

ศักยภาพการลดความเข้มข้นของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิง
ก๊าซธรรมชาติ โดยการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอีย

นางสาวญาดา บุญยะมนิตย์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Carbon intensity reduction potential of natural gas combined cycle
power plants by exergy analysis

Miss Yada Bunyamanid



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ศักยภาพการลดความเข้มข้นคาร์บอนของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ โดยการวิเคราะห์เอ็กซีเซอีย

โดย

นางสาวญาดา บุญยะมนิตย์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.ธนาพล ตันตีสัตยกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ธนาพล ตันตีสัตยกุล)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป ฝาริโน)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉริยา สุริยวงค์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.เปรมฤดี กาญจนปิยะ)

ญาดา บุญยฆมนินิตย์ : ศักยภาพการลดความเข้มข้นคาร์บอนของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ โดยการวิเคราะห์เอ็กซีเซอีย (Carbon intensity reduction potential of natural gas combined cycle power plants by exergy analysis) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อรรถัย ชวลาภาฤทธิ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.ธนาพล ต้นดีสัตยกุล, 145 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติและเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าจากการวิเคราะห์เอ็กซีเซอีย ใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์จากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษาในประเทศไทยจำนวน 3 โรงงาน รวบรวมข้อมูลเป็นระยะเวลา 2 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 ถึง พ.ศ. 2557 ผลการศึกษาพบว่าค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานเฉลี่ยของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษามีค่าเท่ากับ 0.406 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และ 7.422 จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ โดยแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลักเกิดจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานของงานวิจัยนี้กับการศึกษาอื่นพบว่าค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วงที่ต่ำแล้ว ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์เอ็กซีเซอีย ใช้ข้อมูลของโรงไฟฟ้าตัวอย่าง 1 โรงงาน แบ่งเป็นการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซีเซอียและประสิทธิภาพเอ็กซีเซอียของอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ กังหันก๊าซ (GT) เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง (HRSG) และกังหันไอน้ำ (ST) ผลการศึกษาพบว่าองค์ประกอบที่มีศักยภาพในการปรับปรุงสูงที่สุดคือ HRSG เนื่องจากมีอัตราการทำลายเอ็กซีเซอียที่สูง ด้วยประสิทธิภาพเอ็กซีเซอียที่ต่ำที่สุด (57.84%) รองลงมา คือ GT ในขณะที่ประสิทธิภาพเอ็กซีเซอียพบมากที่สุดในกังหันไอน้ำความดันสูง (97.36%) ดังนั้นแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาสามารถทำได้โดยการปรับปรุงประสิทธิภาพของ HRSG และ GT ซึ่งผลจากการปรับปรุงนี้จะส่งผลต่อปริมาณการใช้พลังงานที่ลดลงและลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าได้

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2558	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5670175621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: CARBON INTENSITY / ENERGY INTENSITY / EXERGY ANALYSIS / NATURAL GAS COMBINED CYCLE POWER PLANTS

YADA BUNYAMANID: Carbon intensity reduction potential of natural gas combined cycle power plants by exergy analysis. ADVISOR: ASSOC. PROF.ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., CO-ADVISOR: THANAPOL TANTISATTAYAKUL, Ph.D., 145 pp.

The objectives of this study were to estimate energy and carbon intensities of natural gas combined-cycle power plants and to improve the efficiency of power plants through an exergy analysis. Three plants in Thailand were evaluated as case studies in this research using data collected in 2013 – 2014. The results showed that the average carbon and energy intensities of three Combined-Cycle Power Plants were 0.406 kgCO₂/kWh and 7.422 GJ/MWh, respectively. The major source of carbon emissions was the natural gas combustion process. The range of energy and carbon intensities in this study was slightly lower than that of other studies. An efficiency analysis of system components through an exergy analysis classifying into 2 parts including exergy destruction and exergy efficiency with the data was collected from one power plant. In this study, the exergy analysis was performed with Gas turbine (GT), Heat Recovery Steam generator (HRSG) and Steam turbine (ST). The results illustrated that the HRSG has lowest exergy efficiency (57.84%), while the HPST has the highest exergy efficiency (97.36%). To sum up, an exergy analysis is one approach has been used to improve the performance of power plants. The results showed that the HRSG has the most efficiency improvement potential followed by the GT. And improving the performance of HRSG and GT will result in lower energy use and emission reduction.

Department: Environmental
Engineering

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2015

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความกรุณาของบุคคลหลายท่าน ผู้เขียนจึงอยากขอขอบคุณ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และดร. ธนาพล ต้นดีสัตยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ความเมตตา ช่วยชี้แนะและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆของงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงให้การอบรมสั่งสอนและให้ข้อคิดในการทำงานต่างๆแก่ผู้เขียน ผู้เขียนมีความซาบซึ้งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ชนาธิป ผาริโน ที่ให้ความเมตตาคอยชี้แนะและสั่งสอนการดำเนินชีวิตตลอดจนการทำงานจริงให้แก่ผู้เขียนเสมอมา และขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ (ประธานกรรมการ) ผศ. ดร. อัจฉริยา สุริยะวงศ์ (กรรมการ) และดร. เปรมฤดี กาญจนปิยะ (กรรมการ) ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และโรงไฟฟ้าที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ข้อมูลในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณนายปัญญา บัวเผื่อน ดร. ภาณุวัฒน์ อุส่าห์เพียร นางสาวนันทมล ลิมพ์พิทักษ์พงศ์ และนางสาวสาวิตรี ตาสุดิน ที่คอยให้คำปรึกษาในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตั้งแต่เริ่มจัดทำจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณนางสาวปรียาภัทร บุญมา ที่ช่วยประสานงานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัยเสมอมา และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจและให้การช่วยเหลือ เป็นกำลังใจให้กันตลอดการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ท้ายสุดนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ที่ให้กำลังใจผู้เขียนเสมอมา จนการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงในที่สุด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ.....	4
2.1.1 ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas).....	4
2.1.2 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change).....	5
2.1.3 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับโลก.....	6
2.1.4 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อประเทศไทย.....	7
2.2 การประเมินความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงาน.....	8
2.2.1 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (Carbon Footprint for Organization : CFO)....	8
2.2.2 ความเข้มข้นคาร์บอน (Carbon Intensity).....	10
2.2.3 ความเข้มพลังงาน (Energy Intensity).....	11
2.3 อุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า.....	12

2.3.1 ประเภทโรงไฟฟ้า.....	12
2.3.2 ระบบผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย	25
2.4 แนวทาง/มาตรการการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้า	27
2.4.1 การเปลี่ยนชนิดของกังหันก๊าซ Super high-temperature gas turbine	27
2.4.2 การเปลี่ยนชนิดของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง BENSON Once- Through HRSG	28
2.4.3 การใช้อุปกรณ์ป้องกันการสูญเสียพลังงานจากกังหัน Brush Seal	30
2.4.4 แนวทาง/มาตรการการเพิ่มประสิทธิภาพอื่นๆ	30
2.5 พื้นฐานของเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Fundamentals).....	31
2.5.1 พลังงาน (Energy)	31
2.5.2 เอนโทรปี (Entropy, S).....	33
2.5.3 เอ็กซ์เซอจี (Exergy)	34
2.6 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	40
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	46
3.1 ทบทวนเอกสารและรายงานการศึกษาต่างๆเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ	48
3.2 รับสมัครโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษา	48
3.2.1 รับสมัครโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่สนใจเข้าร่วมงาน วิจัย.....	48
3.2.2 ศึกษากระบวนการผลิตของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาที่เข้าร่วมงานวิจัย	49
3.3 การกำหนดขอบเขตการประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	49
3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	50
3.5 การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	52
3.5.1 ขอบเขตที่ 1 การการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางตรง (Direct emission) 52	

3.5.2 ขอบเขตที่ 2 การการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางอ้อม (Indirect emission)	56
3.5.3 การประเมินความเข้มคาร์บอน	57
3.5.4 การประเมินความเข้มพลังงาน	57
3.6 การประเมินศักยภาพการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอ ยี.....	58
3.6.1 การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของกังหันก๊าซ.....	63
3.6.2 การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง.....	66
3.6.3 การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของกังหันไอน้ำ.....	69
3.6.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงาน	71
3.7 ศึกษาแนวทาง/มาตรการการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าพลังความ ร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ	73
บทที่ 4 ผลการทดลอง	74
4.1 การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มคาร์บอนและความเข้ม พลังงาน.....	74
4.1.1 การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	74
4.1.2 การประเมินความเข้มคาร์บอน	76
4.1.3 การประเมินความเข้มพลังงาน	78
4.1.4 การเปรียบเทียบความเข้มคาร์บอนและความเข้มพลังงานของโรงไฟฟ้าพลังความ ร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษากับงานวิจัยอื่น	79
4.2 การประเมินศักยภาพการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอ ยี.....	81
4.2.1 การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของกังหันก๊าซ.....	82
4.2.2 การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง.....	91

