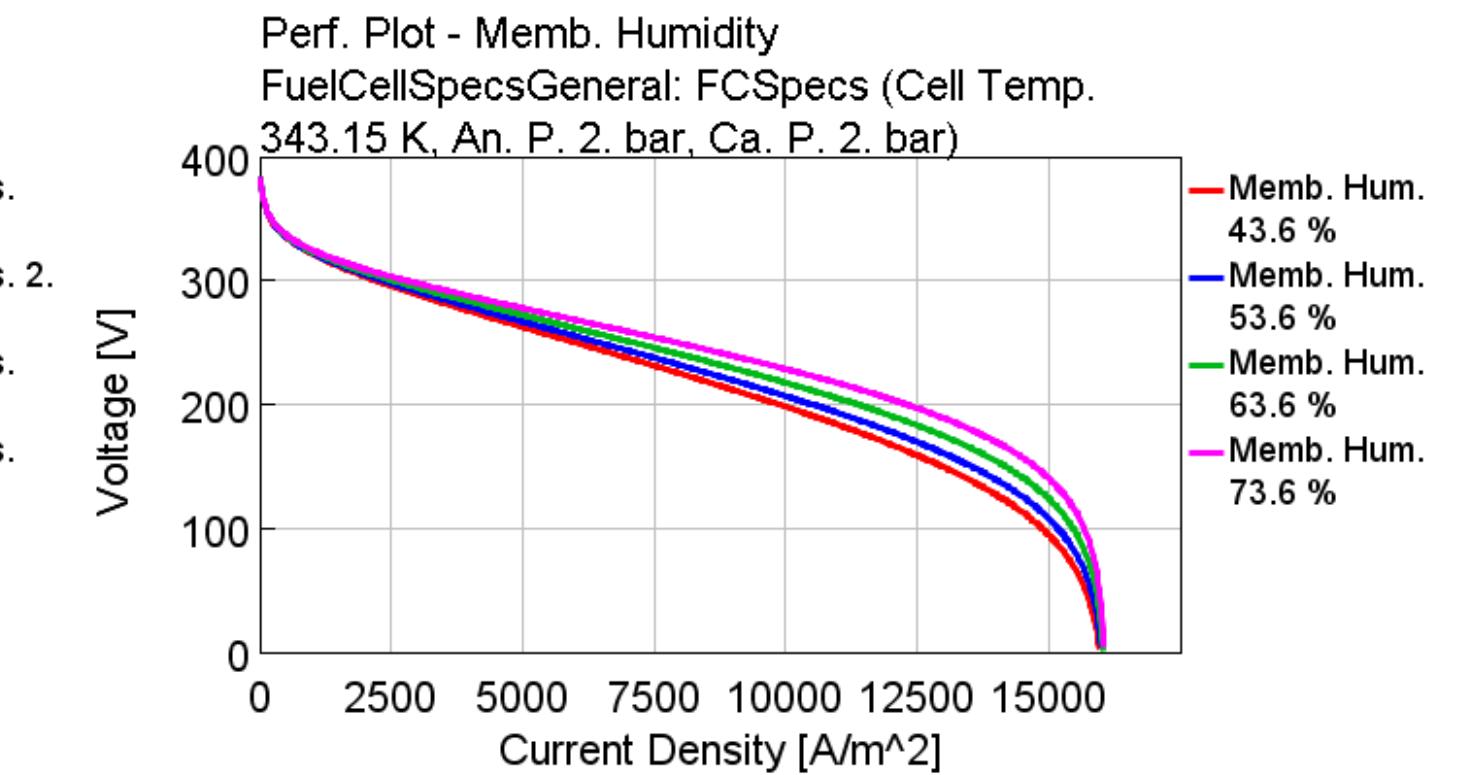
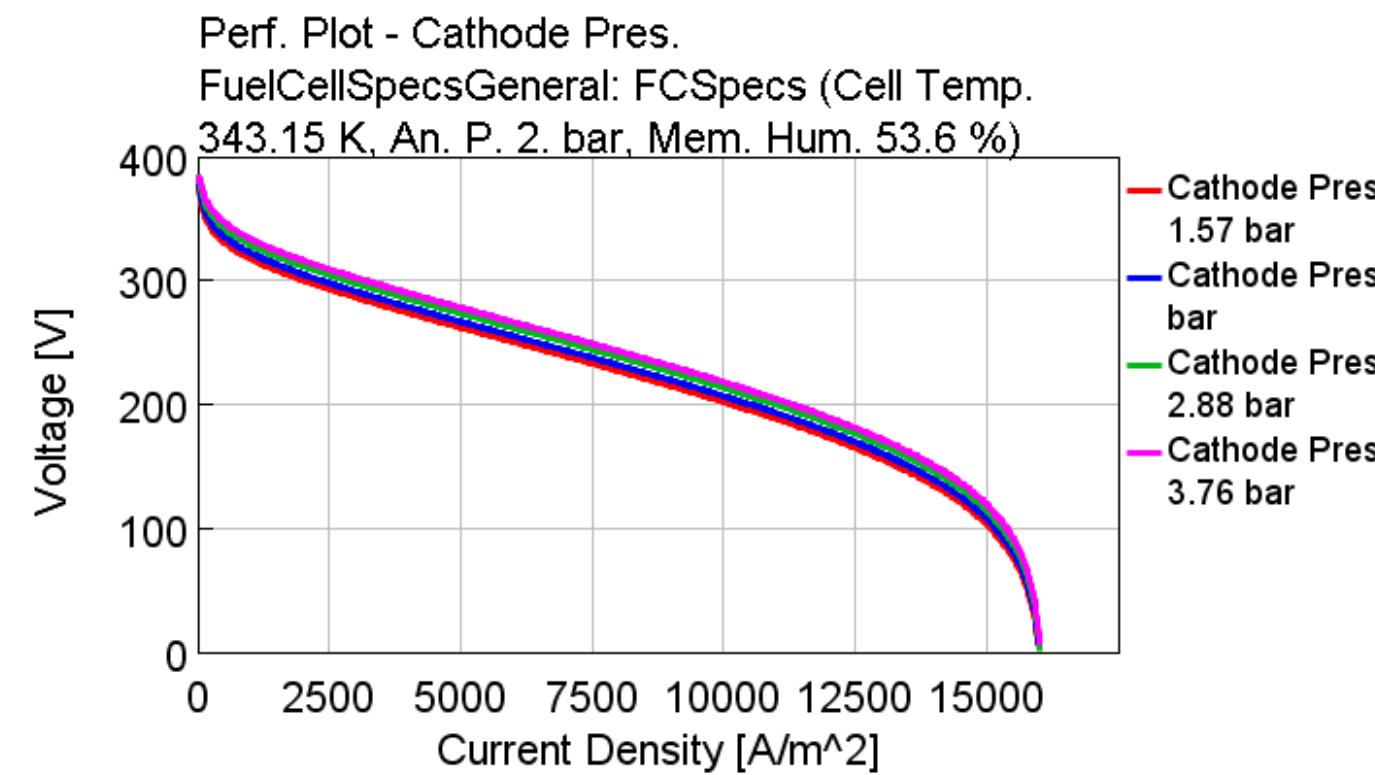
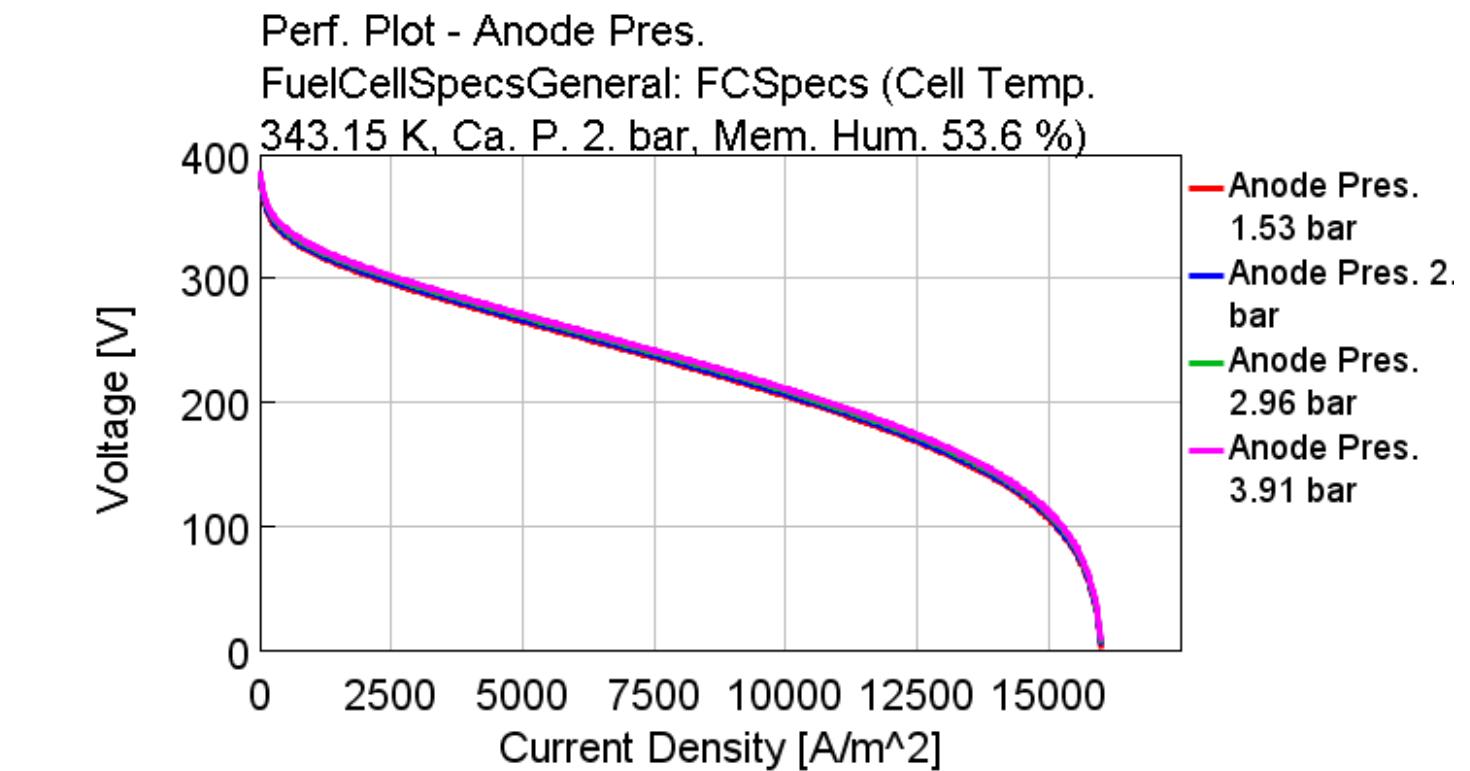
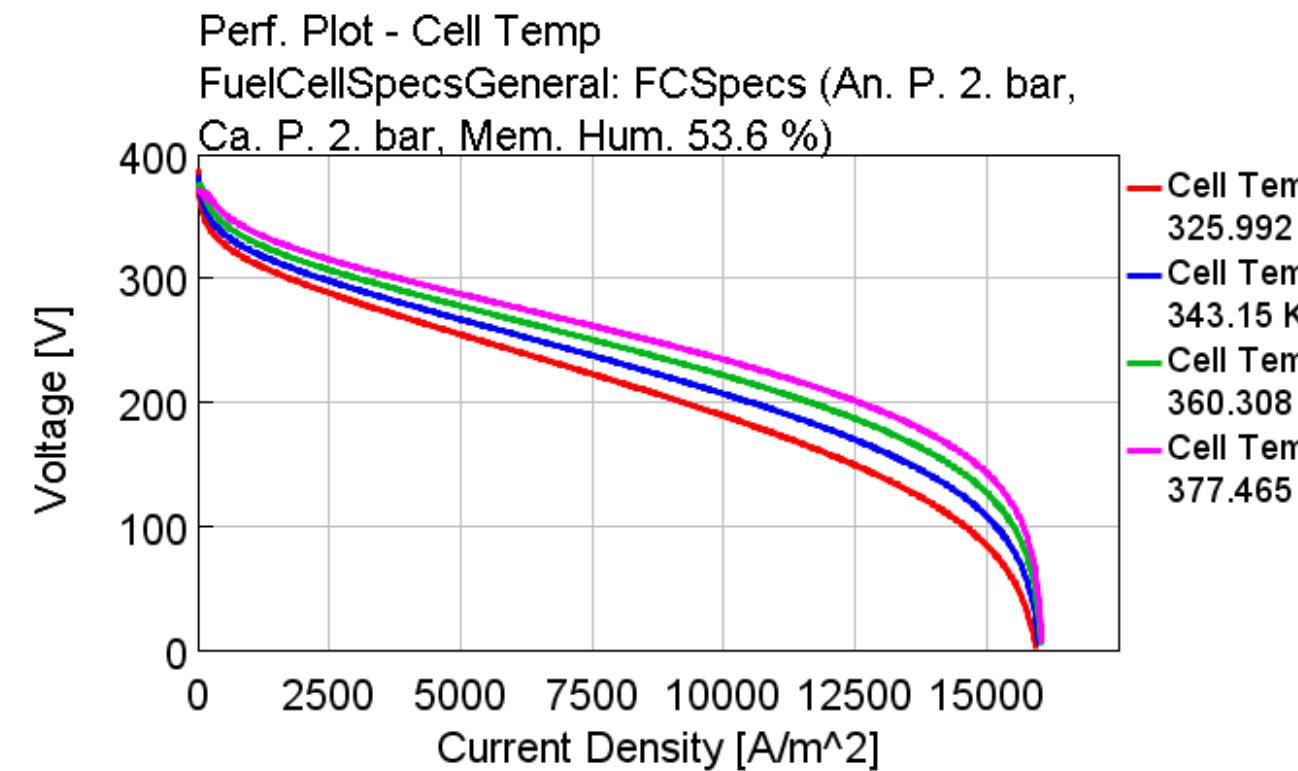


