

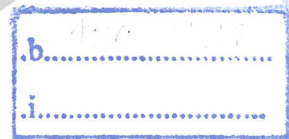
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โปรแกรมจำลองระบบการผลิตไฟฟ้าและกำลังงานร่วม  
ระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

A SIMULATION PROGRAM FOR ELECTRICAL POWER COMBINED  
CYCLE BETWEEN SOLID OXIDE FUEL CELL AND GAS TURBINE  
ENGINE



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**103127**  
วัน,เดือน,ปี.....**28 ส.ค. 2552**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A SIMULATION PROGRAM FOR ELECTRICAL POWER COMBINED  
CYCLE BETWEEN SOLID OXIDE FUEL CELL AND GAS TURBINE  
ENGINE**



**Mr. Warit Tantivirasut**

**Miss. Watchareeya Yosboonruang**

**Mr. Sarun Varangkee**

**A THESIS SUBMITTED IN PAREIAL FULILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDUES  
KING MONGKUT' INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2009**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDUES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โปรแกรมจำลองระบบการผลิตไฟฟ้าและกำลังงานร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิง  
และเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

A SIMULATION PROGRAM FOR ELECTRICAL POWER COMBINED CYCLE  
BETWEEN SOLID OXIDE FUEL CELL AND GAS TURBINE ENGINE

ผู้จัดทำ

- |                               |              |          |
|-------------------------------|--------------|----------|
| 1. นาย วรวิทย์ ตันติวิรสุต    | รหัสนักศึกษา | 48010784 |
| 2. นางสาว วัชรวิญา ยศบุญเรือง | รหัสนักศึกษา | 48010804 |
| 3. นาย ศรัณย์ วรรณศิริ        | รหัสนักศึกษา | 48010868 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมจำลองระบบการผลิตไฟฟ้าและกำลังงานร่วม  
ระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

นายวริทธิ์ ตันตวิรสุต 48010784  
นางสาววชิรญา ยศบุญเรือง 48010804  
นายศรัณย์ วรรางคี 48010868  
รศ.ดร. จารูวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสนับสนุน  
ห่อเซลล์โดยมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน

ระบบรีฟอร์ม: จำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีในการผลิต ไฮโดรเจน และส่งปริมาณของไฮโดรเจน  
เพื่อนำไปใช้ในระบบต่อไป

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง: จำลองการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ระหว่างเซลล์  
ไฮโดรเจนกับอากาศ ทำการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรวมทั้งอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงและ  
อากาศ

ระบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซ: จำลองระบบคอมเพรสเซอร์ ห้องเผาไหม้ และกังหันก๊าซเพื่อนำ  
ผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์มาเป็นส่วนผสมช่วยในการเผาไหม้และได้  
พลังงานกลจากก๊าซร้อนที่ขยายตัวผ่านกังหันก๊าซ

**A SIMULATION PROGRAM FOR ELECTRICAL POWER COMBINED  
CYCLE BETWEEN SOLID OXIDE FUEL CELL AND GAS TURBINE  
ENGINE**

Mr. Warit Tantivirasut 48010784

Miss. Watchareeya Yosboonruang 48010804

Mr. Sarun Varangkee 48010868

Assoc. Prof. Dr. Jarruwat Charoensuk Advisor

Academic Year 2008

**ABSTRACT**

This project concerns with the development of mathematical models of solid oxide fuel cell (SOFC) and its supporting subsystems which comprise of:

Reforming subsystem: explains the chemical kinetics producing hydrogen product from this unit is fed into the combustor and the fuel stack.

Solid oxide fuel cell subsystem: simulate electrical production and the chemical reaction between Hydrogen ( $H_2$ ) and oxygen in the Air. It also calculates the consumption rate of fuel and air.

Gas turbine subsystem: simulate the compressor, combustor and turbine characteristics to accommodate the exhaust gas from SOFC stack.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ควบคุมปริญญาโท ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และความเมตตาจากท่านอาจารย์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่ได้เป็นกำลังใจในการฝ่าฟันอุปสรรคและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คุณค่าและผลประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาโทฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายวิทธิ ตันติวิรสุต  
นางสาววัชรวิญา ยศบุญเรือง  
นายศรัณย์ วรรราชกิจ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
สัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 ส่วนประกอบของปริญญานิพนธ์	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	4
2.1 ระบบ Reformer	4
2.1.1 Heat exchanger (HEX)	5
2.1.2 Hydro-desulfurizer (HDS)	6
2.1.3 Mixer (Mix)	6
2.1.4 Catalytic Partial Oxidation (CPOX)	7
2.1.5 Water Gas Shift Converter and Preferential Oxidation Reactor	10
2.2 ระบบ Fuel Cell (SOFC)	11
2.2.1 หลักการทำงานอย่างง่าย	11
2.2.2 ประโยชน์ของ Fuel Cell	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3	ข้อเสียของ Fuel cell	12
2.2.4	ชนิดของ fuel cell	13
2.2.5	หลักการทํางาน	14
2.2.6	ค่า Gibb free energy	15
2.2.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง Gibb free energy กับ voltage	16
2.2.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง ความต่างศักย์ และ อุณหภูมิ	17
2.2.9	ค่า Voltage แปรผันกับค่า ความเข้มข้น: Nernst equation	18
2.2.10	Activation Loss	19
2.2.11	Potential and rate	20
2.2.12	Ohmic loss	21
2.2.13	Concentration Loss	21
2.3	ระบบ Gas Turbine	25
2.3.1	อุปกรณ์หลัก	25
2.3.2	หลักการทํางาน	25
2.3.3	ทฤษฎีการเผาไหม้	27
2.3.3.1	ปฏิกิริยาการเผาไหม้	27
2.3.3.2	ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้	27
2.3.3.3	การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ดีต้องอาศัยปัจจัยสำคัญ 3 ประการ	27
2.3.4	หลักการคำนวณพลังงานที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้	28
2.3.4.1	น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ของก๊าซผสม	29
2.3.4.2	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ( $A/F$ ) Stoic	29
2.3.4.3	อัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio, $\phi$ )	29
2.3.4.4	เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (% Excess Air)	30
2.3.4.5	การหาค่า Entropy	30
2.3.4.6	การหาค่าอุณหภูมิเปลวไฟแอดิยาบติก	31

(Adiabatic Flame Temperature)

บทที่ 3 การออกแบบและพัฒนาระบบ	32
3.1 ภาพรวมของระบบ	32
3.2 ขั้นตอนการออกแบบและการพัฒนาระบบ	32
3.3 Block Diagram	33
3.3.1 Reformer System	33
3.3.1.1 Block Hydro-desulfurizer Volume (HDS) & Block Heat Exchanger Volume (HEX)	34
3.3.1.2 Block Catalytic Partial Oxidation (CPOX)	34
3.3.1.3 Water Gas Shift Converter and Preferential Oxidation Reactor (WROX)	38
3.3.2 SOFC System	41
3.3.2.1 บล็อก Fuel Cell	44
3.3.2.2 บล็อกการเปลี่ยนหน่วยเป็น mole fraction	44
3.3.2.3 บล็อก Nernst equation	45
3.3.2.4 บล็อก Ohmic loss	48
3.3.2.4 บล็อก Cathode loss	48
3.3.3 Gas Turbine System	52
3.3.3.1 ส่วนการรับค่า	53
3.3.3.2 ส่วนที่คำนวณพลังงานที่ใช้ของ คอมเพรสเซอร์ และพลังงานที่ได้จากเทอร์ไบน์	54
3.3.3.3 ส่วนที่คำนวณงานที่ได้จากระบบ Gas Turbine System	61
บทที่ 4 ผลการจำลองของระบบ	62
4.1 ผลการจำลองในส่วนของ Reformer System	62
4.2 ผลการจำลองในส่วนของ Fuel Cell System	66
4.3 ผลการจำลองในส่วนของ Gas Turbine System	77
บท 5 บทสรุปและบทวิจารณ์	80
5.1 บทสรุป	81

5.2 วิจารณ์สิ่งที่ได้จากโครงการ	81
5.3 ปัญหาอุปสรรคและแนวทางแก้ไข	81
5.4 แนวทางการพัฒนาต่อ	81



# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	Fuel Processing System (FPS)	4
2.2	CPOX Diagram	8
2.3	ปฏิกิริยา fuel cell อย่างง่าย	11
2.4	หลักการทำงานของ Fuel Cell	14
2.5	ตัวอย่างแสดง Power กับ Current density	14
2.6	Diffusion layer ใน anode	22
2.7	mass transport ของ fuel cell	27
2.8	ระบบก๊าซเทอร์ไบน์	25
2.9	ส่วนประกอบเครื่องยนต์กังหันก๊าซ	25
2.10	หลักการทำงานเครื่องยนต์กังหันก๊าซ	25
2.11	กราฟ T-s Diagram ของระบบก๊าซเทอร์ไบน์	26
3.1	รูประบบรวม	32
3.2	รูประบบรวมสร้างด้วย Block Diagram	33
3.3	Block Diagram ของระบบ Reformer	33
3.4	Reformer system	34
3.5	CPOX system	34
3.6	CPOX system2	35
3.7	Alpha system	35
3.8	S system	36
3.9	WROX system	38
3.10	WROX sub-system	38
3.11	WGS system	39
3.12	PROX system	39
3.13	M-file reformer	40
3.14	Block Diagram ของระบบ Fuel Cell	42
3.15	Flux ของการไหลใน SOFC	42
3.16	sub-system model ใน Fuel Cell	44

3.17	subs-system model mole fraction	44
3.18	sub-system model total mole	45
3.19	sub-system model ใน water generate	45
3.20	sub-system model ในการ convert mole	46
3.21	sub-system model ใน SOFC	47
3.22	sub-system model Nernst equation	47
3.23	sub-system model Ohmic loss	48
3.24	sub-system model ใน Cathode loss	48
3.25	ผลการจำลองแสดงผลการจำลองเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง	50
3.26	กราฟ i-v Curve	51
3.27	Block Diagram ระบบ Gas Turbine	52
3.28	Block การคำนวณพลังงานในระบบ Gas Turbine	52
3.29	การรับค่าใน Block Turbine	53
3.30	M-File กำหนดค่าเพื่อใช้ในการคำนวณ Block Turbine System	53
3.31	Block Mole Fraction จากปฏิกิริยาการเผาไหม้	54
3.32	การคำนวณ Mole Fraction ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้	55
3.33	การหาอุณหภูมิเปลวไฟ แอเดียบัติก	56
3.34	Absolute Enthalpy ที่ออกจากห้องเผาไหม้หรือเข้า Turbine ( $h_3$ , kJ/kg)	57
3.35	การหาอุณหภูมิเปลวไฟแอเดียบัติก	58
3.36	การหา enthalpy ที่ออกจาก Turbine ( $h_{4s}$ )	59
3.37	การหางานจาก Turbine	59
3.38	การหางานที่ให้ Compressor	60
3.39	การหางานที่ได้จากระบบ Gas turbine	61
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์แลมด้ากับอัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจน	62
4.2	กราฟของแลมด้ากับอัตราการไหลเชิงโมลของมีเทน	62
4.3	กราฟของอัตราการไหลเชิงมวลของห้อง CPOX กับอัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจน	63
4.4	กราฟของอัตราการไหลเชิงมวลของห้อง CPOX กับอัตราการไหลเชิงโมลของมีเทน	63
4.5	กราฟของแลมด้า O2C กับ ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ Reformer	64
4.6	กราฟของแลมด้า O2C กับ ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ Reformer	65

4.7	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 1 atm., อุณหภูมิ 1000 K	66
4.8	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 1 atm., อุณหภูมิ 1100 K	67
4.9	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 1 atm., อุณหภูมิ 1200 K	67
4.10	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 1 atm., อุณหภูมิ 1400 K	68
4.11	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 3 atm., อุณหภูมิ 1000 K	68
4.12	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 3 atm., อุณหภูมิ 1100 K	69
4.13	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 3 atm., อุณหภูมิ 1200 K	69
4.14	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 3 atm., อุณหภูมิ 1400 K	70
4.15	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 5 atm., อุณหภูมิ 1000 K	70
4.16	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 5 atm., อุณหภูมิ 1100 K	71
4.17	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 5 atm., อุณหภูมิ 1200 K	71
4.18	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 5 atm., อุณหภูมิ 1400 K	72
4.19	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 10 atm., อุณหภูมิ 1000 K	72
4.20	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 10 atm., อุณหภูมิ 1100 K	73
4.21	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 10 atm., อุณหภูมิ 1200 K	73
4.22	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 10 atm., อุณหภูมิ 1400 K	74
4.23	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 1 atm.	74
4.24	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 3 atm.	75
4.25	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 5 atm.	75
4.26	กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 10 atm.	76
4.27	กราฟแสดงค่างานที่ได้จาก Turbine เมื่อมีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้	77
4.28	กราฟแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบ เมื่อมีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้	77
4.29	กราฟแสดงค่าอัตราการฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ที่ Equivalence Ratio ต่างๆ โดยกำหนดให้ไต้งานที่ Turbine 60 kW	78
4.30	กราฟแสดงประสิทธิภาพของระบบ Gas turbine ที่ Equivalence Ratio ต่างๆ	78
4.31	กราฟแสดง อุณหภูมิ Adiabatic ที่ Equivalence Ratio ต่างๆ	79
4.32	กราฟแสดงงานที่ได้จาก Turbine (kJ/kg) เมื่อระบบทำงานที่ Pressure ratio ต่างๆ	79

# สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตารางแสดงชนิด fuel cell ต่างๆ	12
2	ตารางคุณสมบัติของมีเทน	28
3	ตารางค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในระบบ Fuel Cell	49



## สัญลักษณ์

$a$	Molar Oxygen-fuel ratio , kmol/kmol
$A$	พื้นที่ , $\text{cm}^2$
$c_{pg}$	Constant pressure specific heat of gas =1.40 , kJ/kg.K
$c_{pu}$	Constant pressure specific heat of air =1.005, kJ/kg.K
$C^*$	ความเข้มข้นของปฏิกิริยาที่ผิว, mole / $\text{cm}^2$
$D$	การแพร่ , $\text{cm}^2/\text{s}$
$E_T, E$	Thermodynamic ideal voltage
$F$	ค่าคงที่ฟาราเดย์ ,96485 C/mol
$G, g$	Gibb free energy ,J/mol ,J
$H, h$	เอนทาลปี , J ,J/mol
$h$	Enthalpy, kJ/kg
$i$	กระแส, A
$J$	ฟลักซ์การไหล, mol/ $\text{cm}^2$
$j$	current density , A/ $\text{cm}^2$
$j_o$	exchange current density , A/ $\text{cm}^2$
$\dot{m}$	อัตราการไหล , kg/s
$\dot{m}_{air}$	อัตราการไหลของอากาศ ,kg/s
$MW_{mix}$	มวล โมเลกุลของก๊าซผสม, kg/kmol
$MW_i$	มวล โมเลกุลขององค์ประกอบ i ,kg/kmol
$MW_{air}$	มวล โมเลกุลของอากาศ ,kg/kmol
$MW_{fuel}$	มวล โมเลกุลของเชื้อเพลิง ,kg/kmol
$\dot{m}_{gas}$	Mass flow rate of gas, kg/s
$\dot{m}_{air}$	Mass flow rate of air, kg/s
$\eta_t$	Isentropic efficiency of turbine
$\eta_c$	Isentropic efficiency of Compressor
$N_i$	โมลขององค์ประกอบ i
$N_{TOT}$	โมลรวมของก๊าซผสม
$P, T$	คือความดันและอุณหภูมิสถติกของก๊าซผสมในห้องเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$t$	ความหนา, cm
$Q$	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง, kJ/kg or kW
$\bar{R}$	คือค่าคงที่ของก๊าซ (Universal gas constant=8.314 kJ/kmol.K)
$R$	ความต้านทาน, ohm
$S, s$	เอนโทรปี, J/K
$V$	ความต่างศักย์ไฟฟ้า, V
$\dot{W}_t$	กำลังงานที่เกิดจากTurbine, kW/s
$\dot{W}_c$	กำลังงานที่ให้ Compressor, kW/s
$W^{blo}$	อัตราการไหลของมวลก๊าซผสมที่ Blower, kg/s
$W^{hex}$	อัตราการไหลของมวลก๊าซผสมที่ Heat exchanger, kg/s
$W^{hds}$	อัตราการไหลของมวลก๊าซผสมที่ Hydro-desulfurizer, kg/s
$W_{Fuel}$	อัตราการไหลของมวลก๊าซผสมที่ถังเชื้อเพลิง, kg/s
$W$	งาน, J
$x$	Mole fraction หรือ สัดส่วนโดยโมล
$x_i$	สัดส่วนโดยโมล ขององค์ประกอบ $i$
$x_{air}^{mix}$	อัตราส่วนเชิงมวลของอากาศที่ห้อง Mixer
$x_{CH_4}^{mix}$	อัตราส่วนเชิงมวลของอากาศที่ห้อง Mixer
$x_{air}^{atm}$	อัตราส่วนเชิงมวลของอากาศที่ความดันบรรยากาศ
$x_{CH_4}^{atm}$	อัตราส่วนเชิงมวลของอากาศที่ความดันบรรยากาศ
$\rho$	ความหนาแน่นของก๊าซผสม, kg/m <sup>3</sup>
$\eta_{WROX}$	ประสิทธิภาพของห้อง WROX
$\eta$	Efficiency
$\eta_{ohmic}$	Ohmic loss, V
$\eta_{conc}$	Concentration loss, V
$\eta_{act}$	Activation loss, V
$\alpha$	สัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ทางประจุไฟฟ้า
$\alpha$	Charge transfer coefficient
$\gamma$	Activity coefficient
$\delta$	ชั้นความหนาการแพร่, m
$\lambda_{O_2C}$	อัตราส่วนของโมลออกซิเจนต่อมีเทน
$\phi$	Equivalence Ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันและในอนาคตข้างหน้าเชื้อเพลิงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการขับเคลื่อน ของเครื่องยนต์หรือเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องต้นกำลัง เช่น เครื่องบิน เรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น เครื่องยนต์เหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งนับวันกำลังจะหมดไปจากโลก ดังนั้นมนุษย์เราจำเป็นต้องหาเชื้อเพลิงชนิดอื่นมาทดแทน

สำหรับโครงการนี้จะศึกษาาระบบเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) ชนิดของแข็ง ร่วมกับเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas Turbine) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าให้นำไปใช้ประโยชน์ได้ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้สำหรับยานยนต์หรือแม้กระทั่งนำมาใช้ในอุปกรณ์ชิ้นเล็ก ๆ อย่างคอมพิวเตอร์แล็บท็อปซึ่งเป็นแบบอูณหภูมิต่ำ หากจะนำไปใช้ในการกำเนิดไฟฟ้าสำหรับ อาคารธุรกิจ ที่อยู่อาศัย ระบบเซลล์เชื้อเพลิงเฉพาะตัวมันเองนั้นสามารถที่จะให้ประสิทธิภาพสูง มีขนาดตั้งแต่ 1 กิโลวัตต์ – 100 เมกะวัตต์ แต่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง จึงต้องทำงานกับระบบกำเนิดพลังงาน เช่น เครื่องยนต์กังหันแก๊ส พลังงานที่เหลือทิ้งจากเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจะมีอุณหภูมิสูงสามารถนำไปเป็นพลังงานให้กับระบบทำความร้อนหรือระบบทำความเย็น แม้แต่ผลิตไฟฟ้าให้เรานำมาใช้กัน และด้วยเป็นระบบที่สะอาด จึงเป็นสิ่งที่เหมาะสำหรับการผลิต รวมถึงมีความเชื่อมั่นสูงในการบริการด้านพลังงาน แต่ต้องพัฒนาอีกมากเพื่อให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ รูปแบบของพลังงานทดแทนที่กล่าวมานี้เป็นพลังงานทดแทนอีกทางเลือกหนึ่งที่มีแนวโน้มที่จะมีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ในอีกไม่กี่ปีข้างหน้า โดยใช้เทคโนโลยีด้านเซลล์เชื้อเพลิง โดยข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับความสนใจเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่สำหรับอนาคต ก็คือ เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมน้อย ลดการเกิดก๊าซที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ออกไซด์ และไนโตรเจน

เครื่องยนต์กังหันก๊าซเป็นเครื่องยนต์ชนิดหนึ่งซึ่งถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเครื่องยนต์สันดาปส่วนใหญ่จะใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการสันดาป ซึ่งในการเพิ่มกำลังให้กับเครื่องยนต์ เครื่องหนึ่งนั้นจะต้องเพิ่มปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้ เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ในโครงการนี้อาศัยหลักการพื้นฐานเดียวกัน โดยเครื่องยนต์ที่ศึกษาจะใช้ก๊าซมีเทน เป็นเชื้อเพลิง เพื่อเป็นก้าวแรกในการพัฒนา อันจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้ก๊าซธรรมชาติในอนาคต ดังนั้นในโครงการนี้เมื่อนำมาใช้ร่วมกับหอเซลล์เชื้อเพลิง และ จะทำการออกแบบโดยอาศัยหลัก

เอกสารถูกพื้นฐานของเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic) ในงานที่กล่าวมานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง ระบบผลิตไฮโดรเจน และระบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ทำการจำลองการทำงานของระบบที่สภาวะต่างๆและ ทำการศึกษาภาวะการทำงานร่วมกันของระบบย่อยดังกล่าว

## 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

ใช้โปรแกรมเพื่อเป็นเครื่องมือในการเรียนรู้ค้นคว้าระบบเซลล์เชื้อเพลิง และระบบสนับสนุนที่ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

1.3.1 ระบบ reformer เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบในการแยกสารมีเทน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน โดยคิดที่สภาวะ steady state

1.3.2 ระบบ Fuel Cell เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของโมเลกุลไฮโดรเจนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยพัฒนาแบบจำลองในระดับห่อเซลล์

1.3.3 กำหนดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบ Lean Combustion มีเชื้อเพลิงที่เหลือจากระบบ Fuel Cell และมีเชื้อเพลิงเสริมคือ มีเทน เป็นสารตั้งต้นภายใต้ประสิทธิภาพเทอร์ไบน์และคอมเพรสเซอร์ ที่กำหนดขึ้น

## 1.4 วิธีการดำเนินการ

- 1.4.1 เสนอโครงการ
- 1.4.2 ค้นคว้าหาความรู้ด้านการทำงานของระบบ Reformer
- 1.4.3 ศึกษาการทำงานของระบบของระบบ Fuel Cell
- 1.4.4 ศึกษาการทำงานของระบบของระบบ Hydrogen & Combustion
- 1.4.5 สรุปความต้องการของระบบ
- 1.4.6 นำความต้องการนั้นมาวิเคราะห์
- 1.4.7 ศึกษาโปรแกรม Fluent, MatLab

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้รับความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการวิเคราะห์ระบบ
- 1.5.2 ได้ประสบการณ์และความชำนาญจากการใช้โปรแกรม
- 1.5.3 ได้รู้ถึงความสำคัญของการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยระบบเดิม
- 1.5.4 ได้เพิ่มทัศนคติและมุมมองของนักวิเคราะห์ระบบและมุมมองของผู้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ส่วนประกอบของปฏิญญาพันธ

ปฏิญญาพันธฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 ส่วนด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปฏิญญาพันธ วัตถุประสงค์ของปฏิญญาพันธ ขอบเขตของปฏิญญาพันธ วิธีการดำเนินการ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของปฏิญญาพันธ

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน ของระบบ Reformer, ระบบ Fuel Cell, ระบบ Combustion Turbine และกล่าวถึงทฤษฎีหลักที่นำมาใช้ในการคำนวณ

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบจำลองและพัฒนาภาพรวมของระบบทั้งหมดที่ศึกษาและส่วนต่างๆ ที่ได้พัฒนาขึ้น โดยใช้โปรแกรม Matlab ในการออกแบบระบบตามทฤษฎีและความต้องการของระบบนั้นๆ

บทที่ 4 ผลการจำลองของระบบทั้งสามระบบ

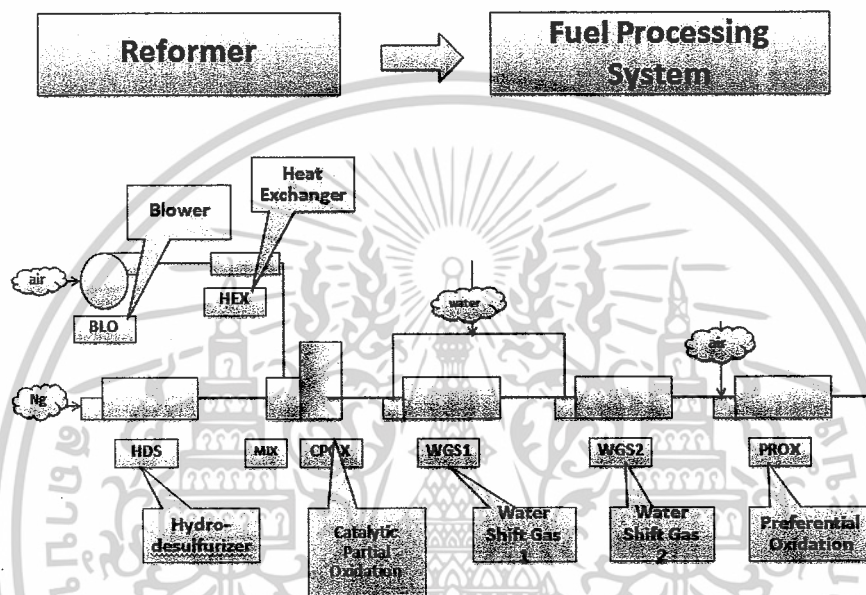
บทที่ 5 เป็นบทวิจารณ์และสรุป ซึ่งกล่าวถึงเนื้อหาโดยสรุปของปฏิญญาพันธ วิจารณ์สิ่งที่ได้รับ และข้อเสนอแนะสำหรับเป็นแนวทางในการพัฒนาแก้ไขต่อไป



## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 ระบบ Reformer



รูปที่ 2.1 Fuel Processing System (FPS)

จากรูปภาพประกอบของระบบ Fuel Processing System (FPS) ประกอบด้วย 4 ส่วนใหญ่ๆ

- 1 Hydro-desulfurizer (HDS)
- 2 Catalytic Partial Oxidation (CPOX)
- 3 Water Gas Shift (WGS)
- 4 Preferential Oxidation (PROX)

การไหลระหว่างปริมาตรในระบบ Fuel Processing System สามารถหาได้จากสมการ Orifice และความแตกต่างระหว่างความดันของทั้งสองปริมาตร

$$W = W_0 \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\Delta p_0}} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $W$  คือ อัตราการไหลเชิงมวล

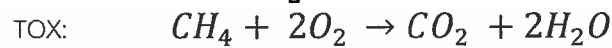
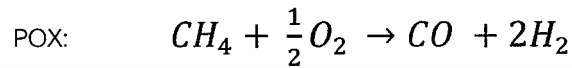
$W_0$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลที่อุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$p_1, p_2$  คือ ความดันที่จุด 1 และ 2

$\Delta p_0$  คือ ผลต่างความดันที่อุดมคติ

โดยบรรจุก๊าซมีเทนลงไปจนถึงความดันสูงหรือต่ำความดันสูง และเข้ามาผสมกับอากาศร้อนที่ห้อง MIXER (MIX)



โดยที่ปฏิกิริยาทั้งสองจะเกิดขึ้นอยู่กับ Selectivity (S)

$$S = \frac{\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาของมีเทนใน POX } \left(\frac{\text{mol}}{\text{s}}\right)}{\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดของมีเทน } \left(\frac{\text{mol}}{\text{s}}\right)} \quad (2.2)$$

จากปฏิกิริยา (POX) ได้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ แต่คาร์บอนมอนอกไซด์นั้นเป็นพิษ เราจึงใช้ Water Gas Shift (WGS) และ Preferential Oxidation Reactor (PROX) เพื่อลดปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยที่เราจะฉีดน้ำเข้าไปใน (WGS)



ต่อมาจนถึง (PROX) โดยทำการฉีดอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์



### 2.1.1 Heat Exchanger (HEX)

การแลกเปลี่ยนเชิงจลน์ศาสตร์เคมี โดยเราไม่คิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และพิจารณาที่ Steady state

$$W^{blo} = W^{hex} \quad (2.3)$$

$W^{blo}$  คือ อัตราการไหลของมวลก๊าซผสมที่ Blower  $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$W^{hex}$  คือ อัตราการไหลของมวลก๊าซผสมที่ Heat Exchanger ( $kg/s$ )

### 2.1.2 Hydro-desulfurizer (HDS)

ความดันของก๊าซใน Hydro-desulfurizer ที่อัตราการไหลเข้าของมวลสารเท่ากับอัตราการไหลออก กำหนดให้ก๊าซธรรมชาติ (Ng) ที่ฉีดเข้ามาเป็นมีเทน ( $CH_4$ ) ทั้งหมด

$$W_{fuel} = W^{hds} \quad (2.4)$$

$W^{hds}$  คืออัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซผสมที่ HDS ( $kg/s$ )

$W_{fuel}$  คืออัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงที่กำหนดขึ้น ( $kg/s$ )

### 2.1.3 Mixer (Mix)

ก๊าซธรรมชาติจาก(HDS) และอากาศจากBlowerผสมกันที่ถังผสม (Mix) สามารถเขียนสมการของของผสมได้คือ

$$W^{hds} = x_{CH_4}^{mix} W^{cpx} \quad (2.5)$$

$$W^{hex} = x_{air}^{mix} W^{cpx} \quad (2.6)$$

$W^{cpx}$  = อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซที่ CPOX ( $kg/s$ )

$W^{hex}$  = อัตราการไหลเชิงมวลของห้อง HEX ( $kg/s$ )

$x_{air}^{mix}$  = อัตราส่วนเชิงมวลของอากาศในห้อง MIX

$x_{CH_4}^{mix}$  = อัตราส่วนเชิงมวลของมีเทนในห้อง MIX

$x_{H_2}^{mix}$  = อัตราส่วนเชิงมวลของไฮโดรเจนในห้อง MIX

$x_{O_2}^{mix}$  = อัตราส่วนเชิงมวลของออกซิเจนในห้อง MIX

$$x_{air}^{mix} = 1 / \left( 1 + \frac{M_{CH_4} p_{CH_4}^{mix}}{M_{air}^{atm} p_{air}^{mix}} \right) \quad (2.7)$$

$$x_{CH_4}^{mix} = 1 / \left( 1 + \frac{M_{air}^{atm} p_{CH_4}^{mix}}{M_{CH_4} p_{air}^{mix}} \right) \quad (2.8)$$

$$x_{N_2}^{mix} = x_{N_2}^{atm} x_{air}^{mix} \quad (2.9)$$

$$x_{O_2}^{mix} = x_{O_2}^{atm} x_{air}^{mix} \quad (2.10)$$

$$x_{H_2O}^{mix} = x_{H_2O}^{atm} x_{air}^{mix} \quad (2.11)$$

$$\lambda_{O_2C} \equiv \frac{n_{O_2}}{n_{CH_4}} = y_{O_2}^{atm} \frac{p_{air}^{mix}}{p_{CH_4}^{mix}} \quad (2.12)$$

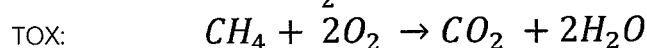
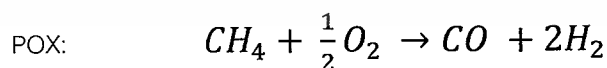
$\lambda_{O_2C}$  = อัตราส่วนของโมล ออกซิเจนส่วนด้วยมีเทน

$y_{O_2}^{atm}$  = อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนที่ atm

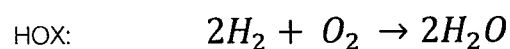
$$\beta = \frac{\text{อัตราการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนกับไฮโดรเจน}}{\text{อัตราการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนกับไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์}} = \frac{N_{O_2rH_2} \text{ (mol/s)}}{N_{O_2rH_2CO} \text{ (mol/s)}} \quad (2.13)$$

#### 2.1.4 Catalytic Partial Oxidation (CPOX)

ใน CPOX มีเทนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์คือไฮโดรเจน โดยที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของมีเทนมีอยู่ 2 ปฏิกิริยา

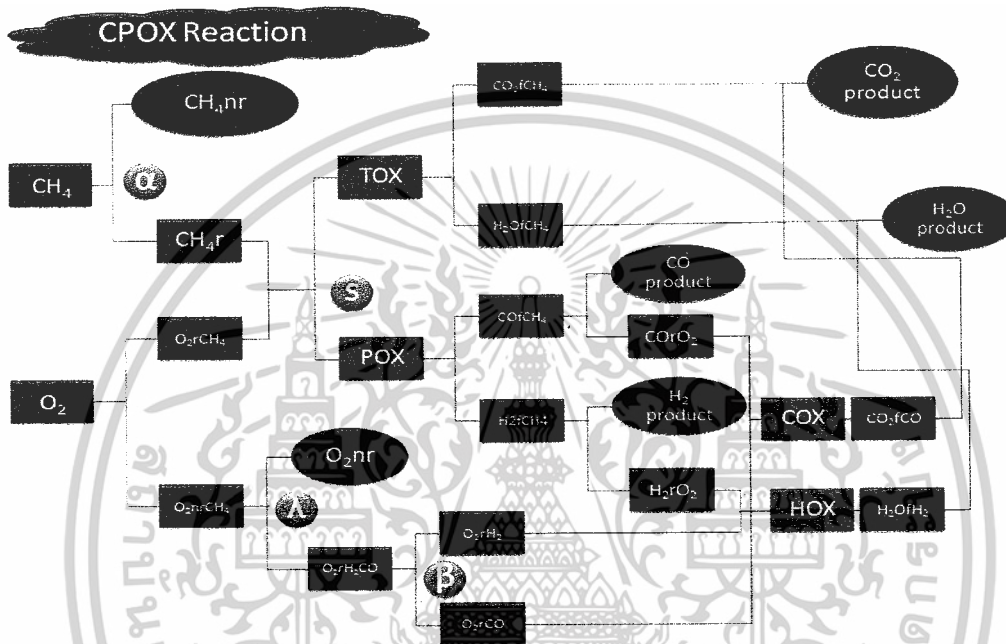


และปฏิกิริยาขั้นต่อมาก็คือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารที่เข้ามาในห้องปฏิกิริยาของCPOXมีสารตั้งต้นอยู่ 4 ชนิดคือ  $CH_4, O_2, H_2O, N_2$  แต่ไนโตรเจนไม่ทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในห้องทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาทั้งหมด 7 ตัว คือ  $CH_4, O_2, H_2O, N_2, CO, CO_2, H_2$  โดยปริมาตรของผลิตภัณฑ์แต่ละตัวขึ้นอยู่กับ  $\lambda_{O_2C}$  และ อุณหภูมิของห้อง CPOX และ  $\lambda_{O_2C}$  ในสมการนี้  $\lambda_{O_2C}$  คืออัตราส่วนของโมล ออกซิเจนส่วนด้วยมีเทน



รูปที่ 2.2 CPOX Diagram

$r$  = "ทำปฏิกิริยา",  $nr$  = "ไม่ทำปฏิกิริยา",  $f$  = "จาก"  
จากความสัมพันธ์ของโมเดล เราสามารถเขียนได้ว่า

$$\alpha = \frac{\text{อัตราการไหลเชิงโมลของมีเทนที่ทำปฏิกิริยา}}{\text{อัตราการไหลเชิงโมลของมีเทนที่เข้ามาในระบบ}} = \frac{N_{CH_4,r} \left( \frac{\text{mol}}{\text{s}} \right)}{N_{CH_4,in} \left( \frac{\text{mol}}{\text{s}} \right)} \quad (2.14)$$