4.2.3 การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของกังหันไอน้ำ	99
4.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency).....	102
4.3.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันก๊าซ	102
4.3.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องผลิตน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง	104
4.3.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันไอน้ำ	105
4.4 ผลการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอีย ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอีย และประสิทธิภาพพลังงาน.....	108
4.5 แนวทาง/มาตรการการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ.....	112
4.5.1 แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียและพลังงาน	112
4.5.2 การประเมินศักยภาพการลดลงของค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มข้นพลังงานทางทฤษฎี.....	114
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	117
5.1 การประเมินความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มข้นพลังงาน	117
5.2 การประเมินศักยภาพการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอีย.....	118
5.3 แนวทาง/มาตรการการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ.....	119
5.4 ข้อเสนอแนะ	120
รายการอ้างอิง	121
ภาคผนวก.....	127
ภาคผนวก ก	127
ภาคผนวก ข	138
ภาคผนวก ค	140

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 145



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	ค่าศักยภาพการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของก๊าซเรือนกระจกชนิดต่างๆ ในช่วงเวลา 100 ปี (เท่าของคาร์บอนไดออกไซด์).....	5
ตารางที่ 2.2	ผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก	7
ตารางที่ 2.3	ค่าความเข้มข้นคาร์บอนจำแนกตามเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้า	11
ตารางที่ 2.4	ค่าความเข้มข้นคาร์บอนจำแนกตามเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า	11
ตารางที่ 2.5	ความเข้มพลังงานตามเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า	12
ตารางที่ 2.6	ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Emission factor) ของเชื้อเพลิง ฟอสซิล.....	18
ตารางที่ 2.7	ข้อเด่นและข้อด้อยของเชื้อเพลิงที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม.....	19
ตารางที่ 2.8	สัดส่วนกำลังผลิตติดตั้ง (เมกะวัตต์) จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ปี พ.ศ. 2558 จำแนกตามเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต.....	26
ตารางที่ 2.9	ความเหมือนและแตกต่างระหว่าง Drum-Type และ BENSON Once-Through HRSG.....	29
ตารางที่ 2.10	สภาวะแวดล้อมอ้างอิง	36
ตารางที่ 2.11	เปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างเอ็กซ์เซอียกับพลังงาน	37
ตารางที่ 2.12	รายละเอียดของหน่วยผลิตต่างๆตามรูปที่ 2.20.....	39
ตารางที่ 2.13	สมการการคำนวณเอ็กซ์เซอียของหน่วยผลิตต่างๆ.....	40
ตารางที่ 2.14	ค่าความเข้มข้นคาร์บอนตามเทคโนโลยีและเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า	41
ตารางที่ 3.1	สัดส่วนกำลังผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ กรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ ข้อมูลปี พ.ศ. 2558.....	49
ตารางที่ 3.2	ข้อมูลของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษา.....	51
ตารางที่ 3.3	เส้นทางการไหลของมวลสาร	60

ตารางที่ 4.1	เปรียบเทียบความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานของโรงไฟฟ้าการศึกษากับงานวิจัยอื่น จำแนกตามเทคโนโลยีและชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิต	80
ตารางที่ 4.2	คุณสมบัติของก๊าซสำหรับใช้ในการคำนวณเอ็กซ์เซอียของกังหันก๊าซ.....	83
ตารางที่ 4.3	การคำนวณอัตราไหลขององค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงในหน่วยกิโลโมลต่อวินาที (kmol/s).....	84
ตารางที่ 4.4	การคำนวณอัตราไหลเชิงโมลขององค์ประกอบของอากาศ ในหน่วยกิโลโมลต่อวินาที (kmol/s)	85
ตารางที่ 4.5	สัดส่วนโมล (mole fraction) ขององค์ประกอบก๊าซเผาไหม้.....	86
ตารางที่ 4.6	สมการการเผาไหม้ที่ใช้สำหรับคำนวณองค์ประกอบก๊าซหลังเผาไหม้.....	86
ตารางที่ 4.7	ค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซ	88
ตารางที่ 4.8	ค่าที่ใช้ในการคำนวณอัตราเอ็กซ์เซอียทางเคมี.....	90
ตารางที่ 4.9	คุณสมบัติของก๊าซ น้ำ และไอน้ำสำหรับใช้ในการคำนวณเอ็กซ์เซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง	92
ตารางที่ 4.10	คุณสมบัติของของเหลวอัดตัว (Compressed Liquid Water Properties)	93
ตารางที่ 4.11	คุณสมบัติของไอร้อนยิ่งยวด (Superheated Vapor Steam Properties)	95
ตารางที่ 4.12	ค่าที่ใช้สำหรับการคำนวณอัตราเอ็กซ์เซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง.....	97
ตารางที่ 4.13	ค่าที่ใช้สำหรับการคำนวณอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง	98
ตารางที่ 4.14	ค่าที่ใช้สำหรับการคำนวณอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียของกังหันไอน้ำ.....	100
ตารางที่ 4.15	ค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซเฉลี่ยที่ปริมาตรคงที่	102
ตารางที่ 4.16	ค่าที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพพลังงานของกังหันก๊าซ.....	103
ตารางที่ 4.17	ค่าที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง.....	104

ตารางที่ 4.18 ค่าที่ใช้ในการคำนวณเอ็นทัลปีที่ไอเซนโทรปิกและประสิทธิภาพพลังงานของ กังหันไอน้ำ	105
ตารางที่ 4.19 ค่าที่ใช้ในการคำนวณเอ็นทัลปีที่ไอเซนโทรปิก.....	106
ตารางที่ 4.20 ตัวอย่างค่าที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพพลังงานของกังหันไอน้ำ	106
ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียของ องค์ประกอบของระบบ	108
ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพพลังงานของ องค์ประกอบของระบบ	110



สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 การสะท้อนกลับของรังสีความร้อน	6
รูปที่ 2.2 โรงไฟฟ้าพลังน้ำ.....	13
รูปที่ 2.3 โรงไฟฟ้าพลังความร้อน.....	13
รูปที่ 2.4 เครื่องกังหันก๊าซ	14
รูปที่ 2.5 โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม	15
รูปที่ 2.6 แหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	16
รูปที่ 2.7 โรงไฟฟ้าดีเซล.....	21
รูปที่ 2.8 โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	22
รูปที่ 2.9 โรงไฟฟ้าพลังงานลม	22
รูปที่ 2.10 โรงไฟฟ้าชีวมวล.....	23
รูปที่ 2.11 โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ.....	24
รูปที่ 2.12 โรงไฟฟ้าพลังงานขยะ.....	24
รูปที่ 2.13 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ	25
รูปที่ 2.14 สัดส่วนกำลังผลิตติดตั้งจากการไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทย ปี พ.ศ. 2558 จำแนกตามเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต.....	26
รูปที่ 2.15 ประสิทธิภาพของกังหันก๊าซรุ่นต่างๆ.....	27
รูปที่ 2.16 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกังหันก๊าซรุ่นต่างๆ.....	28
รูปที่ 2.17 อุปกรณ์ BENSON Once-Through.....	29
รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบระยะเวลาการเริ่มเดินเครื่องจักรระหว่าง Drum-Type และ BENSON Once-Through HRSG.....	29
รูปที่ 2.19 เทคโนโลยี Brush Seal.....	30
รูปที่ 2.20 แผนภาพกระบวนการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีพลังความร้อนร่วม (Combined Cycle Power Plant).....	38

รูปที่ 3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย	47
รูปที่ 3.2	แผนภาพสมดุลความร้อนและมวลของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซ ธรรมชาติกรณีศึกษา	59
รูปที่ 3.3	แผนภาพของกังหันก๊าซ	63
รูปที่ 3.4	แผนภาพของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง.....	66
รูปที่ 3.5	แผนภาพของกังหันไอน้ำ.....	69
รูปที่ 4.1	สัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยจำแนกตามขอบเขตที่ 1 และ 2	75
รูปที่ 4.2	สัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยจำนวน 3 โรงงานในปี พ.ศ. 2556 - 2557 โดยจำแนกตามแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	76
รูปที่ 4.3	ความเข้มข้นคาร์บอนเฉลี่ยของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ กรณีศึกษาจำนวน 3 โรงงาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556-2557	77
รูปที่ 4.4	ความเข้มข้นพลังงานเฉลี่ยของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ กรณีศึกษาจำนวน 3 โรงงาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556-2557	78
รูปที่ 4.5	แผนภาพกังหันก๊าซ.....	82
รูปที่ 4.6	แผนภาพเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง.....	92
รูปที่ 4.7	แผนภาพของกังหันไอน้ำ.....	99
รูปที่ 4.8	อัตราการทำลายเอ็กซีเซอียขององค์ประกอบของระบบ	109
รูปที่ 4.9	ประสิทธิภาพเอ็กซีเซอียขององค์ประกอบของระบบ	109
รูปที่ 4.10	ประสิทธิภาพพลังงานขององค์ประกอบของระบบ	111
รูปที่ 4.11	การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กซีเซอียจากงานวิจัยอื่น.....	112
รูปที่ 4.12	การประมาณศักยภาพการลดลงของค่าความเข้มข้นคาร์บอน.....	115
รูปที่ 4.13	การประมาณศักยภาพการลดลงของค่าความเข้มข้นพลังงาน	115