# Case Study - 相对湿度遍历



# 预处理性能曲线

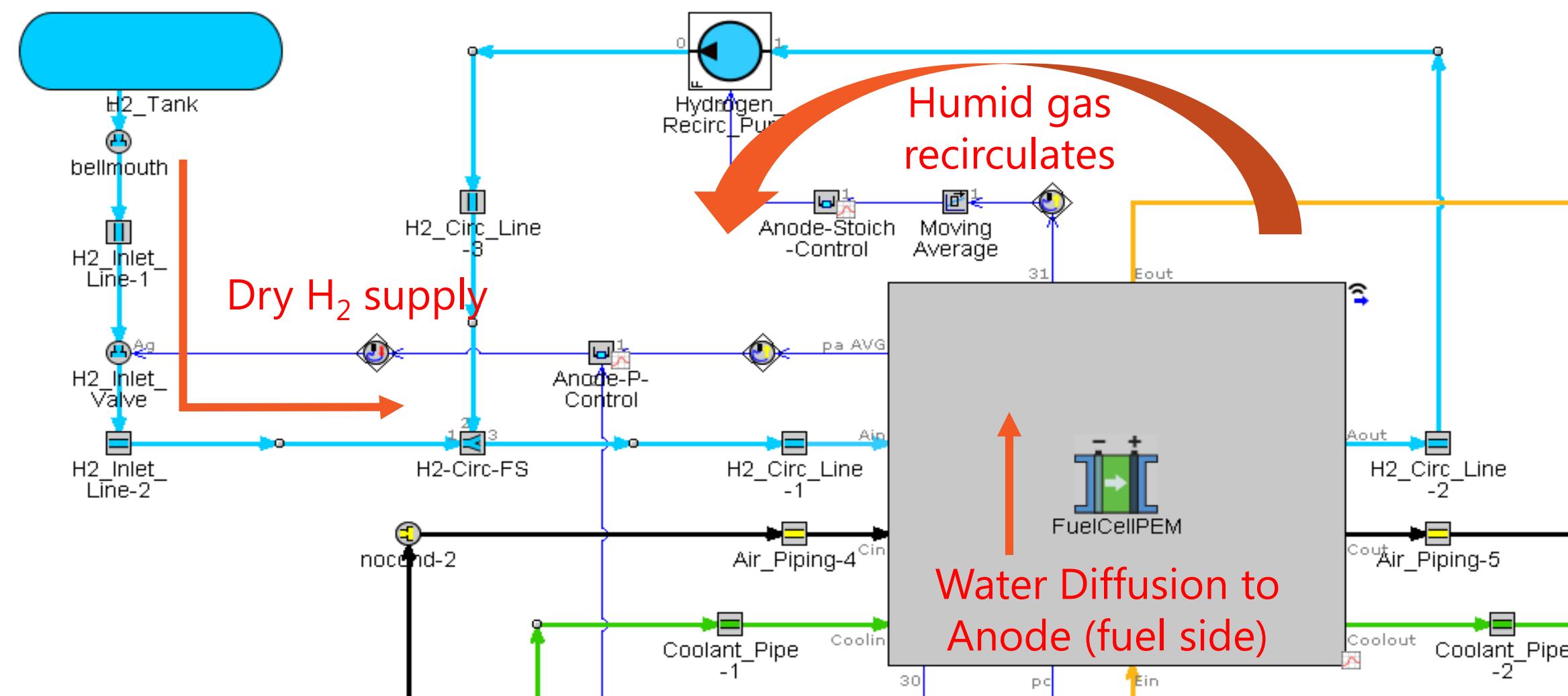
## ■ 遍历分析各种主要影响因素对极化曲线的影响



# 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



# 水渗透

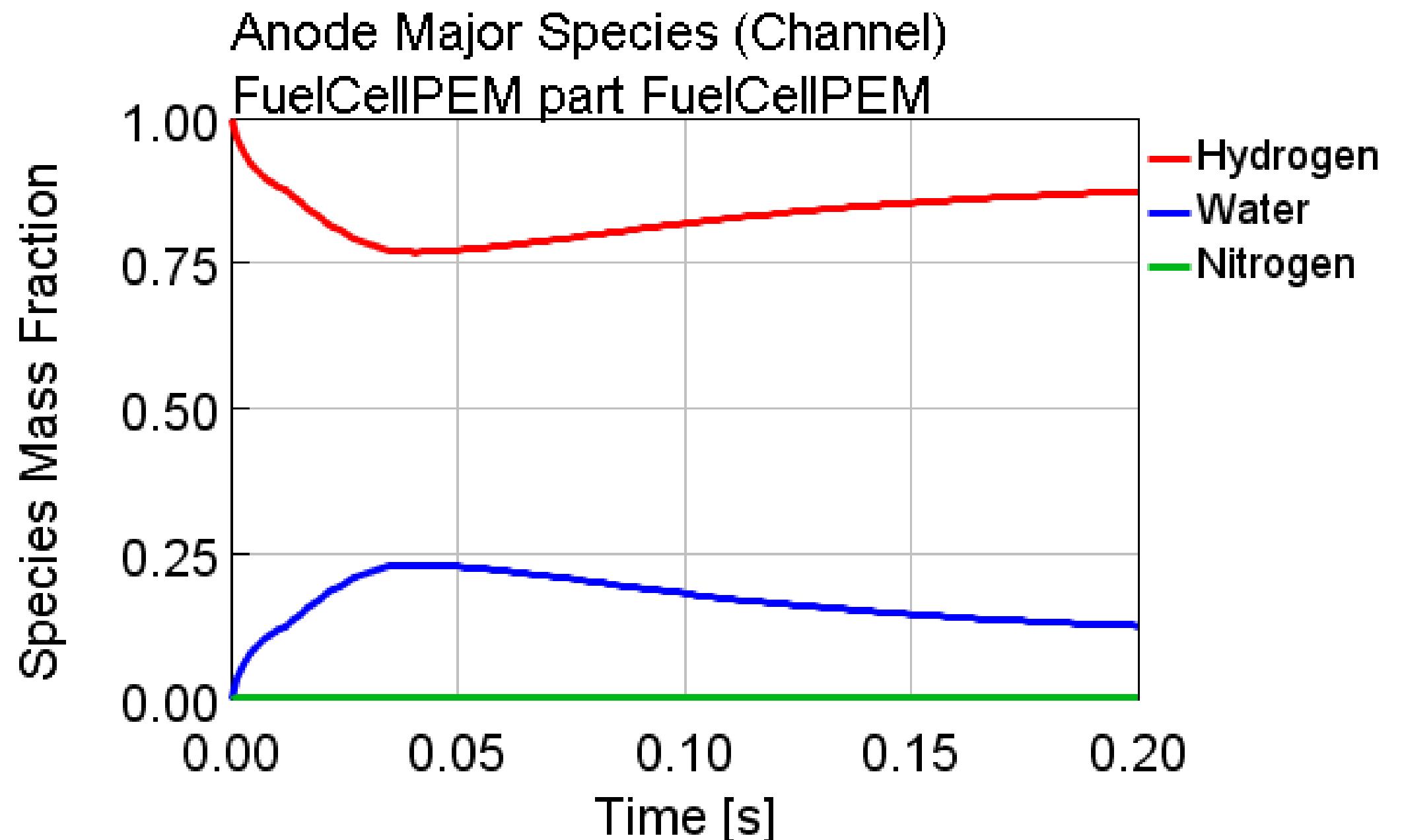
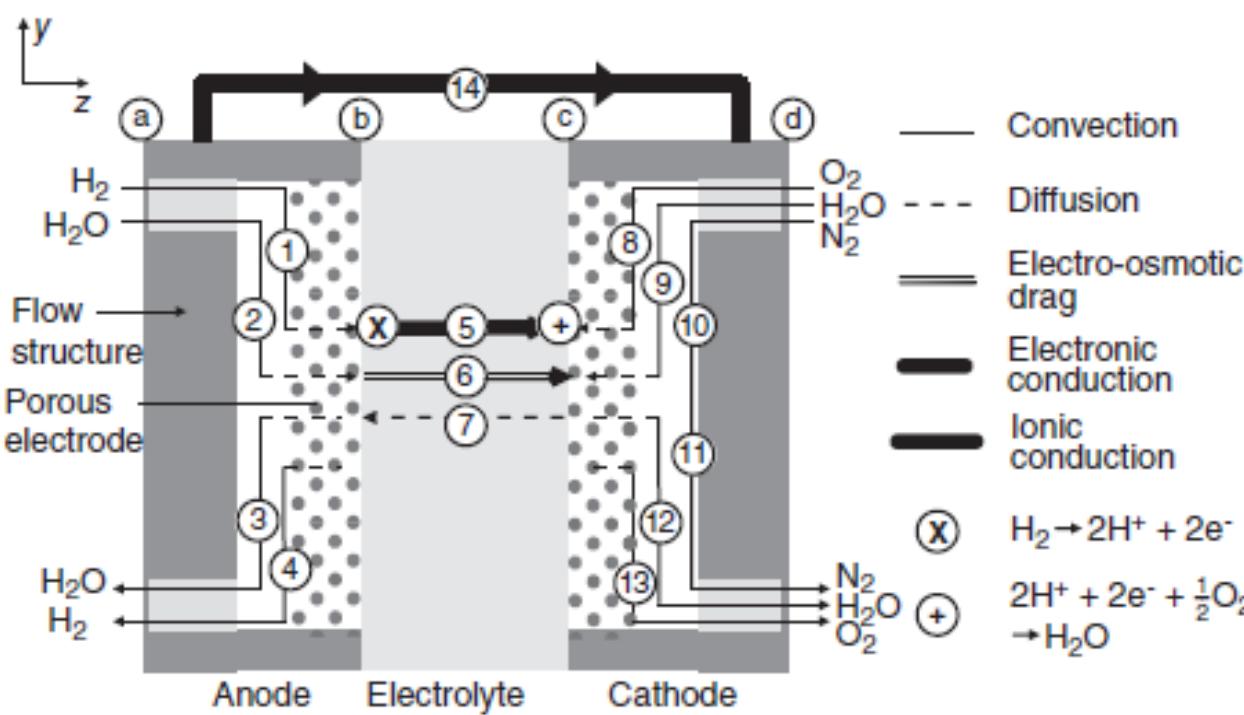
$$N_w = N_{w,electro-osmotic} - N_{w,diffusion}$$

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

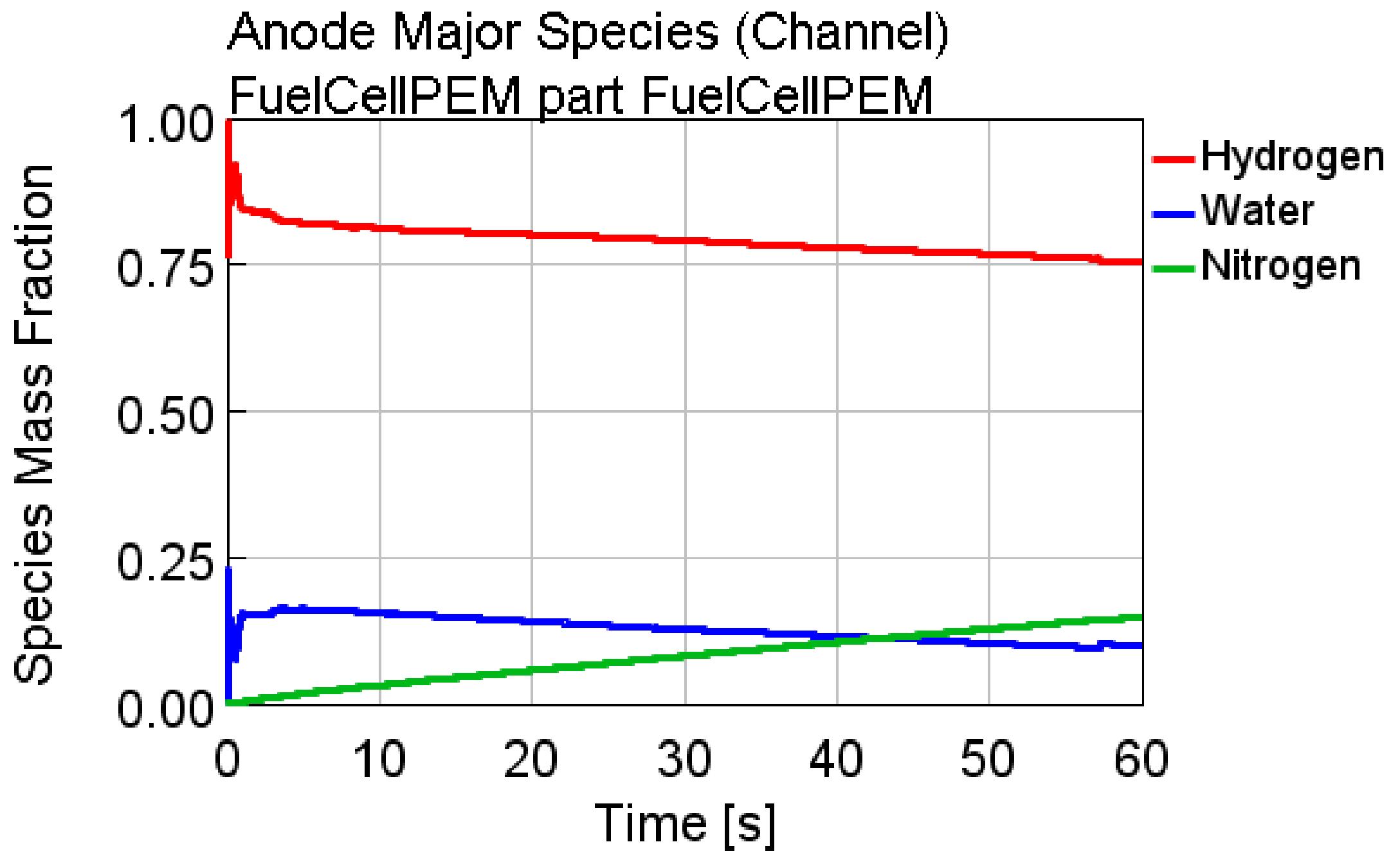
$$n_{sat} = 0.0029\lambda_m^2 + 0.05\lambda_m$$

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

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



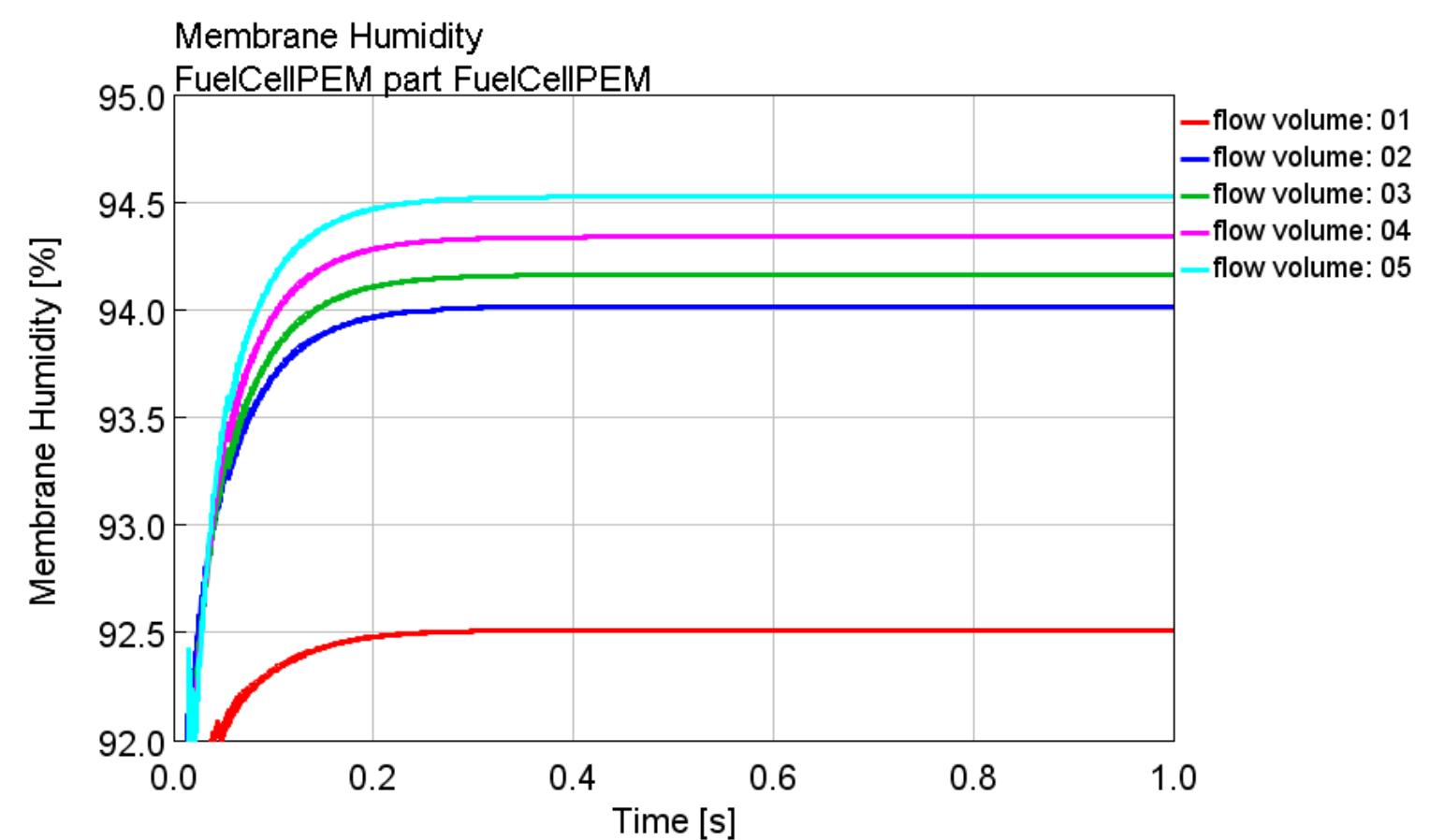
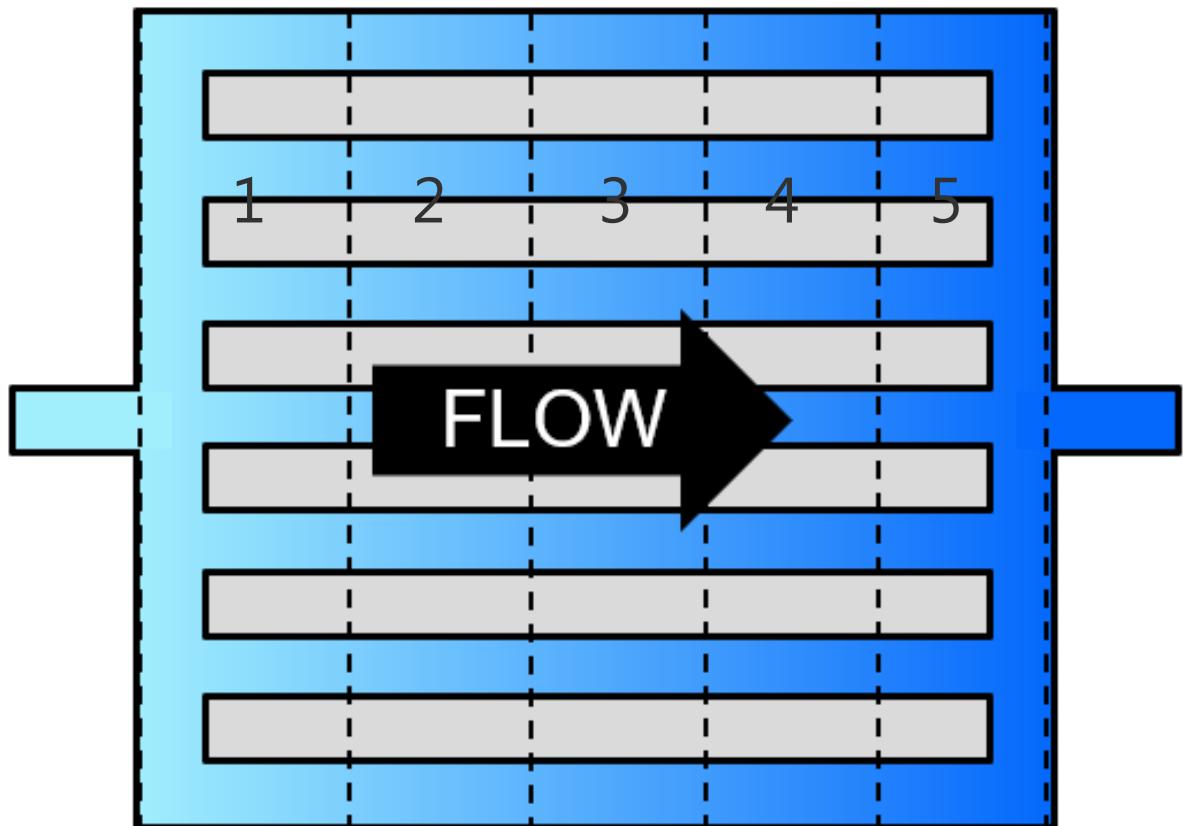
- 跨膜扩散
- 增加阳极中惰性气体的量，降低电压
- 随着时间的推移，氢气再循环回路会累积氮气并影响设备的性能
- 系统应定期清洗
- 启用特定标记