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_1 \lambda_{O_2C} & ; \lambda_{O_2C} \geq 0.5 \\ 1 - (1 - 0.5\lambda_1)(1 - \tanh(\alpha_2(\lambda_{O_2C} - 0.5))) & ; \lambda_{O_2C} \leq 0.5 \end{cases} \quad (2.15)$$

โดยที่

$$\alpha_1 = \min(2, 0.0029T_{cproX} - 1.185) \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_2 = 0.215e^{3.9 \cdot (10^{-8}) \cdot ((T_{CPOX} - 600)^3)} \quad (2.17)$$

$$T_{CPOX} = \text{อุณหภูมิของห้อง CPOX}$$

Selectivity (S) คือตัวบอกปฏิกิริยาว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในห้อง CPOX โดยแบ่งออกเป็น

ถ้า  $S = 1$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ มีเทนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้คาร์บอนมอนอกไซด์กับไฮโดรเจน

$$\text{ถ้า } S = \frac{2}{3} (2 - \lambda_{O_2C})$$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ มีเทนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้คาร์บอนมอนอกไซด์กับไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ

ถ้า  $S = 0$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ มีเทนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ

$$S = \frac{N_{CH_4rPOX} \text{ (mol/s)}}{N_{CH_4r} \text{ (mol/s)}} \quad (2.18)$$

จากความสัมพันธ์ของ  $\lambda_{O_2C}$  กับ S เราสามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{array}{ll} S = 1 & , \lambda_{O_2C} < \frac{1}{2} \\ S = \frac{2}{3} (2 - \lambda_{O_2C}) & , \frac{1}{2} \leq \lambda_{O_2C} \leq 2 \\ S = 0 & , \lambda_{O_2C} > 2 \end{array}$$

อัตราการไหลเชิงโมลของแก๊สที่เข้ามาสามารถคำนวณได้จาก

$$N_{i,in} = \frac{x_i^{mix} W_{CPOX}}{M_i} \quad (2.19)$$

$N_{i,in}$  = อัตราการไหลเชิงโมลของสปีชีส์ i ที่ห้อง MIX, ( $\text{mol/s}$ )

$M_i$  = มวลโมเลกุล, ( $\text{kg/kmole}$ )

จากเงื่อนไขที่ได้สามารถแก้สมการหาอัตราการไหลเป็น โมลของผลิตภัณฑ์ของ CPOX ได้

$$\begin{aligned} N_{H_2} &= N_{H_2fCH_4} - N_{H_2rO_2} \\ &= [2Sa - 2\beta (X_{O_2C} - (2 - \frac{3}{2}S)a) \text{sign}(S)] N_{CH_4in} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$N_{CO} = N_{COfCH_4} - N_{COro_2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= [Sa - 2(1-\beta)(X_{O_2C} - (2 - \frac{3}{2}S)a)\text{sign}(S)] N_{CH_4in} \quad (2.21)$$

$$N_{CO_2} = N_{CO_2fCH_4} + N_{CO_2fCO}$$

$$= [(1-s)a + 2(1-\beta)(X_{O_2C} - (2 - \frac{3}{2}S)a)\text{sign}(S)] N_{CO_2fCH_4} \quad (2.22)$$

$$N_{H_2O} = N_{H_2fCH_4} + N_{H_2ofCH_2} + N_{H_2Oin}$$

$$= [2(1-s)a + 2\beta(X_{O_2C} - (2 - \frac{3}{2}S)a)\text{sign}(S)] N_{CH_4in} + N_{H_2Oin} \quad (2.23)$$

$$N_{CH_4} = (1-a) N_{CH_4in} \quad (2.24)$$

$$N_{O_2} = N_{O_2in} - N_{O_2r} = (N_{O_2in} - (2 - \frac{3}{2}S)a N_{CH_4in}) \text{sign}(s) \quad (2.25)$$

$$N_{N_2} = N_{N_2in} \quad (2.26)$$

### 2.1.5 Water Gas Shift Converter and Preferential Oxidation Reactor (WROX)

ระบบ WGS และ PROX เป็นระบบที่ถูกรวมกันเป็นอันเดียวโดยปฏิกิริยาที่เกิดจากการไหลเชิงมวลของสารสามชนิดได้แก่  $H_2$  จาก CPOX น้ำที่ถูกฉีดจาก WGS และ Air จาก PROX ระบบ PROX มีจุดประสงค์เพื่อลดอุณหภูมิและกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์

$$W^{CPOX} + W^{WGS} + W_{air}^{PROX} = W^{WROX} \quad (2.27)$$

$$(1 + \eta_{WROX}) W_{H_2}^{CPOX} = X_{H_2}^{WROX} W^{WROX} \quad (2.28)$$

$\eta_{WROX}$  = ประสิทธิภาพของห้อง WROX

$W_{H_2}^{WROX}$  = อัตราการไหลเชิงมวลของไฮโดรเจนที่ WROX (kg/s)

$W_{air}^{PROX}$  = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ PROX (kg/s)

อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนใน WROX สามารถหาได้ดังนี้

$$X_{H_2}^{WROX} = \frac{M_{H_2}}{M^{WROX}} \frac{P_{H_2}^{WROX}}{P^{WROX}} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

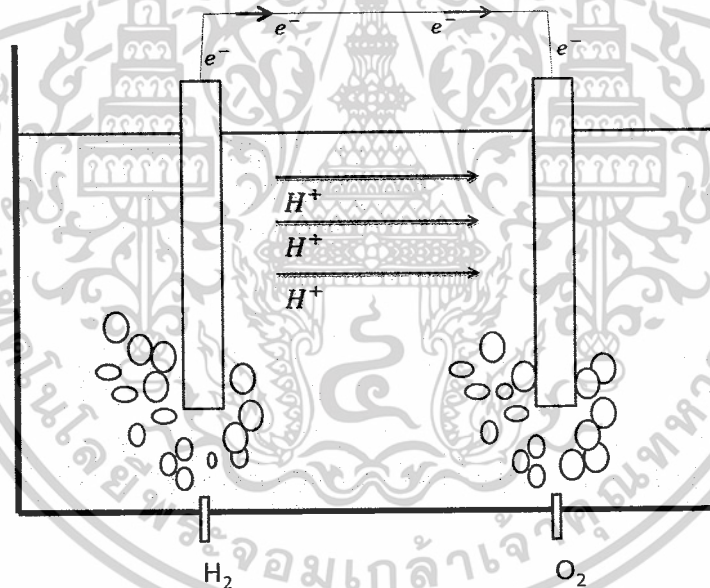
## 2.2 ระบบ Fuel Cell (SOFC)

### 2.1.1 หลักการทำงานอย่างง่าย

ใน Fuel cell จะแบ่งปฏิกิริยาได้สองปฏิกิริยา



จากปฏิกิริยาดังกล่าว  $e^-$  เดินทางผ่านวงจรไฟฟ้าทำให้เกิดงานทางไฟฟ้าซึ่งสามารถนำไปใช้ในประโยชน์ต่างๆจากกรุป Fuel cell ประกอบด้วย 2 platinum electrodes จุ่มในสารละลายกรดซัลฟิวริก  $H_2$  (gas) เข้าทางด้านซ้าย โดยการแยกออกทางไฟฟ้าจะได้  $H^+$  และ  $e^-$  จากนั้น  $H^+$  จะเดินทางผ่าน อิเล็กโทรไลต์ แต่  $e^-$  จะเดินทางผ่าน สายไฟซึ่งต่อกับขั้ว platinum ผลที่ได้คืองานทางไฟฟ้า และผ่านที่ทางด้านขวา  $e^-$  จะไปรวมกับออกซิเจนไอออน เกิดน้ำ



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยา fuel cell อย่างง่าย

### 2.2.2 ประโยชน์ของ Fuel Cell

1. Fuel cell มีประสิทธิภาพสูงกว่าอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าทั่วไป เพราะว่า Fuel cell ไม่ได้เปลี่ยนรูปพลังงานในรูปความร้อนหรือการเผาไหม้ ดังนั้น Fuel cell จึงไม่ได้ถูกจำกัดด้วยวัฏจักรคาร์โน (Carnot cycle)
2. เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ เนื่องจากกระบวนการที่เกิดขึ้นมีเพียงกระแสไฟฟ้า น้ำ และความร้อนเท่านั้น ต่างจากการผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีอื่น ๆ ซึ่งจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มลพิษต่างๆเกิดขึ้น เช่น  $SO_2$ ,  $NO_3$ ,  $CO_3$ ,  $HC$  เป็นต้น นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Fuel cell ง่ายต่อการดูแลรักษาและไม่เกิดเสียงดังในขณะที่ทำงาน เพิ่มพลังงานไฟฟ้าด้วยการต่อ Fuel cell แบบอนุกรม ซึ่งการผลิต Fuel cell สามารถทำเป็น module เล็ก ๆ แล้วนำมาต่ออนุกรมกัน

4. มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงและใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ได้

5. สามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีราคาถูกร่วมกับ Fuel cell ที่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้

6. สำหรับ Fuel cell ที่สามารถทำงานที่มีอุณหภูมิสูง สามารถนำความร้อนที่ได้มาผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยวัฏจักรมาตรฐานอากาศและวัฏจักรแรงคินได้ และทำให้ประสิทธิภาพรวมทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย

### 2.2.3 ข้อดีของ Fuel cell

1. มีค่าใช้จ่ายในการสร้างสูง
2. ไฮโดรเจนบริสุทธิ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันยังหายาก

ตารางที่ 1 ตารางแสดงชนิด fuel cell ต่างๆ

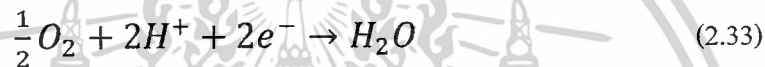
เซลล์เชื้อเพลิง	อิเล็กโทรไลต์	เชื้อเพลิงที่แอโนด	แก๊สที่แอโนด	อุณหภูมิใช้งาน	การประยุกต์ใช้งาน
Alkaline Fuel cell (AFC)	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน	60 - 90	ยานอวกาศ เรือดำน้ำ
Proton Exchange membrane Fuel cell (PMFC)	พอลิเมอร์ชนิดสื่อถ่ายโอนโปรตอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน จากอากาศ	60 - 90	ยานพาหนะ โรงไฟฟ้าอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เคลื่อนย้ายได้สะดวก
Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)	กรดฟอสฟอริก	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน จากอากาศ	200	โรงไฟฟ้าแบบความร้อนร่วม
Molten Carbonate Fuel (MCFC)	Molten alkaline carbonate	ไฮโดรเจน มีเทน แก๊ส จากถ่านหิน	ออกซิเจน จากอากาศ	650	โรงไฟฟ้าแบบความร้อนร่วม
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	Ceramic solid electrolyte	ไฮโดรเจน แก๊สธรรมชาติ แก๊ส จากถ่านหิน	ออกซิเจน จากอากาศ	300-1000	โรงไฟฟ้าแบบความร้อนร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.4 ชนิดของ Fuel cell

1. Phosphoric acid fuel cell (PAFC)
2. Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC)
3. Alkaline Fuel cell (AFC)
4. Molten carbonate fuel cell (MCFC)
5. Solid oxide fuel cell (SOFC)

ชนิด PEMFC จะประกอบด้วย polymer เป็น electrolyte โดย  $H^+$  จะเป็นตัวนำไอออนผ่าน PEM membrane โดยสมการ



ชนิด SOFC จะใช้ ceramic เป็น electrolyte โดย  $O^{2-}$  จะเป็นตัวนำไอออนใน SOFC

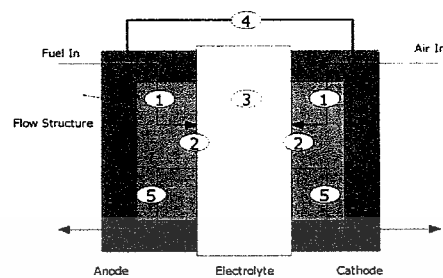


โดย SOFC จะทำงานที่อุณหภูมิสูง ( $T > 600$  องศาเซลเซียส) โดยทำให้พลังงานและประสิทธิภาพสูงกว่า

ใน PEM  $H^+$  จะเคลื่อนที่ผ่าน electrolyte และเกิดน้ำที่ cathode

ใน SOFC  $O^{2-}$  จะเคลื่อนที่ผ่าน electrolyte และเกิดน้ำที่ anode

## 2.2.5 หลักการทำงาน



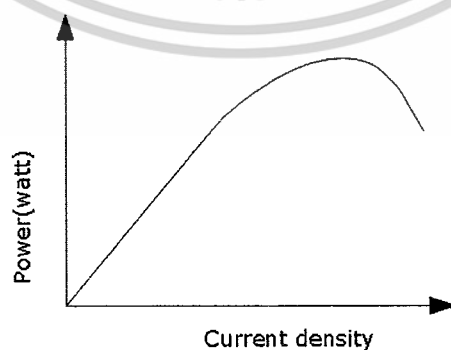
รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของ Fuel Cell

1. สารตั้งต้นเดินทางเข้าสู่ Fuel cell
2. เกิดปฏิกิริยาเคมี
3. ไฮดรอกไซด์ไอออนเดินทางผ่าน electrolyte
4.  $e^-$  เดินทางผ่านวงจรไฟฟ้า
5. เกิดผลิตภัณฑ์ที่ทางออก Fuel cell

### ประสิทธิภาพโดยรวม

ประสิทธิภาพโดยรวมสามารถหาค่าได้จาก  $(i-v)$  curve โดยโวลต์ voltage ที่ออกจาก Fuel cell โดยทั่วไปแล้ว กระแสไฟฟ้าที่ได้จะคิดต่อพื้นที่เรียกว่า current density ( $i/cm^2$ ) Fuel cell ที่ใหญ่กว่า จะให้ค่าไฟฟ้าที่สูงกว่า ค่าทางไฟฟ้านี้จะสามารถหาค่าได้จาก หลักการ thermodynamic

ค่า Power density จะสามารถคิดได้โดยนำค่า  $i$  คูณ  $v$  ที่คู่ลำดับนั้นๆ



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างแสดง Power กับ Current density

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.6 ค่า Gibb free energy

Gibbs Free Energy,  $G$  ( พลังงานอิสระกิบส์ ) : ค่าปริมาณทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปี (Enthalpy,  $H$ ) เอนโทรปี (Entropy,  $S$ ) และอุณหภูมิ (Temperature,  $T$ ) ดังสมการ

$$G = H - TS \quad (2.36)$$

ทำการดิฟทั้งสองฝั่งจะได้

$$dG = dH - TdS - SdT \quad (2.37)$$

พิจารณารูปแบบของ Isothermal อุณหภูมิคงที่

$$\Delta g = \Delta h - T\Delta s \quad (2.38)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง Gibb free energy กับค่าทางไฟฟ้า

สำหรับ fuel cell เราพิจารณาค่าทางไฟฟ้าสูงสุดได้จากการคำนวณปฏิกิริยาเคมี

$$dG = dU - TdS - SdT + pdV + Vdp \quad (2.39)$$

ใส่สมการ  $dU$  จากกฎข้อที่หนึ่ง ของ Thermodynamics

$$dU = TdS - dW \quad (2.40)$$

$$dU = TdS - (pdV + dW_{elec}) \quad (2.41)$$

ในเทอม  $dG$  รวมจะได้

$$dG = -SdT + Vdp - dW_{elec} \quad (2.42)$$

สำหรับ อุณหภูมิคงที่ และ ความดันคงที่  $dT, dp = 0$  ดังนั้นจะลดรูปได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dG = -dW_{elec} \quad (2.43)$$

สำหรับค่าทางไฟฟ้าสูงสุดของระบบที่ อุณหภูมิคงที่ และ ความดันคงที่ จากกระบวนการจะให้ค่าติดลบที่ Gibb free energy จากกระบวนการ

$$W_{elec} = -\Delta g \quad (2.44)$$

### 2.2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Gibb free energy กับ voltage

ค่าทางไฟฟ้าสามารถวัดได้ทางไฟฟ้า (Voltage) หรือเรียกว่า electrical voltage ค่าทางไฟฟ้าถูกคิดจากการเคลื่อนที่ ของประจุไฟฟ้า Q มีหน่วยเป็น coulombs

$$dW_{elec} = EQ \quad (2.45)$$

โดยที่ประจุกคำนวณจากอิเล็กตรอน

$$Q = nF \quad (2.46)$$

n เป็นจำนวนที่ อิเล็กตรอน โอนถ่ายและ F เป็นค่าคงที่ฟาราเดย์ เมื่อรวมสมการ 2.45 กับ 2.46 จะได้

$$\Delta g = -nFE \quad (2.47)$$

ค่า Gibb free energy จะติดลบบ้างมากที่สุด สำหรับสมการเคมี เช่นตัวอย่าง สมการเคมีของ fuel cell



ค่า Gibb free energy change  $\Delta g$  จะมีค่าเท่ากับ -237 kJ/mol ที่สภาวะ standard state condition สำหรับน้ำที่เป็นของเหลว

$$E^0 = -\frac{\Delta g^0}{nF} \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E^0 = - \frac{-237,000 \text{ J/mol}}{(2 \text{ mol } e^- \text{ mol reactant})(96,400 \text{ C/mol})} = 1.229 \text{ V} \quad (2.50)$$

ค่าที่ได้อาจจะอยู่ระหว่าง 0.8-1.5V หากต้องการได้มากกว่านี้ เช่น 10V จะต้องต่ออนุกรมกัน

### 2.2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความต่างศักย์ และ อุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่าง ความต่างศักย์ และ อุณหภูมิต่างๆ จากสมการเริ่มต้นของ Gibb free energy

$$dG = -SdT + Vdp \quad (2.51)$$

และสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\left(\frac{dG}{dT}\right)_p = -S \quad (2.52)$$

โดยเปลี่ยนในรูปขนาดของความเข้มข้น (molar reaction quantities) จะได้

$$\left(\frac{d(\Delta g)}{dT}\right)_p = -\Delta s \quad (2.53)$$

$$\Delta g = -nFE \quad (2.54)$$

รวมสมการ 2.52 และ 2.53

$$\left(\frac{dE}{dT}\right)_p = \frac{\Delta s}{nF} \quad (2.55)$$

ทำการอินทิเกรตจะได้ฟังก์ชันของ อุณหภูมิ

$$E_T = E^0 + \frac{\Delta s}{nF} (T - T_0) \quad (2.56)$$

$$E_T = E^0 + \frac{-44.43 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}}{(2)(96400)} (T - T_0) \quad (2.57)$$

$$E_T = E^0 + (2.304 \times 10^{-4} \text{ V/K})(T - T_0) \quad (2.58)$$

สำหรับทุกๆ 100 องศาที่เพิ่มขึ้นในเซลล์จะทำให้ความต่างศักย์ลดลง 23mV. H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>, ทำงานที่อุณหภูมิ 1000K จะได้ค่าประมาณ 1.07V

### 2.2.9 ค่า Voltage แปรผันกับค่า ความเข้มข้น: Nernst equation

จากค่าของ พลังงานศักย์เคมีคิดได้จาก Gibb free energy เปลี่ยนแปลงในระบบในแต่ละสปีชีส์ โดยเขียนสมการได้

$$\mu_i^\alpha = \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_{j \neq i}} \quad (2.59)$$

โดยที่  $\mu_i^\alpha$  คือค่า พลังงานศักย์เคมีของแต่ละสปีชีส์ ในเฟส  $\alpha$  และ  $\left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_{j \neq i}}$  คือค่าที่บ่งบอกถึง Gibb free energy ที่เปลี่ยนแปลงของแต่ละสปีชีส์ ในที่นี้พลังงานศักย์เคมีมีความสัมพันธ์กับ Activity

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i \quad (2.60)$$

สำหรับ Ideal gas ,  $a_i = p_i/p^0$  โดยที่  $p_i$  คือ ค่าความดันย่อยของแก๊ส และ  $p^0$  ค่าความดันอ้างอิงหรือความดันรวมรวมสมการ 2.59 กับ 2.60 จะสามารถคำนวณค่าเปลี่ยนแปลง Gibb free energy แต่ละสปีชีส์จากสมการ

$$dG = \sum_i^n \mu_i dn_i = \sum_i^n (\mu_i^0 + RT \ln a_i) dn_i \quad (2.61)$$

พิจารณารวมที่ปฏิกิริยาเคมีแต่ละตัวโดย molar ของสปีชีส์ A จาก



โดยที่ A, B เป็นสารตั้งต้น และ M, N เป็นผลิตภัณฑ์ และ 1, b, m, n เป็นสัมประสิทธิ์ โดยโมลของสาร A, B, M, N ตามลำดับทำให้สามารถเขียนสมการรวมได้

$$\Delta g = (m\mu_M^0 + n\mu_N^0) - (\mu_A^0 + b\mu_B^0) + RT \ln \left( \frac{a_M^m a_N^n}{a_A^1 a_B^b} \right) \quad (2.63)$$

โดยสามารถยุบสมการรวมได้คือ

$$\Delta g = \Delta g_0 + RT \ln \left( \frac{a_M^m a_N^n}{a_A^1 a_B^b} \right) \quad (2.64)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสมการ Gibb free energy จะเปลี่ยนตามค่าของ function activity จากสมการ  $\Delta g = -nFE$  แทนไปในสมการ 2.54 จะได้

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{a_M^m a_N^n}{a_A^1 a_B^b} \right) \quad (2.65)$$

หรือจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปคือ

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{\prod a_{products}^{v_i}}{\prod a_{reactants}^{v_i}} \right) \quad (2.66)$$

โดยที่  $v_i$  คือ สัมประสิทธิ์โมลโมเลกุล

ตัวอย่าง  $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow H_2O$  ทำงานที่อุณหภูมิห้อง (ในที่นี้ น้ำ อุณหภูมิต่ำกว่า  $100^\circ C$  จะมีค่าความเข้มข้น  $\alpha_{H_2O} = 1$ ) และ  $H_2$  ที่ 3 atm , air ที่ 5 atm จะได้

$$E = + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{\prod a_{products}^{v_i}}{\prod a_{reactants}^{v_i}} \right) \quad (2.67)$$

$$E = 1.229 + \frac{(8.314)(298.15)}{(2)(96400)} \ln \left( \frac{1}{(3)(5+0.21)^{0.5}} \right) = 1.224V \quad (2.68)$$

เหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมี 3 อย่างคือ Activation loss, Ohmic Loss , Concentration loss ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ซึ่งหากรวมสมการทางไฟฟ้าจะได้

$$V = E_{Nernst} - \eta_{act} - \eta_{ohmic} - \eta_{conc} \quad (2.69)$$

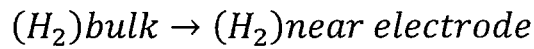
### 2.2.10 Activation Loss

Activation loss คือค่าพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนย้าย  $e^-$  และพลังงานที่ใช้ในการแยกพันธะเคมีใน anode and cathode ความสัมพันธ์ใน  $V_{act}$  ในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆจะต้องใช้ Activation energy

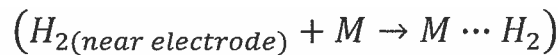
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง วิธีการคิด  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow H_2O$

1. Mass transport ของแก๊ซ  $H_2$  ไปยัง electrode



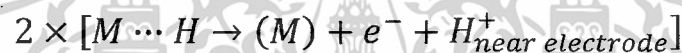
2. เกิดการดูด  $H_2$  ที่ผิวของ อิเล็กโทรด



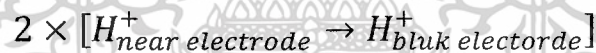
3. แบ่งโมเลกุลออกเป็นพันธะไฮโดรเจน สองพันธะที่ผิว electrode



4. เกิดการโอนถ่ายอิเล็กตรอนและปลดปล่อย  $H^+$



5. การถ่ายโอนของ  $H^+$  ออกจาก electrode



### 2.2.11 Potential and rate

สมการ Butler – Volmer ถูกพิจารณาจากค่า electrochemical kinetic ใช้เพื่ออธิบายค่า  $i$  กับ  $v$  ในระบบไฟฟ้าเคมีจะเพิ่มขึ้นแบบ exponential กับค่า activation loss ซึ่งเป็นค่า loss ทางไฟฟ้าเคมี โดยมีสมการดังนี้

$$j = j_0 \left( \frac{c_R^*}{c_R^{0*}} e^{\alpha n F \eta / (RT)} - \frac{c_P^*}{c_P^{0*}} e^{-(1-\alpha) n F \eta / (RT)} \right) \quad (2.70)$$

สมการ Activation kinetic อย่างง่าย Tafel Equation

เมื่อ  $\eta$  มีค่าน้อย(น้อยกว่า 15mV) ใช้ ทฤษฎี Taylor series เมื่อค่ายกกำลัง มีค่าน้อยกว่า 1

( $e^x \approx 1 + x$ ) จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการเปลี่ยนรูปจะได้สมการ

$$j = j_0 \frac{n F \eta_{act}}{RT} \quad (2.71)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\eta$  มีค่ามาก (ประมาณ 50-100mV) จะทำให้เทอมที่สองของสมการ Butler-Volmer equation ไม่มีผลดังนั้นจะได้สมการ

$$j = j_0 e^{\alpha n F \eta_{act} / (RT)} \quad (2.72)$$

ทำการหาค่า  $\eta$

$$\eta_{act} = -\frac{RT}{\alpha n F} \ln j_0 + \frac{RT}{\alpha n F} \ln j \quad (2.73)$$

ทำการพล็อตกราฟ ระหว่าง  $\eta_{act}$  กับค่า  $j$  จะได้เส้นตรงซึ่งสมการนี้เขียนในรูปแบบมาตรฐานจะได้อยู่รูปแบบ  $\eta_{act} = a + b \log j$  หรือที่เรียกว่า Tafel equation และค่า  $b$  จะเรียกว่า Tafel slope

### 2.2.12 Ohmic loss

ทุกวัสดุจะมีค่าต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียด้านพลังงานทางไฟฟ้า การลดลงทางไฟฟ้าเรียกว่า “Ohmic loss” จะขึ้นกับค่าความต้านทานของ Electrode ทั้งฝั่ง cathode และ Anode โดยขึ้นกับอุณหภูมิของ cell

โดยจากกฎของ Ohm's law

$$V = iR = i \left( \frac{l}{A\sigma} \right) \quad (2.74)$$

โดยที่เรากำหนดค่า  $l/A\sigma$  เป็นค่าตัวต้านทาน เมื่อแทนค่าไปในสมการจะได้ Voltage loss แทนค่าด้วยรูป  $\eta_{ohmic}$  และเขียนแทนความต้านทานดังกล่าวด้วย ความต้านทานทางไอออนิก และความต้านทานอิเล็กทรอนิกส์

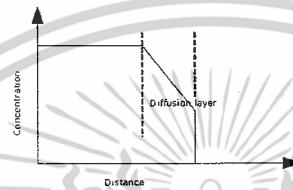
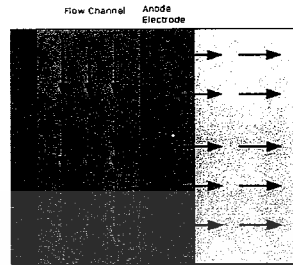
$$\eta_{ohmic} = iR_{ohmic} = i(R_{elec} + R_{ionic}) \quad (2.75)$$

### 2.2.13 Concentration Loss

Loss เนื่องจากการลดลงของผลิตภัณฑ์ความเข้มข้นของ gas จะทำให้เกิดการลดลงของความดันย่อยของผลิตภัณฑ์ ใน concentration loss จะแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ mass transport ใน Fuel cell electrode ส่วนที่สองคือ ส่วนของ mass transport ในส่วนของโครงสร้างของการไหล เหตุผลที่แตกต่างคือระยะทาง สำหรับในโครงสร้างช่องการไหลมีหน่วยเป็น เซนติเมตร, มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในส่วนของ fuel cell electrode จะมีหน่วยเป็น ไมโครเมตร , นาโนเมตร ในที่นี้เราจะพิจารณามาเฉพาะ ความเข้มข้นในส่วนของ electrode

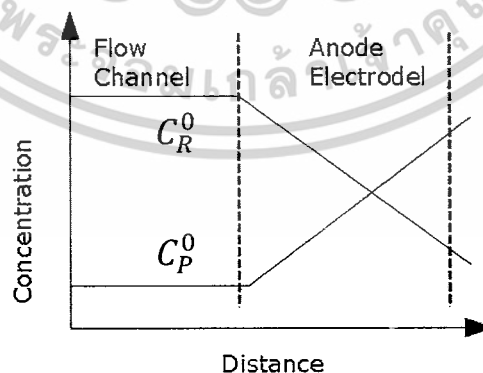


รูปที่ 2.6 Diffusion layer ใน anode

Electrochemical Reaction ของ อิเล็กโทรด จะได้รับอิทธิพลจาก

1. Nernst loss. ค่าของ  $v$  จะลดลงคำนวณได้จากสมการ Nernst เนื่องจากสารตั้งต้นความเข้มข้นลดลงและ ผลิตภัณฑ์ที่ catalyst layer เพิ่มขึ้น
2. Reaction loss โดยที่ activation loss จะเพิ่มเพราะความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ catalyst layer ลดลงและผลิตภัณฑ์ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

เมื่อรวมทั้งสองอย่างเข้าด้วยกัน



รูปที่ 2.7 mass transport ของ fuel cell

ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ขึ้นกับเวลาโดยเริ่มจาก  $t = 0$  ค่าเริ่มต้นที่  $C_R^0$  และ  $C_P^0$  ถ้าคิดที่ steady

เอกส state จะดูได้ที่เส้นในรูป สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Diffusion flux จะสามารถหาได้จาก

$$J_{diff} = -D \frac{dc}{dx} \quad (2.76)$$

สำหรับรูป 2.7 จะได้สมการ

$$J_{diff} = -D^{eff} \frac{C_R^* - C_R^0}{\delta} \quad (2.77)$$

ซึ่ง  $C_R^*$  เป็น Catalyst ความเข้มข้นของปฏิกิริยา

$C_R^0$  เป็นความเข้มข้นของสารตั้งต้น

$D^{eff}$  เป็น Effective diffusion coefficient ของปฏิกิริยาการแพร่

จากสมการ  $j = nFJ_{diff}$  แทนค่าใน Reactant concentration จะได้สมการ

$$j = -nfD^{eff} \frac{C_R^* - C_R^0}{\delta} \quad (2.78)$$

$$C_R^* = C_R^0 - \frac{j\delta}{nfD^{eff}} \quad (2.79)$$

โดยที่  $j$  คือ current density

สมการนี้บอกถึง ความเข้มข้นของสารตั้งต้นใน Catalyst layer น้อยกว่าค่า Bulk concentration

โดยขึ้นกับ  $D^{eff}$ ,  $j$ ,  $\delta$  ยิ่งถ้าเพิ่มค่า concentration มากยิ่งเกิดการสูญเสีย concentration loss

อย่างไรก็ตามค่า concentration loss สามารถลดลงได้โดย ลด layer thickness หรือ เพิ่มการแพร่

ค่าความเข้มข้นกับ Nernst Equation

จากสมการในเรื่อง Nernst Potential

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{\prod a_{products}^{v_i}}{\prod a_{reactants}^{v_i}} \right) \quad (2.80)$$

เราต้องการจะคิด Nernst potential เปลี่ยนไปเท่าไร เมื่อใช้ค่า  $C_R^*$  และ  $C_R^0$  จะได้สมการ

$$\eta_{conc} = E_{Nernst}^0 - E_{Nernst}^* \quad (2.81)$$

$$= \left( E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{1}{C_R^0} \right) - \left( E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{1}{C_R^*} \right) \quad (2.82)$$

$$= \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_R^0}{C_R^*} \quad (2.83)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง Nernst Equation ถูกแทนด้วยค่า  $C^0$ ,  $E_{Nernst}^*$  สามารถเขียนในรูป limits current density ได้

$$C_R^0 = \frac{j_L \delta}{nF D_{eff}} \quad (2.84)$$

และ  $C_R^0$  เขียนในเทอมของ Diffusion equation

$$C_R^* = C_R^0 - \frac{j_L \delta}{nF D_{eff}} \quad (2.85)$$

$$= \frac{j_L \delta}{nF D_{eff}} - \frac{j \delta}{nF D_{eff}} \quad (2.86)$$

อัตราส่วนของ  $C_R^0/C_R^*$  เขียนได้ดังนี้

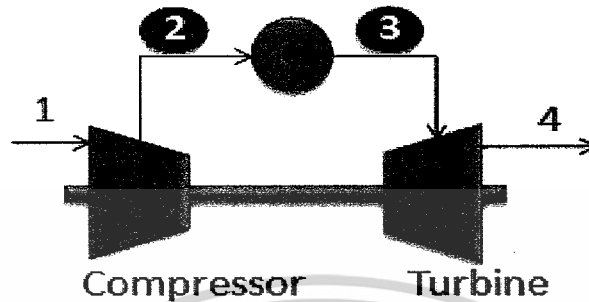
$$\frac{C_R^0}{C_R^*} = \frac{j_L \delta / (nF D_{eff})}{j_L \delta / (nF D_{eff}) - j \delta / (nF D_{eff})} \quad (2.87)$$

$$= \frac{j_L}{j_L - j} \quad (2.88)$$

เมื่อรวมสมการจะได้ค่า  $\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{j_L}{j_L - j}$

สมการข้างต้นจะใช้ได้ต่อเมื่อ  $j < j_L$  อย่างไรก็ตามเมื่อ  $j$  มีค่าเข้าใกล้  $j_L$ ,  $\eta_{conc}$  จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

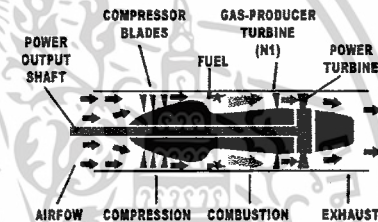
## 2.3 ระบบ Gas Turbine



รูปที่ 2.8 ระบบกังหันเทอร์ไบน์

### 2.3.1 อุปกรณ์หลัก

- Compressor (เครื่องอัดอากาศ)
- Combustor (ห้องเผาไหม้)
- Turbine (กังหันก๊าซ)

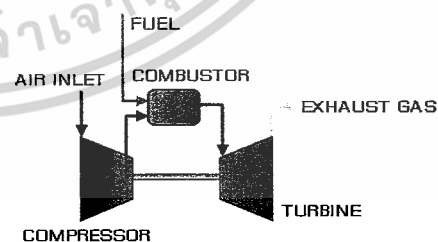


รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

### 2.3.2 หลักการทำงาน

การทำงานของเครื่องยนต์กังหันเทอร์ไบน์ เริ่มจากชุดอัดอากาศ (Compressor) ดูดและอัดอากาศให้มีความดันสูงขึ้น ส่งเข้าห้องเผาไหม้ (Combustors) ผสมกับเชื้อเพลิงที่ฉีดออกมาจากหัวฉีด (Fuel Nozzle) แล้วจุดด้วยหัวเทียน (Igniters) เกิดการเผาไหม้ ก๊าซที่เผาไหม้ขยายตัวพุ่งออกไปปะทะกับเทอร์ไบน์ ทำให้เทอร์ไบน์หมุน เมื่อเทอร์ไบน์หมุนก็ต่อเพลลาออกมาขับเคลื่อนชุดอัดอากาศ หมุนดูดและอัดอากาศอีกเป็นอันครา ว วัฏจักร

ปกติห้องเผาไหม้จะสร้างด้วยโลหะทนความร้อนสูง แต่เนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่เข้าไปขับเคลื่อนกังหันมีขีดจำกัด



