

๒๕๑.๖๑๔๔๔๙

ร.๖๔๑๗

๘.๔

การจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพ โดยใช้
โปรแกรม Aspen Plus



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
พฤษภาคม ๒๕๕๓
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

๕ ๓ ๗ ๒ ๖ / ๗

๒๐ ก.ย. ๒๕๕๓

การจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพ โดยใช้
โปรแกรม Aspen Plus



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
พฤษภาคม 2553

ทัชพงษ์ จันทรลี. (2553). การจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus ปรินูญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์, ดร. จันจิรา จับศิริ

การจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen PlusTM มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen PlusTM ศึกษาผลของอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ และองค์ประกอบเชื้อเพลิงที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพ โดยมีอัตราส่วนขององค์ประกอบ ได้แก่ $\text{CH}_4:\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2:\text{CO}$ เท่ากับ 55:40:3:1:1, 60:35:3:1:1, 65:30:3:1:1, 70:25:3:1:1 และ CH_4 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งงานวิจัยนี้ นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่มีการนำความร้อนที่เกิดจากกระบวนการมาช่วยประโยชน์ในกระบวนการได้ โดยให้รูปแบบที่มีอยู่ในโปรแกรม Aspen PlusTM และหน่วยปฏิบัติการต่างๆ ที่มีอยู่ในโปรแกรม โดยที่แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งใน Aspen PlusTM ที่ถูกพัฒนาขึ้นมา นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทของ Siemens – Westinghouse 100 กิโลวัตต์ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามูลค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง ในทำนองเดียวกันเมื่อค่าองค์ประกอบของมีเทนในเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามูลค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จากการจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง พบว่าการนำพลังงานความร้อนที่ได้มาช่วยประโยชน์ในระบบ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในการผลิตกระแสไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถช่วยลดการนำพลังงานภายนอกมาใช้ได้

SIMULATION OF SOLID OXIDE FUEL CELL SYSTEM FOR BIOGAS FEED APPLICATION
USING ASPEN PLUS PROGRAM



Presented in partial fulfillment of the requirements for the
Master of Engineering degree in Chemical Engineering
at Srinakharinwirot University

May 2010

Touchpong Janlee. (2010). *Simulation of Solid Oxide Fuel Cell System for Biogas Feed Application Using Aspen Plus*. Master Thesis, M.Eng. (Chemical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst. Prof. Dr. Wanwilai Kraipech Evans, Dr. Junjira Jupsin.

The objectives of this research work is to study and simulate solid oxide fuel cell (SOFC) system for biogas feed application using Aspen Plus. The development of a SOFC model by utilizing existing Aspen Plus SOFC functions and existing unit operation modules was introduced. The developed Aspen Plus SOFC model was validated of by compare to the experimental data obtained from Siemens-Westinghouse 100 kW class tubular SOFC stack by Veyo S. (1996). The new design SOFC system with heat recovery processes was presented in this work. Sensitivity analyses of major operating parameters of; composition of biogas, and fuel and air molar flow rate in the design SOFC system, were also carried out. The biogas compositions of $\text{CH}_4:\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2:\text{CO}$ used in this work are equal to 55:40:3:1:1, 60:35:3:1:1, 65:30:3:1:1, 70:25:3:1:1 and CH_4 100 %. It was found that an increase in fuel and air flow rate and methane ratio in biogas leads to increase the power density but decrease the thermal efficiency. The heat recovery processes included in the presented SOFC system can increase the efficiency of the system and reduce the use of external energy.

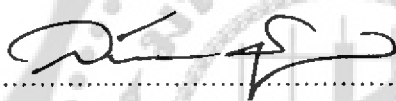
ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม
Aspen Plus

ของ
ทัชพงษ์ จันทรลี

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวិชากรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



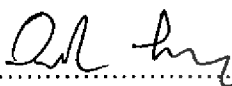
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย สันติวัฒนกุล)

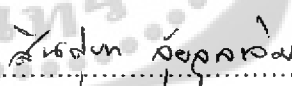
วันที่ 27 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2553

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า



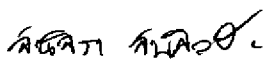
..... ประธาน



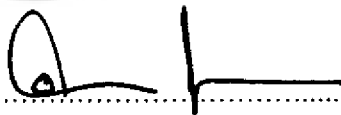
..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินศุภา จัตุจลเจิม)



..... กรรมการ



..... กรรมการ

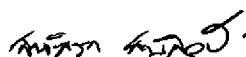
(ดร.จันจิรา จับศิลป์)

(พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์)



..... กรรมการ

(ดร.จันจิรา จับศิลป์)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรรณวิไล ไกรเพ็ชร เอวานส์ ประธานกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ และ ดร.จันจิรา จัปศิลป์ กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ให้แนวคิดในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับปริญญานิพนธ์ ตลอดจนช่วยตรวจแก้ปริญญานิพนธ์จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินศุภา จัยจุลเจิม ประธานกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะในการวิเคราะห์และอภิปรายผลจากงานวิจัยในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ และอาจารย์ พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง กรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนโปรแกรมในการจำลองการไหล รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เชื้อเพื่อสถานที่ในการทำวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้การอุปการะเลี้ยงดูอบรมสั่งสอน ให้ความรู้จนมีโอกาสดำเนินโครงการฉบับนี้ และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ทัชพงษ์ จันทรลี

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ผลงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทนำ.....	5
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	21
3 การกำหนดปัญหาและการตรวจสอบผลการคำนวณ.....	35
การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
การตรวจสอบผลการคำนวณกับผลการจำลองและผลการทดลองจาก งานวิจัยที่ผ่านมาโดยการใช้โปรแกรม Aspen Plus.....	36
การออกแบบแบบจำลองสำหรับกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิง แบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพ โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus	38
สรุปผลท้ายบท.....	42
4 การศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของ.....	43
เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง.....	43
การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย.....	43
ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์.....	44
สรุปผลท้ายบท.....	64

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะจากงานวิจัย.....	65
สรุปผลงานวิจัย.....	65
ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย.....	66
บรรณานุกรม.....	67
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก การตรวจสอบผลการคำนวณกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยการคำนวณภายนอก.....	71
ภาคผนวก ข คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย.....	115
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	119

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	10
2 สภาวะเงื่อนไขการทำงานของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ ของแข็งประเภทท่อที่ทดลองโดยซาง ครัวเทห์ ดักลาส ฟาวเลอร์ และ เอ็นท์เซฟ และผลการทดลองของเวโย.....	37
3 ผลการจำลองการทำงานของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ ของแข็งประเภทท่อ โดยนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ทดลอง โดยซาง ครัวเทห์ ดักลาส ฟาวเลอร์ และ เอ็นท์เซฟและผลการทดลอง ของเวโย.....	38
4 สภาวะเงื่อนไขการทำงานของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ ของแข็งประเภทท่อที่ออกแบบในงานวิจัยนี้.....	40
5 ผลการจำลองการทำงานของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ ของแข็งประเภทท่อในงานวิจัยนี้.....	40
6 สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ.....	44
7 ตารางสรุปกรณีที่ทำการศึกษา.....	46
8 สรุปผลการคำนวณสำหรับทุกกรณีศึกษา.....	47
9 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ตามแบบจำลอง.....	72
10 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง.....	90
11 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,500 โมลต่อชั่วโมง.....	91

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
12 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,000 โมลต่อชั่วโมง.....	92
13 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,500 โมลต่อชั่วโมง.....	93
14 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 4,000 โมลต่อชั่วโมง.....	94
15 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง.....	95
16 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,500 กิโลโมลต่อชั่วโมง.....	96

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง

หน้า

17 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,000 โมลต่อชั่วโมง.....	97
18 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,500 โมลต่อชั่วโมง.....	98
19 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 4,000 โมลต่อชั่วโมง.....	99
20 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง.....	100
21 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,500 โมลต่อชั่วโมง.....	101

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
22 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,000 โมลต่อชั่วโมง.....	102
23 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,500 โมลต่อชั่วโมง.....	103
24 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 4,000 โมลต่อชั่วโมง.....	104
25 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 70 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง.....	105
26 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 70 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,500 โมลต่อชั่วโมง.....	106

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
27	ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 70 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,000 โมลต่อชั่วโมง.....	107
28	ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 70 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,500 โมลต่อชั่วโมง.....	108
29	ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 70 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 4,000 โมลต่อชั่วโมง.....	109
30	ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง.....	110
31	ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,500 โมลต่อชั่วโมง.....	111
32	ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,000 โมลต่อชั่วโมง.....	112

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
33 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิง เท่ากับ 3,500 โมลต่อชั่วโมง.....	113
34 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยมีเทน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิง เท่ากับ 4,000 โมลต่อชั่วโมง.....	114



บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	6
2 รูปหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง.....	13
3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่วางเรียงต่อกันเป็นชุด.....	17
4 แผนภาพวงจรไฟฟ้าสำหรับระบบ SOFC-UPS.....	17
5 วงจรไฮบริดของก๊าซเทอร์ไบน์ในระบบ SOFC-ICGT.....	18
6 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในรูปแบบของโปรแกรม Aspen Plus TM	25
7 กราฟความสามารถของเซลล์ (Performance curve) แสดงค่าที่เกิดจาก ค่าความต่างศักย์เกินตัวทั้ง 3 ประเภท.....	29
8 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ณ สภาวะการณ์ทำงานอ้างอิง.....	34
9 ขั้นตอนการจำลองกระบวนการในโปรแกรม Aspen Plus	37
10 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในรูปแบบของโปรแกรม Aspen Plus TM	39
11 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในรูปแบบของโปรแกรม Aspen Plus TM .ในงานวิจัยนี้.....	39
12 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า.....	41
13 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า.....	44
14 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในรูปแบบของโปรแกรม Aspen Plus TM	44
15 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแส ไฟฟ้าที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตรา การไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	49

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
16 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการ การไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	50
17 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าทุกกรณีศึกษา ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ..	51
18 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ทุกกรณีศึกษา ที่อัตราการไหล เชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	51
19 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแส ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล เชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	52
20 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแส ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล เชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	53
21 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแส ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 70 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล เชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	53
22 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแส ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	54

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
23 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตรา การไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	54
24 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตรา การไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	54
25 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 70 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตรา การไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	55
26 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	55
27 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่ค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	57
28 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่ค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	58
29 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าทุกกรณีศึกษา ที่องค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	58

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

[illegible]

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเผาไหม้เชื้อเพลิงทำให้เกิดพลังงานความร้อนซึ่งสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปพลังงานแบบอื่นๆ เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานกล หรือพลังงานรูปอื่นๆ แหล่งของพลังงานเชื้อเพลิง ได้แก่ เชื้อเพลิงจากฟอสซิล เชื้อเพลิงจากชีวภาพ เป็นต้น เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติเป็นแหล่งพลังงานหลักที่มนุษย์นำมาใช้มากที่สุด ทำให้ปัจจุบันมีราคาสูงขึ้นและมีปริมาณลดลง และอาจจะหมดไปในไม่ช้า นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลยังทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดภาวะเรือนกระจก (Green house effect) นอกจากนี้ยังมีก๊าซพิษอื่นๆ รวมทั้งฝุ่นละอองและเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ออกมาด้วย ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันการพัฒนาเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ (Alternative fuels) ขึ้นมาใช้งานแทนที่น้ำมันดิบเป็นสิ่งที่ประเทศพัฒนาแล้วต่างๆ ทั่วโลก อาทิเช่น สหรัฐอเมริกา เยอรมัน อังกฤษ และญี่ปุ่น กำลังให้ความสนใจ และดำเนินงานวิจัยเพื่อสังเคราะห์เชื้อเพลิงประเภทใหม่ จากวัตถุดิบต่างๆ ออกมากันอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างของเชื้อเพลิงชนิดสำคัญที่ทั่วโลกกำลังให้ความสนใจศึกษาและวิจัยอยู่ ได้แก่ เชื้อเพลิงไฮโดรเจน คือ เชื้อเพลิงที่สะอาดโดยเฉพาะเมื่อใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่ก่อให้เกิดมลพิษใดๆ รวมทั้งปราศจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นก๊าซเรือนกระจก และเป็นต้นเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อน ประเทศไทยมีข้อได้เปรียบของการใช้เทคโนโลยีเชื้อเพลิงไฮโดรเจน คือ ประเทศไทยมีแหล่งเชื้อเพลิงที่สามารถใช้ผลิตไฮโดรเจนได้มากมาย อาทิเช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวมวล ถ่านหิน หรือแม้แต่ เอทานอลจากพืช ซึ่งหากประเทศไทยสามารถพัฒนาเทคโนโลยีในการเปลี่ยนวัตถุดิบดังกล่าวเป็นก๊าซไฮโดรเจนเพื่อใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงได้ ถึงแม้ในอนาคตประเทศไทยต้องซื้อเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงจากต่างประเทศเข้ามา ก็จะเป็นการลดต้นทุนของประเทศอย่างมากมาย อีกทั้งการพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูป เชื้อเพลิงขึ้นมาเองเพื่อใช้กับวัตถุดิบที่มีอยู่ในประเทศจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมสูงกว่าการซื้อเทคโนโลยีทั้งระบบมาจากต่างประเทศ (นวดล เหล่าศิริพันธ์, 2550)

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเคมีที่จะแปลงพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าและความร้อนได้โดยตรงโดยปราศจากการเผาไหม้หรือสันดาป เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งแบ่งได้ 5 ชนิดได้แก่

1. เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, PEMFC) การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถทำงานได้รวดเร็วแม้ที่อุณหภูมิต่ำให้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ

2. เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cells, AFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพสูงมาก มีข้อเสียที่เกิดขึ้นจากการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากเชื้อเพลิงและอากาศที่จะผ่านเข้าไปในเซลล์

3. เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC) อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ กรดฟอสฟอริก การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะให้ประสิทธิภาพที่สูงที่ 200 องศาเซลเซียส แต่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มีราคาสูง และยังให้กระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ต่ำ

4. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอนเนตหลอมเหลว (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาถูก ให้ประสิทธิภาพที่สูง แต่ปฏิกิริยาภายในเซลล์จะเกิดเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ส่วนประกอบของเซลล์เสียหายได้

5. เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 600 ถึง 1000 องศาเซลเซียส) ตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาไม่แพง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วที่อุณหภูมิสูง ไม่มีผลกระทบจากการกัดกร่อนของอิเล็กโทรไลต์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คาดหวังไว้ว่าจะสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าในศตวรรษที่ 21

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ให้ความร้อนมีมากในกระบวนการ ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการสามารถถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการได้ เช่น นำไปเพิ่มความร้อนในสายป้อน และเครื่องปฏิกรณ์ต่างๆ ในกระบวนการ ระบบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสามารถใช้ได้กับก๊าซธรรมชาติ ดังนั้น เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งจึงมีศักยภาพสูงในอนาคตอันใกล้

สำหรับระบบการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพนั้น จะต้องตรวจสอบระบบการทำงานทั้งหมด เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดและมีประสิทธิภาพรวมถึงกระแสไฟฟ้าตามที่ต้องการจากการทดลองก่อน แต่เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นมีราคาสูงและจะเป็นการสิ้นเปลืองอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำโปรแกรม Aspen Plus มาช่วยในการจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการสิ้นเปลืองดังกล่าว โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อต้องการศึกษาการจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพ ศึกษาความเป็นไปได้ใน

การนำความร้อนที่เกิดจากกระบวนการนำไปใช้ประโยชน์ รวมถึงปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ และศึกษาผลขององค์ประกอบของเชื้อเพลิง ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า และผลจากการจำลองระบบการทำงานนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยของอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ ที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพจากแบบจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

1.2.3 เพื่อศึกษาผลขององค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพจากแบบจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ออกแบบการจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

1.3.2 จำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus

1.3.3 ศึกษาผลของอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

1.3.4 ศึกษาผลขององค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเซลล์ คือ อัตราส่วนของมีเทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ 55:40, 60:35, 65:30, 70:25 และ 100:0

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยจะทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.4.1 ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Aspen Plus และออกแบบการจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

1.4.3 ออกแบบการจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus

1.4.4 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์และแสดงผล

1.4.5 สรุปผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1.4.6 จัดทำรูปเล่มโครงงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงการผลิตไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพ

1.5.2 เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในวิจัยและพัฒนาพลังงานต่อไปในอนาคต

1.5.3 ได้แบบจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพที่เหมาะสม



บทที่ 2

ผลงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี

หัวข้อ 2.1 บทนำ

หัวข้อ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อ 2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

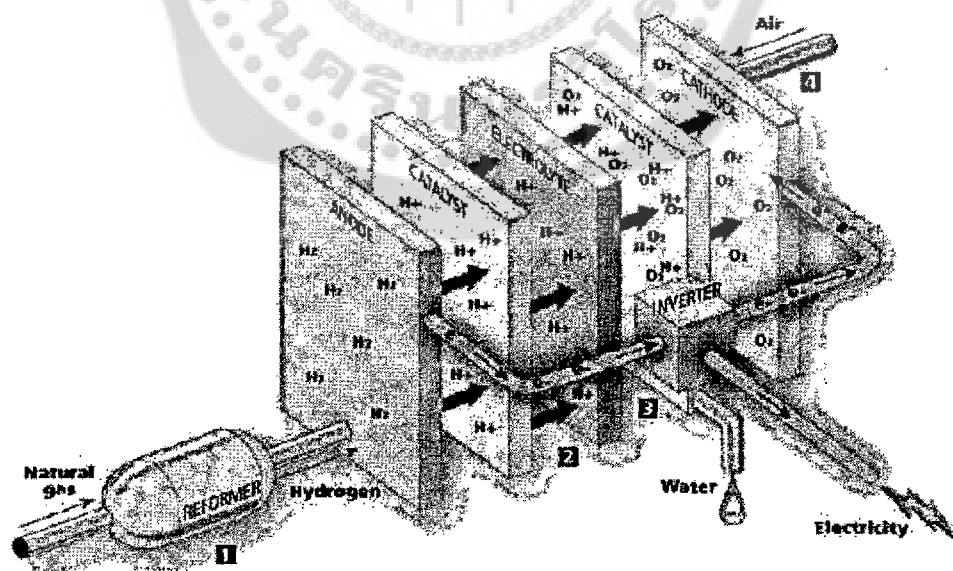
สำหรับระบบการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพนั้น จะต้องตรวจสอบระบบการทำงานทั้งหมด เพื่อหาสภาวะการณ์ทำงานที่เหมาะสมที่สุดและมีประสิทธิภาพรวมถึงกระแสไฟฟ้าตามที่ต้องการต้องอาศัยปัจจัยต่างๆ เช่น คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างเซลล์เชื้อเพลิง (อิเล็กโทรด และอิเล็กโทรไลต์) อัตราการไหล ความเร็ว ความดัน องค์ประกอบของเชื้อเพลิง และอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศ เป็นต้น ดังนั้นการในออกแบบจึงต้องมีความรู้และความเข้าใจในการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงโดยรวม เพื่อที่จะสามารถทำให้การทำงานของระบบโดยรวมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงการทำงานโดยภาพรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง จากนั้นจึงจะกล่าวถึงงานวิจัยซึ่งเป็นที่มาและมีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยงานวิจัยนี้เน้นการศึกษาการจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพ

2.1.1 ประวัติและความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเคมีที่จะแปลงพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าและความร้อนได้โดยตรงโดยปราศจากการเผาไหม้หรือสันดาปซึ่งจุดเริ่มต้นของเซลล์เชื้อเพลิงเกิดขึ้นในปี 1839 โดย William Grove ได้ผสมไฮโดรเจนและออกซิเจนลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำให้เกิดผลผลิตเป็นน้ำและมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น แต่การพบนี้ก็ไม่ได้ได้รับความสนใจ จนกระทั่งในปี 1959 Francis T. Bacon ก็ทำให้เกิดการตื่นตัวขึ้นเมื่อทีมงานของเขาสามารถเตรียมและสาธิตการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้น ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ ขั้วลบหรือแคโทดขั้วบวกหรือแอโนด สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเชื้อเพลิงซึ่งเป็นก๊าซออกซิเจนและไฮโดรเจน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ประกอบด้วย (i) ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดจะเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจน

กลายเป็นโปรตอน (H^+) และอิเล็กตรอนอิสระที่จะถูกถ่ายเทไปยังขั้วแคโทด ในขณะที่ (ii) ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดจะรวมก๊าซออกซิเจนและโปรตอนให้กลายเป็นน้ำ ซึ่งก่อให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้น เซลล์เชื้อเพลิงจึงสามารถให้กระแสไฟฟ้าโดยตรง และให้น้ำเป็นผลผลิตของระบบ ดังนั้นจึงไม่มีการปลดปล่อยสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์เชื้อเพลิงจะมีส่วนคล้ายกับแบตเตอรี่ โดยที่ทั้งสองระบบนี้จะมีขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรด 2 ขั้วซึ่งถูกแบ่งแยกออกจากกันโดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นภายในเซลล์ก็จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าขึ้นได้ แต่เซลล์เชื้อเพลิงจะแตกต่างกับแบตเตอรี่ในส่วนที่เซลล์เชื้อเพลิงซึ่งจะถูกป้อนเข้าสู่ภายในเซลล์จากแหล่งกำเนิดภายนอก

เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจหลายประการ ดังตัวอย่างเช่น กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงไม่เป็นไปตามกฎของคาร์โนท์ ทำให้ไม่มีความจำเป็นที่ต้องเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อที่จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้แล้วที่อุณหภูมิต่ำการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงก็ไม่ส่งผลให้เกิด NO_x ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดเชื้อเพลิงถูกออกซิไดส์ โดยทั่วไปแล้วถ้าใช้เชื้อเพลิงเป็นไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ น้ำ แต่อาจจะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้ถ้าใช้เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นสารประเภทไฮโดรคาร์บอน นอกจากเรื่องของประสิทธิภาพและปราศจากมลพิษแล้ว เซลล์เชื้อเพลิงยังไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางเสียง และสามารถออกแบบในลักษณะที่นำเซลล์แต่ละเซลล์มาต่อกันเป็นชุดๆ เพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าตามที่ต้องการได้



ภาพประกอบ 1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง[<http://students.bath.ac.uk/en2dg/Fuelcell.htm>]

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงได้รับความสนใจในการพัฒนามาใช้งานจริงกล่าวคือ เมื่อเปรียบเทียบเซลล์เชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ชนิดสันดาปภายในที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในรถยนต์ในปัจจุบัน เซลล์เชื้อเพลิงสามารถแปลงวัตถุดิบให้เป็นพลังงานขับเคลื่อนเครื่องยนต์สูงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เครื่องยนต์ชนิดสันดาปภายในมีประสิทธิภาพเพียง 25 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามการจะนำเซลล์เชื้อเพลิงมาเป็นแหล่งพลังงานในรถยนต์ได้นั้น ยังต้องมีการแก้ไขและพัฒนาอีกหลายจุด โดยเฉพาะความปลอดภัยของระบบการทำงาน กำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง และระบบการกักเก็บวัตถุดิบที่มีประสิทธิภาพ

2.1.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถจำแนกได้หลายชนิดขึ้นกับชนิดของสารที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งแบ่งได้ 5 ชนิดได้แก่

2.1.2.1. เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, PEMFC) จะใช้แผ่นเมมเบรนพอลิเมอร์ที่สามารถนำไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ และการทำงานของเซลล์ชนิดนี้จะกระทำที่อุณหภูมิที่น้ำอยู่ในสถานะของเหลว เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะมีข้อดีในด้านการนำไปใช้ ไม่เกิดการกัดกร่อน ไม่เกิดปัญหาในการกำจัดสารอิเล็กโทรไลต์เนื่องจากสารอิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็ง และสามารถทำงานได้รวดเร็วแม้ที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้เซลล์ชนิดนี้ยังให้ ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า สูงที่สุดเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในยานพาหนะ อย่างไรก็ตามเซลล์อาจมีราคาสูงเนื่องจากการใช้แพลทินัมที่มีราคาสูงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์

2.1.2.2. เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cells, AFC) สารอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้จะอยู่ในรูปสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เซลล์ประเภทนี้จะมีประสิทธิภาพสูงมาก เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาแคโทดได้รวดเร็วในอัลคาไลน์อิเล็กโทรไลต์ อย่างไรก็ตามข้อเสียที่เกิดขึ้นมักจะมีมาจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่ออิเล็กโทรไลต์ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากเชื้อเพลิงและอากาศที่จะผ่านเข้าไปในเซลล์ เซลล์จึงมักใช้ในเครื่องมือทางทหารและเครื่องมือในอวกาศซึ่งไม่มีปัญหาด้านค่าใช้จ่ายแต่เน้นประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์ที่สูง

2.1.2.3. เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC) อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงนี้ คือ กรดฟอสฟอริก ซึ่งการทำงานของเซลล์ประเภทนี้จะให้ประสิทธิภาพที่สูงที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังสามารถใช้กับไฮโดรเจนที่ไม่บริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิงในเซลล์ได้ แต่เซลล์ประเภทนี้ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มีราคาสูง และยังให้กระแสและ

ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ต่ำจึงเป็นข้อจำกัดด้านการนำเซลล์ประเภทนี้ไปใช้ เซลล์เชื้อเพลิงนี้จึงมักใช้ในเครื่องใช้ไฟฟ้าบางประเภทและในอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องการขนส่งบางชนิด

2.1.2.4. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC) ใช้ส่วนผสมของเกลือคาร์บอเนตที่หลอมเหลวของลิเทียม โซเดียม และ/หรือ โพแทสเซียมคาร์บอเนตซึ่งผสมในเมทริกซ์ที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ เซลล์เชื้อเพลิงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ราคาถูก มีประสิทธิภาพที่สูง แต่ปฏิกิริยาภายในเซลล์จะเกิดเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ส่วนประกอบของเซลล์เสียหายได้ นอกจากนี้ยังมีผลเกิดขึ้นจากการกัดกร่อนของอิเล็กโทรไลต์ด้วย

2.1.2.5. เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) เซลล์ชนิดนี้จะมีส่วนคล้ายกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว คือการทำงานของเซลล์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 600 ถึง 1000 องศาเซลเซียส) ตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาไม่แพง ขณะที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วขึ้นที่อุณหภูมิสูง เซลล์ชนิดนี้จะใช้เซรามิกเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นเซอร์โคเนียออกไซด์ (Zirconium Oxide) ที่เติมยิเทรียม (Yttrium) จำนวนเล็กน้อย แต่สำหรับเซลล์ชนิดนี้จะไม่มีความเสียหายจากการกัดกร่อนของอิเล็กโทรไลต์เหมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว แต่ก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับส่วนประกอบของเซลล์อันเกิดจากอุณหภูมิภายในเซลล์ที่สูง แต่เซลล์ชนิดนี้คาดหวังไว้ว่าจะสามารถนำไปใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าในศตวรรษที่ 21

นอกจากเซลล์เชื้อเพลิงที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเซลล์อีกชนิดที่เรียกว่า เซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ใช้เมทานอลเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดคล้ายกับปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน แตกต่างที่ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด โมเลกุลเมทานอลจะแตกออกเมื่อสารละลายผสมระหว่างน้ำกับเมทานอลถูกส่งผ่านไปขั้วลบ จากนั้นอะตอมของคาร์บอนจะรวมตัวกับออกซิเจนอะตอมที่มาจากเมทานอลกับน้ำเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนจะถูกออกซิไดส์ที่ขั้วแอโนดและโปรตอนจะวิ่งผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแคโทดทำให้เกิดน้ำขึ้นที่ขั้วแคโทดและเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขั้วแอโนด

2.1.3 ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิง [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]

2.1.3.1 เป็นแหล่งพลังงานที่ปลอดภัย ลดการใช้น้ำมัน ลดการนำเข้าน้ำมัน จึงเป็นการอนุรักษ์แหล่งพลังงานจากธรรมชาติ

2.1.3.2 มีประสิทธิภาพสูงมาก สามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงระหว่าง 50 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ (ขึ้นอยู่กับชนิดและการออกแบบของเซลล์เชื้อเพลิง) ในขณะที่โรงงานผลิตไฟฟ้าใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีของ

เชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เพียง 40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับในรถยนต์น้ำมันก๊าซโซลีนเมื่อเกิดการเผาไหม้ให้พลังงานเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนเพียง 25 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น

2.1.3.3 สามารถเลือกเชื้อเพลิงได้ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซโปรเพน ก๊าซบิวเทน เมทานอล หรือน้ำมันดีเซล เป็นต้น

2.1.3.4 เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากเซลล์เชื้อเพลิง คือน้ำบริสุทธิ์ อาจปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาบ้างขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงที่ใช้ แต่เมื่อเทียบกับการเผาไหม้ตามปกติจะเห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงไม่ผลิตก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ออกสู่บรรยากาศ และในขณะที่เซลล์กำลังทำงานจะไม่มีเสียงดังรบกวน เนื่องจากไม่มีวัสดุหรือส่วนใดของเซลล์มีการเคลื่อนที่จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและทางเสียง

2.1.4 ข้อจำกัดของเซลล์เชื้อเพลิง [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]

2.1.4.1 ไม่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในเซลล์แต่จะให้พลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องถ้าในเซลล์ยังมีเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์

2.1.4.2 วัสดุที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดราคาแพง และมีอายุการใช้งานสั้น

2.1.4.3 การขนส่งและการจัดเก็บก๊าซไฮโดรเจนซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิง ต้องใช้ความระมัดระวังและต้องใช้เทคนิคพิเศษจากผู้ที่ชำนาญมีเช่นนั้นอาจเกิดอันตรายได้ จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้มีการใช้ไฮโดรคาร์บอน หรือแอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงแทนก๊าซไฮโดรเจนทั้งๆ ที่เมื่อใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงจะไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเลย เพราะจะเกิดน้ำบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น

2.1.4.4 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะเกิดที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง เป็นต้น

2.1.5 ทิศทางของการวิจัยพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในอนาคต [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]

วิวัฒนาการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งมีแนวโน้มสูงที่จะใช้ในสถานีผลิตไฟฟ้าในศตวรรษหน้า ปัจจุบันแสดงให้เห็นว่าการวิจัยพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งนี้มีความเป็นไปได้สูงมาก อย่างไรก็ตามในแง่ของการนำไปใช้งานเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ยังมีรายละเอียดอีกมาก และในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงที่พัฒนาขึ้นมายังมีข้อบกพร่องบางประการดังได้กล่าวไปแล้ว จึงต้องมีการศึกษาวิจัยต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวข้องกับสิ่งต่อไปนี้

- 1) ปรับปรุงวัสดุที่ใช้เป็นตัวเชื่อมต่อและตัวประสานในเซลล์เชื้อเพลิง
- 2) ปรับปรุงในด้านราคาให้ต่ำลง
- 3) ปรับปรุงให้สามารถใช้งานได้นานและมีความทนทานสูง

2.1.6 ประวัติและความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพ [<http://th.wikipedia.org/wiki/ก๊าซชีวภาพ>]

ก๊าซชีวภาพ (Biogas หรือ digester gas) หรือ ไบโอก๊าซ คือ ก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน โดยทั่วไปจะหมายถึง ก๊าซมีเทนที่เกิดจากการหมัก (fermentation) ของอินทรีย์วัตถุ ประกอบด้วย ปุ๋ยคอก มูลจากน้ำเสีย ขยะประเภทของแข็งจากเมือง หรือ ของเสียชีวภาพจากอาหารสัตว์ภายใต้สภาวะ ไม่มีออกซิเจน (anaerobic) องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 50 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 30 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซชนิดอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน (H_2) ออกซิเจน (O_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไนโตรเจน (N_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไอน้ำ

ตาราง 1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ [<http://www.scribd.com/doc/7037713/biogas>]

องค์ประกอบของก๊าซ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
มีเทน (CH_4)	50 – 70
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	25 – 40
ไนโตรเจน (N_2)	0.5 – 3.0
ไฮโดรเจน (H_2)	0.5 – 1.5
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	0.5 – 1.5
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	0.01 – 0.05

ก๊าซชีวภาพมีชื่ออื่นอีกคือ ก๊าซหนองน้ำ และ มาร์ชก๊าซ (marsh gas) ขึ้นกับแหล่งที่มันเกิด กระบวนการนี้เป็นที่นิยมในการเปลี่ยน ของเสีย ประเภทอินทรีย์ทั้งหลายไปเป็นกระแสไฟฟ้า นอกจากกำจัดขยะได้แล้วยังทำลายเชื้อโรคได้ด้วย การใช้ก๊าซชีวภาพเป็นการบริหารจัดการของเสียที่ควรได้รับการสนับสนุนเพราะมันไม่เป็นการเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่เป็นต้นเหตุของ

ปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ส่วนการเผาไหม้ของก๊าซชีวภาพซึ่งส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทนจะสะอาดกว่า

2.1.7 ขบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะปราศจากออกซิเจน

[<http://th.wikipedia.org/wiki/ก๊าซชีวภาพ>]

ขบวนการย่อยสลายประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น ไขมัน แป้ง และโปรตีน ซึ่งอยู่ในรูปสารละลายจนกลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile acids) โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (acid-producing bacteria) และขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (methane-producing bacteria)

2.1.8 การย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซ [<http://th.wikipedia.org/wiki/ก๊าซชีวภาพ>]

การย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซมีปัจจัยต่าง ๆ เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1.8.1 อุณหภูมิ (Temperature) การย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซในสภาพปราศจากออกซิเจน สามารถเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากตั้งแต่ 4 ถึง 60 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของกลุ่มจุลินทรีย์

2.1.8.2 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความเป็นกรด-ด่าง มีความสำคัญต่อการหมักมาก ช่วง pH ที่เหมาะสมอยู่ในระดับ 6.6 ถึง 7.5 ถ้า pH ต่ำเกินไปจะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน

2.1.8.3 อัลคาไลน์ตี (Alkalinity) ค่าอัลคาไลน์ตี หมายถึง ความสามารถในการรักษาระดับความเป็นกรด-ด่าง ค่าอัลคาไลน์ตีที่เหมาะสมต่อการหมักมีค่าประมาณ 1,000 ถึง 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)

2.1.8.4 สารอาหาร (Nutrients) สารอินทรีย์ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ มีรายงานการศึกษาพบว่า มีสารอาหารในสัดส่วน C:N และ C:P ในอัตรา 25:1 และ 20:1 ตามลำดับ

2.1.8.5 สารยับยั้งและสารพิษ (inhibiting and Toxic Materials) เช่น กรดไขมันระเหยได้ ไฮโดรเจน หรือแอมโมเนีย สามารถทำให้ขบวนการย่อยสลายในสภาพไร้ออกซิเจนหยุดชะงักได้

2.1.8.6 สารอินทรีย์และลักษณะของสารอินทรีย์สำหรับขบวนการย่อยสลาย ซึ่งมีความแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1.8.7 ชนิดและแบบของบ่อก๊าซชีวภาพ (Biogas Plant) บ่อก๊าซชีวภาพ แบ่งตามลักษณะการทำงาน ลักษณะของของเสียที่เป็นวัตถุดิบ และประสิทธิภาพการทำงานได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ ดังนี้

2.1.8.7.1 บ่อหมักช้าหรือบ่อหมักของแข็ง บ่อหมักช้าที่มีการสร้างใช้ประโยชน์กันและเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป มี 3 แบบหลัก คือ

2.1.8.7.1.1 แบบยอดโดม (fined dome digester)

2.1.8.7.1.2 แบบฝาครอบลอย (floating drum digester) หรือแบบอินเดีย (Indian digester)

2.1.8.7.1.3 แบบพลาสติกคลุมราง (plastic covered ditch) หรือแบบปลั๊กโฟลว์ (plug flow digester)

2.1.8.7.2 บ่อหมักเร็วหรือบ่อบำบัดน้ำเสีย แบ่งได้เป็น 2 แบบหลัก คือ

2.1.8.7.2.1 แบบบรจุตัวกลางในสภาพไร้ออกซิเจน (Anaerobic Filter) หรืออาจเรียกตามชื่อย่อว่า แบบเอเอฟ (AF) ตัวกลางที่ใช้ทำได้จากวัสดุหลายชนิด เช่น ก้อนหิน กรวด พลาสติก เส้นใยสังเคราะห์ ไม้ไผ่ตัดเป็นท่อน เป็นต้น ในลักษณะของบ่อหมักเร็วแบบนี้ จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนบนตัวกลางที่ถูกตรึงอยู่

2.1.8.7.2.2 แบบยูเอเอสบี (UASB หรือ Upflow Anaerobic Sludge Blanket) บ่อหมักเร็วแบบนี้ใช้ตะกอนของสารอินทรีย์ (sludge) ที่เคลื่อนไหวภายในบ่อหมักเป็นตัวกลางให้จุลินทรีย์เกาะ ลักษณะการทำงานของบ่อหมักเกิดขึ้น โดยการควบคุมความเร็วของน้ำเสียให้ไหลเข้าบ่อหมักจากด้านล่างขึ้นสู่ ด้านบนตะกอนส่วนที่เบาจะลอยตัวไปพร้อมกับน้ำเสียที่ไหลล้นออกนอกบ่อตะกอนส่วนที่หนัก จะจมลงก้นบ่อ