# 目录

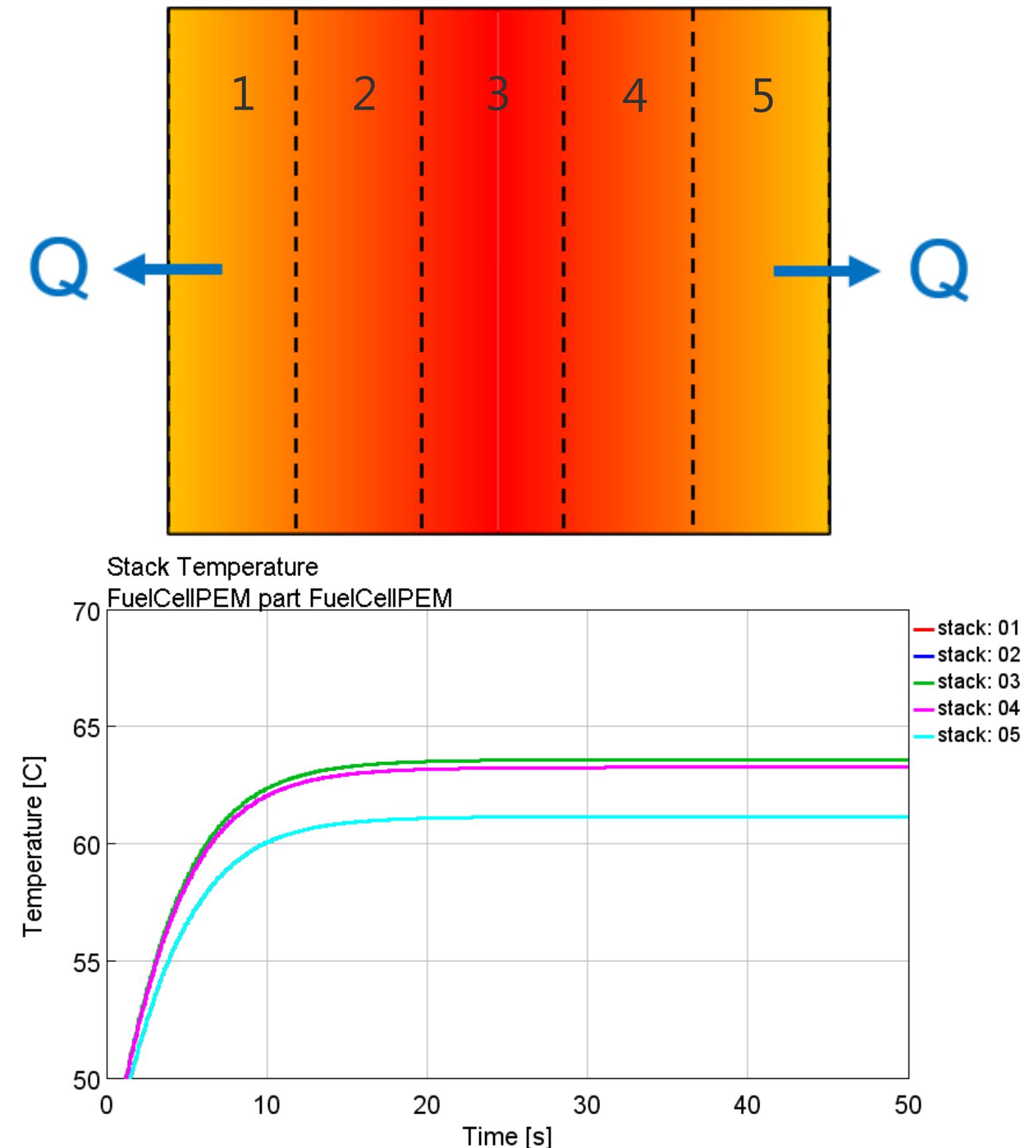
1. 简介
2. 燃料电池简介
3. v2019功能回顾
4. 极化预测模拟
5. 组份渗透
6. 离散
7. 热管理
8. 系统平衡
9. 整车模拟

- 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



# 离散处理

- 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

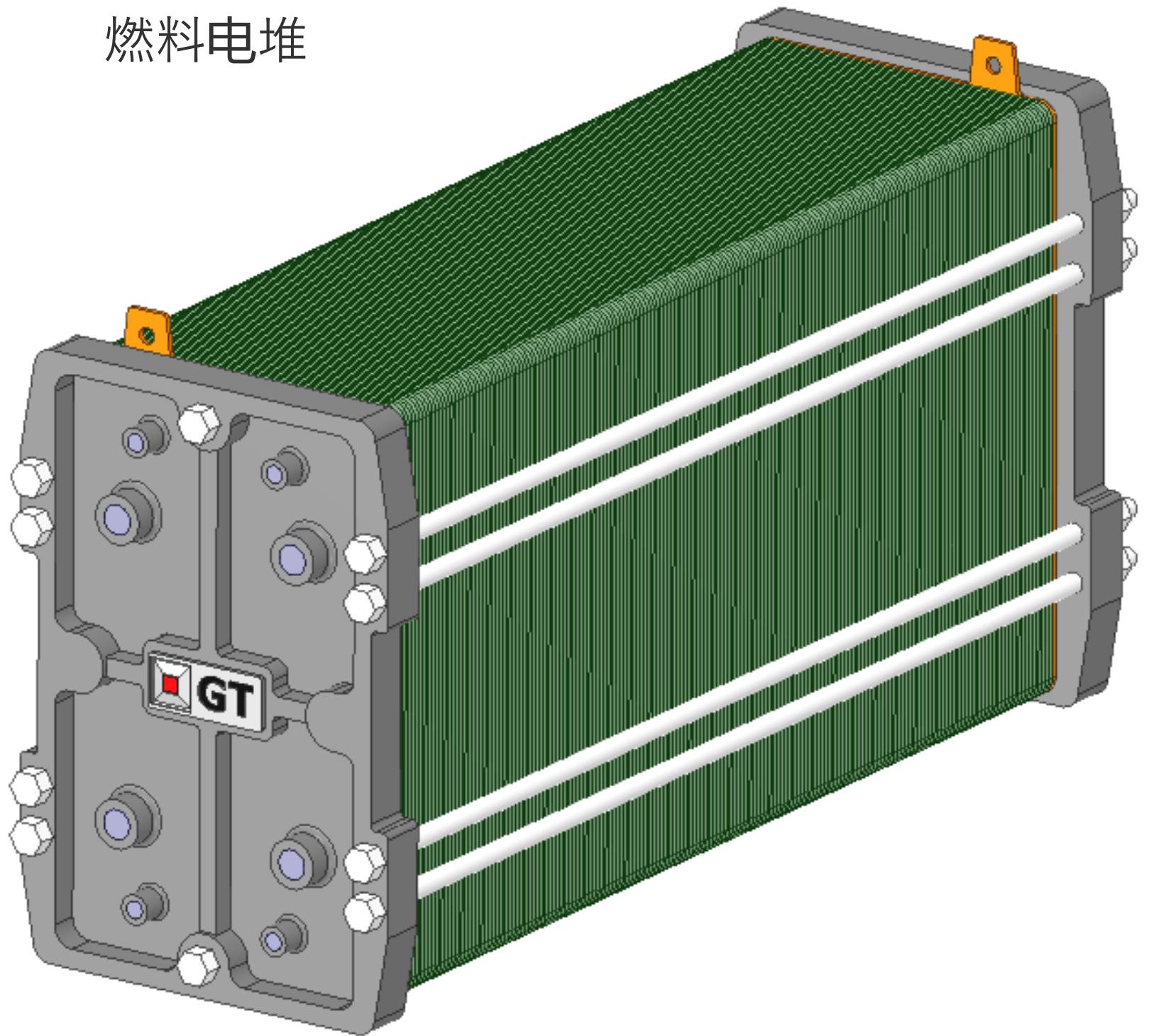


# 目录

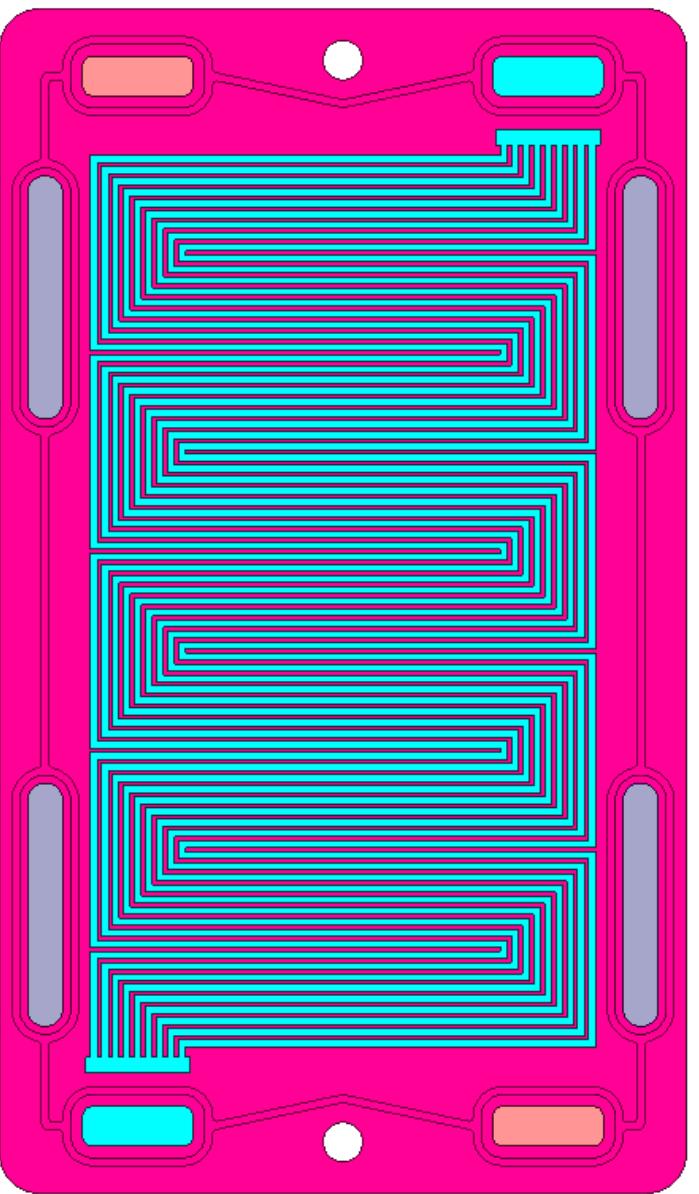
1. 简介
2. 燃料电池简介
3. v2019功能回顾
4. 极化预测模拟
5. 组份渗透
6. 离散
7. 热管理
8. 系统平衡
9. 整车模拟