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ก๊าซเรือนกระจก เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีความร้อน จะดูดกลืนความร้อนในเวลากลางวันและจะแผ่รังสีความร้อนออกมาในเวลากลางคืน จึงทำให้อุณหภูมิของโลกไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน แต่เนื่องจากในปัจจุบันกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก กล่าวคือ ปรากฏการณ์ที่ความร้อนถูกกักเก็บไว้ในชั้นบรรยากาศเนื่องจากปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มมากขึ้นพอดี ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้นหรือที่เรียกว่า ภาวะโลกร้อน ซึ่งอาจนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิพื้นผิวโลกจะสูงขึ้น ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จากผลการศึกษาทางวิทยาศาสตร์พบว่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้เพิ่มมากขึ้นมาตลอดระหว่างปี พ.ศ. 2523-2553 และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จึงได้มีการจัดประชุมนานาชาติขึ้นและนำไปสู่การจัดตั้งคณะกรรมการการเจรจาระหว่างรัฐบาลด้านกรอบของอนุสัญญาว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Negotiating Committee for a Framework Convention on Climate Change: INC) ในปี พ.ศ. 2533 และได้มีการยกร่างอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC) ขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการควบคุมระดับความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกให้คงที่ อยู่ในระดับที่ปลอดภัยจากการแทรกแซงของมนุษย์ที่เป็นอันตรายต่อระบบภูมิอากาศ (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2558)

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (2556) ได้รายงานแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญในประเทศไทย ได้แก่ ภาคพลังงานร้อยละ 69.6 ภาคการเกษตรร้อยละ 22.6 ภาคกระบวนการอุตสาหกรรมร้อยละ 7.2 ภาคของเสียร้อยละ 4.1 และภาคการเปลี่ยนแปลงการใช้พื้นที่และป่าไม้ร้อยละ -3.4 ซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมภาคพลังงานที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศเช่นกัน นอกจากนั้นสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงานยังได้ศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกิจกรรมต่างๆในภาคพลังงานของประเทศไทย ได้แก่ การผลิตไฟฟ้า การขนส่ง อุตสาหกรรม และอื่นๆ พบว่าในปี พ.ศ. 2556 การผลิตไฟฟ้ามีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 40.1

งานวิจัยนี้ได้ตระหนักถึงความสำคัญของการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคพลังงานซึ่งเป็นภาคที่มีปริมาณการปล่อยสูงที่สุด โดยศึกษาโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษาในประเทศไทย ภายใต้วัตถุประสงค์ คือ ประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ทราบถึงปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติตัวอย่าง รวมไปถึงการประเมินค่าความเข้มข้นคาร์บอน และความเข้มข้นพลังงาน นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานหรือการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอีย และศึกษาเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าในงานวิจัย และสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าจากเทคโนโลยีที่ได้ศึกษาได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อประเมินความเข้มข้นพลังงานและความเข้มข้นคาร์บอนของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษาโรงไฟฟ้าเอกชนรายเล็กและรายใหญ่

1.2.2 เพื่อประเมินศักยภาพการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอีย

1.2.3 เพื่อเสนอแนะแนวทาง/มาตรการการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษาในประเทศไทย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ โดยใช้ข้อมูลโรงไฟฟ้าเอกชนรายใหญ่และรายเล็กตัวอย่างจำนวน 3 โรงงาน เก็บรวบรวมข้อมูลเป็นระยะเวลา 2 ปีระหว่างปี พ.ศ. 2556-2557

1.3.2 ประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกครอบคลุมเฉพาะแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ขอบเขตที่ 1 (แหล่งปล่อยทางตรง) และขอบเขตที่ 2 (แหล่งปล่อยทางอ้อมจากการใช้พลังงาน) เท่านั้น (ไม่รวมแหล่งดูดกลับก๊าซเรือนกระจก) โดยหน่วยของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก คือ ตัน (หรือกิโลกรัม) คาร์บอนไดออกไซด์ (ton CO₂)

1.3.3 วิธีการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อ้างอิงตามแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (พัฒนาโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน)) ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1 พ.ศ. 2556 สถาบันปิโตรเลียมแห่งสหรัฐอเมริกา (American Petroleum Institute : API) ค.ศ. 2009 สถาบันทรัพยากรแห่งโลก (World Resources Institute :

WRI) ค.ศ. 2006 และคณะกรรมการนักธุรกิจเพื่อสิ่งแวดล้อมโลก (World Business Council for Sustainable Development : WBCSD) ค.ศ. 2006

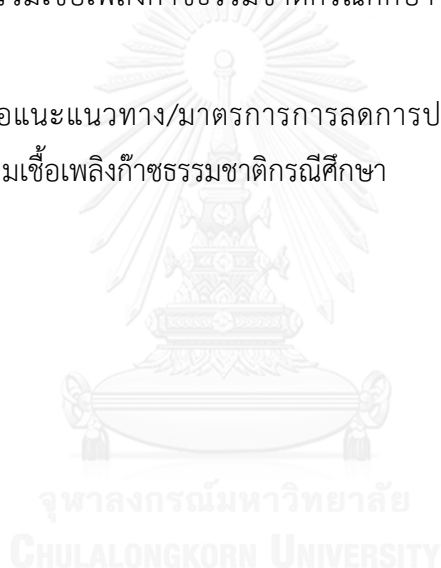
1.3.4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานด้วยการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอซีของระบบ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ค่าปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าความเข้มคาร์บอนและค่าความเข้มพลังงาน ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษากรณีศึกษาโรงไฟฟ้าเอกชนรายเล็กและรายใหญ่

1.4.2 ได้ค่าศักยภาพการปรับปรุงของอุปกรณ์/เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษา เพื่อนำไปสู่การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.4.3 ได้ข้อเสนอแนะแนวทาง/มาตรการการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษา



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

2.1.1 ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas)

ก๊าซเรือนกระจก เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นรังสีความร้อน หรือรังสีอินฟราเรดได้ดี ก๊าซเหล่านี้มีความจำเป็นต่อการรักษาอุณหภูมิในบรรยากาศของโลกให้คงที่ ซึ่งหากบรรยากาศโลกไม่มีก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ จะทำให้อุณหภูมิในตอนกลางวันนั้นร้อนจัดและในตอนกลางคืนนั้นหนาวจัด เนื่องจากก๊าซเหล่านี้ดูดซับคลื่นรังสีความร้อนไว้ในเวลากลางวัน แล้วค่อยๆแผ่รังสีความร้อนออกมาในเวลากลางคืน ทำให้อุณหภูมิในบรรยากาศโลกไม่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน

ก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ได้แก่ ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โอโซน มีเทน ไนตรัสออกไซด์ สารซีเอฟซี เป็นต้น แต่ก๊าซเรือนกระจกที่ถูกควบคุมโดยพิธีสารเกียวโต มีเพียง 6 ชนิดเท่านั้น ซึ่งก๊าซเหล่านี้เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (anthropogenic greenhouse gas emission) เท่านั้น ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซมีเทน (CH₄) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC) ก๊าซเพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFC) และก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF₆) ทั้งนี้ ยังมีก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง คือ สารซีเอฟซี (CFC หรือ Chlorofluorocarbon) ซึ่งใช้เป็นสารทำความเย็นและใช้ในการผลิตโฟม แต่ไม่ถูกกำหนดในพิธีสารเกียวโต เนื่องจากเป็นสารที่ถูกจำกัดการใช้ในพิธีสารมอนทรีออลแล้ว

การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกนั้น ส่งผลให้ชั้นบรรยากาศมีความสามารถในการกักเก็บรังสีความร้อนได้มากขึ้น ผลที่ตามมาคืออุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกนั้น ไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดยังมีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Global Warming Potential : GWP) ที่แตกต่างกัน ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนนี้ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนของโมเลกุลและขึ้นอยู่กับอายุของก๊าซนั้นๆ ในบรรยากาศ และจะคิดเทียบกับการแผ่รังสีความร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เช่น 20 ปี 50 ปี หรือ 100 ปี โดยค่า GWP ของก๊าซเรือนกระจกต่างๆ ในช่วงเวลา 100 ปี ของก๊าซเรือนกระจกต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2558)

ตารางที่ 2.1 ค่าศักยภาพการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของก๊าซเรือนกระจกชนิดต่างๆ ในช่วงเวลา 100 ปี (เท่าของคาร์บอนไดออกไซด์)

Greenhouse gas	Lifetime (years)	Global Warming Potential (CO ₂ -eq)
CO ₂	200-450	1
CH ₄	12	25
N ₂ O	114	298
CFC-12	100	10,900
PFC-14	50,000	7,390
SF ₆	3,200	22,800

ที่มา : (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007)

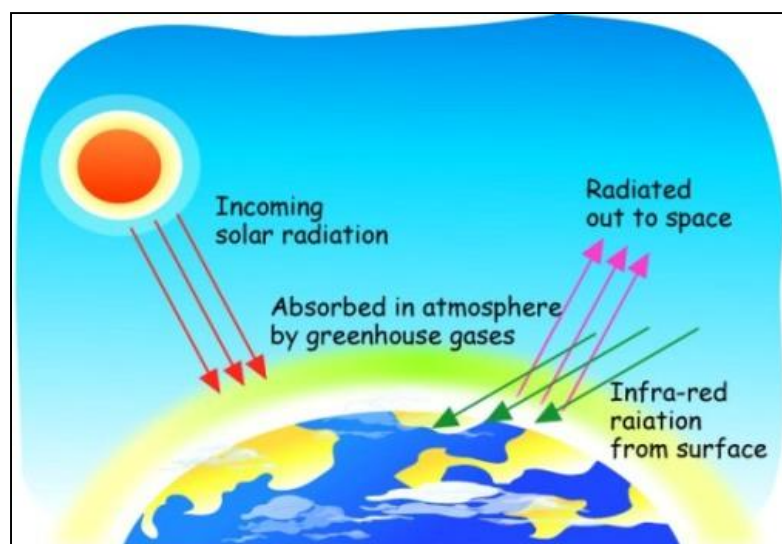
2.1.2 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change)