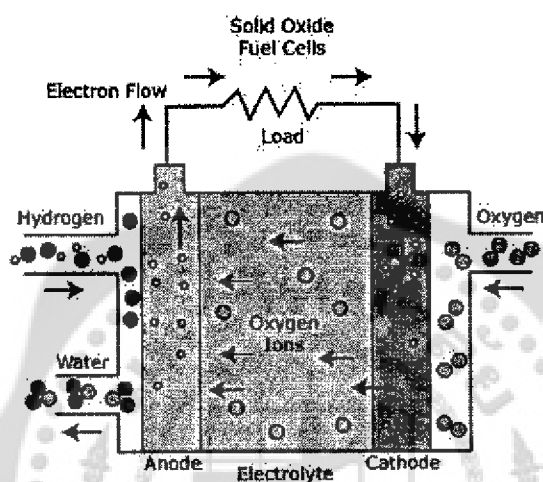
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยและการพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งนั้นมีหลายส่วนประกอบกัน โดยสามารถแบ่งงานวิจัยหลักๆ ได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับชนิดเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) ในระบบ SOFC ทั้งอิเล็กโทรดและสารอิเล็กโทรไลต์ต่างก็ทำมาจากวัสดุเซรามิกจำพวกออกไซด์แข็ง อาทิ ยิทเทรีย (yttria) หรือเซอร์โคเนีย (zirconia) วัสดุเหล่านี้จะสามารถเป็นตัวนำออกซิเจน (O^{2-}) อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ถ้าเซลล์มีสภาวะการทำงานที่ประมาณ 900 องศาเซลเซียส การไหลเวียนกลับของ

คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากทางออกหัวแอโนดไปยังหัวแคโทดเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซจากถ่านหินหรือเชื้อเพลิงเหลวที่ถูกทำให้ระเหยสามารถถูกปฏิรูปให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจน ภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิง ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการสามารถถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้ ระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งสามารถใช้ได้กับก๊าซธรรมชาติ ดังนั้น เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งจึงมีศักยภาพสูงในขนาดคณิกัล อุณหภูมิทำงานประมาณ 1,800 องศาฟาเรนไฮต์ (1,000 องศาเซลเซียส) ขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 100 กิโลวัตต์



ภาพประกอบ 2 รูปหลักการเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง [http://www.fcetec.co/fcetec_types_sofc.asp]

มัลลอน และ เคนดอลล์ [Mallon, C. and Kendall, K., 2005 : 154-160] ทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและเชื้อเพลิงที่ส่งผลต่อเซลล์ที่พัฒนาขึ้นมา โดยทำการเตรียมแอโนดซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ nickel oxide (44 wt%) 8YSZ (12 wt%) acetone (41.4 wt%) และ KD2 surfactant (2.6 wt%) แคโทดประกอบด้วย $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ (44 wt%) 8YSZ (12 wt%) acetone (42 wt%) และ KD2 surfactant (1.2 wt%) และอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย lanthanum (58 wt%) acetone (40.7 wt%) และ KD2 (1.2 wt%) โดยนำมาประกอบกันเป็นตัวเซลล์ยาว 5 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ซึ่งแอโนด แคโทด และอิเล็กโทรไลต์มีความหนา 50 30 และ 200 ไมโครเมตรตามลำดับ โดยทำการทดลองที่เงื่อนไขต่างกัน 2 แบบ คือ แบบที่ 1 ให้ความร้อนกับอากาศที่ 20 เคลวินต่อนาที จนถึง 850 องศาเซลเซียส โดยให้อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที เปรียบเทียบกับมีเทนที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 5 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า ไฮโดรเจนให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ดีกว่า เนื่องจากคาร์บอนจากมีเทนไปสะสมตัวในแอโนด ทำให้ปิดกั้นการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าส่งผลให้เซลล์หยุดการทำงานภายใน 8-15 นาทีเท่านั้น แบบที่ 2 ให้ความร้อนกับเชื้อเพลิงที่ 20 เคลวินต่อนาที จนถึง 850

องศาเซลเซียส โดยให้อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที เปรียบเทียบกับ มีเทนที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 5 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า มีเทนให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ดีกว่าไฮโดรเจน เพราะคาร์บอนไม่ได้ไปปิดกั้นกระแสไฟฟ้า อีกทั้งเซลล์ยังสามารถทำงานได้นานกว่า 30 ชั่วโมงอีกด้วย

ซูซูกิ อาวานะ จาซินสกี เปโตรอฟสกี และ แอนเดอร์สัน [Suzuki, T., Awano, M., Jasinski, P, Petrovsky., V. and Anderson, H.U., 2006 : 2071-2074] ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพและความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์ที่ได้สร้างขึ้นมา โดยทำการเตรียมสารประกอบ (La, Sr) MnO_3 (LSM) – Y doped ZrO_2 (YSZ) จาก YSZ ที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (YSZ มีขนาดอนุภาคเริ่มต้นประมาณ 100 นาโนเมตร) YSZ และ LSM polymer ก่อนที่จะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ผลจากการทดลองพบว่าสารประกอบ LSM-YSZ ที่สร้างมานั้นมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเท่ากับ 0.14 และ 0.3 โอห์ม ตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนั้นทำให้เซลล์ที่สร้างมาสามารถนำไปใช้เป็นแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งได้ โดยประสิทธิภาพของเซลล์ที่ใช้สารประกอบ LSM-YSZ เป็นแคโทด และ Ni-YSZ เป็นแอโนด พบว่าให้ค่า ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า เท่ากับ 0.26 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง

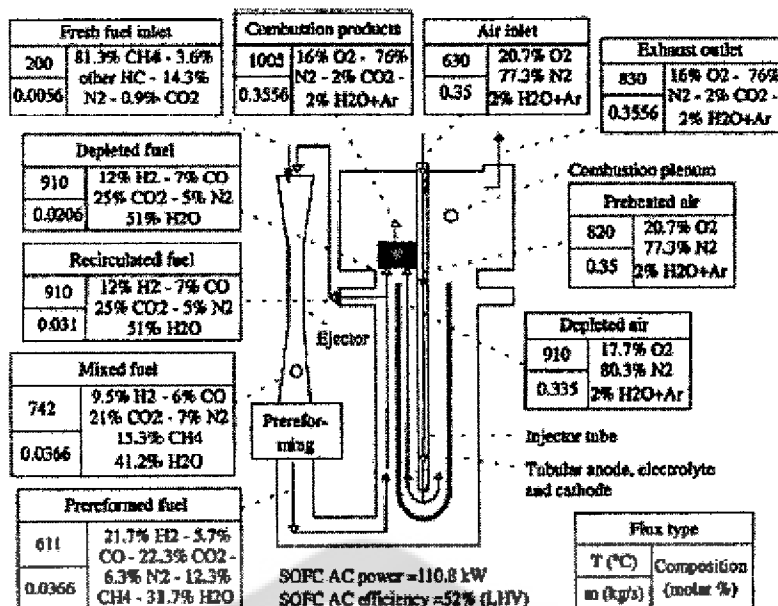
ซอเดอร์ และ เคนดอลล์ [Saunders, G.J.; &Kendall, K., 2002: 258-263] ทำการศึกษาถึงปฏิกิริยาของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตรโดยทำการศึกษาสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวก alkanes, organic acids และ alcohols ได้แก่ methanol, ethanol, propan-1-ol, propan-2-ol, *n*-octane, 2,2,4-trimethylpentane, formic acid และ acetic acid เพื่อเป็นการหาประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์ ผลที่ได้พบว่า methanol และ formic acid สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งแบบท่อและยังได้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ดีกว่าสารตัวอื่นๆ ส่วนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นๆ จะไปทำลายแอโนด เนื่องจากคาร์บอนในสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะเข้าไปสะสมตัวในเซลล์ ทำให้แอโนดบวมตัวขึ้นจึงส่งผลให้เกิดการปิดกั้นช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง

สุวรรณวรังกูร ครวัชเชิธ เอ็นท์เซฟ จรดโรจน์กุล พรทิษฐ์เกอร์ ฟาวเลอร์ ดักลาส ชีวะธนาคุป และ มโหดม [Suwanwarangkul, R., Croiset, E., Entchev, E., Charojrochkul, S., Pritzker, M.D., Fowler, M.W., Douglas, P.L., Chewathanakup, S. and Mahoudom, H., 2006 : 308-322] ทำการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทแผ่นแบบ 2 มิติโดยใช้โปรแกรม FEMLAB ในการคำนวณ ซึ่งทดลองโดยการประยุกต์ใช้ก๊าซสังเคราะห์แทนเชื้อเพลิงทั่วไปซึ่งประกอบไปด้วย H_2 CO CO_2 H_2O และ N_2 เพื่อศึกษาถึงปรากฏการณ์การส่งผ่านทางโมเมนตัม มวล ที่สัมพันธ์กับปฏิกิริยาทางเคมีและไฟฟ้าเคมี และแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเป็นการทำนายปริมาณคาร์บอนที่เป็นผลมาจากการ

ทดลองและศึกษาถึงผลกระทบจากปริมาณคาร์บอนที่เกิดขึ้น โดยเปรียบเทียบกันระหว่างการทดลองที่อุณหภูมิ 800 กับ 900 องศาเซลเซียส ผลจากการพัฒนาแบบจำลองพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองจริงจากการทดลองที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จากการจำลองมีค่าเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งภาพที่ได้จากการถ่ายโครงสร้างของเซลล์พบว่าผิวของแอโนดหลังจากกระบวนการทดลองเสร็จสมบูรณ์ แสดงให้เห็นถึงการสะสมตัวของคาร์บอนจำนวนมากบนผิวแอโนด และพบปริมาณนิกเกิลที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ระหว่างเซลล์ของแอโนดที่การทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างกับการทดลองที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีการสะสมตัวของคาร์บอนและมีปริมาณของนิกเกิลเพียงเล็กน้อย จากผลการทดลองและการจำลองมีเหตุผลหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลงโดยการใช้ก๊าซสังเคราะห์ คือ คาร์บอน โดยผลจากปฏิกิริยาคาร์บอนจะไปทำลายผิวของแอโนด ดังนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ยอมรับได้ คือแบบจำลองที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามถ้าหากเติม H_2O หรือ CO_2 เข้าไปในก๊าซสังเคราะห์ ถึงแม้ว่าจะเป็นการสิ้นเปลืองและสูญเสียกำลังทางไฟฟ้าไปบ้าง แต่ H_2O หรือ CO_2 จะช่วยลดอันตรายจากปริมาณคาร์บอนระหว่างทำการทดลองได้

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแบบจำลอง

คัมพานารี [Campanari, S., 2001: 26-34] ได้ศึกษาแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์และวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (SOFC) ด้วยการป้อนก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีรูปแบบของการแบบจำลองดังแสดงในภาพประกอบ 3 ผลการศึกษาพบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (i_c) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรไปเป็น 400 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศมีค่าคงที่ ให้ค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 65 กิโลวัตต์ไปเป็น 210.9 กิโลวัตต์ สำหรับกรณีที่ค่า fuel utilization factor (U_f) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.80 ไปเป็น 0.95 โดยกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศมีค่าคงที่ ให้ค่ากำลังไฟฟ้าลดลงจาก 115.4 กิโลวัตต์ไปเป็น 94.6 กิโลวัตต์ และสำหรับกรณีที่ค่า U_f และ i_c รวมถึงอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงมีค่าคงที่ ค่าของ Steam-to-carbon ratio (S/C) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.4 ไปเป็น 2.5 ให้ค่ากำลังไฟฟ้าลดลงจาก 111.9 กิโลวัตต์ไปเป็น 109 กิโลวัตต์

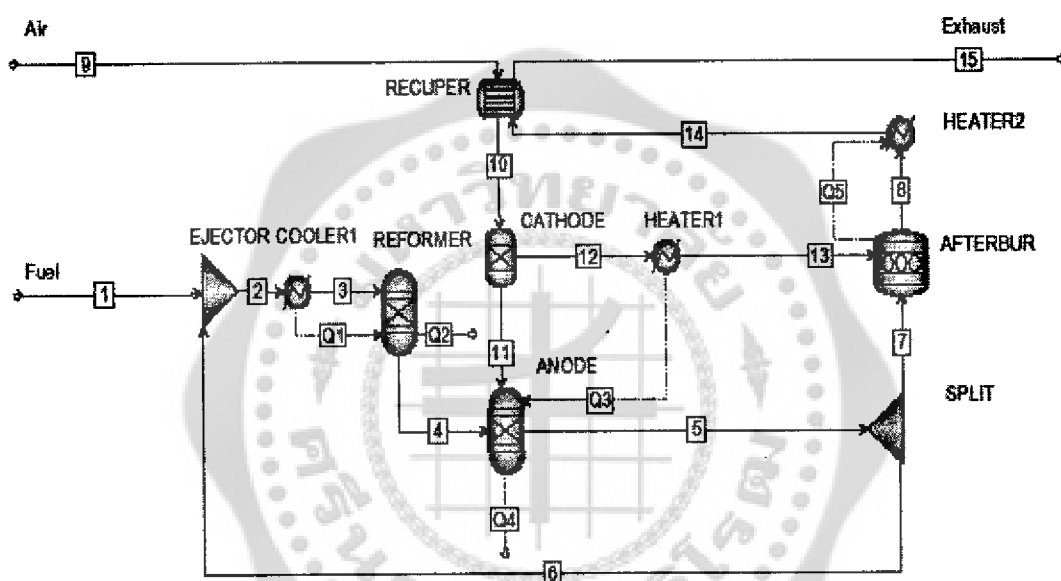


ภาพประกอบ 3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่วางเรียงต่อกันเป็นชุด [Campanari, S., 2001]

ครัมดิก เพจ และ ราวนด์ [Krumdieck, S., Page, S. and Round, S., 2004: 189-198] ได้ศึกษาการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ชนิดของแข็งและระบบความปลอดภัยของการผลิตพลังงานไฟฟ้า เพื่อที่จะนำไปควบคุมระบบการทำงานของ SOFC-UPS ดังแสดงในภาพประกอบ 4 โดยทำการศึกษาที่แตกต่างกันอยู่ 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 เป็นแบบโหมด Standby คือใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งจำนวน 1 stack (550 เซลล์) ที่อัตราการไหลของมีเทนมีค่าเท่ากับ 0.35 โมลต่อวินาที พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่า 125 กิโลวัตต์ สำหรับกรณีที่ 2 เป็นแบบโหมด Full Load คือใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งจำนวน 2 ชั้นวางเซลล์ (1100 เซลล์) ที่อัตราการไหลของมีเทนมีค่าเท่ากับ 0.64 โมลต่อวินาที พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่า 250 กิโลวัตต์ โดยที่ทั้ง 2 กรณีกำหนดให้ค่าอุณหภูมิอากาศเข้าของอากาศและเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 800 เคลวิน ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.6 โวลต์ และค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

อี ราว เบราเวอร์ และซามูเอลเซน [Yi, Y., Rao, A.D., Brouwer, J.; & Samuelsen, G.S., 2004; 77-85] ได้ศึกษาและวิเคราะห์พลังงานสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งและความเย็นภายในระบบไฮบริดของก๊าซเทอร์โบ (SOFC-ICGT) โดยมีแบบจำลองแสดงดังภาพประกอบ 5 ผลการศึกษาพบว่าให้ค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงถึง 75.8 เปอร์เซ็นต์ และให้ค่ากำลังไฟฟ้าวรวมสูงสุดเท่ากับ 627 เมกกะวัตต์ (กำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง 450 เมกกะวัตต์ และ

ชาว ครัวเซ็ท ตักลาส ฟาวเลอร์ และ เอ็นท์เซฟ [Zhang, W., Croiset, E., Douglas, P.L., Fowler, M.W. ; & Entchev, E., 2005: 181-196] ได้ศึกษาการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งโดยใช้โปรแกรม AspenPlus™ โดยมีแบบจำลองแสดงดังภาพประกอบ 6 โดยที่แบบจำลองนำไปวิเคราะห์ถึงรายละเอียดทางอุณหพลศาสตร์และตัวแปรต่างๆ ของการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง โดยที่แบบจำลองที่ได้นำมาเทียบกับผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง ประเภทท่อของ Siemens-Westinghouse 100 กิโลวัตต์ ผลจากการศึกษาพบว่า พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์ เมื่อ U_1 เท่ากับ 0.85 และ U_2 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขั้วแอโนดที่บริเวณขาออกมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 6 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในรูปแบบของโปรแกรม Aspen Plus™ [Zhang, W., Croiset, E., Douglas, P.L., Fowler, M.W. ; & Entchev, E., 2005]

ปกรณ (2551) เสนอการวิเคราะห์เชิงสมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพ แบ่งได้เป็น 4 ส่วนหลักคือ การวิเคราะห์การเกิดคาร์บอนภายในเซลล์เชื้อเพลิง การพิจารณาเลือกตัวทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งที่เหมาะสมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิง การประเมินสมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการจัดเรียงระบบที่แตกต่างกัน และการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการดำเนินการของเซลล์เชื้อเพลิงที่ป้อนด้วยเชื้อเพลิงต่างชนิดกัน ผลของการศึกษาการเกิดคาร์บอนในเซลล์เชื้อเพลิงบ่งชี้ว่าการป้อนตัวทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งเพิ่มเติมเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันการเกิดคาร์บอนในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง ในการพิจารณาเลือกตัวทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งที่เหมาะสมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อเทียบกับอากาศ หรือ การใช้ไอน้ำร่วมกับอากาศ ทั้งนี้เนื่องจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ป้อนด้วยไอน้ำมีค่าความหนาแน่นของไฟฟ้าสูงกว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ป้อนด้วยตัวทำปฏิกิริยาอาร์ฟอรัมมิ่งชนิดอื่น ในการพิจารณาระบบเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ที่มีการจัดเรียงระบบที่แตกต่างกันนั้น ได้แบ่งการจัดเรียงระบบออกเป็น 3 ลักษณะได้แก่ ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเยื่อเลือกผ่าน ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานร่วมกับเครื่องดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานร่วมกับทั้งเครื่องปฏิกรณ์เยื่อเลือกผ่านและระบบดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการศึกษาพบว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเยื่อเลือกผ่านในระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงได้ อย่างไรก็ตามระบบเซลล์เชื้อเพลิงนี้ยังไม่คุ้มค่าที่จะลงทุนเมื่อพิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์ ขณะที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานร่วมกับระบบดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะให้ผลดีทั้งในทางเทคนิคและในทางเศรษฐศาสตร์ก็ต่อเมื่อใช้ระบบตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์เป็นระบบดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามระบบเซลล์เชื้อเพลิงนี้ไม่สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดที่ผลิตในระบบได้ การทำงานร่วมกันของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเยื่อเลือกผ่านและเครื่องดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อเทียบกับสองระบบแรก อย่างไรก็ตามระบบเซลล์เชื้อเพลิงนี้ยังไม่คุ้มค่าในการลงทุนทางเศรษฐศาสตร์ ข้อดีของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบได้เกือบทั้งหมด ขณะที่ผลของการพิจารณาความเป็นไปได้ในการดำเนินการของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งที่ป้อนด้วยเชื้อเพลิงต่างชนิดกันพบว่า ก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิงที่ให้ค่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น การใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรงจำเป็นต้องป้อนอากาศเข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นจำนวนมากเพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงสามารถดำเนินการได้อีกทั้งค่าสมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงยังมีค่าต่ำมาก ขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ก๊าซมีเทนที่ผ่านปฏิกิริยาอาร์ฟอรัมมิ่งเป็นเชื้อเพลิงจะมีสมรรถนะสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ก๊าซชีวภาพที่ผ่านปฏิกิริยาอาร์ฟอรัมมิ่งเป็นเชื้อเพลิง

นวดล (2550) ผลงานจากโครงการ “การออกแบบระบบผลิตไฮโดรเจนซึ่งใช้วัตถุดิบที่สามารถหาได้ในประเทศไทยเป็นสารตั้งต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อใช้ประโยชน์ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง” งานวิจัยที่ทางผู้วิจัยได้ทำการวิจัย การออกแบบระบบผลิตไฮโดรเจนจากวัตถุดิบที่สามารถหาได้ในประเทศไทย อันได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซหุงต้ม ก๊าซชีวภาพ เอทานอล และเมทานอลอย่างมีประสิทธิภาพ โดยงานวิจัยดังกล่าวมุ่งเน้นไปที่การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนให้ดีขึ้นกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันซึ่งมักประสบกับปัญหาด้านการเสื่อมสภาพเร็ว และมีประสิทธิภาพการทำงานต่ำ โดยเฉพาะเมื่อถูกใช้กับสารตั้งต้นที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ ผลสรุปจากการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกซีเรียมออกไซด์ที่

มีขนาดอยู่ในระดับนาโน ซึ่งจัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใหม่สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนจากวัตถุดิบทุกชนิดสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาทั่วไปที่ใช้ในปัจจุบัน ทั้งในแง่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา และความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ นอกจากนั้นจากงานวิจัยต่อเนื่องที่คณะผู้วิจัยดำเนินการศึกษาได้พบข้อมูลที่สำคัญอีกประการคือ หากนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวไปใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาทั่วไปที่มีอยู่ในปัจจุบัน จะให้ศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนจากสารตั้งต้นสูงมาก

สุทธิชัย (2550) ศึกษาการผลิตสารเทอร์เชียรีเอมีลเอทิลอีเทอร์จากเอทานอลและเทอร์เชียรีแอลกอฮอล์ในหอกลั่นแบบมีปฏิกิริยาซึ่งเป็นหน่วยที่ปฏิกิริยาและการแยกสารสามารถเกิดขึ้นพร้อมกัน งานวิจัยนี้ทำการศึกษาโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus ซึ่งใช้ข้อมูลสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาและสมมติให้แต่ละชั้นในหอกลั่นแบบมีปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล ระหว่าง วัฏภาคของเหลวและก๊าซ การศึกษาได้พิจารณาผลของตัวแปรในการออกแบบ คือ จำนวนขั้นตอนในส่วน rectifying จำนวนขั้นตอนในส่วนเกิดปฏิกิริยาและจำนวนขั้นตอนในส่วน stripping เพื่อเลือกรูปแบบของหอกลั่นแบบมีปฏิกิริยาที่เหมาะสม จากการศึกษาพบว่าหอกลั่นแบบ มีปฏิกิริยาที่มีจำนวนขั้นตอนในส่วน rectifying เท่ากับ 0 จำนวนขั้นตอนในส่วนเกิดปฏิกิริยา เท่ากับ 4 และจำนวนขั้นตอนในส่วน stripping เท่ากับ 8 เป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการดำเนินการ จากนั้นได้ศึกษาผลของตัวแปรในการดำเนินการต่างๆ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของเทอร์เชียรีแอลกอฮอล์และ ค่าการเลือกเกิดของสารเทอร์เชียรีเอมีลเอทิลอีเทอร์ การศึกษาพบว่าสัดส่วนการป้อนกลับ (reflux ratio) และความดันในหอกลั่นแบบมีปฏิกิริยาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของหอกลั่นแบบมีปฏิกิริยามากที่สุด

สง่าพงษ์ (2542) ศึกษาแผนภาพการใช้ประโยชน์ของพลังงาน (Energy-Utilization Diagram, EUD) เป็นเครื่องมือซึ่งใช้ในการแสดงการวิเคราะห์ Exergy ทางภาพของกระบวนการเคมี เทคนิคนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในวัฏจักรพลังงาน ซึ่งเป็นการรวมระบบของระบบย่อยเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อนและระบบย่อยพลังงาน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาโปรแกรมต้นแบบของการสร้างแผนภาพการใช้ประโยชน์ของพลังงานในโปรแกรมแบบจำลอง ASPEN Plus และทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาวะปฏิบัติการที่มีต่อการสูญเสีย Exergy โดยงานวิจัยนี้มีขอบเขตในการศึกษาเพียงสองระบบย่อยดังกล่าวเท่านั้น โปรแกรมต้นแบบนี้ถูกเขียนใน Fortran block (หรือ In-line Fortran) และแฟ้มข้อมูลภาษาฟอร์แทรน ซึ่งวัฏจักรพลังงานแรงกิน (Rankine power cycle) ถูกเลือกมาเป็นกรณีศึกษาเพื่อทดสอบโปรแกรมที่สร้างขึ้น ผลของการวิเคราะห์ความไวพบว่า อัตราส่วนของการสูญเสีย Exergy ต่อพลังงานที่ผลิตได้ จะมีค่าลดลงในสามสภาวะต่อไปนี้ การเพิ่มความดันขาออกของเครื่องอัดความดันสำหรับของเหลว (pump) การลดความดันขาออกของกังหันความดันสำหรับก๊าซ (turbine) และการเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำ ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุด

เดือดในเครื่องควบแน่น (Condenser) จะทำให้อัตราส่วนของการสูญเสีย Exergy ต่อพลังงานที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้น ในกรณีการปรับปรุงระบบ พบว่า อัตราส่วนของการสูญเสียของ Exergy ต่อพลังงานที่ผลิตได้จะลดลงได้ถึงร้อยละ 12.6 โดยการปรับเปลี่ยนสภาวะปฏิบัติการที่เหมาะสม

นางลักษณ์ [นางลักษณ์, 2542] ศึกษาการจำลองแบบกระบวนการระเหยน้ำส้มโดยเครื่องระเหยแบบฟิล์มที่มีใบกววนเพื่อทำน้ำส้มเข้มข้น และหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการที่ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ โปรแกรม Aspen Plus™ ได้ถูกนำมาใช้พัฒนาแบบจำลองของเครื่องระเหย โดยใช้โมเดลเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อกับโมเดลแฟลช ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากการทดลองจะนำไปพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปตัวแปรไร้มิติของ Sae Tae (1999) เพื่อใช้สำหรับกระบวนการระเหยน้ำส้มนี้ คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำส้มคำนวณจากสมการของ Boonsriudomsuk (1999) ในการทดลอง จะใช้เครื่องระเหยแบบฟิล์มที่มีใบกววน ทั้ง Lab scale และ pilot plant ผลการทดลองที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากโปรแกรม พบว่า โมเดลของเครื่องระเหยโดยโปรแกรม Aspen Plus™ ให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ความแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับผลการคำนวณจากโมเดลจะถูกลดลงวิธี Data Reconciliation จากการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเพื่อลดต้นทุนการผลิตโดยใช้แบบจำลองเครื่องระเหยนี้ พบว่า ถ้าทำการทำงานที่ optimum condition จะสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 10% ของต้นทุนปกติ สำหรับระบบ lab scale สามารถลดต้นทุนได้ถึง 278,587 บาท/ปี สำหรับระบบ pilot plant พบว่าสามารถประหยัดได้ถึง 854,454 บาท/ปี และสำหรับเครื่องระเหยในกระบวนการอุตสาหกรรมสามารถลดต้นทุนได้ถึง 8,544,540 บาท/ปี

สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการออกแบบจำลองสำหรับกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus และศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิเข้าของสาร อัตราการไหลของสาร ที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อหาสภาวะการทำงานในการนำความร้อนที่เกิดจากกระบวนการไปใช้ประโยชน์ต่อไป

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

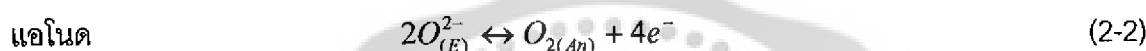
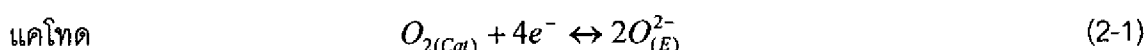
2.3.1.1 บทนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง แบบจำลองนี้นำมาใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมต่างๆ ของเซลล์ เช่น กำลังทางไฟฟ้าที่ได้ ประสิทธิภาพ และอุณหภูมิทางเข้าออกของก๊าซภายใต้เงื่อนไขสภาวะการทำงาน รวมไปถึงการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่สำคัญที่มีผลต่อกระบวนการและการทำงานของเซลล์ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการ

ออกแบบเซลล์เพื่อสร้างประโยชน์ให้ได้มากที่สุด และลดความสิ้นเปลืองเนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นมีราคาสูง [Suwanwarangkul, R., 2005]

2.3.1.2 ความต่างศักย์ผันกลับ (Reversible Fuel Cell Voltage, E°)

ความต่างศักย์ผันกลับ หมายถึง ศักย์ที่บอกว่าเซลล์มีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดทางทฤษฎี สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งมีอิเล็กโทรไลต์ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำออกซิเจนไอออน ปฏิกริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงทั้งปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันของออกซิเจนที่แคโทดและแอโนดตามลำดับ เป็นไปตามสมการดังนี้ [Suwanwarangkul, R., 2005]



โดยที่ (Cat), (E) และ (An) หมายถึง แคโทด อิเล็กโทรไลต์ และแอโนดตามลำดับ

ความต่างศักย์ผันกลับสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งโดยพิจารณาจากความเข้มข้นของออกซิเจนอธิบายได้โดยสมการ Nernst equation มีรูปสมการเป็น

$$E_{cell}^\circ = E_{Cat}^\circ - E_{An}^\circ = (RT/4F) \ln(p_{O_2,Cat} / p_{O_2,An}) \quad (2-3)$$

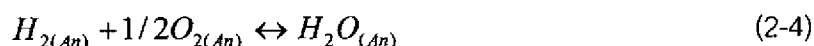
โดยที่ R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูลต่อเคลวินต่อโมล)

T คือ อุณหภูมิที่เซลล์ทำงาน (เคลวิน)

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96487 คูลอมบ์ต่อโมล)

$p_{O_2,An}$ และ $p_{O_2,Cat}$ คือ ความดันย่อยของออกซิเจนบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่แอโนดและแคโทดตามลำดับ

สำหรับ $p_{O_2,Cat}$ ให้อากาศเข้าทำปฏิกิริยาที่แคโทดซึ่งอากาศประกอบด้วยออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์ และไนโตรเจน 79 เปอร์เซ็นต์ และ $p_{O_2,An}$ ขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงที่ใช้ โดยกำหนดให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล ซึ่งปฏิกิริยาที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงที่ด้านแอโนด มีรูปสมการเป็น



ดังนั้น $p_{O_2, An}$ สำหรับปฏิกิริยานี้เขียนในรูปความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$(p_{O_2, An})_{H_2} = \left(\frac{p_{H_2O}}{K_{eq, H_2} p_{H_2}} \right)^2 \quad (2-5)$$

โดยที่ p_{H_2} และ p_{H_2O} คือ ความดันแฟงของไฮโดรเจนและน้ำบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่แอโนดตามลำดับ
 K_{eq, H_2} คือ ค่าคงที่สมดุลสำหรับปฏิกิริยา (2-5) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิมีรูปสมการเป็น

$$K_{eq, H_2} = \exp(-\Delta G_{H_2} / RT) \quad (2-6)$$

โดยที่ ΔG_{H_2} คือ พลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปของไฮโดรเจนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

แทนสมการ (2-5) และ (2-6) ในสมการ (2-3) ได้สมการ

$$E_{H_2}^\circ = -\frac{1}{2F} \left[\Delta G_{H_2} + RT \ln \left(\frac{p_{H_2O}}{p_{H_2} p_{O_2, Cat}^{0.5}} \right) \right] \quad (2-7)$$

โดยที่ $E_{H_2}^\circ$ คือ ค่าความต่างศักย์ผันกลับโดยใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง

2.3.1.3 ความต่างศักย์ที่ได้จริงจากเซลล์เชื้อเพลิง (Actual Fuel Cell Voltage, V_{cell})

ในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงความต่างศักย์ที่ได้จริงจากเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าน้อยกว่าความต่างศักย์ผันกลับเนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีการสูญเสียพลังงานซึ่งเกิดจากความต้านทานของ อิเล็กโทรไลต์และความต่างศักย์เกินตัว (Overvoltage หรือ overpotential, η) ที่บริเวณผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรดกับอิเล็กโทรไลต์ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลง ดังนั้นความต่างศักย์ที่ได้จริงจากเซลล์เชื้อเพลิง มีค่าดังนี้

$$V_{cell} = E_{Cell}^\circ - \eta \quad (2-8)$$

ความต่างศักย์เกินตัวมี 3 ประเภท ประกอบด้วย

1. แอกติเวชันโอเวอร์โพเทนเชียล (Activation overpotential, η_{Act}) เป็นค่าที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยที่ค่า η_{Act} ขึ้นอยู่กับค่า exchange current density (j_0 , แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ซึ่งค่า exchange current density เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารตั้ง

ตันและผลิตภัณฑ์ และคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งค่า η_{Act} ในสมการบัตเตอร์-โวลเมอร์ (Butter-volmer equation) มีค่าแตกต่างกัน 2 กรณี คือ

กรณีที่ η_{Act} มีค่าน้อย (น้อยกว่า 15 มิลลิโวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง)

$$j = j_0 \frac{nF\eta_{act}}{RT} \quad (2-9a)$$

กรณีที่ η_{Act} มีค่ามาก (มากกว่า 50 ถึง 100 มิลลิโวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง)

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{j}{j_0} \quad (2-9b)$$

โดยที่ j คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

j_0 คือ exchange current density

n คือ จำนวนของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Transfer coefficient) โดยมีค่า 0 ถึง 1

2. โอห์มมิกโอเวอร์โพเทนเชียล (Ohmic overpotential, η_{Ohm}) เป็นค่าที่เกิดจากค่าความต้านทานจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนที่ผ่านชั้นเซลล์ ซึ่งขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าและเป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's law)

$$\eta_{Ohm} = \frac{j l}{\sigma} \quad (2-10)$$

โดยที่ l คือ ระยะทางที่อิเล็กตรอนหรือไอออนเคลื่อนที่

σ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนหรือไอออน

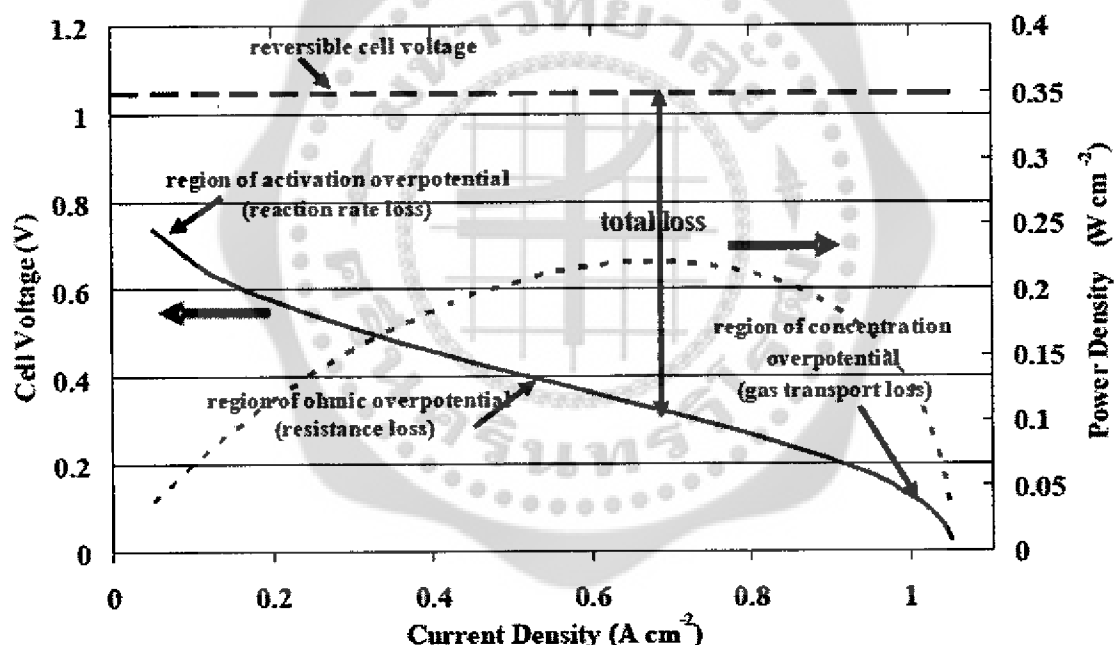
3. คอนเซนเทรชันโอเวอร์โพเทนเชียล (Concentration overpotential, η_{Conc}) เป็นค่าที่เกิดจากการถ่ายโอนมวล เนื่องมาจากค่าความต้านทานในการแพร่ของก๊าซบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{j_L}{j_L - j} \quad (2-11)$$

โดยที่ j_L คือ limiting current density

ดังนั้น ความต่างศักย์ที่ได้จริงที่เกิดจากค่าความต่างศักย์เกินตัวทั้ง 3 ประเภท มีค่าดังนี้

$$V_{cell} = E_{Cell}^{\circ} - \eta_{Act} - \eta_{Ohm} - \eta_{Conc} \quad (2-12)$$



ภาพประกอบ 7 กราฟความสามารถของเซลล์ (Performance curve) แสดงค่าที่เกิดจากค่าความต่างศักย์เกินตัวทั้ง 3 ประเภท [Suwanwarangkul, R., 2005]

ภาพประกอบ 7 แสดงให้เห็นว่าค่าความต่างศักย์ที่ได้จริงจากเซลล์มีค่าลดลงเนื่องจากค่าความต่างศักย์เกินตัวทั้ง 3 ประเภท โดยช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำ ค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเซลล์มีค่าลดลงเนื่องมาจากค่าแอคติเวชันโอเวอร์โพเทนเชียลมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นในช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าปานกลางเกิดจากค่าโอห์มมิก และคอน

เซนเทอร์ชั้นโอเวอร์โพเทนเชียล อย่างไรก็ตามค่าที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ค่าของโอห์มมิกโอเวอร์โพเทนเชียลมีค่าสูงกว่าค่าคอนเซนเทอร์ชั้นโอเวอร์โพเทนเชียล สุดท้ายในช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าสูง ค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเซลล์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากค่าคอนเซนเทอร์ชั้นโอเวอร์โพเทนเชียลที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก และในภาพประกอบ 7 แสดงถึงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power density, PD) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$PD = j \times V_{cell} \quad (2-13)$$

ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power density) หลังจากนั้นค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าลดลงเพราะว่าค่าความต่างศักย์ของเซลล์มีค่าไม่เพียงพอ

2.3.1.4 ฟิวเอลยูทิลิไซ์เซชันแฟกเตอร์ และแอร์ยูทิลิไซ์เซชันแฟกเตอร์ (Fuel Utilization Factor and Air Utilization Factor)

ฟิวเอลยูทิลิไซ์เซชันแฟกเตอร์ แอร์ยูทิลิไซ์เซชันแฟกเตอร์ และประสิทธิภาพของเซลล์เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการหาความสามารถของเซลล์เชื้อเพลิง โดยที่ปริมาณของเชื้อเพลิงและออกซิเจนที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้จากฟิวเอลยูทิลิไซ์เซชันแฟกเตอร์ และแอร์ยูทิลิไซ์เซชันแฟกเตอร์ตามลำดับ ซึ่งทั้งคู่ส่งผลต่อความสามารถและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

2.3.1.4.1 ฟิวเอลยูทิลิไซ์เซชันแฟกเตอร์ (U_f)

ฟิวเอลยูทิลิไซ์เซชันแฟกเตอร์ หมายถึง อัตราส่วนของเชื้อเพลิงทั้งหมดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ฟิวเอลยูทิลิไซ์เซชันแฟกเตอร์มีรูปสมการดังนี้

$$U_f = \frac{\text{Moles of } H_2 \text{ Consumed}}{\text{Moles of } H_2 \text{ Supplied}} \times 100\% \quad (2-14)$$

จำนวนโมลของไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ดังนั้นจำนวนโมลของไฮโดรเจนที่ใช้ (n_{H_2}) ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี คำนวณได้จาก

$$n_{H_2} = \frac{j_{H_2} A_{cell}}{2F} \quad (2-15)$$

โดยที่ j_{H_2} คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้ของไฮโดรเจนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

A_{cell} คือ พื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิง

ฟูลเซลล์ไฮโดรเจนเซลล์เชื้อเพลิงควรจะมีค่าสูง โดยที่ค่าฟูลเซลล์ไฮโดรเจนเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในทางพาณิชย์มีค่าประมาณ 75 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์

2.3.1.4.2 แอร์ยูนิตไลซ์เซชันแฟกเตอร์ (U_a)

แอร์ยูนิตไลซ์เซชันแฟกเตอร์ หมายถึง อัตราส่วนของออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง โดยที่แอร์ยูนิตไลซ์เซชันแฟกเตอร์มีรูปสมการดังนี้

$$U_a = \frac{\text{Moles of } O_2 \text{ Consumed}}{\text{Moles of } O_2 \text{ Supplied with Air}} \times 100\% \quad (2-16)$$

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งแอร์ยูนิตไลซ์เซชันแฟกเตอร์ควรจะมีค่าต่ำ โดยที่ค่าแอร์ยูนิตไลซ์เซชันแฟกเตอร์ในทางพาณิชย์มีค่าประมาณ 15 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ สมการที่ใช้ในการหาค่าแอร์ยูนิตไลซ์เซชันแฟกเตอร์อีกสมการหนึ่งเรียกว่า แอร์สตอยชิโอเมตริกเรโซ (Air stoichiometric ratio, λ_a) ซึ่งเป็นส่วนกลับของแอร์ยูนิตไลซ์เซชันแฟกเตอร์

$$\lambda_a = \frac{\text{Moles of } O_2 \text{ Supplied with Air}}{\text{Moles of } O_2 \text{ Consumed}} \quad \text{หรือ} \quad \lambda_a = 1/U_a \quad (2-17)$$

จากการสมดุลโมลสำหรับปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง ใช้ไฮโดรเจน 1 โมล และออกซิเจน 0.5 โมล เป็นสารตั้งต้น ดังนั้นตามกฎของฟาราเดย์จำนวนโมลของออกซิเจนที่ใช้ (n_{O_2}) ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง มีรูปสมการเป็น

$$n_{O_2} = \frac{j_{O_2} A_{cell}}{4F} \quad (2-18)$$

โดยที่ j_{O_2} คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้ของออกซิเจนที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทด

2.3.1.5 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จากการคำนวณ (Cell Voltage, V_{cell})

ในการคำนวณหาความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์นั้น ได้นำวิธีการที่ประยุกต์ขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยนำมาจากกราฟความสามารถที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทำงานที่มาตรฐานเพื่อใช้สำหรับการอ้างอิงและทำนายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ซึ่งกราฟที่ใช้ในการอ้างอิงนั้น ใช้สำหรับการหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง (V_{ref}) ที่สภาวะการทำงานอ้างอิง (องค์ประกอบของเชื้อเพลิงขาเข้า : ไฮโดรเจน 67 เปอร์เซ็นต์/คาร์บอนมอนอกไซด์ 22 เปอร์เซ็นต์/น้ำ 11 เปอร์เซ็นต์, U_f 85 เปอร์เซ็นต์, U_a 25 เปอร์เซ็นต์, อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส และ ความดัน 1 บาร์) ซึ่งนำมารวมกับอีก 4 สมการที่มีผลจากความดัน, อุณหภูมิ, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า องค์ประกอบของเชื้อเพลิงและอากาศ ทำให้ได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่แท้จริงดังสมการต่อไปนี้

2.3.1.5.1 ความดัน ณ สภาวะการทำงาน

$$\Delta V_p (mV) = 76 \times \log \frac{P}{P_{ref}} \quad (2-19)$$

โดยที่ P คือ ความดัน ณ สภาวะการทำงาน (bar)

P_{ref} คือ ความดัน ณ สภาวะการทำงานอ้างอิง (ซึ่ง $P_{ref} = 1$ bar)

2.3.1.5.2 อุณหภูมิ ณ สภาวะการทำงาน และความหนาแน่นของ

กระแสไฟฟ้า

$$\Delta V_T (mV) = 0.008 \times (T - T_{ref}) (^\circ C) \times I_c (mA/cm^2) \quad (2-20)$$

โดยที่ T คือ อุณหภูมิ ณ สภาวะการทำงาน

T_{ref} คือ อุณหภูมิ ณ สภาวะการทำงานอ้างอิง (ซึ่ง $T_{ref} = 1000$ $^\circ C$)

2.3.1.5.3 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง

$$\Delta V_{anode} (mV) = 172 \times \log \frac{P_{H_2} / P_{H_2O}}{(P_{H_2} / P_{H_2O})_{ref}} \quad (2-21)$$

โดยที่ P_{H_2} / P_{H_2O} คือ อัตราส่วนของความดันย่อยของไฮโดรเจนและน้ำในระบบ

$(P_{H_2} / P_{H_2O})_{ref}$ คือ อัตราส่วนของความดันย่อยของไฮโดรเจนและน้ำในระบบ ณ สภาวะการณ์ทำงานอ้างอิง (ซึ่ง $(P_{H_2} / P_{H_2O})_{ref} = 0.15$)

2.3.1.5.4 องค์ประกอบของสารออกซิแดนท์

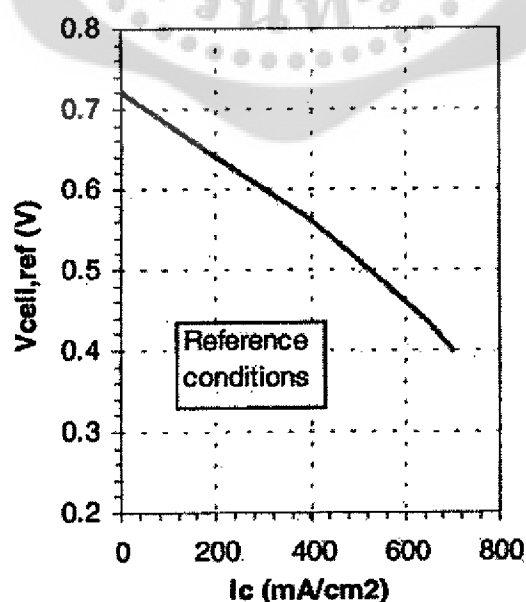
$$\Delta V_{cathode}(mV) = 92 \times \log \left(\frac{P_{O_2}}{(P_{O_2})_{ref}} \right) \quad (2-22)$$

โดยที่ P_{O_2} คือ ความดันย่อยเฉลี่ยของออกซิเจนที่แคโทด

$(P_{O_2})_{ref}$ คือ ความดันย่อยเฉลี่ยของออกซิเจนที่แคโทด ณ สภาวะการณ์ทำงานอ้างอิง (ซึ่ง $(P_{O_2})_{ref} = 0.164$)

โดยที่เราสามารถนำความสัมพันธ์ของทั้ง 4 สมการมารวมกันเพื่อหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้ ดังนี้

$$V = V_{ref} + \Delta V_T + \Delta V_P + \Delta V_{anode} + \Delta V_{cathode} \quad (2-23)$$



ภาพประกอบ 8 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ณ สภาวะการณ์ทำงานอ้างอิง [Campanari Stefano., 2001]

2.3.1.6 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Efficiency)

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงใช้ในการหาค่าพลังงานในเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนไปเป็นกำลังไฟฟ้า โดยทั่วไปสามารถแสดงในรูปของประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ (Thermal efficiency, $\eta_{thermal}$) ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ หมายถึง ปริมาณของพลังงานความร้อนที่ได้ที่แปรเปลี่ยนไปเป็นพลังงานเคมี เมื่อเชื้อเพลิงและออกซิเจนทำปฏิกิริยากัน

$$\eta_{thermal} = \frac{P}{\Delta H_f} \times 100\% \quad (2-24)$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้าที่ได้

ΔH_f คือ เอนทาลปีที่เปลี่ยนไปของเชื้อเพลิง

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ΔH_f คำนวณได้

จาก

$$\Delta H_f = F_{H_2} LHV_{H_2} \quad (2-25)$$

โดยที่ F_{H_2} คือ อัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจน (โมลต่อวินาที)

LHV_{H_2} คือ lower heating values ของไฮโดรเจน (จูลต่อโมล)

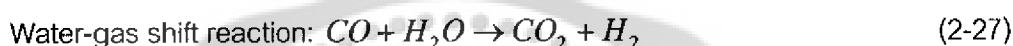
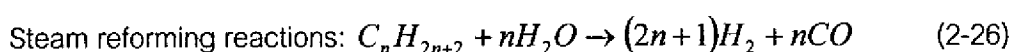
2.3.2 จำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus

การจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus

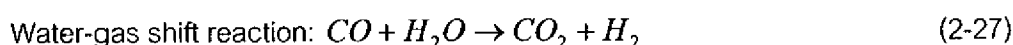
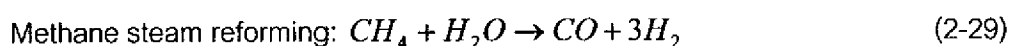
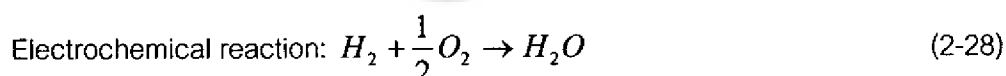
Aspen Plus เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีฟังก์ชันสำหรับการจำลองกระบวนการภายใต้สภาวะเชิงสถิติ สำหรับกระบวนการในอุตสาหกรรมเคมี โดยประกอบด้วยข้อมูลและคุณสมบัติทางกายภาพของสารเคมี มีแบบจำลองของหน่วยปฏิบัติการ สามารถแสดงแผนภาพการไหลของกระบวนการ และแสดงรายละเอียดของหน่วยปฏิบัติการย่อยในแผนภาพการไหล สำหรับระบบไอ/ของเหลว ระบบไอ/ของเหลว/ของเหลว ระบบของแข็ง และระบบอื่นๆ ที่กำหนดโดยผู้ใช้ สามารถพล็อตกราฟข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองกระบวนการ สามารถคำนวณหาเงื่อนไขในการปฏิบัติการหรือหาค่าของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ กระบวนการที่สอดคล้องกับข้อกำหนดของประสิทธิภาพของกระบวนการ คำนวณหาสภาวะที่เหมาะสมในการปฏิบัติการของโรงงาน และสามารถใช้ในการออกแบบรายละเอียดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ในขั้นตอนของการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus ก่อนที่จะจำลองกระบวนการนั้น จะต้องทราบว่าในกระบวนการนี้ใช้สารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ใดบ้าง และต้องทราบสภาวะการใช้งานของอุปกรณ์แต่ละชนิด เพื่อนำมาใช้ในการสร้าง เช่น

รีฟอร์มเมอร์ (Reformer) อุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้ คือ อุปกรณ์ที่สมดุล (Rgibbs) โดยรีฟอร์มเมอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นก๊าซไฮโดรเจน อุณหภูมิที่รีฟอร์มเมอร์ทำงานซึ่งโดยทั่วไปมีค่ามากกว่า 500 องศาเซลเซียส เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเกิด temperature gradient ในเซลล์ โดยที่ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในรีฟอร์มเมอร์เป็นดังนี้



ปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของ CO และ CH_4 ที่อยู่ในเชื้อเพลิง มีความเป็นไปได้ที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งโดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา แต่อาจเกิดปฏิกิริยาข้างสำหรับปฏิกิริยา water-gas shift ของ CO ไปเป็น H_2 ปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปของ CH_4 ไปเป็น H_2 สำหรับการเปลี่ยนจาก CO ไปเป็น H_2 และการเปลี่ยนรูปของ CH_4 ไปเป็น H_2 รวมถึงปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ได้วิเคราะห์จากพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของเซลล์เชื้อเพลิง ในการจำลองปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ แอโนด (Anode) อุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้ คือ อุปกรณ์ที่สมดุล (Rgibbs) ซึ่งปริมาณสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีขึ้นอยู่กับการปริมาณของไฮโดรเจนกับออกซิเจน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



เครื่องเปลี่ยนความร้อน โดยที่อากาศขาเข้าจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซขาออกภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ชื่อ Heatx (ตั้งชื่อว่า HEATEX) หลังจากนั้นเข้าสู่แคโทด เครื่อง

แยกสาร Sep (ตั้งชื่อว่า CATHODE) ซึ่งปริมาณของออกซิเจนถูกแยกออกจากอากาศในแคโทดแล้วเข้าสู่แอโนดเพื่อที่จะออกซิไดซ์ก๊าซเชื้อเพลิง

สำหรับสมการที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ประกอบไปด้วย

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (2-30)$$

และ

$$Q = UA \overline{\Delta T_L} \quad (2-31)$$

เมื่อ Q คือ ค่าความร้อน (kJ/s)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงโมล (kg/hr)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg K)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (K)

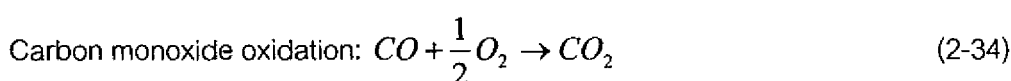
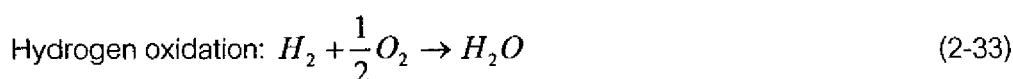
U คือ ค่า Overall coefficient ($\text{kJ} / \text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

A คือ พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

$\overline{\Delta T_L}$ คือ ค่า Logarithmic mean temperature difference (LMTD) ซึ่งเป็นตามสมการ

$$\overline{\Delta T_L} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad (2-32)$$

หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและปฏิกิริยาเคมี ส่วนที่เหลือจากเชื้อเพลิงที่ถูกใช้หมดไปจะเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ปริมาณของ H_2 และ CO ที่เหลือในเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศในห้องเผาไหม้ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะปล่อยความร้อนออกมา ซึ่งถูกนำไปใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกันของก๊าซขาออกและอากาศขาเข้า ซึ่งอุปกรณ์ Rstoic (ตั้งชื่อว่า AFTERBUR) ถูกเลือกมาใช้ในการจำลองในเตาปฏิกรณ์ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน AFTERBUR ประกอบไปด้วย



สำหรับสมการที่ใช้ในเตาปฏิกรณ์ ประกอบไปด้วย

$$\Delta C_p = \Delta\alpha + \Delta\beta T + \Delta\gamma T^2 \quad (2-35)$$

$$\Delta H_0 = \Delta H_{rxn,298} - \Delta\alpha T - \frac{\Delta\beta}{2} T^2 - \frac{\Delta\gamma}{3} T^3 \quad (2-36)$$

$$\Delta H_{rxn} = \Delta H_0 + \Delta\alpha T + \frac{\Delta\beta}{2} T^2 - \frac{\Delta\gamma}{3} T^3 \quad (2-37)$$

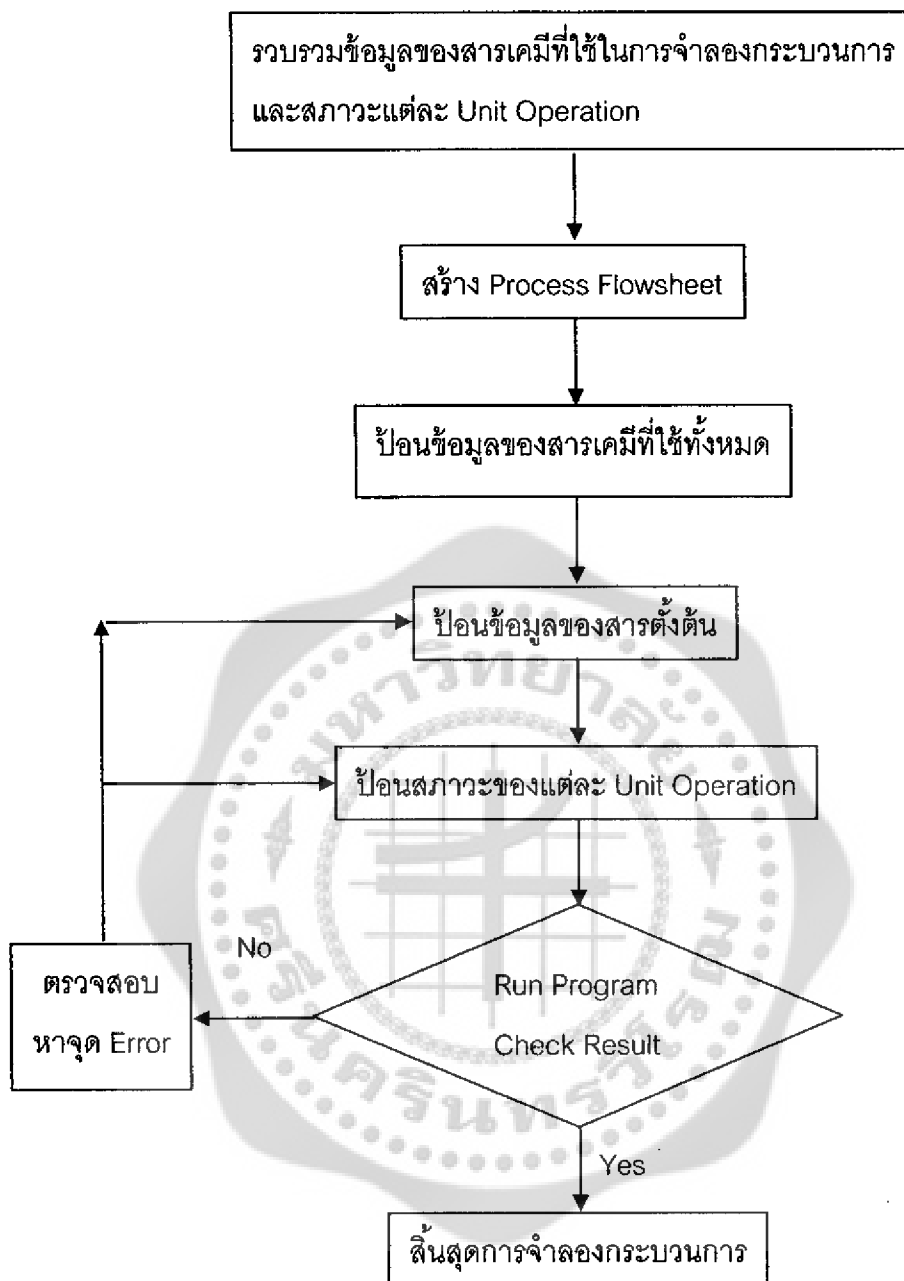
เมื่อ ΔC_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg K)

ΔH_0 คือ ค่าเอนทัลปีที่เปลี่ยนไปที่อุณหภูมิอ้างอิง 298 K (Cal)

ΔH_{rxn} คือ ค่าเอนทัลปีที่เปลี่ยนไปที่อุณหภูมิปฏิกิริยา (Cal)

แผนภาพการไหล (Flow sheet) ของทั้งกระบวนการแล้วป้อนข้อมูลของสารเคมีที่ใช้ทั้งหมด และป้อนข้อมูลของสายป้อน ขั้นตอนต่อไปเป็นขั้นตอนการป้อนค่าสภาวะของอุปกรณ์แต่ละชนิดในกระบวนการ รวมถึงการป้อนค่า kinetic reaction ขั้นตอนสุดท้ายคือขั้นตอนการ run และตรวจสอบผลการจำลองกระบวนการ

การตรวจสอบผลการจำลองกระบวนการให้ตรวจสอบที่ Control panel หากการ run แล้วผลการจำลองแจ้งว่า Results available แสดงว่าการจำลองกระบวนการนี้ไม่มีข้อผิดพลาด แต่หากการ run แล้วผลการจำลองแจ้งว่า error แสดงว่ามีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นระหว่างขั้นตอน ต้องกลับไปตรวจสอบตั้งแต่การป้อนค่าข้อมูลของสารตั้งต้น และค่าอื่นๆ ซึ่งขั้นตอนการจำลองกระบวนการทั้งหมดนั้นแสดงดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 ขั้นตอนการจำลองกระบวนการในโปรแกรม Aspen Plus

บทที่ 3

การกำหนดปัญหาและการตรวจสอบผลการคำนวณ

ในบทนี้เป็นการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้สำหรับงานวิจัย และพร้อมทั้งทำการตรวจสอบผลการคำนวณกับผลการจำลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

หัวข้อ 3.1 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

หัวข้อ 3.2 การตรวจสอบผลการคำนวณกับผลการจำลองและผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus

หัวข้อ 3.3 การออกแบบแบบจำลองสำหรับกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus

หัวข้อ 3.4 สรุปผลท้ายบท

3.1 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการจำลองสำหรับกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus โดยนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองของ Zhang, W., Croiset, E., Douglas, P.L., Fowler, M.W. ; & Entchev, E., 2005) ซึ่งได้ทำการจำลองโดยใช้แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อจำนวน 1152 เซลล์ จากบริษัท Siemens-Westinghouse 100 กิโลวัตต์ เปรียบเทียบกับการทดลองของเวโย (Veyo, S., 1996) โดยแบบจำลองที่ใช้นั้นใช้โปรแกรม Aspen Plus โดยกำหนดให้กระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยมิกเซอร์ รีฟอร์มเมอร์ เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งเตาปฏิกรณ์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในภาพประกอบ 10

ในการทำงานของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus อากาศที่ใช้จะถูกป้อนเข้าทางสาย 9 ทางด้านบนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซที่เหลือจากการเผาไหม้ของเตาปฏิกรณ์ เพื่อเพิ่มความร้อนก่อนที่จะเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง หลังจากนั้นจึงผ่านไปยังเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งทางด้านแคโทด สำหรับทางด้านเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงใหม่ที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจะถูกนำมารวมกับเชื้อเพลิงที่เหลือจากเตาปฏิกรณ์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งรวมกันผ่านอุปกรณ์มิกเซอร์ ก่อนที่จะเข้าสู่รีฟอร์มเมอร์ เพื่อที่จะทำการเปลี่ยนรูปก๊าซชีวภาพที่ใช้ให้เป็นไฮโดรเจน เพื่อที่จะเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งต่อไป หลังจากนั้นออกซิเจนจะแพร่ผ่านรูพรุนของแคโทดไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแคโทดกับอิเล็กโทรไลต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนเกิดเป็นออกซิเจนไอออน

ตาราง 2 สภาวะเงื่อนไขการทำงานของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่
จำลองโดยชาว ครัวเซ็ท ดักลาส ฟาวเลอร์ และ เอ็นท์เซฟ [Zhang, W., Croiset, E., Douglas,
P.L., Fowler, M.W. and Entchev, E., 2005] ผลการทดลองของเวโย [Veyo, S., 1996]

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่กำหนด
สัดส่วนโดยโมล (เปอร์เซ็นต์)	
เชื้อเพลิง	81.3 CH ₄ /2.9 C ₂ H ₆ /0.4 C ₃ H ₈ /0.2 C ₄ H ₁₀ / 14.3 N ₂ /0.9 CO
อากาศ	21 O ₂ /79 N ₂
อุณหภูมิขาเข้า (องศาเซลเซียส)	
เชื้อเพลิง	200
อากาศ	630
พื้นที่ในการทำปฏิกิริยา (ตารางเมตร)	96.1 (1152 เซลล์)
เงื่อนไขการทำงานของเซลล์	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	1000
ความดัน (บาร์)	1.08

จากผลของการจำลองที่ได้จากงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับผลการจำลองของชาว ครัวเซ็ท
ดักลาส ฟาวเลอร์ และ เอ็นท์เซฟ (Zhang, W., Croiset, E., Douglas, P.L., Fowler, M.W. ; &
Entchev, E., 2005) และผลการทดลองของเวโย (Veyo, S., 1996) พบว่า ค่าต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกับ
ชาว ครัวเซ็ท ดักลาส ฟาวเลอร์ และ เอ็นท์เซฟ (Zhang, W., Croiset, E., Douglas, P.L., Fowler,
M.W. ; & Entchev, E., 2005) โดยมีค่าต่างกับการทดลองดังนี้ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามี
ค่า 171 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าความแตกต่างจากการจำลอง 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิก่อน
เข้าสู่รีฟอร์มเมอร์ (สาย 3) มีค่า 536.25 องศาเซลเซียส มีค่าความแตกต่างจากการจำลอง 2.5
เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิขาออกของกระบวนการ (สาย 15) มีค่า 833.85 องศาเซลเซียส มีค่าความ
แตกต่างจากการจำลอง 1.55 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของสารขาออกจากกระบวนการ (สาย 15) มี
ค่าความแตกต่างจากการจำลองโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 5.68 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้

ตาราง 3 ผลการจำลองการทำงานของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ โดยนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่จำลองโดยชาว ครัวเซ็ท ดักลาส ฟาวเลอร์ และ เอ็นท์เชฟ (Zhang, W., Croiset, E., Douglas, P.L., Fowler, M.W. ; & Entchev, E., 2005) และผลการทดลองของเวโย [Veyo, S., 1996]

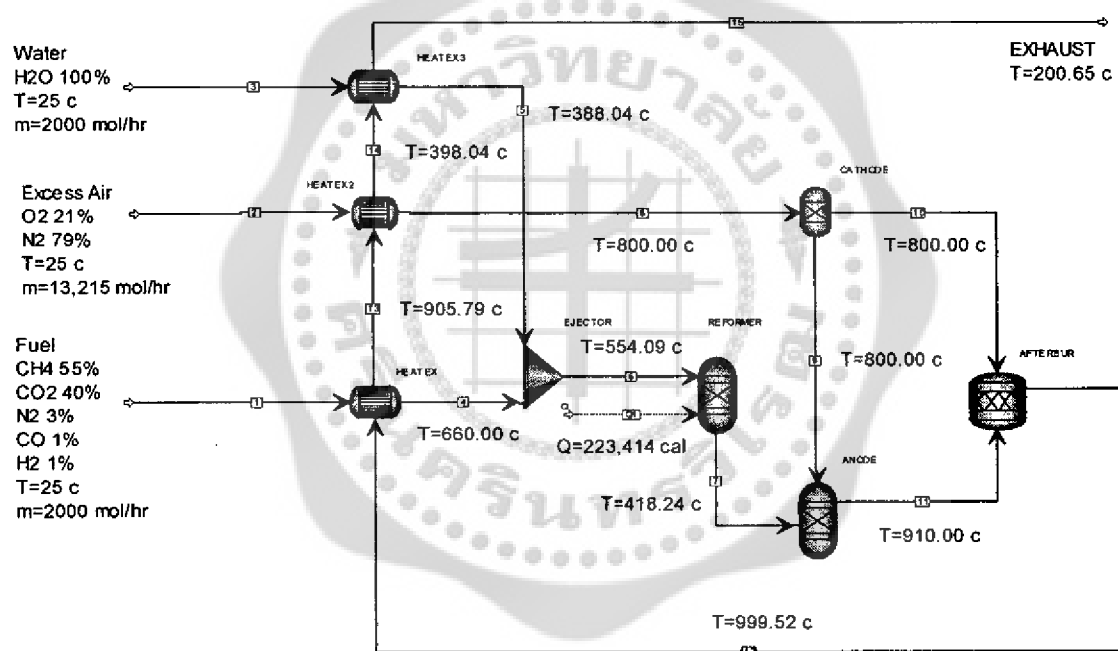
พารามิเตอร์ (หน่วย)	ผลการทดลอง (เวโย) (1996)	ผลการจำลอง (ชาวและคณะ) (2005)	ผลการจำลอง จากงานวิจัยนี้ (2010)
ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	180	178	171
อุณหภูมิก่อนเข้าสู่รีฟอร์มเมอร์ (สาย 3) (องศาเซลเซียส)	550	536	536
อุณหภูมิขาออกของกระบวนการ (สาย 15) (องศาเซลเซียส)	847	834	834
องค์ประกอบของสารขาออกจาก กระบวนการ (สาย 15) (เปอร์เซ็นต์)	77 N ₂ 16 O ₂ 5 H ₂ O 2 CO ₂	77.3 N ₂ 15.9 O ₂ 4.5 H ₂ O 2.3 CO ₂	77.4 N ₂ 16.0 O ₂ 4.4 H ₂ O 2.2 CO ₂

3.3 การออกแบบแบบจำลองสำหรับกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus

งานวิจัยนี้ทำการจำลองสำหรับกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus ซึ่งทำการออกแบบไว้ โดยที่กำหนดให้กระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยมิกเซอร์ รีฟอร์มเมอร์ เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง เตาปฏิกรณ์ และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในภาพประกอบ 11

ในการทำงานของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus อากาศที่ใช้จะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการ (สาย 2) เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซที่เหลือจากการเผาไหม้ของเตาปฏิกรณ์ เพื่อเพิ่มความร้อนก่อนที่จะเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง หลังจากนั้นจึงผ่านไปยังเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งทางด้านแคโทด สำหรับทางด้านเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงใหม่ (สาย 1) ที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจะถูกนำมารวมกับน้ำ (สาย 3)

ซึ่งรวมกันผ่านอุปกรณ์микเซอร์ โดยที่ทั้งเชื้อเพลิงใหม่และน้ำจะถูกแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซที่เหลือจากการเผาไหม้ของเตาปฏิกรณ์ เพื่อเป็นการนำความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ก่อนที่จะเข้าสู่รีฟอร์มเมอร์ เพื่อที่จะทำการเปลี่ยนรูปก๊าซชีวภาพที่ใช้ให้เป็นไฮโดรเจน เพื่อที่จะเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งต่อไป หลังจากนั้นออกซิเจนจะแพร่ผ่านรูพรุนของแคโทดไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแคโทดกับอิเล็กโทรไลต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนเกิดเป็นออกซิเจนไอออน (O^{2-}) โดยที่ออกซิเจนไอออนจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแคโทดกับ อิเล็กโทรไลต์ไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแอโนดกับอิเล็กโทรไลต์โดยผ่านอิเล็กโทรไลต์ สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ได้จากรีฟอร์มเมอร์ ไฮโดรเจนจะแพร่ผ่านรูพรุนของแอโนดไปทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับออกซิเจนไอออนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแอโนดกับอิเล็กโทรไลต์ เกิดน้ำเป็นผลิตภัณฑ์



ภาพประกอบ 11 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในรูปแบบของโปรแกรม Aspen PlusTM ในงานวิจัยนี้

โดยที่สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณในงานวิจัยนี้เพื่อทำการจำลองสำหรับกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus ได้แสดงในตารางที่ 4 และผลที่ได้จากการจำลองแสดงในตารางที่ 5

ตาราง 4 สภาวะเงื่อนไขการทำงานของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่ออกแบบในงานวิจัยนี้

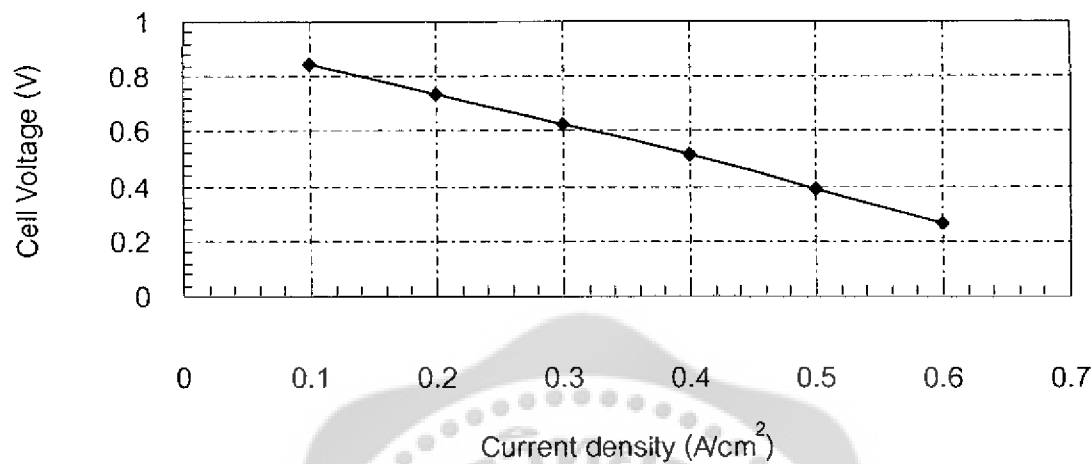
พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่กำหนด
สัดส่วนโดยโมล (เปอร์เซ็นต์)	
เชื้อเพลิง	55 CH ₄ /40 CO ₂ /3 N ₂ /1 H ₂ /1 CO
อากาศ	21 O ₂ /79 N ₂
อุณหภูมิเข้า (องศาเซลเซียส)	
เชื้อเพลิง	25
อากาศ	25
พื้นที่ในการทำปฏิกิริยา (ตารางเมตร)	96.1 (1152 เซลล์)
เงื่อนไขการทำงานของเซลล์	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	910
ความดัน (บาร์)	1.08

ตาราง 5 ผลการจำลองการทำงานของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อในงานวิจัยนี้

พารามิเตอร์ (หน่วย)	Aspen Plus	คำนวณ
ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุด (วัตต์ต่อตารางเมตร)	2046.05	2046.05
อุณหภูมิขาออกของกระบวนการ (องศาเซลเซียส)	200.65	200.00
ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ (เปอร์เซ็นต์)	63.56	63.56

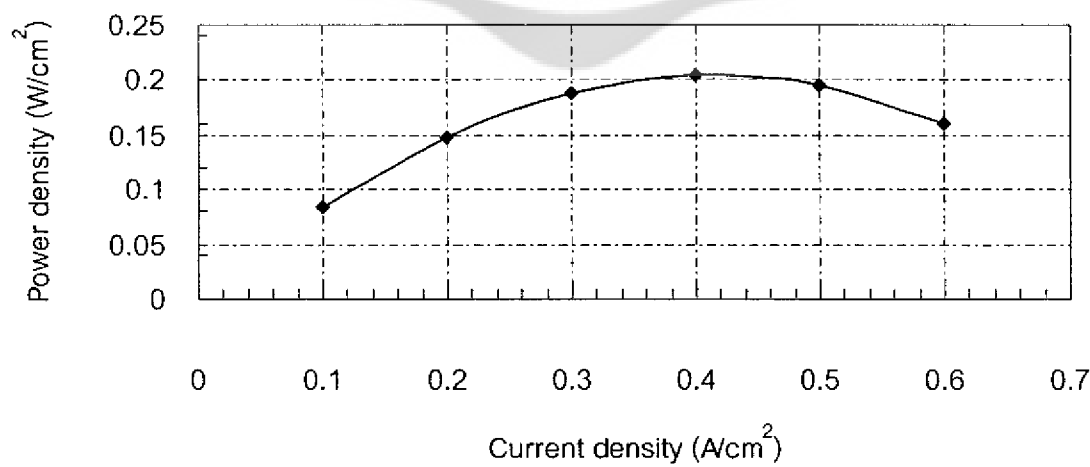
จากผลของการจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งเป็นการแสดงค่าต่างๆ ที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus และจากการคำนวณดังแสดงไว้ในภาคผนวกด้านหลัง พบว่า ทั้งจากโปรแกรม Aspen Plus และจากการคำนวณให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 2046.05 วัตต์ต่อตารางเมตรเท่ากัน สำหรับค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ พบว่า ทั้งจาก

โปรแกรม Aspen Plus และการคำนวณให้ค่าเท่ากัน โดยมีค่าเท่ากับ 63.22 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ
อุณหภูมิขาออกของกระบวนการจากโปรแกรม Aspen Plus มีค่าเท่ากับ 200.65 องศาเซลเซียส และ
จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 200.00 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 12 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