# 在GT-SPACECLAIM中的3D模型

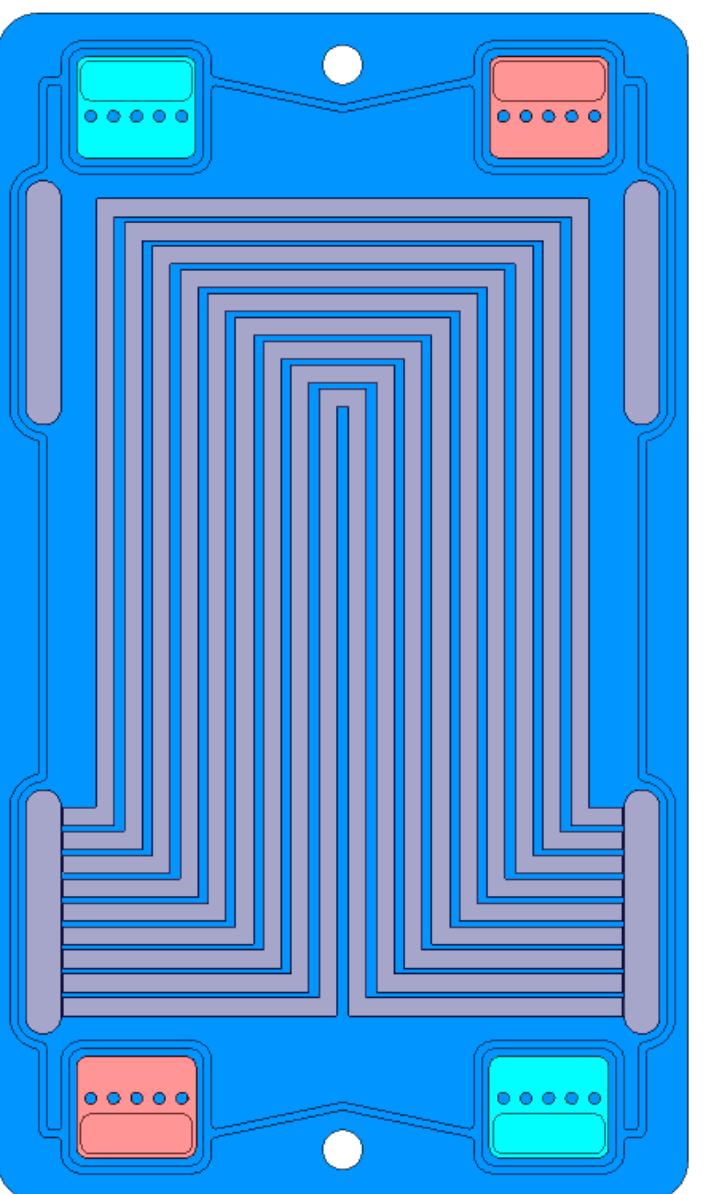
燃料电堆



双极板中的流体通道



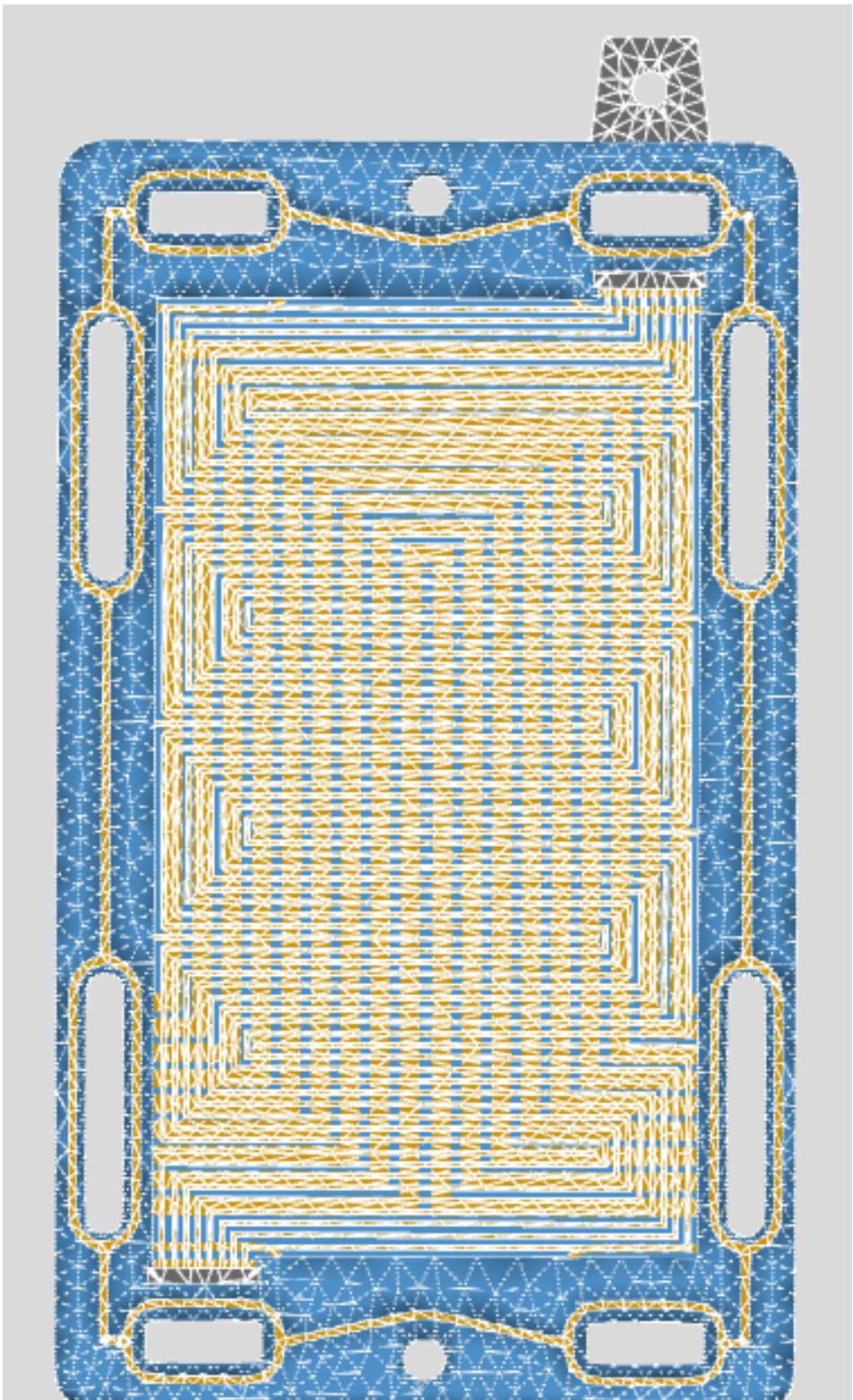
双极板中的冷却通道



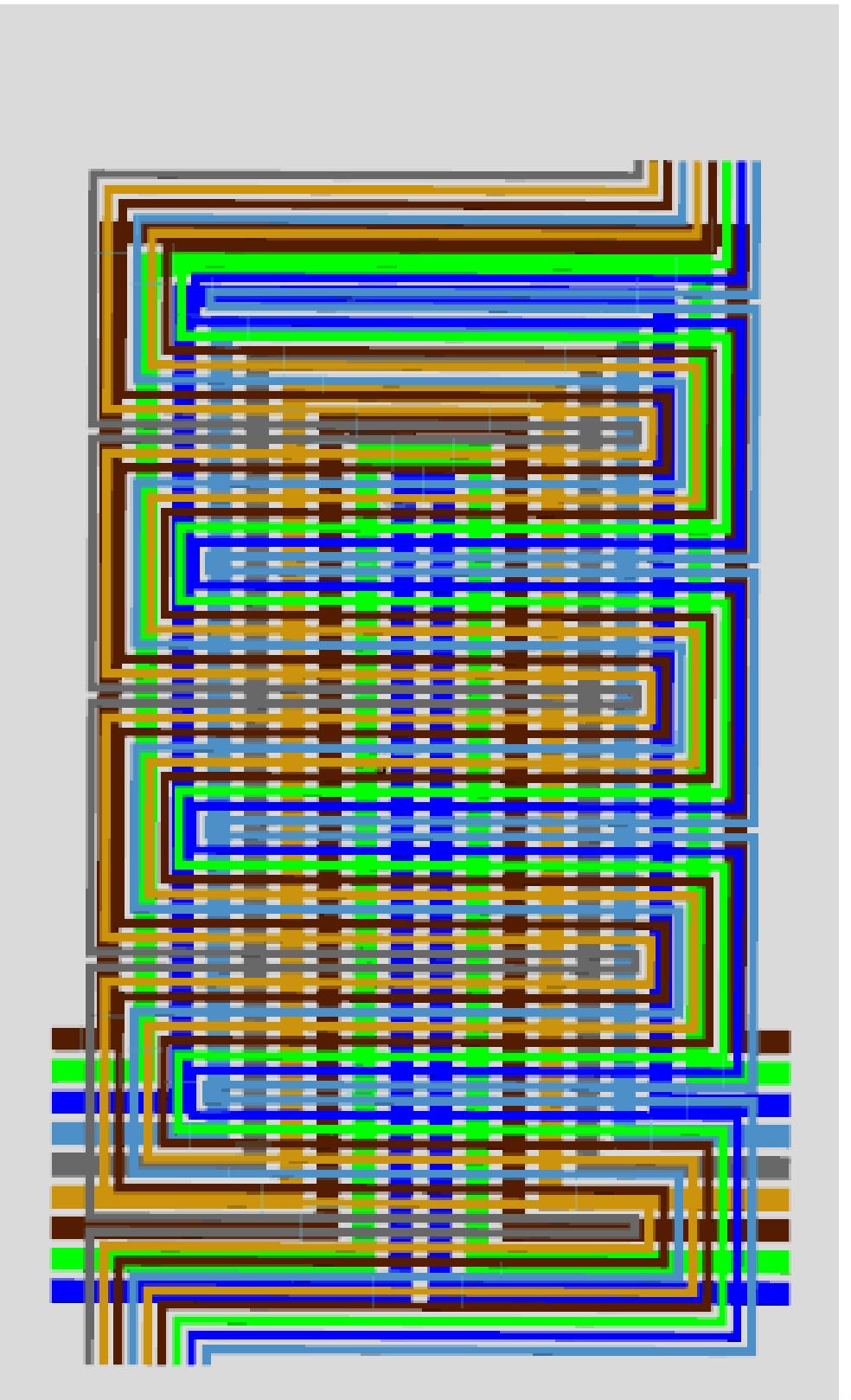
# GEM3D中离散

- 直接从CAD创建有限元热模型
- 离散流体通道为GEMSolidFlowVol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

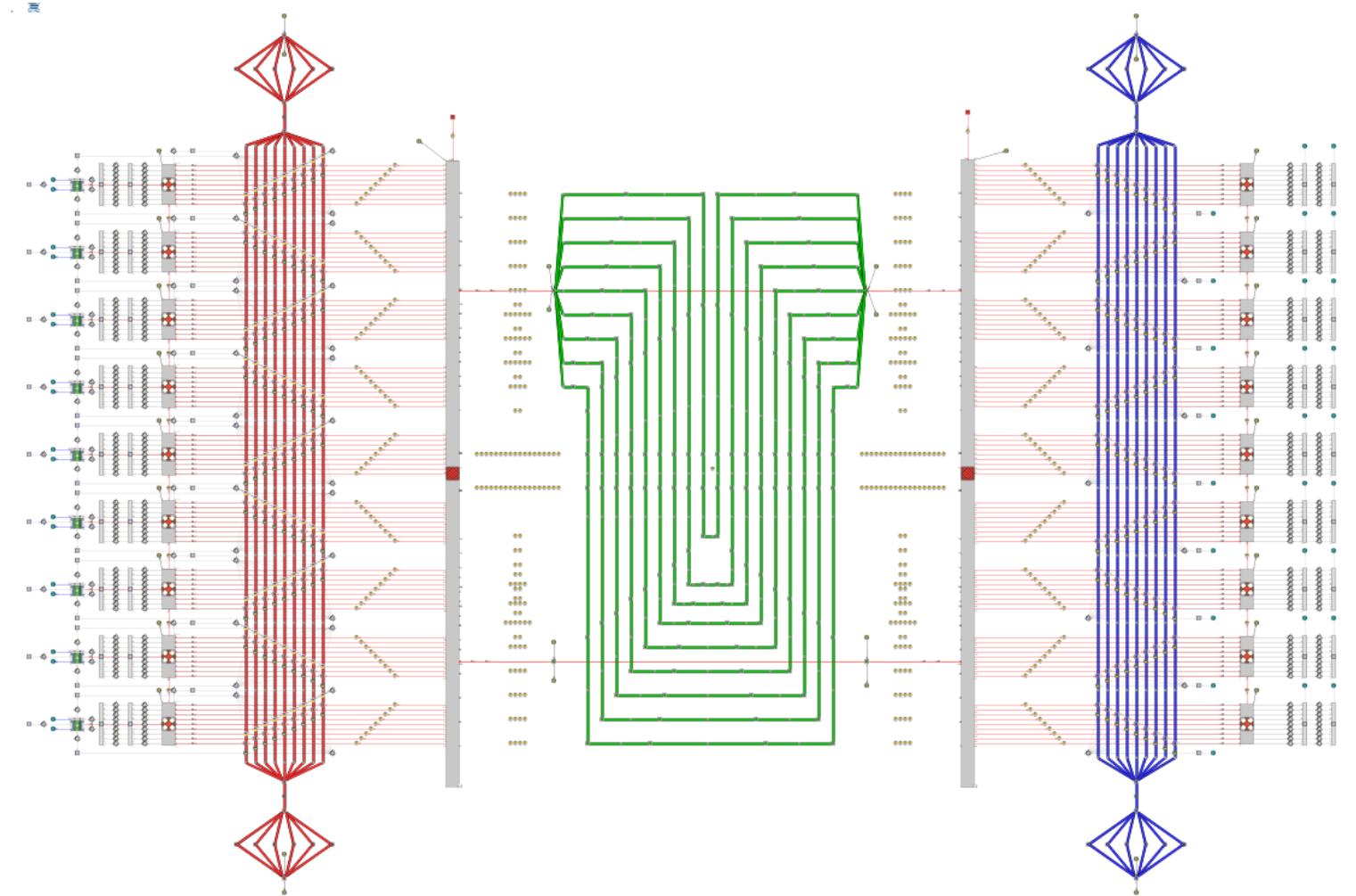
FE 热网格



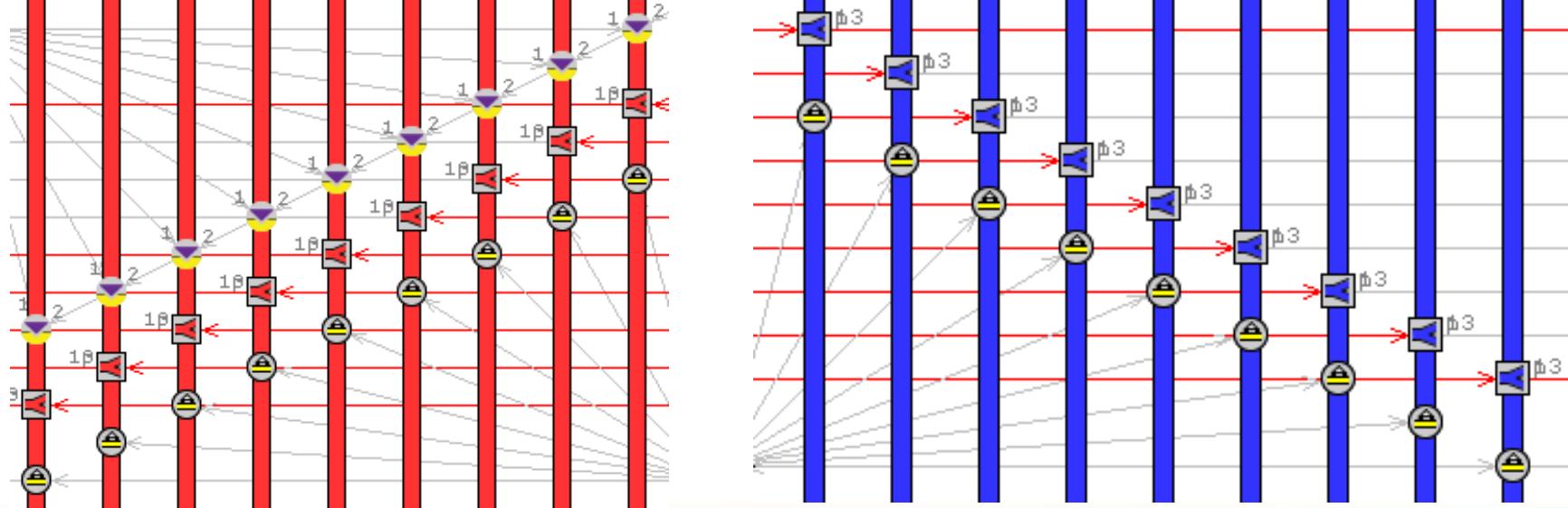
流体通道



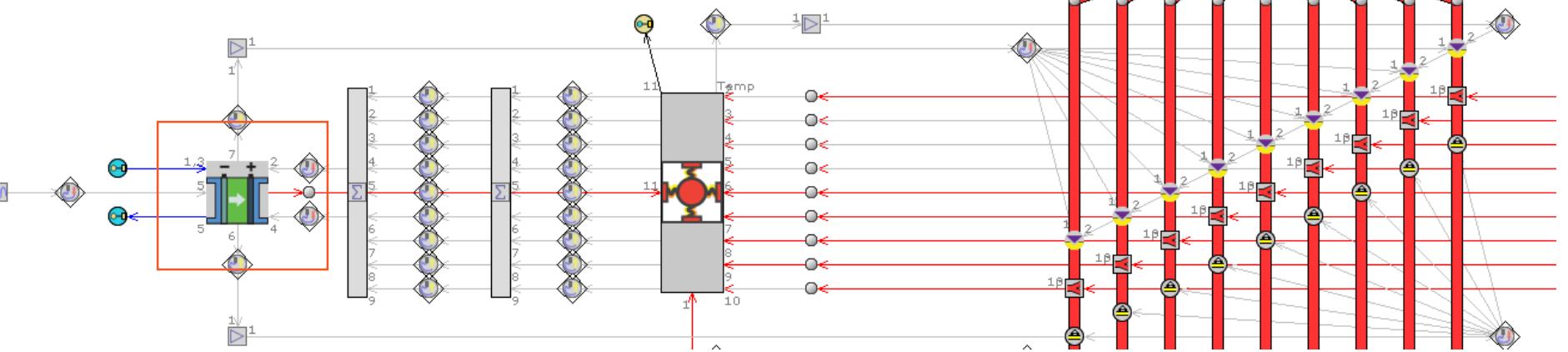
# 从GEM中生成燃料电池的部件



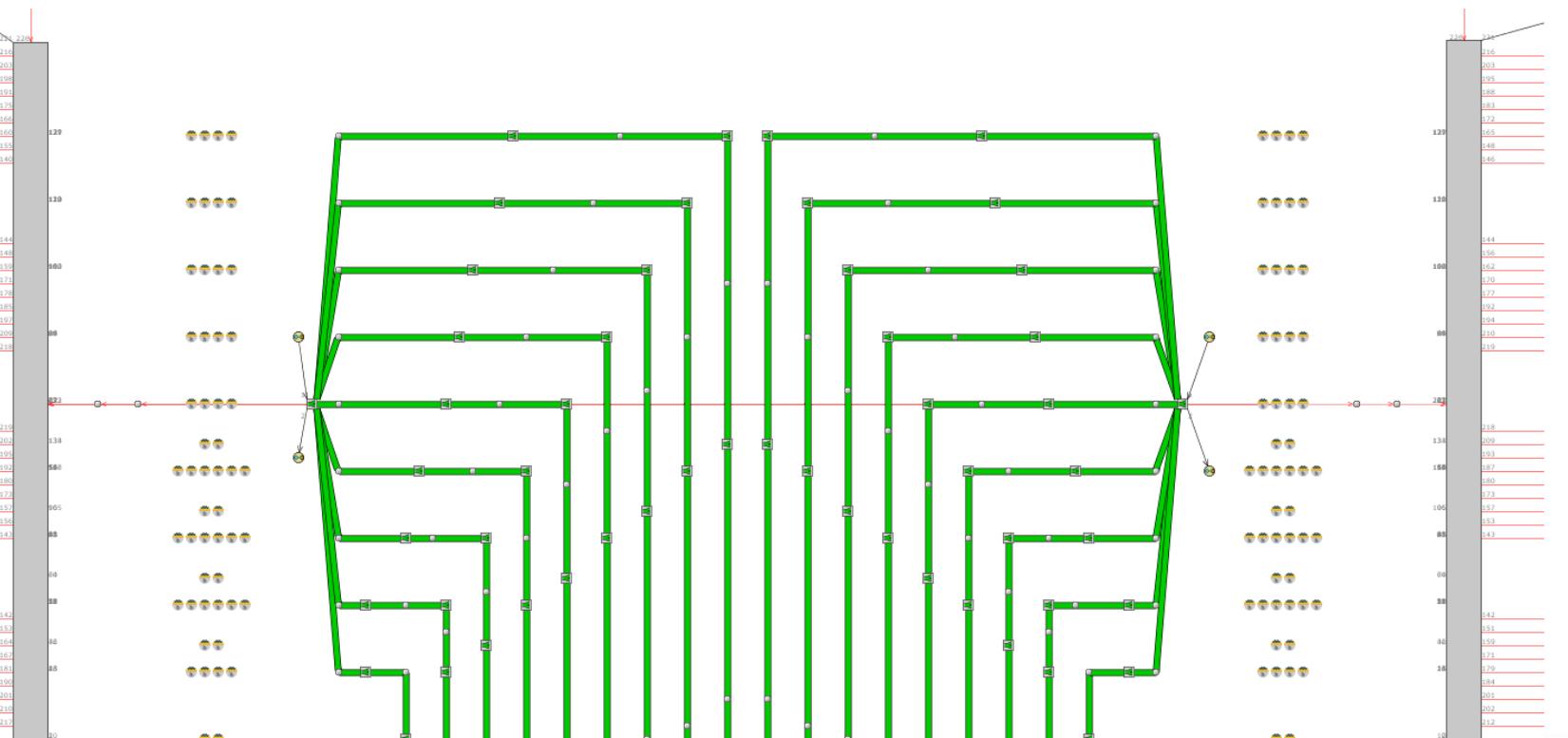
基于化学反应进行组份的处理



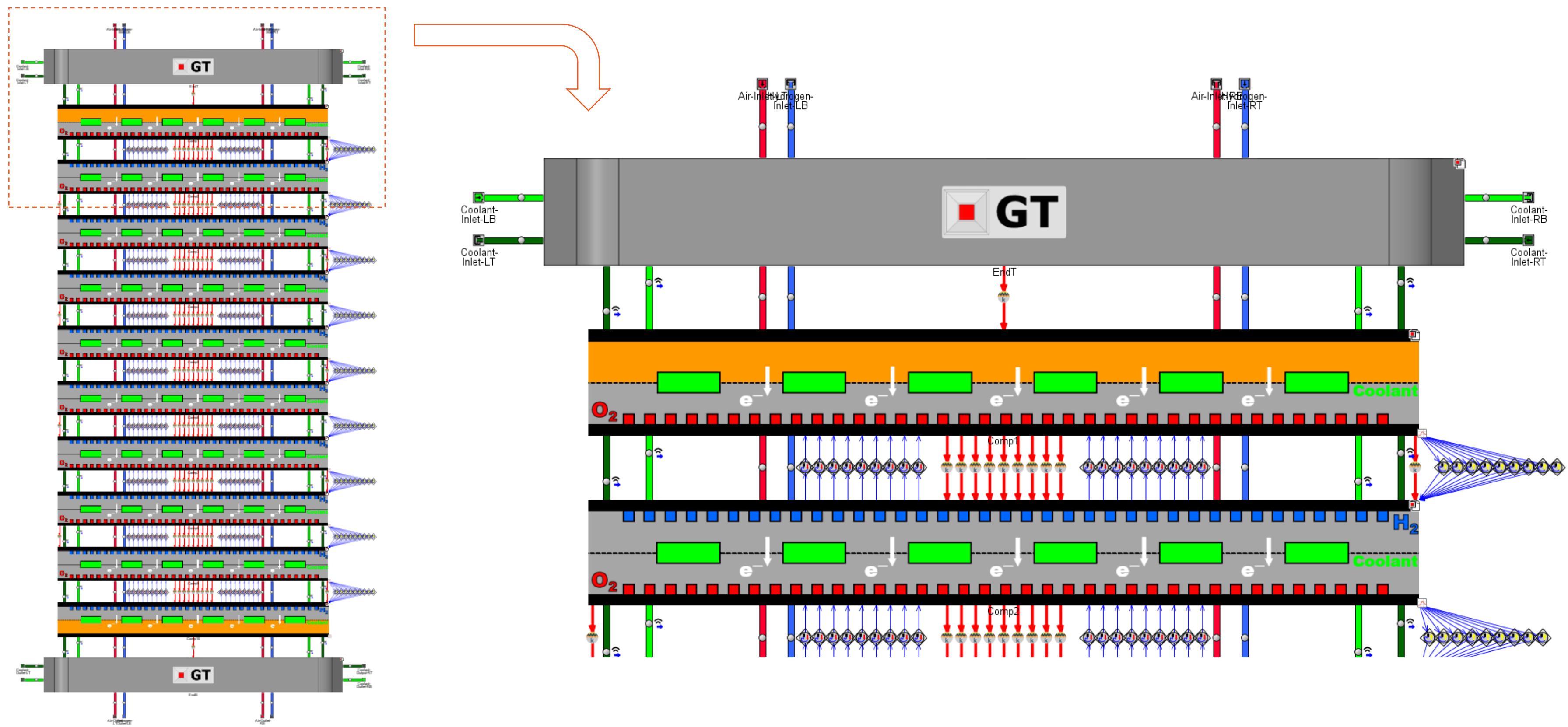
FuelCellPEMSystem 模板考虑流体和热质量的相互反  
应去预测反应过程