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศอันเป็นผลจากกิจกรรมของมนุษย์ที่เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของบรรยากาศโลกโดยตรงหรือโดยอ้อมและที่เพิ่มเติมจากความแปรปรวนของสภาวะอากาศตามธรรมชาติที่สังเกตได้ในช่วงระยะเวลาเดียวกัน ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน ฤดูกาล ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงอยู่ของสิ่งมีชีวิตที่จะต้องปรับตัวให้เข้ากับสภาพภูมิอากาศในบริเวณที่สิ่งมีชีวิตนั้นอาศัยอยู่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งเป็นแหล่งพลังงานสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมในช่วง 200 ปีที่ผ่านมา เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกหรือภาวะโลกร้อน

ภูมิอากาศของโลกเกิดจากการไหลวนของพลังงานจากดวงอาทิตย์ พลังงานจากดวงอาทิตย์นี้ส่วนใหญ่เข้ามาสู่โลกในรูปแสงแดด โดยพลังงานที่เดินทางมาสู่โลกได้สะท้อนกลับไปสู่ห้วงอวกาศร้อยละ 30 แต่อีกร้อยละ 70 ได้ถูกดูดซับผ่านชั้นบรรยากาศลงมาให้ความอบอุ่นแก่พื้นผิวโลก โลกต้องส่งพลังงานเหล่านี้กลับสู่อวกาศในรูปของแสงอินฟราเรด เนื่องจากโลกมีบรรยากาศที่เย็นกว่าดวงอาทิตย์ มากจึงไม่สามารถส่งพลังงานในรูปแสงได้เช่นเดียวกับดวงอาทิตย์ แต่จะส่งกลับพลังงานในรูปของอินฟราเรดหรือรังสีความร้อน การที่โลกได้สะท้อนเอาความร้อนออกไปจะช่วยทำให้โลกไม่ร้อนจนเกินไป

ก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศเป็นสิ่งขวางกั้นแสงอินฟราเรดที่โลกสะท้อนกลับจากพื้นผิวสู่บรรยากาศได้เหมือนกับแสงสว่าง ดังนั้นพลังงานที่ส่งออกจากพื้นผิวของโลกจึงเป็นการส่งออกโดยกระแสมลและเมฆที่อยู่บนชั้นบรรยากาศที่หนาแน่นไปด้วยก๊าซเรือนกระจก ปรากฏการณ์ที่ความร้อน

ถูกกักเก็บไว้ในชั้นบรรยากาศนี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์เรือนกระจก” (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2558)



รูปที่ 2.1 การสะท้อนกลับของรังสีความร้อน

ที่มา : (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2558)

2.1.3 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับโลก

การปฏิวัติอุตสาหกรรมตั้งแต่ ค.ศ. 1750 เป็นต้นมา ทำให้มีการนำพลังงานฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอนมาใช้ การใช้พลังงานเหล่านี้ทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ โดยปริมาณการปล่อยเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 356 ส่วนในล้านส่วน ตั้งแต่ ค.ศ. 1750 จนถึงปัจจุบัน และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า หรือ 700 ส่วนในล้านส่วนภายใน ค.ศ. 2100

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่นๆ เช่น มีเทน (CH_4) และไนตรัสออกไซด์ (N_2O) มีอยู่ในบรรยากาศโลกในปริมาณน้อย มีคุณสมบัติในการดูดกลืนพลังงานความร้อนจึงเรียกว่าก๊าซเรือนกระจก เมื่อก๊าซเหล่านี้มีปริมาณมากขึ้น ทำให้บรรยากาศโลกดูดกลืนพลังงานความร้อนไว้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมดุลของพลังงานโลกเปลี่ยนแปลงไป โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้นเกิดผลกระทบต่อเนื่องนานปีการ เช่น ฤดูกาลและปริมาณน้ำฝนเปลี่ยนแปลงไป ระดับน้ำทะเลสูงขึ้นเนื่องจากน้ำแข็งขั้วโลกละลาย น้ำทะเลขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิสูงขึ้น เกิดพายุและภัยพิบัติที่รุนแรงขึ้นและถี่ขึ้น เป็นต้น

คณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC) ได้คาดการณ์ผลกระทบที่คาดว่าจะ

เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกไว้ในปี 2001 ดังแสดงในตารางที่ 2.2 (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2558)

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก

ความเปลี่ยนแปลงช่วงศตวรรษที่ 21	ตัวอย่างของผลกระทบ
<ul style="list-style-type: none"> ■ วันอากาศร้อนเพิ่มมากขึ้น ■ กระแสคลื่นความร้อนรุนแรงขึ้น 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ปัญหาสุขภาพที่รุนแรงขึ้น ■ สัตว์ป่าและสัตว์เลี้ยงเกิดความเครียดจากอากาศร้อน ■ พืชผลเสียหาย
<ul style="list-style-type: none"> ■ เกิดเหตุการณ์รุนแรงด้านภูมิอากาศมากขึ้น 	<ul style="list-style-type: none"> ■ น้ำท่วม ดินถล่ม ■ การกัดเซาะหน้าดิน ■ พืชผลเสียหาย
<ul style="list-style-type: none"> ■ พายุเขตร้อนทวีความรุนแรงขึ้น 	<ul style="list-style-type: none"> ■ เพิ่มความเสี่ยงต่อคุณภาพชีวิต ■ เกิดโรคระบาด ■ พืชผลเสียหาย
<ul style="list-style-type: none"> ■ ภัยแล้งและน้ำท่วมรุนแรงขึ้น 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ผลผลิตการเกษตรลดลง ■ ศักยภาพด้านการผลิตไฟฟ้าและพลังงานลดลง
<ul style="list-style-type: none"> ■ ภูมิอากาศในฤดูมรสุมหน้าร้อนเขตเอเชียแปซิฟิกแปรปรวนมากขึ้น 	<ul style="list-style-type: none"> ■ เกิดอุทกภัยและภัยแล้งที่รุนแรงขึ้นในเขตเอเชียและเขตอบอุ่น

ที่มา : (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2558)

2.1.4 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อประเทศไทย

ประเทศไทยได้ลงนามและให้สัตยาบันในอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และได้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มประเทศที่ไม่มีพันธกรณีในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก หรือ Non-Annex เนื่องจากเมื่อเทียบกับประเทศอุตสาหกรรมและประเทศกำลังพัฒนาอื่นๆ แล้ว ประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในสัดส่วนที่น้อยมากคิดเป็นร้อยละ 0.6 ของการปล่อยก๊าซชนิดนี้จากทั่วทุกประเทศ อีกทั้งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อคนมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของโลก ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะปล่อยก๊าซเรือนกระจกในสัดส่วนที่น้อยก็ตามแต่ก็ยังได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเช่นกัน (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2558)

2.2 การประเมินความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงาน

2.2.1 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (Carbon Footprint for Organization : CFO)

การกำหนดขอบเขตการดำเนินงาน

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากกิจกรรมต่างๆ ขององค์กร เช่น การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง การใช้ไฟฟ้า การจัดการของเสีย และการขนส่ง คำนวณออกมาในรูปแบบตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยพิจารณาจาก 3 ส่วนหลักดังนี้

ขอบเขตที่ 1 : การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงขององค์กร (Direct Greenhouse Gas Emission) ประกอบด้วย

- 1) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการเผาไหม้ที่อยู่กับที่ ตัวอย่างเช่น
 - การผลิตไฟฟ้า ความร้อนและไอน้ำเพื่อใช้เองภายในองค์กรและ/หรือเพื่อการส่งออก หรือ แจกจ่ายให้แก่ผู้ใช้งานนอกขอบเขตองค์กรและการสูญเสียที่เกิดขึ้นในระหว่างการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า ความร้อนหรือไอน้ำ
 - การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจากการใช้งานของอุปกรณ์และ/หรือเครื่องจักรที่องค์กรเป็นเจ้าของ หรือเช่าเหมามา แต่องค์กรรับผิดชอบค่าใช้จ่ายของน้ำมันเชื้อเพลิง
 - การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหุงต้มภายในองค์กร โดยองค์กรเป็นผู้รับผิดชอบการดำเนินงานดังกล่าว
- 2) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่มีการเคลื่อนที่ตัวอย่างเช่น
 - การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจากกิจกรรมการขนส่งของยานพาหนะที่องค์กรเป็นเจ้าของ หรือเช่า เมา แต่องค์กรรับผิดชอบค่าใช้จ่ายของน้ำมันเชื้อเพลิง
 - การปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการรั่วไหลและอื่นๆ (Fugitive emissions) ตัวอย่างเช่น การรั่วซึมของก๊าซเรือนกระจกออกสู่บรรยากาศภายนอกที่เกิดขึ้น บริเวณรอยเชื่อมต่อท่อของอุปกรณ์ที่ตั้งอยู่ภายในองค์กร เช่น สารทำความเย็น หรือการ รั่วไหลของก๊าซเรือนกระจกจากอุปกรณ์ต่างๆที่ตั้งอยู่ภายในองค์กร ในขณะที่ทำการซ่อมบำรุง การใช้อุปกรณ์ดับเพลิงประเภทที่สามารถก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกได้ ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียและหลุมฝังกลบ ก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการใช้ปุ๋ยหรือ สารเคมีเพื่อการชักล้างหรือทำความสะอาดภายใน