รูปที่ 2.10 หลักการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

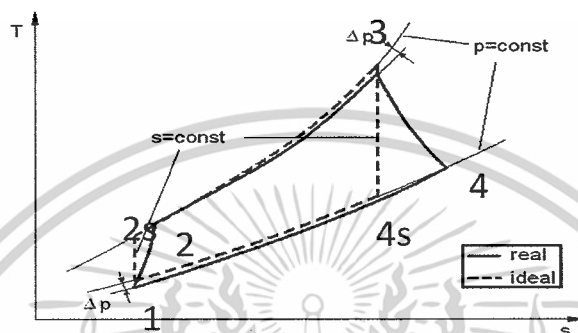
ดังนั้นอากาศประมาณ 1/6 ของอากาศอัดทั้งหมดจะถูกใช้ในห้องเผาไหม้ส่วนที่เหลือก็จะทำหน้าที่ผสมกับก๊าซร้อน พลังงานที่ผลิตจากเครื่องกังหันก๊าซ จะนำไปขับเคลื่อนเครื่องอัดอากาศประมาณ 60% ส่วนที่เหลือจะนำไปขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ประกอบช่วยงานอย่างอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่เหลือของก๊าซที่เผาไหม้จะพุ่งออกทางท่อท้าย (Tail Pipe) สำหรับเครื่องยนต์ jet แต่สำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าแล้วส่วนนี้จะเป็นส่วนที่จะต้องเอาไปดันน้ำให้เดือดเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเข้าไปใน stream turbine

การคำนวณพลังงาน

Non-ideal Air Standard Gas Turbine System



รูปที่ 2.11 กราฟ T-s Diagram ของระบบก๊าซเทอร์ไบน์

Turbine work

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{gas} \eta_t (h_3 - h_{4s}) \quad (2.89)$$

$$= \dot{m}_{gas} \eta_t c_{pg} T_3 \left( 1 - \frac{T_{4s}}{T_3} \right) \quad (2.90)$$

Compressor work

$$\dot{W}_c = \frac{\dot{m}_{air}}{\eta_c} (h_{2s} - h_1) \quad (2.91)$$

$$= \dot{m}_{air} \frac{c_{pa} T_1}{\eta_c} \left( \frac{T_{2s}}{T_1} - 1 \right) \quad (2.92)$$

โดย

$\dot{W}_t$  คือ งานที่เกิดจาก Turbine (kW/s)

$\dot{W}_c$  คือ งานที่ให้ Compressor (kW/s)

$\dot{m}_{gas}$  คือ mass flow rate of gas (kg/s)

$\dot{m}_{air}$  คือ mass flow rate of air (kg/s)

$\eta_t$  คือ efficiency of turbine

$\eta_c$  คือ efficiency of Compressor

$c_{pg}$  คือ Specific heat of gas = 1.40 (kJ/kg.K)

$c_{pa}$  คือ Specific heat of air = 1.005 (kJ/kg.K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 ทฤษฎีการเผาไหม้

#### 2.3.3.1 ปฏิกริยาการเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ โดยที่พลังงานที่สะสมอยู่ในโมเลกุลของเชื้อเพลิงถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปพลังงานความร้อนซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เชื้อเพลิงส่วนมากจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ส่วนตัวออกซิไดซ์คืออากาศ

#### 2.3.3.2 ผลลัพธ์ที่เกิดจากการเผาไหม้

ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ หรือไอเสียจากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย ซึ่งในการวิเคราะห์ จะตั้งสมมติฐานว่าในอากาศหนึ่ง 1 โมลประกอบด้วย  $N_2$  79% และ  $O_2$  21% นั่นคือใน 1 โมลของ  $O_2$  ที่เข้าทำปฏิกิริยาจะมี  $N_2$  3.76 โมลที่เข้าสู่ปฏิกิริยาด้วย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ถ้าเราต้องการให้  $O_2$  ทำปฏิกิริยา 1 โมล จะต้องใช้อากาศ 4.36 โมล ซึ่งในปฏิกิริยาการเผาไหม้  $N_2$  จะสมมติให้ไม่ทำปฏิกิริยาเนื่องจาก  $N_2$  เป็นก๊าซเฉื่อย

สำหรับก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักของการเผาไหม้สมบูรณ์แสดงได้ด้วย



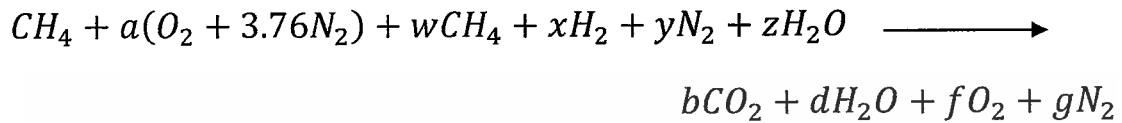
ในทางปฏิบัติปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะไม่สมบูรณ์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์นอกเหนือจากสารข้างต้นคือ  $CO$  และ ไฮโดรคาร์บอนบางส่วนที่เผาไหม้ไม่หมด นอกจากนี้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นประกอบกับมี Excess air มากพอ ไนโตรเจน จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ทำให้เกิดเป็น  $NO_x$  ขึ้นได้

#### 2.3.3.3 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ดีต้องอาศัยปัจจัยสำคัญ 3 ประการ คือ

1. เวลาในการเผาไหม้ต้องนานเพียงพอ เพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ได้หมดโดยไม่ถูกอากาศส่วนเกินพาออกไปก่อนถูกเผาไหม้
2. อุณหภูมิต้องสูงพอทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง
3. การผสมผสานกันของเชื้อเพลิงควรอยู่ในลักษณะของการผสมอย่างปั่นป่วนเพื่อให้เกิดการคลุกเคล้ากันอย่างดี

### 2.3.4 หลักการคำนวณพลังงานที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้

เมื่อมีการฉีดเชื้อเพลิง(มีเทน) เข้าไปในห้องเผาไหม้ โดยมีอากาศและก๊าซที่เหลือจากระบบ Fuel cell โดยสมมติฐานว่าก๊าซเป็น Ideal gas ,ความดันคงที่ ,Lean combustion และเป็นการเผาไหม้แบบ Adiabatic Flame Temperature จะเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้



เมื่อ a,b,d,f,g คือ mole ที่ใช้ในการเผาไหม้ของปฏิกิริยา

x,y,z คือ mole ที่เหลือจากระบบ Fuel Cell

w คือ mole ที่เหลือจากระบบ Reformer

ตารางที่ 2 1 ตารางคุณสมบัติของมีเทน

Properties	Methane
- Chemical formation	$CH_4$
- Molecular weight	16.043
- R (kJ/kg-K)	0.5182
- Volume (m <sup>3</sup> /kmol)	0.0993
- $\bar{\Delta}h_c^0 = -HHV$ (kJ/kmol) at 25°C 1 atm	-890,360

ในการดุลสมการใช้หลักการสมดุลมวล จะได้

$$X_i = \frac{N_i}{N_{TOT}} \quad (2.93)$$

โดย  $X_i$  คือ Mole Fraction ขององค์ประกอบ i

$N_i$  คือ โมล ขององค์ประกอบ i

$N_{TOT}$  คือ โมลรวมของก๊าซผสม

การหา Absolute Enthalpy

$$\bar{h}_i(T) = \bar{h}_{f,i}^0(T_{ref}) + \Delta\bar{h}_{s,i}(T) \quad (2.94)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $\bar{h}_i(T)$  คือ Absolute enthalpy at temperature  $T$ , (kJ / kmole)  
 $\bar{h}_{f,i}^0(T_{ref})$  คือ Enthalpy Of formation at standard reference state, (kJ / kmole)  
 $\Delta\bar{h}_{s,i}(T)$  คือ Sensible enthalpy change in going from  $T_{ref}$  to  $T$ , (kJ / kmole)

$$\bar{h}_{mix} = X_i \bar{h}_i \quad (2.95)$$

$$h_{mix} = \frac{\bar{h}_{mix}}{MW_{mix}} \quad (2.96)$$

#### 2.3.4.1 น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ของก๊าซผสมหาได้จาก

$$MW_{mix} = X_{CO_2} MW_{CO_2} + X_{H_2O} MW_{H_2O} + X_{N_2} MW_{N_2} + X_{air} MW_{air} \quad (2.97)$$

โดย  $MW_{mix}$  คือ มวลโมเลกุลของก๊าซผสม

#### 2.3.4.2 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F)<sub>Stoic</sub>

เป็นอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงโดยมวลทางทฤษฎีหรือตามสตอยชิโอเมตริกของการเผาไหม้

$$(A/F)_{stoic} = (m_{air}/m_{fuel})_{stoic} = 4.76a \left( \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}} \right) \quad (2.98)$$

เมื่อ  $m_{air}$  คือ มวลของอากาศ, kg  
 $m_{fuel}$  คือ มวลของเชื้อเพลิง, kg  
 $a$  คือ Molar Oxygen-fuel ratio, kmol/kmol  
 $MW_{air}$  คือ มวลโมเลกุลของอากาศ, kg/kmol  
 $MW_{fuel}$  คือ มวลโมเลกุลของเชื้อเพลิง, kg/kmol

#### 2.3.4.3 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio, $\phi$ )

ค่าอัตราส่วนสมมูล ( $\phi$ ) คือค่าที่บ่งบอกให้ทราบว่าส่วนผสมระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้งานได้จริงมีค่ามากหรือน้อยกว่าส่วนผสมระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี

$$\phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)_{Actual}} = \frac{(F/A)_{Actual}}{(F/A)_{Stoic}} \quad (2.99)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ถ้า  $\phi > 1$  หมายความว่า ส่วนผสมหนา (Rich Mixture)  
 $\phi < 1$  หมายความว่า ส่วนผสมบาง (Lean Mixture)  
 $\phi = 1$  หมายความว่า ส่วนผสมพอดี

#### 2.3.4.4 เปอร์เซ็นอากาศส่วนเกิน (% Excess Air)

เปอร์เซ็นอากาศส่วนเกิน คือ ปริมาณที่บอกให้ทราบว่า มีอากาศส่วนเกินกี่เปอร์เซ็นต์ โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100

$$\% \text{Excess air} = \frac{1-\phi}{\phi} \times 100\% \quad (2.100)$$

#### 2.3.4.5 การหาค่า Entropy

การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของก๊าซอุดมคติจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันเท่านั้น  
 คำนวณได้จากสมการ

$$\Delta \bar{s} = \bar{s}_3^0 - \bar{s}_{4s}^0 + R \ln \frac{P_{4s}}{P_3} \quad (2.101)$$

ซึ่งค่า  $\bar{s}^0$  เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและจะเท่ากับ 0 ที่อุณหภูมิ 0 องศาสัมบูรณ์หาได้จากตาราง  
 Thermodynamic

ส่วนค่า  $\Delta \bar{s}$  เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดัน ดังสมการ

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{C}_{v,av} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (2.102)$$

เมื่อ แทน  $dh = C_p dT$  และ  $P = RT/v$  ซึ่งเป็นคุณสมบัติของก๊าซอุดมคติ

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{C}_{p,av} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (2.102)$$

จากเงื่อนไข Isentropic  $\bar{s}_3 = \bar{s}_{4s}$  นั่นคือ  $\Delta \bar{s} = 0$  แทนในสมการ 2.101  
 จะได้

$$\bar{s}_{4s}^0 = \bar{s}_3^0 + R \ln \frac{P_{4s}}{P_3} \quad (2.103)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเป็นก๊าซผสม

$$S^0_{mix} = \frac{\bar{s}^0_{mix}}{MW_{mix}} \quad (2.104)$$

$S^0_{mix}$  คือ ปริมาณเอนโทรปีต่อหน่วยมวล kJ/K kg

$\bar{S}^0_{mix}$  คือ ปริมาณเอนโทรปีต่อหน่วยโมล kJ/K kmole

### 2.3.4.6 การหาค่าอุณหภูมิเปลวไฟแอดิยาบติก (Adiabatic Flame Temperature)

จากความสัมพันธ์ของ ความดันคงที่ และเป็น กระบวนการแอดิยาบติกจะได้ว่า

$$Q = \Delta H = 0 \quad (2.105)$$

$$\Delta H = H_{react} - H_{prod} = 0 \quad (2.106)$$

ดังนั้น

$$H_{react} = H_{prod} \quad (2.107)$$

$$\sum_{react} (N_i \bar{h}_{f,i}) = \sum_{prod} (N_i \bar{h}_{f,i}) \quad (2.108)$$

$$\text{เมื่อ } \bar{h}_{f,i} = (\bar{h}^0_{f,i})_{298} + \int_{298}^{T_{ad}} \bar{c}_{p,i} dT \quad (2.109)$$

ในส่วนทางด้าน Reactant เทอมของการอินทิเกรตจะมีค่าเป็น 0 แต่ในส่วนทางด้านของ Product จะมีค่าต่างๆขึ้นอยู่กับ  $T_{ad}$  ที่กำหนดจากนั้นนำค่าต่างๆ มาทำการหาค่า Adiabatic Flame Temperature ได้จาก

$$H_{react} = T_{ad} (\sum_{prod} N_i \bar{c}_{p,T_{ad}}) - \sum_{prod} N_i (\bar{h}^0_{f,i} + \bar{c}_{p,T_{ad}} \cdot 298) \quad (2.110)$$

$$T_{ad} = \frac{[H_{react} - \sum_{prod} N_i (\bar{h}^0_{f,i} - \bar{c}_{p,T_{ad}} \cdot 298)]}{\sum_{prod} (N_i \cdot \bar{c}_{p,T_{ad}})} \quad (2.111)$$

ในการหาค่า  $T_{ad}$  จะใช้วิธี Trial & Error โดยสมมติอุณหภูมิขึ้นมา แล้วนำอุณหภูมิตัวกล่ามาทำการเปิดตารางหาค่า  $\bar{c}_{p,T_{ad}}$  แล้วคำนวณ  $T_{ad}$  ออกมาและตรวจสอบ  $T_{ad}$  ว่าต่างกับอุณหภูมิที่สมมติเกิน 100k หรือไม่ถ้าต่างเกินหาค่าโดยสมมติอุณหภูมิใหม่ ให้ได้ค่า  $T_{ad}$  ต่างกับค่าที่คำนวณไม่เกิน 100K จึงแสดงว่าค่าที่คำนวณได้คือ  $T_{ad}$  นั่นเอง

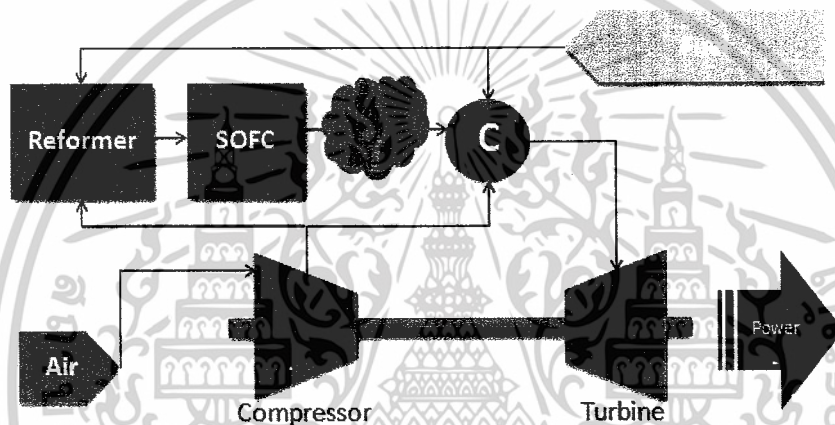
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและพัฒนาระบบ

#### 3.1 ภาพรวมของระบบ

ระบบที่ทำการวิเคราะห์ที่นั่นถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย คือ ระบบผลิตไฮโดรเจน ระบบ Fuel Cell และระบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ซึ่งจะอธิบายการวิเคราะห์ ออกแบบและวิธีการคำนวณไว้ในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.1 รูประบบรวม

#### 3.2 ขั้นตอนการออกแบบและการพัฒนาระบบ

การออกแบบ และ พัฒนาระบบ นั้นได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

##### 3.2.1 ศึกษาการทำงานของ โปรแกรม Matlab

เริ่มจากการศึกษาโปรแกรมด้วยวิธีเขียน โปรแกรมตามตัวอย่างจากTutorialซึ่งเป็นเอกสารทั้งหมดที่ทางผู้ผลิตโปรแกรมให้ข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการใช้โปรแกรมมา

##### 3.2.2 วิเคราะห์ความต้องการของระบบซึ่งสามารถสรุปความต้องการออกมาได้ดังนี้

##### ระบบ Reformer

- พิจารณาระบบที่ Steady state
- มีคมีเทนและอากาศในสถานะบรรยากาศ

##### ระบบ Fuel Cell

- พิจารณาระบบ SOFCรับค่าเฉพาะ  $H_2$  มาส่วนสารอื่นๆจะถูกส่งผ่าน ไปยังห้องเผาไหม้
- ในสมการ Nernst Equation ความเข้มข้นของสารคิดเฉพาะ pure  $H_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ระบบ Gas Turbine

- ต้องการฉีดเชื้อเพลิงมีเทนผสมกับอากาศเพื่อให้เกิดการเผาไหม้
- ก๊าซอุดมคติ มีความดันคงที่
- เผาไหม้ที่อุณหภูมิแอเดียบาติกแบบ Lean combustion ( $\phi \leq 1$ )

#### 3.2.3 นำข้อมูลที่ได้มาออกแบบระบบ

ออกแบบระบบใน Matlab โดยใช้ Simulink เป็นแบบ Block Diagram เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์หาค่ามูลที่ต้องการและเพื่อให้ได้ความคล่องจอกกันในการทำงานเดิมแต่เพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันมากกว่าที่เคยคำนวณด้วยสูตรทีละสูตรซึ่งแบ่งการเชื่อมต่อออกเป็น 3 ระบบย่อยด้วยกัน

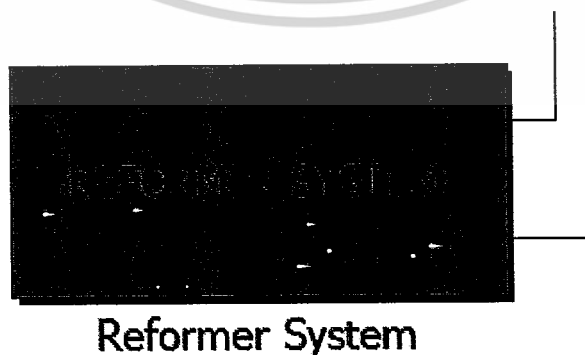
### 3.3 Block Diagram



รูปที่ 3.2 รูประบบรวมสร้างด้วย Block Diagram

ได้อธิบายโปรแกรม ได้ เป็น 3 ส่วน ดังนี้

#### 3.3.1 Reformer System

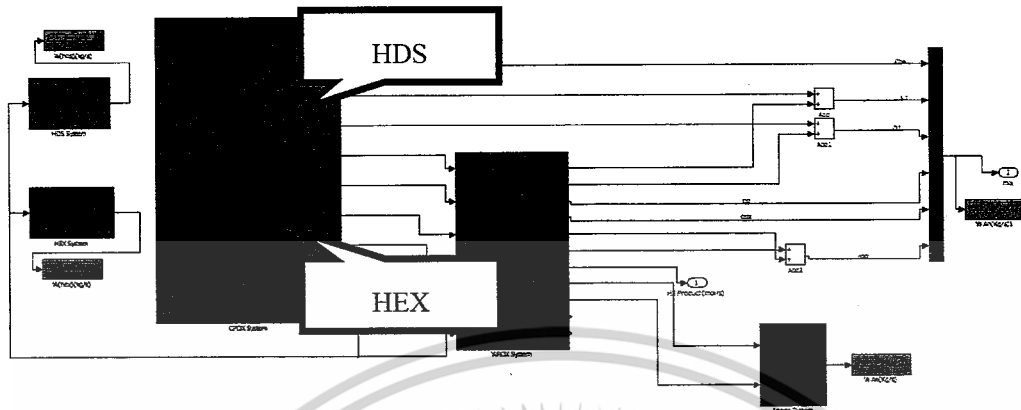


รูปที่ 3.3 Block Diagram ของระบบ Reformer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1.1 Block Hydro-desulfurizer Volume (HDS) & Block Heat Exchanger

#### Volume (HEX)



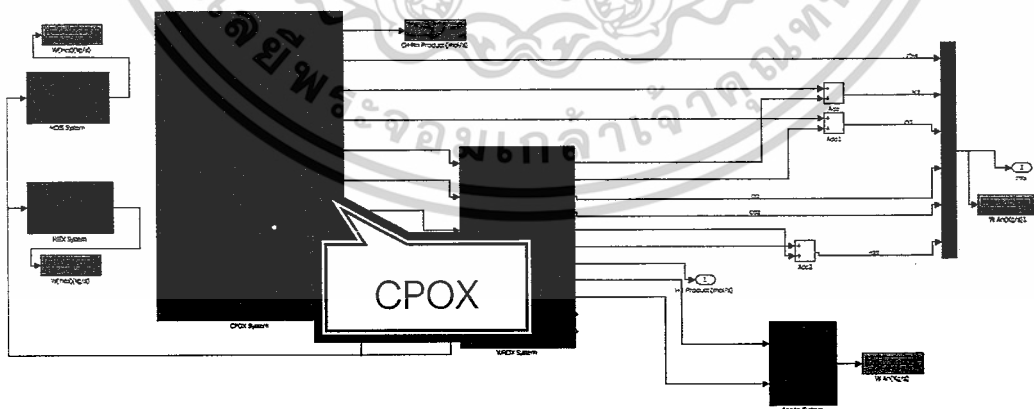
รูปที่ 3.4 Reformer system

ระบบ Fuel Processing Process (FPS) อากาศจะไหลผ่านมาทาง HEX และมีเทนจะไหลมาทาง HDS อากาศและมีเทนจะไหลมารวมกันที่ห้อง Mixer (MIX) เราสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$W^{hds} = X_{CH_4}^{mix} W^{cpoX} \tag{3.1}$$

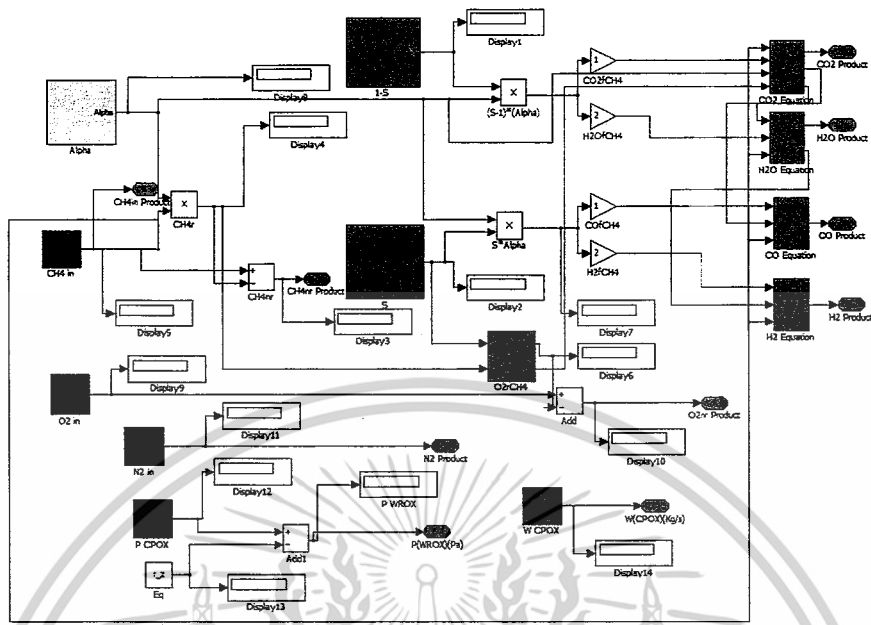
$$W^{hex} = X_{air}^{mix} W^{cpoX} \tag{3.2}$$

### 3.3.1.2 Block Catalytic Partial Oxidation (CPOX)



รูปที่ 3.5 CPOX system

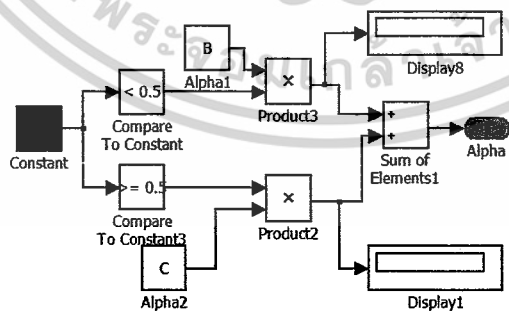
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 รายละเอียดของ CPOX system2

จากรูปภายใน CPOX SYSTEM ระบบ CPOX มีตัวแปรที่กำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ อยู่ 3 ตัว คือ

- 1) Lamda  $O_2$  to  $CH_4$  ( $\lambda_{O_2C}$ ) ในสมการนี้  $\lambda_{O_2C}$  คืออัตราส่วนของโมล ออกซิเจนส่วนด้วยมีเทน
- 2) Alpha ( $\alpha$ ) ในสมการนี้  $\alpha$  คืออัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงโมลของมีเทนที่ทำปฏิกิริยาส่วนด้วยอัตราการไหลเชิงโมลของมีเทนที่เข้ามาในระบบ



รูปที่ 3.7 Alpha system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปสามารถแบ่งพิจารณาได้ 2 กรณีคือ ค่า  $\lambda_{O2C}$  มากกว่า 0.5 หรือ  $\lambda_{O2C}$  น้อยกว่า 0.5

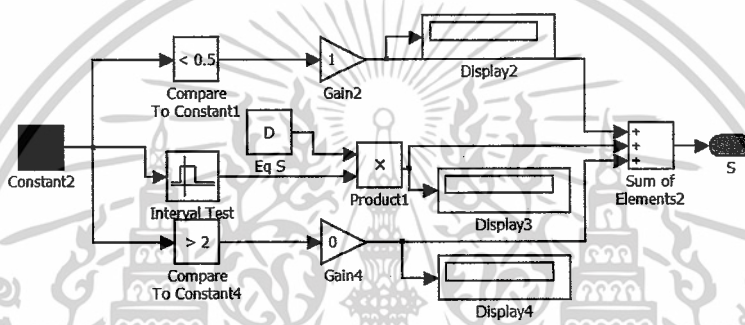
-ค่า  $\lambda_{O2C} < 0.5 ; \alpha = \alpha_1 \lambda_{O2C}$

-ค่า  $\lambda_{O2C} \geq 0.5 ; \alpha = 1 - (1 - 0.5\alpha_1)(1 - \tanh(\alpha_2(\lambda_{O2C} - 0.5)))$

$$\alpha_1 = \min (2, 0.0029T_{cprox} - 1.185) \tag{3.3}$$

$$\alpha_2 = 0.215e^{3.9*(10^{-8})((T_{cprox}-600)^3)} \tag{3.4}$$

3) Selectivity (S) คือตัวบ่งบอกปฏิกิริยาว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในห้อง CPOX



รูปที่ 3.8 S system

$$\begin{aligned}
 S &= 1 & , \lambda_{O2C} &< \frac{1}{2} \\
 S &= \frac{2}{3}(2 - \lambda_{O2C}) & , \frac{1}{2} &\leq \lambda_{O2C} \leq 2 \\
 S &= 0 & , \lambda_{O2C} &> 2
 \end{aligned}$$

ถ้า S = 1

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ มีเทนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้คาร์บอนมอนอกไซด์กับไฮโดรเจน

ถ้า  $S = \frac{2}{3}(2 - \lambda_{O2C})$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ มีเทนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้คาร์บอนมอนอกไซด์กับไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ

ถ้า S = 0

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ มีเทนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้นกำหนดให้ตัวแปรต้นคือ  $\lambda_{O2C}$  ,  $W_{CPOX}$  ,  $T_{CPOX}$

เมื่อกำหนดค่าที่กล่าวมาข้างต้นสามารถหาค่า

ตัวอย่างการคำนวณ กำหนดให้  $\lambda_{O_2C} = 0.6$ ,  $W_{CPOX} = 0.05$  kg/s,  $T_{CPOX} = 1000$  C,  $\eta_{WROX} = 0.5$   
 $W_{WGS} = 0.05$  kg/s,  $W_{PROX} = 0.05$  kg/s

$$O_2C \equiv \frac{n_{O_2}}{n_{CH_4}} = y_{O_2}^{atm} \frac{p_{air}^{mix}}{p_{CH_4}^{mix}} \quad (3.5)$$

เราสามารถแก้สมการ  $\frac{p_{air}^{mix}}{p_{CH_4}^{mix}}$  แทนค่าที่ได้มาลงในสมการ

$$x_{air}^{mix} = \frac{1}{1 + \frac{M_{CH_4} p_{CH_4}^{mix}}{M_{air}^{atm} p_{air}^{mix}}} \quad (3.6)$$

$$x_{CH_4}^{mix} = \frac{1}{1 + \frac{M_{air}^{atm} p_{CH_4}^{mix}}{M_{CH_4} p_{air}^{mix}}} \quad (3.7)$$

$$x_{N_2}^{mix} = x_{N_2}^{atm} x_{air}^{mix} \quad (3.8)$$

$$x_{O_2}^{mix} = x_{O_2}^{atm} x_{air}^{mix} \quad (3.9)$$

$$x_{H_2O}^{mix} = x_{H_2O}^{atm} x_{air}^{mix} \quad (3.10)$$

ทำให้เราสามารถหาค่า  $x_{air}^{mix}$ ,  $x_{CH_4}^{mix}$  ได้

$$N_{i,in} = \frac{x_i^{mix} W_{cpx}}{M_i} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ให้เมื่อเรารู้  $x_{air}^{mix}$ ,  $x_{CH_4}^{mix}$ ,  $x_{N_2}^{mix}$ ,  $x_{O_2}^{mix}$ ,  $x_{H_2O}^{mix}$ ,  $W_{cpx}$ ,  $M_i$  เราสามารถหา  $N_{i,in}$  ของสารแต่ละตัวได้ และเมื่อเรารู้ค่า  $\lambda_{O_2C}$  เราสามารถหาค่า  $S$  และ  $\alpha$  ได้ จากเงื่อนไขที่ได้มา เมื่อทราบค่า  $\lambda_{O_2C}$ ,  $\alpha$ ,  $S$  เราสามารถหาค่าต่างๆมาแทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} N_{H_2} &= N_{H_2fCH_4} - N_{H_2rO_2} \\ &= [2Sa - 2\beta (X_{O_2C} - (2 - \frac{3}{2}S)a)\text{sign}(S)] N_{CH_4in} \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} N_{CO} &= N_{COfCH_4} - N_{COro_2} \\ &= [Sa - 2(1-\beta)(X_{O_2C} - (2 - \frac{3}{2}S)a)\text{sign}(S)] N_{CH_4in} \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} N_{CO_2} &= N_{CO_2fCH_4} + N_{CO_2fCO} \\ &= [(1-s)a + 2(1-\beta)(X_{O_2C} - (2 - \frac{3}{2}S)a)\text{sign}(S)] N_{CO_2fCH_4} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$N_{H_2O} = N_{H_2fCH_4} + N_{H_2ofCH_2} + N_{H_2Oin}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

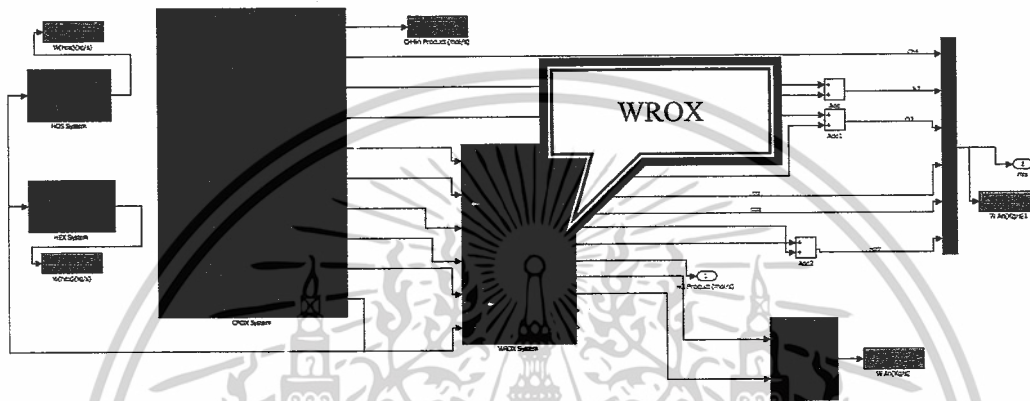
$$= [2(1-s)a + 2\beta(X_{O_2C} - (2 - \frac{3}{2}S)a)\text{sign}(S)] N_{CH_4in} + N_{H_2Oin} \quad (3.15)$$

$$N_{CH_4} = (1-a) N_{CH_4in} \quad (3.16)$$

$$N_{O_2} = N_{O_2in} - N_{O_2r} = (N_{O_2in} - (2 - \frac{3}{2}S)a N_{CH_4in}) \text{sign}(s) \quad (3.17)$$

$$N_{N_2} = N_{N_2in} \quad (3.18)$$

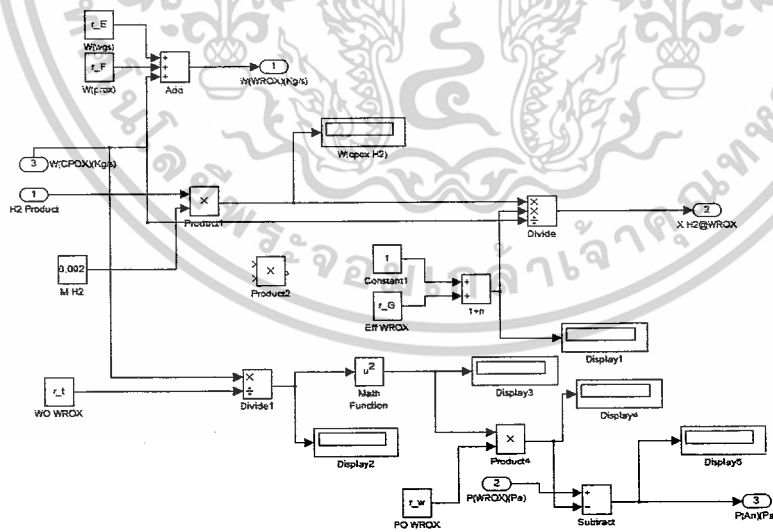
### 3.3.1.3 Water Gas Shift Converter and Preferential Oxidation Reactor (WROX)



รูปที่ 3.9 WROX system

ภายในของ Block WROX แบ่งออกเป็น 3 blockย่อยๆ

#### 1) Block WROX



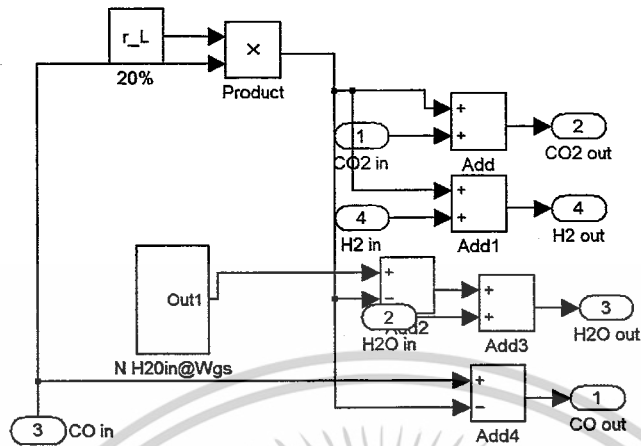
รูปที่ 3.10 WROX system

จากรูปที่ 3.10 WROX system ซึ่งประกอบอยู่ในรูปที่ 3.9 WROX system

เป็นส่วนในการคำนวณอัตราการไหลของห้องและความดันของห้องที่ได้รับมาจาก Block CPOX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