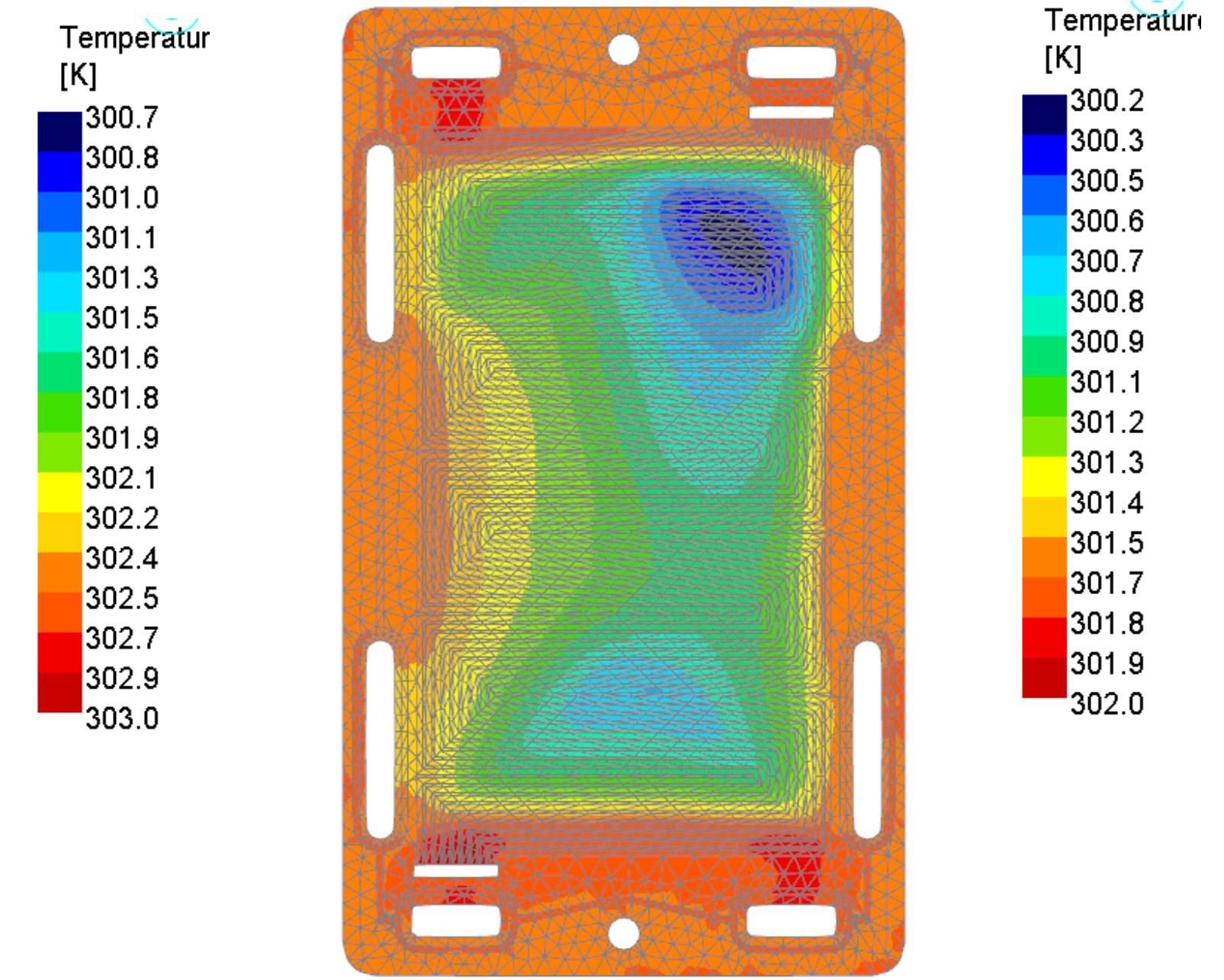
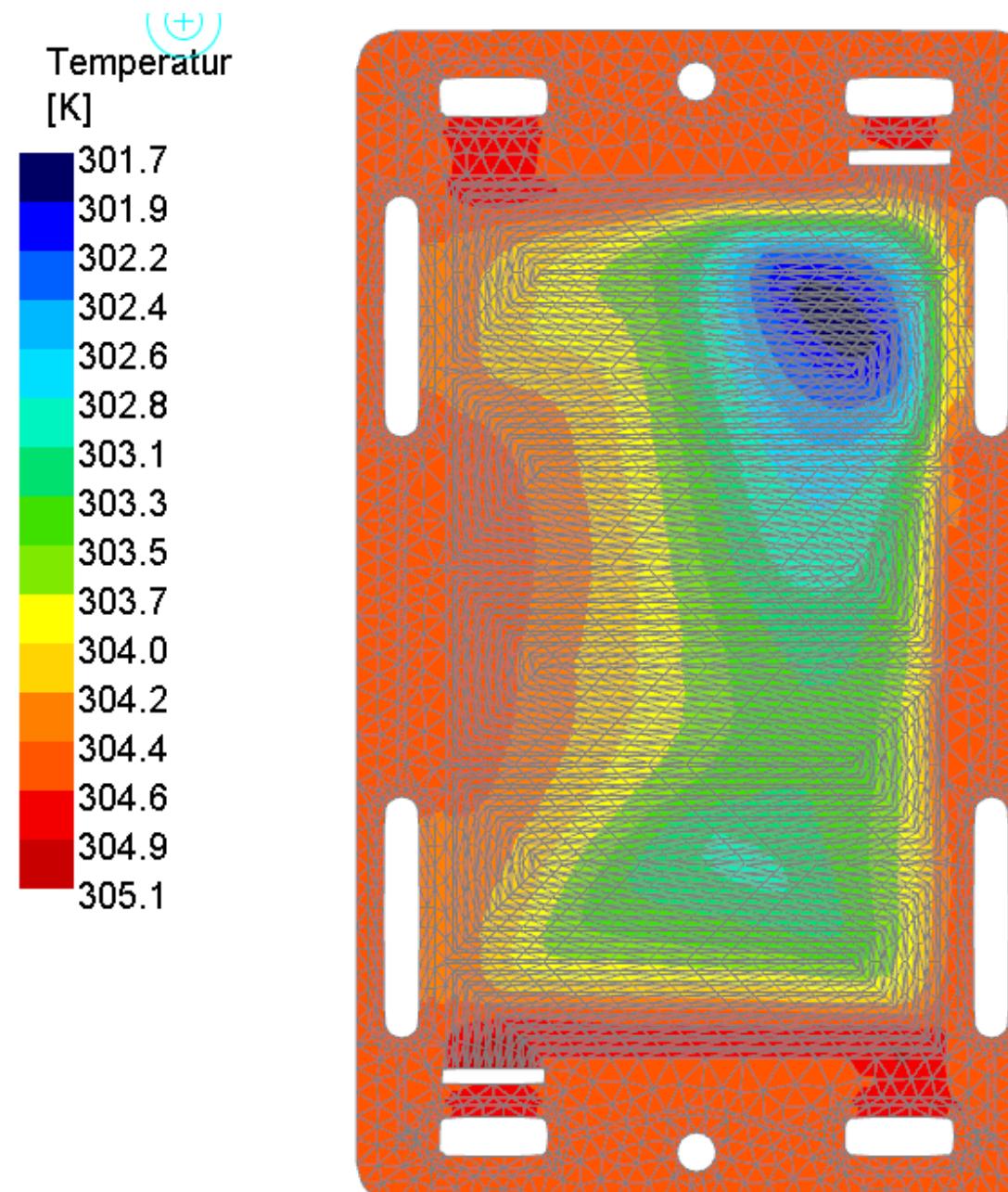
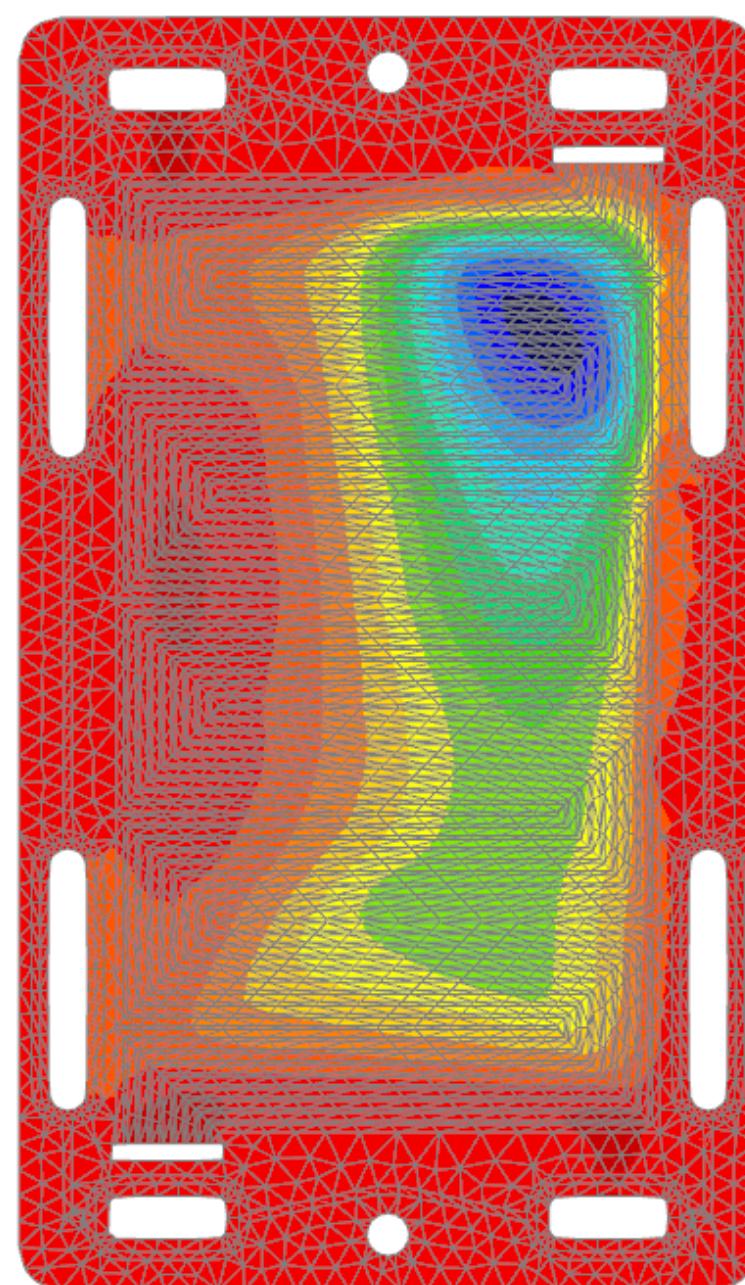
双极板的质量与流体之间传热



# GT-ISE 中的主模型



# 计算结果



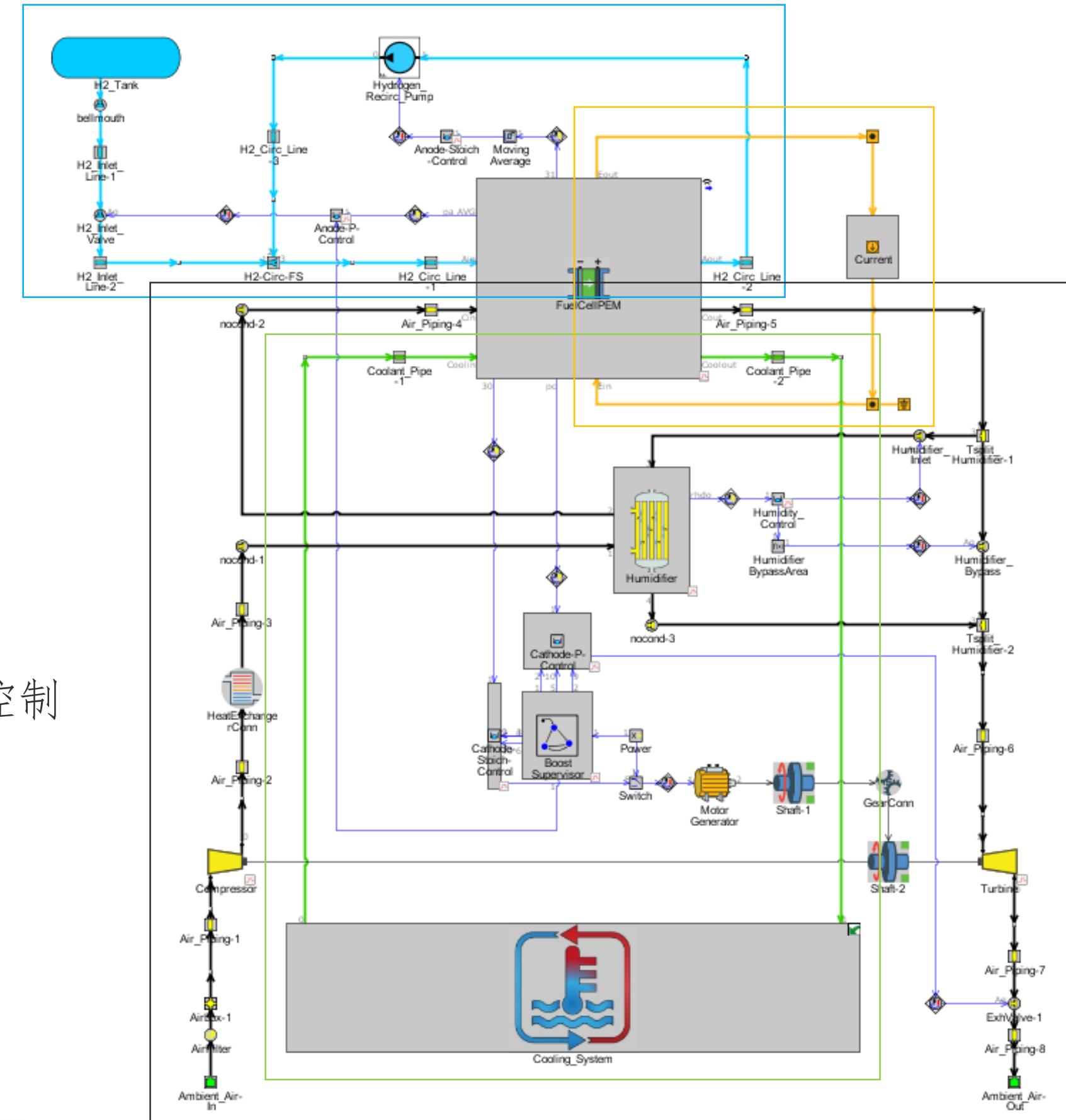
Mass Flow Rate : 2.5, 5, 10 g/s per Cooling Plate