องค์กร และการปล่อยและดูดกลับก๊าซ เรือนกระจกโดยตรงของชีวมวล เช่น ดินและป่าไม้

ขอบเขตที่ 2 : การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้พลังงาน (Indirect Greenhouse Gas Emission) ประกอบด้วย ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการผลิตไฟฟ้า ความร้อนหรือไอน้ำที่ถูกนำเข้ามาจากภายนอกเพื่อใช้งานภายในองค์กร

ขอบเขตที่ 3 : การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่นๆ ประกอบด้วย ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆนอกเหนือจากที่ระบุในประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 ที่เกิดเนื่องจากการใช้สินค้า บริการหรือการจ้างเหมาช่วงตัวอย่างของกิจกรรมที่ก่อให้เกิดการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่นๆ ประกอบด้วย

1) การเดินทางของพนักงานเพื่อการประชุมสัมมนาและติดต่อธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับองค์กรด้วยระบบการขนส่งประเภทต่างๆ เช่น ยานพาหนะส่วนตัว ยานพาหนะที่ใช้ภายในองค์กรแต่จ้างเหมาบริการรวมน้ำมันเชื้อเพลิงจากภายนอกองค์กร รถไฟ เรือโดยสาร เครื่องบิน

2) การเดินทางไป-กลับจากที่พักถึงองค์กรเพื่อการทำงานของพนักงานด้วยยานพาหนะส่วนตัวหรือยานพาหนะที่ใช้ภายในองค์กรแต่จ้างเหมาบริการรวมน้ำมันเชื้อเพลิงจากภายนอกองค์กร หรือระบบขนส่งสาธารณะ

3) การขนส่งผลิตภัณฑ์วัตถุดิบคนงานหรือกากของเสียที่เกิดจากการจ้างเหมาบริการโดยหน่วยงานหรือองค์กรอื่นภายนอกขอบเขตขององค์กรที่ได้กำหนดไว้

4) กิจกรรมต่างๆที่สามารถก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งเกิดจากการจ้างเหมารับช่วงดำเนินงานโดยหน่วยงานหรือองค์กรอื่นภายนอกขอบเขตขององค์กรที่ได้กำหนดไว้ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อการหุงต้มจากกิจกรรมการประกอบอาหารภายในโรงอาหารโดยการจ้างเหมาจากบุคคลหน่วยงานหรือองค์กรภายนอก

5) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกำจัดกากของเสียและการบำบัดน้ำเสียโดยหน่วยงานหรือองค์กรอื่นภายนอกขอบเขตขององค์กรที่ได้กำหนดไว้

6) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์หรือบริการขององค์กรในช่วงการใช้งานและช่วงการจัดการซาก

7) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าทางอ้อมของบ้านพักพนักงานภายในองค์กร

8) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมการใช้น้ำประปาภายในองค์กร

9) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัสดุสำนักงานที่มีการใช้ภายในองค์กร เช่น กระดาษ หมึก พิมพ์ดินสอ ปากกา ยางลบ (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2556)

การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ระบุแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจก
 2. การคัดเลือกวิธีการคำนวณ องค์กรต้องคัดเลือกและใช้วิธีการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ออกมาอย่างถูกต้อง ไม่ขัดแย้งกัน และช่วยลดความไม่แน่นอนอย่างสมเหตุสมผล วิธีการคำนวณแบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

- จากการตรวจวัด ทำการตรวจวัดปริมาณการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกโดยตรง ณ แหล่งปล่อยหรือดูดซับก๊าซเรือนกระจกอย่างต่อเนื่อง หรือเว้นช่วงเป็นระยะ โดยใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์การตรวจวัดที่ได้ มาตรฐาน ตามวิธีการตามมาตรฐานสากล ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลปริมาณการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกที่มีความถูกต้องสูง
- จากการคำนวณ การหาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วยวิธีการคำนวณสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การสร้างโมเดล หรือการทำสมการมวลสารสมดุล หรือการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ facility-specific หรือ การคำนวณโดยใช้ข้อมูลกิจกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในองค์กร คูณกับค่าแฟกเตอร์การปล่อยหรือดูดกลับก๊าซเรือนกระจก และแสดงผลให้อยู่ในรูปของตัน (กิโลกรัม) คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂ equivalent) ดังแสดงต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณก๊าซเรือนกระจก} = \text{ข้อมูลกิจกรรม} \times \text{ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก}$$

2.2.2 ความเข้มข้นคาร์บอน (Carbon Intensity)

ความเข้มข้นคาร์บอน คือ ปริมาณการปล่อยคาร์บอนต่อหนึ่งหน่วยผลผลิต เป็นดัชนีชี้วัดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ เป็นปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นเพื่อให้ได้มาซึ่งผลผลิตหนึ่งหน่วย สำหรับอุตสาหกรรมไฟฟ้าสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นคาร์บอนได้จากปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) ต่อปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้

จากการค้นคว้า เมื่อพิจารณาตามเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า พบว่าเทคโนโลยีกังหันก๊าซ (เชื้อเพลิงดีเซล) มีค่าความเข้มข้นคาร์บอนสูงที่สุด เท่ากับ 0.970 kgCO₂/kWh และเทคโนโลยีพลังความร้อนร่วม (เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ) มีค่าความเข้มข้นคาร์บอนต่ำที่สุด เท่ากับ 0.426 kgCO₂/kWh ดังแสดงในตารางที่ 2.3 เมื่อพิจารณาเฉพาะชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิต พบว่าเชื้อเพลิงถ่านหินและ

ลิแกนด์มีค่าความเข้มข้นคาร์บอนสูงสุด เท่ากับ 0.920 kg CO₂/kWh และก๊าซธรรมชาติมีค่าความเข้มข้นคาร์บอนต่ำที่สุด เท่ากับ 0.503 kgCO₂/kWh ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ค่าความเข้มข้นคาร์บอนจำแนกตามเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้า

เทคโนโลยีการผลิต (เชื้อเพลิง)		CO ₂ intensity (kg CO ₂ /kWh)
พลังความร้อนร่วม	ก๊าซธรรมชาติ	0.426
	ก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซล	0.469
พลังความร้อน	ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเตาและน้ำมันดีเซล	0.622
	ก๊าซธรรมชาติและน้ำมันเตา	0.600
	ถ่านหิน/ลิแกนด์	0.914
กังหันก๊าซ	น้ำมันดีเซล	0.970
เครื่องยนต์ดีเซล	น้ำมันดีเซล	0.842

ที่มา : (สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, 2553)

ตารางที่ 2.4 ค่าความเข้มข้นคาร์บอนจำแนกตามเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า

ชนิดเชื้อเพลิง	CO ₂ intensity (kg CO ₂ /kWh)
ก๊าซธรรมชาติ	0.503
น้ำมันดีเซล	0.620
น้ำมันเตา	0.752
ถ่านหินและลิแกนด์	0.920

ที่มา : (สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, 2553)

2.2.3 ความเข้มข้นพลังงาน (Energy Intensity)

ความเข้มข้นพลังงาน เป็นค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วยของมูลค่าการผลิตในแต่ละอุตสาหกรรม เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและสามารถนำมาประเมินประสิทธิภาพในการใช้พลังงานได้ ทั้งในระดับมหภาคและระดับจุลภาค กล่าวคือ ตั้งแต่ระดับประเทศ ระดับอุตสาหกรรม ระดับกลุ่มอุตสาหกรรมย่อย ระดับกระบวนการผลิต จนกระทั่งระดับผู้ประกอบการผลิต สำหรับอุตสาหกรรมไฟฟ้าสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นพลังงานได้จากปริมาณการใช้พลังงานต่อปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558)

จากการค้นคว้าพบว่าเทคโนโลยีพลังความร้อนร่วม (เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ) มีค่าความเข้มพลังงานต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีพลังความร้อน ไม่ว่าจะใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเตาหรือถ่านหิน ดังแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความเข้มพลังงานตามเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า

เทคโนโลยีการผลิต (เชื้อเพลิง)		Energy intensity (GJ/MWh)
พลังความร้อนร่วม	ก๊าซธรรมชาติ	7.947
พลังความร้อน	ก๊าซธรรมชาติและน้ำมันเตา	9.665
	ถ่านหิน	10.480

ที่มา : (Electricity Generating Authority of Thailand, 2014)

2.3 อุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า

2.3.1 ประเภทโรงไฟฟ้า

2.3.1.1 ประเภทของโรงไฟฟ้าแบ่งตามการใช้เชื้อเพลิง จำแนกได้ดังนี้ (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2558)

1) ประเภทใช้เชื้อเพลิง

- ก๊าซธรรมชาติ ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม, โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ
- ถ่านหิน ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังความร้อน
- น้ำมันดีเซล ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม, โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ, โรงไฟฟ้าดีเซล
- น้ำมันเตา ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังความร้อน