สำหรับผลที่ได้จากการจำลอง เมื่อพิจารณาจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ พบว่า เมื่อ
ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้มีค่า
ลดลง ดังแสดงในภาพประกอบ 12 และเมื่อพิจารณาถึงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า พบว่า ค่า
ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงจุดๆ หนึ่งจะมีค่าลดลง เมื่อค่าความหนาแน่นของ
กระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

3.4 สรุปผลท้ายบท

จากการศึกษาในหัวข้อต่างๆ ที่ผ่านมานั้นสามารถนำมาสรุปได้ดังนี้

การตรวจสอบผลการจำลองจากแบบจำลองสำหรับกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus ในการคำนวณ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองของเวโย (Veyo, S., 1996) และผลการจำลองของซาง ครัวเซ็ท ดักลาส ฟาวเลอร์ และ เอ็นท์เซฟ (Zhang, W., Croiset, E., Douglas, P.L., Fowler, M.W. ; & Entchev, E., 2005) พบว่า ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่า 171 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าความแตกต่างจากการจำลอง 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิก่อนเข้าสู่รีฟอร์มเมอร์ (สาย 3) มีค่า 536.25 องศาเซลเซียส มีค่าความแตกต่างจากการจำลอง 2.5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิขาออกของกระบวนการ (สาย 15) มีค่า 833.85 องศาเซลเซียส มีค่าความแตกต่างจากการจำลอง 1.55 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของสารขาออกจากกระบวนการ (สาย 15) มีค่าความแตกต่างจากการจำลองโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 5.68 เปอร์เซ็นต์ ทำให้แบบจำลองในงานวิจัยนี้รวมถึงแบบจำลองต่างๆ ที่ใช้ในโปรแกรม Aspen Plus สามารถนำมาเป็นเครื่องมือในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ปัญหาและนำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ภายในกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในเบื้องต้นก่อนการออกแบบได้

จากผลการจำลองในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับแบบจำลองของซาง ครัวเซ็ท ดักลาส ฟาวเลอร์ และ เอ็นท์เซฟ (Zhang, W., Croiset, E., Douglas, P.L., Fowler, M.W. ; & Entchev, E., 2005) และผลการทดลองของเวโย (Veyo, S., 1996) พบว่า แบบจำลองของซางมีการนำสายที่เหลือที่ออกจากเตาปฏิกรณ์นำกลับมาใช้ในการป้อน ซึ่งสายที่เหลือจากเตาปฏิกรณ์มีปริมาณของคาร์บอนเป็นส่วนผสมอยู่ เมื่อเข้าไปสู่เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งนั้นเสื่อมสภาพเร็วขึ้น ส่วนระบบที่ออกแบบในงานวิจัยนี้มีการนำความร้อนที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งมาใช้ในระบบ อีกทั้งยังลดจำนวนของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการให้น้อยลงกว่าเดิม ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่ามากกว่าเดิม และลดการสูญเสียความร้อนในระบบให้น้อยลง

ดังนั้นแบบจำลองที่ออกแบบไว้เหมาะสมที่จะนำไปทำการศึกษาผลขององค์ประกอบของเชื้อเพลิง และอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ เนื่องจากแบบจำลองมีการนำความร้อนจากการทำปฏิกิริยามาใช้ในกระบวนการก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม และปริมาณไฮโดรเจนในกระบวนการถูกนำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 4

การศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

สำหรับในบทนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบของเชื้อเพลิง และอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้ รวมถึงประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง โดยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ ดังนี้

หัวข้อ 4.1 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

หัวข้อ 4.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง และอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ

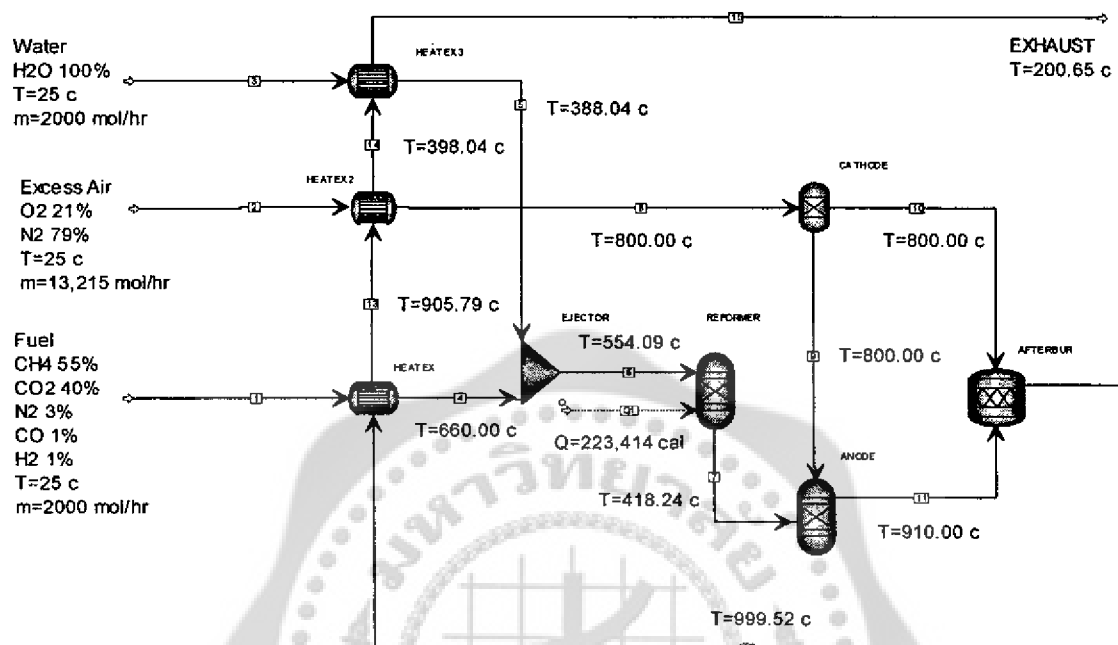
หัวข้อ 4.3 สรุปผลท้ายบท

4.1 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการจำลองสำหรับกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus ซึ่งทำการออกแบบไว้ โดยที่กำหนดให้กระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยมิกเซอร์ รีฟอร์มเมอร์ เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง เตาปฏิกรณ์ และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในภาพประกอบ 14

ในการทำงานของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus อากาศที่ใช้จะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการ (สาย 2) เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซที่เหลือจากการเผาไหม้ของเตาปฏิกรณ์ เพื่อเพิ่มความร้อนก่อนที่จะเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง หลังจากนั้นจึงผ่านไปยังเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งทางด้านแคโทด สำหรับทางด้านเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงใหม่ (สาย 1) ที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจะถูกนำมารวมกับน้ำ (สาย 3) ซึ่งรวมกันผ่านอุปกรณ์มิกเซอร์ โดยที่ทั้งเชื้อเพลิงใหม่และน้ำจะถูกแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซที่เหลือจากการเผาไหม้ของเตาปฏิกรณ์ เพื่อเป็นการนำความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ก่อนที่จะเข้าสู่รีฟอร์มเมอร์ เพื่อที่จะทำการเปลี่ยนรูปก๊าซชีวภาพที่ใช้ให้เป็นไฮโดรเจน เพื่อที่จะเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งต่อไป หลังจากนั้นออกซิเจนจะแพร่ผ่านรูพรุนของแคโทดไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแคโทดกับอิเล็กโทรไลต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนเกิดเป็นออกซิเจนไอออน (O^{2-}) โดยที่ออกซิเจนไอออนจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแคโทดกับ อิเล็กโทรไลต์ไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแอโนดกับอิเล็กโทรไลต์โดยผ่านอิเล็กโทร

ไลต์ สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ได้จากรีฟอร์มเมอร์ ไฮโดรเจนจะแพร่ผ่านรูพรุนของแอโนดไปทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับออกซิเจนไอออนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแอโนดกับอิเล็กโทรไลต์ เกิดน้ำเป็นผลิตภัณฑ์



ภาพประกอบ 14 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในรูปแบบของโปรแกรม Aspen PlusTM

4.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง และอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ

การศึกษาอิทธิพลของค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้ รวมถึงประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง โดยได้สรุปค่าเงื่อนไขการทำงานของเซลล์ไว้ในตาราง 6

ตาราง 6 สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่กำหนด
ความดันขาเข้า (บาร์)	
เชื้อเพลิง	1.08
อากาศ	1.08
อุณหภูมิขาเข้า (องศาเซลเซียส)	
เชื้อเพลิง	25
อากาศ	25
น้ำ	25
พื้นที่ในการทำปฏิกิริยา (ตารางเมตร)	96.1 (1152 เซลล์)
อัตราการไหลเชิงโมล (โมลต่อชั่วโมง)	
เชื้อเพลิง	2,000 ถึง 4,000
อากาศ	Excess air
สัดส่วนโดยโมล (เปอร์เซนต์)	
เชื้อเพลิง	
CH ₄	55 ถึง 100
CO ₂	0 ถึง 40
N ₂	3
H ₂	1
CO	1
อากาศ	21 O ₂ /79 N ₂
อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างสายเย็นและสายร้อน	
ขาออก (องศาเซลเซียส)	
ใน HEATEX III	10
เงื่อนไขการทำงานของเซลล์	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	910
ความดัน (บาร์)	1.08
ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	0.1 ถึง 0.6
(แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	

จากตาราง 6 สามารถสรุปกรณีที่ทำการศึกษาในบทนี้ได้ทั้งหมดรวมเป็น 5 กรณี โดยได้อธิบายกรณีที่ทำการศึกษาในแต่ละกรณีไว้ในตาราง 7

ตาราง 7 ตารางสรุปกรณีที่ทำการศึกษา

กรณีที่ศึกษา	ค่าที่กำหนด
กรณีที่ 1	อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000, 2,500, 3,000, 3,500 และ 4,000 โมลต่อชั่วโมง และสัดส่วนโดยโมลของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์) $55 \text{ CH}_4/40 \text{ CO}_2/3 \text{ N}_2/1 \text{ H}_2/1 \text{ CO}$
กรณีที่ 2	อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000, 2,500, 3,000, 3,500 และ 4,000 โมลต่อชั่วโมง และสัดส่วนโดยโมลของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์) $60 \text{ CH}_4/35 \text{ CO}_2/3 \text{ N}_2/1 \text{ H}_2/1 \text{ CO}$
กรณีที่ 3	อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000, 2,500, 3,000, 3,500 และ 4,000 โมลต่อชั่วโมง และสัดส่วนโดยโมลของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์) $65 \text{ CH}_4/30 \text{ CO}_2/3 \text{ N}_2/1 \text{ H}_2/1 \text{ CO}$
กรณีที่ 4	อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000, 2,500, 3,000, 3,500 และ 4,000 โมลต่อชั่วโมง และสัดส่วนโดยโมลของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์) $70 \text{ CH}_4/25 \text{ CO}_2/3 \text{ N}_2/1 \text{ H}_2/1 \text{ CO}$
กรณีที่ 5	อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000, 2,500, 3,000, 3,500 และ 4,000 โมลต่อชั่วโมง และสัดส่วนโดยโมลของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์) 100 CH_4

สำหรับผลที่ได้จากการคำนวณในการเปลี่ยนแปลงค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้ รวมถึงประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง ที่ทำการศึกษาในบทนี้โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus ได้แสดงค่าไว้ในตาราง 8

ตาราง 8 สรุปผลการคำนวณสำหรับทุกกรณีศึกษา

กรณีศึกษา / พารามิเตอร์ (หน่วย)	อุณหภูมิขา ออกของ กระบวนการ (องศา เซลเซียส)	ความ หนาแน่นของ กำลังไฟฟ้า		ประสิทธิภาพ ทางอุณหพล ศาสตร์ (เปอร์เซนต์)
		กำลังไฟฟ้า สูงสุด (วัตต์ต่อ ตารางเมตร)	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	
กรณีที่ 1				
อัตราการไหลเชิงโมลของ เชื้อเพลิง (โมลต่อชั่วโมง)				
2,000	200.65	1477.96	108.99	44.20
2,500	190.28	1512.89	111.94	36.13
3,000	181.67	1544.86	114.62	30.98
3,500	174.58	1574.40	117.11	27.04
4,000	168.72	1607.51	119.89	24.31
กรณีที่ 2				
อัตราการไหลเชิงโมลของ เชื้อเพลิง (โมลต่อชั่วโมง)				
2,000	194.70	1477.96	108.99	40.54
2,500	184.05	1512.89	111.94	33.26
3,000	175.40	1551.12	115.15	28.55
3,500	168.40	1589.16	118.10	25.07
4,000	162.66	1616.79	120.67	22.44
กรณีที่ 3				
อัตราการไหลเชิงโมลของ เชื้อเพลิง (โมลต่อชั่วโมง)				
2,000	189.15	1483.44	109.46	37.59
2,500	178.36	1519.57	112.50	30.78
3,000	169.75	1557.32	115.67	26.48

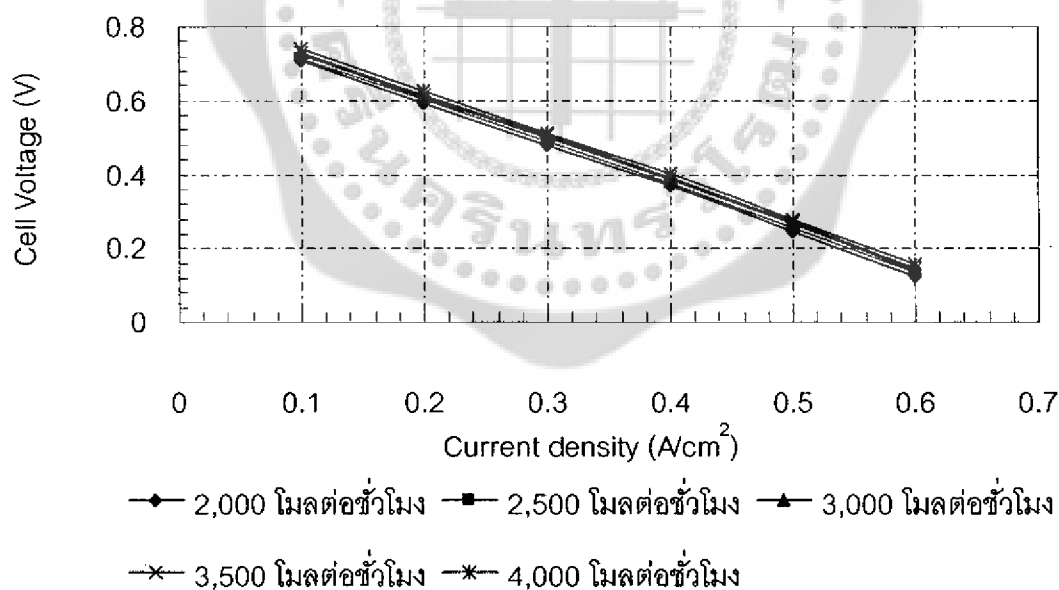
ตาราง 8 สรุปผลการคำนวณสำหรับทุกกรณีศึกษา (ต่อ)

กรณีศึกษา / พารามิเตอร์ (หน่วย)	อุณหภูมิขา ออกของ กระบวนการ (องศา เซลเซียส)	ความ หนาแน่นของ กำลังไฟฟ้า		ประสิทธิภาพ ทางอุณหพล ศาสตร์ (เปอร์เซนต์)
		กำลังไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า	
		สูงสุด	(กิโลวัตต์)	
		(วัตต์ต่อ ตารางเมตร)		
กรณีที่ 3				
อัตราการไหลเชิงโมลของ เชื้อเพลิง (โมลต่อชั่วโมง)				
3,500	162.85	1595.94	118.92	23.37
4,000	157.21	1627.75	121.59	20.88
กรณีที่ 4				
อัตราการไหลเชิงโมลของ เชื้อเพลิง (โมลต่อชั่วโมง)				
2,000	184.01	1485.16	109.60	34.97
2,500	173.13	1526.18	113.05	28.82
3,000	164.60	1567.77	116.55	24.79
3,500	157.82	1605.52	119.72	21.81
4,000	152.33	1640.21	122.64	19.56
กรณีที่ 5				
อัตราการไหลเชิงโมลของ เชื้อเพลิง (โมลต่อชั่วโมง)				
2,000	160.57	1516.39	112.23	25.20
2,500	150.21	1571.37	116.85	20.99
3,000	142.50	1624.17	121.29	18.16
3,500	136.58	1673.64	125.45	16.10
4,000	131.91	1717.25	129.12	14.50

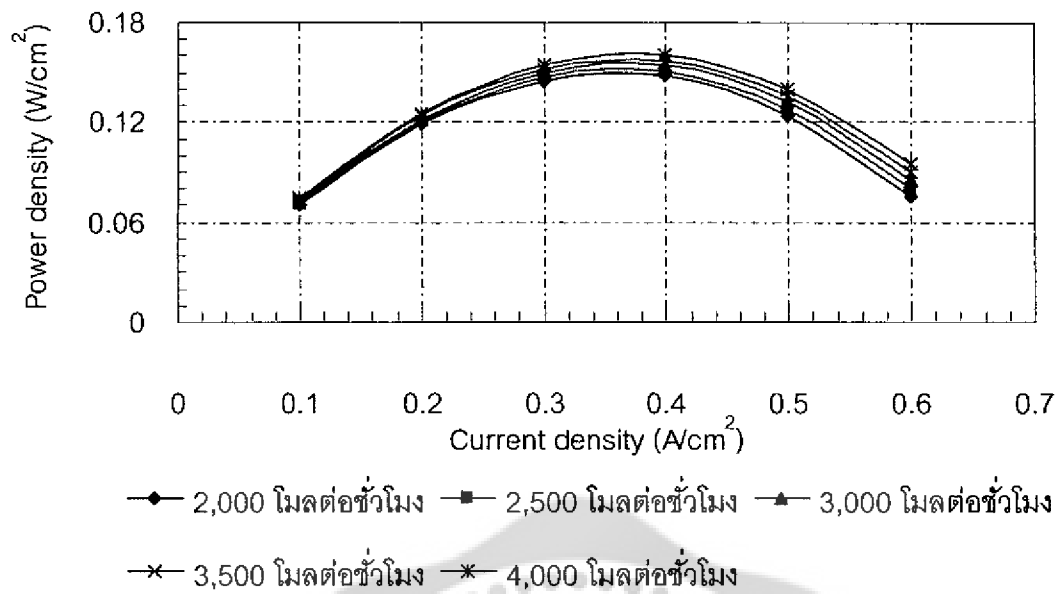
4.2.1 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตไฮโดรเจนของเชื้อเพลิง (กรณีศึกษาที่ 1 – 5)

กรณีศึกษาที่ 1 ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และ คาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการผลิตไฮโดรเจนของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000, 2,500, 3,000, 3,500 และ 4,000 โมลต่อชั่วโมง

ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการผลิตไฮโดรเจนของเชื้อเพลิงโดยเพิ่มขึ้นจาก 2,000 โมลต่อชั่วโมง ถึง 4,000 โมลต่อชั่วโมง และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าคงที่ ผลจากการคำนวณดังแสดงในภาพประกอบ 15 พบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งทุกอัตราการผลิตไฮโดรเจนของเชื้อเพลิงที่ทำการศึกษา ค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน จากภาพประกอบ 16 พบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จนถึงจุดๆ หนึ่งจะมีค่าลดลง พบว่า ช่วงการทำงานที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เท่ากับ 0.4 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในทุกกรณีศึกษาเป็นค่าที่ให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงที่สุด

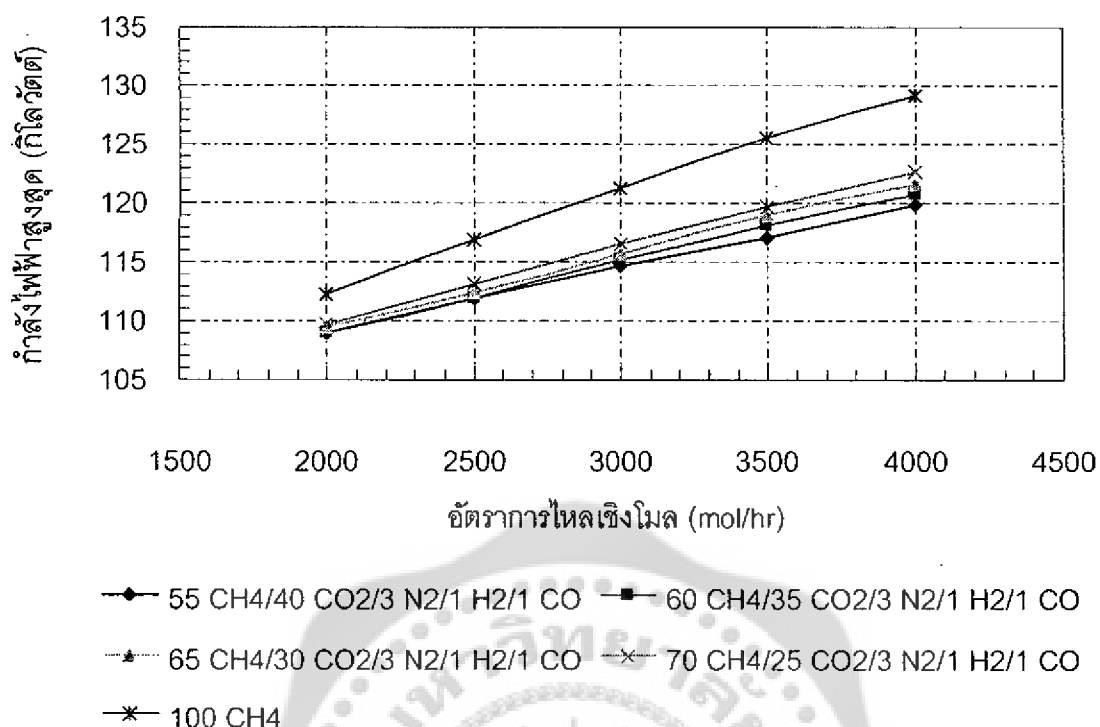


ภาพประกอบ 15 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการผลิตไฮโดรเจนของเชื้อเพลิงต่างๆ

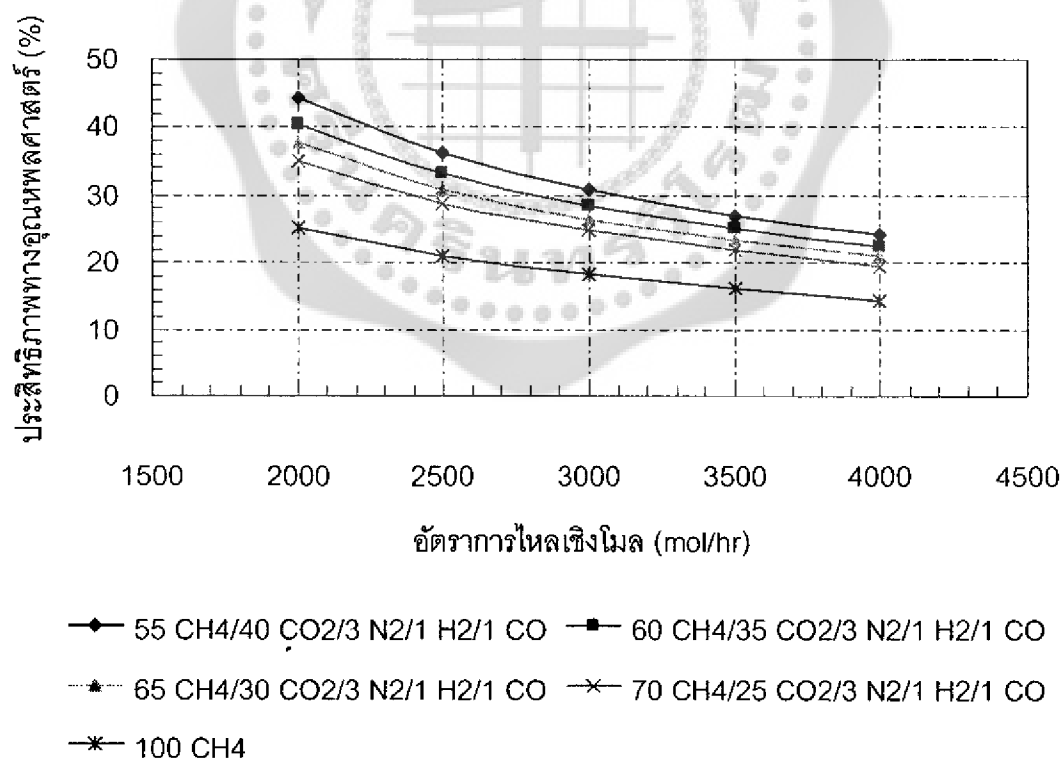


ภาพประกอบ 16 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ

สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ พบว่า เมื่ออัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง เนื่องจากถึงแม้ว่าปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงมากขึ้น แต่ปริมาณสัดส่วนของการนำเชื้อเพลิงไปใช้ และการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นไม่ได้เพิ่มเป็นสัดส่วนเดียวกันกับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น และต้องใช้ความร้อนในการให้พลังงานกับเชื้อเพลิงนั้นมากขึ้นตามอัตราการป้อนที่มากขึ้น โดยเป็นไปในทิศทางเดียวกันทุกกรณีศึกษา ดังแสดงในภาพประกอบ 17 และ 18 ตามลำดับ

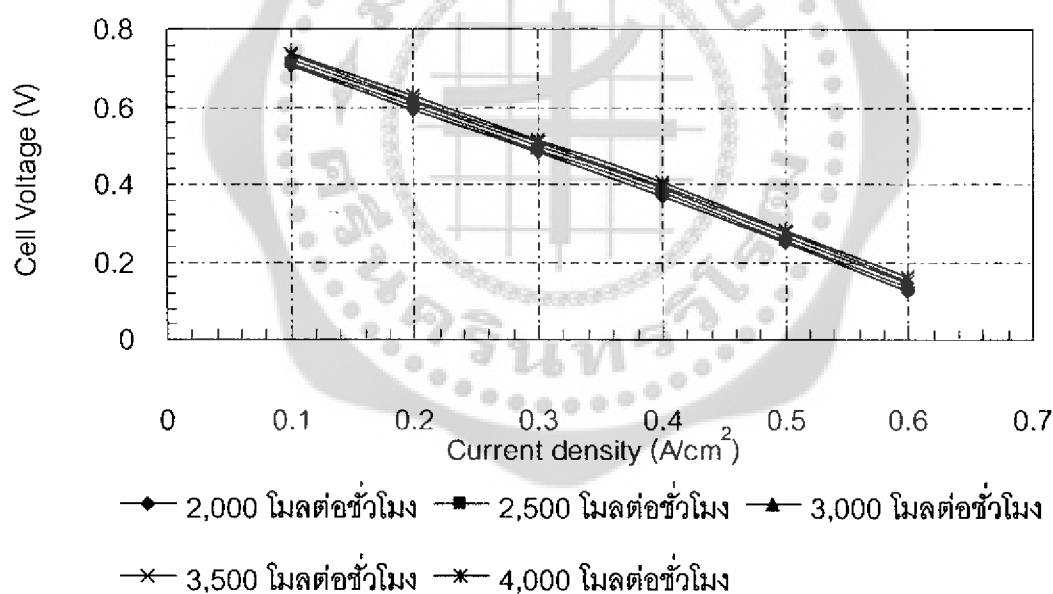


ภาพประกอบ 17 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าทุกกรณีศึกษา ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ

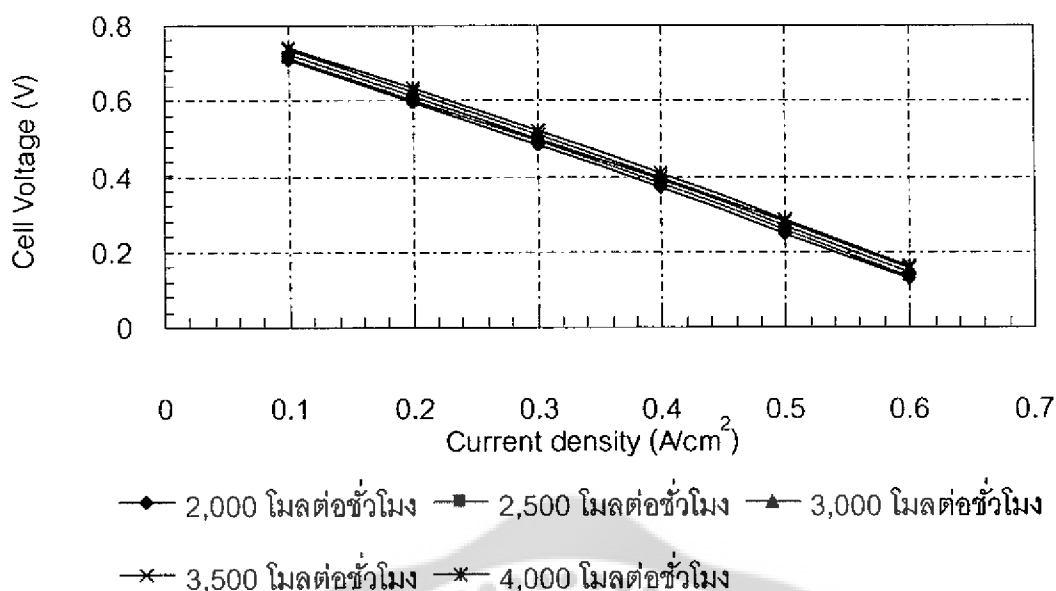


ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ทุกกรณีศึกษา ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ

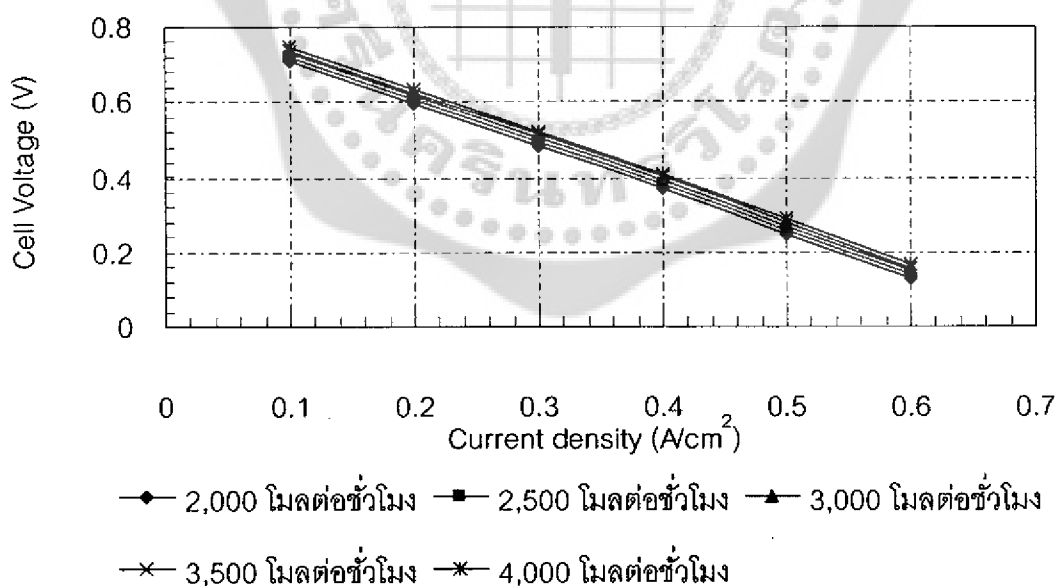
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2, 3, 4 และ 5 โดยมีค่าอัตราส่วนขององค์ประกอบในเชื้อเพลิง ได้แก่ $\text{CH}_4:\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2:\text{CO}$ เท่ากับ 60:35:3:1:1, 65:30:3:1:1, 70:25:3:1:1 และ CH_4 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่า ผลการคำนวณที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอากาศ เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีศึกษาที่ 1 โดยเมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเท่ากัน และอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น จะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 19 ถึง 22 ตามลำดับ สำหรับค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงจุดๆ หนึ่งจะมีค่าลดลง เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ในกรณีศึกษาที่ 2 ถึง 5 ดังแสดงในภาพประกอบ 23 ถึง 26 ในส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์นั้น เมื่อค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง ดังแสดงในภาพประกอบ 17 และ 18 ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ได้แสดงไว้ต่อจากนี้



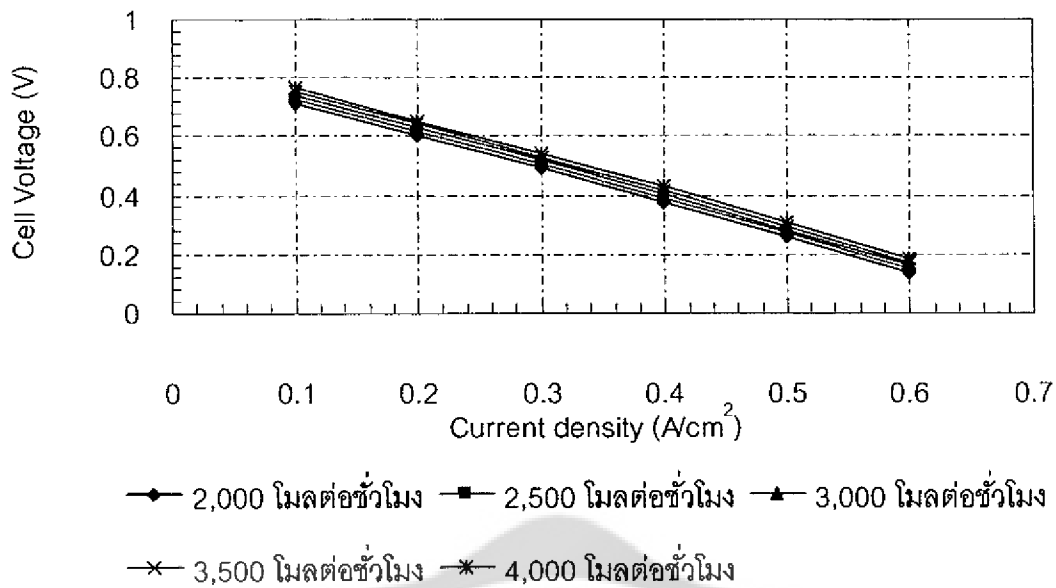
ภาพประกอบ 19 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการใช้เชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ



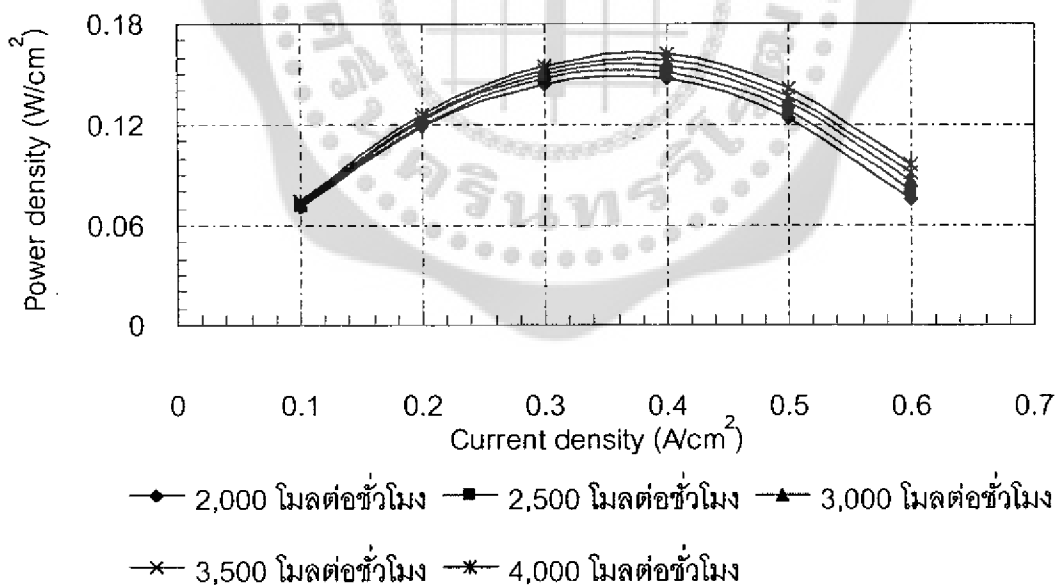
ภาพประกอบ 20 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ



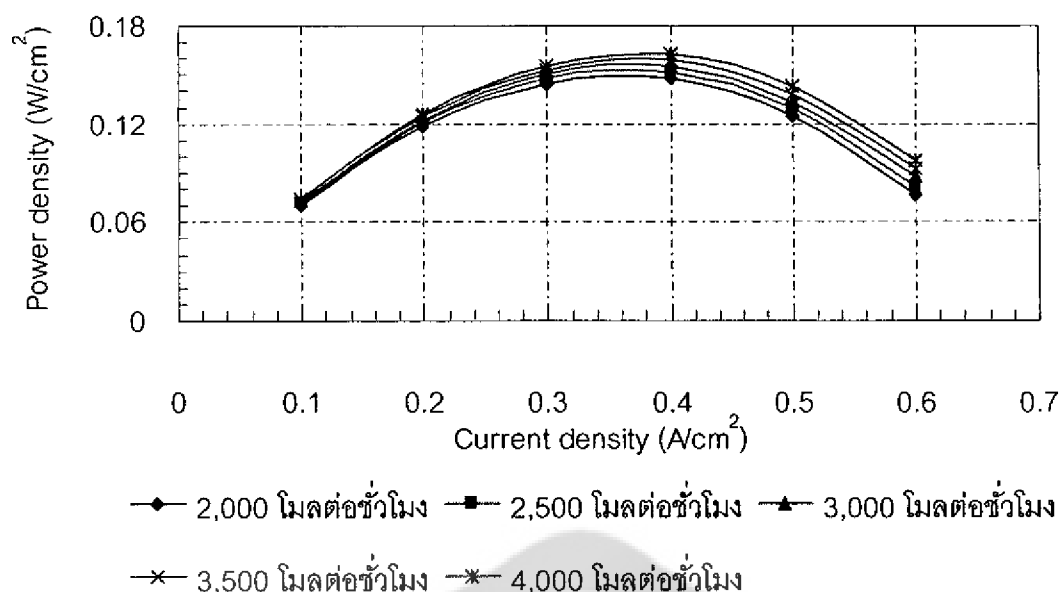
ภาพประกอบ 21 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 70 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ