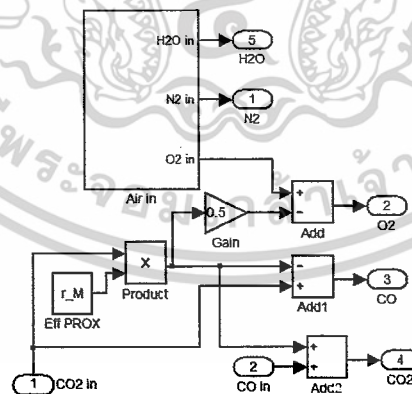
## 2) Block WGS



รูปที่ 3.11 WGS system

จากรูปที่ 3.11 WGS system ซึ่งประกอบอยู่ในรูปที่ 3.9 WROX system โดยมีน้ำที่ฉีดเข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์โดยประสิทธิภาพในการกำจัดกำหนดให้อยู่ที่ 20%

## 3) Block PROX



รูปที่ 3.12 PROX system

จากรูปที่ 3.12 PROX system ซึ่งประกอบอยู่ในรูปที่ 3.9 WROX system โดยมีออกซิเจนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์คือคาร์บอนไดออกไซด์โดยประสิทธิภาพในการกำจัดกำหนดให้อยู่ที่ 30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตัวอย่าง การคำนวณ

จากตัวอย่างการคำนวณของห้องปฏิกริยา CPOX กำหนดค่า  $\lambda_{O_2C} = 0.6$ ,  $W_{CPOX} = 0.05$  kg/s,  $T_{CPOX} = 1000$  C,  $\eta_{WROX} = 0.5$   $W_{WGS} = 0.05$  kg/s,  $W_{PROX} = 0.05$  kg/s

จากที่โจทย์ให้มาเราสามารถคำนวณหา อัตราการไหลเชิง โมลของสารที่ไหลออกมาจากห้องได้ ต่อมาเมื่อเราทราบค่าประสิทธิภาพของห้องนี้คือ 50% โดยแบ่งออกเป็น WGS 20%และ PROX 30%

จากหัวข้อที่แล้วเรารู้อัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์แต่ในทางปฏิบัติเราไม่ต้องการได้ให้คาร์บอนมอนอกไซด์ โจทย์กำหนดประสิทธิภาพในการกำจัดของห้อง WGS คือ 20% เมื่อคาร์บอนมอนอกไซด์เข้ามา 1 โมล คาร์บอนมอนอกไซด์จะทำปฏิกริยาเปลี่ยนเป็น คาร์บอน ไดออกไซด์ 0.5 โมล

เมื่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหลือจากห้อง WGS เข้ามาที่ห้อง PROX ที่กำหนดประสิทธิภาพไว้ 30%คาร์บอนมอนอกไซด์ก็จะทำปฏิกริยาตกลงไปอีก 30% และสามารถหาอัตราการไหลเชิงมวลได้จากสูตร

$$W = W_0 \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\Delta p_0}} \quad (3.19)$$

```

1 - lam=0.6 ; % (lamda O2C) (Assume)
2 - i=0.05 ; % (Wcpx) (Kg/s) (Assume)
3 - h=1000 ; % (Tcpx) (Assume)
4 - r_y=300000 ; % (F CPOX) (Pa) (Assume)
5 - r_E=0.06 ; % (Wwgs) (Assume)
6 - r_F=0.06 ; % (Wprox) (Assume)
7 - r_G=0.5 ; % (eff WROX) (Assume)
8 - r_L=0.2 ; % (eff WGS) (Assume)
9 - r_H=0.3 ; % (eff PROX) (Assume)
10 - %-----
11 - d=1.7125 ; % (k air/k CH4 (atm) (constant)
12 - r_k=0.56 ; % (H2Omass fraction@atm) (constant)
13 - r_l=0.16 ; % (N2mass fraction@atm) (constant)
14 - r_m=0.27 ; % (O2mass fraction@atm) (constant)
15 - r_s=0.05 ; % (W0 CPOX) (Kg/s) (constant)
16 - r_t=0.06 ; % (W0 WROX) (Kg/s) (constant)
17 - r_u=0.06 ; % (W0 AM) (Kg/s) (constant)
18 - r_v=3000 ; % (P0 CPOX) (Pa) (constant)
19 - r_w=2000 ; % (P0 WROX) (Pa) (constant)
20 - r_x=600 ; % (P0 Amb) (Pa) (constant)
21 - r_H=100000 ; % (P Amb) (Pa) (constant)
22 - r_I=2/3 ; % (Belta) (constant)
23 - x=1.715 ; % (Alpha1) (constant)
24 - y=2.608 ; % (Alpha2) (constant)
25 - %-----
26 - c=lam/0.1827 ; % (p air/p CH4) (Equation)
27 - e=d*c ; % (eq4*eq5) (Equation)
28 - f=1/(1+e) ; % (x CH4@mix) (Equation)
29 - g=1/(1+(1/e)) ; % (x air@mix) (Equation)
30 - jj=f*i/0.016 ; % (N CH4, in) (Equation)
31 - r_n=(r_k)*g ; % (H2Omass fraction@mix) (Equation)
32 - r_o=(r_l)*g ; % (N2mass fraction@mix) (Equation)
33 - r_p=(r_m)*g ; % (O2mass fraction@mix) (Equation)
34 - r_q=(r_p)*i/0.032 ; % (N O2, in) (Equation)
35 - B=x*lam ; % (Alpha)1 (Equation)
36 - C=(1-(1-(0.5*x))*(1-tanh(y*(lam-0.5)))) ; % (Alpha)2 (Equation)

```

### รูป 3.13 M-file reformer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นตัวกำหนดค่าตัวแปรต่างๆของโปรแกรมอาทิ โดยตัวแปรต้นของสมการนี้กำหนดให้  $\lambda_{O_2C}$ ,  $\eta_{CPOX}$ ,  $W_{PROX}$ ,  $W_{WGS}$ ,  $T_{CPOX}$ ,  $P_{CPOX}$  และ  $W_{CPOX}$

$$\text{วิธีคิดประสิทธิภาพ} \quad \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{N_{H_2}}{N_{CH_4}} \quad (3.20)$$

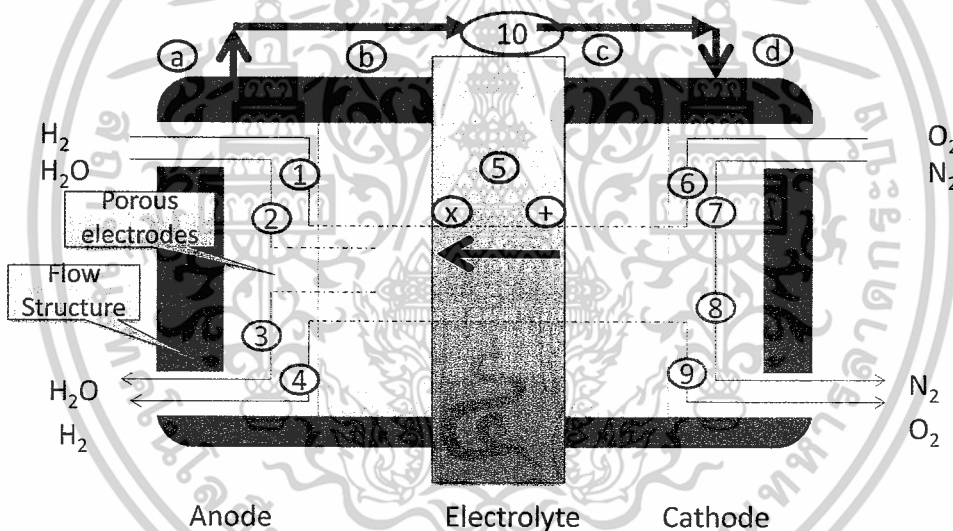


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 SOFC System



รูปที่ 3.14 Block Diagram ของระบบ Fuel Cell



รูปที่ 3.15 Flux ของการไหลใน SOFC

สำหรับสมการ 1D fuel cell ซึ่งสามารถหาค่า  $i-v$  curve จากสมการ SOFC ในรูป เราสามารถอธิบาย H<sub>2</sub> H<sub>2</sub>O ใน anode ในรูปได้จากสมการ

$$J_{H_2}^A = \frac{-p^A D_{H_2, H_2O}^{eff}}{RT} \frac{dx_{H_2}}{dz} \tag{3.21}$$

$$J_{H_2O}^A = \frac{-p^A D_{H_2, H_2O}^{eff}}{RT} \frac{dx_{H_2O}}{dz} \tag{3.22}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้สมการ Current density จากการอินทิเกรตสมการ 6.23 จากเขต Boundary conditions ที่ผิว a จะได้

$$X_{H_2}(z) = X_{H_2@a} - z \frac{jRT}{2Fp^A D_{H_2,H_2O}^{eff}} \quad (3.23)$$

$$X_{H_2O}(z) = X_{H_2O@a} + z \frac{jRT}{2Fp^A D_{H_2,H_2O}^{eff}} \quad (3.24)$$

และทำเช่นเดียวกันในฝั่ง b ได้

$$X_{H_2@b} = X_{H_2@a} - t^A \frac{jRT}{2Fp^A D_{H_2,H_2O}^{eff}} \quad (3.25)$$

$$X_{H_2O@b} = X_{H_2O@a} + t^A \frac{jRT}{2Fp^A D_{H_2,H_2O}^{eff}} \quad (3.26)$$

โดยที่  $t^A$  คือ anode thickness และทำเช่นเดียวกันที่ฝั่ง cathode

$$X_{O_2@c} = X_{O_2@d} + t^C \frac{jRT}{4Fp^A D_{O_2,N_2}^{eff}} \quad (3.27)$$

ในที่นี้เราไม่พิจารณา  $N_2$  เพราะมันจะไม่ทำปฏิกิริยาใน fuel cell เมื่อรวมทั้งสองสมการเข้าด้วยกัน

$$\text{Cathode} = \frac{RT}{4\alpha F} \ln \left[ \frac{j}{j_0 P^c \{x_{O_2(d)} - t^c [jRT/4fP^c D_{O_2,N_2}^{eff}]\}} \right] \quad (3.28)$$

สำหรับ ohmic loss

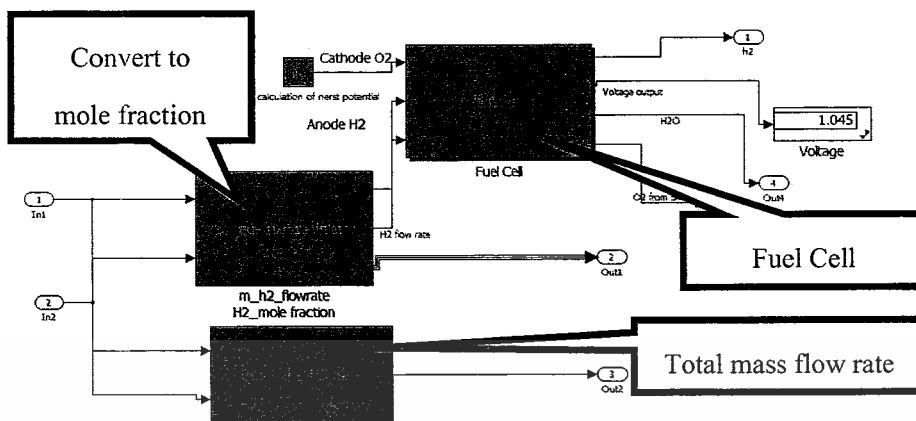
$$\text{Ohmic loss} = j \frac{t^M T}{Ae^{-\Delta G/(RT)}} \quad (3.29)$$

สุดท้ายสามารถรวมสมการได้คือ

$$V = E_{thermo} - \eta_{ohmic} - \eta_{cathode} \quad (3.30)$$

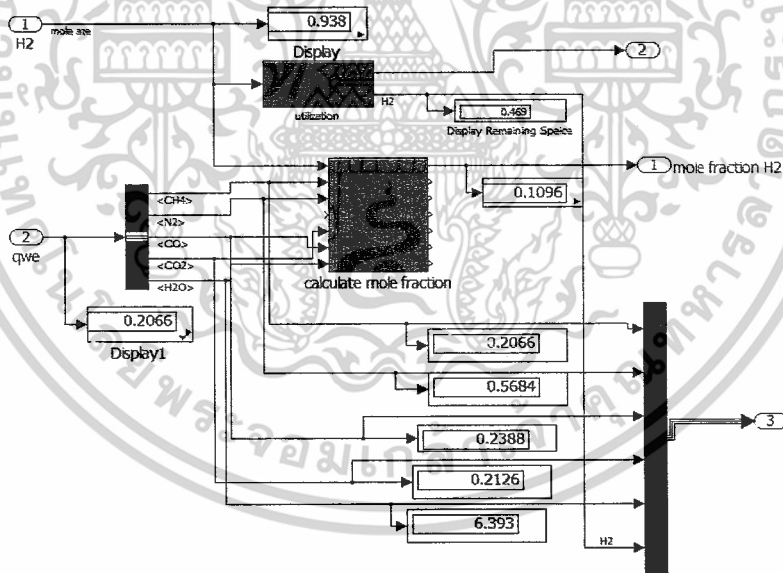
$$V = E_{thermo} - j \frac{t^M T}{Ae^{-\Delta G/(RT)}} - \frac{RT}{4\alpha F} \ln \left[ \frac{j}{j_0 P^c \{x_{O_2(d)} - t^c [jRT/4fP^c D_{O_2,N_2}^{eff}]\}} \right] \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



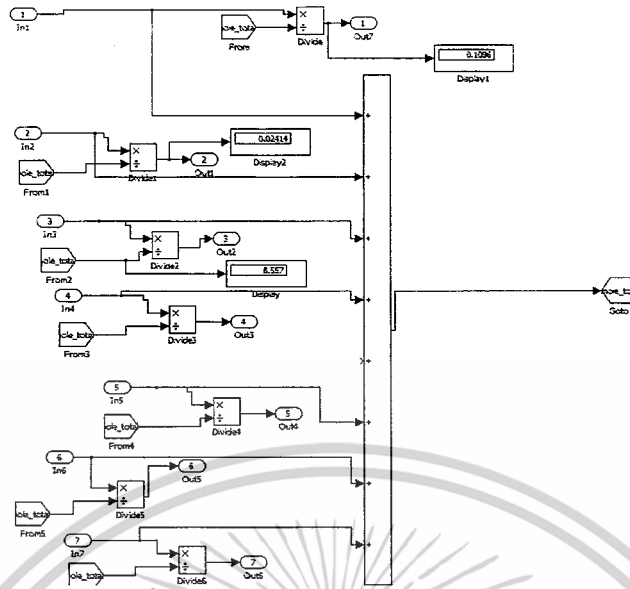
รูปที่ 3.16 sub-system model ใน Fuel Cell

หลังจากได้รับค่าเข้ามาที่หอคเซลล์แล้ว ทำการเปลี่ยนหน่วย โดยที่ข้อมูลจะเข้าไปที่ (2) และ (3) เพื่อเปลี่ยนหน่วยอัตราการไหล  
ภายใน บล็อก (2) flow rate to mole fraction



รูปที่ 3.17 sub-system model mole fraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 sub-system model total mole

ซึ่งจะทำการเปลี่ยนอัตราการไหล mole/s ไปเป็น mole fraction

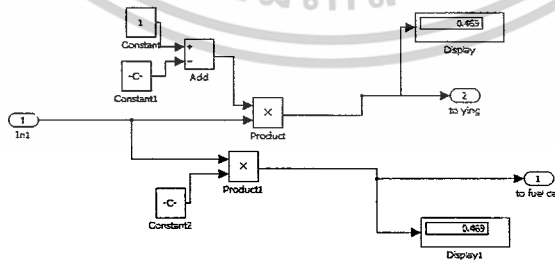
$$x_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} = \frac{N_i}{N_{tot}} \quad (3.32)$$

โดยที่  $x_i$  คือ Mole fraction ของสารแต่ละชนิด

$N_i$  คือ โมลของสารแต่ละชนิด, mole/s

$N_{tot}$  คือ อัตราการไหล, mole/s

ในบล็อกนี้จะประกอบด้วย Sub-model ของ utilization ซึ่งคือค่าที่ว่า การทำปฏิกิริยาของ เชื้อเพลิง มากน้อยเพียงใด



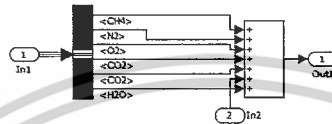
รูปที่ 3.19 sub-system model ใน water generate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรในการคำนวณ

$$utilization = \frac{H_2 used}{H_2 input} \quad (3.33)$$

ภายใน บล็อก (3) Total mass flow rate



รูปที่ 3.20 sub-system model ในการ convert mole

จะรับค่าอัตราการไหลของสารแต่ละชนิดมารวมกัน ได้จากสมการ

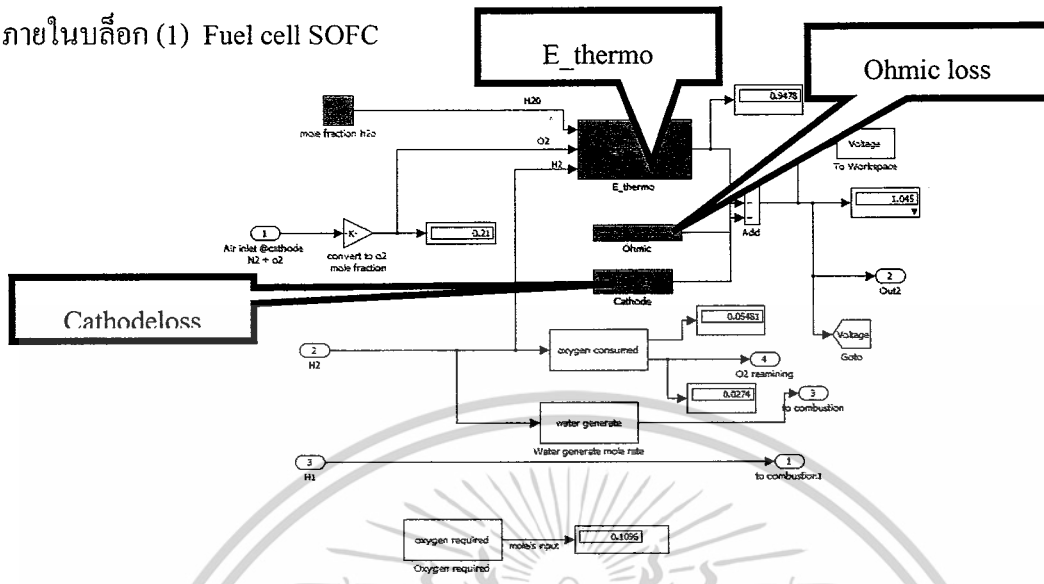
$$\dot{N}_{tot} = \sum_{i=1}^n \dot{N}_i \quad (3.34)$$

โดยที่  $\dot{N}_{tot}$  คือโมลรวม

$\dot{N}_i$  คือ เป็นโมลของสารแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในบล็อก (1) Fuel cell SOFC

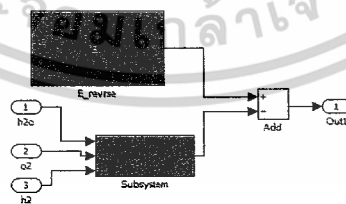


รูปที่ 3.21 sub-system model ใน SOFC

หลังจากข้อมูลเข้ามาที่ หอเซลล์แล้วจะนำค่า H<sub>2</sub> มาคิดที่ fuel cell ส่วนสารที่เหลือจะส่งผ่านไป ยัง combustor และในส่วนของ fuel cell จะมีการป้อน อากาศเข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยา กับ H<sub>2</sub> และได้ สมการไฟฟ้า จากNernst potential ใน บล็อก e\_thermo และส่วนของ loss ต่างๆ จะถูกคิดและนำไป หักลบ ohmic loss และ cathode loss

$$V = E_{thermo} - \eta_{ohmic} - \eta_{cathode} \tag{3.35}$$

ภายใน block E\_thermo



รูปที่ 3.22 sub-system model Nernst equation

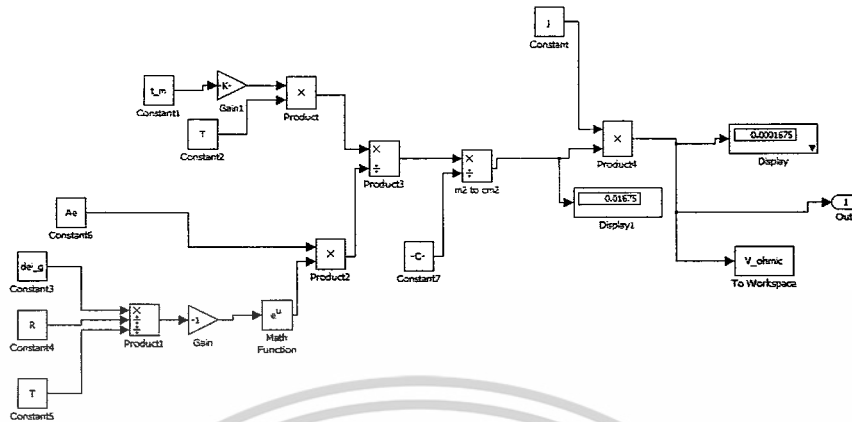
จะคำนวณหาค่า โดยที่จะมีผลของทางความเข้มข้น และ อุณหภูมิทางไฟฟ้าจากสมการ

$$E = E_T + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{\prod a_{products}^{v_i}}{\prod a_{reactants}^{v_i}} \right) \tag{3.36}$$

$$E_T = E^0 + (2.304 \times 10^{-4} \text{ V/K})(T - T_0) \tag{3.37}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใน block Ohmic loss

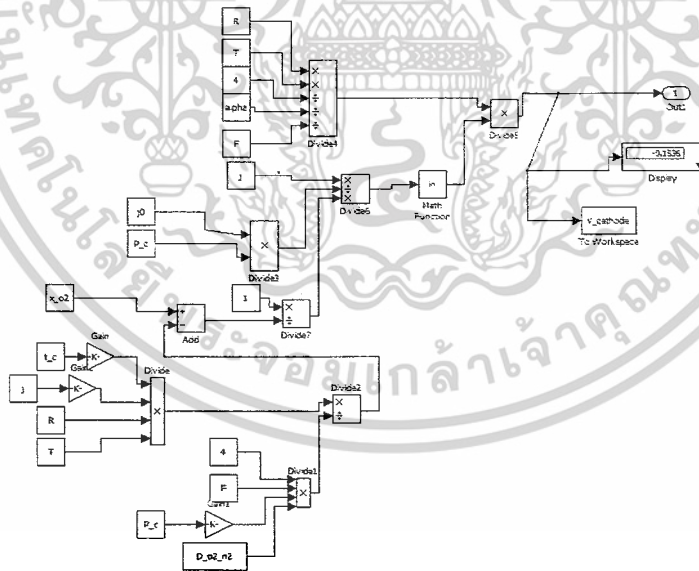


รูปที่ 3.23 sub-system model Ohmic loss

จะหาค่า loss เนื่องจากความต้านทานได้จากสมการ

$$Ohmic\ loss = j \frac{t^M T}{Ae^{-\Delta G/(RT)}} \quad (3.38)$$

ภายใน block Cathode loss



รูปที่ 3.24 sub-system model ใน Cathode loss

การหาค่า loss เนื่องจาก ความเข้มข้นที่ฝั่ง cathode ได้จาก

$$Cathode\ loss = \frac{RT}{4\alpha F} \ln \left[ \frac{j}{j_0 P^c \{x_{O_2(d)} - t^c [jRT/4fP^c D_{O_2, N_2}^{eff}]\}} \right] \quad (3.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปทำการทำนายค่าจากพลังงานไฟฟ้าที่ได้โดยใช้ค่า current density  $j = 500 \text{ mA/cm}^2$  และใช้ค่า

ตารางที่ 3 ตารางค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในระบบ Fuel Cell

Physical properties	Values
Thermodynamic voltage, $E_{thermo}$ (V)	1.0
Temperature, T(K)	1073
Hydrogen inlet mole fraction, $x_{H_2} d$	0.95
Oxygen inlet mole fraction, $x_{O_2} d$	0.21
Cathode pressure, $P^c$ (atm.)	1
Anode pressure, $P^a$ (atm.)	1
Effective hydrogen(or water) diffusivity, $D_{O_2,N_2}^{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)	$1 \times 10^{-4}$
Effective Oxygen diffusivity, $D_{O_2,N_2}^{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)	$2 \times 10^{-5}$
Transfer coefficient, $\alpha$	0.5
Exchange current density, $j_0$ (a2/cm)	0.1
Electrolyte constant, A(K/ $\Omega$ m)	$9 \times 10^7$
Electrolyte activation energy, $\Delta G$ (kJ/mol)	100
Electrolyte thickness, $t^M$ ( $\mu$ m)	20
Anode thickness, $t^A$ ( $\mu$ m)	50
Cathode thickness, $t^C$ ( $\mu$ m)	800
Gas constant, R (J/mol K)	8.314
Faraday constant, F (C/mol)	96,485

$$V = E_{thermo} - \eta_{ohmic} - \eta_{cathode}$$

$$\eta_{ohmic} = 0.5 \text{ A/cm}^2 \frac{(0.00002 \text{ m})(1073 \text{ K})}{(9 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{K/m}) e^{-(100 \text{ KJ/mol}) / (8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 1073 \text{ K})}}$$

$$= (0.5 \text{ A/cm}^2)(0.176 \Omega \text{ cm}^2) = 0.088 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

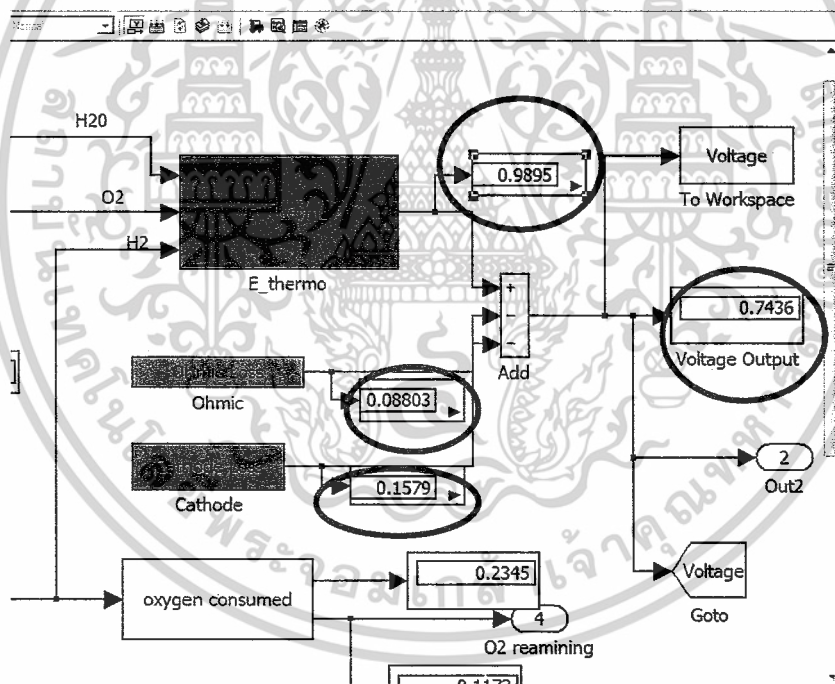
$$\eta_{ohmic} = \frac{\left(8.314 \frac{J}{mol \cdot K}\right) (1073 K)}{4 \times 0.5 \times 96485 C/mol} \ln \left[ \frac{0.5 A/cm^2}{1 \frac{A}{cm^2} \cdot 1 atm} \right]$$

$$\times \frac{1}{0.210 - 0.00008 m \frac{5000 \frac{A}{m^2} \times 8.314 \frac{J}{mol \cdot K} \times 1073 K}{(4 \times 96485 C/mol) \times 101325 Pa \times 0.00002 m^2/s}}$$

$$= 0.158 V$$

คิดผลรวมของความต่างศักย์

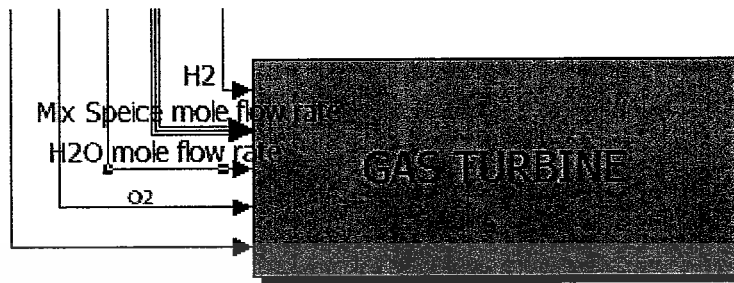
$$V = 1.0V - 0.088V - 0.158V = 0.754V$$



รูปที่ 3.25 แสดงผลการจำลองเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง

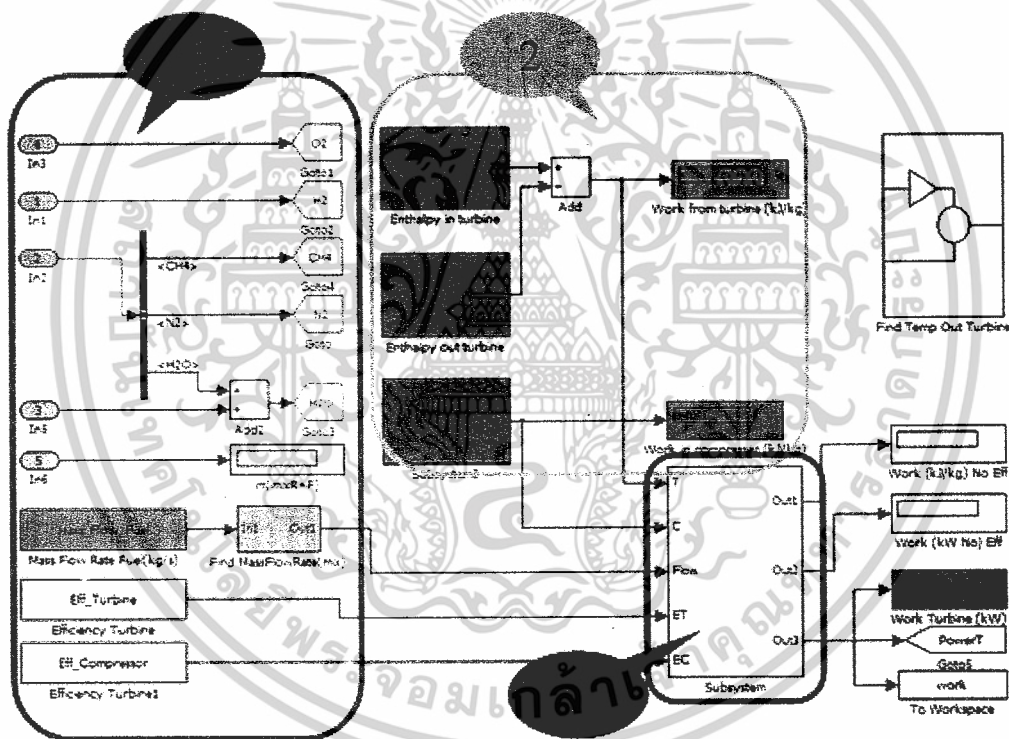
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 Gas Turbine System



Gas Turbine

รูปที่ 3.27 Block Diagram ระบบ Gas Turbine

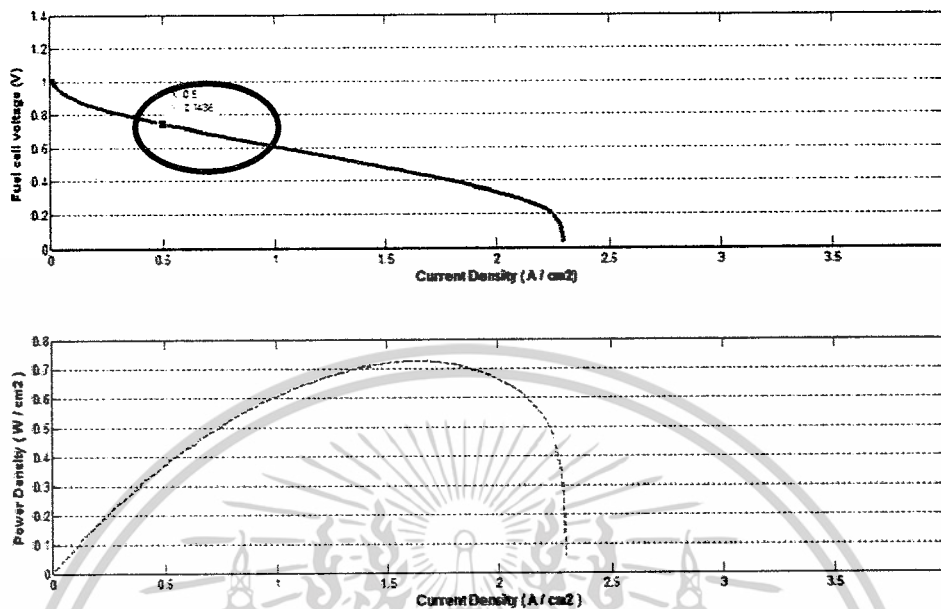


รูปที่ 3.28 Block การคำนวณพลังงานในระบบ Gas Turbine

ภายในของ Block Gas Turbine แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อยๆ

- 1) ส่วนที่รับค่าจาก ระบบ Reformer และ Fuel Cell System กับ อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง และ ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์และ คอมเพรสเซอร์ ที่กำหนดในไปใช้ในการคำนวณต่างๆ
- 2) ส่วนที่คำนวณพลังงานที่ใช้ของคอมเพรสเซอร์และพลังงานที่ได้เทอร์ไบน์
- 3) ส่วนที่คำนวณงานที่ได้จากระบบ Gas Turbine System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



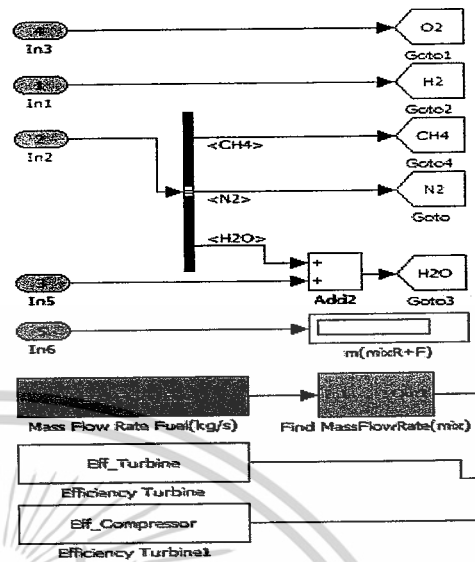
รูปที่ 3.26 กราฟบนแสดงถึง (i-v curve) ส่วนกราฟล่างแสดงถึง (i-p curve)

จะสังเกตเห็นว่าค่าที่ได้จาก ohmic loss และค่าจาก cathode loss มีค่าเท่ากับตัวอย่างส่วนค่าจาก  $e_{thermo}$  นั้นไม่เท่าเพราะ ใน โปรแกรมต้องรับค่ามาจาก reformer แต่ในตัวอย่างกำหนด ค่า  $E_{thermo}$  มีค่าเท่ากับ 1 เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3.1 ส่วนการรับค่า

- รับค่า mole (mole/s) ของ  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$  จากระบบ SOFC ของ  $CH_4$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$  จากระบบ Reformer ที่ By pass ผ่านระบบ SOFC
- รับค่า อัตราการไหล ของมีเทนที่ฉีดเข้าห้องเผาไหม้ (kg/s) ที่กำหนดใน M-File
- รับค่า ประสิทธิภาพ turbine ที่กำหนดใน M-File
- รับค่า ประสิทธิภาพ compressor ที่กำหนดใน M-File