2) ประเภทไม่ใช้เชื้อเพลิง

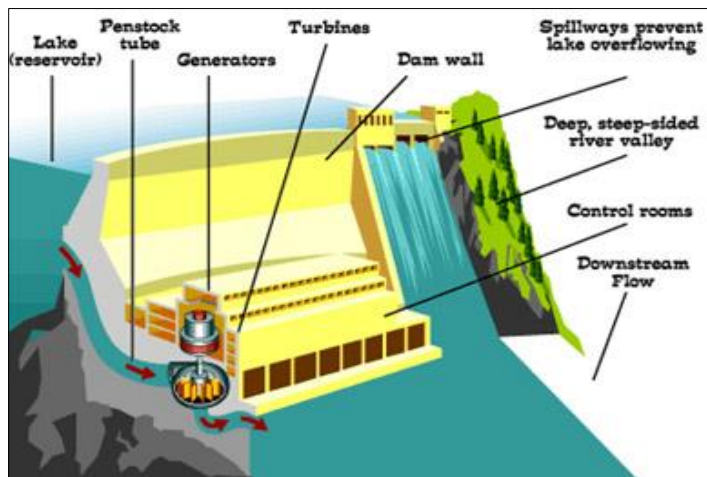
- พลังน้ำจากเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำ
- พลังธรรมชาติจากแหล่งพลังงานที่ไม่หมดสิ้น ได้แก่ พลังแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังความร้อนใต้พิภพ

2.3.1.2 ประเภทของโรงไฟฟ้าแบ่งตามเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้า จำแนกได้ดังนี้

1) โรงไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydro Power Plant)

หลักการทำงาน คือ การสร้างเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำให้มีระดับน้ำที่สูงกว่าระดับของโรงไฟฟ้า ทำการปล่อยน้ำปริมาณที่ต้องการไปตามท่อส่งน้ำไปยังโรงไฟฟ้าที่อยู่ต่ำกว่า พลังน้ำที่ปล่อยลงไปนั้น

จะไปหมุนเพลลาของกังหันไอน้ำที่ต่อกับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เกิดการเหนี่ยวนำได้กระแสไฟฟ้าออกมา ดังรูปที่ 2.2

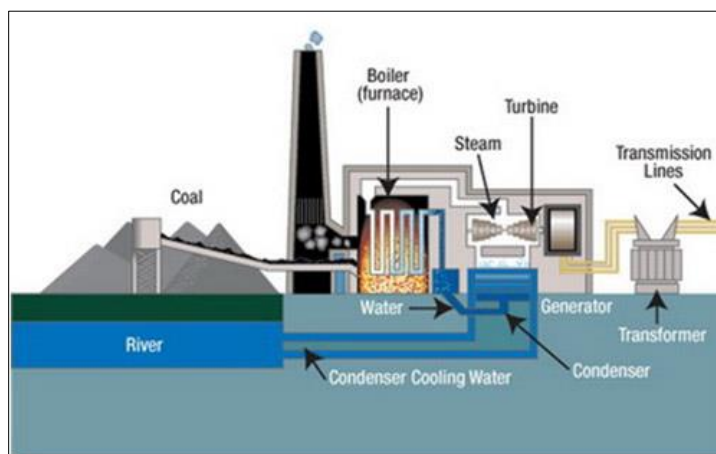


รูปที่ 2.2 โรงไฟฟ้าพลังน้ำ

ที่มา : (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2558)

2) โรงไฟฟ้าพลังความร้อน (Thermal Power Plant)

โรงไฟฟ้าพลังความร้อนเป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า ชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้ ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเตา ถ่านหิน และดีเซล หลักการทำงาน คือ เชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้เพื่อให้เกิดการสันดาปและจะได้ความร้อนออกมา ความร้อนจะไปเปลี่ยนสถานะของน้ำกลายเป็นไอน้ำ และแรงดันไอน้ำจะทำการหมุนเพลลาของกังหันไอน้ำซึ่งต่อกับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เกิดการเหนี่ยวนำได้กระแสไฟฟ้าออกมา ดังรูปที่ 2.3



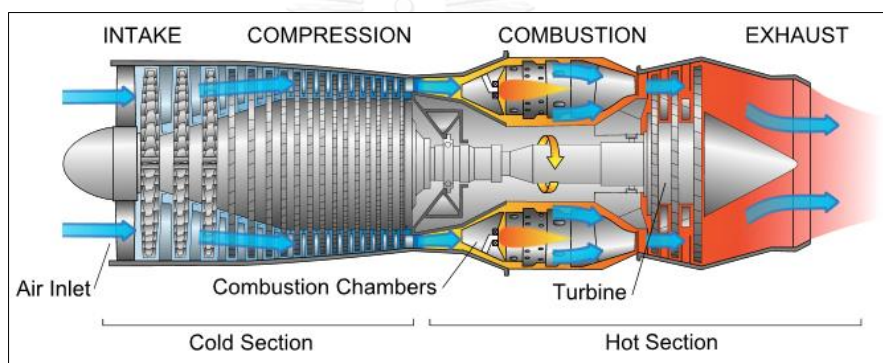
รูปที่ 2.3 โรงไฟฟ้าพลังความร้อน

ที่มา : (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2558)

โรงไฟฟ้าพลังความร้อนสามารถแบ่งได้หลายประเภท เช่น โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ (Gas Turbine Power Plant) โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม (Combined Cycle Power Plant) และ โรงไฟฟ้าดีเซล (Diesel Power Plant) เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1) โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ (Gas Turbine Power Plant)

หลักการทำงาน คือ จะเกิดการเผาไหม้ของส่วนผสมระหว่างก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันดีเซล กับอากาศความดันสูง (Compressed Air) จากเครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) ในห้องเผาไหม้ ไอร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้นั้นมีความดันและอุณหภูมิสูง จะไปขับเคลื่อนเพลากังหันก๊าซที่ต่ออยู่กับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เกิดการเหนี่ยวนำได้กระแสไฟฟ้าออกมา ดังรูปที่ 2.4 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2558)



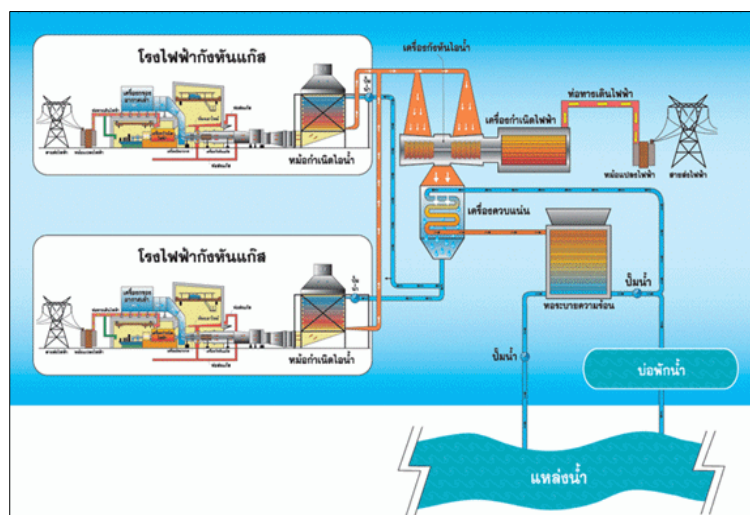
รูปที่ 2.4 เครื่องกังหันก๊าซ

ที่มา : (Powerplant, 2558)

2.2) โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม (Combined-Cycle Power Plant)

โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้การทำงานร่วมกันระหว่างระบบกังหันก๊าซ (Gas turbine) และระบบกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) หลักการทำงาน คือ เชื้อเพลิงก๊าซจะถูกส่งเข้าไปยังห้องเผาไหม้ของเครื่องกังหันก๊าซ โดยมีอากาศที่ถูกอัดด้วยความดันสูง 8-10 เท่าจากเครื่องอัดอากาศมาช่วยเผาไหม้ ทำให้เกิดการขยายตัวของก๊าซร้อนที่มีอุณหภูมิสูงส่งเข้าไปขับเคลื่อนกังหันก๊าซ เพื่อขับเคลื่อนและจุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อกันบนเพลาร่วมกัน ก๊าซร้อนที่ขับเคลื่อนกังหันก๊าซเสร็จจะถูกส่งออกไปยังเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง ได้ไอน้ำที่มีความดันสูง ไอน้ำที่มีความดันสูงนี้จะไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนไอน้ำที่ขับเคลื่อนกังหันไอน้ำแล้ว ยังคงมีความดันสูงอยู่จะไหลผ่านวาล์วความดัน ซึ่งไอน้ำส่วนนี้ก็จะสามารถนำไปใช้ขับเคลื่อนกังหันได้อีกครั้งหนึ่ง ส่วนไอน้ำที่ความดันลดลงก็จะถูกส่งเข้าไปยังเครื่องควบแน่น ซึ่งจะระบายความร้อนของไอ

น้ำด้วยน้ำหล่อเย็น ไอน้ำจะถูกควบแน่นเป็นน้ำป้อนส่งไปยังถังพักน้ำเพื่อส่งไปต้มต่อไปยังหม้อต้มไอน้ำ
 ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

ที่มา : (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2558)