# 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



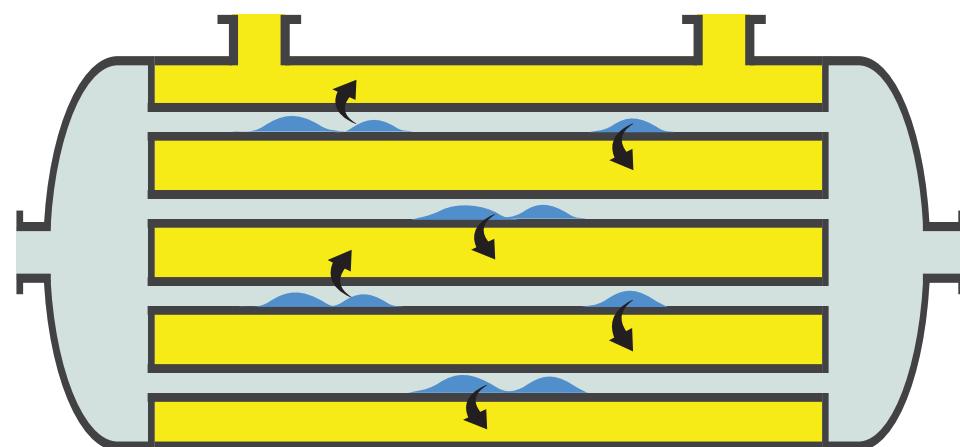
电的回路

冷却系统

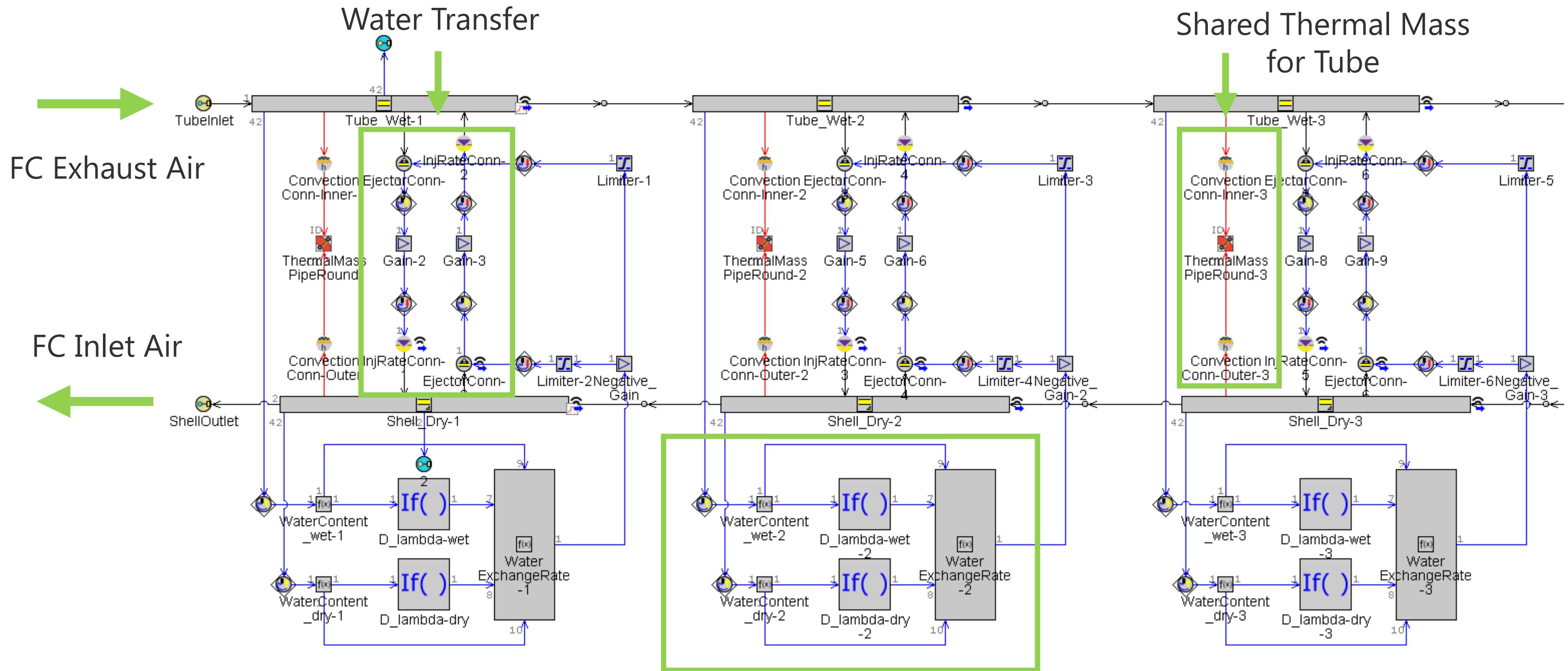
空气压缩和湿度控制

# 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



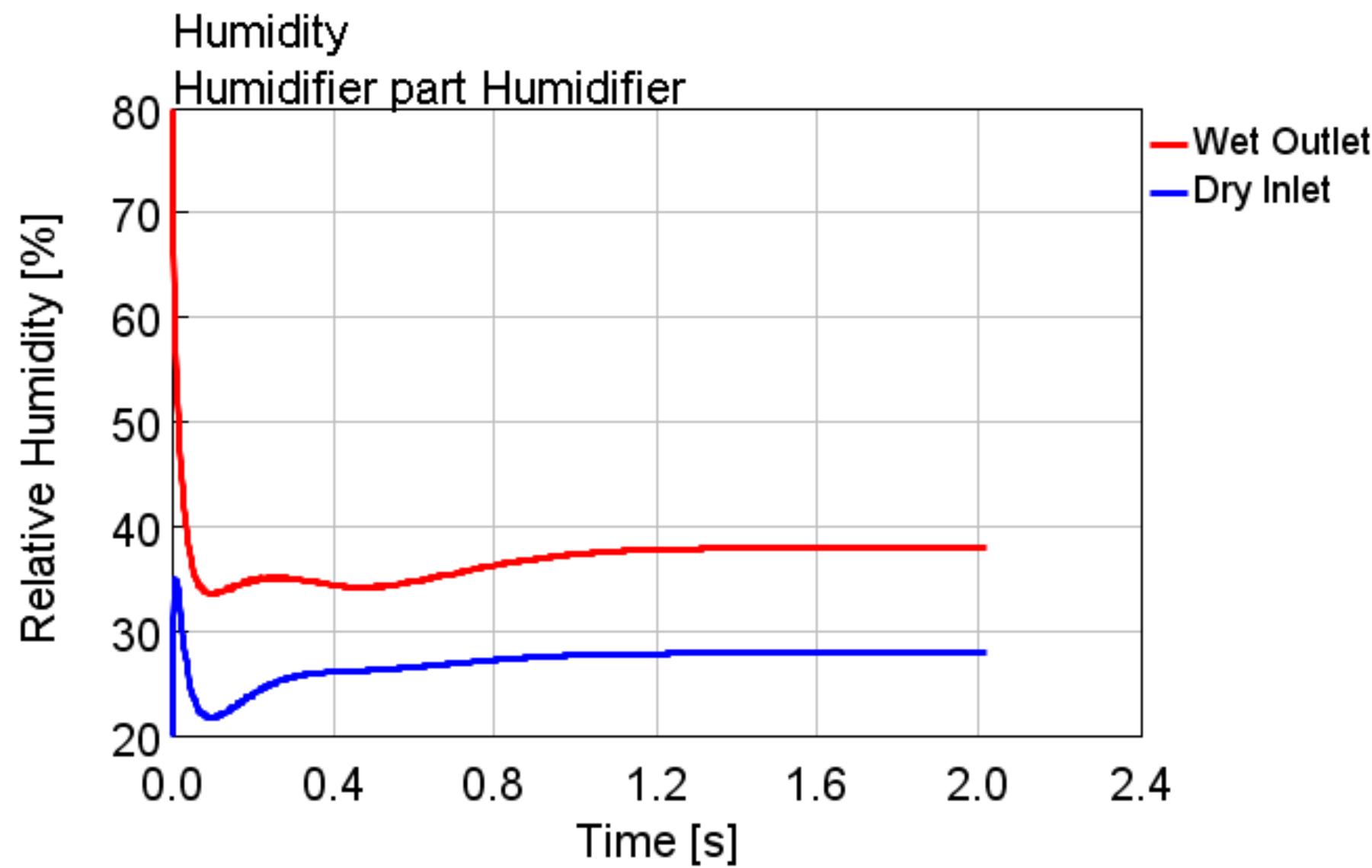
Main	GT-POST Output	
Attribute	Unit	Object Value
<b>Geometry</b>		
Inner Diameter of Shell (dry side)	mm	200 <input type="button" value="..."/>
Inner Diameter of Tube (wet side)	mm	1.5 <input type="button" value="..."/>
Tube Membrane Thickness	mm	0.2 <input type="button" value="..."/>
Number of Tubes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



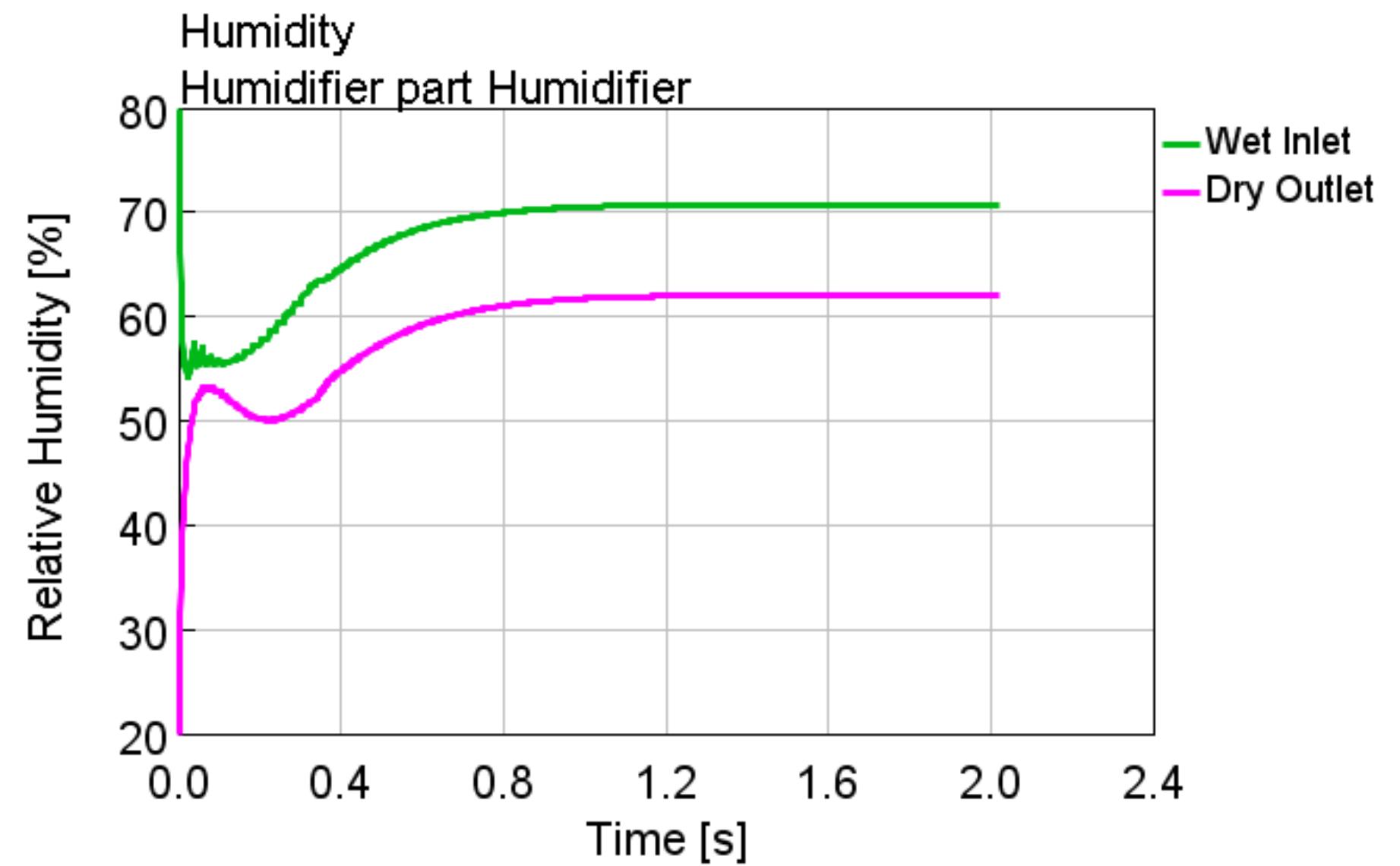
Diffusion calculation  
based on water content