รูปที่ 3.29 การรับค่าใน Block Turbine

```

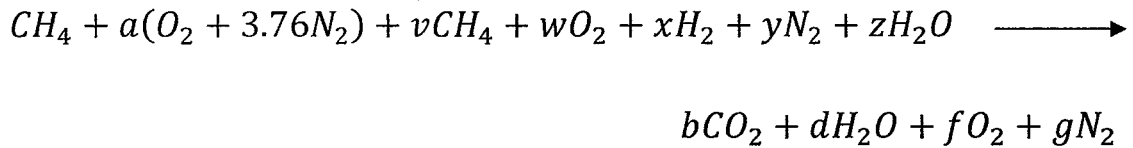
Editor - C:\Documents and Settings\...
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
[Icons] Stack: B
- 1.0 + ÷ 1.1 × % % %
1 - A = 1 ;%(Ch4)
2 - b = A ;%(CO2)
3
4 -----
5
6 - stoi = 0.7 ;%(Stoichiometric condition)
7
8 - temp_in = 300 ;%(temperature in combustion:K)
9
10 - Rp = 3 ;%(Pressure ratio)
11
12 - Mass_Flow_Fuel = 0.05 ;%(Mass flowrate fuel:kg/s)
13
14 - Eff_Turbine = 50 ;%(Efficiency Turbine %)
15 - Eff_Compressor = 80 ;%(Efficiency Compressor %)

```

รูปที่ 3.30 M-File กำหนดค่าเพื่อใช้ในการคำนวณ Block Turbine System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

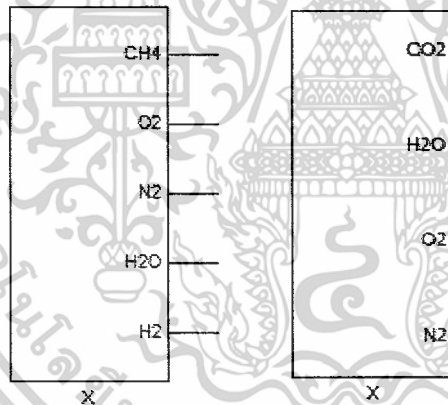
3.3.3.2 ส่วนที่คำนวณพลังงานที่ใช้ของ คอมเพรสเซอร์และพลังงานที่ได้จากเทอร์ไบน์ จากปฏิกิริยา



จากสมมติฐาน เป็นก๊าซอุดมคติ เกิดการเผาไหม้ที่ Lean Combustion (Stoichiometric  $\phi \leq 1$ )

$$a = \frac{(1+v)(1+\frac{1}{4})}{\phi} \quad (3.40)$$

เราจะหาค่า mole/s ของ a,b,d,f,g โดยที่ v,w,x,y,z การรับค่าจากระบบ Reformer และ SOFC และดุลสมการ เพื่อใช้ในการคำนวณ Mole fraction ในปฏิกิริยา

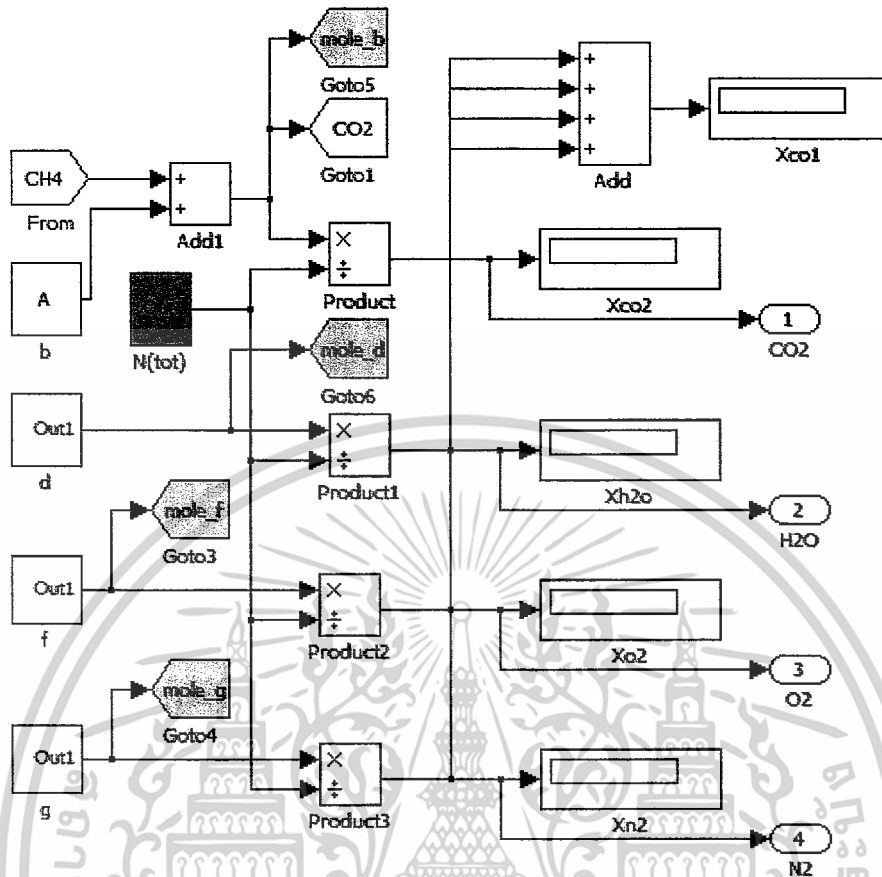


รูปที่ 3.31 Block Mole Fraction จากปฏิกิริยาการเผาไหม้

โดยที่ Mole fraction

$$X_i = \frac{N_i}{N_{TOT}} \quad (3.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 การคำนวณ Mole Fraction ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้

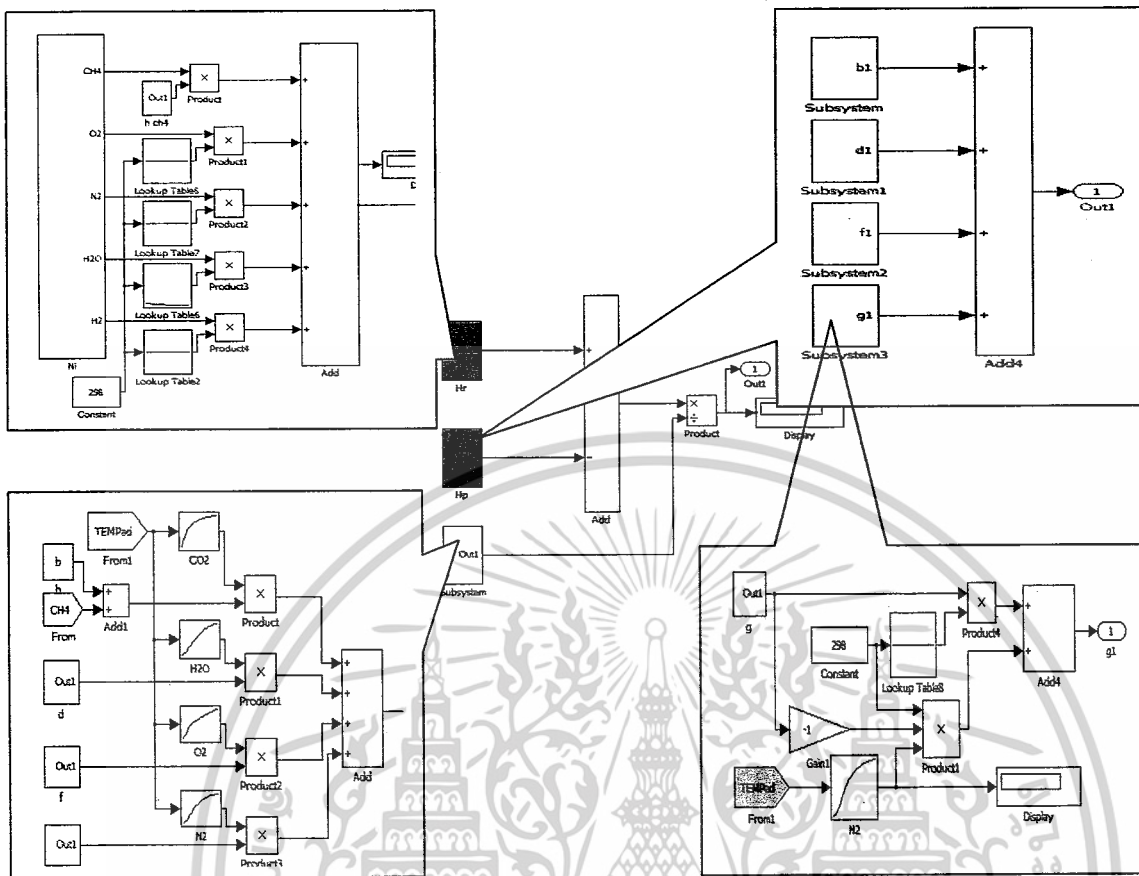
การหาค่าอุณหภูมิที่เกิดในห้องเผาไหม้ใช้หลักการหาอุณหภูมิเปลวไฟแอเดียติก จากความสัมพันธ์ของ ความดันคงที่ และเป็น กระบวนการแอเดียติก

$$\Delta H_c = H_{react} - H_{prod} = 0 \quad (3.42)$$

จะได้ว่า

$$T_{ad} = \frac{[H_{react} - \sum_{prod} N_i (\bar{h}_{f,i}^0 - \bar{c}_{p,T_{ad}} \cdot 298)]}{\sum_{prod} (N_i \cdot \bar{c}_{p,T_{ad}})} \quad (3.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 การหาอุณหภูมิเปลวไฟ แอเดียบัตติก

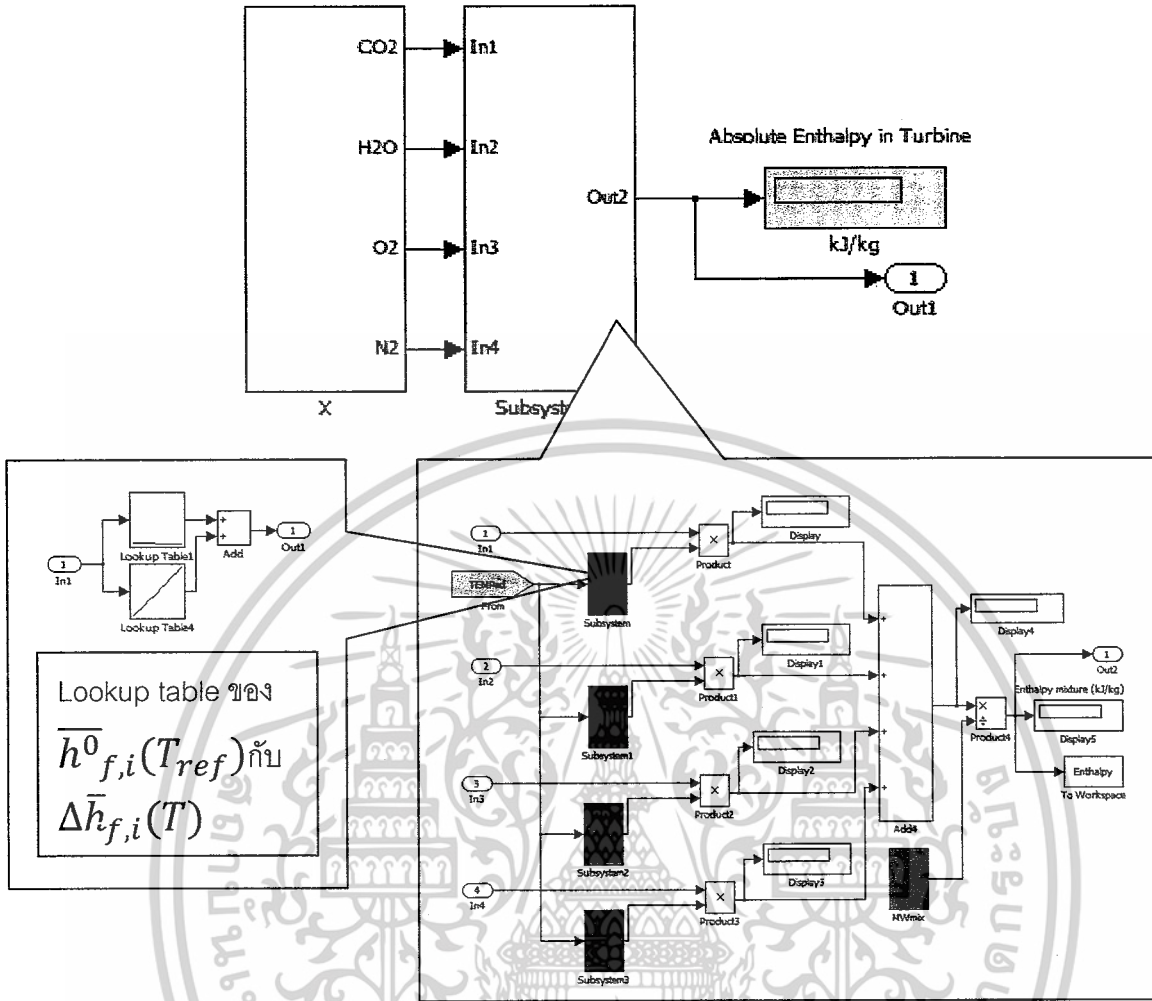
จะนำอุณหภูมิเปลวไฟแอเดียบัตติกไปหา Absolute Enthalpy จากผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้

$$\bar{h}_i(T) = \bar{h}_{f,i}^0(T_{ref}) + \Delta \bar{h}_{s,i}(T) \quad (3.44)$$

$$\bar{h}_{mix} = \sum X_i \bar{h}_i \quad (3.45)$$

$$h_{mix} = \frac{\bar{h}_{mix}}{MW_{mix}} \quad (3.46)$$

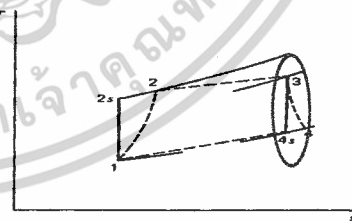
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.34 Absolute Enthalpy ที่ออกจากห้องเผาไหม้หรือเข้า Turbine ( $h_3$ , kJ/kg)

หา Absolute Enthalpy ที่ ทางออกของ Turbine

เนื่องจากเป็น Isentropic Ideal Gas  
 ค่า entropy ที่เข้า turbine กับค่า entropy ที่ออกจาก turbine มีค่าเท่ากัน ( $S_3 = S_{4s}$ )



จากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของก๊าซอุดมคติจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน

$$\Delta \bar{s} = \bar{s}_3^0 - \bar{s}_{4s}^0 + R \ln \frac{P_3}{P_{4s}} \quad (3.47)$$

จากเงื่อนไข Isentropic  $S_3 = S_{4s}$  .ในทอมของ  $\Delta \bar{s} = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

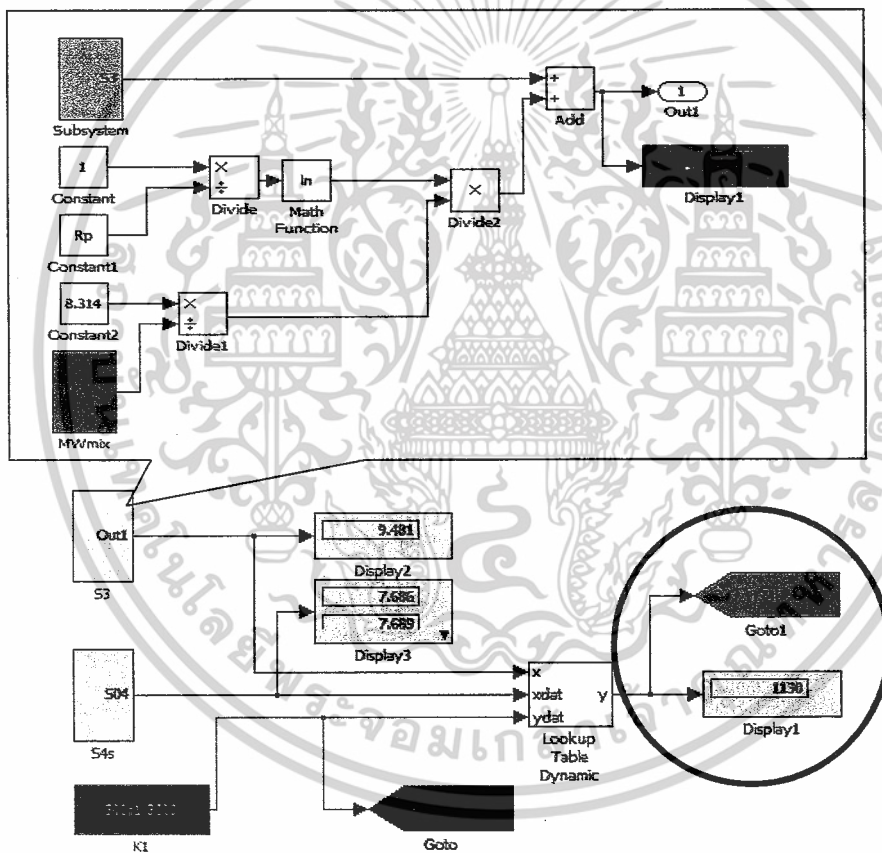
จะหา  $\bar{s}_{4s}^0$  จาก

$$\bar{s}_{4s}^0 = \bar{s}_3^0 + R \ln \frac{P_3}{P_{4s}} \tag{3.48}$$

ก๊าซผสม

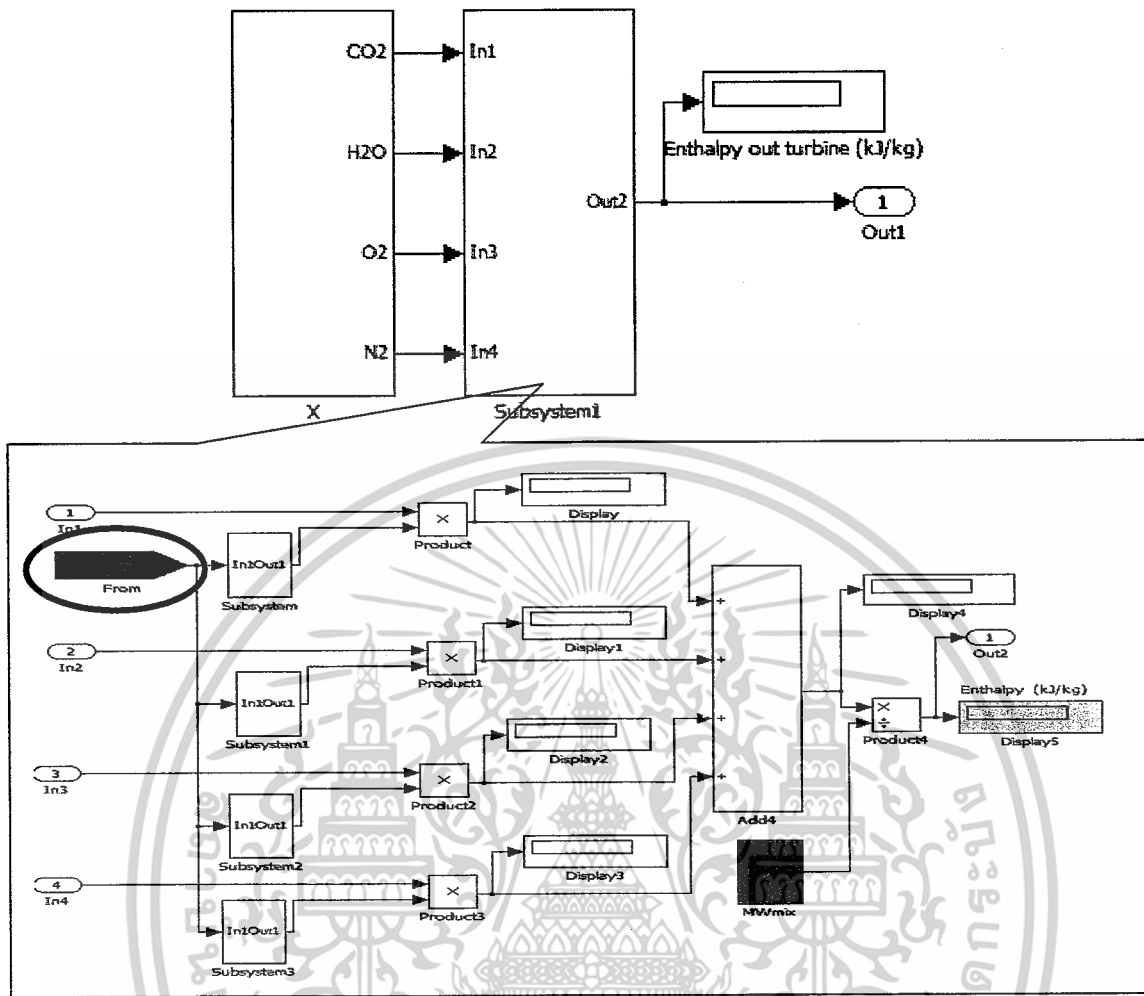
$$s^0_{mix} = \frac{\bar{s}^0_{mix}}{MW_{mix}} \tag{3.49}$$

โดย  $\bar{s}_3^0$  หาค่าได้จากตาราง ที่อุณหภูมิ  $T_{ad}$  เมื่อเราได้  $\bar{s}_{4s}^0$  นำค่าไปหาอุณหภูมิกลับจากตารางได้ TEMPout ดังรูป



รูปที่ 3.35 การหาอุณหภูมิเปลวไฟแอดิยาติก

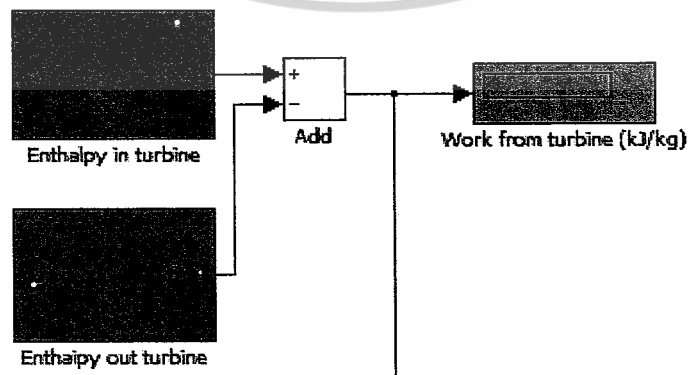
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.36 การหา enthalpy ที่ออกจาก Turbine ( $h_{4s}$ )

และงานที่ได้จาก Turbine คือ

$$Work_t = h_3 - h_{4s} \tag{3.50}$$

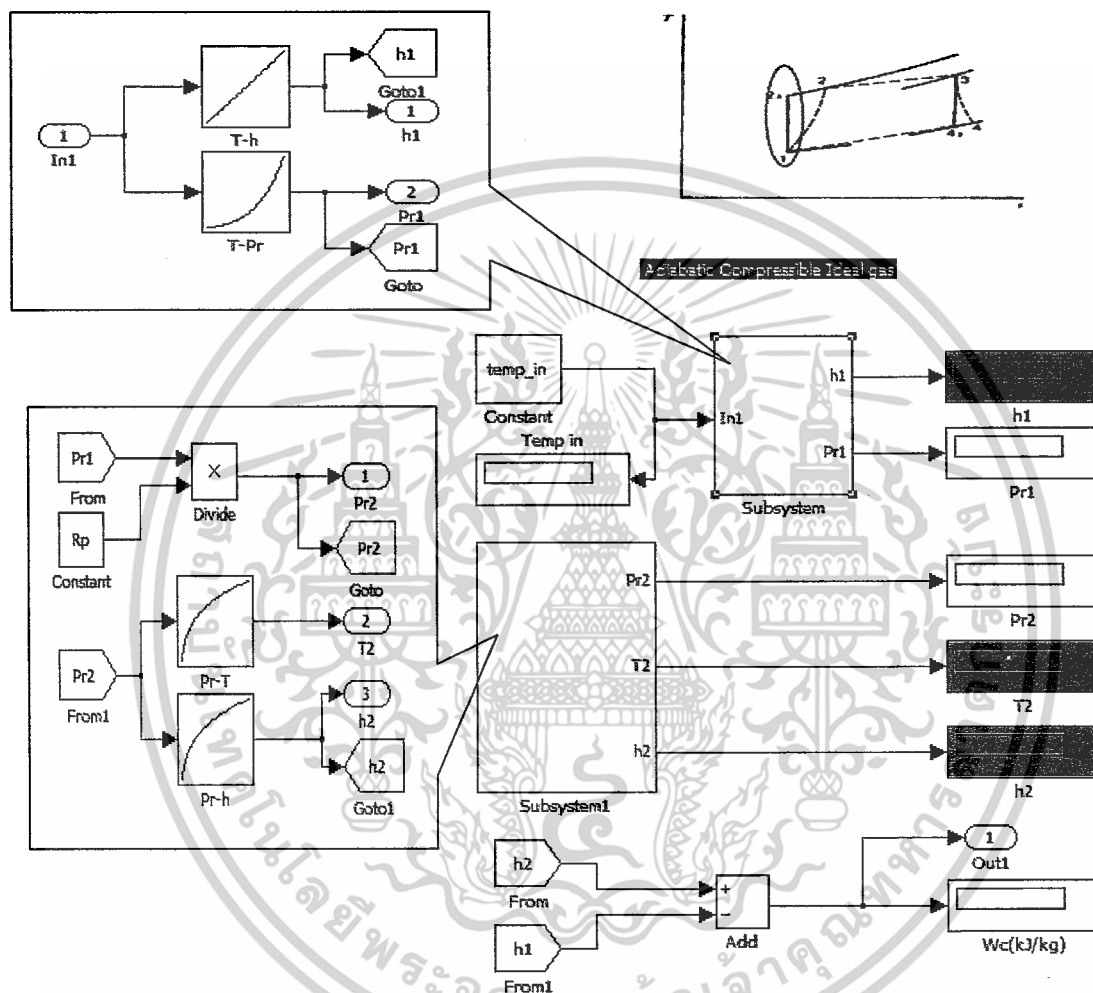


รูปที่ 3.37 การหางานจาก Turbine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของ Compressor

$$Work_c = h_{2s} - h_1 \quad (3.51)$$



รูป 3.38 การทำงานที่ให้ Compressor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3.3 ส่วนที่คำนวณงานที่ได้จากระบบ Gas Turbine System

งานสุทธิที่ได้จากระบบ Turbine

$$Work = Work_t - Work_c \quad (3.52)$$

งานที่ได้ในหน่วย kJ/kg

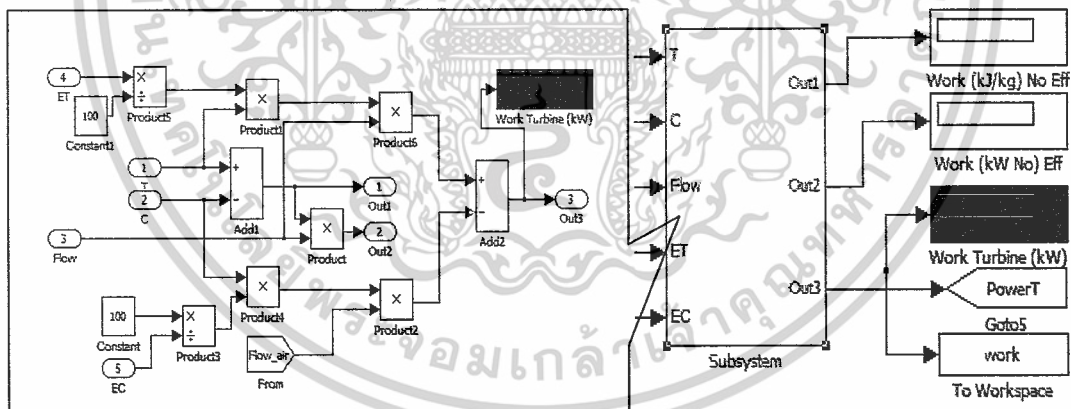
$$Work_t = h_3 - h_{4s} \quad (3.53)$$

$$Work_c = h_{2s} - h_1 \quad (3.54)$$

งานที่ได้ในหน่วย kW รวมกับประสิทธิภาพของ compressor และ Turbine

$$Work_t = m_{mix} \eta_t (h_3 - h_{4s}) \quad (3.55)$$

$$Work_c = \frac{m_{air}(h_{2s} - h_1)}{\eta_c} \quad (3.56)$$



รูป 3.39 การหางานที่ได้จากระบบ Gas turbine

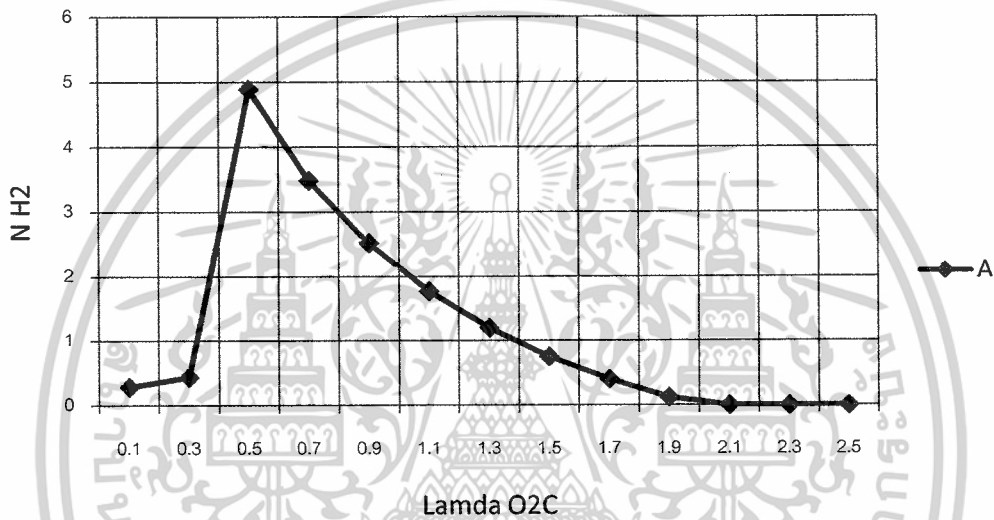
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

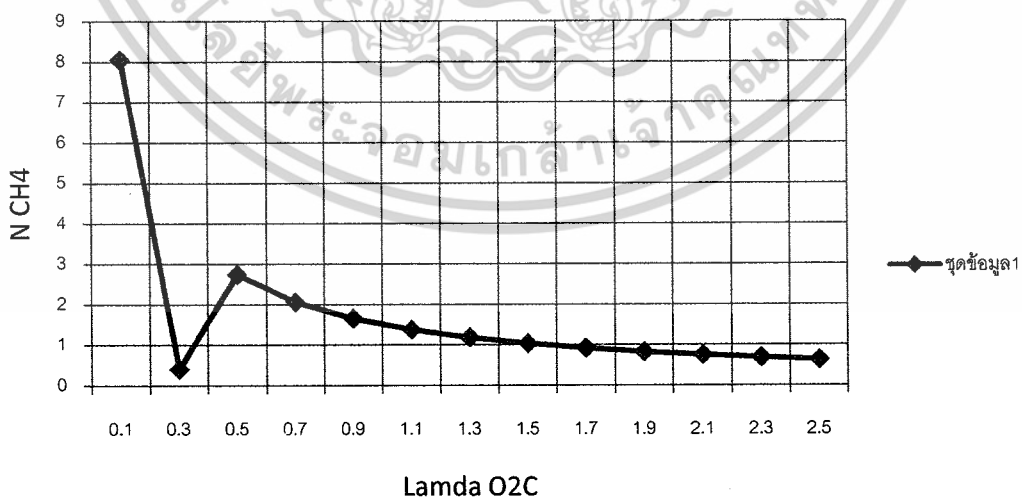
### ผลการจำลองของระบบ

#### 4.1 ผลการจำลองในส่วนของ Reformer System

จากการทดลองของระบบ Reformer โดยกำหนดค่า  $\lambda_{O_2C}$  ตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 แล้วหาค่าของอัตราการไหลเชิงโมลของ  $\dot{N}_{H_2}$ ,  $\dot{N}_{CH_4}$



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์แลมด้ากับอัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจน

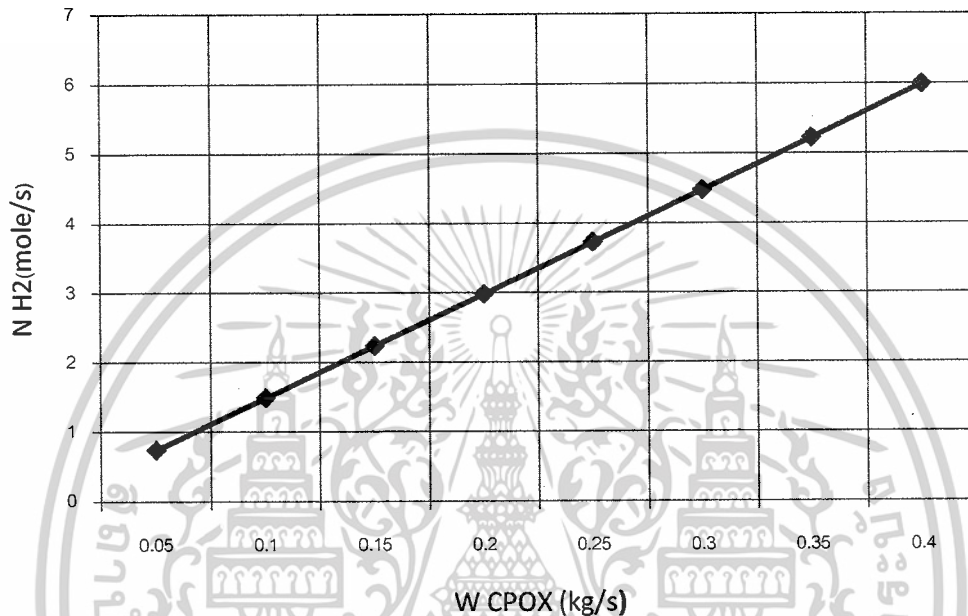


รูปที่ 4.2 กราฟของแลมด้ากับอัตราการไหลเชิงโมลของมีเทน

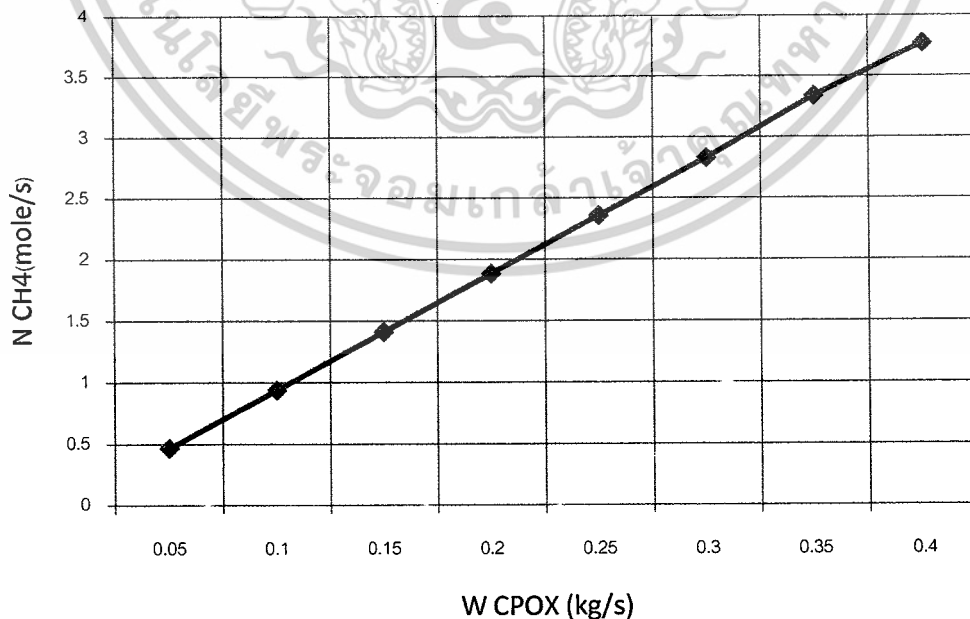
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ได้มาแสดงให้เห็นว่าแลมด้าเมื่อเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจนและมีเทนมีค่าลดลง