ข้อเด่นของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

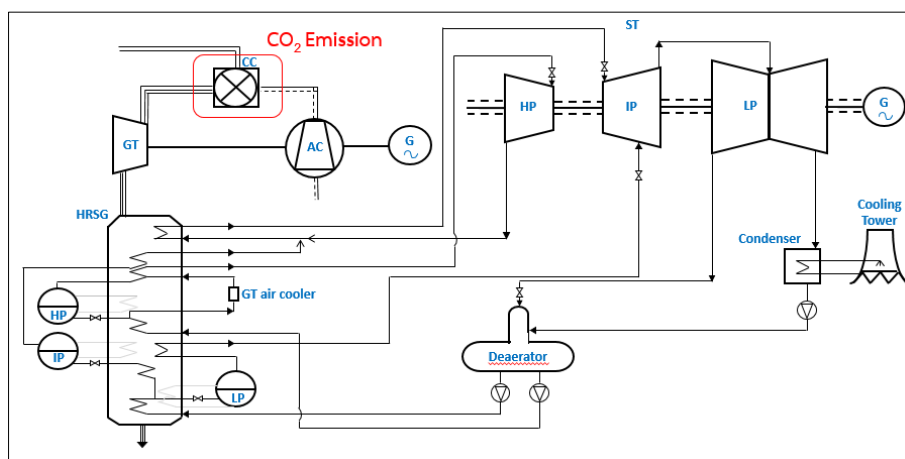
- ประหยัดค่าเชื้อเพลิงในหน่วยผลิตไฟฟ้าจากกังหันไอน้ำ
- มีความเหมาะสมในการเพิ่มกำลังผลิตไฟฟ้าและเสริมความมั่นคงต่อระบบไฟฟ้า
- สามารถออกแบบให้สามารถใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติและน้ำมันเตาได้
- ประสิทธิภาพรวมของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมสูงถึงร้อยละ 50 เมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนทั่วไปซึ่งมีค่าเพียงร้อยละ 40
- เมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน พบว่าโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า เนื่องจากหน่วยผลิตไฟฟ้ากังหันไอน้ำไม่ได้ใช้เชื้อเพลิงจากภายนอก

ข้อด้อยของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

- ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมนั้นมีราคาสูง
- กรณีใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสำรองหรือโรงไฟฟ้าบางแห่งมีสัญญาซื้อขายเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกับบริษัทต่างประเทศ ทำให้เสียเงินตราในการนำเข้าจากต่างประเทศและทำให้เงินตรารั่วไหลออกนอกประเทศ (ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2558)

แหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

แหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงสำหรับการผลิตไฟฟ้าเป็นหลัก โดยแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดจากห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง (Combustion Chamber) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เชื้อเพลิงที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

▪ ก๊าซธรรมชาติ (Natural gas) เป็นเชื้อเพลิงปิโตรเลียมที่เกิดจากการทับถมของสิ่งมีชีวิต เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เมื่อเข้าสู่กระบวนการในโรงแยกก๊าซธรรมชาติจะได้ผลิตภัณฑ์ ได้แก่ มีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทน ก๊าซโซลินธรรมชาติและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยองค์ประกอบหลักคือก๊าซมีเทนมากถึงร้อยละ 70 ขึ้นไป ก๊าซธรรมชาติไม่มีสีและไม่มีกลิ่น ดังนั้นในการขนส่งหรือในกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติจึงต้องมีการเติมสารที่มีกลิ่นลงไปเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน มีความเบาอากาศ เมื่อรั่วไหลจะลอยขึ้นสู่ที่สูงและฟุ้งกระจายไปในอากาศอย่างรวดเร็ว ติดไฟได้ และเป็นเชื้อเพลิงสะอาด เผาไหม้สมบูรณ์กว่าจึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียมประเภทอื่น (บริษัทผลิตไฟฟ้าจำกัด (มหาชน), 2558) และ (วิชาการตอทคอม, 2558)

องค์ประกอบในก๊าซธรรมชาติ ประกอบด้วย

1. ก๊าซมีเทน (Methane, C1) ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนในโรงงานอุตสาหกรรม ใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์
2. ก๊าซอีเทน (Ethane, C2) ใช้ผลิตเอทิลีน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตเม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีน (PE) เพื่อใช้ผลิตขวดพลาสติก

3. ก๊าซโพรเพน (Propane, C3) ใช้ผลิตโพรพิลีนซึ่งเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เพื่อใช้ในการผลิตเม็ดพลาสติกโพลีโพรพิลีน (PP)
4. ก๊าซบิวเทน (Butane, C4) สามารถนำมาผสมกับก๊าซโพรเพนตามอัตราส่วนอัดใส่ถังเป็นก๊าซปิโตรเลียมเหลว
5. ก๊าซโซลีนธรรมชาติ (C5+) ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมตัวทำละลาย ใช้ผสมเป็นน้ำมันเบนซินสำเร็จรูปและใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี
6. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide, CO₂) เมื่อผ่านกระบวนการแยกแล้วจะถูกนำไปทำให้อยู่ในสภาพของแข็ง เรียกว่า น้ำแข็งแห้ง นำไปใช้ในอุตสาหกรรมถนอมอาหาร เป็นต้น (บริษัทสกนอินเตอร์จำกัด (มหาชน), 2558)

สถานะของก๊าซธรรมชาติ

1. ก๊าซธรรมชาติที่ขนส่งโดยทางท่อ ชื่อทางการตลาดว่า Sale Gas คือ ก๊าซธรรมชาติที่มีก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบหลัก ถูกขนส่งด้วยระบบท่อเพื่อส่งให้แก่ผู้ใช้ที่เป็นลูกค้านำไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือในโรงงานอุตสาหกรรม
2. ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ (Natural Gas for Vehicles : NGV) คือ รูปแบบของการใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน
3. ก๊าซธรรมชาติเหลว (Liquid Petroleum Gas : LPG) ในการขนส่งก๊าซธรรมชาติจากแหล่งผลิตไปยังบริเวณที่ใช้ปกติจะขนส่งโดยระบบท่อ แต่ในกรณีที่ระยะทางระหว่างแหล่งผลิตกับบริเวณที่ใช้มีระยะทางไกลเกินกว่า 2,000 กิโลเมตร การวางท่อส่งก๊าซจะต้องใช้เงินลงทุนเป็นจำนวนมาก จึงมีการขนส่งด้วยเรือที่ถูกออกแบบไว้โดยเฉพาะ (วิชาการดอทคอม, 2558)

- ถ่านหิน (Coal) คือ หินตะกอนชนิดหนึ่งและเป็นแร่เชื้อเพลิงที่สามารถติดไฟได้ มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำ ถ่านหินประกอบด้วยธาตุที่สำคัญ 4 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจน นอกจากนั้นยังมีธาตุหรือสารอื่น เช่น กำมะถันเจือปนเล็กน้อย ถ่านหินที่มีจำนวนคาร์บอนสูงและมีธาตุอื่น ๆ ต่ำ เมื่อนำมาเผาจะให้ความร้อนมาก ถือว่าเป็นถ่านหินคุณภาพดี

แหล่งถ่านหินในประเทศไทยพบกระจายอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศ แต่ส่วนใหญ่อยู่ในเขตภาคเหนือ ปัจจุบันมีพื้นที่ผลิตถ่านหินทั้งหมด 27 แห่ง โดยถ่านหินส่วนใหญ่ที่พบร้อยละ 99 มีคุณภาพอยู่ในชั้นลิกไนต์ (Lignite) และซับบิทูมินัส (sub-bituminous) ซึ่งให้ความร้อนไม่สูงนัก ประเทศไทยมีการนำเข้าถ่านหินจากต่างประเทศเนื่องจากถ่านหินในประเทศไม่เพียงพอต่อความ

ต้องการใช้ โดยส่วนใหญ่นำเข้ามาจากประเทศออสเตรเลีย อินโดนีเซีย จีน เวียดนาม พม่า และลาว และส่วนใหญ่เป็นการนำเข้าถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous) เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าถึงร้อยละ 76.8 และอุตสาหกรรมซีเมนต์ร้อยละ 16.3 นอกนั้นจะนำไปใช้ในด้านอื่นๆ เช่น การบ่มใบยาสูบ อุตสาหกรรมปูนขาว กระจก เส้นใย และอาหาร เป็นต้น (บริษัทผลิตไฟฟ้าจำกัด (มหาชน), 2558)

- น้ำมันดีเซล (Diesel Fuel) น้ำมันเกิดจากซากพืชและซากสัตว์ที่ถูกฝังทับถมไว้ในชั้นหินตะกอน ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนในปริมาณมาก เมื่อทำการเผาไหม้จะได้พลังงานสูง น้ำมันดิบที่มีกำมะถันเจือปนน้อยถือว่าเป็นน้ำมันดี จึงมีราคาแพงเพื่อใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงต่างๆ

น้ำมันดิบสามารถนำไปผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงได้หลายชนิด ได้แก่ น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด น้ำมันเตาและยางมะตอย เป็นต้น สำหรับการผลิตไฟฟ้าเราใช้น้ำมันเตาหรือน้ำมันดีเซลสำหรับใช้ในเตาเผาหรือต้มน้ำในหม้อต้มไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า (บริษัทผลิตไฟฟ้า จำกัด (มหาชน), 2558)

ในการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้านั้น เราจำเป็นต้องทราบค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อ้างอิงตามแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Emission factor) ของเชื้อเพลิงฟอสซิล

เชื้อเพลิงฟอสซิล	หน่วย	ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมต่อหน่วย)
ก๊าซธรรมชาติ	ลูกบาศก์ฟุต	0.0572
ถ่านหิน	กิโลกรัม	1.05747
น้ำมันดีเซล	ลิตร	2.698722
น้ำมันเตา	ลิตร	3.078198

ที่มา : (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2556)

ตารางที่ 2.7 แสดงข้อดีและข้อด้อยของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และน้ำมันดีเซล

ตารางที่ 2.7 ข้อเด่นและข้อด้อยของเชื้อเพลิงที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