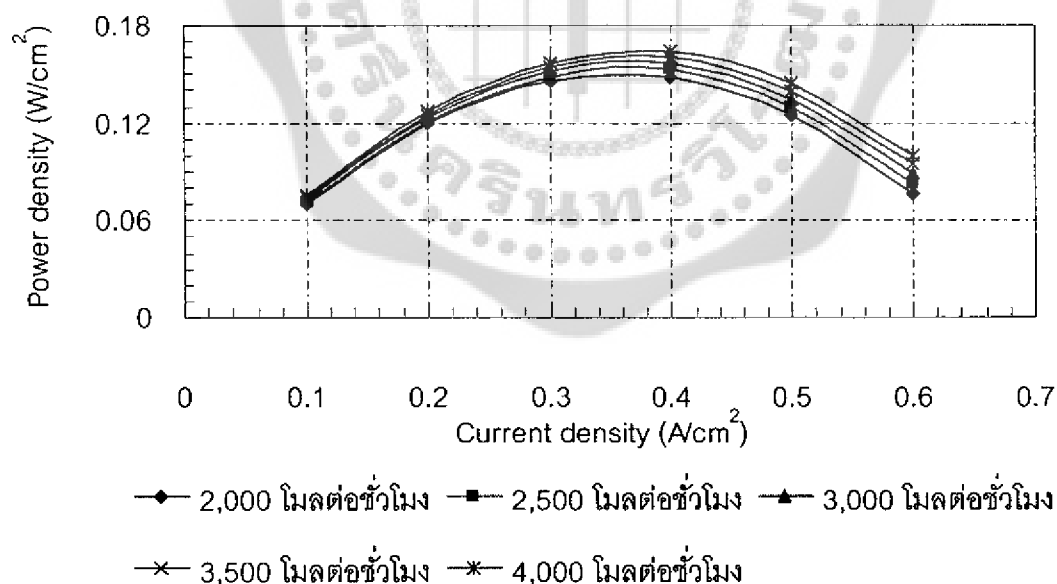
ภาพประกอบ 22 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ



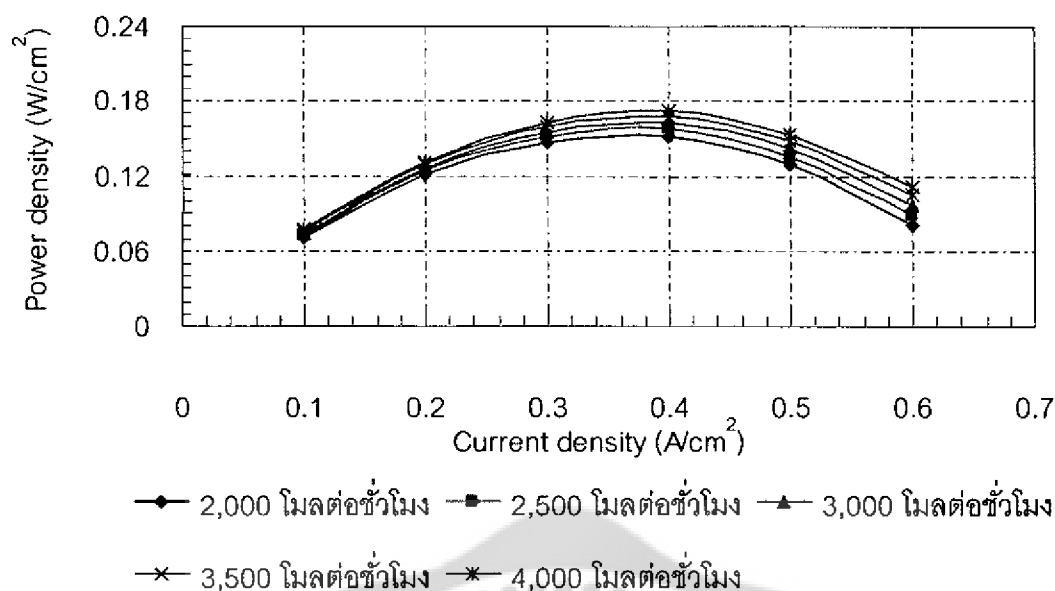
ภาพประกอบ 23 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ



ภาพประกอบ 24 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ



ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 70 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ

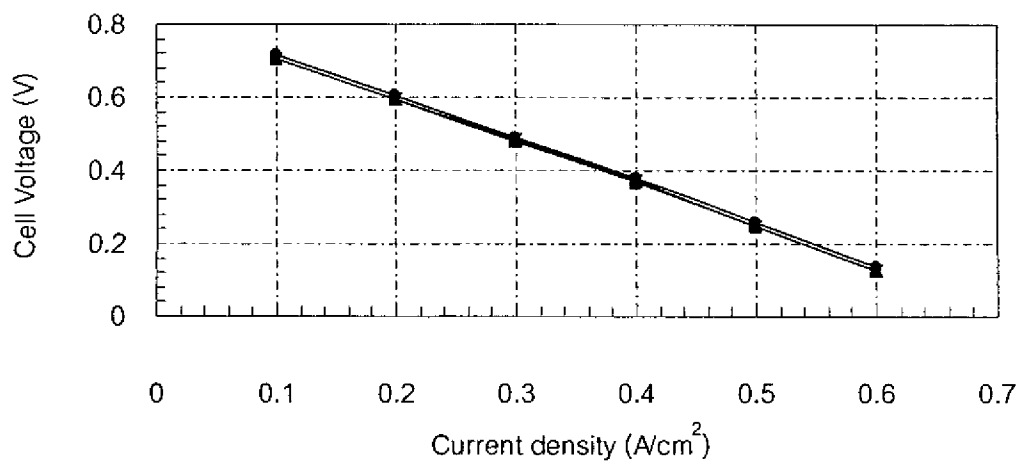


ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงต่างๆ

4.2.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเชื้อเพลิง (กรณีศึกษาที่ 1 – 5)

กรณีศึกษาที่ 1 ถึง 5 ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ

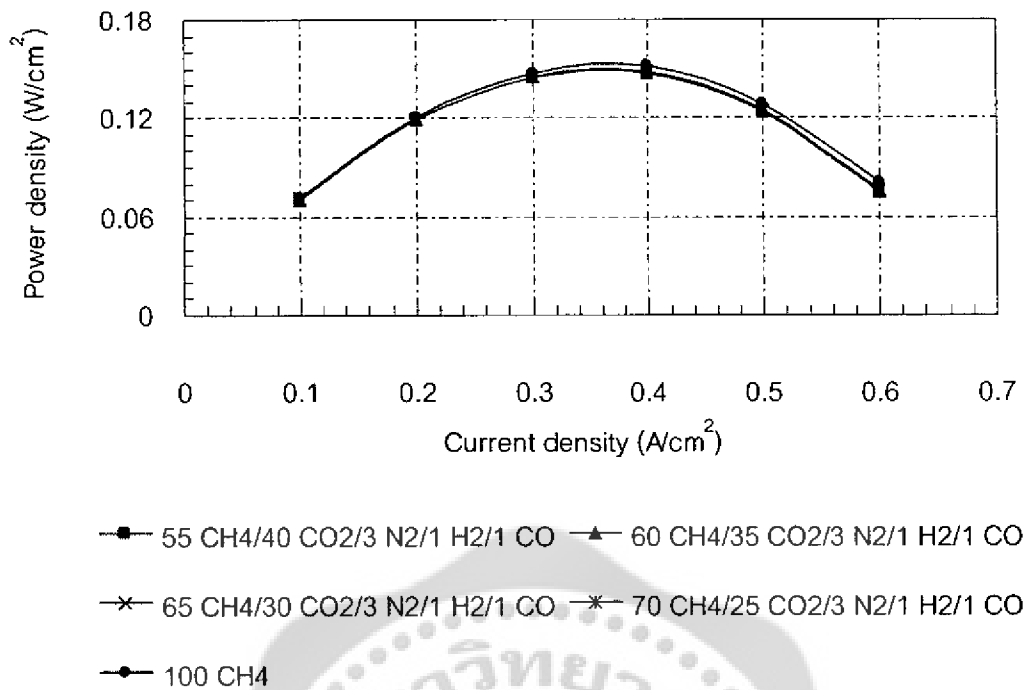
ผลจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยมีอัตราส่วนขององค์ประกอบ ได้แก่ $\text{CH}_4:\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2:\text{CO}$ เท่ากับ 55:40:3:1:1, 60:35:3:1:1, 65:30:3:1:1, 70:25:3:1:1 และ CH_4 100 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าคงที่ ผลการคำนวณดังแสดงในภาพประกอบ 27 พบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งทุกองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ทำการศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน โดยที่เมื่อค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น และจากภาพประกอบ 28 พบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จนถึงจุดๆ หนึ่งจะมีค่าลดลง โดยที่ทุกๆ องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเหมือนกัน



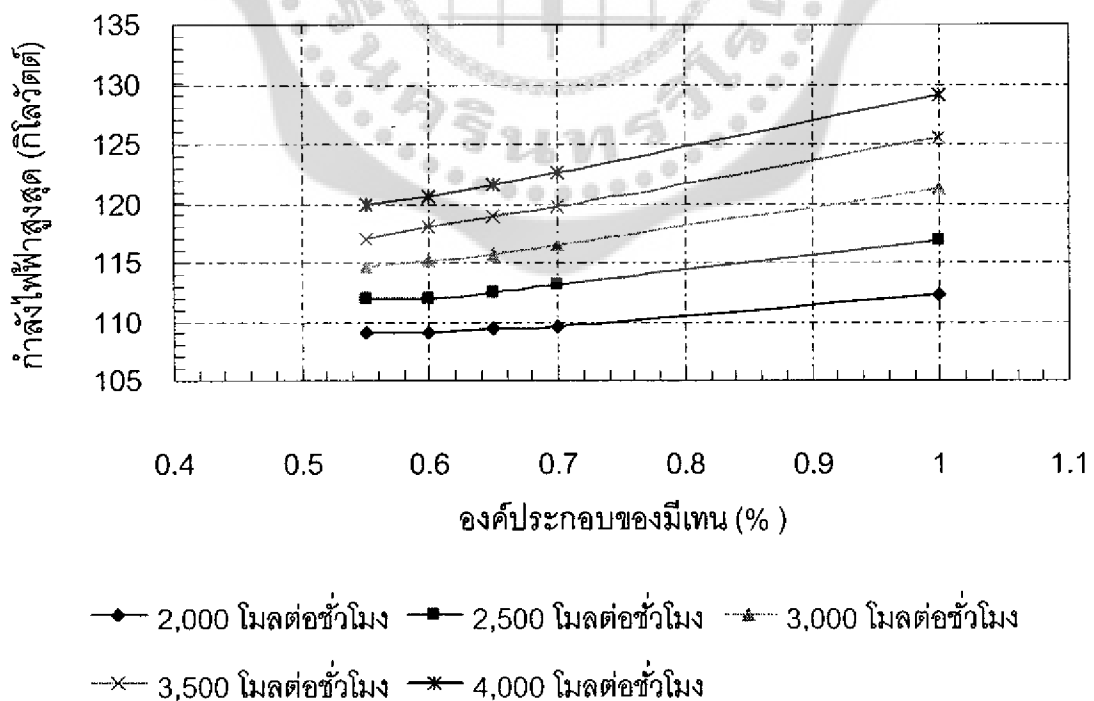
—■— 55 CH₄/40 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO —▲— 60 CH₄/35 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 —×— 65 CH₄/30 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO —*— 70 CH₄/25 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 —●— 100 CH₄

ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ

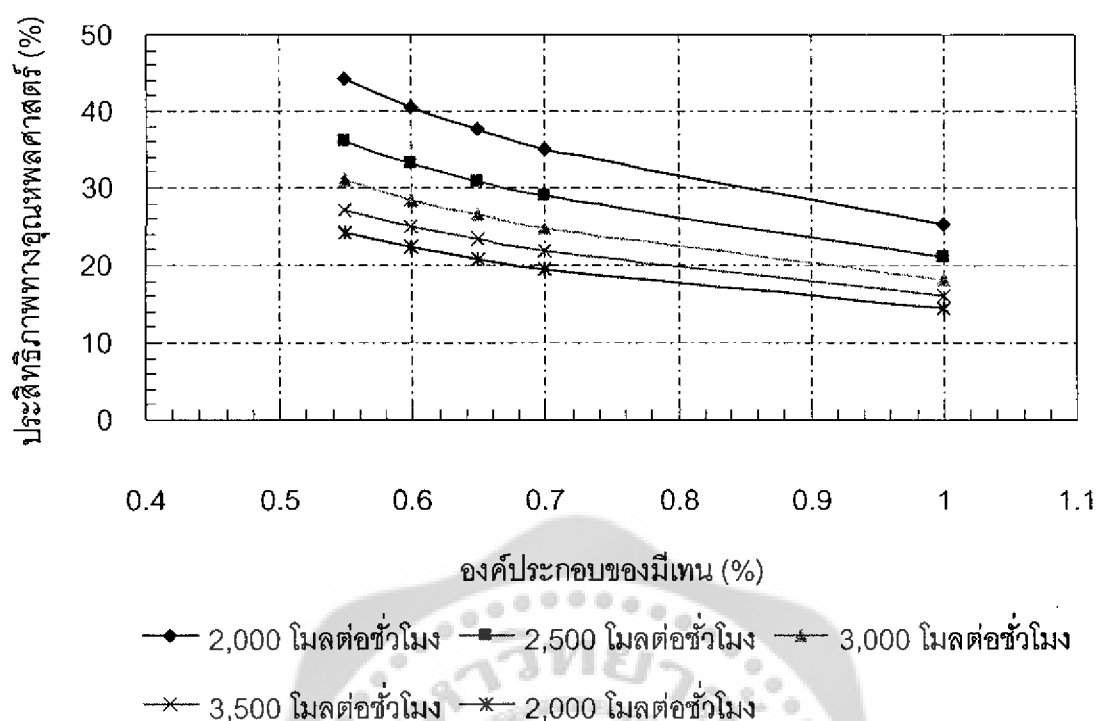
สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ พบว่า พบว่า เมื่อค่าองค์ประกอบของมีเทนในเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่สำหรับค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง เนื่องจากค่าองค์ประกอบของมีเทนในเชื้อเพลิง ทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณสัดส่วนของการนำเชื้อเพลิงไปใช้ และการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นไม่ได้เพิ่มเป็นสัดส่วนเดียวกันกับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นและต้องใช้ความร้อนในการให้พลังงานกับเชื้อเพลิงนั้นมากขึ้นตามอัตราการป้อนที่มากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 29 และ 30 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ

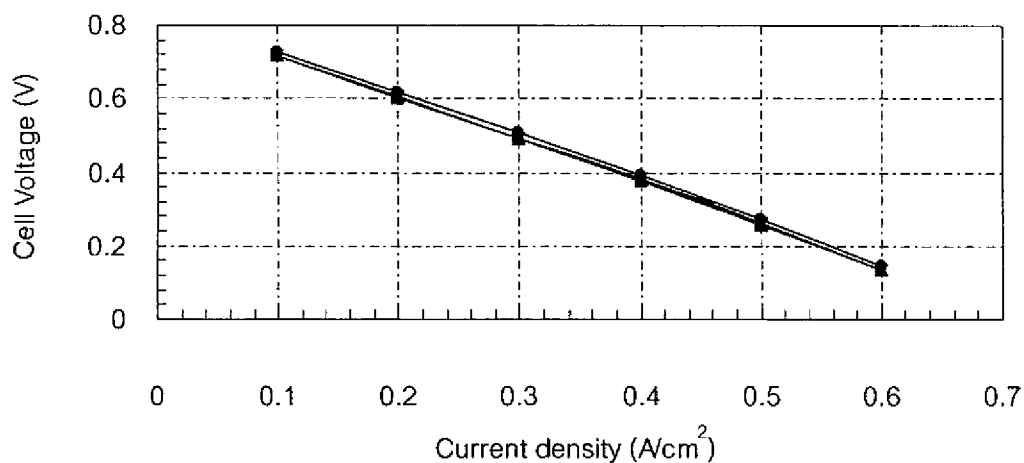


ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าทุกกรณีศึกษา ที่องค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ



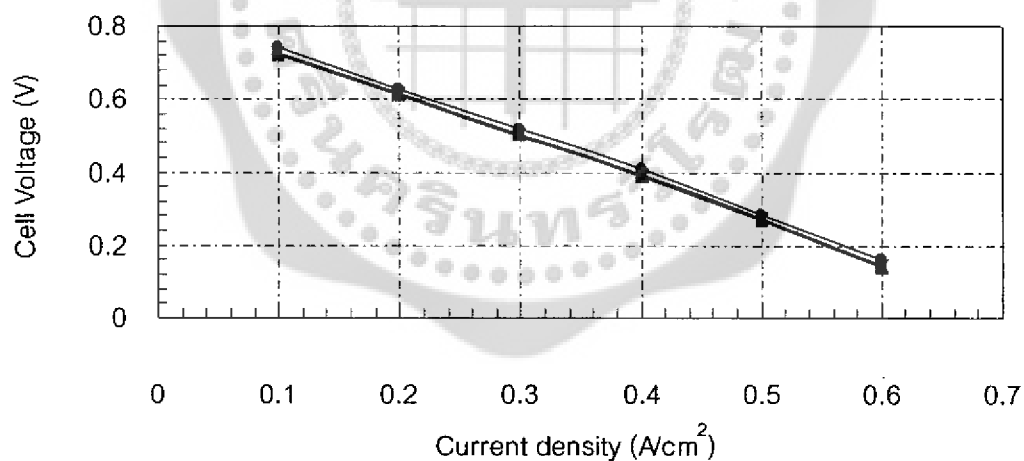
ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ทุกกรณีศึกษา ที่องค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ

สำหรับกรณีศึกษาที่ 2, 3, 4 และ 5 โดยมีค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,500, 3,000, 3,500 และ 4,000 มิลต่อชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า ผลการคำนวณที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเชื้อเพลิง เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีศึกษาที่ 1 โดยเมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเท่ากัน และองค์ประกอบของเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น จะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 31 ถึง 34 ตามลำดับ สำหรับค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงจุดๆ หนึ่งจะมีค่าลดลง เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ในกรณีศึกษาที่ 2 ถึง 5 ดังแสดงในภาพประกอบ 35 ถึง 38 ในส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์นั้น เมื่อค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง ดังแสดงในภาพประกอบ 29 และ 30 ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ได้แสดงไว้ต่อจากนี้



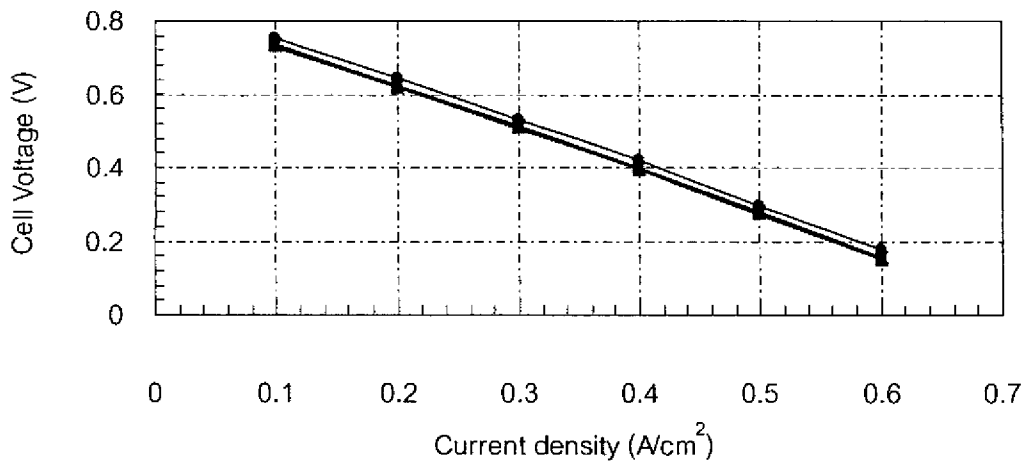
■ 55 CH₄/40 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO ▲ 60 CH₄/35 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 × 65 CH₄/30 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO * 70 CH₄/25 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 ● 100 CH₄

ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,500 โมลต่อชั่วโมง ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ



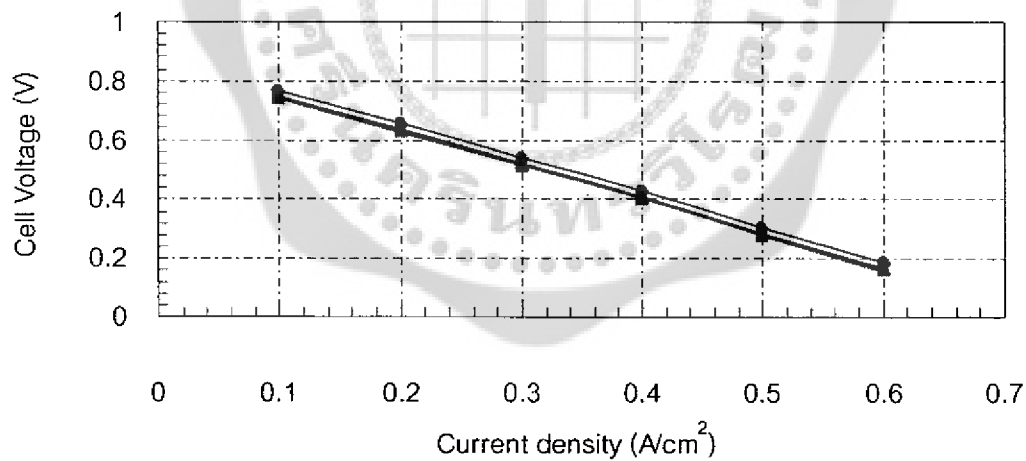
■ 55 CH₄/40 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO ▲ 60 CH₄/35 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 × 65 CH₄/30 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO * 70 CH₄/25 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 ● 100 CH₄

ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,000 โมลต่อชั่วโมง ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ



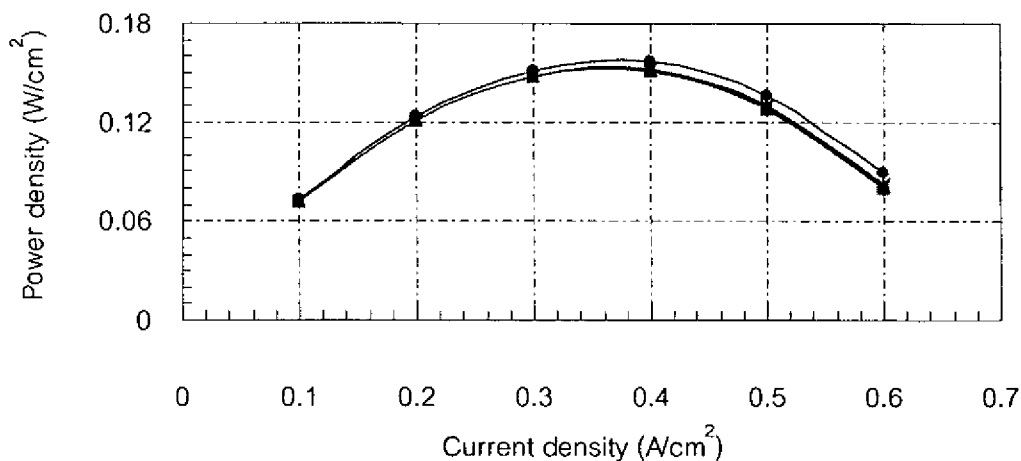
- 55 CH₄/40 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO ▲ 60 CH₄/35 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 × 65 CH₄/30 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO * 70 CH₄/25 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 ● 100 CH₄

ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,500 โมลต่อชั่วโมง ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ



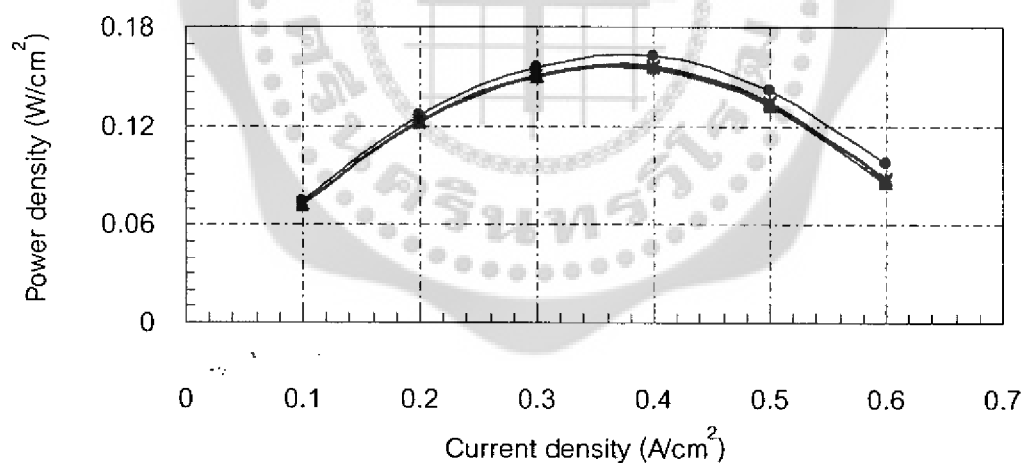
- 55 CH₄/40 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO ▲ 60 CH₄/35 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 × 65 CH₄/30 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO * 70 CH₄/25 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 ● 100 CH₄

ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 4,000 โมลต่อชั่วโมง ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ



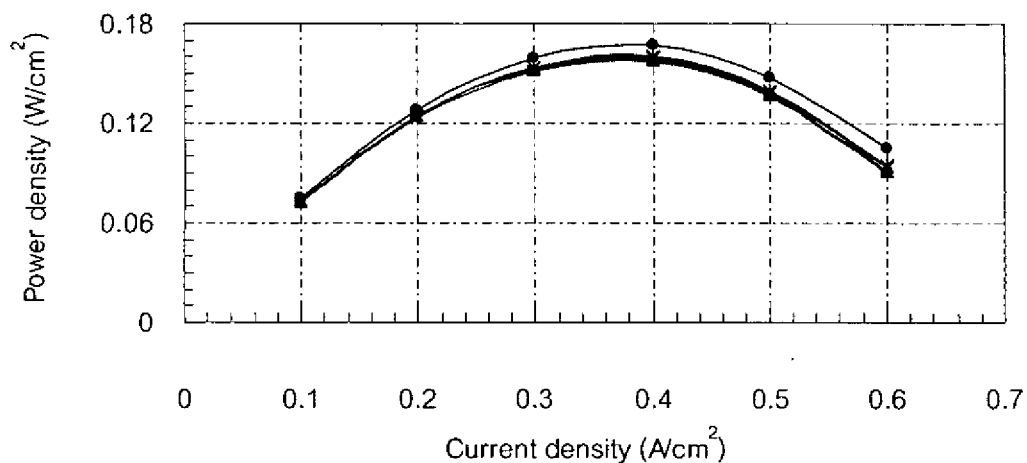
- 55 CH₄/40 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO ▲ 60 CH₄/35 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 × 65 CH₄/30 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO * 70 CH₄/25 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 ● 100 CH₄

ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,500 โมลต่อชั่วโมง ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ



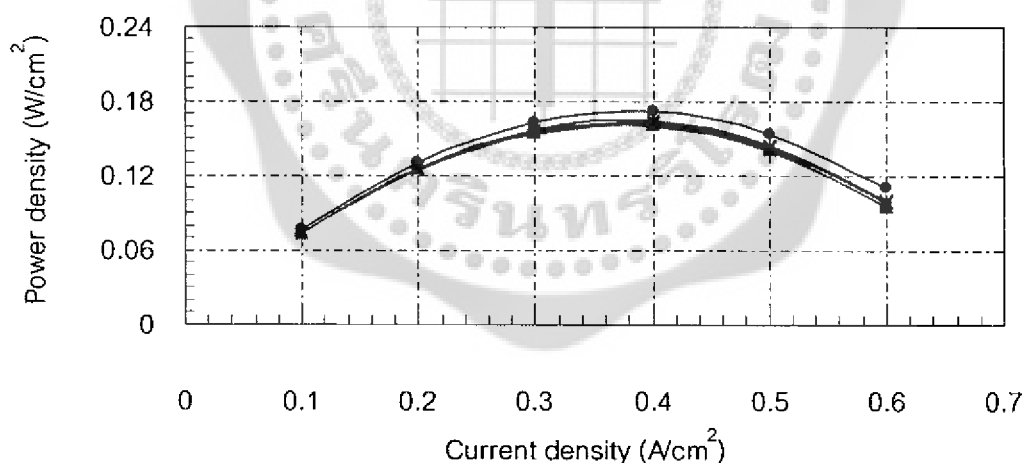
- 55 CH₄/40 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO ▲ 60 CH₄/35 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 × 65 CH₄/30 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO * 70 CH₄/25 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 ● 100 CH₄

ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,000 โมลต่อชั่วโมง ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ



- 55 CH₄/40 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO —▲— 60 CH₄/35 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 —×— 65 CH₄/30 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO —*— 70 CH₄/25 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 —●— 100 CH₄

ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,500 โมลต่อชั่วโมง ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ



- 55 CH₄/40 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO —▲— 60 CH₄/35 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 —×— 65 CH₄/30 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO —*— 70 CH₄/25 CO₂/3 N₂/1 H₂/1 CO
 —●— 100 CH₄

ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 4,000 โมลต่อชั่วโมง ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่างๆ

4.3 สรุปผลท้ายบท

ผลการคำนวณที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงและอากาศ และค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus พบว่า

1) ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิง

จากการศึกษาในกรณี 1, 2, 3, 4 และ 5 ที่ทำการศึกษา โดยเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิง ซึ่งมีค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจาก 2,000 โมลต่อชั่วโมง จนถึง 4,000 โมลต่อชั่วโมง และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าคงที่ พบว่า เมื่อค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง เนื่องจากถึงแม้ว่าปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงมากขึ้น แต่ปริมาณสัดส่วนของการนำเชื้อเพลิงไปใช้ และการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นไม่ได้เพิ่มเป็นสัดส่วนเดียวกันกับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น และต้องใช้ความร้อนในการให้พลังงานกับเชื้อเพลิงนั้นมากขึ้นตามอัตราการป้อนที่มากขึ้น โดยเป็นไปในทิศทางเดียวกันทุกกรณีศึกษา โดยพบว่า ช่วงการทำงานที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เท่ากับ 0.4 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในทุกกรณีศึกษาเป็นค่าที่ให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงที่สุด

2) ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง

จากการศึกษาในกรณี 1, 2, 3, 4 และ 5 ที่ทำการศึกษา โดยเปลี่ยนแปลงค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยมีอัตราส่วนขององค์ประกอบ ได้แก่ $\text{CH}_4:\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2:\text{CO}$ เท่ากับ 55:40:3:1:1, 60:35:3:1:1, 65:30:3:1:1, 70:25:3:1:1 และ CH_4 100 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าคงที่ พบว่า เมื่อค่าองค์ประกอบของมีเทนในเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่สำหรับค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง เนื่องจากค่าองค์ประกอบของมีเทนในเชื้อเพลิง ทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณสัดส่วนของการนำเชื้อเพลิงไปใช้ และการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นไม่ได้เพิ่มเป็นสัดส่วนเดียวกันกับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นและต้องใช้ความร้อนในการให้พลังงานกับเชื้อเพลิงนั้นมากขึ้นตามอัตราการป้อนที่มากขึ้น โดยพบว่า ช่วงการทำงานที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เท่ากับ 0.4 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในทุกกรณีศึกษาเป็นค่าที่ให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงที่สุด เช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิง

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยในปริณฎานิพนธ์นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus ศึกษาผลของอัตราการผลิตของเชื้อเพลิงและอากาศ และองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพ โดยมีอัตราส่วนขององค์ประกอบ ได้แก่ $\text{CH}_4:\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2:\text{CO}$ เท่ากับ 55:40:3:1:1, 60:35:3:1:1, 65:30:3:1:1, 70:25:3:1:1 และ CH_4 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งงานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่มีการนำความร้อนที่เกิดจากกระบวนการมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการได้ โดยที่แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในโปรแกรม Aspen Plus ที่ถูกพัฒนาขึ้นมา นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของเวโย [Veyo, S., 1996] และผลการจำลองของซาง ครัวเซ็ท ดักลาส ฟาวเลอร์ และ เอ็นท์เซฟ (Zhang, W., Croiset, E., Douglas, P.L., Fowler, M.W. ; & Entchev, E., 2005) ผลการศึกษาพบว่า ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า, อุณหภูมิก่อนเข้าสู่รีฟอร์มเมอร์, อุณหภูมิขาออกของกระบวนการ และองค์ประกอบของสารขาออกจากกระบวนการ มีค่าความแตกต่างจากการทดลองและการจำลองอยู่ที่ 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ายอมรับได้ ทำให้แบบจำลองในงานวิจัยนี้รวมถึงแบบจำลองต่างๆ ที่ใช้ในโปรแกรม Aspen Plus สามารถนำมาเป็นเครื่องมือในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ปัญหาและนำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ภายในกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในเบื้องต้นก่อนการออกแบบได้ ซึ่งจากผลการจำลองในงานวิจัยนี้ พบว่า แบบจำลองของซางและคณะมีการนำสายที่เหลือที่ออกจากเตาปฏิกรณ์นำกลับมาใช้ในการป้อน ซึ่งสายที่เหลือจากเตาปฏิกรณ์มีปริมาณของคาร์บอนเป็นส่วนผสมอยู่ เมื่อเข้าไปสู่เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งนั้นเสื่อมสภาพเร็วขึ้น ส่วนระบบที่ออกแบบในงานวิจัยนี้มีการนำความร้อนที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งมาใช้ในระบบ อีกทั้งยังลดจำนวนของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการให้น้อยลงกว่าเดิม ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่ามากกว่าเดิม และลดการสูญเสียความร้อนในระบบให้น้อยลง

สำหรับผลการคำนวณที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราการผลิตของเชื้อเพลิงและอากาศ และค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus พบว่า ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตของเชื้อเพลิง โดยเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการผลิตของเชื้อเพลิง ซึ่งมีค่าอัตราการผลิตของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจาก 2,000 โมลต่อชั่วโมง จนถึง 4,000 โมลต่อชั่วโมง และ

กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าคงที่ พบว่า เมื่อค่าอัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง เนื่องจาก ถึงแม้ว่าปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงมากขึ้น แต่ปริมาณสัดส่วนของการนำเชื้อเพลิงไปใช้ และการผลิต กระแสไฟฟ้านั้นไม่ได้เพิ่มเป็นสัดส่วนเดียวกันกับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น และต้องใช้ความร้อน ในการให้พลังงานกับเชื้อเพลิงนั้นมากขึ้นตามอัตราการป้อนที่มากขึ้น โดยเป็นไปในทิศทางเดียวกันทุก กรณีศึกษา โดยพบว่า ช่วงการทำงานที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เท่ากับ 0.4 แอมแปร์ต่อ ตารางเซนติเมตร ในทุกกรณีศึกษาเป็นค่าที่ให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงที่สุด สำหรับผลจาก การเปลี่ยนแปลงค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยเปลี่ยนแปลงค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยมี อัตราส่วนขององค์ประกอบ ได้แก่ $\text{CH}_4:\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2:\text{CO}$ เท่ากับ 55:40:3:1:1, 60:35:3:1:1, 65:30:3:1:1, 70:25:3:1:1 และ CH_4 100 เปอร์เซนต์ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าคงที่ พบว่า เมื่อค่าองค์ประกอบของมีเทนในเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่สำหรับค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง เนื่องจากค่าองค์ประกอบของมีเทนใน เชื้อเพลิง ทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณสัดส่วนของการนำเชื้อเพลิงไปใช้ และการ ผลิตกระแสไฟฟ้านั้นไม่ได้เพิ่มเป็นสัดส่วนเดียวกันกับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นและต้องใช้ความ ร้อนในการให้พลังงานกับเชื้อเพลิงนั้นมากขึ้นตามอัตราการป้อนที่มากขึ้น โดยพบว่า ช่วงการทำงานที่ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เท่ากับ 0.4 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในทุกกรณีศึกษาเป็น ค่าที่ให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงที่สุด เช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลเชิง โมลของเชื้อเพลิง

5.2 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

ผลจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองในงานวิจัยนี้รวมถึงแบบจำลองต่างๆ ที่ใช้ใน โปรแกรม Aspen Plus สามารถนำมาเป็นเครื่องมือในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ปัญหาและนำมาใช้ ศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ภายในกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในเบื้องต้นก่อนการ ออกแบบได้ ซึ่งเป็นการประหยัดเวลาและหลีกเลี่ยงการสิ้นเปลืองจากการทดลองจริง สำหรับผลการ คำนวณจากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาและการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ ออกไซด์แข็งให้มีความเหมาะสม โดยผลของอุณหภูมิที่ออกจากกระบวนการควรให้มีค่าน้อยที่สุด หรือ นำพลังงานความร้อนที่ได้จากกระบวนการนำกลับไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการ อีกทั้งผลจากการ คำนวณนี้ยังสามารถนำไปเป็นแนวทางในงานวิจัยในระดับต่อไปได้



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- นงลักษณ์ ขวาลย์กุล. (2542). การจำลองแบบกระบวนการและหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการทำน้ำส้มให้เข้มข้นโดยเครื่องระเหยแบบฟิล์มที่มีใบกวนโดยโปรแกรม Aspen Plus, วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (สาขาวิศวกรรมเคมี). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- นวดล ศิริพจน์. (2550). การออกแบบระบบผลิตไฮโดรเจนซึ่งใช้วัตถุดิบที่สามารถหาได้ในประเทศไทย เป็นสารตั้งต้น. วารสารวิชาการ. ถ่ายเอกสาร.
- ปกรณ พิรุณฤกษ์กุล. (2551). การวิเคราะห์เชิงสมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งที่ป้อนด้วยก๊าซชีวภาพ, วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (สาขาวิศวกรรมเคมี). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- สง่าพงษ์ เหล่าวิทยางค์กูร. (2542). การพัฒนาแผนภาพการใช้ประโยชน์ของพลังงานสำหรับโปรแกรม Aspen Plus, วศ.ม. (สาขาวิศวกรรมเคมี). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- สุทธิชัย อัลสละบำรุงรัตน์. (2550). การผลิตสารเทอร์เชียรีเอมีลเอทิลอีเธอร์จากเอธานอลและเทอร์เชียรีแอลกอฮอล์. วารสารวิชาการ. ถ่ายเอกสาร.
- Campanari Stefano. (2001). *Thermodynamic model and parametric analysis of a tubular SOFC module*. Journal of Power Sources. (92). pp. 26-34
- <http://enghome.eng.psu.ac.th/mne/knowledge/student/Fuel%20cell49/Type.html> สืบค้นเมื่อวันที่ 25 เมษายน 2552.
- https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE_143.doc สืบค้นเมื่อวันที่ 25 เมษายน 2552.
- <http://students.bath.ac.uk/en2dg/Fuelcell.htm> สืบค้นเมื่อวันที่ 25 เมษายน 2552.
- <http://th.wikipedia.org/wiki/ก๊าซชีวภาพ> สืบค้นเมื่อวันที่ 25 เมษายน 2552.
- http://www.fctec.com/fctec_types_sofc.asp สืบค้นเมื่อวันที่ 25 เมษายน 2552.
- <http://www.scribd.com/doc/7037713/biogas> สืบค้นเมื่อวันที่ 25 เมษายน 2552.
- Jiang, W., Fang, R., Khan, J.A. and Dougal, R.A. (2006). *Parameter setting and analysis of a dynamic tubular SOFC model*. Journal of Power Sources. (162). pp. 316-326.
- Krumdieck, S.; Page, S.; & Round, S. (2004). *Solid oxide fuel cell architecture and system design for secure power on an unstable grid*. Journal of Power Sources. (125). pp. 189-198.