จากการทดลองเขียนกราฟของอัตราการไหลเชิงมวลของห้อง CPOX กับ อัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจนและมีเทน ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $W_{CPOX}$  กับ  $N_{H_2}$  ในสมการที่ 2.19



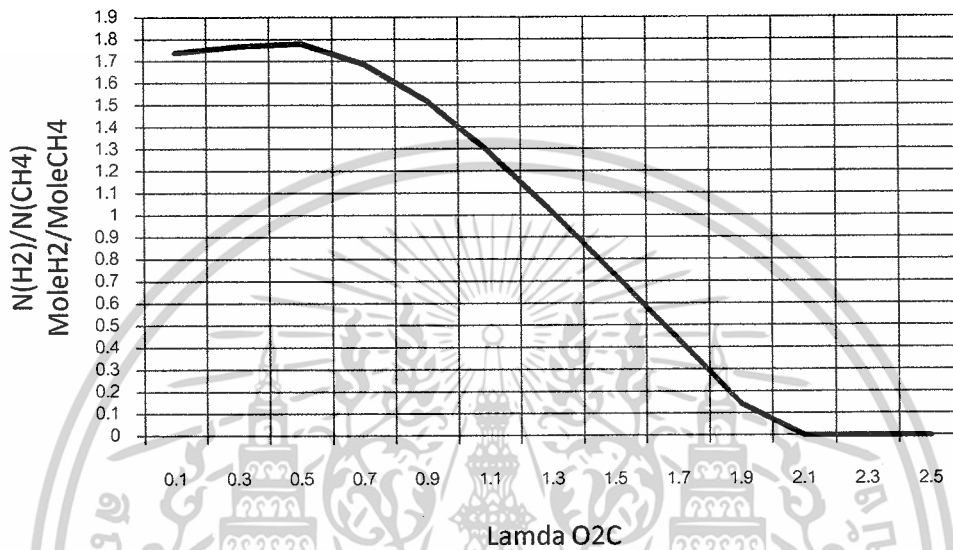
รูปที่ 4.3 กราฟของอัตราการไหลเชิงมวลของห้อง CPOX กับ อัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจน



รูปที่ 4.4 กราฟของอัตราการไหลเชิงมวลของห้อง CPOX กับ อัตราการไหลเชิงโมลของมีเทน  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าของกราฟของอัตราการใช้ไฮโดรเจนของห้อง *CPOX* แปรผัน  
อัตราการใช้ไฮโดรเจนโมลของไฮโดรเจนและมีเทน

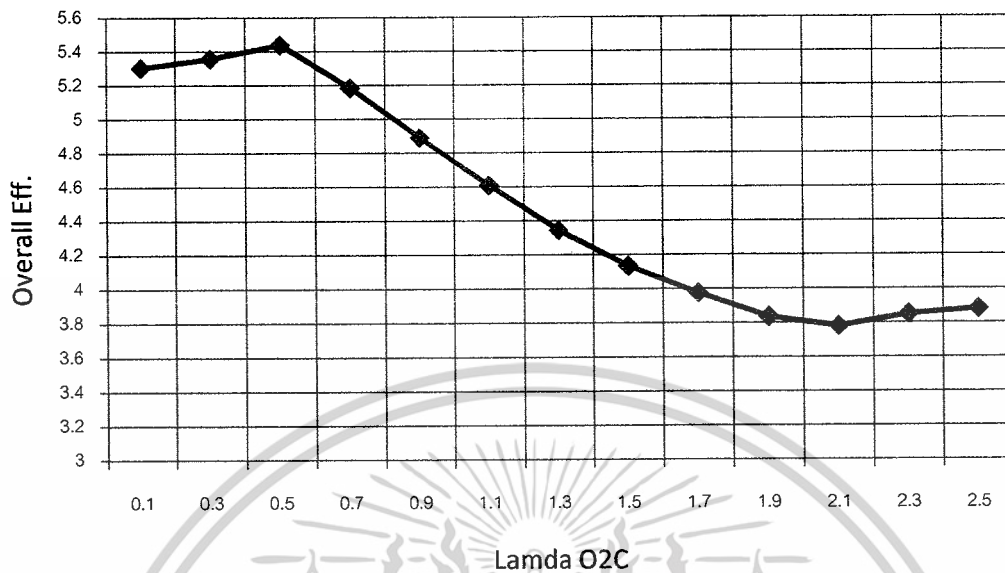
จากการจำลองความสัมพันธ์ของแลมด้า  $O_2C$  กับ ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ  
Reformer



รูปที่ 4.5 กราฟของ  $\lambda_{O_2C}$  กับ ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ Reformer

จากความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.5 ที่ค่า  $\lambda_{O_2C}$  มีค่า 0.1-0.5 มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมเพิ่มขึ้น  
และที่ค่า  $\lambda_{O_2C}$  มีค่า 0.6 – 2.5 มีค่าประสิทธิภาพลดลงตามลำดับตามความสัมพันธ์ของ S  
และสมการ 3.20

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าแลมด้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 2 ประสิทธิภาพจะมีค่าลดลง



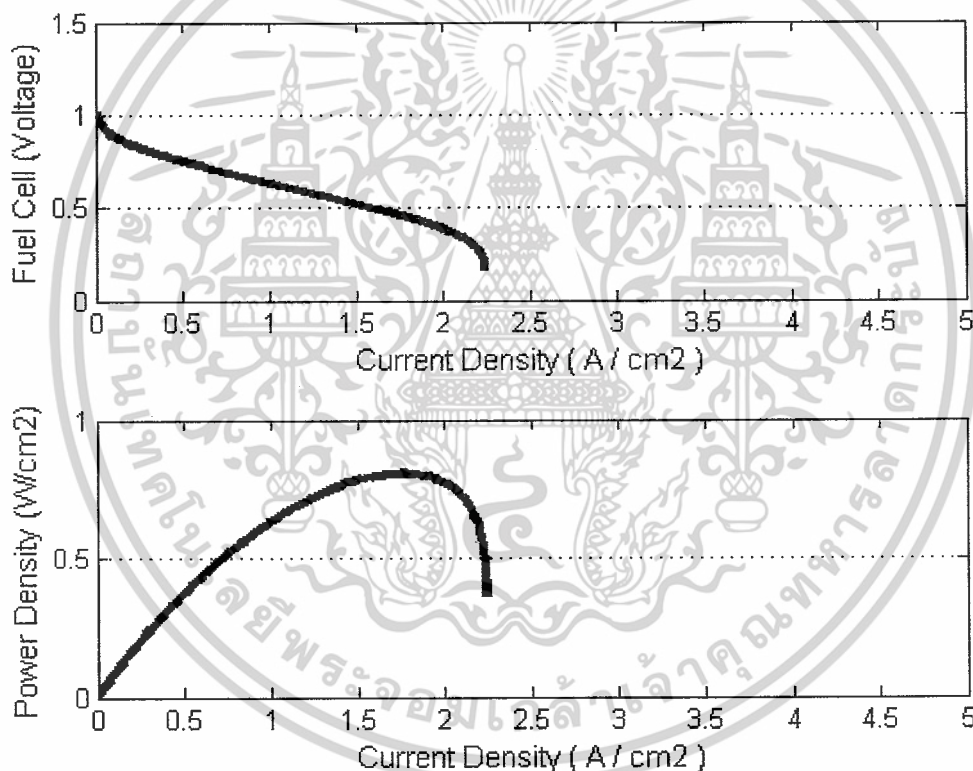
รูปที่ 4.6 กราฟของแลมด้า O2C กับ ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ Reformer จากการจำลองความสัมพันธ์ของแลมด้า O2C กับ ประสิทธิภาพระบบ กราฟแสดงให้เห็นว่าที่ค่า  $\lambda_{O2C}$  มีค่า 0.1- 0.5 มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมเพิ่มขึ้น และที่ค่า  $\lambda_{O2C}$  มีค่า 0.6 - 2.5 มีค่าประสิทธิภาพลดลงตามลำดับตามความสัมพันธ์ของ S

## 4.2 ผลการจำลองในส่วนของ Fuel Cell System

จากสมการที่ได้ ในบทที่แล้ว

$$V = E_{thermo} - j \frac{t^{MT}}{Ae^{-\Delta G/(RT)}} - \frac{RT}{4 \alpha F} \ln \left[ \frac{j}{j_0 P^c \left\{ x_{O_2(d)} - t^c \left[ \frac{jRT}{4f P^c D_{O_2, N_2}^{eff}} \right] \right\}} \right]$$

ทำการ plot ค่า i - v (curve) โดยเปลี่ยนช่วงตัวแปรต่างๆ ตัวแปรที่เราจะทำการเปลี่ยนนำคือ j โดยที่เริ่มจาก 0 ไปจนถึง 4 และจะบันทึกผลการทดลองดังนี้

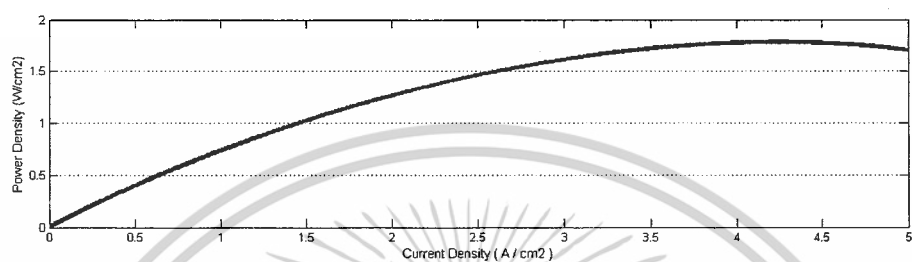
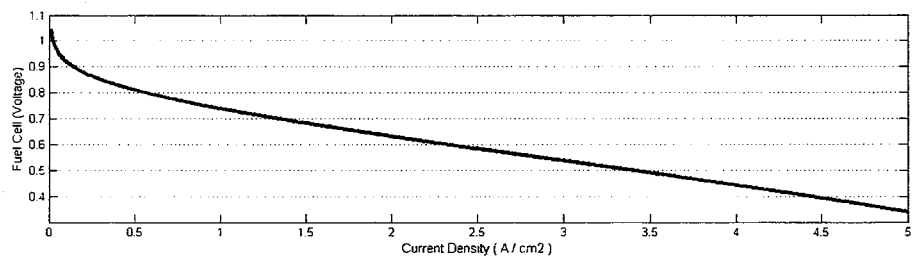


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 1 atm., อุณหภูมิ 1000 K

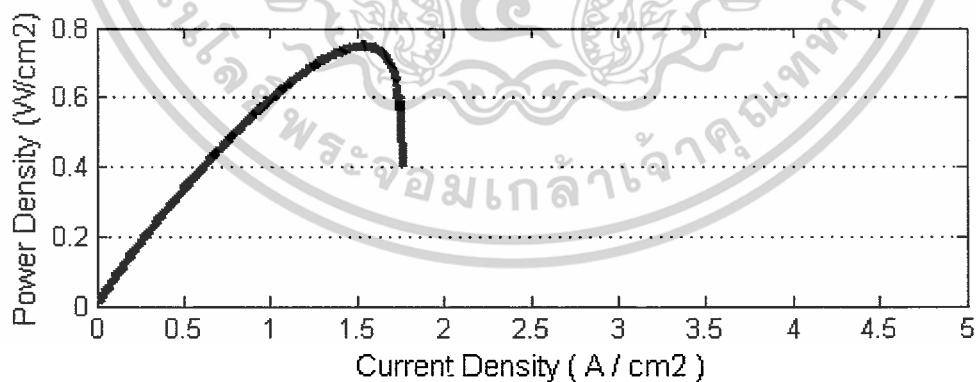
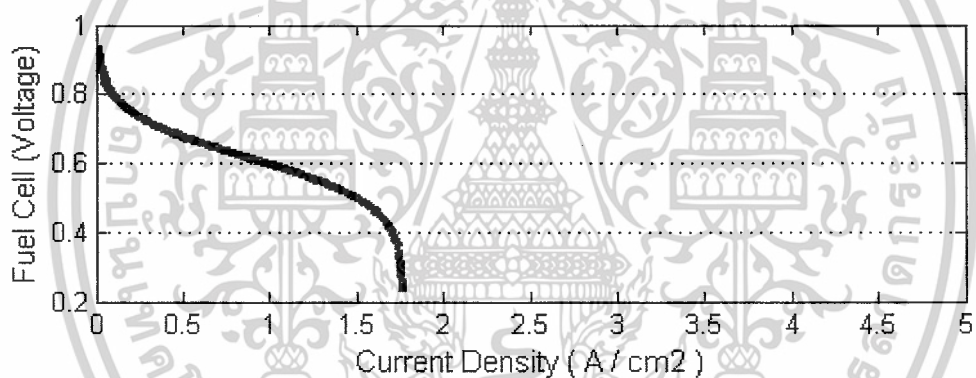
การหาค่า power density ทำได้โดยนำค่า i คูณกับค่า v ของคู่ลำดับนั้นๆจะได้ ลักษณะของกราฟที่ได้นั้น ที่ low current density จะมีผลจาก activation loss ส่วน high current density มีผลมาจาก activation loss, ohmic loss, concentration loss.

จากนั้นทำการจำลองค่าที่สภาวะต่างๆคือ ความดัน 1 atm, 3 atm, 5 atm, 10 atm ตามลำดับ และอุณหภูมิ 1000 K, 1200 K, 1400 K และวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

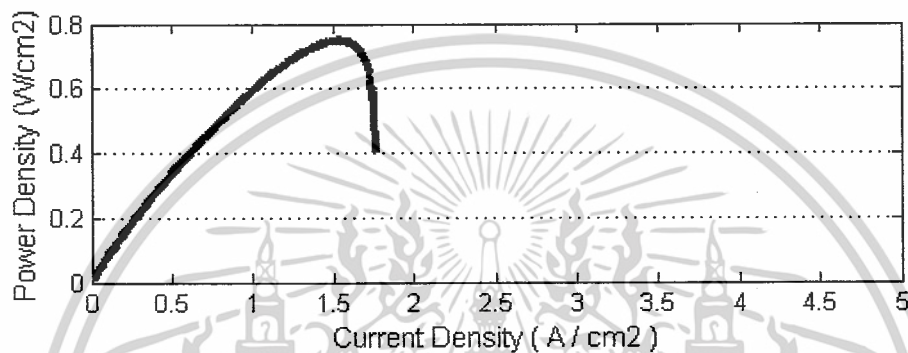
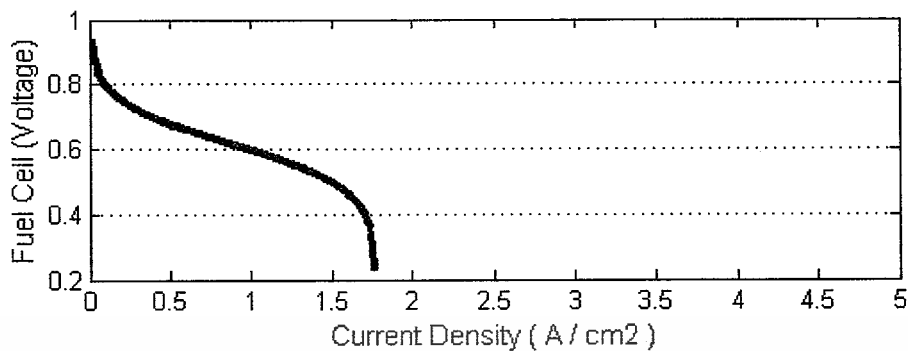


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 1 atm., อุณหภูมิ 1100 K

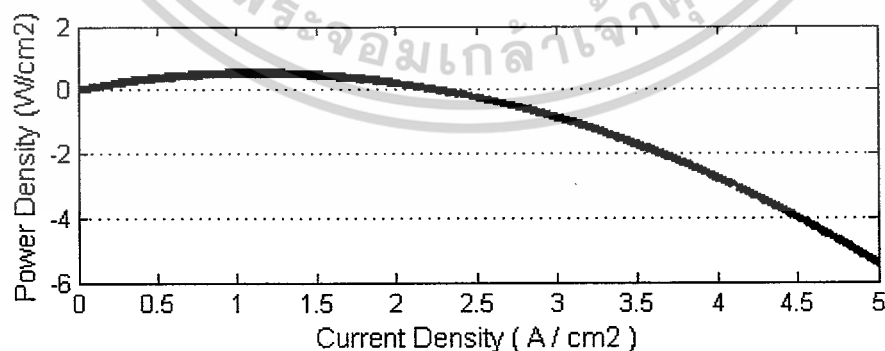
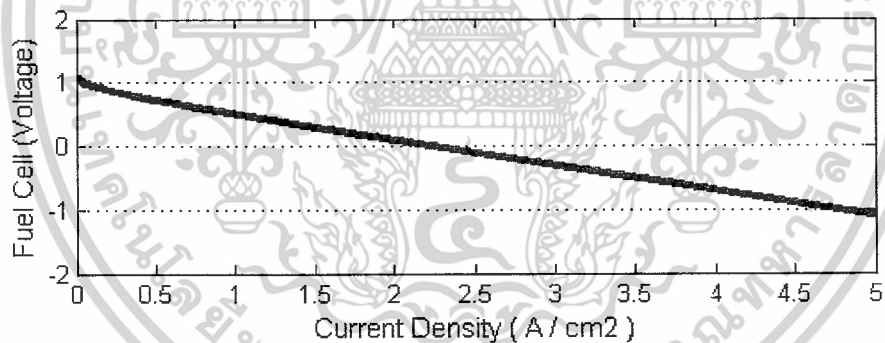


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 1 atm., อุณหภูมิ 1200 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

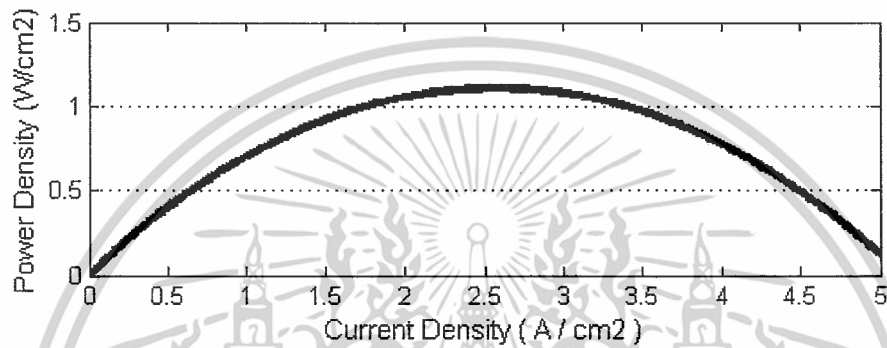
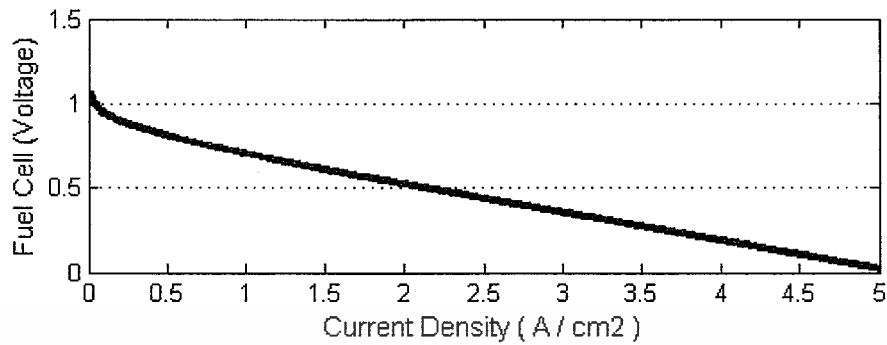


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 1 atm., อุณหภูมิ 1400 K

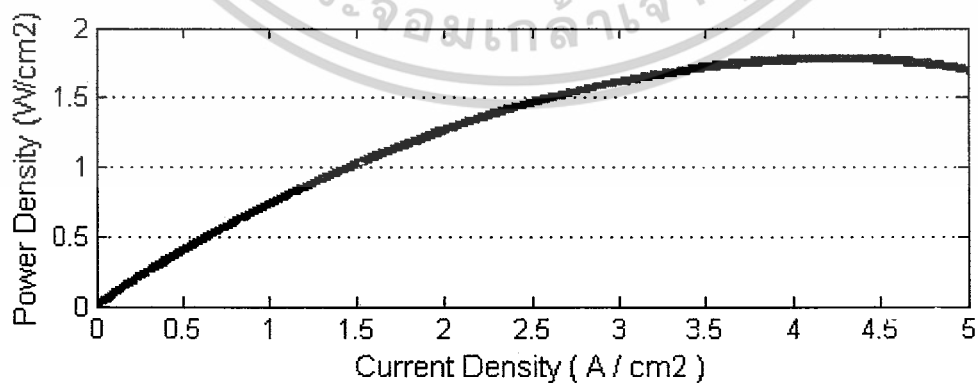
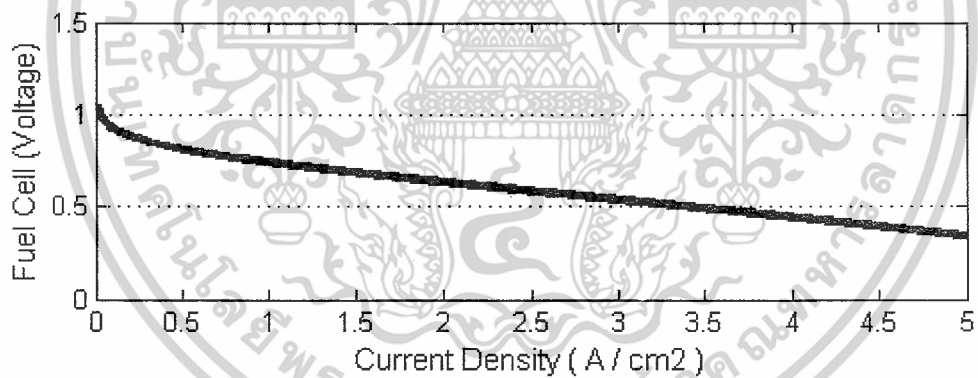


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 3 atm., อุณหภูมิ 1000 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

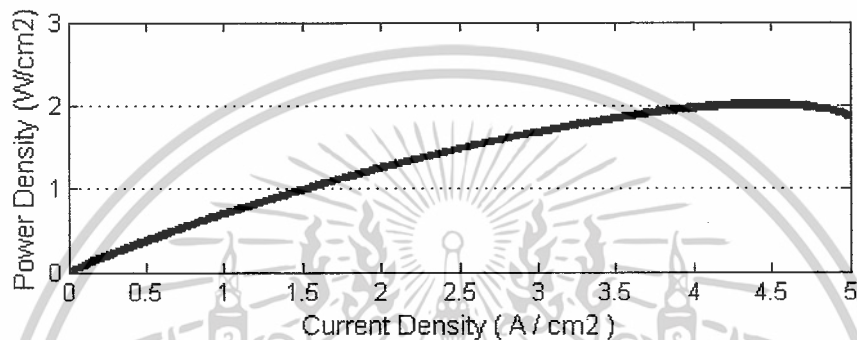
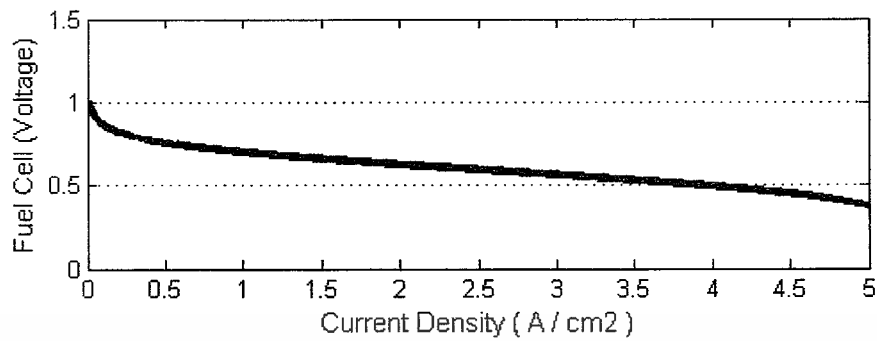


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 3 atm., อุณหภูมิ 1100 K

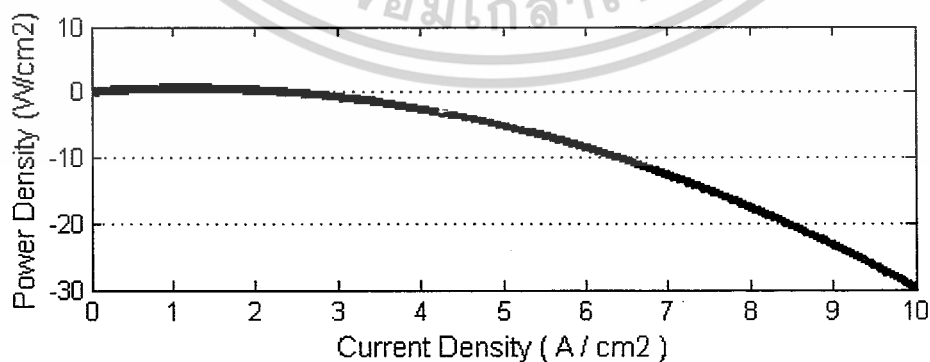
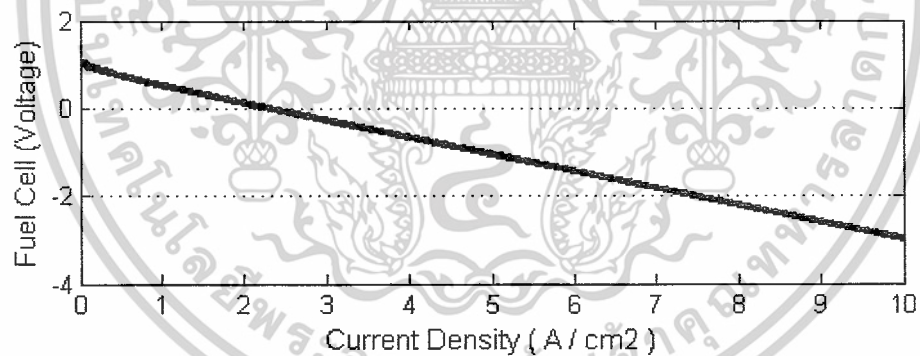


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 3 atm., อุณหภูมิ 1200 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

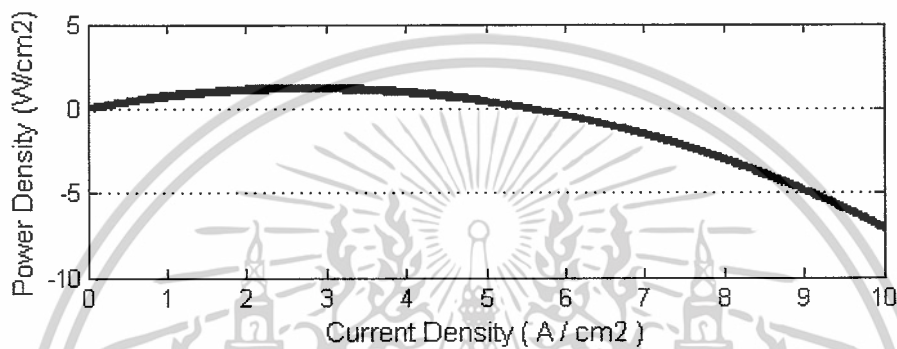
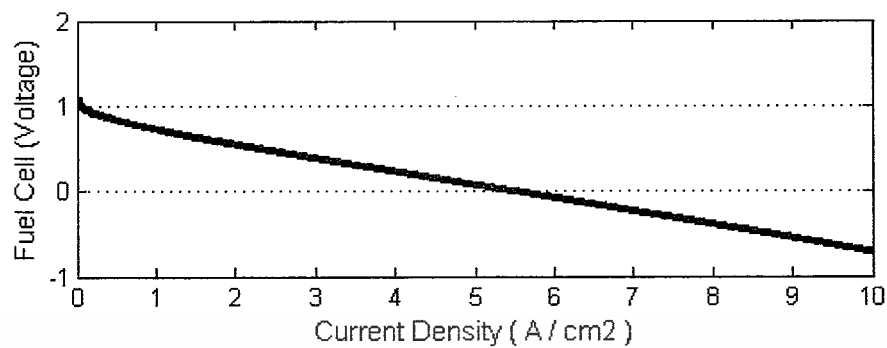


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 3 atm., อุณหภูมิ 1400 K

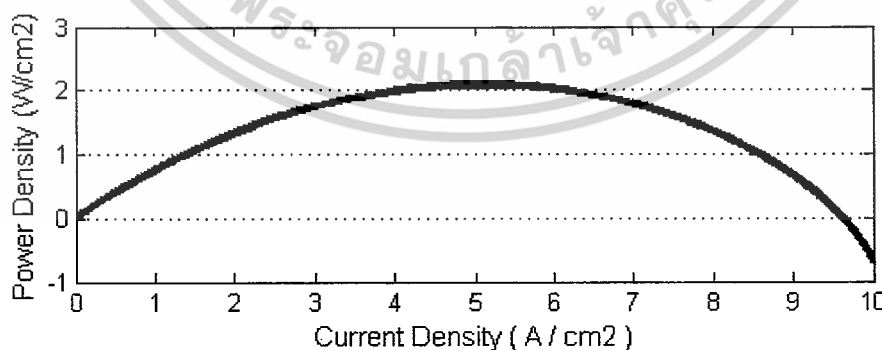
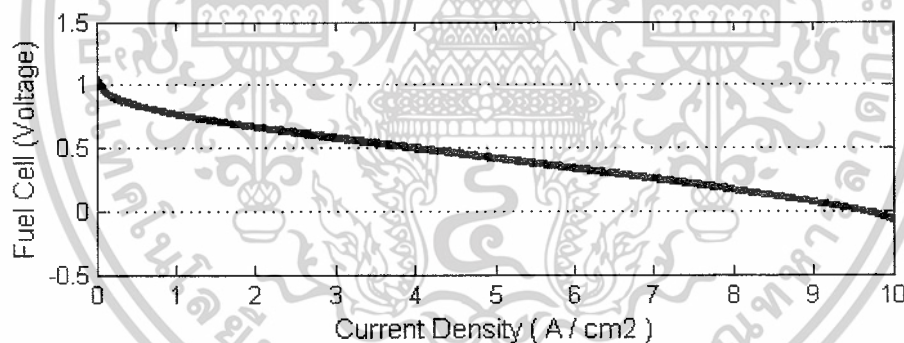


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 5 atm., อุณหภูมิ 1000 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

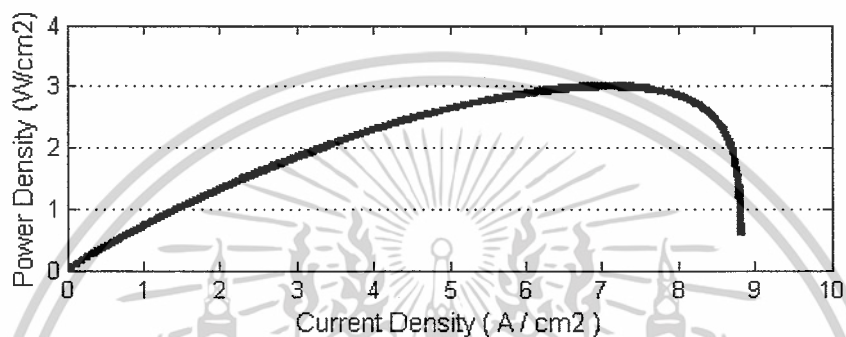
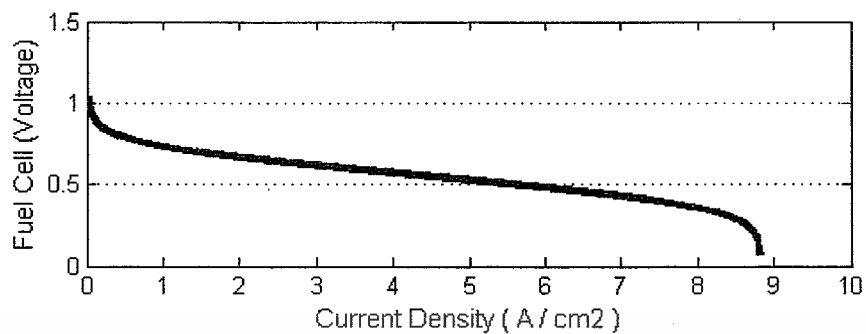


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 5 atm., อุณหภูมิ 1100 K

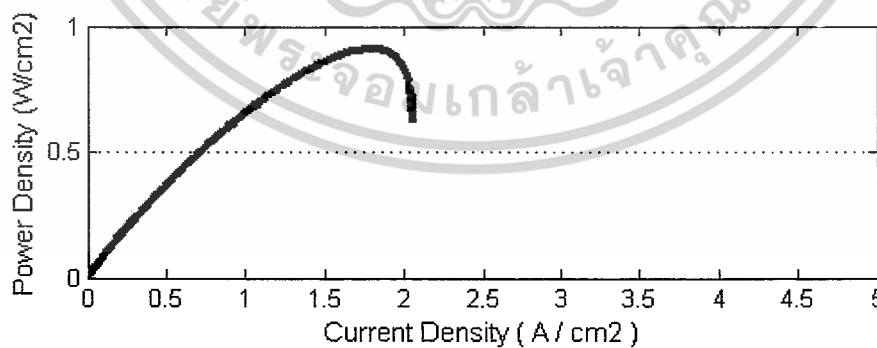
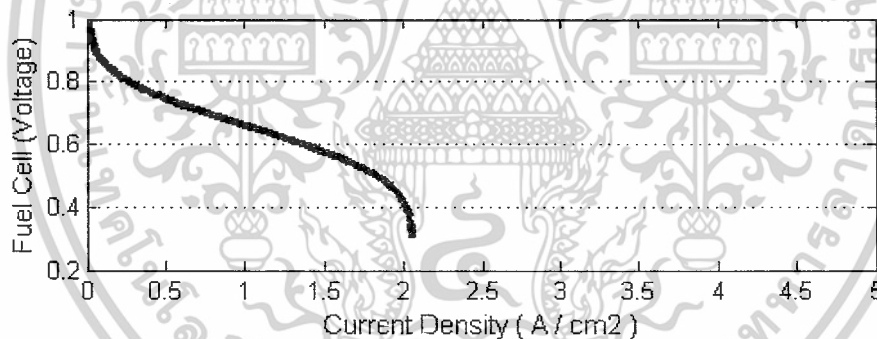


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 5 atm., อุณหภูมิ 1200 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

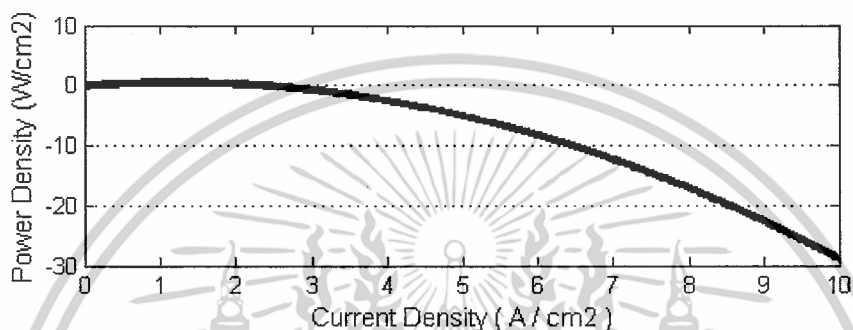
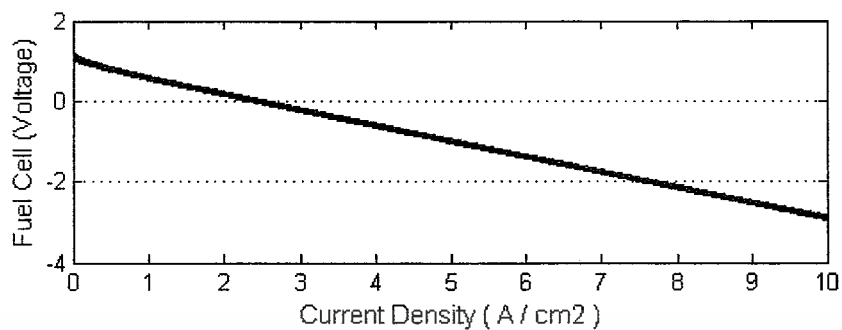