# 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

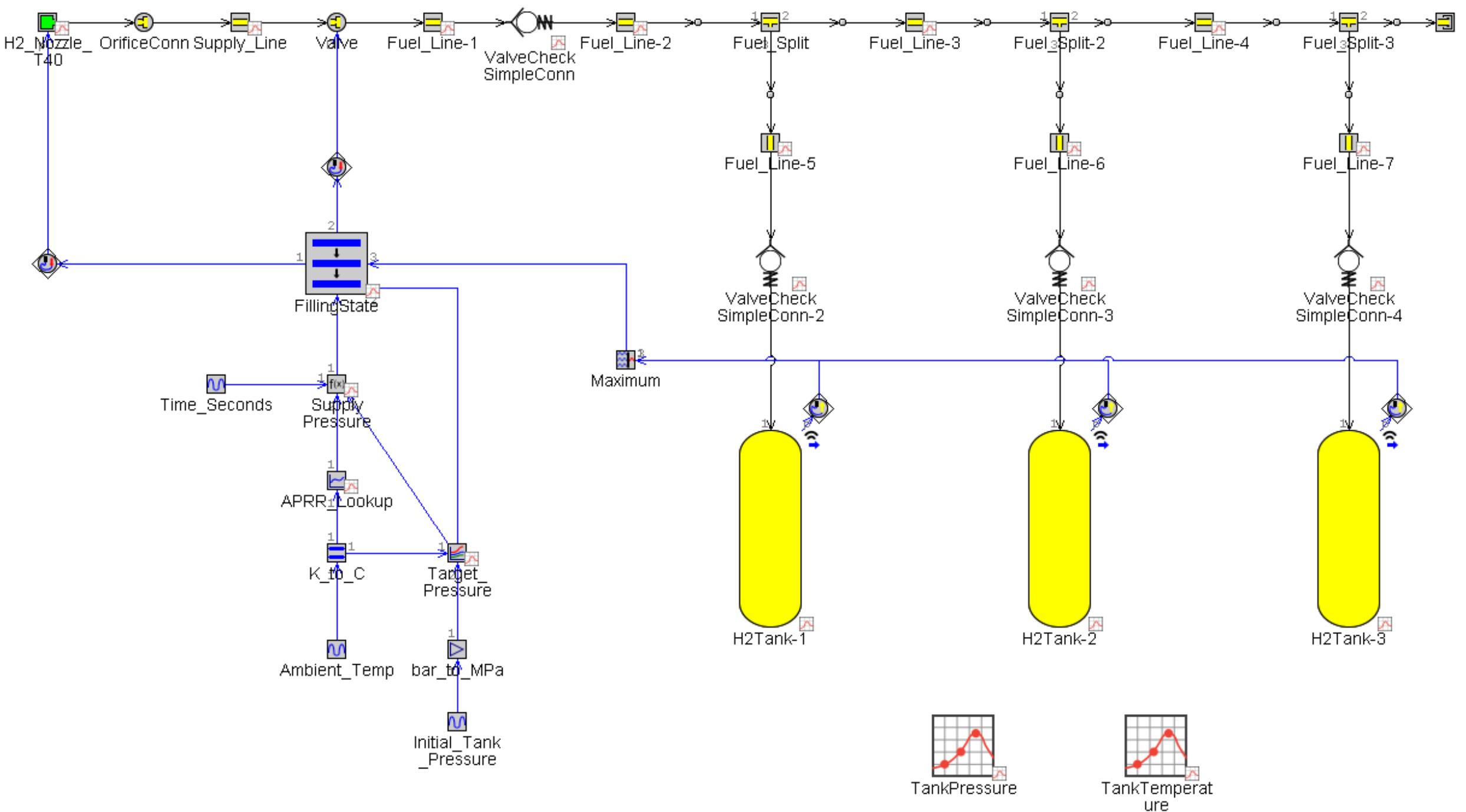


- “干”空气出口加湿器在 $>60\%$  RH
- “湿”空气出口加湿器湿度 $<40\%$ RH



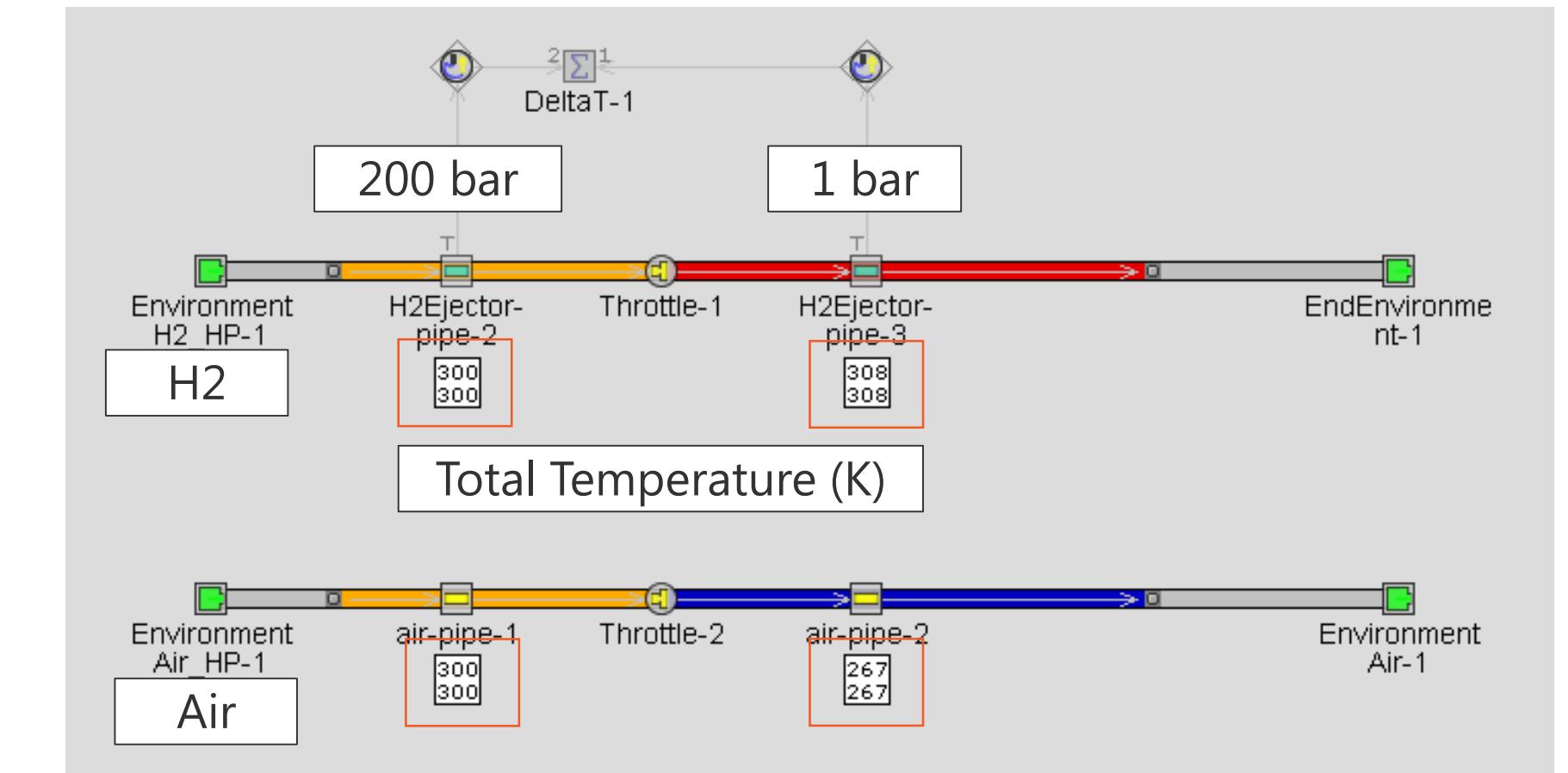
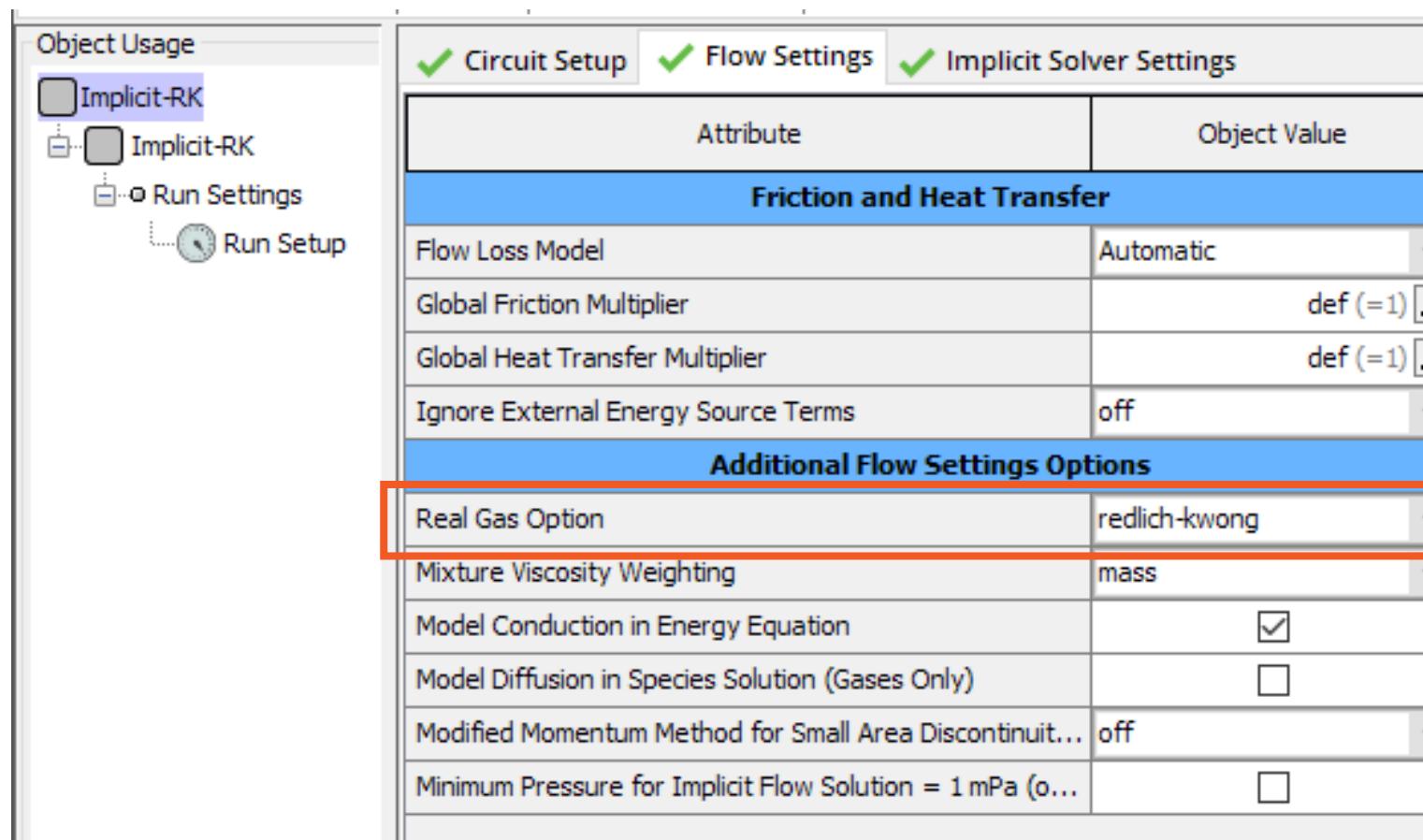
# 新的算例：氢罐加注

- 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取决于初始罐压力和环境温度
- 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

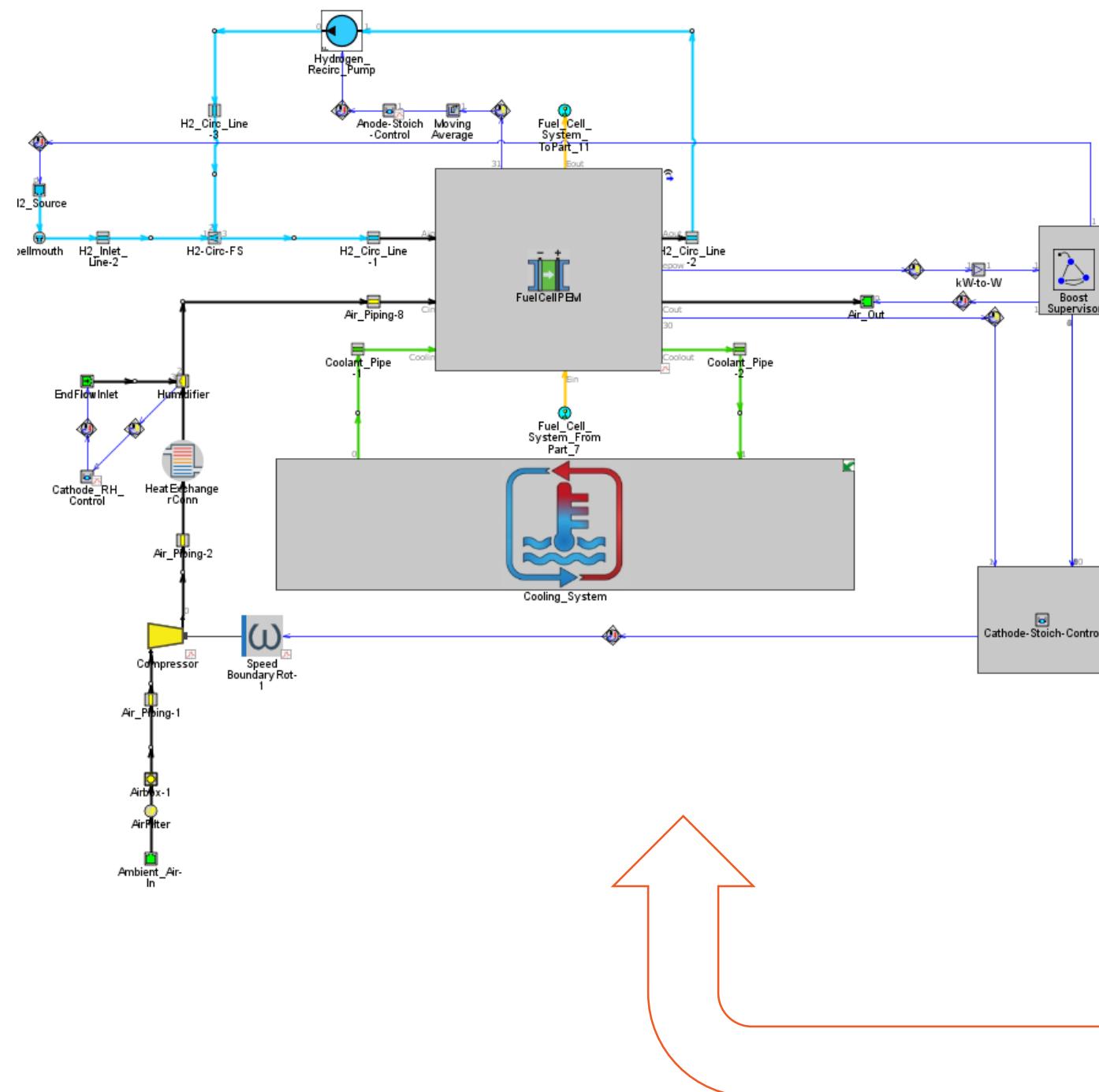
- Redlich-Kwong状态方程来模拟实际气体特性
- 能体现焦耳-汤姆逊效应了
- 建议在氢发生较大膨胀时使用 ( $\sim 20$  bar)
- 只需带有很小的计算代价
- 只需激活特定求解对象



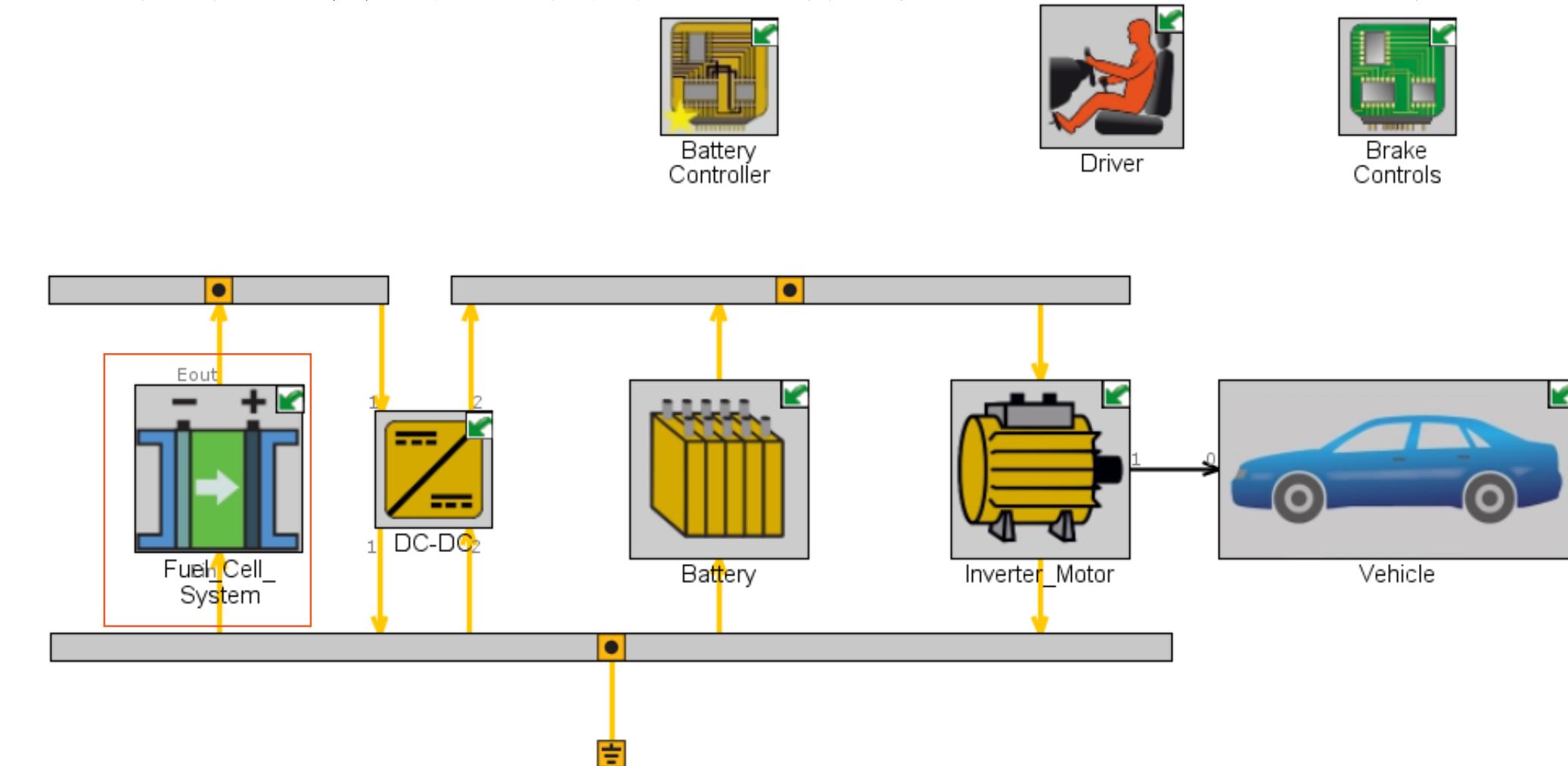
# 目录

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

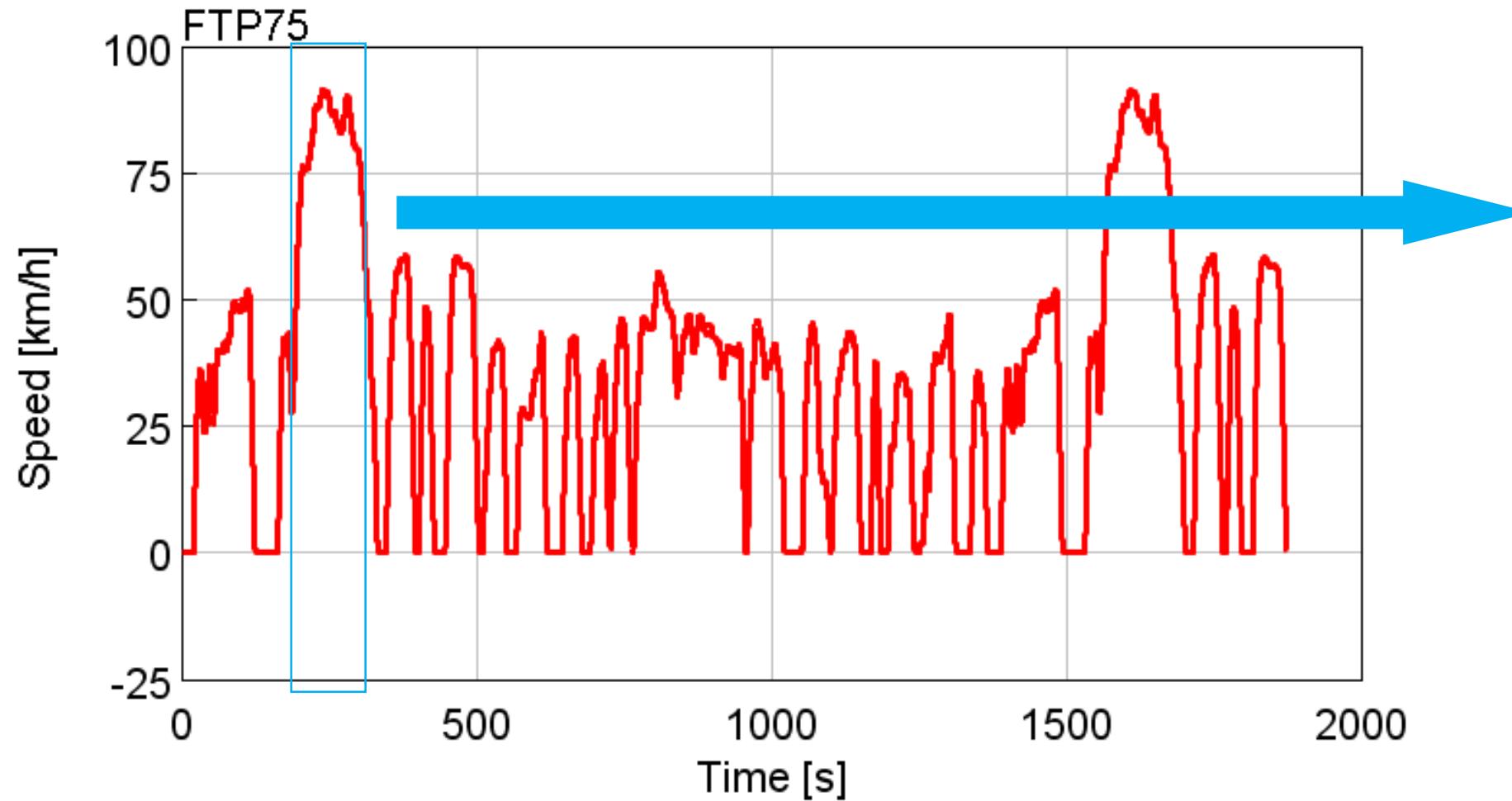
# 带有电气连接的车辆模型



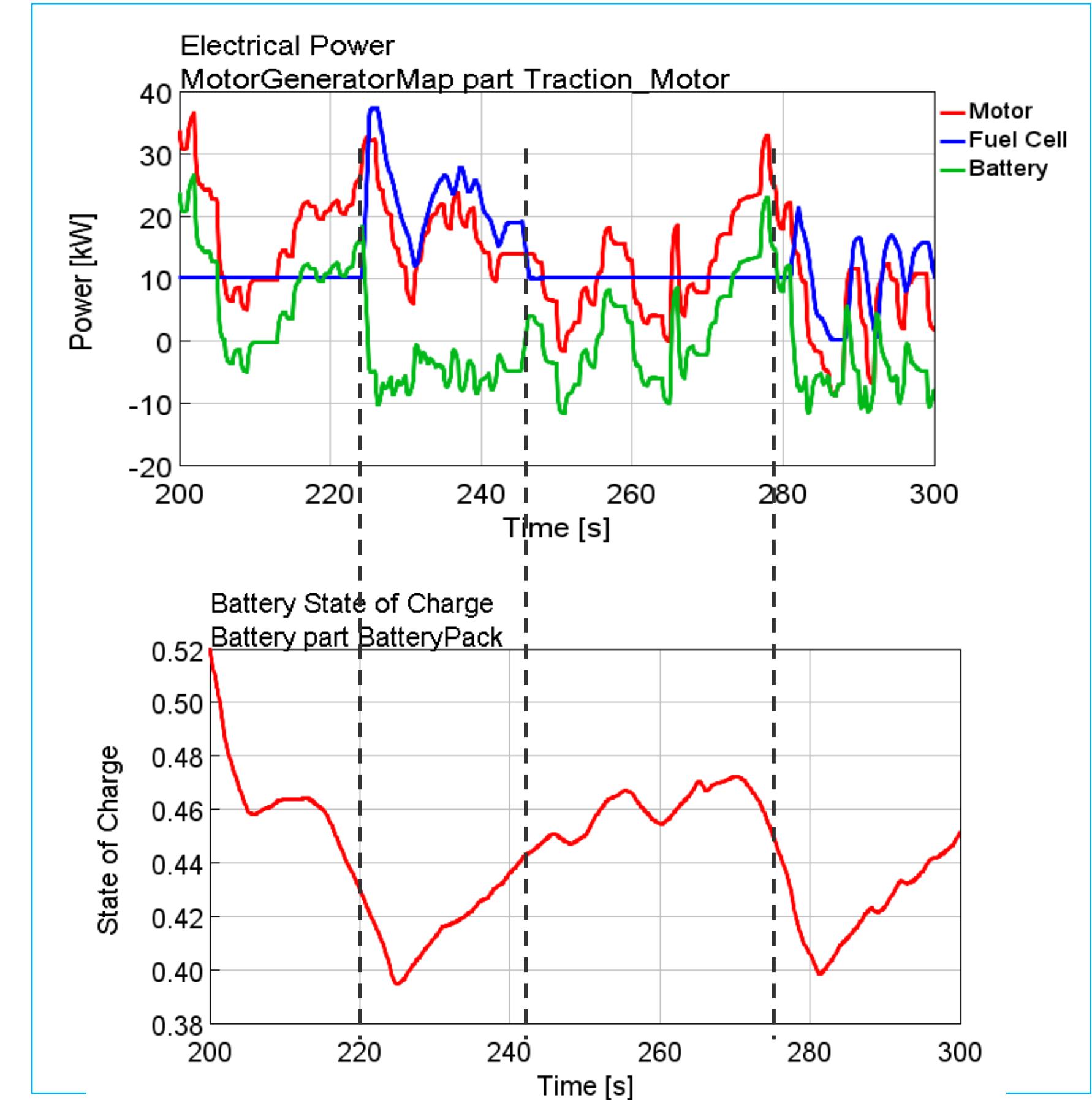
- 直流-直流转换器的电气连接
- 燃料电池为电机提供动力，并可为电池充电
- 电池可满足快速增长的需求或大的总负荷要求
- 全面的驱动循环分析
- 采用隐式求解器用于快速运行 (12x faster than RT)