- Mallon, C. and Kendall, K. (2005). *Sensitivity of nickel cermet anodes to reduction conditions*. Journal of Power Sources. (145). pp. 154-160.
- Saunders, G.J. and Kendall, K. (2002). *Reactions of hydrocarbons in small tubular SOFCs*. Journal of Power Sources. (106). pp. 258-263.
- Suwanwaranggul, R., Croiset, E., Entchev, E., Charojrochkul, S., Pritzker, M.D., Fowler, M.W., Douglas, P.L., Chewathanakup, S. and Mahaudom, H.. (2006). *Experimental and modeling study of solid oxide fuel cell operating with syngas fuel*. Journal of Power Sources. (161). pp. 308-322.
- Suzuki, T., Awano, M., Jasinski, P., Petrovsky, V. and Anderson, H.U.. (2006). *Composite (La, Sr) MnO₃ -YSZ cathode for SOFC*. Solid State Ionics. (177). pp. 2071-2074
- Veyo SE. (1996). The Westinghouse solid oxide fuel cell program—a status report. In: *Proceedings of the 31st IECEC*, (No. 96570). pp. 1138–43.
- Yi, Y., Rao, A.D., Brouwer, J. and Samuelsen, G.S. (2004). *Analysis and optimization of a solid oxide fuel cell and intercooled gas turbine (SOFC-ICGT) hybrid cycle*. Journal of Power Sources. (132). pp. 77–85.
- Zhang, W., Croiset, E., Douglas, P.L., Fowler, M.W. and Entchev, E. (2005). *Simulation of a tubular solid oxide fuel cell stack using AspenPlusTM unit operation models*. Energy Conversion and Management. (46). pp. 181–196.



ภาคผนวก ก

การตรวจสอบผลการคำนวณกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยการคำนวณภายนอก

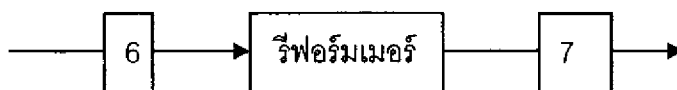


การตรวจสอบผลการคำนวณกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยการคำนวณภายนอก
ในหัวข้อนี้ได้ทำการตรวจสอบผลการคำนวณที่ได้กับผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen
Plus ตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งได้ทำการคำนวณโดยใช้สมดุลโมเลกุลจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น
ในแต่ละอุปกรณ์ที่ได้ทำการออกแบบไว้ในแบบจำลอง

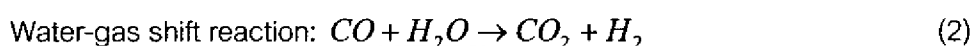
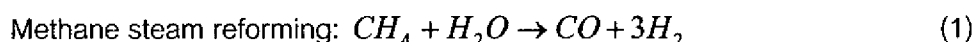
ตาราง 9 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ตามแบบจำลอง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	CATHODE	AFTERBU	HEATEX	AFTERBU	HEATEX2	HEATEX3
To		HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	ANODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
Substream: MIXED															
Phase:		Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	
Component Mole Flow															
H2		0.02	0	0	0.02	0	0.02	2.41	0	0	0	0	0	0	0
CH4		1.1	0	0	1.1	0	0.32	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O		0	0	2	0	2	1.16	0	0	0	4.22	4.22	4.22	4.22	4.22
CO		0.02	0	0	0.02	0	0.74	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2		0.8	0	0	0.8	0	0.85	0	0	0	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92
O2		0	2.78	0	0	0	0	2.78	2.22	0.56	0	0.56	0.56	0.56	0.56
N2		0.06	10.44	0	0.06	0	0.06	10.44	0	10.44	0.06	10.5	10.5	10.5	10.5
Mole Flow		2	13.22	2	2	2	4	5.56	13.22	2.22	10.99	6.2	17.2	17.2	17.2
Mass Flow		55.14	381.26	36.03	55.14	36.03	91.17	91.17	381.26	71.04	310.22	162.21	472.42	472.42	472.42
Volume Flow		45.91	303.32	0.04	143.68	101.8	254.74	382.14	1091.77	183.42	908.35	564.73	1684.69	1684.69	1684.69
Temperature		25	25	25	680	388.04	554.09	620	800	800	800	910	999.52	995.79	398.04
Pressure		1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction		1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction		0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy		-47.65	0	-68.23	-40.15	-54.71	-47.43	-26.18	5.77	6.03	5.72	-59.65	-16.46	-17.33	-23.34
Mass Enthalpy		-1728.4	0	-3787.57	-1455.41	-3036.09	-2081.08	-1595.87	200.02	188.54	202.65	-2279.92	-598.95	-630.69	-849.35
Enthalpy Flow		-0.1	0	-0.14	-0.08	-0.11	-0.19	-0.15	0.08	0.01	0.06	-0.37	-0.28	-0.3	-0.4
Molar Entropy		-8.45	0.89	-38.86	4.36	-4.09	1.67	11.4	10.28	9.64	9.58	7.39	11.23	10.51	5.62
Mass Entropy		-0.31	0.03	-2.16	0.16	-0.23	0.07	0.69	0.36	0.3	0.34	0.28	0.41	0.38	0.2
Molar Density		0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
Mass Density		1.2	1.26	993.96	0.38	0.36	0.36	0.24	0.35	0.39	0.34	0.29	0.28	0.3	0.53
Average Molecular Weight		27.57	28.65	18.02	27.57	18.02	22.79	16.4	28.85	32	28.21	26.16	27.47	27.47	27.47

ตัวอย่างผลการคำนวณภายนอกที่อุปกรณ์รีฟอร์มเมอร์



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในรีฟอร์มเมอร์



จากตาราง 2 แสดงให้เห็นว่ามีเทนที่เข้าสู่รีฟอร์มเมอร์ (สาย 6) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.1 กิโลโมลต่อชั่วโมง และมีเทนที่ออกจากรีฟอร์มเมอร์ (สาย 7) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.32 กิโลโมลต่อชั่วโมง ดังนั้นมีเทนที่ทำปฏิกิริยาในรีฟอร์มเมอร์ตามสมการเคมีที่ (1) มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} CH_4 \text{ ที่ใช้ทำปฏิกิริยา} &= CH_4 \text{ ขาเข้า} - CH_4 \text{ ขาออก} \\ &= 1.1 - 0.32 = 0.78 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง} \end{aligned} \quad (3)$$

จากสมการเคมี (1) พบว่า

ใช้ CH_4 0.78 กิโลโมลต่อชั่วโมง

ใช้ H_2O 0.78 กิโลโมลต่อชั่วโมง

เกิด CO 0.78 กิโลโมลต่อชั่วโมง

เกิด H_2 $3 \times 0.78 = 2.34$ กิโลโมลต่อชั่วโมง

พิจารณาสมการเคมี (2) พบว่า

จากสมการเคมี (1) เกิด CO 0.78 กิโลโมลต่อชั่วโมง และมี CO ป้อนเข้าสู่กระบวนการ 0.02 กิโลโมลต่อชั่วโมง ดังนั้น CO ที่ทำปฏิกิริยาในสมการเคมี (2) มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} CO \text{ ที่เข้าทำปฏิกิริยา} &= CO \text{ ขาเข้า} + CO \text{ ที่เกิดจาก (1)} \\ &= 0.02 + 0.78 = 0.80 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง} \end{aligned} \quad (4)$$

จากตาราง 2 แสดงให้เห็นว่า CO ที่ออกจากรีฟอร์มเมอร์ (สาย 7) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.74 กิโลโมลต่อชั่วโมง ดังนั้น CO ที่ทำปฏิกิริยาในรีฟอร์มเมอร์ตามสมการเคมีที่ (2) มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}\text{CO ที่ใช้ทำปฏิกิริยา} &= \text{CO ที่เข้าทำปฏิกิริยา} - \text{CO ขาออก} \\ &= 0.80 - 0.74 = 0.06 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}\end{aligned}\quad (5)$$

จากสมการเคมี (2) พบว่า

ใช้ CO 0.06 กิโลโมลต่อชั่วโมง

ใช้ H₂O 0.06 กิโลโมลต่อชั่วโมง

เกิด CO₂ 0.06 กิโลโมลต่อชั่วโมง

เกิด H₂ 0.06 กิโลโมลต่อชั่วโมง

ตรวจสอบผลการคำนวณภายนอกกับผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus (สาย 7)

$$\begin{aligned}\text{ไฮโดรเจน (H}_2\text{)} &= \text{H}_2 \text{ ที่เกิดจาก (1)} + \text{H}_2 \text{ ที่เกิดจาก (2)} + \text{H}_2 \text{ ขาเข้า} \\ &= 2.34 + 0.06 + 0.02 = 2.42 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}\end{aligned}\quad (6)$$

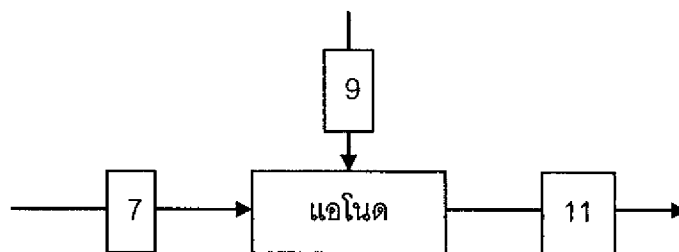
$$\begin{aligned}\text{มีเทน (CH}_4\text{)} &= \text{CH}_4 \text{ ขาเข้ารีฟอร์มเมอร์} - \text{CH}_4 \text{ ที่ใช้ใน (1)} \\ &= 1.1 - 0.78 = 0.32 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}\end{aligned}\quad (7)$$

$$\begin{aligned}\text{น้ำ (H}_2\text{O)} &= \text{H}_2\text{O ขาเข้า} - \text{H}_2\text{O ที่ใช้จาก (1)} - \text{H}_2\text{O ที่ใช้จาก (2)} \\ &= 2 - 0.78 - 0.06 = 1.16 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}\end{aligned}\quad (8)$$

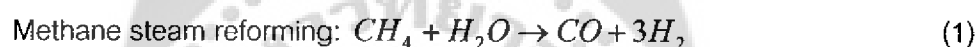
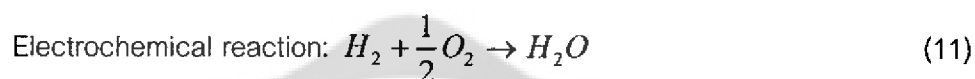
$$\begin{aligned}\text{คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)} &= \text{CO ขาเข้า} + \text{CO ที่เกิดจาก (1)} - \text{CO ที่ใช้ใน (2)} \\ &= 0.02 + 0.78 - 0.06 = 0.74 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}\end{aligned}\quad (9)$$

$$\begin{aligned}\text{คาร์บอนไดออกไซด์ (CO}_2\text{)} &= \text{CO}_2 \text{ ขาเข้า} + \text{CO}_2 \text{ ที่เกิดจาก (2)} \\ &= 0.80 + 0.06 = 0.86 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}\end{aligned}\quad (10)$$

ตัวอย่างผลการคำนวณภายนอกที่แอโนด



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แอโนด



จากตาราง 2 แสดงให้เห็นว่ามีเทนที่เข้าสู่แอโนด (สาย 7) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.32 กิโลโมลต่อชั่วโมง และมีเทนที่ออกจากแอโนด (สาย 11) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 กิโลโมลต่อชั่วโมง ดังนั้นมีเทนที่ทำปฏิกิริยาที่แอโนดตามสมการเคมีที่ (1) มีค่าเท่ากับ 0.32 กิโลโมลต่อชั่วโมง

จากสมการเคมี (1) พบว่า

ใช้ CH_4 0.32 กิโลโมลต่อชั่วโมง

ใช้ H_2O 0.32 กิโลโมลต่อชั่วโมง

เกิด CO 0.32 กิโลโมลต่อชั่วโมง

เกิด H_2 $3 \times 0.32 = 0.96$ กิโลโมลต่อชั่วโมง

พิจารณาสมการเคมี (2) พบว่า

จากสมการเคมี (1) เกิด CO 0.32 กิโลโมลต่อชั่วโมง และมี CO ป้อนเข้าสู่แอโนด 0.74 กิโลโมลต่อชั่วโมง ดังนั้น CO ที่ทำปฏิกิริยาในสมการเคมี (2) มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}\text{CO ที่เข้าทำปฏิกิริยา} &= \text{CO ที่เข้าสู่แอดไนต์} + \text{CO ที่เกิดจาก (1)} \\ &= 0.74 + 0.32 = 1.06 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}\end{aligned}\quad (12)$$

จากสมการเคมี (2) พบว่า

ใช้ CO 1.06 กิโลโมลต่อชั่วโมง

ใช้ H₂O 1.06 กิโลโมลต่อชั่วโมง

เกิด CO₂ 1.06 กิโลโมลต่อชั่วโมง

เกิด H₂ 1.06 กิโลโมลต่อชั่วโมง

พิจารณาสมการเคมี (11) พบว่า

จากสมการเคมี (2) และ (1) เกิด H₂ เท่ากับ 1.06 และ 0.96 กิโลโมลต่อชั่วโมงตามลำดับ และมี H₂ ป้อนเข้าสู่แอดไนต์ 2.42 กิโลโมลต่อชั่วโมง ดังนั้น H₂ ที่ทำปฏิกิริยาในสมการเคมี (11) มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}\text{H}_2 \text{ ที่ทำปฏิกิริยา} &= \text{H}_2 \text{ ที่เข้าแอดไนต์} + \text{H}_2 \text{ จาก (2)} + \text{H}_2 \text{ จาก (1)} \\ &= 2.42 + 1.06 + 0.96 = 4.44 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}\end{aligned}\quad (13)$$

จากสมการเคมี (11) พบว่า

ใช้ H₂ 4.44 กิโลโมลต่อชั่วโมง

ใช้ O₂ 0.5 x 4.44 = 2.22 กิโลโมลต่อชั่วโมง

เกิด H₂O 4.44 กิโลโมลต่อชั่วโมง

ตรวจสอบผลการคำนวณภายนอกกับผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus (สาย 11)

$$\begin{aligned}\text{ไฮโดรเจน (H}_2\text{)} &= \text{H}_2 \text{ เกิดจาก (1)} + \text{H}_2 \text{ เกิดจาก (2)} + \text{H}_2 \text{ เข้าแอดไนต์} - \text{H}_2 \text{ ใช้ใน (11)} \\ &= 2.34 + 0.06 + 0.02 = 2.42 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}\end{aligned}\quad (14)$$

$$\begin{aligned}\text{มีเทน (CH}_4\text{)} &= \text{CH}_4 \text{ เข้าแอดไนต์} - \text{CH}_4 \text{ ที่ใช้ใน (1)} \\ &= 2.42 - 2.42 = 0 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}\end{aligned}\quad (15)$$

$$\begin{aligned}\text{น้ำ (H}_2\text{O)} &= \text{H}_2\text{O เข้าแอดไนต์} - \text{H}_2\text{O ที่ใช้ (1)} - \text{H}_2\text{O ที่ใช้ (2)} + \text{H}_2\text{O ที่เกิด (11)} \\ &= 1.16 - 0.32 - 1.06 + 4.44 = 4.22 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}\end{aligned}\quad (16)$$

$$\begin{aligned}\text{คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)} &= \text{CO เข้าแอมไนด์} + \text{CO ที่เกิด (1)} - \text{CO ที่ใช้ (2)} - \text{CO ที่ใช้ (11)} \\ &= 0.74 + 0.32 - 1.06 = 0 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}\end{aligned}\quad (17)$$

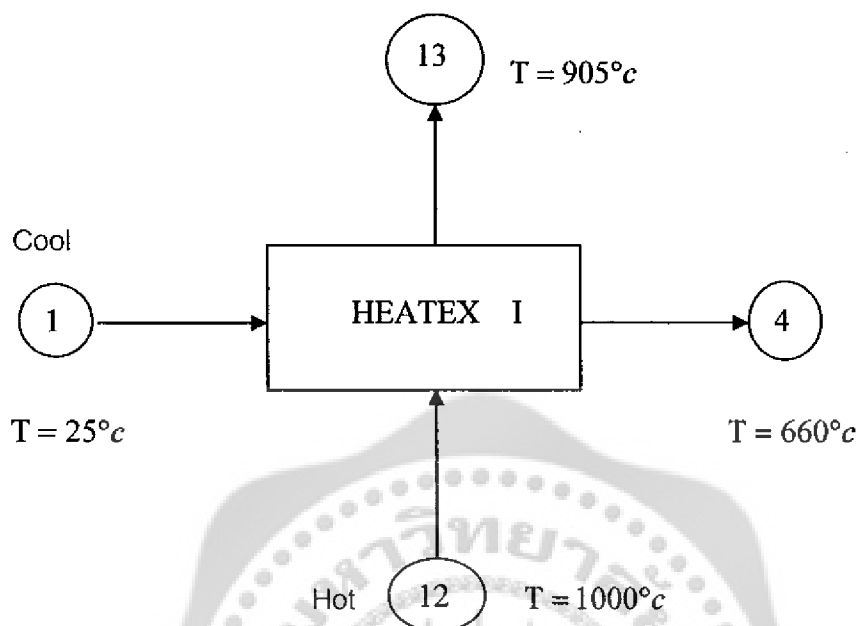
$$\begin{aligned}\text{คาร์บอนไดออกไซด์ (CO}_2\text{)} &= \text{CO}_2 \text{ เข้าแอมไนด์} + \text{CO}_2 \text{ ที่เกิดจาก (2)} \\ &= 0.86 + 1.06 = 1.92 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}\end{aligned}\quad (18)$$

$$\begin{aligned}\text{ออกซิเจน (O}_2\text{)} &= \text{O}_2 \text{ เข้าแอมไนด์} - \text{O}_2 \text{ ที่ใช้ใน (11)} \\ &= 2.22 - 2.22 = 0 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}\end{aligned}\quad (19)$$



ผลการคำนวณโดยการคำนวณภายนอก

ตัวอย่างผลการคำนวณภายนอกที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1



พิจารณา Cool Steam

$$\begin{aligned}
 Q &= \dot{m}C_p\Delta T \\
 &= (55.136 \text{ kg/hr})(1.1557 \text{ kJ/kg K})(933 - 298 \text{ K}) \\
 &= 40463.19 \text{ kJ/hr} \\
 &= 11.24 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

พิจารณา Hot Steam

$$\begin{aligned}
 Q &= \dot{m}C_p\Delta T \\
 &= (472.425 \text{ kg/hr})(1.1410 \text{ kJ/kg K})(1273 - 1178 \text{ K}) \\
 &= 51209.31 \text{ kJ/hr} \\
 &= 14.22 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

หมายเหตุ ค่า C_p เปิดจากหนังสือ Fundamentals of Momentum, Heat and Mass transfer
 "James R.Welty, Charles E.Wicks, Robert E.Wilson"

หาค่า Logarithmic mean temperature difference (LMTD), $\overline{\Delta T_L}$

จากสมการ
$$\overline{\Delta T_L} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

At Shell inlet $\Delta T_1 = 1000 - 660 = 340^\circ\text{C}$

At Shell outlet $\Delta T_2 = 905 - 25 = 880^\circ\text{C}$

$$\overline{\Delta T_L} = \frac{(880 - 340)}{\ln(880/340)}$$

$$= 567.84^\circ\text{C}$$

หาค่า A จากสมการ $Q = UA\overline{\Delta T_L}$

โดยกำหนดให้ $U = 0.85 \text{ kJ/s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ เพราะจาก gas - gas

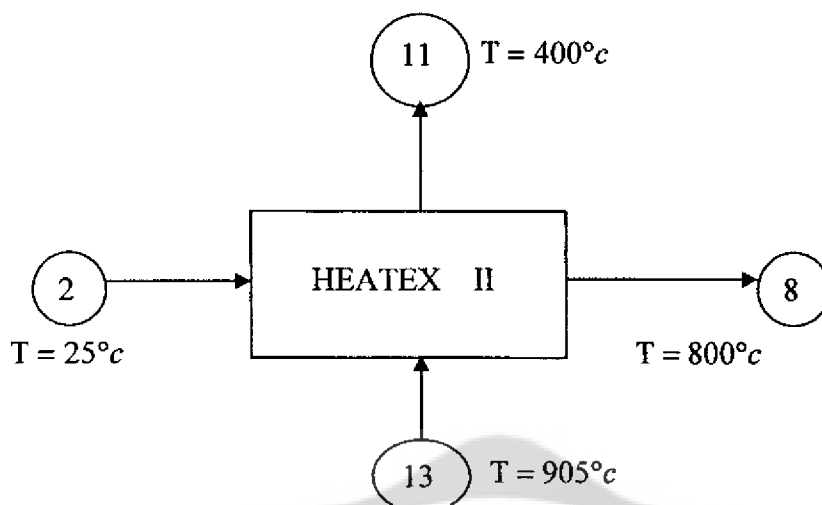
จากหนังสือ Conceptual Design "James M. Douglas

$$A = \frac{Q}{U\overline{\Delta T_L}} = \frac{12.73 \text{ kJ/s}}{(0.85 \text{ kJ/s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$A = 0.0264 \text{ m}^2$$

หมายเหตุ ค่า Q ที่ใช้มาจาก $Q = \frac{Q_{cool} + Q_{hot}}{2}$

ตัวอย่างผลการคำนวณภายนอกที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2



พิจารณา Cool Steam

$$\begin{aligned}
 Q &= \dot{m} C_p \Delta T \\
 &= (381.258 \text{ kg/hr})(1.0063 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(1073 - 298 \text{ K}) \\
 &= 297336.44 \text{ kJ/hr} \\
 &= 82.59 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

พิจารณา Hot Steam

$$\begin{aligned}
 Q &= \dot{m} C_p \Delta T \\
 &= (472.425 \text{ kg/hr})(1.1320 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(1178 - 673 \text{ K}) \\
 &= 270066.48 \text{ kJ/hr} \\
 &= 75.02 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

หาค่า $\overline{\Delta T_L}$, At Shell inlet $\Delta T_1 = 905 - 800 = 105^\circ\text{C}$

At Shell outlet $\Delta T_2 = 400 - 25 = 375^\circ\text{C}$

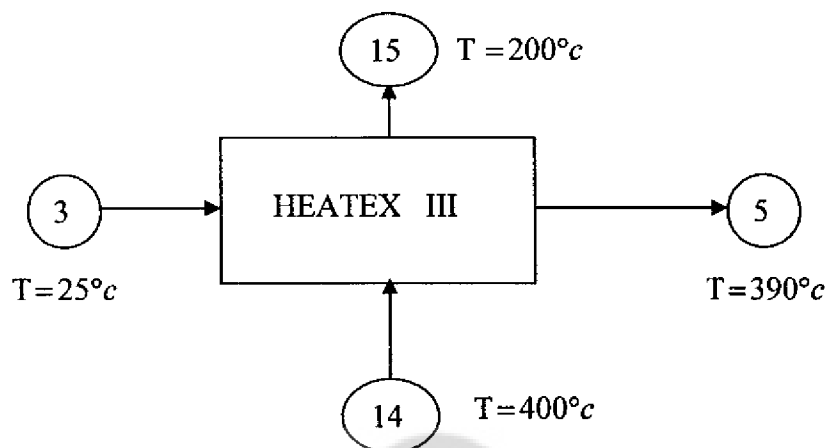
$$\overline{\Delta T_L} = \frac{375 - 105}{\ln(375/105)} = 212.10^\circ\text{C}$$

หาค่า A จาก $A = \frac{Q}{U \overline{\Delta T_L}}$

$$A = \frac{78.805 \text{ kJ/s}}{(0.85 \text{ kJ/s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})(212.10^\circ\text{C})}$$

$$\therefore A = 0.4371 \text{ m}^2$$

ตัวอย่างผลการคำนวณภายนอกที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 3



พิจารณา Cool Steam

$$\begin{aligned}
 Q &= \dot{m} C_p \Delta T \\
 &= (36.031 \text{ kg/hr}) (6.887 \text{ kJ/kg.K}) (663 - 298 \text{ K}) \\
 &= 90573.11 \text{ kJ/hr} \\
 &= 25.16 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

พิจารณา Hot Steam

$$\begin{aligned}
 Q &= \dot{m} C_p \Delta T \\
 &= (472.425 \text{ kg/hr}) (10504 \text{ kJ/kg.K}) (673 - 473 \text{ K}) \\
 &= 99247.04 \text{ kJ/hr} \\
 &= 27.59 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

หาค่า $\overline{\Delta T_L}$, At Shell inlet $\Delta T_1 = 400 - 390 = 10^\circ\text{C}$

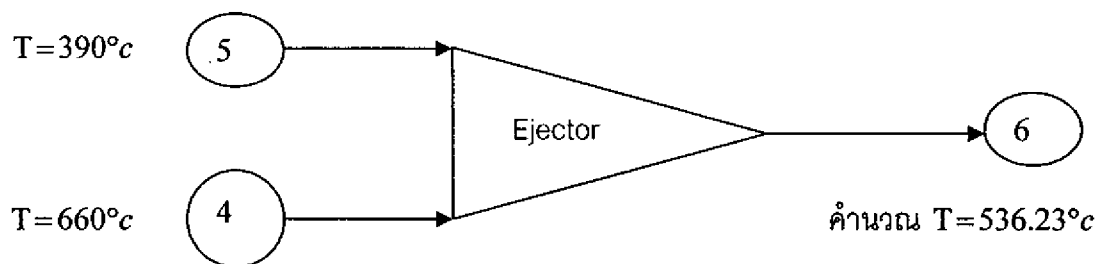
At Shell out $\Delta T_2 = 200 - 25 = 175^\circ\text{C}$

$$\overline{\Delta T_L} = \frac{175 - 10}{\ln(175/10)} = 57.65^\circ\text{C}$$

หาค่า A จาก $A = \frac{Q}{U \overline{\Delta T_L}}$

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{26.365 \text{ kJ/s}}{(0.85 \text{ kJ/s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) (57.65^\circ\text{C})} \\
 &= 0.5381 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างผลการคำนวณภายนอกที่เครื่องรวมสาร



จากสมการ

$$Q_{\text{ลด}} = Q_{\text{เพิ่ม}}$$

$$\dot{m}C_p\Delta T = \dot{m}C_p\Delta T$$

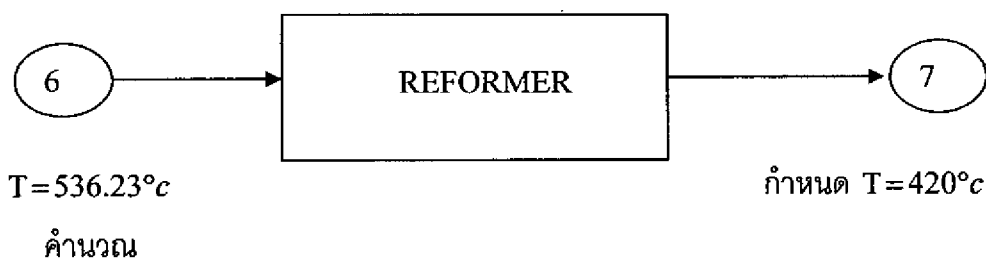
$$121.78 \times (660 - T) = 103.07 (T - 390)$$

$$80374.8 - 121.78T = 103.07T - 40197.3$$

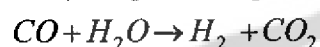
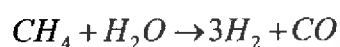
$$120572.1 = 224.85T$$

$$T = 536.23^\circ\text{C}$$

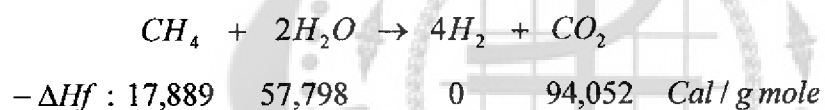
ตัวอย่างผลการคำนวณภายนอกที่รีฟอร์มเมอร์



จากสมการเคมีในรีฟอร์มเมอร์



จาก Appendix G (ภาคผนวก ข)



ดังนั้น $\Delta H_f = (-4(0) - 94052) - (17889 + 2 \times 57798)$

$$= -94052 - (133485)$$

$$= -227,537 \quad \text{Cal / g mole}$$

คำนวณหาค่า ΔC_p จาก Appendix F (ภาคผนวก จ)

$$C_{pCO_2} = 6.393 + 10.100 \times 10^{-3} T - 3.405 \times 10^{-6} T^2$$

$$C_{pH_2} = 6.424 + 1.039 \times 10^{-3} T - 0.078 \times 10^{-6} T^2$$

$$C_{pH_2O} = 6.970 + 3.464 \times 10^{-3} T - 0.483 \times 10^{-6} T^2$$

$$C_{pCH_4} = 3.204 + 18.41 \times 10^{-3} T - 4.48 \times 10^{-6} T^2$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= [(1)(6.393 + (4)(6.424))] - [(1)(3.204) + (2)(6.970)] \\ &= 32.089 - 17.144 \\ &= -10.002 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\beta &= [(1)(10.100) + (4)(1.309)](10^{-3}) - [(1)(18.41) + (2)(3.464)](10^{-3}) \\ &= (15.336)(10^{-3}) - (25.538)(10^{-3}) \\ &= -10.002 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\gamma &= [(1)(-3.405) + (4)(-0.078)](10^{-6}) - [(1)(-4.48) + (2)(3.464)](10^{-3}) \\ &= (15.336)(10^{-6}) - (-5.446)(10^{-6}) \\ &= 1.729 \times 10^{-6}\end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\Delta C_p = 14.945 - 10.002 \times 10^{-3} T + 1.729 \times 10^{-6} T^2$$

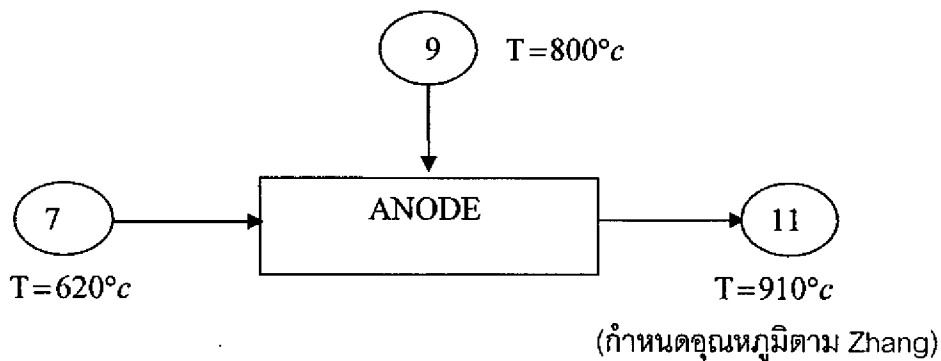
หาค่า ΔH_0 ที่อุณหภูมิอ้างอิง 298 K

$$\begin{aligned}\Delta H_0 &= \Delta H_{rxn,298} - \Delta\alpha T - \frac{\Delta\beta}{2} T^2 - \frac{\Delta\gamma}{3} T^3 \\ &= -227537 - (14.945)(298) - \left(\frac{10.002 \times 10^{-3}}{2}\right)(298)^2 - \left(\frac{1.729 \times 10^{-6}}{3}\right)(298)^3 \\ &= -231561.75 \text{ Cal}\end{aligned}$$

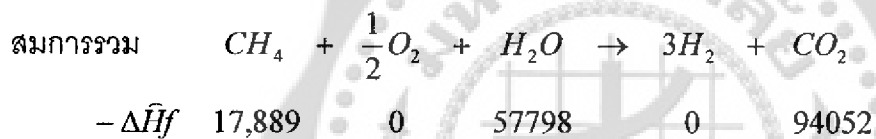
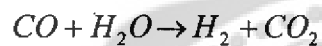
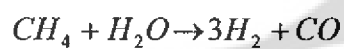
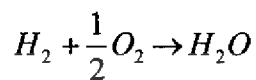
หาค่า $\Delta H_{rxn,893}$ จากสมการ

$$\begin{aligned}\Delta H_{rxn,893} &= \Delta H_0 + \Delta\alpha T + \frac{\Delta\beta}{2} T^2 - \frac{\Delta\gamma}{3} T^3 \\ &= -231561.75 + (14.945)(693) - \left(\frac{10.002 \times 10^{-3}}{2}\right)(693)^2 + \left(\frac{1.729 \times 10^{-6}}{3}\right)(693)^3 \\ &= -231561.75 + 10356.885 - 2401.725 + 191.811 \\ &= -223414.78 \text{ Cal}\end{aligned}$$

ตัวอย่างผลการคำนวณภายนอกที่แอโนด



จากสมการเคมีในแอโนด



ดังนั้น จะได้ว่า $\therefore \Delta\bar{H}_{rxn(298)} = -227537 \text{ Cal / g mole } CH_4$

หา C_{PO_2} เพิ่มเติมจากรีฟอร์มเมอร์โดยที่

$$C_{PO_2} = 6.732 + 1.505 \times 10^{-3} T - 0.1791 T^2$$

จะได้

$$\Delta\alpha = 11.579$$

$$\Delta\beta = -10.7545 \times 10^{-3}$$

$$\Delta\gamma = 1.63945 \times 10^{-6}$$

$$\Delta C_p = 11.579 - 10.7545 \times 10^{-3} T + 1.63945 \times 10^{-6} T^2$$

หาค่า ΔH_0 ที่อุณหภูมิอ้างอิง 298 K

$$\Delta H_0 = \Delta H_{rxn298} - \Delta\alpha T - \frac{\Delta\beta}{2} T^2 - \frac{\Delta\gamma}{3} T^3$$

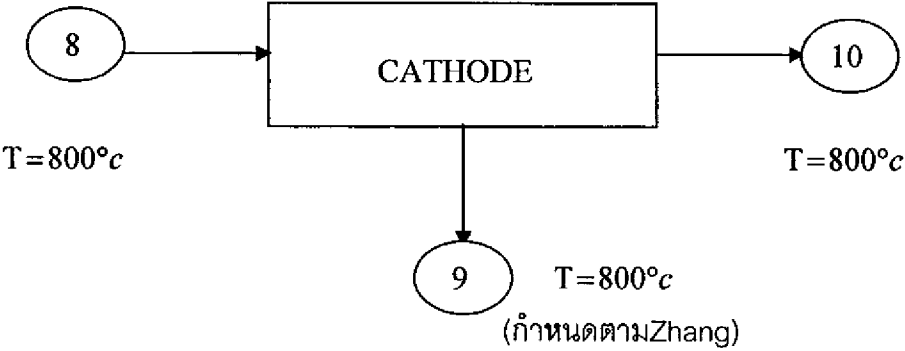
$$\begin{aligned}
 \Delta H_o &= -227537 - (11.579)(298) - \left(\frac{-10.7545 \times 10^{-3}}{2}\right)(298)^2 - \left(\frac{1.63945 \times 10^{-6}}{3}\right)(298)^3 \\
 &= -227537 - 3450.54 + 4773.52 - 14.46 \\
 &= -230524.48 \text{ Cal}
 \end{aligned}$$