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 5 atm., อุณหภูมิ 1400 K

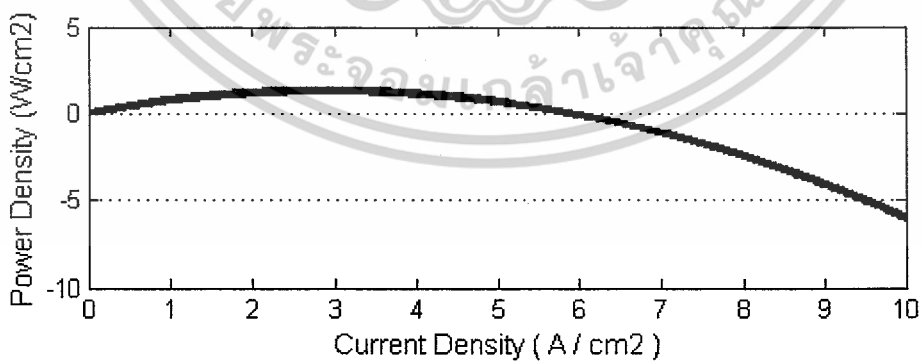
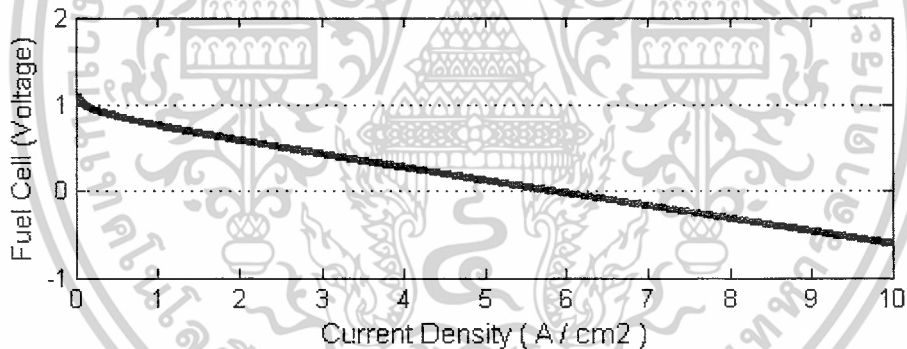


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 10 atm., อุณหภูมิ 1000 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

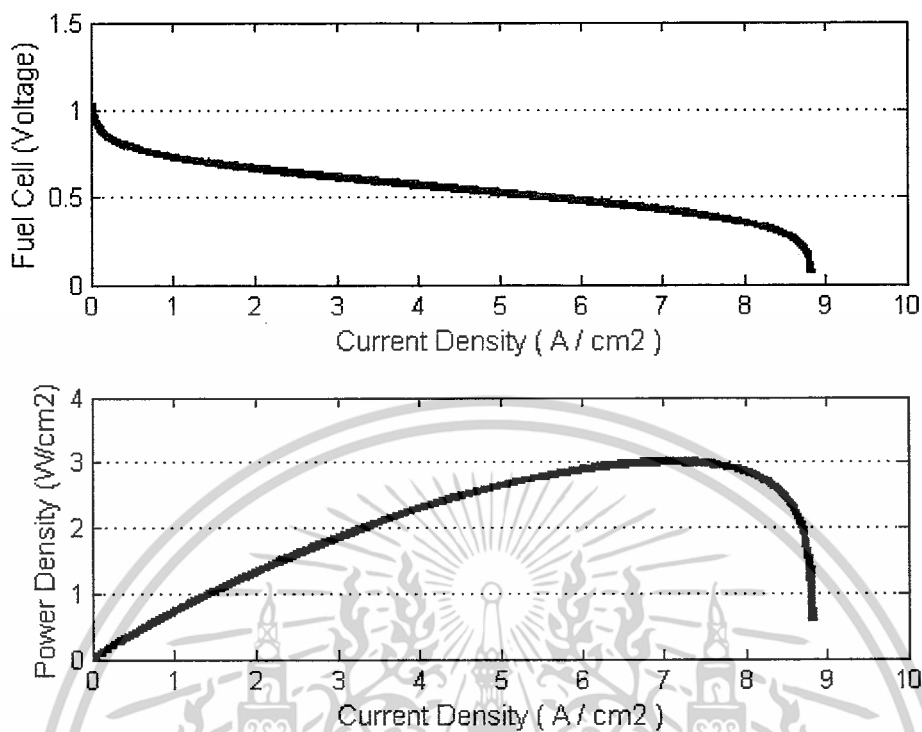


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 10 atm., อุณหภูมิ 1100 K

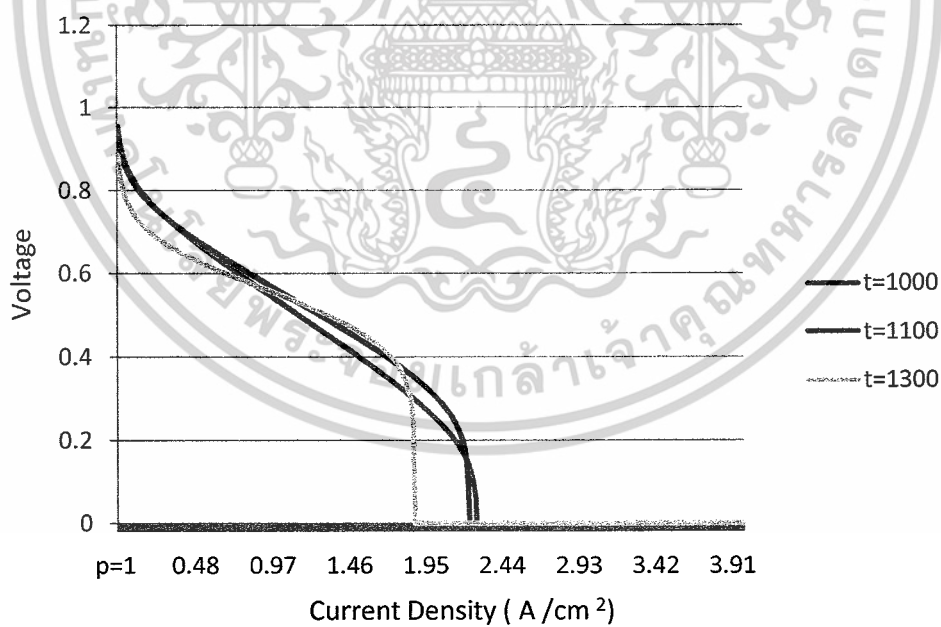


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 10 atm., อุณหภูมิ 1200 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

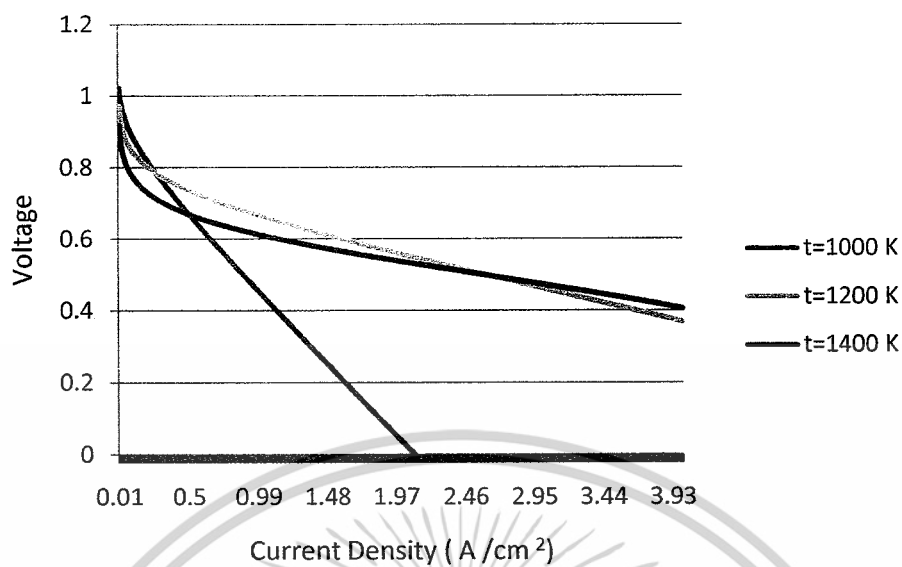


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 10 atm., อุณหภูมิ 1400 K

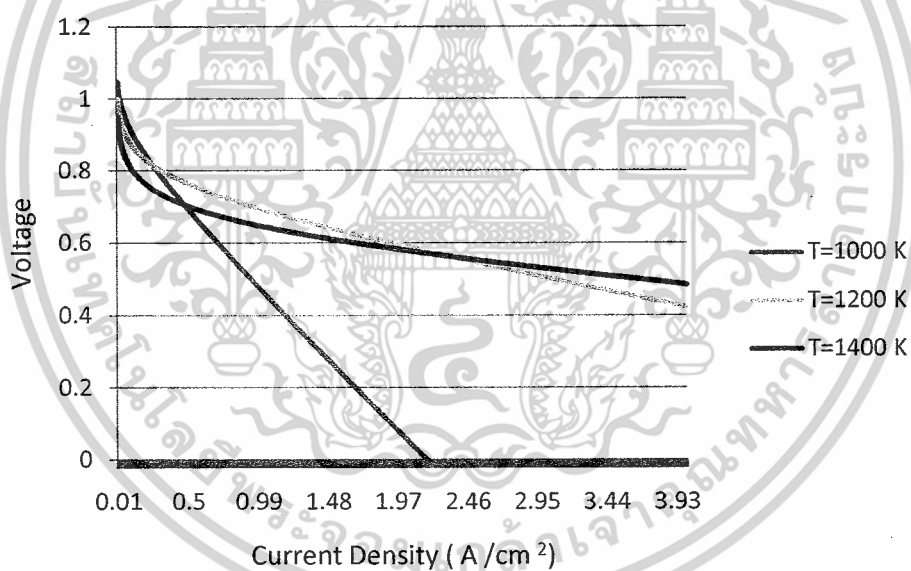


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 1 atm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

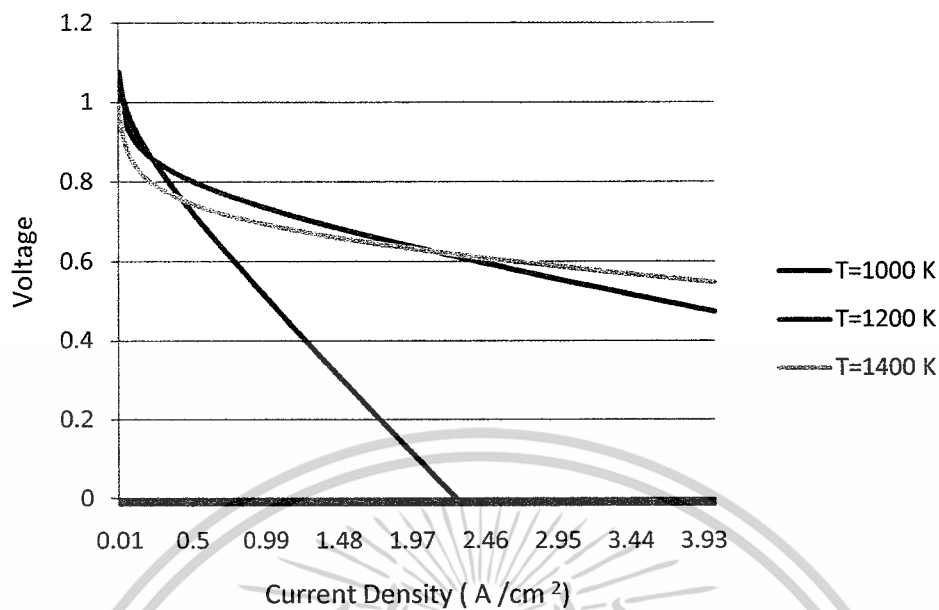


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 3 atm.



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าการจำลองที่ความดัน 5 atm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

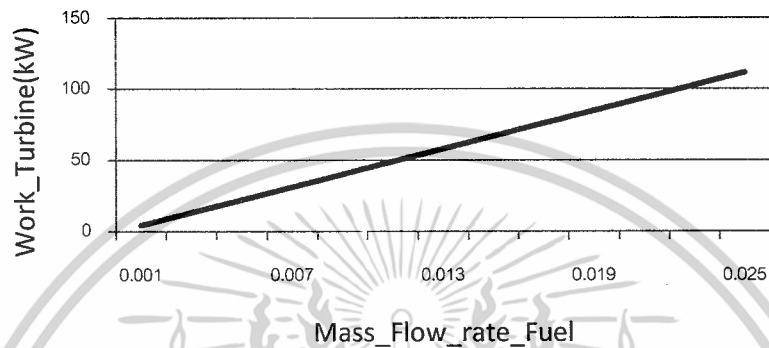


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าการจ่ายที่ความดัน 10 atm.

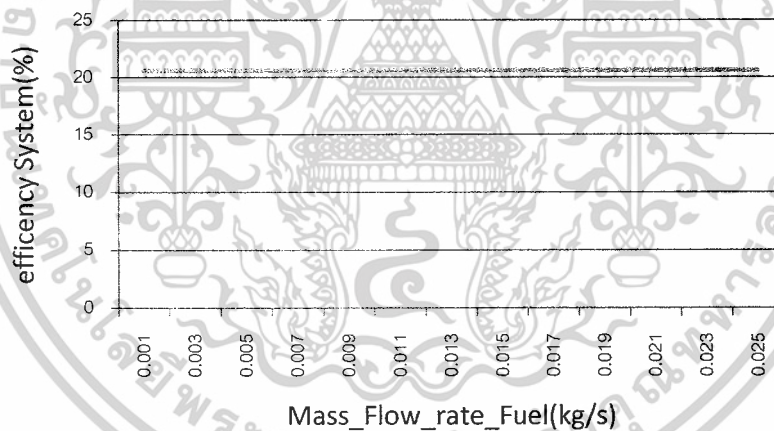
จากการเพิ่มค่าความดันเราจะพบว่าที่ความดัน 3 atm. จะเหมาะสมที่สุดเนื่องจากความดันที่ 5 atm. จะได้ไฟฟ้ามากกว่าไม่มากเมื่อเทียบกับความดันที่ 3 atm และอุณหภูมิ 1200 K แต่การลงทุนไม่มากกว่าทำให้ไม่เหมาะสม

### 4.3 ผลการจำลองในส่วนของ Gas turbine System

จากการจำลองของระบบ Gas turbine System  
เมื่อกำหนดค่าอัตราไหลของเชื้อเพลิง ตั้งแต่ 0.001-0.025 kg/s แล้วหาค่างานที่ได้จากระบบ (kW) และประสิทธิภาพของระบบ ที่ Equivalence ratio = 0.7



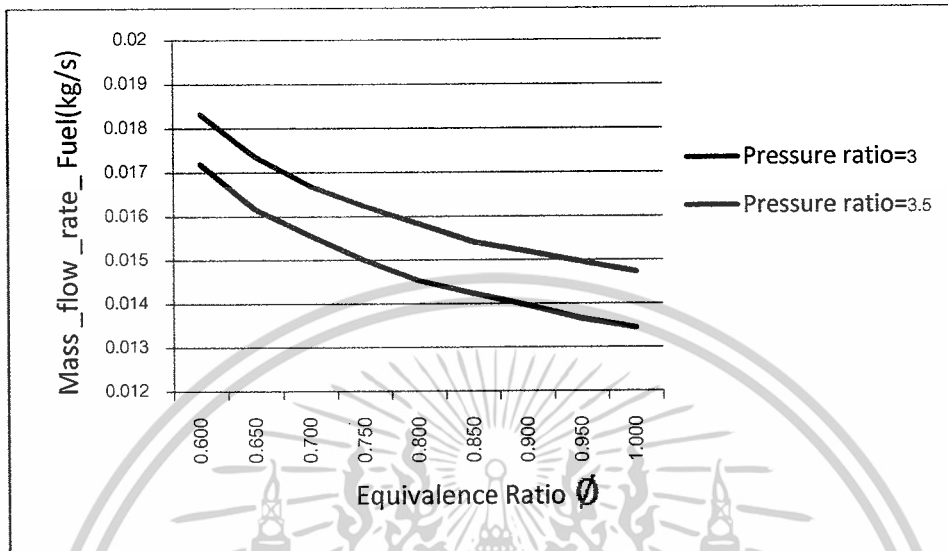
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่างานที่ได้จาก Turbine เมื่อมีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้



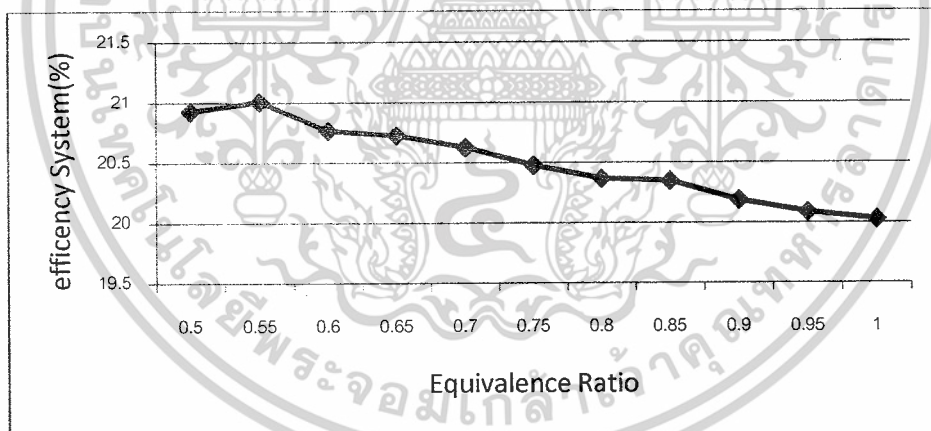
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบ เมื่อมีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้

จะเห็นว่า อัตราการฉีดเชื้อเพลิงมีผลโดยตรงต่องานที่ได้จากเทอร์ไบน์ เมื่อมีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้มากจะทำให้ได้งานเพิ่มมากขึ้น ส่วนประสิทธิภาพจะไม่เปลี่ยน เนื่องจากการฉีดเชื้อเพลิง เพราะเมื่อเรากำหนด ค่า Equivalence ratio คงที่ เมื่อมีการฉีดเชื้อเพลิงเท่าใด คอมเพรสเซอร์จะ ดูดอากาศเพื่อให้พอดีกับการเผาไหม้ที่สภาวะนั้นๆ จึงทำให้ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพ

เมื่อกำหนดค่า Equivalence ratio ตั้งแต่ 0.6-1 แล้วหาค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/s) ที่ทำให้ได้งานจากเทอร์ไบน์ 60 kW ที่อัตราส่วนความดัน 3 และ 3.5



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่าอัตราการฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ที่ Equivalence Ratio ต่างๆ โดยกำหนดให้ได้งานที่ Turbine 60 kW

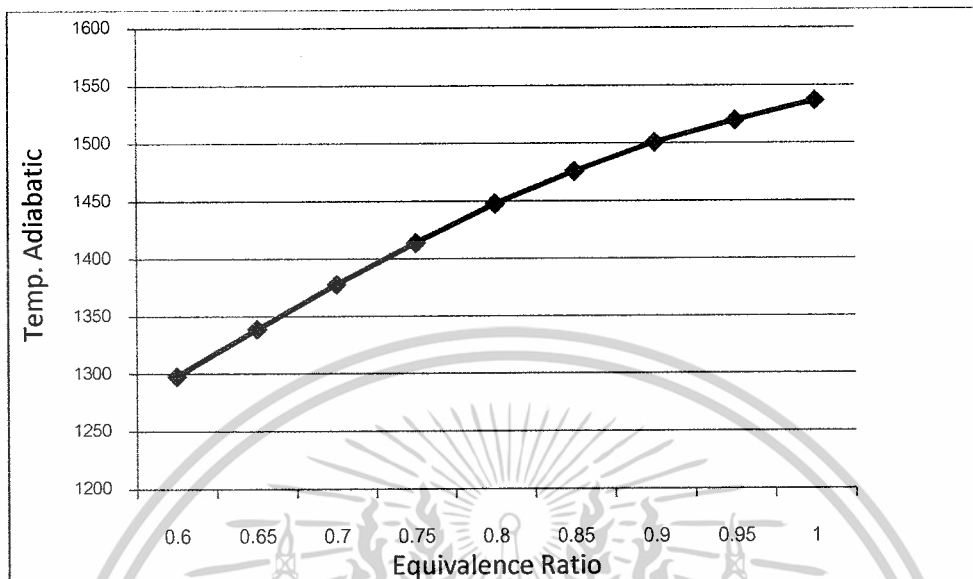


รูปที่ 4.30 กราฟแสดง ประสิทธิภาพของระบบ Gas turbine ที่ Equivalence Ratio ต่างๆ

จะเห็นว่า Equivalence Ratio มีผลต่อการฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ เมื่อเราฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ที่ค่าที่ Equivalence Ratio เข้าใกล้ 1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมที่พอดีของ เชื้อเพลิงต่ออากาศตามทฤษฎี จะทำให้ใช้เชื้อเพลิงน้อยให้ได้งานจากเทอร์ไบน์มากกว่าค่า Equivalence Ratio น้อยกว่าที่ต้องฉีดเชื้อเพลิงมากเพื่อให้ได้งานจากเทอร์ไบน์เท่ากัน ซึ่งจะทำให้ประหยัดพลังงานส่วนประสิทธิภาพจะลดลงเนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการดูดอากาศมากเพื่อให้พอดีกับการเผาไหม้ที่สภาวะนั้นๆ ทำให้อัตราการไหลของอากาศรวมที่ทางออกเทอร์ไบน์น้อยลง

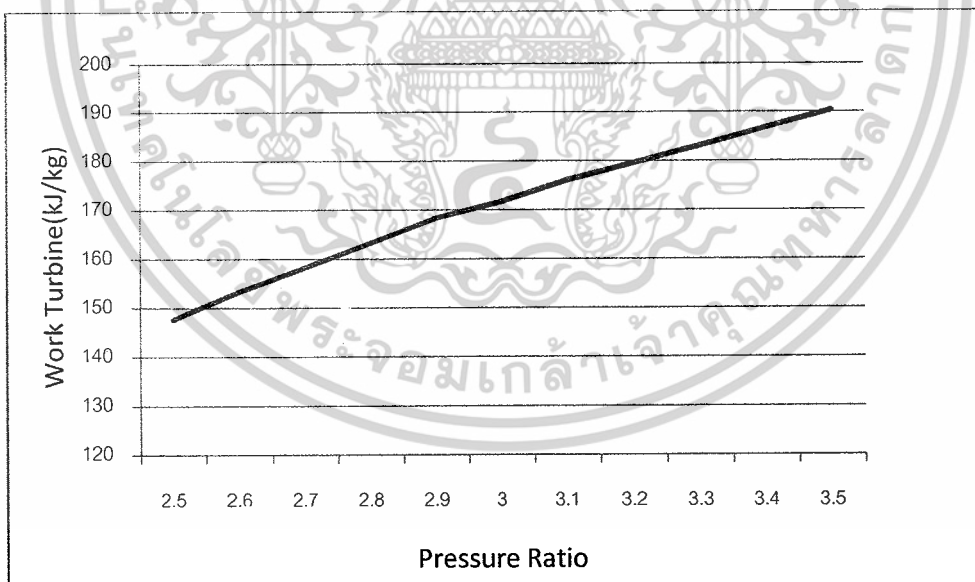
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนการอัด 3 แล้วอุณหภูมิAdiabatic ที่ได้จากระบบ (K) ที่ทำให้ได้งานจากเทอร์ไบน์ 60 kW



รูปที่ 4.31 กราฟแสดง อุณหภูมิAdiabatic ที่ Equivalence Ratio ต่างๆ

เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนการอัดตั้งแต่ 2.5-3.5 แล้วหาค่างานที่ได้จากระบบ (kJ/kg) ที่ Equivalence Ratio=0.6 และอัตราการฉีดเชื้อเพลิง 0.015 kg/s



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่างานที่ได้จาก Turbine (kJ/kg) เมื่อระบบทำงานที่ Pressure ratio ต่าง

จะเห็นว่า อัตราความดันมีผลต่องานที่ได้จากเทอร์ไบน์ เมื่อมีอัตราความดันมากจะทำให้ได้งานเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุปและบทวิจารณ์

#### 5.1 บทสรุป

จากการทำโครงการครั้งนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาระบบ โดยการสร้างใน โปรแกรม Matlab ซึ่งจำเป็นต้องมีการแก้ไขและปรับปรุงเพื่อให้ระบบนั้นสามารถทำงานได้สมจริงจึงต้อง กำหนดตัวแปรต่างๆเข้าระบบที่ออกแบบ และลากความสัมพันธ์จากจุดหนึ่ง ไปจุดหนึ่ง โดยเรียง เป็นขั้นตอนผ่านสมการการคำนวณในระบบ สามารถสรุปออกเป็นหัวข้อย่อยๆ ดังนี้

1. จากรูปที่ 4.1, รูปที่ 4.2 และพิจารณาอัตราการไหลเชิงมวลของห้องCPOX ( $W_{CPOX}$ ) นั้น คงที่ ผลที่ได้ออกมาก็คือ อัตราการไหลเชิงโมลของ  $H_2$  และ  $CH_4$  มีค่าลดลงตามลำดับ เนื่องมาจาก ค่า $H_2$ และ  $CH_4$ ผกผันกับอัตราส่วนของ $\lambda_{O_2C}$

จากรูปที่ 4.3 ,รูปที่ 4.4 และ ค่าของ $\lambda_{O_2C}$  นั้นคงที่ ผลที่ได้ออกมาก็คือเมื่ออัตราการไหลเชิงมวล ของห้องCPOX ( $W_{CPOX}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการไหลเชิงโมลของ  $H_2$ และ  $CH_4$ มีค่าเพิ่มขึ้น ตามลำดับ เนื่องมาจาก ค่า $H_2$ และ  $CH_4$ ผันตรงกับอัตราการไหลเชิงมวลของห้องCPOX ( $W_{CPOX}$ )

จากการทดลองที่พิจารณาค่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบกับอัตราการไหลเชิงโมลของ  $H_2$  ส่วนด้วยอัตราการไหลเชิงโมลของ  $CH_4$  รูปที่ 4.5, รูปที่ 4.6 ผลที่ได้ออกมาก็คืออัตราการไหลเชิง โมลของ  $H_2$  ส่วนด้วยอัตราการไหลเชิงโมลของ  $CH_4$  มีค่าลดลง

2.จากผลการจำลองค่าSOFC ของสมการ Nernst equation ที่สภาวะต่างๆ ทำการพล็อต กราฟ ระหว่างค่า (i-v) curve และ p-i หากค่าที่เหมาะสมจะพบว่าช่วงความดันเพิ่มจาก 5atm ไปสู่ 10 atm จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนที่เพิ่มขึ้นความดันที่เหมาะสมคือช่วง 3 atm. หากมองถึงค่า อุณหภูมิต่างๆที่ ความดัน 3 atm พบว่ายิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น จะได้ค่า ความดันไฟฟ้า เพิ่มขึ้นอีกแต่ในความเป็นจริงแล้ว วัสดุ ที่จะมาทำ fuel cell จะไม่สามารถทนความร้อนได้

3. อัตราการฉีดเชื้อเพลิงและอัตราส่วนความดันมีผลต่องานที่ได้จากเทอร์ไบน์ เมื่อมีการฉีด เชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้มากจะทำให้ได้งานเพิ่มมากขึ้น สำหรับค่า Equivalence Ratio มีผลต่อ อุณหภูมิAdiabatic และการฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ด้วยยิ่งถ้าเราฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ที่ ค่าที่ Equivalence Ratio เข้าใกล้ 1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมที่พอดีของเชื้อเพลิงต่ออากาศตามทฤษฎี จะ ทำให้ใช้เชื้อเพลิงน้อย เมื่อเทียบกับเมื่อมีการผสมของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ค่าต่ำกว่าที่ต้องฉีด เชื้อเพลิงมากเพื่อ ให้ได้งานจากเทอร์ไบน์เท่ากัน ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานอีกด้วย

ส่วนประสิทธิภาพจะไม่เปลี่ยน เนื่องจากการฉีดเชื้อเพลิง เพราะถ้าเรากำหนด ค่า Equivalence ratio คงที่ เมื่อมีการเมื่อเราฉีดเชื้อเพลิงเท่าใด คอมเพรสเซอร์จะดูดอากาศเพื่อให้พอดีกับการเผา

ไหม้ที่สภาวะนั้นๆจึงทำให้ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพ ตัวแปรที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาจากค่า Equivalence Ratio ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการดูดอากาศมากเพื่อให้พอดีกับการเผาไหม้ที่สภาวะนั้นๆ ทำให้อัตราการไหลก๊าซไอเสียรวมทั้งทางออกเทอร์ไบน์น้อยลงมีผลทำให้ประสิทธิภาพลดลงด้วย

จากการจำลองระบบจะเห็นว่าเมื่อเลือกสภาวะดีที่สุดของแต่ละระบบ ทำให้ได้ประสิทธิภาพ 17.11% ซึ่งน้อยกว่าที่ควรจะเป็นจึงต้องมีการพัฒนาระบบให้ดียิ่งขึ้น

## 5.2 วิจารณ์สิ่งที่ได้จากโครงการ

- สามารถใช้โปรแกรมในการคำนวณค่าต่างๆ ได้ง่ายและแม่นยำมากยิ่งขึ้นทำให้สะดวกในการหาค่าและวิเคราะห์ออกแบบระบบโดยรวม
- ทำให้ได้ความรู้เกี่ยวกับระบบ Reformer, Fuel cell และ ระบบ Gas turbine
- สามารถวิเคราะห์ความต้องการของระบบจากการสร้าง Block Diagram ได้
- เรียนรู้ที่จะใช้โปรแกรมต่างๆ ในการคำนวณวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

## 5.3 ปัญหาอุปสรรคและแนวทางแก้ไข

- โครงการเป็นการสร้างระบบ โดยใช้โปรแกรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องจึงใช้เวลานานในการศึกษาทั้งระบบและโปรแกรมใหม่เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดมากที่สุด
- ความไม่มีประสบการณ์ในระบบ Reformer, Fuel cell และ ระบบ Gas turbine ทำให้ต้องศึกษาตั้งแต่ต้นทำให้เกิดความล่าช้าของงานได้

## 5.4 แนวทางการพัฒนาต่อ

- งานที่ทำงานยังต้องมีการพัฒนาในเรื่องการพัฒนาจากเปลวไฟไปในรูปแบบของไฟฟ้า
- Reformer การผลิตโดยใช้ปริมาณ  $H_2$  ต่อโมล  $CH_4$  น้อยเนื่องจากยังไม่ได้คิดปฏิกิริยา Water Gas Shift
- สมมติฐานเพียง 50% ของระบบ Water Gas Shift ควรจะกำหนดให้สะท้อนความเป็นจริงมากกว่านี้
- เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าโดยเทอร์ไบน์ เปรียบเทียบกับการผลิตไฟฟ้าโดยเชื้อเพลิง และเปรียบเทียบความคุ้มค่า
- สำหรับในเรื่องระบบ จะต้องมีการเพิ่มเติมในส่วนของคุณสมบัติต่างๆ ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และพัฒนาในเรื่องของการเชื่อมโยงระหว่างระบบมีความคล่องตัวและง่ายต่อการปรับเปลี่ยนและใช้งานได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เชื้อเพลิงที่นำมาวิเคราะห์อาจมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากปัจจุบันเชื้อเพลิงมีราคาสูงถ้าได้เชื้อเพลิงราคาถูกนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า จะทำให้ใช้พลังงานได้อย่างคุ้มค่ามากขึ้น
- สามารถพิจารณาในระบบในเทอมของการเปลี่ยนแปลงความดันที่ไม่คงที่ได้
- ก๊าซร้อนที่เหลือจากระบบ Gas Turbine ยังมีอุณหภูมิที่สูงสามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีก โดยติดตั้งระบบ Stream Turbine หรือนำก๊าซร้อนไป Preheat ก่อนเข้าระบบซึ่งจำทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของระบบ Combine System นี้ได้
- สำหรับ สมการ Nernst equation ใน โปรแกรมนี้คิดเฉพาะ pure hydrogen ซึ่งต่อไปอาจจะต้องคิดสมการของสารอื่นๆด้วย

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{\prod a_{products}^{v_i}}{\prod a_{reactants}^{v_i}} \right)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] V Ganesan(2004). Internal Combustion Engines. Indian Institute of Technology, Madars.
- [2] M.M.El-Wakil(1984). Powewplant Technology. Profresor of Mechanical and Nuclear Engineering, University of Wisconsin.
- [3] Jay T. Pukrushpan, Anna G. Stefanopoulou, Hue Peng(2006).Control Of Fuel Cell Power System, Principle, Modeling, Analysis and feedback design, Springer.
- [4] Colleen Spriegel(2008). FEM Cell Modeling and Simulation Using MATHLAB, Elsevier.
- [5] Bruce R Munson, Donal F Young, Theodore H Okiishi(2006). Fundamentals of Fluid Mechanics. Department of Mechanical and Aerospace Engineering Ames, Iowa,USA.
- [6] Yunus ACengel, Michael A. Boles(1994). Thermodynamics. McGraw-Hill,Inc.
- [7] Steven C Chapra (2007). Applied Numerical Methods with MATLAB. McGraw-Hill,Inc.
- [8] Arthur H. Lefebvre(1983), Gas turbine Combustion, School of Mechanical Engineering Purdue University, West Lafayette Indiana.
- [8] อวรุท ฤทธิรัตนากุล, พฤติกรรมการเผาไหม้ของหัวเผาวัสดูพرون. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21,17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## โปรแกรมจำลองระบบการผลิตไฟฟ้าและกำลังงานร่วม ระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

วริทธิ์ ตันติวีรสุต<sup>1</sup>, วชิรญา ยศบุญเรือง<sup>2</sup>, ศรัณย์ วรรณศิริ<sup>2</sup>, จารุวัตร เจริญสุข<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสนับสนุนเซลล์โดยมีส่วนประกอบของลำดับ 3 ส่วน ระบบรีฟอร์มมิ่ง: จำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมี ในการผลิต ไฮโดรเจน และส่งปริมาณของ ไฮโดรเจนเพื่อนำไปใช้ในระบบต่อไป ระบบเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง: จำลองการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับอากาศ ทำการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรวมทั้ง อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงและอากาศ ระบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซ: จำลองระบบคอมเพรสเซอร์ ห้องเผาไหม้ และกังหันก๊าซเพื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์มาเป็น ส่วนผสมช่วยการเผาไหม้และได้พลังงานกลจากกังหันที่ขยายตัวผ่านกังหันก๊าซ

### Abstract

This project concerns with the development of mathematical models of solid oxide fuel cell (SOFC) supporting subsystems comprising of:

Reforming subsystem: explains the chemical kinetics producing hydrogen from which the product is fed to the combustor.

Solid oxide fuel cell subsystem: simulate electrical production and the chemical reaction between Hydrogen (H<sub>2</sub>) and oxygen in the Air. It also calculates the consumption rate of fuel and air.