# 带有电气连接的车辆模型

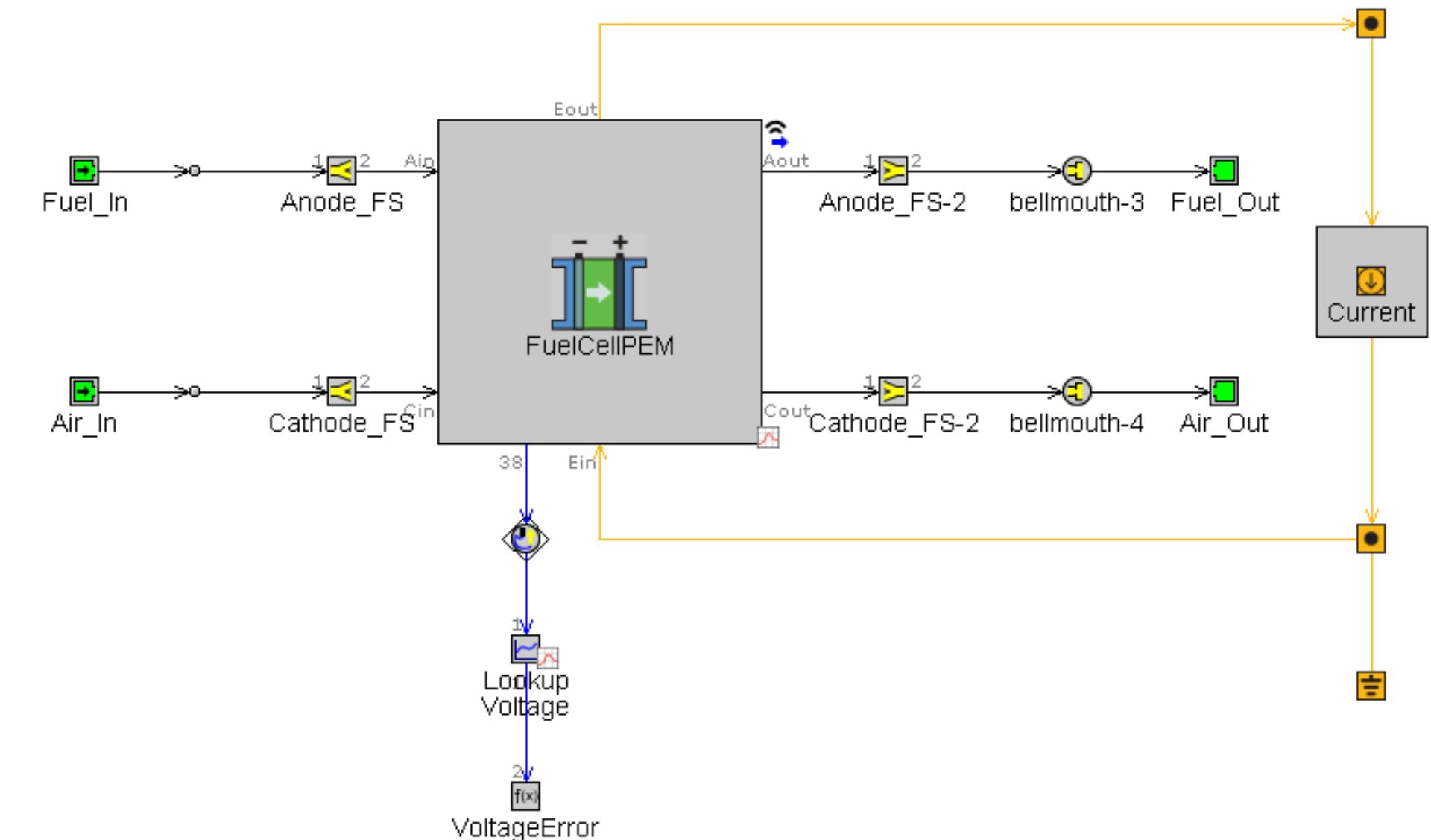


- 200s - 225s: 燃料电池运行在名义上的10kW
- 225s - 245s: 当电机需要额外的负载和电池SOC < 0.4时，燃料电池的功率就会增加
- 245s - 280s: 燃料电池运行在名义功率10kW
- 280s - 300s: 当不需要的电驱动时 (+ 制动能量回收)，燃料电池功率下降，

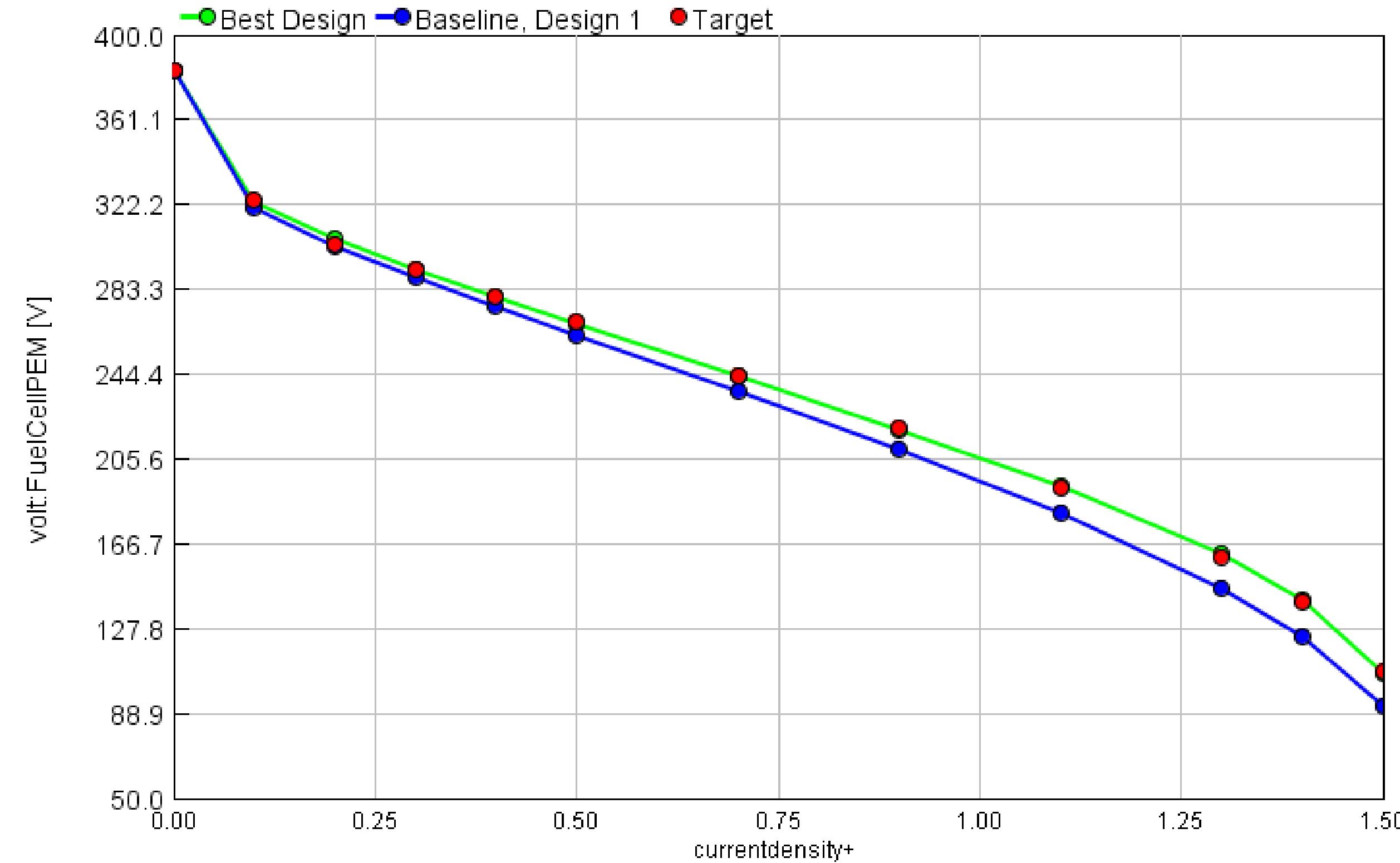


# 附录:其他新功能

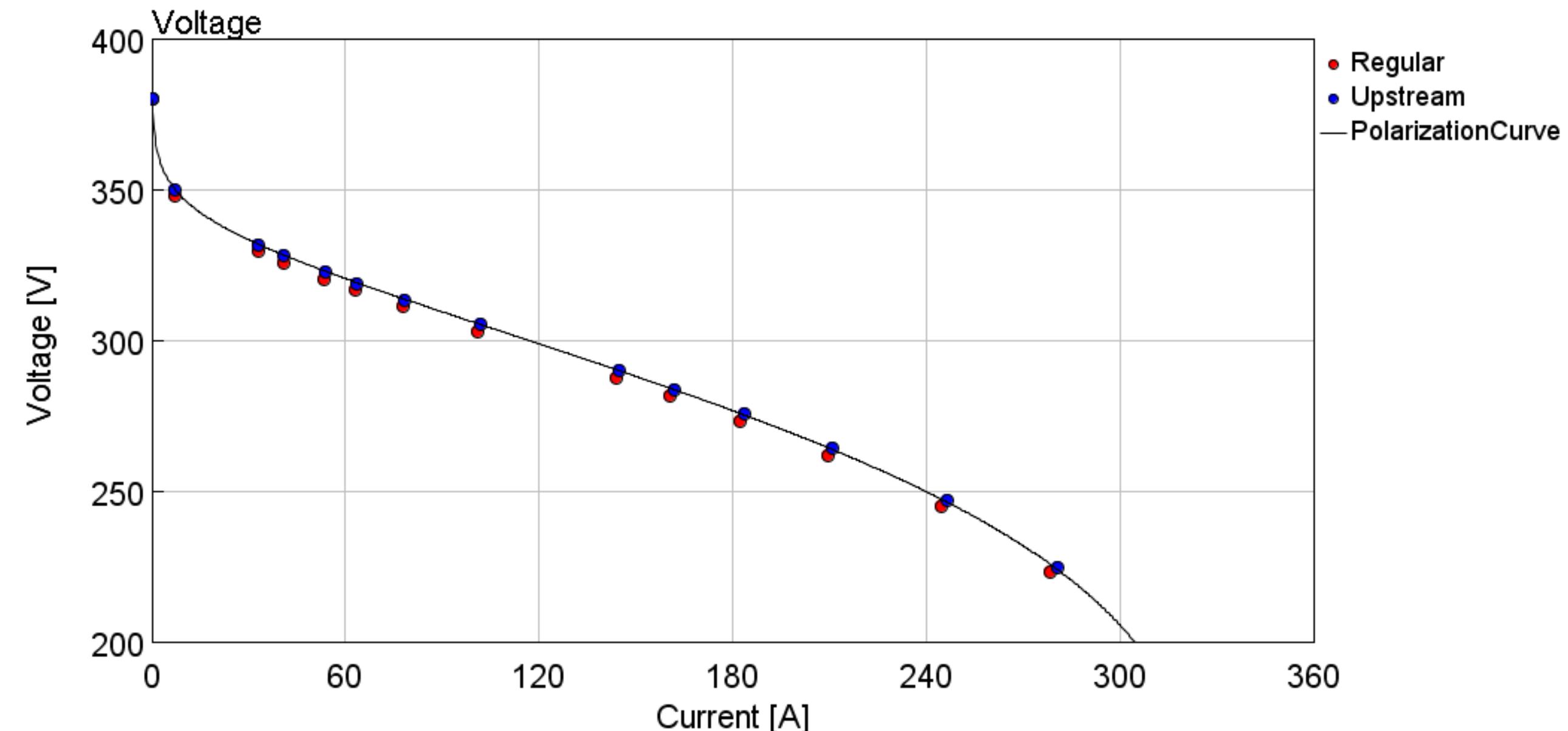
- 根据燃料电池上游供参考条件拟合极化曲线系数
- 燃料电池内的情况会随着运行的不同而变化
- 简单的实验台设置用于重现极化曲线测量值
- 优化器用于校准极化曲线系数，以更好地匹配测量数据



# 新的算例模型：燃料电池校准

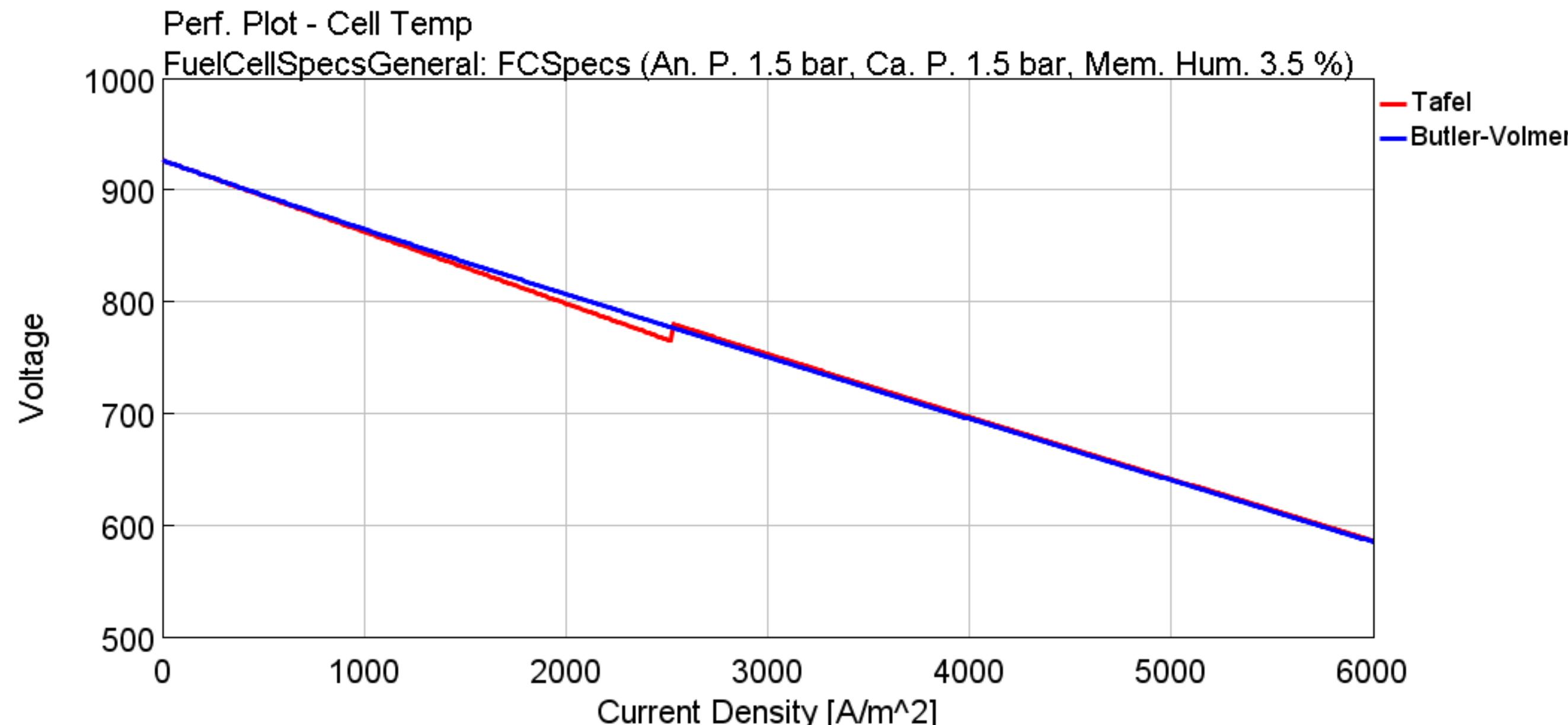


- 复选框，使计算基于燃料电池上游的条件，而不是燃料电池内部
- 如果试图在相同的参考条件下重现极化曲线会更有用



# 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 ( $\sim 10\%$ )
- 在FuelCellSpecsGeneral中启用复选框



## 要点总结

- GT-SUITE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](mailto:support@idaj.cn)
- Tel: 021-50588290; 010-65881497