หาค่า $\Delta H_{rxn,1183}$ จากสมการ

$$\begin{aligned}
 \Delta H_{rxn1183} &= \Delta H_o + \Delta\alpha T + \frac{\Delta\beta}{2} T^2 + \frac{\Delta\gamma}{3} T^3 \\
 &= -230524.48 + (11.579)(1183) + \left(\frac{-10.7545 \times 10^{-3}}{2}\right)(1183)^2 + \left(\frac{1.63945 \times 10^{-6}}{3}\right)(1183)^3 \\
 &= -230524.48 + 13697.96 - 7525.40 + 904.75 \\
 &= -223447.17 \text{ Cal}
 \end{aligned}$$



ตัวอย่างผลการคำนวณภายนอกที่แคโทด



การแยกองค์ประกอบของ O₂, N₂ โดยกำหนดให้แยกใน

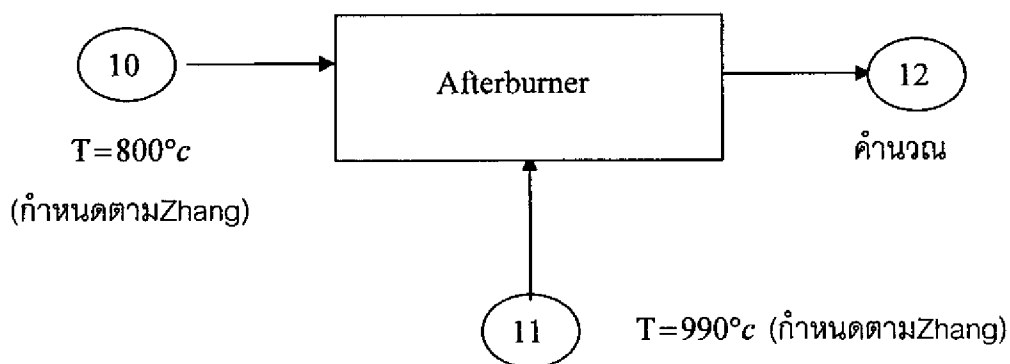
สาย 9 ; O₂ = 0.8

สาย 10 ; O₂ = 0.2, N₂ = 1.0

Mole flow (kmol/hr)

	8	9	10
O ₂	2.775	2.220	0.555
N ₂	10.440		10.440

ตัวอย่างผลการคำนวณภายนอกที่เตาปฏิกรณ์



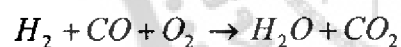
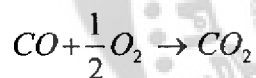
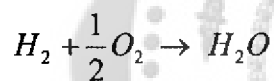
เลือกชนิด เตาปฏิกรณ์ แบบ tempering furnace Type FD-RT2-280-9

Rated power 280Kw

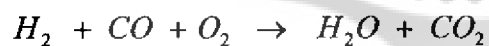
Temperature °c 950 °c

Rated Voltage (V) 380 V

สมการเคมีในเตาปฏิกรณ์



จาก Appendix G (ภาคผนวก ข)



$$+ \Delta H_f \quad 0 \quad 26416 \quad 0 \quad 57798 \quad 94052 \quad \text{Cal / g mole}$$

ดังนั้น

$$\Delta H_f = (+94052 + 57798) - (+26416)$$

$$\Delta H_{rxn(298)} = +125434 \text{ Cal / g mole}$$

คำนวณหาค่า ΔC_p จาก Appendix F (ภาคผนวก จ)

$$C_{PO_2} = 6.393 + 10.100 \times 10^{-3} T - 3.405 \times 10^{-6} T^2$$

$$C_{PH_2} = 6.424 + 1.039 \times 10^{-3} T - 0.078 \times 10^{-6} T^2$$

$$C_{PH_2O} = 6.970 + 3.464 \times 10^{-3} T - 0.483 \times 10^{-6} T^2$$

$$C_{P_{CH_4}} = 3.204 + 18.41 \times 10^{-3} T - 4.48 \times 10^{-6} T^2$$

$$C_{P_{CO}} = 6.480 + 1.5654 \times 10^{-3} T - 0.239 \times 10^{-6} T^2$$

$$C_{P_{O_2}} = 6.732 + 1.505 \times 10^{-3} T - 0.1791 \times 10^{-6} T^2$$

จะได้

$$\Delta\alpha = -6.273$$

$$\Delta\beta = 9.4546 \times 10^{-3}$$

$$\Delta\gamma = -3.3919 \times 10^{-6}$$

$$\Delta C_p = -6.273 + 9.4546 \times 10^{-3} T - 3.3919 \times 10^{-6} T^2$$

แทนค่า $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$ ลงในสมการ

$$\Delta H_P - \Delta H_R = \Delta\alpha(T - T_{ref}) + \frac{\Delta\beta}{2}(T^2 - T_{ref}^2) + \frac{\Delta\gamma}{3}(T^3 - T_{ref}^3)$$

จะได้ $\Delta H_P - \Delta H_R = 1479.47 - 6.273T + 4.7273 \times 10^{-3} T^2 - 1.1306 \times 10^{-6} T^3$

จากสมการ $Q = \Delta H_{rxn(298)} + \sum \Delta H_P - \sum \Delta H_R$

จะได้ $Q = +125434 + 1479.47 - 6.273T + 4.7273 \times 10^{-3} T^2 - 1.1306 \times 10^{-6} T^3$

จาก Power 280 kw = 0.0240917782 Gcal / hr

$$= 124,257.51 \text{ Cal / g mole}$$

แทนค่า Q ในสมการได้

$$124257.51 = 125434 + 1479.47 - 6.273T + 4.7273 \times 10^{-3} T^2 - 1.1306 \times 10^{-6} T^3$$

ทำการแก้สมการยกกำลังสามจะได้

$$T = 1277.49 \text{ K}$$

$$T = 1277.49 - 273 = 1004.49^\circ\text{C}$$

ตาราง 10 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR REFORMER	HEATEX2	CATHODE ANODE	AFTERBU	CATHODE ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	CATHODE	ANODE	AFTERBU	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2 KMOL/HR	0.02	0	0	0.02	0	0.02	0.54	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4 KMOL/HR	1.1	0	0	1.1	0	1.1	0.97	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O KMOL/HR	0	0	2	0	2	2	1.74	0	0	0	4.22	4.22	4.22	4.22	4.22
CO KMOL/HR	0.02	0	0	0.02	0	0.02	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2 KMOL/HR	0.8	0	0	0.8	0	0.8	0.92	0	0	0	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92
O2 KMOL/HR	0	2.78	0	0	0	0	0	2.78	2.22	0.56	0	0.56	0.56	0.56	0.56
N2 KMOL/HR	0.06	10.44	0	0.06	0	0.06	0.06	10.44	0	10.44	0.06	10.5	10.5	10.5	10.5
Mole Flow KMOL/HR	2	13.22	2	2	2	4	4.27	13.22	2.22	10.99	6.2	17.2	17.2	17.2	17.2
Mass Flow KG/HR	55.14	381.26	36.03	55.14	36.03	91.17	91.17	381.26	71.04	310.22	162.21	472.42	472.42	472.42	472.42
Volume Flow CUM/HR	45.91	303.32	0.04	143.68	101.8	254.74	227.07	1091.77	183.42	908.35	564.73	1684.69	1560.62	888.48	627.19
Temperature C	25	25	25	660	388.04	554.09	418.24	800	800	800	910	999.52	905.79	398.04	200.65
Pressure BAR	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy KJAL/MOL	-47.65	0	-68.23	-40.15	-54.71	-47.43	-44.53	5.77	6.03	5.72	-59.65	-16.46	-17.33	-21.76	-23.34
Mass Enthalpy KJAL/KG	-1728.4	0	-3787.57	-1456.41	-3036.99	-2081.08	-2083.51	200.02	188.54	202.65	-2279.92	-598.95	-630.69	-792.11	-849.35
Enthalpy FGCAL/HR	-0.1	0	-0.14	-0.08	-0.11	-0.19	-0.19	0.08	0.01	0.06	-0.37	-0.28	-0.3	-0.37	-0.4
Molar Enthalpy KJAL/MOL	-8.45	0.89	-38.86	4.36	-4.09	1.67	1.9	10.28	9.64	9.58	7.39	11.23	10.51	5.62	2.85
Mass Enthalpy KJAL/KG	-0.31	0.03	-2.16	0.16	-0.23	0.07	0.09	0.36	0.3	0.34	0.28	0.41	0.36	0.2	0.1
Molar Density KMOL/CUM	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density KG/CUM	1.2	1.26	993.96	0.38	0.35	0.36	0.4	0.35	0.39	0.34	0.29	0.28	0.3	0.53	0.75
Average Molecular Wt	27.57	28.85	18.02	27.57	18.02	22.79	21.37	28.85	32	28.21	26.16	27.47	27.47	27.47	27.47

ตาราง 11 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,500 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	ANODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.03	0	0	0.03	0	0.03	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	1.38	0	0	1.38	0	1.38	1.23	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.72	0	0	0	4.77	4.78	4.78	4.78	4.78
CO	0.03	0	0	0.03	0	0.03	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	1	0	0	1	0	1	1.13	0	0	0	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
O2	0	3.47	0	0	0	0	0	3.47	2.78	0.69	0	0.69	0.69	0.69	0.69
N2	0.07	13.05	0	0.07	0	0.07	0.07	13.05	0	13.05	0.07	13.13	13.13	13.13	13.13
Mole Flow KMOL/HR	2.5	16.52	2	2.5	2	4.5	4.79	16.52	2.78	13.74	7.25	21	21	21	21
Mass Flow KG/HR	68.92	476.61	36.03	68.92	36.03	104.95	104.95	476.61	88.81	387.8	193.76	581.56	581.56	581.56	581.56
Volume Flow CUM/HR	57.38	379.18	0.04	179.6	94.15	285.81	256.12	1364.82	229.29	1135.53	680.39	2011.35	1854.96	1004.47	749.04
Temperature C	25	25	25	650	338.32	551.86	420.97	800	800	800	910	971.27	874.52	348.32	190.28
Pressure BAR	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy KJ/KMOL	-47.65	0	-68.23	-40.15	-55.15	-46.82	-44	5.77	6.03	5.72	-60.33	-15.95	-16.84	-21.38	-22.63
Mass Enthalpy KJ/KG	-1728.4	0	-3787.57	-1456.41	-3861.22	-2007.36	-2009.48	200.02	188.54	202.66	-2257.6	-575.77	-608	-771.92	-816.93
Enthalpy Flow GCAL/HR	-0.12	0	-0.14	-0.1	-0.11	-0.21	-0.21	0.1	0.02	0.08	-0.44	-0.33	-0.35	-0.45	-0.48
Molar Enthalpy CAJ/KMOL	-3.45	0.89	-38.86	4.36	-4.77	1.89	2.09	10.28	9.64	9.58	7.75	11.16	10.42	5.16	2.84
Mass Enthalpy CAJ/KG	-0.31	0.03	-2.16	0.16	-0.26	0.08	0.1	0.36	0.3	0.34	0.29	0.4	0.38	0.19	0.1
Molar Density KMOL/CU	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density KG/CUM	1.2	1.26	993.96	0.38	0.38	0.37	0.41	0.35	0.39	0.34	0.29	0.29	0.31	0.58	0.78
Average Molecular Wt	27.57	28.85	18.02	27.57	18.02	23.32	21.9	28.85	32	28.21	26.72	27.7	27.7	27.7	27.7

ตาราง 12 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,000 โมลต่อชั่วโมง

From	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	HEATEX	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3		
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.03	0	0	0.03	0	0.03	0.66	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	1.65	0	0	1.65	0	1.55	1.49	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.7	0	0	0	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33
CO	0.03	0	0	0.03	0	0.03	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	1.2	0	0	1.2	0	1.2	1.34	0	0	0	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88
O2	0	4.16	0	0	0	0	0	4.16	3.33	0.83	0	0.83	0.83	0.83	0.83
N2	0.09	15.66	0	0.09	0	0.09	0.09	15.66	0	15.66	0.09	15.75	15.75	15.75	15.75
Mole Flow	3	19.82	2	3	2	5	5.33	19.82	3.33	16.49	8.3	24.79	24.79	24.79	24.79
Mass Flow	82.7	571.9	36.03	82.7	36.03	118.73	118.73	571.9	106.56	465.34	225.3	690.64	690.64	690.64	690.64
Volume Flow	68.86	455	0.04	215.51	88.76	318.61	286.24	1637.7	275.13	1362.56	756.02	2337.49	2148.73	1119.42	868.1
Temperature	25	25	25	650	303.34	554.59	425	800	800	800	910	951.51	852.62	313.34	181.67
Pressure	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	-47.65	0	-68.23	-40.15	-55.45	-46.27	-43.48	5.77	6.03	5.72	-60.85	-15.6	-16.51	-21.12	-22.15
Mass Enthalpy	-1728.4	0	-3787.57	-1455.41	-3078.04	-1948.5	-1950.38	200.02	188.54	202.65	-2241.64	-559.98	-592.55	-758.18	-795.2
Enthalpy Flow	-0.14	0	-0.14	-0.12	-0.11	-0.23	-0.23	0.11	0.02	0.09	-0.51	-0.39	-0.41	-0.52	-0.55
Molar Entropy	-8.45	0.89	-38.86	4.36	-5.28	2.11	2.3	10.28	9.64	9.58	8.01	11.11	10.34	4.8	2.81
Mass Entropy	-0.31	0.03	-2.16	0.16	-0.29	0.09	0.1	0.36	0.3	0.34	0.3	0.4	0.37	0.17	0.1
Molar Density	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density	1.2	1.26	993.96	0.38	0.41	0.37	0.41	0.35	0.39	0.34	0.3	0.3	0.32	0.62	0.8
Average Molecular Weight	27.57	28.85	18.02	27.57	18.02	23.75	22.29	28.85	32	28.21	27.14	27.86	27.86	27.86	27.86

ตาราง 13 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,500 โมลต่อชั่วโมง

From	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	HEATEX3
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.72	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	1.93	0	0	1.93	0	1.93	1.74	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.68	0	0	0	5.88	5.88	5.88	5.88	5.88
CO	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	1.4	0	0	1.4	0	1.4	1.54	0	0	0	3.36	3.36	3.36	3.36	3.36
O2	0	4.86	0	0	0	0	0	4.86	3.89	0.97	0	0.97	0.97	0.97	0.97
N2	0.11	18.27	0	0.11	0	0.11	0.11	18.27	0	18.27	0.11	18.38	18.38	18.38	18.38
Mole Flow	3.5	23.13	2	3.5	2	5.5	5.86	23.13	3.89	19.24	9.35	28.59	28.59	28.59	28.59
Mass Flow	96.49	667.22	36.03	96.49	36.03	132.52	132.52	667.22	124.33	542.9	256.85	799.74	799.74	799.74	799.74
Volume Flow	80.34	530.83	0.04	251.43	84.76	352.4	316.94	1910.66	320.99	1589.67	851.67	2663.49	2442.33	1233.78	985.52
Temperature	25	25	25	660	277.37	559.13	429.21	800	800	800	910	936.9	836.43	287.37	174.58
Pressure	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	-47.65	0	-68.23	-40.15	-55.67	-45.8	-43.01	5.77	6.03	5.72	-51.24	-15.34	-15.26	-20.93	-21.81
Mass Enthalpy	-1728.4	0	-3787.57	-1456.41	-3090.41	-1900.68	-1902.36	200.02	188.54	202.65	-2229.56	-548.47	-581.28	-748.16	-779.57
Enthalpy Flow	-0.17	0	-0.14	-0.14	-0.11	-0.25	-0.25	0.13	0.02	0.11	-0.57	-0.44	-0.46	-0.6	-0.62
Molar Enthalpy	-8.45	0.89	-38.86	4.36	-5.66	2.31	2.5	10.28	9.64	9.58	8.21	11.07	10.28	4.52	2.77
Mass Enthalpy	-0.31	0.03	-2.16	0.16	-0.32	0.1	0.11	0.36	0.3	0.34	0.3	0.4	0.37	0.16	0.1
Molar Density	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density	1.2	1.26	993.96	0.38	0.43	0.38	0.42	0.35	0.39	0.34	0.3	0.3	0.33	0.65	0.81
Average Molecular Weight	27.57	28.85	18.02	27.57	18.02	24.09	22.61	28.85	32	28.21	27.47	27.97	27.97	27.97	27.97

ตาราง 14 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 4,000 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	CATHODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	ANODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.79	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	2.2	0	0	2.2	0	2.2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.65	0	0	0	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44
CO	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	1.6	0	0	1.6	0	1.6	1.75	0	0	0	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84
O2	0	5.55	0	0	0	0	0	5.55	4.44	1.11	0	1.11	1.11	1.11	1.11
N2	0.12	20.88	0	0.12	0	0.12	0.12	20.88	0	20.88	0.12	21	21	21	21
Mole Flow	4	26.43	2	4	2	6	6.4	26.43	4.44	21.99	10.4	32.39	32.39	32.39	32.39
Mass Flow	110.27	762.54	36.03	110.27	36.03	146.3	145.3	762.54	142.09	520.46	288.39	908.85	908.85	908.85	908.85
Volume Flow	91.81	606.67	0.04	287.35	81.68	386.79	347.97	2183.62	356.85	1816.77	947.31	2989.36	2735.77	1347.74	1101.84
Temperature	25	25	25	660	257.33	564.22	433.2	800	800	800	910	925.66	823.96	267.33	168.72
Pressure	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	-47.65	0	-68.23	-40.15	-55.85	-45.38	-42.59	5.77	6.03	5.72	-61.56	-15.14	-16.07	-20.78	-21.54
Mass Enthalpy	-1728.4	0	-3787.57	-1455.41	-3099.89	-1861.16	-1862.68	200.02	188.54	202.65	-2220.11	-539.72	-572.72	-740.54	-767.81
Enthalpy Flow	-0.19	0	-0.14	-0.16	-0.11	-0.27	-0.27	0.15	0.03	0.13	-0.64	-0.49	-0.52	-0.67	-0.7
Molar Entropy	-8.45	0.89	-38.86	4.36	-5.99	2.49	2.67	10.28	9.64	9.58	8.37	11.04	10.24	4.3	2.73
Mass Entropy	-0.31	0.03	-2.16	0.16	-0.33	0.1	0.12	0.36	0.3	0.34	0.3	0.39	0.36	0.15	0.1
Molar Density	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density	1.2	1.26	993.96	0.38	0.44	0.38	0.42	0.35	0.39	0.34	0.3	0.3	0.33	0.67	0.82
Average Molecular Weight	27.57	28.85	18.02	27.57	18.02	24.38	22.86	28.85	32	28.21	27.73	28.06	28.06	28.06	28.06

ตาราง 15 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง

From	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	
Component Mole Flow															
H2	0.02	0	0	0.02	0	0.02	0.54	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	1.2	0	0	1.2	0	1.2	1.07	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.74	0	0	0	4.42	4.42	4.42	4.42	4.42
CO	0.02	0	0	0.02	0	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0.7	0	0	0.7	0	0.7	0.83	0	0	0	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92
O2	0	3.03	0	0	0	0	0	3.03	2.42	0.61	0	0.61	0.61	0.61	0.61
N2	0.05	11.38	0	0.05	0	0.05	0.05	11.38	0	11.38	0.06	11.44	11.44	11.44	11.44
Mole Flow KMOL/HR	2	14.4	2	2	2	4	4.26	14.4	2.42	11.98	6.4	18.39	18.39	18.39	18.39
Mass Flow KG/HR	52.34	415.59	36.03	52.34	36.03	88.37	88.37	415.59	77.44	338.15	165.81	503.96	503.96	503.96	503.96
Volume Flow CUM/HR	45.91	330.64	0.04	143.68	98.78	252.7	225.5	1190.08	199.93	990.15	582.94	1786.6	1660.88	922.18	662.18
Temperature C	25	25	25	660	368.4	547.46	413.79	800	800	800	910	999.14	900.32	378.4	194.7
Pressure BAR	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy KCAL/MOL	-43.84	0	-68.23	-36.29	-54.89	-45.59	-42.82	5.77	6.03	5.72	-69.34	-15.62	-16.44	-20.97	-22.42
Mass Enthalpy KCAL/KG	-1675.18	0	-3787.57	-1385.87	-3046.61	-2063.59	-2066.11	200.02	188.54	202.65	-2290.35	-569.95	-599.9	-764.84	-817.82
Enthalpy Flow GCAL/HR	-0.09	0	-0.14	-0.07	-0.11	-0.18	-0.18	0.08	0.01	0.07	-0.38	-0.29	-0.3	-0.39	-0.41
Molar Entropy CAL/MOL	-9.49	0.89	-38.86	3.38	-4.35	1.08	1.34	10.28	9.64	9.58	7.23	11.11	10.44	5.37	2.76
Mass Entropy CAL/GMHK	-0.36	0.03	-2.16	0.13	-0.24	0.05	0.06	0.36	0.3	0.34	0.28	0.41	0.38	0.2	0.1
Molar Density KMOL/CU	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density KG/CUM	1.14	1.26	993.95	0.36	0.35	0.35	0.39	0.35	0.39	0.34	0.28	0.28	0.3	0.55	0.76
Average Molecular Wt	26.17	28.85	18.02	26.17	18.02	22.09	20.72	28.85	32	28.21	25.91	27.41	27.41	27.41	27.41

ตาราง 16 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,500 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	ANODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.03	0	0	0.03	0	0.03	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	1.5	0	0	1.5	0	1.5	1.35	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.72	0	0	0	5.02	5.03	5.03	5.03	5.03
CO	0.03	0	0	0.03	0	0.03	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0.88	0	0	0.88	0	0.88	1.01	0	0	0	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
O2	0	3.78	0	0	0	0	0	3.78	3.03	0.76	0	0.76	0.76	0.76	0.76
N2	0.07	14.23	0	0.07	0	0.07	0.07	14.23	0	14.23	0.07	14.3	14.3	14.3	14.3
Mole Flow/KMOL/HR	2.5	18.01	2	2.5	2	4.5	4.79	18.01	3.03	14.98	7.5	22.48	22.48	22.48	22.48
Mass Flow/KG/HR	55.42	519.54	36.03	55.42	36.03	101.45	101.45	519.54	96.81	422.73	198.26	620.99	620.99	620.99	620.99
Volume Flow/CUM/HR	57.38	413.34	0.04	179.6	91.49	284.18	254.85	1487.75	249.94	1237.81	683.16	2138.39	1979.99	1045.74	791.35
Temperature/C	25	25	25	660	321.03	547.15	417.44	800	800	800	910	962.31	870.79	331.03	184.05
Pressure/BAR	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy/KCAL/MOL	-43.84	0	-58.23	-36.29	-55.3	-44.74	-42.05	5.77	6.03	5.72	-59.98	-15.13	-15.97	-20.59	-21.74
Mass Enthalpy/KCAL/KG	-1675.18	0	-3787.57	-1386.87	-3069.56	-1984.46	-1986.66	200.02	168.54	202.65	-2268.98	-547.81	-578.19	-745.53	-787.19
Enthalpy Flow/KCAL/HR	-0.11	0	-0.14	-0.09	-0.11	-0.2	-0.2	0.1	0.02	0.09	-0.45	-0.34	-0.35	-0.46	-0.49
Molar Entropy/KCAL/MOL	-9.49	0.89	-38.86	3.38	-5.02	1.26	1.51	10.28	9.64	9.58	7.56	11.05	10.34	4.92	2.74
Mass Entropy/KCAL/KG	-0.36	0.03	-2.16	0.13	-0.28	0.05	0.07	0.36	0.3	0.34	0.29	0.4	0.37	0.18	0.1
Molar Density/KMOL/CUM	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density/KG/CUM	1.14	1.26	993.96	0.36	0.39	0.36	0.4	0.35	0.39	0.34	0.29	0.29	0.31	0.59	0.78
Average Molecular Weight	26.17	28.85	18.02	26.17	18.02	22.55	21.16	28.85	32	28.21	26.43	27.62	27.62	27.62	27.62

ตาราง 17 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,000 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	ANODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.03	0	0	0.03	0	0.03	0.67	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	1.8	0	0	1.8	0	1.8	1.64	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.69	0	0	0	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63
CO	0.03	0	0	0.03	0	0.03	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	1.05	0	0	1.05	0	1.05	1.2	0	0	0	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88
O2	0	4.54	0	0	0	0	0	4.54	3.63	0.91	0	0.91	0.91	0.91	0.91
N2	0.09	17.07	0	0.09	0	0.09	0.09	17.07	0	17.07	0.09	17.16	17.16	17.16	17.16
Mole Flow/KMOL/HR	3	21.61	2	3	2	5	5.33	21.61	3.63	17.98	8.6	26.58	26.58	26.58	26.58
Mass Flow/KG/HR	78.51	623.46	36.03	78.51	36.03	114.54	114.54	623.46	116.17	507.29	230.71	738	738	738	738
Volume Flow/L/HR	88.86	496.01	0.04	215.51	86.37	317.28	285.22	1785.33	299.94	1485.4	783.37	2489.75	2298.61	1168.32	917.85
Temperature C	25	25	25	660	287.81	551.11	422.14	800	800	800	910	943.59	850.18	297.81	175.4
Pressure BAR	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy/KCAL/MOL	-43.84	0	-58.23	-36.29	-55.59	-44.01	-41.34	5.77	6.03	5.72	-60.46	-14.79	-15.64	-20.33	-21.29
Mass Enthalpy/KCAL/KG	-1675.18	0	-3787.57	-1386.87	-3085.45	-1921.19	-1923.13	208.02	188.54	202.65	-2253.67	-532.72	-563.39	-732.37	-766.65
Enthalpy Flow/KCAL/HR	-0.13	0	-0.14	-0.11	-0.11	-0.22	-0.22	0.12	0.02	0.1	-0.52	-0.39	-0.42	-0.54	-0.57
Molar Enthalpy/KCAL/MOL	-9.49	0.89	-38.86	3.38	-5.52	1.46	1.69	10.28	9.64	9.58	7.81	11	10.27	4.57	2.69
Mass Enthalpy/KCAL/KG	-0.36	0.03	-2.16	0.13	-0.31	0.06	0.08	0.36	0.3	0.34	0.29	0.4	0.37	0.16	0.1
Molar Density/KMOL/CU	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density/KG/CUM	1.14	1.26	993.96	0.36	0.42	0.36	0.4	0.35	0.39	0.34	0.29	0.3	0.32	0.63	0.8
Average Molecular Weight	26.17	28.85	18.02	26.17	18.02	22.91	21.5	28.85	32	28.21	26.83	27.77	27.77	27.77	27.77

ตาราง 18 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,5000 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	CATHODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	ANODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	
Component Mole Flow															
H2	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.74	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	2.1	0	0	2.1	0	2.1	1.92	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.66	0	0	0	6.23	6.24	6.24	6.24	6.24
CO	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	1.23	0	0	1.23	0	1.23	1.38	0	0	0	3.36	3.36	3.36	3.36	3.36
O2	0	5.29	0	0	0	0	0	5.29	4.24	1.06	0	1.06	1.06	1.06	1.06
N2	0.11	19.92	0	0.11	0	0.11	0.11	19.92	0	19.92	0.11	20.02	20.02	20.02	20.02
Mole Flow KMOL/HR	3.5	25.21	2	3.5	2	5.5	5.87	25.21	4.24	20.97	9.7	30.68	30.68	30.68	30.68
Mass Flow KG/HR	91.59	727.32	36.03	91.59	36.03	127.62	127.62	727.32	435.52	591.79	263.15	854.94	854.94	854.94	854.94
Volume FICUM/HR	80.34	578.64	0.04	251.43	82.59	351.29	316.13	2082.75	349.9	1732.85	883.54	2840.73	2616.83	1290.27	1042.72
Temperature C	25	25	25	660	263.23	556.51	426.86	800	800	800	910	929.79	834.97	273.23	168.4
Pressure BAR	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy KJ/KG	-43.84	0	-68.23	-36.29	-55.8	-43.39	-40.71	5.77	6.03	5.72	-60.83	-14.54	-15.4	-20.15	-20.96
Mass Enthalpy KJ/KG	-1675.18	0	-3787.57	-1386.87	-3097.1	-1869.7	-1871.44	200.02	188.54	202.65	-2242.24	-521.81	-562.7	-722.86	-751.96
Enthalpy FICUM/HR	-0.15	0	-0.14	-0.13	-0.11	-0.24	-0.24	0.15	0.03	0.12	-0.59	-0.45	-0.47	-0.62	-0.64
Molar Enthalpy KJ/MOL	-9.49	0.89	-38.86	3.38	-5.9	1.64	1.87	10.28	9.64	9.58	8	10.96	10.22	4.3	2.65
Mass Enthalpy KJ/GM-M	-0.36	0.03	-2.16	0.13	-0.33	0.07	0.09	0.36	0.3	0.34	0.29	0.39	0.37	0.15	0.1
Molar Density KMOL/CU	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density KG/CUM	1.14	1.26	993.96	0.36	0.44	0.36	0.4	0.35	0.39	0.34	0.3	0.3	0.33	0.66	0.82
Average Molecular Weight	26.17	28.85	18.02	26.17	18.02	23.2	21.76	28.85	32	28.21	27.13	27.87	27.87	27.87	27.87

ตาราง 19 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 4,000 โมลต่อชั่วโมง

From	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	ANODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.81	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	2.4	0	0	2.4	0	2.4	2.2	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.64	0	0	0	6.84	6.84	6.84	6.84	6.84
CO	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	1.4	0	0	1.4	0	1.4	1.56	0	0	0	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84
O2	0	6.05	0	0	0	0	0	6.05	4.84	1.21	0	1.21	1.21	1.21	1.21
N2	0.12	22.76	0	0.12	0	0.12	0.12	22.76	0	22.76	0.12	22.88	22.88	22.88	22.88
Mole Flow	4	28.81	2	4	2	6	6.41	28.81	4.84	23.97	10.8	34.77	34.77	34.77	34.77
Mass Flow	104.68	831.18	35.03	104.68	36.03	140.71	140.71	831.18	154.88	676.3	295.59	971.89	971.89	971.89	971.89
Volume Flow	91.81	661.27	0.04	287.35	79.67	385.85	347.34	2380.17	399.87	1980.3	983.72	3191.59	2934.9	1411.84	1166.55
Temperature	25	25	25	660	244.3	562.2	431.24	800	800	800	910	919.19	823.29	254.3	162.66
Pressure	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	-43.84	0	-58.23	-36.29	-55.96	-42.85	-40.17	5.77	6.03	5.72	-61.12	-14.35	-15.22	-20	-20.71
Mass Enthalpy	-1675.18	0	-3787.57	-1386.87	-3106.02	-1827.08	-1828.66	200.02	188.54	202.65	-2233.32	-513.52	-544.57	-715.64	-740.9
Enthalpy Flow	-0.18	0	-0.14	-0.15	-0.11	-0.26	-0.26	0.17	0.03	0.14	-0.66	-0.5	-0.53	-0.7	-0.72
Molar Enthalpy	-9.49	0.89	-38.85	3.38	-6.2	1.8	2.03	10.28	9.64	9.58	8.15	10.93	10.17	4.08	2.61
Mass Enthalpy	-0.36	0.03	-2.16	0.13	-0.34	0.08	0.09	0.36	0.3	0.34	0.3	0.39	0.36	0.15	0.09
Molar Density	0.04	0.04	55.17	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density	1.14	1.26	993.96	0.36	0.45	0.36	0.41	0.35	0.39	0.34	0.3	0.3	0.33	0.69	0.83
Average Molecular Weight	26.17	28.85	18.02	26.17	18.02	23.45	21.97	28.65	32	28.21	27.37	27.95	27.95	27.95	27.95

ตาราง 20 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง

From	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3		
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.02	0	0	0.02	0	0.02	0.55	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	1.3	0	0	1.3	0	1.3	1.17	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.74	0	0	0	4.62	4.62	4.62	4.62	4.62
CO	0.02	0	0	0.02	0	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0.6	0	0	0.6	0	0.6	0.73	0	0	0	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92
O2	0	3.28	0	0	0	0	0	3.28	2.62	0.66	0	0.66	0.66	0.66	0.66
N2	0.06	12.32	0	0.06	0	0.06	0.06	12.32	0	12.32	0.06	12.32	12.32	12.32	12.32
Mole Flow KMOL/HR	2	15.6	2	2	2	4	4.26	15.6	2.62	12.98	6.6	19.58	19.58	19.58	19.58
Mass Flow KG/HR	49.54	450.01	36.03	49.54	36.03	85.57	85.57	450.01	83.85	366.16	169.43	535.58	535.58	535.58	535.58
Volume Flow LIT/HR	45.91	358.02	0.04	143.68	96.08	250.93	224.09	1288.64	216.49	1072.15	601.2	1888.58	1761.31	955.39	696.78
Temperature C	25	25	25	660	350.86	541.73	409.61	800	800	800	910	979.89	895.45	360.86	189.15
Pressure BAR	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy KJ/KMOL	-40.03	0	-68.23	-32.44	-55.04	-43.74	-41.09	5.77	6.03	5.72	-59.04	-14.89	-15.66	-20.26	-21.61
Mass Enthalpy KJ/KG	-1615.96	0	-3787.57	-1399.49	-3055.15	-2044.49	-2047.1	200.02	188.54	202.65	-2300.11	-544.26	-572.61	-740.67	-789.94
Enthalpy Flow KJ/HR	-0.08	0	-0.14	-0.06	-0.11	-0.17	-0.18	0.09	0.02	0.07	-0.39	-0.29	-0.31	-0.4	-0.42
Molar Entropy CAL/MOL	-10.55	0.89	-38.86	2.38	-4.6	0.48	0.78	10.28	9.64	9.58	7.08	11.01	10.37	5.15	2.67
Mass Entropy CAL/KG	-0.43	0.03	-2.16	0.1	-0.26	0.02	0.04	0.36	0.3	0.34	0.28	0.4	0.36	0.19	0.1
Molar Density KMOL/CU	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density KG/CUM	1.08	1.26	993.96	0.34	0.38	0.34	0.38	0.35	0.39	0.34	0.28	0.28	0.3	0.56	0.77
Average Molecular Weight	24.77	28.85	18.02	24.77	18.02	21.39	20.07	28.65	32	28.21	25.67	27.36	27.36	27.36	27.36

ตาราง 21 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,500 โมลต่อชั่วโมง

From	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.03	0	0	0.03	0	0.03	0.61	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	1.63	0	0	1.63	0	1.63	1.48	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.71	0	0	0	5.27	5.28	5.28	5.28	5.28
CO	0.03	0	0	0.03	0	0.03	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0.75	0	0	0.75	0	0.75	0.89	0	0	0	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
O2	0	4.09	0	0	0	0	0	4.09	3.28	0.82	0	0.82	0.82	0.82	0.82
N2	0.07	15.4	0	0.07	0	0.07	0.07	15.4	0	15.4	0.07	15.48	15.48	15.48	15.48
Mole Flow	2.5	19.5	2	2.5	2	4.5	4.8	19.5	3.28	16.22	7.76	23.97	23.97	23.97	23.97
Mass Flow	61.93	562.44	36.03	61.93	36.03	97.96	97.96	562.44	104.8	457.64	202.76	660.4	660.4	660.4	660.4
Volume Flow	57.38	447.47	0.04	179.6	89.13	282.79	253.72	1510.6	270.58	1340.02	705.92	2265.17	2104.87	1086.62	833.18
Temperature	25	25	25	660	305.7	543.15	414.11	800	800	800	910	954.37	867.5	315.7	178.36
Pressure	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	-40.03	0	-68.23	-32.44	-55.43	-42.68	-40.08	5.77	6.03	5.72	-59.65	-14.42	-15.21	-19.9	-20.97
Mass Enthalpy	-1615.96	0	-3787.57	-1309.49	-3076.91	-1959.57	-1961.84	200.02	188.54	202.65	-2279.92	-523.23	-551.97	-722.32	-761.09
Enthalpy	-0.1	0	-0.14	-0.08	-0.11	-0.19	-0.19	0.11	0.02	0.09	-0.46	-0.35	-0.35	-0.48	-0.5
Molar Entropy	-10.55	0.89	-38.86	2.38	-5.25	0.64	0.92	10.28	9.64	9.58	7.39	10.95	10.28	4.7	2.63
Mass Entropy	-0.43	0.03	-2.16	0.1	-0.29	0.03	0.05	0.36	0.3	0.34	0.28	0.4	0.37	0.17	0.1
Molar Density	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density	1.08	1.26	993.96	0.34	0.4	0.36	0.39	0.35	0.39	0.34	0.29	0.29	0.31	0.61	0.79
Average Molecular Weight	24.77	28.85	18.02	24.77	18.02	21.77	20.43	26.85	32	28.21	26.16	27.55	27.55	27.55	27.55