Gas turbine subsystem: simulate the compressor, combustor and turbine characteristics to accommodate the exhaust gas from SOFC stack.

More work also concern with the simulation of methane combustion in the combustion chamber using CFD technique.

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันและในอนาคตข้างหน้าเชื้อเพลิงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการขับเคลื่อนของเครื่องยนต์หรือเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องต้นกำลัง เช่น เครื่องบิน เรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น เครื่องยนต์เหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งนับวันกำลังจะหมดไปจากโลก ดังนั้นมนุษย์เราจำเป็นต้องหาเชื้อเพลิงชนิดอื่นมาทดแทน

สำหรับโครงการนี้เราจะศึกษาระบบเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) ชนิดของแข็ง ร่วมกับเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas Turbine) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าให้ นำไปใช้ประโยชน์ได้

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้สำหรับยานยนต์ในการขับเคลื่อน อาคารธุรกิจ ที่อยู่อาศัย หรือแม้กระทั่งนำมาไป ใช้ในอุปกรณ์ชิ้นเล็ก ๆ อย่างคอมพิวเตอร์แล็บท็อป ระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถที่จะให้ประสิทธิภาพสูง มีขนาดตั้งแต่ 1 กิโลวัตต์ - 100 เมกะวัตต์ ระบบ เซลล์เชื้อเพลิงใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง และกักเก็บเอาไว้เพื่อนำไปใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

<sup>1</sup> ชื่ออังกฤษ "A simulation program for electrical - power combined cycle between solid oxide fuel cell and Gas turbine engine"

<sup>2</sup> นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. ห้อง 4G รหัส 48010784, 48010804 และ 48010868 ตามลำดับ

<sup>3</sup> อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร. 081-617-7658, Email [kciarruw@kmitl.ac.th](mailto:kciarruw@kmitl.ac.th)

นำไปเป็นพลังงานให้กับระบบทำความร้อนหรือระบบทำความเย็น หรือแม้แต่ผลิตไฟฟ้าให้เราสามารถใช้กัน และด้วยเป็นระบบที่สะอาด จึงเป็นที่มาเหมาะสำหรับการผลิต รวมถึงมีความเชื่อมั่นสูงในการบริการด้านพลังงาน และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ รูปแบบของพลังงานทดแทนที่กล่าวมานี้เป็นพลังงานทดแทนอีกทางเลือกหนึ่งที่มีแนวโน้มที่จะมีบทบาทในวิวัฒนาการของมนุษยชาติในอีกไม่กี่ข้างหน้า โดยใช้เทคโนโลยีด้านเซลล์เชื้อเพลิง โดยข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับความสนใจเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่สำหรับอนาคต ก็คือ เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมน้อย ลดการเกิดก๊าซที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไนโตรเจน

เครื่องยนต์กังหันก๊าซเป็นเครื่องยนต์ชนิดหนึ่ง ซึ่งถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เครื่องยนต์สันดาปส่วนใหญ่จะใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการสันดาป ซึ่งในการเพิ่มกำลังให้กับเครื่องยนต์เครื่องหนึ่งนั้นจะต้องเพิ่มปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้ เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ในโครงการนี้อาศัยหลักการพื้นฐานเดียวกัน โดยเครื่องยนต์ที่ศึกษาจะใช้ก๊าซมีเทน เป็นเชื้อเพลิง เพื่อเป็นก้าวแรกในการพัฒนา อันจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้ก๊าซธรรมชาติในอนาคต ดังนั้นในโครงการนี้เมื่อนำมาใช้ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง และ จะทำการออกแบบโดยอาศัยหลักการพื้นฐานของเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic) รวมถึงการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดย Computational Fluid Dynamics (CFD)

## 2.วัตถุประสงค์

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงระบบผลิตไฮโดรเจนและระบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ทำการจำลองการทำงานของระบบที่สภาวะต่างๆและ ทำการศึกษาภาวะการทำงานร่วมกันของระบบย่อยดังกล่าว

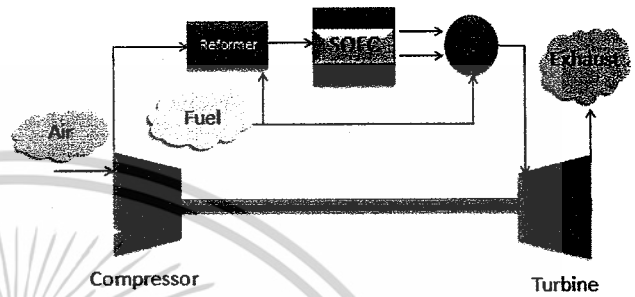
## 3.ขอบเขตของการศึกษา

ใช้โปรแกรมเพื่อเป็นเครื่องมือในการเรียนรู้ค่านวาระบบเซลล์เชื้อเพลิง และระบบสนับสนุนที่ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

- 1) ระบบ reformer เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบในการแยกสารมีเทน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน โดยคิดที่สภาวะ steady state
- 2) ระบบ Fuel Cell เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของโมเลกุลไฮโดรเจนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยพัฒนาแบบจำลองในระดับทอเซลล์
- 3) กำหนดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบ Lean Combustion มีเชื้อเพลิงที่เหลือจากระบบ Fuel Cell และมีเชื้อเพลิงเสริมคือ มีเทนเป็นสารตั้งต้นภายใต้ประสิทธิภาพเทอร์ไบน์และคอมเพรสเซอร์ ที่กำหนดขึ้น

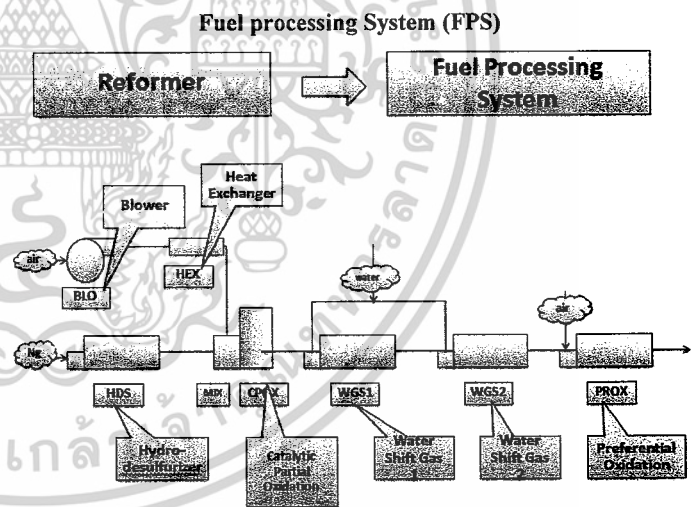
## 4.กิจกรรม

- ศึกษาการทำงานของระบบ Reformer
- ศึกษาการทำงานของระบบ Fuel Cell
- ศึกษาการทำงานของระบบ Hydrogen & LPG Combustion
- เรียนรู้การใช้โปรแกรม Chemkin
- เรียนรู้การใช้โปรแกรม Fluent
- เรียนรู้การใช้โปรแกรม Math lab



## 5.ทฤษฎี

### 1) ระบบ reformer



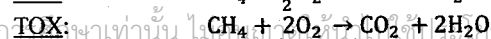
จากรูปภาพประกอบของระบบ Fuel Processing System (FPS)

ประกอบด้วย 4 ส่วนใหญ่ๆ

- 1) Hydro-desulfurizer (HDS)
- 2) Catalytic partial oxidation (CPOX)
- 3) Water gas Shift (WGS)
- 4) Preferential oxidation (PROX)

โดยบรรจุก๊าซธรรมชาติ(มีเทน)ลงไปในถังความดันสูงหรือท่อความดัน

สูง และเข้ามาผสมกับอากาศร้อนที่ MIXER (MIX)



โดยที่ปฏิกิริยาทั้งสองเกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับ Selectivity (S)

ใช้งานเพื่อศึกษาเท่านั้น ไม่ใช่วิธีปฏิบัติจริงในการค้า โดยที่ปฏิกิริยาทั้งสองเกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับ Selectivity (S)

$$\beta = \frac{\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาของมีเทนใน POX (mol/s)}}{\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดของมีเทน (mol/s)}}$$

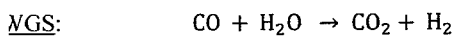
$$\beta = \frac{\text{อัตราการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนกับไฮโดรเจน}}{\text{อัตราการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนกับไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์}} = \frac{N_{O_2 r H_2} \text{ (mol/s)}}{N_{O_2 r H_2 CO} \text{ (mol/s)}}$$

จากปฏิกิริยา (POX) ได้คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ แต่

$$N_{i, in} = \frac{x_i^{mix} W_{cpx}}{M_i}$$

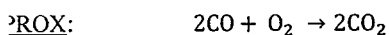
คาร์บอนมอนอกไซด์นั้นเป็นพิษ เราจึงใช้ (WGS)

โดยที่เราจะฉีดน้ำเข้าไปใน (WGS)

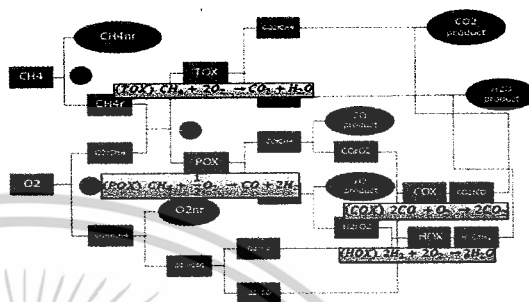


ต่อมาจนถึง (PROX) โดยทำการฉีดอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับ

คาร์บอนมอนอกไซด์



จากสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆสามารถสรุปได้ดังนี้



### Heat exchanger (HEX)

การแลกเปลี่ยนเชิงจลนศาสตร์เคมี โดยเราไม่คิดการ

เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และพิจารณาที่ Steady state

$$W^{blo} = W^{hex}$$

$W^{blo}$  คืออัตราการไหลของมวลก๊าซผสมที่ Blower ( $kg/s$ )

$W^{hex}$  คืออัตราการไหลของมวลก๊าซผสมที่ Heat exchanger ( $kg/s$ )

### Hydro-desulfurizer (HDS)

ความดันของก๊าซใน Hydro-desulfurizer ที่อัตราการไหลเข้า

ของมวลสารเท่ากับอัตราการไหลออก กำหนดให้ก๊าซธรรมชาติ (Ng) ที่ฉีด

เข้ามาเป็นมีเทน ( $CH_4$ ) ทั้งหมด

$$W_{fuel} = W^{hds}$$

$W^{hds}$  คืออัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซผสมที่ HDS ( $kg/s$ )

$W_{fuel}$  คืออัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงที่กำหนดขึ้น ( $kg/s$ )

### Mixer (Mix)

ก๊าซธรรมชาติจาก (HDS) และอากาศจาก Blower ผสมกันที่ถัง

ผสม (Mix) สามารถเขียนสมการของผสมได้คือ

$$W^{hds} = x_{CH_4}^{mix} W_{cpx}$$

$$W^{hex} = x_{air}^{mix} W_{cpx}$$

$W_{cpx}$  = อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซที่ CPOX ( $kg/s$ )

$$x_{air}^{mix} = \frac{1}{1 + \frac{M_{CH_4} p_{CH_4}^{mix}}{M_{air} p_{air}^{mix}}}$$

$$x_{CH_4}^{mix} = \frac{1}{1 + \frac{M_{air}^{atm} p_{CH_4}^{mix}}{M_{CH_4} p_{air}^{mix}}}$$

$$x_{N_2}^{mix} = x_{N_2}^{atm} x_{air}^{mix}$$

$$x_{O_2}^{mix} = x_{O_2}^{atm} x_{air}^{mix}$$

$$x_{H_2O}^{mix} = x_{H_2O}^{atm} x_{air}^{mix}$$

$$\lambda_{O_2C} \equiv \frac{n_{O_2}}{n_{CH_4}} = y_{O_2}^{atm} \frac{p_{air}^{mix}}{p_{CH_4}^{mix}}$$

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_1 \lambda_{O_2C} & \lambda_{O_2C} \geq 0.5 \\ 1 - (1 - 0.5\lambda_1)(1 - \tanh(\alpha_2(\lambda_{O_2C} - 0.5))) & \lambda_{O_2C} \leq 0.5 \end{cases}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดค้าน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{H_2} = N_{H_2 r CH_4} - N_{H_2 r O_2} = [2S\alpha - 2\beta(\lambda_{O_2C} - (2 - \frac{3}{2})\alpha) \text{sign}(S)] N_{CH_4, in}$$

$$N_{CO} = N_{CO r CH_4} - N_{CO r O_2}$$

$$N_{CO_2} = N_{CO_2 r CH_4} - N_{CO_2 r CO}$$

$$N_{H_2O} = N_{H_2O r CH_4} + N_{H_2O r H_2} + N_{H_2O, in}$$

$$N_{CH_4} = (1 - \alpha) N_{CH_4, in}$$

$$N_{O_2} = N_{O_2, in} - N_{O_2 r}$$

$$N_{N_2} = N_{N_2, in}$$

## 2) ระบบ Fuel Cell

หลักการการทำงานของ Fuel cell เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Gibb free energy ที่ต่างกันของผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้น



$$\Delta g_f = g_f \text{ of products} - g_f \text{ of reactants} = (g_f)_{H_2O} - (g_f)_{H_2} - (g_f)_{O_2}$$

Gibb free energy นี้ใช้ในการเคลื่อนที่  $e^-$  ผ่านวงจรไฟฟ้าสำหรับสองโมลของ hydrogen และหนึ่งโมล oxygen ซึ่งจะได้

$$\text{Electron work done} = -2FE$$

ซึ่ง F คือ Faraday constant (=96485 J) E โวลต์ที่เปลี่ยนแปลง  $e^-$

$$\Delta g_f = -2FE$$

แต่ Fuel cell มีส่วนของพลังงานที่ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible)

พลังงานบางส่วนในปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนเป็นพลังงานทางความร้อนทำให้

พลังงานไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าพลังงานที่ได้ข้างต้น ซึ่งสมการนี้เรียกว่า Nernst Equation

$$E = \frac{-\Delta g_f}{2F} = \frac{-\Delta g_f^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}$$

ค่าที่ถูกต้องที่ T = 25 , P = 1 atm จะได้ไฟฟ้า 1.229 V เหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมี 3 อย่างคือ Activation loss , Ohmic Loss , Concentration loss ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ซึ่งหากรวมสมการทางไฟฟ้าจะได้

$$V = E_{Nernst} - \eta_{act} - \eta_{ohmic} - \eta_{conc}$$

- $\eta_{act}$  = Activation loss ,
- $\eta_{ohmic}$  = Ohmic Loss ,
- $\eta_{conc}$  = Concentration loss

**Activation loss**

Activation loss คือค่าพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนย้าย e<sup>-</sup> และพลังงานที่ใช้ในการแยกพันธะเคมีใน anode and cathode ความสัมพันธ์ใน V<sub>act</sub> อธิบายโดยสมการ Tafel equation

$$\eta_{act} = -\frac{RT}{\alpha nF} \ln j_0 + \frac{RT}{\alpha nF} \ln j$$

$$\eta_{act} = a + b \log j$$

**Ohmic loss**

ทุกวัสดุจะมีค่าต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียด้านพลังงานทางไฟฟ้า การลดลงทางไฟฟ้าเรียกว่า "Ohmic loss" จะขึ้นกับค่าความต้านทานของ Electrode ทั้งฝั่ง cathode และ Anode โดยมีผลต่อ ความต้านทานและ อุณหภูมิของ cell

$$\eta_{ohmic} = iR_{ohmic}$$

**Concentration Loss**

Loss เนื่องจากการลดลงของผลิตภัณฑ์ความเข้มข้นของ gas จะทำให้เกิดการลดลงของความดันย่อยของผลิตภัณฑ์ใน Electrochemical ของอิเล็กโทรด จะก่อให้เกิดผลต่อ

Nernst loss. ค่าของ v จะลดลงคำนวณได้จากสมการ Nernst เนื่องมาจากสารตั้งต้นความเข้มข้นลดลงและ ผลิตภัณฑ์ที่ catalyst layer เพิ่มขึ้น

$$J_{diff} = -D_{eff} \frac{C_R^* - C_R^0}{\delta}$$

$$C_R^* = C_R^0 - \frac{j\delta}{nfD_{eff}}$$

รวมสมการเข้ากับสมการ Nernst จะได้  $\eta_{conc}$

$$\eta_{conc} = E_{Nernst}^0 - E_{Nernst}^*$$

$$= \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_R^0}{C_R^*}$$

$C_R^0$  เขียนในเทอมของ Diffusion equation

$$C_R^* = C_R^0 - \frac{jL\delta}{nFD_{eff}} \quad (2.85)$$

$$= \frac{jL\delta}{nFD_{eff}} - \frac{j\delta}{nFD_{eff}}$$

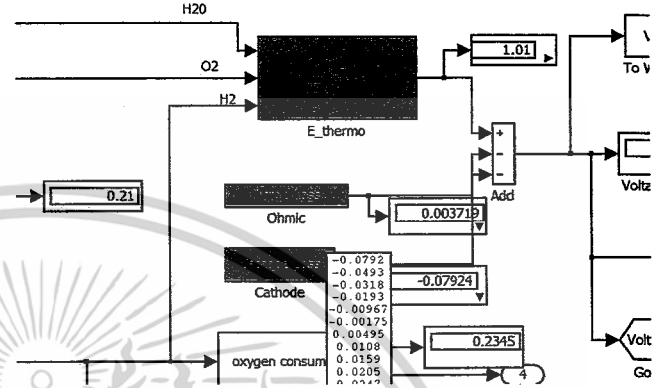
อัตราส่วนของ  $C_R^0/C_R^*$  เขียนได้ดังนี้

$$\frac{C_R^0}{C_R^*} = \frac{jL\delta/(nFD_{eff})}{jL\delta/(nFD_{eff}) - j\delta/(nFD_{eff})}$$

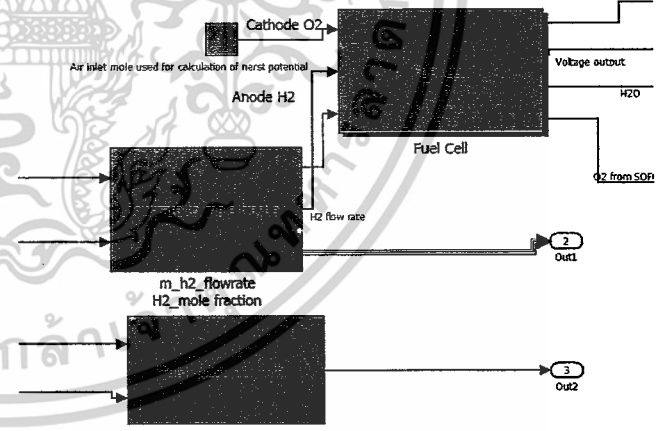
$$= \frac{jL}{jL - j}$$

ลักษณะตัวโปรแกรม

Sub module ใน SOFC :Nernst potential



จะประกอบด้วยสมการ Activation loss , Ohmic Loss , Concentration loss โดยสมการ E\_thermo จะรับค่า H<sub>2</sub> มาจาก reformer โดยก่อนจะเข้า Fuel cell จะเข้าบล็อก เพื่อที่จะเปลี่ยนหน่วย ในอัตราการใช้



ซึ่งจะอธิบายโปรแกรมอย่างละเอียดใน thesis

**3) ระบบ Turbine Combustion**

อุปกรณ์หลัก

- Compressor (เครื่องอัดอากาศ)
- Combustor (ห้องเผาไหม้)
- Turbine (กังหันก๊าซ)

การทำงานของเครื่องยนต์กังหันแก๊ส เริ่มจากชุดอัดอากาศ (Compressor) ดูดและอัดอากาศให้มีความดันสูงขึ้น ส่งเข้าห้องเผาไหม้ (Combustors) ผสมกับเชื้อเพลิงที่ฉีดออกมาจากหัวฉีด (Fuel Nozzle)

คิดการเผาไหม้ ก๊าซที่เผาไหม้ขยายตัวพุ่งออกไปปะทะกับเทอร์ไบน์ ทำให้เทอร์ไบน์หมุน ซึ่งทำให้เกิดพลังงานออกมาได้

**ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง**

**การจำลองแบบเชิงตัวเลข (Numerical Method)**

การจำลองแบบเชิงตัวเลขคือการจำลองพฤติกรรมของสิ่งที่สนใจ เพื่ออธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นจริงได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

**กฎการอนุรักษ์ (Law of conservation)**

ถือว่าเป็นพื้นฐานสำคัญของกลศาสตร์ความต่อเนื่อง และสำคัญอย่างมากต่อความเข้าใจทางกายภาพของพฤติกรรมคาร์ไบไลต์ และการถ่ายโอนความร้อน โดยสามารถใช้ได้กับทุกตำแหน่งในหัวกังหันด้วยแนวคิดของ

ความต่อเนื่อง ด้วยการอธิบายผ่านเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่เชื่อมโยง

ความหมายทางกายภาพ

ต่างๆไว้ แบ่งเป็น 3 กฎที่รู้จักกันดีคือ

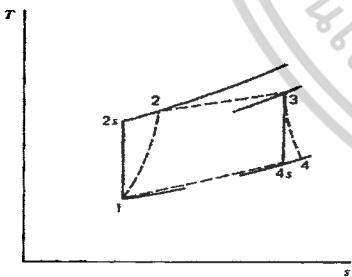
สมการเชิงอนุรักษ์มวล (Conservation of mass)

สมการเชิงอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum Equation)

สมการเชิงอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy)

**Compressor & turbine**

**Non-ideal Air Standard Gas Turbine System**



Turbine work

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{gas} \eta_t (h_3 - h_{4s})$$

$$= \dot{m}_{gas} \eta_t c_{pg} T_3 \left( 1 - \frac{T_{4s}}{T_3} \right)$$

Compressor work

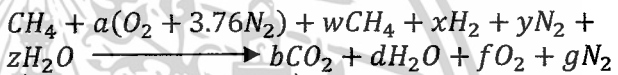
$$\dot{W}_c = \frac{\dot{m}_{air}}{\eta_c} (h_{2s} - h_1)$$

$$= \dot{m}_{air} \frac{c_{pa} T_1}{\eta_c} \left( \frac{T_{2s}}{T_1} - 1 \right)$$

- $\dot{W}_t$  = งานที่เกิดจากTurbine (kW/s)
- $\dot{W}_c$  = งานที่ให้ Compressor (kW/s)
- $\dot{m}_{gas}$  = mass flow rate of gas (kg/s)
- $\dot{m}_{air}$  = mass flow rate of air (kg/s)
- $\eta_t$  = efficiency of turbine
- $\eta_c$  = efficiency of Compressor
- $c_{pg}$  = Specific heat of gas =1.40 (kJ/kg.K)
- $c_{pa}$  = Specific heat of air =1.005 (kJ/kg.K)

**Combustion**

หลักการคำนวณพลังงานที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ เมื่อมีการฉีดเชื้อเพลิง(มีเทน)เข้าไปในห้องเผาไหม้ โดยมีอากาศและก๊าซที่เหลือจากระบบ Fuel cell โดยสมมติฐานว่าก๊าซเป็น Ideal gas, ความดันคงที่, Lean combustion และเป็นกาเผาไหม้แบบ Adiabatic Flame Temperature จะเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้



เมื่อ  $a, b, d, f, g$  คือ mole ที่ใช้ในการเผาไหม้ของปฏิกิริยา  
 $x, y, z$  คือ mole ที่เหลือจากระบบ Fuel Cell  
 $w$  คือ mole ที่เหลือจากระบบ Reformer

การดุลสมการใช้หลักการสมดุลมวล

$$X_i = \frac{N_i}{N_{TOT}}$$

โดย  $X_i$  คือ Mole Fraction ขององค์ประกอบ  $i$   
 $N_i$  คือ โมล ขององค์ประกอบ  $i$   
 $N_{TOT}$  คือ โมลรวมของก๊าซผสม

หา Absolute Enthalpy

$$\bar{h}_i(T) = \bar{h}_{f,i}^0(T_{ref}) + \Delta \bar{h}_{s,i}(T)$$

$$\bar{h}_{mix} = X_i \bar{h}_i$$

$$h_{mix} = \frac{\bar{h}_{mix}}{MW_{mix}}$$

การหาค่า Entropy

$$\Delta \bar{s} = \bar{s}_3^0 - \bar{s}_{4s}^0 + R \ln \frac{P_{4s}}{P_3}$$

จากเงื่อนไข ที่ความดันคงที่  $s_3 = s_{4s}$  . ในเทอมของ  $\Delta \bar{s} = 0$  จะได้

$$\bar{s}_{4s}^0 = \bar{s}_3^0 + R \ln \frac{P_{4s}}{P_3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เมื่อเป็นก๊าซผสม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$$s^0_{mix} = \frac{\bar{s}^0_{mix}}{MW_{mix}}$$

## 7. สรุปผล

เมื่อค่าแลมด้า O2C มีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจนและมีเทนมีค่าลดลง

เมื่อค่า  $\lambda$  O2C มีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราการไหลเชิงโมลของ  $H_2$  และ  $CH_4$  มีค่าลดลง อัตราการไหลเชิงมวลของห้อง CPOX แปรผัน อัตราการไหลเชิงโมลของ  $H_2$  และ  $CH_4$   $\lambda$  O2C มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 0.5 ถึง 2 อัตราส่วนของโมล  $CH_4$  ต่อ  $H_2$  จะมีค่าลดลงและประสิทธิภาพรวมจะมีค่าลดลง

ในส่วนของ SOFC เมื่อได้  $i - V$  (curve) จะนำค่า  $i \cdot V$  จะได้ Power density เพื่อหาค่าสูงสุด จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเทียบกับ  $V$  เพื่อหาทางนทางไฟฟ้า จากตัวอย่างที่ผ่านมาจะได้ค่า  $V$  ที่เหมาะสมที่สุด ประมาณ 0.54V

ใช้สมการการเผาไหม้ของมีเทน คำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพื่อนำหาพลังงานที่เกิดจากเทอร์โมโมเนเจอร์ปี ที่อุณหภูมิแอเดียเบติกจะเห็นว่าเมื่อให้เทอร์โมโมเนเจอร์ปีได้ 60kW จะเห็นว่าค่า Stoichiometric ที่เพิ่มขึ้น จะให้อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ลดลง ซึ่งจะประหยัดพลังงานมากกว่าโดยที่ให้กำลังได้เท่าเดิม

จะเห็นว่าในการใช้ Computer เพื่อใช้ในการคำนวณและศึกษาโดยใช้ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาถูกกว่า และไม่มีความเสี่ยงต่ออันตรายและวิเคราะห์ระบบใหญ่ๆ ที่ใช้สมการยุ่งยากได้ง่าย เราควรทราบ หลัก ทฤษฎี และนำผลการ มาใช้ได้อย่างถูกต้องและชำนาญ เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดจากการคำนวณของ Computer ให้มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้ การคำนวณและการจำลองใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงได้

## 7.เอกสารอ้างอิง

- [1] V Ganesan(2004). Internal Combustion Engines. Indian Institute of Technology, Madras.
- [2] M.M.El-Wakil(1984). Powewplant Technology. Profesor of Mechanical and Nuclear Engineering, University of Wisconsin.
- [3] Jay T. Pukrushpan, Anna G. Stefanopoulou, Hue Peng(2006).Control Of Fuel Cell Power System, Principle, Modeling, Analysis and feedback design, Springer.
- [4] Colleen Spriegel(2008). FEM Cell Modeling and Simulation Using MATHLAB, Elsevier.
- [5] Bruce R Munson, Donal F Young, Theodore H Okiishi(2006). Fundamentals of Fluid Mechanics. Department of Mechanical and Aerospace Engineering Ames, Iowa,USA.

[6] อาวุธ ลภีรัตนากุล, พหุติกรรมกรเผาไหม้ของหัวเผาวัสดุพูน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, 17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี

การหาค่าอุณหภูมิเปลวไฟแอเดียบาติก  
(Adiabatic Flame Temperature)

$$Q = \Delta H = 0$$

$$\Delta H_c = H_{react} - H_{prod} = 0$$

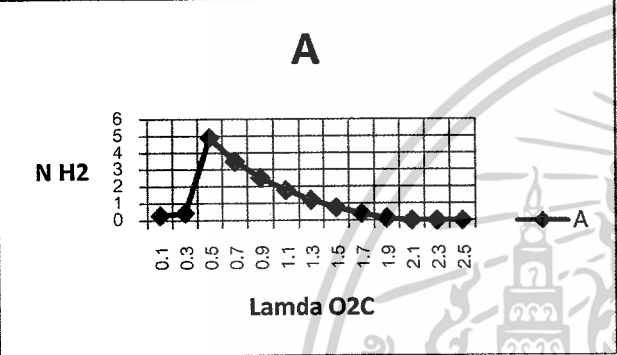
$$T_{ad} = \frac{[H_{react} - \sum_{prod} N_i (\bar{h}_{f,i}^0 - \bar{c}_{p,T_{ad}} \cdot 298)]}{\sum_{prod} (N_i \cdot \bar{c}_{p,T_{ad}})}$$

จะอธิบายโปรแกรมอย่างละเอียดใน thesis

## 6. ตัวอย่างผลการจำลอง

$$\dot{N}_{H_2} = N_{H_2,CH_4} - N_{H_2,O_2}$$

$$= [2S\alpha - 2\beta (\lambda_{O_2C} - (2 - \frac{3}{2}S)\alpha) \text{sign}(S)] N_{CH_4,in}$$

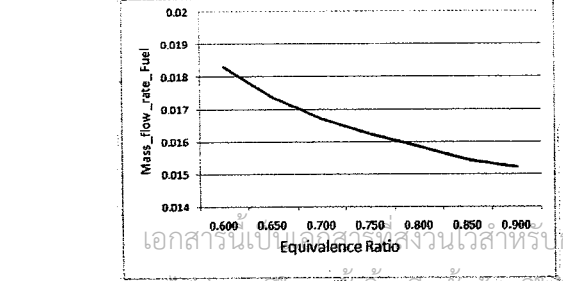
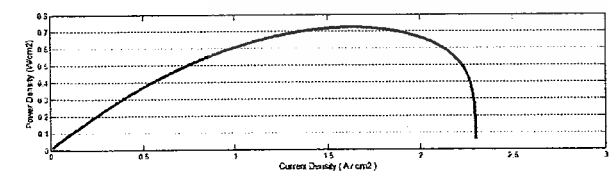
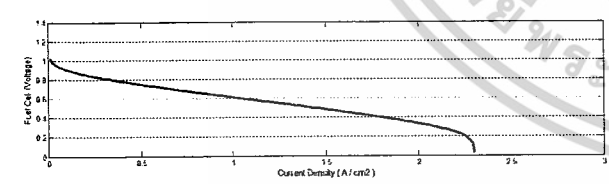


SOFC จากที่ได้สมการ

$$V = E_{thermo} - j \frac{tM T}{Ae^{-\Delta G/(RT)}}$$

$$- \frac{RT}{4 \alpha F} \ln \left[ \frac{j}{j_0 P^c \left\{ x_{O_2}(d) - t^c \left[ jRT/4f P^c D_{O_2,N_2}^{eff} \right] \right\}} \right]$$

ผลการจำลองของ T=1073K ที่ความดัน p = 1atm  
เพิ่มค่าจาก 0 ถึง 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$a$	Molar Oxygen-fuel ratio , kmol/kmol	$\eta_t$	efficiency of turbine
$A$	พื้นที่ , cm <sup>2</sup>	$\eta_c$	efficiency of Compressor
$C_p$	ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่ (kJ/kg.K)	$N_i$	โมล ขององค์ประกอบ $i$
$C_{pg}$	Specific heat of gas =1.40 (kJ/kg.K)	$N_i$	อัตราการไหลเชิงโมลของสาร $i$ , mol/s
$C_{pa}$	Specific heat of air =1.005 (kJ/kg.K)	$N_{TOT}$	โมลรวมของก๊าซผสม
$C^*$	ความเข้มข้นของปฏิกิริยาที่ผิว, mole /cm <sup>2</sup>	$N_i$	คือจำนวนโมลขององค์ประกอบ
$D$	การแพร่ , cm <sup>2</sup> /s	$P, T$	คือความดันและอุณหภูมิสถิตของก๊าซผสมในห้องเผาไหม้
$E_T, E$	thermodynamic ideal voltage	$t$	ความหนา, cm
$F$	ค่าคงที่ฟาราเดย์ ,96485 C/mol	$Q$	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง, kJ
$G, g$	<i>gibb free energy</i> , J ,J/mol	$\bar{R}$	คือค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 kJ/kmol.K)
$H, h$	เอนทาลปี , J ,J/mol	$R$	ความต้านทาน, ohm
$h$	Enthalpy (kJ/kg)	$S, s$	เอนโทรปี, J/K
$i$	ความหนาแน่นทางกระแสไฟฟ้า ( )	$V$	ความดันไฟฟ้า, V
$i$	กระแส, A	$\dot{W}_t$	คือ งานที่เกิดจากTurbine, kW/s
$J$	ฟลักการไหล, mol/ cm <sup>2</sup>	$\dot{W}_c$	คือ งานที่ให้ Compressor, kW/s
$j$	current density , A/cm <sup>2</sup>	$W^{blo}$	อัตราการไหลของมวลก๊าซผสมที่ Blower, kg/s
$j_o$	exchange current density , A/cm <sup>2</sup>	$W^{hex}$	อัตราการไหลของมวลก๊าซผสมที่Heat exchanger, kg/s
$\dot{m}$	อัตราการไหล (kg/s)	$W^{hds}$	อัตราการไหลของมวลก๊าซผสมที่ Hydro-desulfurizer, kg/s
$\dot{m}_{air}$	อัตราการไหลของอากาศ ,kg/s	$W_{Fuel}$	อัตราการไหลของมวลก๊าซผสมที่ถึงเชื้อเพลิง, kg/s
$MW_{mix}$	มวลโมเลกุลของก๊าซผสม	$W$	งาน, J
$MW_i$	มวลโมเลกุลขององค์ประกอบ $i$	$x$	mole fraction
$MW_{air}$	น้ำหนักมวลโมเลกุลของอากาศ ,kg/kmol		
$MW_{fuel}$	น้ำหนักมวลโมเลกุลของเชื้อเพลิง ,kg/kmol		
$\dot{m}_{gas}$	mass flow rate of gas (kg/s)		
$\dot{m}_{air}$	mass flow rate of air (kg/s)		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
 สืบค้นโดยโมล ขององค์ประกอบ  $i$  นำไปใช้

$X_i$	Mole Fraction ขององค์ประกอบ i	$\eta$	efficiency
$x_{air}^{mix}$	อัตราส่วนเชิงมวลของอากาศที่ห้องMixer	$\eta_{ohmic}$	Ohmic loss, V
$x_{CH_4}^{mix}$	อัตราส่วนเชิงมวลของมีเทนที่ห้องMixer	$\eta_{conc}$	Concentration loss, V
$x_{CH_4}^{atm}$	อัตราส่วนเชิงมวลของมีเทนที่บรรยากาศ	$\eta_{act}$	Activation loss, V
$\rho$	คือความหนาแน่นของก๊าซผสม	$\alpha$	สปส.การเคลื่อนที่ทางประจุไฟฟ้า () charge transfer coefficient
$\eta_c$	ประสิทธิภาพไอเซ็นโทรปิกของการอัด	$\gamma$	activity coefficient
$\eta_t$	ประสิทธิภาพไอเซ็นโทรปิกของการขยายตัว	$\delta$	ชั้นความหนาการแพร่, m
$\eta_{wrox}$	ประสิทธิภาพของห้อง WROX	$\lambda_{O_2C}$	อัตราส่วนของโมล ออกซิเจนส่วนด้วยมีเทน
		$\phi$	Equivalence Ratio



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้