ตาราง 22 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,000 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	ANODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
Substream: MIXED															
Phase	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.03	0	0	0.03	0	0.03	0.68	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	1.95	0	0	1.95	0	1.95	1.78	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.68	0	0	0	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93
CO	0.03	0	0	0.03	0	0.03	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0.9	0	0	0.9	0	0.9	1.05	0	0	0	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88
O2	0	4.91	0	0	0	0	0	4.91	3.93	0.98	0	0.98	0.98	0.98	0.98
N2	0.09	18.48	0	0.09	0	0.09	0.09	18.48	0	18.48	0.09	18.57	18.57	18.57	18.57
Mole Flow KMOL/HR	3	23.4	2	3	2	5	5.33	23.4	3.93	19.46	8.9	28.36	28.36	28.36	28.36
Mass Flow KG/HR	74.31	674.96	36.03	74.31	36.03	110.34	110.34	674.96	125.77	549.19	236.11	785.3	785.3	785.3	785.3
Volume FICUM/HR	68.86	536.98	0.04	215.51	84.26	316.16	284.3	1932.8	324.71	1608.09	810.68	2641.67	2448.28	1216.81	967.14
Temperature C	25	25	25	660	274.08	548.21	419.41	800	800	800	910	936.59	848.03	284.08	169.75
Pressure BAR	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar EnthKCAL/MOL	-40.03	0	-58.23	-32.44	-55.7	-41.74	-39.18	5.77	6.03	5.72	-60.09	-14.09	-14.89	-19.65	-20.53
Mass EnthKCAL/KG	-1615.96	0	-3787.57	-1309.49	-3091.97	-1891.52	-1893.52	200.02	188.54	202.65	-2265.26	-508.8	-537.6	-709.72	-741.64
Enthalpy FGCAL/HR	-0.12	0	-0.14	-0.1	-0.11	-0.21	-0.21	0.14	0.02	0.11	-0.53	-0.4	-0.42	-0.56	-0.58
Molar EntrCAL/MOL	-10.55	0.89	-38.86	2.38	-5.73	0.8	1.08	10.28	9.64	9.58	7.62	10.9	10.21	4.36	2.58
Mass EntrCAL/GMHK	-0.43	0.03	-2.16	0.1	-0.32	0.04	0.05	0.36	0.3	0.34	0.29	0.39	0.37	0.16	0.09
Molar DeniKMOL/CUI	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass DeniKG/CUM	1.08	1.26	993.96	0.34	0.43	0.35	0.39	0.35	0.39	0.34	0.29	0.3	0.32	0.65	0.81
Average Molecular Wt	24.77	28.85	18.02	24.77	18.02	22.07	20.69	28.85	32	28.21	26.53	27.69	27.69	27.69	27.69

ตาราง 23 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,500 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3 EJECTOR	HEATEX3 EJECTOR REFORMER	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX3
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	HEATEX3 EJECTOR	HEATEX3 EJECTOR REFORMER	HEATEX3 EJECTOR REFORMER	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX2 CATHODE ANODE	HEATEX3
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.76	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	2.27	0	0	2.27	0	2.27	2.09	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.65	0	0	0	6.58	6.59	6.59	6.59	6.59
CO	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	1.05	0	0	1.05	0	1.05	1.21	0	0	0	3.36	3.36	3.36	3.36	3.36
O2	0	5.73	0	0	0	0	0	5.73	4.59	1.15	0	1.15	1.15	1.15	1.15
N2	0.11	21.56	0	0.11	0	0.11	0.11	21.56	0	21.56	0.11	21.56	21.56	21.56	21.56
Mole Flow	3.5	27.29	2	3.5	2	5.5	5.87	27.29	4.59	22.71	10.05	32.76	32.76	32.76	32.76
Mass Flow	86.7	787.38	35.03	86.7	36.03	122.73	122.73	787.38	146.72	640.67	269.45	910.12	910.12	910.12	910.12
Volume Flow	80.34	626.43	0.04	251.43	80.66	350.38	315.41	2254.76	378.8	1875.96	915.4	3017.72	2791.23	1346.37	1099.49
Temperature	25	25	25	660	250.75	554.35	424.6	800	800	800	910	923.51	833.7	260.75	162.85
Pressure	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	-40.03	0	-68.23	-32.44	-55.9	-40.97	-38.41	5.77	6.03	5.72	-60.44	-13.85	-14.66	-19.47	-20.22
Mass Enthalpy	-1615.96	0	-3787.57	-1309.49	-3102.99	-1836.01	-1837.81	200.02	188.54	202.65	-2254.38	-498.4	-527.6	-700.65	-727.75
Enthalpy	-0.14	0	-0.14	-0.11	-0.11	-0.23	-0.23	0.16	0.03	0.13	-0.61	-0.45	-0.48	-0.64	-0.66
Molar Enthalpy	-10.55	0.89	-38.86	2.38	-5.1	0.95	1.24	10.28	9.64	9.58	7.8	10.86	10.16	4.09	2.54
Mass Enthalpy	-0.43	0.03	-2.16	0.1	-0.34	0.04	0.06	0.36	0.3	0.34	0.29	0.39	0.37	0.15	0.09
Molar Density	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density	1.08	1.26	993.96	0.34	0.45	0.35	0.39	0.35	0.39	0.34	0.29	0.3	0.33	0.68	0.83
Average Molecular Weight	24.77	28.85	18.02	24.77	18.02	22.31	20.9	28.85	32	28.21	26.81	27.78	27.78	27.78	27.78

ตาราง 24 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 4,000 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR REFORM	HEATEX2 REFORM	HEATEX2 CATHODE	CATHODE ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3		
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORM	ANODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3		
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.83	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	2.6	0	0	2.6	0	2.6	2.39	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.62	0	0	0	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24
CO	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	1.2	0	0	1.2	0	1.2	1.37	0	0	0	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84
O2	0	6.55	0	0	0	0	0	6.55	5.24	1.31	0	1.31	1.31	1.31	1.31
N2	0.12	24.64	0	0.12	0	0.12	0.12	24.64	0	24.64	0.12	24.76	24.76	24.76	24.76
Mole Flow KMOL/HR	4	31.19	2	4	2	6	6.41	31.19	5.24	25.95	11.2	37.15	37.15	37.15	37.15
Mass Flow KG/HR	99.09	899.93	36.03	99.09	36.03	135.12	135.12	899.93	167.69	732.24	302.8	1035.05	1035.05	1035.05	1035.05
Volume Flow CUM/HR	91.81	745.97	0.04	287.35	77.9	385.09	346.81	2577.04	432.94	2144.1	1020.18	3393.97	3134.33	1475.66	1230.93
Temperature C	25	25	25	660	232.78	560.55	429.36	800	800	800	910	913.47	822.69	242.78	157.21
Pressure BAR	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy KCAL/MOL	-40.03	0	-68.23	-32.44	-56.05	-40.31	-37.75	5.77	6.03	5.72	-60.71	-13.66	-14.48	-19.33	-19.98
Mass Enthalpy KCAL/KG	-1515.96	0	-3787.57	-1309.49	-3111.42	-1789.99	-1791.63	200.02	188.54	202.65	-2245.72	-490.44	-519.78	-693.68	-717.22
Enthalpy Flow GCAL/HR	-0.16	0	-0.14	-0.13	-0.11	-0.24	-0.24	0.18	0.03	0.15	-0.68	-0.51	-0.54	-0.72	-0.74
Molar Enthalpy CAL/MOL	-10.55	0.89	-38.86	2.38	-6.4	1.09	1.37	10.28	9.64	9.58	7.94	10.83	10.12	3.88	2.49
Mass Enthalpy CAL/KG	-0.43	0.03	-2.16	0.1	-0.35	0.05	0.07	0.36	0.3	0.34	0.29	0.39	0.36	0.14	0.09
Molar Density KMOL/CUM	0.04	0.04	55.17	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03
Mass Density KG/CUM	1.08	1.26	993.96	0.34	0.46	0.35	0.39	0.35	0.39	0.34	0.3	0.3	0.33	0.7	0.84
Average Molecular Weight	24.77	28.85	18.02	24.77	18.02	22.52	21.07	28.85	32	28.21	27.03	27.86	27.86	27.86	27.86

ตาราง 25 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 70 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	CATHODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	CATHODE	CATHODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3		
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.02	0	0	0.02	0	0.02	0.55	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	1.4	0	0	1.4	0	1.4	1.27	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.73	0	0	0	4.82	4.82	4.82	4.82	4.82
CO	0.02	0	0	0.02	0	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0.5	0	0	0.5	0	0.5	0.63	0	0	0	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92
O2	0	3.53	0	0	0	0	0	3.53	2.82	0.71	0	0.71	0.71	0.71	0.71
N2	0.06	13.26	0	0.06	0	0.06	0.06	13.26	0	13.26	0.06	13.32	13.32	13.32	13.32
Mole Flow	2	16.79	2	2	2	4	4.26	16.79	2.82	13.97	6.8	20.77	20.77	20.77	20.77
Mass Flow	46.75	484.31	36.03	46.75	36.03	82.78	82.78	484.31	90.24	394.07	173.02	567.09	567.09	567.09	567.09
Volume Flow	45.91	385.31	0.04	143.68	93.67	249.41	222.8	1386.87	232.99	1153.88	649.39	1990.09	1861.34	988.58	730.87
Temperature	25	25	25	680	335.2	536.79	405.6	800	800	800	910	971.64	891.11	345.2	184.01
Pressure	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	-36.22	0	-68.23	-28.58	-55.18	-41.88	-39.34	5.77	6.03	5.72	-58.77	-14.24	-14.98	-19.64	-20.9
Mass Enthalpy	-1549.66	0	-3787.57	-1222.84	-3062.73	-2023.69	-2026.39	200.02	188.54	202.65	-2309.76	-521.57	-548.51	-719.34	-765.39
Enthalpy Flow	-0.07	0	-0.14	-0.06	-0.11	-0.17	-0.17	0.1	0.02	0.08	-0.4	-0.3	-0.31	-0.41	-0.43
Molar Entropy	-11.64	0.89	-38.86	1.35	-4.82	-0.11	0.23	10.28	9.64	9.58	6.93	10.92	10.31	4.94	2.59
Mass Entropy	-0.5	0.03	-2.16	0.06	-0.27	-0.01	0.01	0.36	0.3	0.34	0.27	0.4	0.38	0.18	0.09
Molar Density	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density	1.02	1.26	993.96	0.33	0.38	0.33	0.37	0.35	0.39	0.34	0.28	0.28	0.3	0.57	0.78
Average Molecular Weight	23.37	28.85	18.02	23.37	18.02	20.69	19.41	28.85	32	28.21	25.44	27.31	27.31	27.31	27.31

ตาราง 26 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 70 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,500 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	CATHODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX2	HEATEX3
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	ANODE	ANODE	ANODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX2	HEATEX3
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	KMOL/HR	0.03	0	0.03	0	0.03	0.62	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	KMOL/HR	1.75	0	1.75	0	1.75	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	KMOL/HR	0	0	2	0	2	1.7	0	0	0	5.52	5.53	5.53	5.53	5.53
CO	KMOL/HR	0.03	0	0.03	0	0.03	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	KMOL/HR	0.63	0	0.63	0	0.63	0.77	0	0	0	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
O2	KMOL/HR	0	4.41	0	0	0	0	4.41	3.53	0.68	0	0.88	0.88	0.88	0.88
N2	KMOL/HR	0.07	16.58	0	0.07	0	0.07	16.58	0	16.58	0.07	16.65	16.65	16.65	16.65
Mole Flow	KMOL/HR	2.5	20.98	2	2.5	2	4.8	20.98	3.53	17.46	8	25.46	25.46	25.46	25.46
Mass Flow	KG/HR	58.43	605.43	36.03	58.43	36.03	94.46	605.43	112.81	492.61	207.27	699.89	699.89	699.89	699.89
Volume Flow	LCUM/HR	57.38	481.67	0.04	179.6	87.01	252.67	1733.7	291.26	1442.43	728.72	2392.06	2229.94	1127.27	874.73
Temperature	C	25	25	660	291.98	539.73	410.85	800	800	800	910	947.27	864.56	301.98	173.13
Pressure	BAR	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	KCAL/MOL	-36.22	0	-68.23	-28.58	-55.55	-40.57	-38.09	5.77	6.03	-59.33	-13.78	-14.53	-19.29	-20.26
Mass Enthalpy	KCAL/KG	-1549.66	0	-3187.57	-1222.84	-3083.46	-1932.53	-1934.88	200.02	188.54	-2290.19	-501.32	-528.61	-701.63	-737.86
Enthalpy	FGCAL/HR	-0.09	0	-0.14	-0.07	-0.11	-0.18	-0.18	0.12	0.02	0.1	-0.47	-0.35	-0.49	-0.52
Molar Enthalpy	KCAL/MOL	-11.64	0.89	-38.86	1.35	-5.45	0	0.34	10.26	9.64	7.23	10.86	10.22	4.5	2.54
Mass Enthalpy	KCAL/KG	-0.5	0.03	-2.16	0.06	-0.3	0	0.02	0.36	0.3	0.28	0.4	0.37	0.16	0.09
Molar Density	KMOL/CUM	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density	KG/CUM	1.02	1.26	993.96	0.33	0.41	0.34	0.37	0.35	0.39	0.28	0.29	0.31	0.62	0.8
Average Molecular Weight		23.37	28.85	18.02	23.37	18.02	20.99	19.69	28.85	32	28.21	27.49	27.49	27.49	27.49

ตาราง 27 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 70 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,000 โมลต่อชั่วโมง

From	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3		
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.03	0	0	0.03	0	0.03	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	2.1	0	0	2.1	0	2.1	1.93	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.67	0	0	0	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23
CO	0.03	0	0	0.03	0	0.03	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0.75	0	0	0.75	0	0.75	0.91	0	0	0	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88
O2	0	5.29	0	0	0	0	0	5.29	4.23	1.06	0	1.06	1.06	1.06	1.06
N2	0.09	19.89	0	0.09	0	0.09	0.09	19.89	0	19.89	0.09	19.89	19.89	19.89	19.89
Mole Flow KMOL/HR	3	25.18	2	3	2	5	5.34	25.18	4.23	20.95	9.2	30.15	30.15	30.15	30.15
Mass Flow KG/HR	70.12	726.48	36.03	70.12	36.03	106.15	106.15	726.48	135.37	591.11	241.52	832.63	832.63	832.63	832.63
Volume Flow L/CUM/HR	68.86	577.98	0.04	215.51	82.37	315.22	283.46	2080.35	349.5	1730.85	838.01	2793.53	2597.99	1265.02	1016.09
Temperature C	25	25	25	660	261.84	545.78	416.72	800	800	800	910	930.35	846.11	271.84	164.6
Pressure BAR	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy KJ/KMOL	-36.22	0	-68.23	-28.58	-55.81	-39.47	-37.02	5.77	6.03	5.72	-59.75	-13.46	-14.22	-19.04	-19.87
Mass Enthalpy KJ/KG	-1549.66	0	-3787.57	-1222.84	-3097.76	-1859.24	-1861.32	200.02	188.54	202.66	-2276.28	-487.58	-515.1	-589.62	-719.47
Enthalpy Flow KJ/HR	-0.11	0	-0.14	-0.09	-0.11	-0.2	-0.2	0.15	0.03	0.12	-0.55	-0.41	-0.43	-0.57	-0.5
Molar Enthalpy KJ/KMOL	-11.64	0.89	-38.86	1.35	-5.92	0.13	0.47	10.28	9.64	9.58	7.45	10.81	10.16	4.17	2.48
Mass Enthalpy KJ/KG	-0.5	0.03	-2.16	0.06	-0.33	0.01	0.02	0.36	0.3	0.34	0.28	0.39	0.37	0.15	0.09
Molar Density KMOL/CUM	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density KG/CUM	1.02	1.26	993.96	0.33	0.44	0.34	0.37	0.35	0.39	0.34	0.29	0.3	0.32	0.86	0.82
Average Molecular Weight	23.37	28.85	18.02	23.37	18.02	21.23	19.89	28.85	32	28.21	26.25	27.62	27.62	27.62	27.62

ตาราง 28 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 70 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,500 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	ANODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.78	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	2.45	0	0	2.45	0	2.45	2.25	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.64	0	0	0	6.93	6.93	6.93	6.93	6.93
CO	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0.88	0	0	0.88	0	0.88	1.05	0	0	0	3.36	3.36	3.36	3.36	3.36
O2	0	6.17	0	0	0	0	0	6.17	4.94	1.23	0	1.23	1.23	1.23	1.23
N2	0.11	23.21	0	0.11	0	0.11	0.11	23.21	0	23.21	0.11	23.31	23.31	23.31	23.31
Mole Flow KMOL/HR	3.5	29.38	2	3.5	2	5.5	5.88	29.38	4.94	24.44	10.4	34.84	34.84	34.84	34.84
Mass Flow KG/HR	81.81	847.54	36.03	81.81	36.03	117.84	117.84	847.54	157.93	689.62	275.76	965.38	965.38	965.38	965.38
Volume Flow CUM/HR	80.34	674.29	0.04	251.43	78.95	349.62	314.76	2427.03	407.74	2019.29	947.31	3194.82	2965.84	1402.24	1155.98
Temperature C	25	25	25	650	239.62	552.57	422.35	800	800	800	910	917.92	832.55	249.62	157.82
Pressure BAR	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy KCAL/MOL	-36.22	0	-58.23	-28.58	-56	-38.55	-36.1	5.77	6.03	5.72	-60.08	-13.23	-14	-18.87	-19.57
Mass Enthalpy KCAL/KG	-1549.66	0	-3787.57	-1222.84	-3108.21	-1799.33	-1801.18	200.02	188.54	202.65	-2255.82	-477.61	-505.3	-580.91	-705.27
Enthalpy Flow KCAL/HR	-0.13	0	-0.14	-0.1	-0.11	-0.21	-0.21	0.17	0.03	0.14	-0.62	-0.46	-0.49	-0.66	-0.68
Molar Enthalpy CAL/MOL	-11.64	0.89	-38.86	1.35	-6.28	0.26	0.6	10.28	9.64	9.58	7.62	10.77	10.11	3.91	2.43
Mass Enthalpy CAL/GM-HR	-0.5	0.03	-2.16	0.05	-0.35	0.01	0.03	0.35	0.3	0.34	0.29	0.39	0.36	0.14	0.09
Molar Density KMOL/CU	0.04	0.04	55.17	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density KG/CUM	1.02	1.26	993.96	0.33	0.46	0.34	0.37	0.35	0.39	0.34	0.29	0.3	0.33	0.69	0.84
Average Molecular Wt	23.37	28.85	18.02	23.37	18.02	21.42	20.04	28.85	32	28.21	26.51	27.71	27.71	27.71	27.71

ตาราง 29 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 70 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 4,000 โมลต่อชั่วโมง

From	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	CATHODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX2	HEATEX2	HEATEX3
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.86	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	2.8	0	0	2.8	0	2.8	2.59	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.61	0	0	0	7.64	7.64	7.64	7.64	7.64
CO	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	1	0	0	1	0	1	1.18	0	0	0	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84
O2	0	7.05	0	0	0	0	0	7.05	5.64	1.41	0	1.41	1.41	1.41	1.41
N2	0.12	26.52	0	0.12	0	0.12	0.12	26.52	0	26.52	0.12	26.52	26.52	26.52	26.52
Mole Flow KMOL/HR	4	33.57	2	4	2	6	6.42	33.57	5.64	27.93	11.6	39.53	39.53	39.53	39.53
Mass Flow KG/HR	93.49	968.62	35.03	93.49	35.03	129.52	129.52	968.62	180.49	788.14	310.01	1098.15	1098.15	1098.15	1098.15
Volume Flow CUM/HR	91.81	770.62	0.04	287.35	76.32	384.48	346.34	2773.75	465.99	2307.76	1056.62	3596.03	3333.59	1539.13	1294.94
Temperature C	25	25	25	660	222.56	559.23	427.48	800	800	800	910	908.39	822.16	232.56	152.33
Pressure BAR	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy KJ/KMOL	-36.22	0	-68.23	-28.58	-56.14	-37.77	-35.32	5.77	6.03	5.72	-60.33	-13.06	-13.83	-18.73	-19.34
Mass Enthalpy KJ/KG	-1549.66	0	-3787.57	-1222.84	-3116.19	-1749.63	-1751.22	200.02	188.54	202.65	-2257.64	-470.04	-497.87	-674.29	-696.32
Enthalpy FGCAL/HR	-0.14	0	-0.14	-0.11	-0.11	-0.23	-0.23	0.19	0.03	0.16	-0.7	-0.52	-0.55	-0.74	-0.76
Molar Enthalpy KJ/KMOL	-11.64	0.89	-38.86	1.35	-6.57	0.37	0.71	10.28	9.64	9.58	7.75	10.75	10.07	3.7	2.39
Mass Enthalpy KJ/KG	-0.5	0.03	-2.16	0.06	-0.36	0.02	0.04	0.36	0.3	0.34	0.29	0.39	0.36	0.13	0.09
Molar Density KMOL/CUM	0.04	0.04	55.17	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03
Mass Density KG/CUM	1.02	1.26	993.96	0.33	0.47	0.34	0.37	0.35	0.39	0.34	0.29	0.31	0.33	0.71	0.85
Average Molecular Weight	23.37	28.85	18.02	23.37	18.02	21.59	20.17	28.85	32	28.21	26.72	27.78	27.78	27.78	27.78

ตาราง 30 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,000 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	ANODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0	0	0	0	0	0	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	2	0	0	2	0	2	1.86	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.7	0	0	0	6	6	6	6	6
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0	0	0	0	0	0	0.15	0	0	0	2	2	2	2	2
O2	0	5	0	0	0	0	0	5	4	1	0	1	1	1	1
N2	0	18.81	0	0	0	0	0	18.81	0	18.81	0	18.81	18.81	18.81	18.81
Mole Flow	2	23.81	2	2	2	4	4.3	23.81	4	19.81	8	27.81	27.81	27.81	27.81
Mass Flow	32.09	686.96	36.03	32.09	36.03	68.12	68.12	686.96	128	558.95	196.12	755.07	755.07	755.07	755.07
Volume Flow	45.91	546.53	0.04	143.68	83.38	244.16	214.56	1967.17	330.48	1636.68	728.7	2589.53	2450.99	1180.92	928.61
Temperature	25	25	25	660	268.42	519.79	375.08	800	800	800	910	936.33	871.63	278.42	160.57
Pressure	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	-17.8	0	-68.23	-9.75	-55.75	-32.75	-30.52	5.77	6.03	5.72	-58.17	-11.8	-12.38	-17.32	-18.21
Mass Enthalpy	-1109.46	0	-3787.57	-607.92	-3094.65	-1923.29	-1926.56	200.02	188.54	202.65	-2372.81	-434.5	-455.82	-637.79	-670.86
Enthalpy Flow	-0.04	0	-0.14	-0.02	-0.11	-0.13	-0.13	0.14	0.02	0.11	-0.47	-0.33	-0.34	-0.48	-0.51
Molar Entropy	-19.38	0.89	-38.86	-5.82	-5.82	-4.05	-3.26	10.28	9.64	9.58	6.23	10.56	10.07	4.04	2.21
Mass Entropy	-1.21	0.03	-2.16	-0.36	-0.32	-0.24	-0.21	0.36	0.3	0.34	0.25	0.39	0.37	0.15	0.08
Molar Density	0.04	0.04	55.17	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Mass Density	0.7	1.26	993.96	0.22	0.43	0.28	0.32	0.35	0.39	0.34	0.27	0.29	0.31	0.64	0.81
Average Molecular Weight	16.04	28.85	18.02	16.04	18.02	17.03	15.64	28.85	32	28.21	24.51	27.15	27.15	27.15	27.15

ตาราง 31 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2,500 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	ANODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	
Component Mole Flow															
H2	0	0	0	0	0	0	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	2.5	0	0	2.5	0	2.5	2.32	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.65	0	0	0	7	7	7	7	7
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0	0	0	0	0	0	0.17	0	0	0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
O2	0	6.25	0	0	0	0	0	6.25	5	1.25	0	1.25	1.25	1.25	1.25
N2	0	23.51	0	0	0	0	0	23.51	0	23.51	0	23.51	23.51	23.51	23.51
Mole Flow	2.5	29.76	2	2.5	2	4.5	4.85	29.76	5	24.76	9.5	34.26	34.26	34.26	34.26
Mass Flow	40.11	858.7	36.03	40.11	36.03	76.14	76.14	858.7	160.01	698.7	236.14	934.84	934.84	934.84	934.84
Volume Flow	57.38	683.17	0.04	179.6	78.13	277.99	245.02	2458.98	413.11	2045.87	865.33	3139.99	2965.8	1364.85	1116.74
Temperature	25	25	25	660	234.27	529.3	382.76	800	800	800	910	917.23	851.2	244.27	150.21
Pressure	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	-17.8	0	-68.23	-9.75	-56.04	-30.32	-28.17	5.77	6.03	5.72	-58.61	-11.42	-12.01	-17.02	-17.73
Mass Enthalpy	-1109.46	0	-3787.57	-607.92	-3110.72	-1792.32	-1795.24	200.02	188.54	202.65	-2358.09	-418.53	-440.04	-623.77	-649.86
Enthalpy	-0.04	0	-0.14	-0.02	-0.11	-0.14	-0.14	0.17	0.03	0.14	-0.56	-0.39	-0.41	-0.58	-0.61
Molar Enthalpy	-19.38	0.89	-38.86	-5.82	-6.37	-4.25	-3.39	10.28	9.64	9.58	6.45	10.5	10	3.65	2.13
Mass Enthalpy	-1.21	0.03	-2.16	-0.36	-0.35	-0.25	-0.22	0.36	0.3	0.34	0.26	0.38	0.37	0.13	0.08
Molar Density	0.04	0.04	55.17	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03
Mass Density	0.7	1.26	993.96	0.22	0.46	0.27	0.31	0.35	0.39	0.34	0.27	0.3	0.32	0.68	0.84
Average Molecular Weight	16.04	28.85	18.02	15.04	18.02	16.92	15.69	28.85	32	28.21	24.86	27.28	27.28	27.28	27.28

ตาราง 32 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,000 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From															
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	ANODE	CATHODE	HEATEX2	REFORMER	ANODE	CATHODE	HEATEX2	REFORMER	ANODE
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	3	0	0	3	0	3	2.8	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.6	0	0	0	8	8	8	8	8
CO	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	3	3	3	3	3
O2	0	7.5	0	0	0	0	0	7.5	6	1.5	0	1.5	1.5	1.5	1.5
N2	0	28.22	0	0	0	0	0	28.22	0	28.22	0	28.22	28.22	28.22	28.22
Mole Flow	3	35.72	2	3	2	5	5.41	35.72	6	29.72	11	40.72	40.72	40.72	40.72
Mass Flow	48.13	1030.42	36.03	48.13	36.03	84.16	84.16	1030.42	192	838.42	276.16	1114.58	1114.58	1114.58	1114.58
Volume Flow	68.86	819.79	0.04	215.51	74.5	312.76	276.32	2950.71	495.72	2454.99	1001.95	3690.08	3480.22	1548.06	1302.87
Temperature	25	25	25	660	210.73	539.37	390.49	800	800	800	910	904.1	837.14	220.73	142.5
Pressure	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	-17.8	0	-88.23	-9.75	-56.24	-28.35	-26.25	5.77	6.03	5.72	-58.94	-11.16	-11.75	-16.82	-17.41
Mass Enthalpy	-1109.46	0	-3787.57	-607.92	-3121.7	-1684.13	-1686.76	200.02	188.54	202.65	-2347.69	-407.72	-429.38	-614.29	-635.82
Enthalpy Flow	-0.05	0	-0.14	-0.03	-0.11	-0.14	-0.14	0.21	0.04	0.17	-0.65	-0.45	-0.48	-0.68	-0.71
Molar Density	-19.38	0.89	-38.86	-5.82	-6.77	-4.37	-3.47	10.28	9.64	9.58	6.61	10.46	9.94	3.36	2.06
Mass Density	-1.21	0.03	-2.16	-0.36	-0.38	-0.26	-0.22	0.36	0.3	0.34	0.26	0.38	0.36	0.12	0.08
Molar Diffusivity	0.04	0.04	55.17	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
Mass Diffusivity	0.7	1.26	993.96	0.22	0.48	0.27	0.3	0.35	0.39	0.34	0.28	0.3	0.32	0.72	0.86
Average Molecular Weight	16.04	28.85	18.02	16.04	18.02	16.83	15.56	28.85	32	28.21	25.1	27.37	27.37	27.37	27.37

ตาราง 33 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่ค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3,500 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR REFORM	HEATEX2	CATHODE ANODE	AFTERBU	CATHODE ANODE	AFTERBU	HEATEX2	HEATEX3		
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORM	ANODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX2	HEATEX3		
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor
Component Mole Flow															
H2	0	0	0	0	0	0	0.92	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	3.5	0	0	3.5	0	3.5	3.27	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.54	0	0	0	9	9	9	9	9
CO	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0	0	0	0	0	0	0.22	0	0	0	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
O2	0	8.75	0	0	0	0	0	8.75	7	1.75	0	1.75	1.75	1.75	1.75
N2	0	32.92	0	0	0	0	0	32.92	0	32.92	0	32.92	32.92	32.92	32.92
Mole Flow	3.5	41.67	2	3.5	2	5.5	5.97	41.67	7	34.67	12.5	47.17	47.17	47.17	47.17
Mass Flow	56.15	1202.18	36.03	56.15	36.03	92.18	92.18	1202.18	224.01	978.17	316.19	1294.36	1294.36	1294.36	1294.36
Volume Flow	80.34	956.44	0.04	251.43	71.85	348	308.11	3442.57	578.35	2864.22	1138.6	4240.14	3994.57	1730.9	1487.86
Temperature	25	25	25	660	193.51	548.74	397.72	800	800	800	910	894.51	826.88	203.51	136.58
Pressure	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	-17.8	0	-68.23	-9.75	-56.38	-26.71	-24.66	5.77	6.03	5.72	-59.18	-10.97	-11.57	-16.67	-17.17
Mass Enthalpy	-1109.46	0	-3787.57	-607.92	-3129.68	-1593.6	-1595.99	200.02	188.54	202.65	-2339.86	-399.89	-421.65	-607.43	-625.74
Enthalpy	-0.06	0	-0.14	-0.03	-0.11	-0.15	-0.15	0.24	0.04	0.2	-0.74	-0.52	-0.55	-0.79	-0.81
Molar Enthalpy	-19.38	0.89	-38.86	-5.82	-7.07	-4.47	-3.52	10.28	9.64	9.58	6.73	10.43	9.9	3.14	2
Mass Enthalpy	-1.21	0.03	-2.16	-0.36	-0.39	-0.27	-0.23	0.36	0.3	0.34	0.27	0.38	0.36	0.11	0.07
Molar Density	0.04	0.04	55.17	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03
Mass Density	0.7	1.26	993.96	0.22	0.5	0.26	0.3	0.35	0.39	0.34	0.28	0.31	0.32	0.75	0.87
Average Molecular Weight	16.04	28.85	18.92	16.04	18.02	16.76	15.45	28.85	32	28.21	25.29	27.44	27.44	27.44	27.44

ตาราง 34 ตารางผลการจำลองจากโปรแกรม Aspen Plus ที่คำนวณประกอบของเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยมีเทน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 4,000 โมลต่อชั่วโมง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
From				HEATEX	HEATEX3	EJECTOR	REFORMER	HEATEX2	CATHODE	CATHODE	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
To	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	EJECTOR	EJECTOR	REFORMER	ANODE	CATHODE	ANODE	AFTERBU	AFTERBU	HEATEX	HEATEX2	HEATEX3	
Substream: MIXED															
Phase:	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	Vapor	
Component Mole Flow															
H2	0	0	0	0	0	0	1.03	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	4	0	0	4	0	4	3.74	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	2	0	2	2	1.49	0	0	0	10	10	10	10	10
CO	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0	4	4	4	4	4
O2	0	10	0	0	0	0	0	10	8	2	0	2	2	2	2
N2	0	37.62	0	0	0	0	0	37.62	0	37.62	0	37.62	37.62	37.62	37.62
Mole Flow	4	47.62	2	4	2	6	6.52	47.62	8	39.62	14	53.62	53.62	53.62	53.62
Mass Flow	64.17	1373.83	36.03	64.17	36.03	100.2	100.2	1373.83	255.99	1117.84	356.19	1474.03	1474.03	1474.03	1474.03
Volume Flow	91.81	1093	0.04	287.35	69.83	383.51	340.22	3934.09	660.93	3273.16	1275.18	4789.79	4508.51	1913.42	1672.03
Temperature	25	25	25	660	180.39	557.13	404.33	800	800	800	910	887.21	819.07	190.39	131.91
Pressure	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Vapor Fraction	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Liquid Fraction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solid Fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	-17.8	0	-68.23	-9.75	-56.49	-25.33	-23.33	5.77	6.03	5.72	-59.38	-10.83	-11.43	-16.56	-17
Mass Enthalpy	-1109.46	0	-3787.57	-607.92	-3135.74	-1516.87	-1519.06	200.02	188.54	202.65	-2333.93	-394.02	-415.85	-602.28	-618.21
Enthalpy Flow	-0.07	0	-0.14	-0.04	-0.11	-0.15	-0.15	0.27	0.05	0.23	-0.83	-0.58	-0.61	-0.89	-0.91
Molar Enthalpy	-19.38	0.89	-38.86	-5.82	-7.31	-4.55	-3.55	10.28	9.64	9.58	6.82	10.4	9.87	2.96	1.95
Mass Enthalpy	-1.21	0.03	-2.16	-0.36	-0.41	-0.27	-0.23	0.36	0.3	0.34	0.27	0.38	0.36	0.11	0.07
Molar Density	0.04	0.04	55.17	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03
Mass Density	0.7	1.26	993.96	0.22	0.52	0.26	0.29	0.35	0.39	0.34	0.28	0.31	0.33	0.77	0.88
Average Molecular Wt	16.04	28.85	18.02	15.04	18.02	16.7	15.36	28.85	32	28.21	25.44	27.49	27.49	27.49	27.49



คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

A_{cell}	พื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิง (ตารางเซนติเมตร)
E_{cell}°	ความต่างศักย์ผันกลับของเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์)
F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96487 คูลอมบ์ต่อโมล)
F_{H_2}	อัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจน (โมลต่อวินาที)
ΔG_{H_2}	พลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปของไฮโดรเจนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
ΔH_f	เอนทาลปีที่เปลี่ยนไปของเชื้อเพลิง
$\Delta H_{electrochem}$	เอนทาลปีที่เปลี่ยนไปที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี
i_{elec}	อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในอิเล็กโทรด (แอมแปร์)
i_{ion}	ไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นอิเล็กโทรไลต์ (แอมแปร์)
J_i	ฟลักซ์การแพร่ของสาร (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
j	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
j_0	exchange current density (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
j_{H_2}	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้ของไฮโดรเจนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนด (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
j_L	limiting current density (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
j_{O_2}	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้ของออกซิเจนที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทด (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
K_{eq,H_2}	ค่าคงที่สมดุลสำหรับปฏิกิริยา
κ	permeability (หนึ่งต่อตารางเมตร)
LHV_{H_2}	lower heating values ของไฮโดรเจน (จูลต่อโมล)
l	ระยะทางที่อิเล็กตรอนหรือไอออนเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)
M_i	มวลโมเลกุลของสาร i (กิโลกรัมต่อโมล)
n	จำนวนของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี
n_i	เลขวาเลนซ์อิเล็กตรอนของสาร i
n_{H_2}	จำนวนโมลของไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

n_{O_2}	จำนวนโมลของออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี
$\vec{n}$	unit vector
P	กำลังไฟฟ้าที่ได้ (วัตต์)
PD	ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)
P_{ref}	ความดัน ณ สภาวะการณ์ทำงานอ้างอิง (bar)
$P_{O_2,An} \cdot P_{O_2,Cat}$	ความดันแฟงของออกซิเจนบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่แอโนดและแคโทดตามลำดับ
$P_{H_2} \cdot P_{H_2O}$	ความดันแฟงของไฮโดรเจนและน้ำบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่แอโนดตามลำดับ
R	ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูลต่อเคลวินต่อโมล)
S_ϕ	เทอมแหล่งกำเนิดของตัวแปรที่สนใจ
T	อุณหภูมิที่เซลล์ทำงาน (เคลวิน)
U	เวกเตอร์ความเร็วของของไหล
U_f	พอลิยูทิลิตี้เซชันแฟกเตอร์
U_a	แอริยูทิลิตี้เซชันแฟกเตอร์
u	ความเร็วในทิศทาง x
V_{cell}	ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)
V_{ref}	ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ณ สภาวะการณ์ทำงานอ้างอิง (mV)
ΔV_{anode}	ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่มีผลจากเชื้อเพลิงที่แอโนด (mV)
$\Delta V_{cathode}$	ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่มีผลจากอากาศที่แคโทด (mV)
ΔV_p	ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่มีผลจากความดัน (mV)
ΔV_T	ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่มีผลจากอุณหภูมิ (mV)
v	ความเร็วในทิศทาง y
w	ความเร็วในทิศทาง z
X_i	สัดส่วนโดยมวลของสาร
x	ระยะในแนวแกน x

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
y	ระยะในแนวแกน y
z	ระยะในแนวแกน z
ρ	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
σ	ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนหรือไอออน
ε	ขนาดของรูปทรง
μ	ความหนืดของของไหล (กิโลกรัม เมตรต่อวินาที)
η_{Act}	แอกติเวชันโอเวอร์โพเทนเชียล
η_{Conc}	คอนเซนเทรชันโอเวอร์โพเทนเชียล
η_{Ohm}	โอห์มมิกโอเวอร์โพเทนเชียล
$\eta_{thermal}$	ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์
ζ	เทนเซอร์ความเค้นเฉือนของของไหล
ϕ	ความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์
β	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน
Φ	ฟังก์ชันการคายตัวเนื่องจากความหนืด
λ_a	แอร์สตอยซีโอเมตริกเรโซ
Γ	สัมประสิทธิ์การแพร่
α	ค่าสัมประสิทธิ์ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน
α_T	สัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อน

ประวัติย่อผู้วิจัย



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายทัชพงษ์ จันทลี
วันเดือนปีเกิด	26 พฤษภาคม พ.ศ. 2516
สถานที่เกิด	นครนายก
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	150 หมู่ที่ 10 ต. พรหมณี อ. เมือง จ. นครนายก 26000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2537	มัธยมศึกษาตอนปลาย
	จาก โรงเรียนนครนายกวิทยาคม
พ.ศ. 2541	อุดมศึกษา (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) วิศวกรรมเคมี
	จาก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
พ.ศ. 2553	บัณฑิตศึกษา (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) วิศวกรรมเคมี
	จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