ประเภทเชื้อเพลิง	ข้อเด่น	ข้อด้อย
ก๊าซธรรมชาติ	<ul style="list-style-type: none"> ■ เป็นเชื้อเพลิงปิโตรเลียมที่นำมาใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพสูง มีการเผาไหม้ สมบูรณ์ ■ ลดการสร้างก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุ ของภาวะโลกร้อน ■ มีความปลอดภัยสูงในการใช้งาน เนื่องจาก เบากว่าอากาศจึงลอยขึ้นเมื่อเกิดการรั่วไหล ■ มีราคาถูกกว่าเชื้อเพลิงปิโตรเลียม อื่นๆ เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล น้ำมัน เตาและก๊าซปิโตรเลียมเหลว ■ ก๊าซธรรมชาติส่วนใหญ่ที่ใช้ในประเทศไทย ผลิตได้เองจากแหล่งในประเทศ จึงช่วยลด การนำเข้าพลังงานเชื้อเพลิงอื่นๆและ ประหยัดเงินตราต่างประเทศได้มาก ■ สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มช่วยขับเคลื่อนการ เจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ราคาก๊าซธรรมชาติไม่คงที่ ผูกติดกับราคาน้ำมันซึ่ง ผันแปรอยู่ตลอดเวลา ■ ประเทศไทยใช้ก๊าซ ธรรมชาติในสัดส่วนที่สูง มาก จนเกิดความเสี่ยง ของแหล่งพลังงาน ■ กำลังสำรองก๊าซธรรมชาติ ในประเทศไทยมีปริมาณ จำกัด

ตารางที่ 2.7 ข้อดีและข้อเสียของเชื้อเพลิงที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม (ต่อ)

ประเภทเชื้อเพลิง	ข้อดี	ข้อเสีย
ถ่านหิน	<ul style="list-style-type: none"> ■ ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงถ่านหินต่ำกว่าเชื้อเพลิงอื่นๆเช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันและพลังงานหมุนเวียน ■ มีปริมาณสำรองมาก สามารถใช้ได้ไม่ต่ำกว่า 200 ปี ■ ปัจจุบันสามารถใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดทำให้กำจัดมลพิษจากการใช้ถ่านหินหมดไป 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ต้องใช้ระบบควบคุมมลภาวะทางอากาศที่มีราคาแพง เนื่องจากการเผาไหม้ถ่านหินเป็นสาเหตุสำคัญของฝนกรดและภาวะโลกร้อน ■ ประเทศไทยต้องนำเข้าถ่านหินคุณภาพดีจากต่างประเทศ ■ ต้องมีระบบการจัดการขนส่งที่ดียังมีภาพลักษณ์ที่น่ากลัวในสายตาประชาชน
น้ำมันดีเซล	<ul style="list-style-type: none"> ■ ขนส่งง่าย ■ หาซื้อได้ง่าย ■ เป็นเชื้อเพลิงที่ไม่ได้รับการต่อต้านจากชุมชน 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ■ ราคาไม่คงที่ ขึ้นกับราคาน้ำมันของตลาดโลก ■ ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน ■ ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้สูง

ที่มา : (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2558)

2.3) โรงไฟฟ้าดีเซล (Diesel Power Plant)

โรงไฟฟ้าดีเซลเป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อนประเภทหนึ่ง ซึ่งใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงหลัก หลักการทำงานจะคล้ายกับเครื่องยนต์ดีเซลในรถทั่วไป โดยอาศัยการสันดาปของน้ำมันดีเซลที่ถูกฉีดเข้าไปในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ที่ถูกอัดอากาศจนมีอุณหภูมิสูงที่เรียกว่า จังหวะอัด ในขณะเดียวกันน้ำมันดีเซลที่ถูกฉีดเข้าไปจะทำการสันดาปกับอากาศที่มีความร้อนสูงจนเกิดการระเบิดขึ้นและดันลูกสูบเคลื่อนที่ลงไปยังเพลาค้อเหวี่ยงซึ่งต่อกับเพลลาของเครื่องยนต์ที่ต่อกับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกทีหนึ่ง เกิดการเหนี่ยวนำได้กระแสไฟฟ้าออกมา ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โรงไฟฟ้าดีเซล

ที่มา : (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2558)

3) โรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน

ปัจจุบันโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย โดยแบ่งตามประเภทเชื้อเพลิงมีอยู่ทั้งหมด 7 ประเภท ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic Power Plant) โรงไฟฟ้าพลังงานลม (Wind Power Plant) โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก โรงไฟฟ้าชีวมวล (Biomass Power Plant) โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ (Biogas power plant) โรงไฟฟ้าขยะ (Incinerator Power Plant) และโรงไฟฟ้าพลังความร้อนใต้พิภพ (Geothermal power plant) ดังมีรายละเอียดดังนี้

3.1) โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

หลักการทำงาน คือ จะใช้แผงโซลาร์เซลล์ (Solar Panel หรือ Photovoltaic Panel) ในการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง และมีอินเวอร์เตอร์สำหรับแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อให้สามารถส่งกระแสไฟฟ้าเข้าสู่สายส่งไฟฟ้าซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับได้ ดังรูปที่ 2.8 (Solar Smile Knowledge, 2558)



รูปที่ 2.8 โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ที่มา : (สภาวิศวกร, 2558)

3.2) โรงไฟฟ้าพลังงานลม

ลมเป็นพลังงานธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง 2 ที่ โดยใช้กังหันลมเป็นอุปกรณ์นำพลังงานลมมาใช้ให้เป็นประโยชน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและในการสูบน้ำ จึงต้องติดตั้งกังหันลมไว้ในสถานที่ที่ลมพัดแรงตลอดเวลาจึงจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อกังหันลมหมุนแกนของกังหันลมที่ต่อมายังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะผลิตไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 2.9 (บริษัทผลิตไฟฟ้าจำกัด (มหาชน), 2558)



รูปที่ 2.9 โรงไฟฟ้าพลังงานลม

ที่มา : (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2558)

3.3) โรงไฟฟ้าชีวมวล

หลักการทำงาน คือ จะใช้เศษวัสดุจากเชื้อเพลิงชีวมวล ได้แก่ กากหรือเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร กากจากผลผลิตทางการเกษตรที่ผ่านการแปรรูปแล้ว เช่น แกลบ ชานอ้อย เศษไม้ กาก

ปาล์ม กากมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด กากและกะลามะพร้าว ส่าเหล้า เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า และพลังไอน้ำ ดังรูปที่ 2.10 (บริษัทผลิตไฟฟ้าจำกัด (มหาชน), 2558)



รูปที่ 2.10 โรงไฟฟ้าชีวมวล

ที่มา : (Botkwamdee, 2555)

3.4) โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ คือก๊าซที่เกิดจากชีวมวลที่ถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยมีอุณหภูมิ ความชื้นและความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสม ก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นก๊าซผสมกันหลายชนิด ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แต่ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยก๊าซมีเทนเป็นหลักซึ่งมีคุณสมบัติติดไฟได้ ก๊าซเหล่านี้สามารถพบได้ในการบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือน โรงงานผลิตแอลกอฮอล์ โรงงานกำจัดขยะ โรงงานผลิตกรดมะนาว โรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานข้าวโพด โรงงานน้ำมันปาล์ม ฟาร์มเลี้ยงสุกร โรงฆ่าสัตว์ ซึ่งน้ำเสียจากแหล่งเหล่านี้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้จำนวนมาก และเป็นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ทดแทนหรือใช้ร่วมกับพลังงานอื่นที่ราคาแพงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการผลิตไฟฟ้า การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพสามารถกระทำได้ด้วยวิธีหลัก ๆ 3 วิธี คือ ระบบกังหันไอน้ำ ระบบกังหันก๊าซเดินคู่กับระบบกังหันไอน้ำ และระบบเครื่องยนต์ก๊าซสันดาปภายใน ดังรูปที่ 2.11 (Pom Relay, 2553)



รูปที่ 2.11 โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ

ที่มา : (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2554)

3.5) โรงไฟฟ้าขยะ

โรงไฟฟ้าขยะจะใช้ขยะเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า โดยขยะส่วนใหญ่เป็นมวลชีวภาพเช่น กระดาษ เศษอาหาร และไม้ หลักการทำงาน คือ นำขยะมาเผาบนตะแกรงแล้วนำความร้อนที่เกิดขึ้นมาใช้ต้มน้ำในหม้อต้มไอน้ำจนกลายเป็นไอน้ำ ไอน้ำที่ได้จะไปหมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา ดังรูปที่ 2.12 (บริษัทผลิตไฟฟ้าจำกัด (มหาชน), 2558)



รูปที่ 2.12 โรงไฟฟ้าพลังงานขยะ

ที่มา : (Thailandindustry, 2558)

3.6) โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ

หลักการทำงาน คือ จะมีการเจาะหลุมที่มีน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงเพื่อผลิตน้ำร้อนออกมาและจะถูกปั้มน้ำคูดเข้าถังต้มน้ำแล้วส่งเข้าไปขับเคลื่อนเครื่องกังหันไอน้ำซึ่งมีเพลลาต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาใช้งาน ดังรูปที่ 2.13 (Pom Relay, 2553)



รูปที่ 2.13 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ

ที่มา : (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2558)

2.3.2 ระบบผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย

เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าของระบบ (National Grid) ในประเทศไทย แบ่งออกเป็น 8 ประเภท ได้แก่

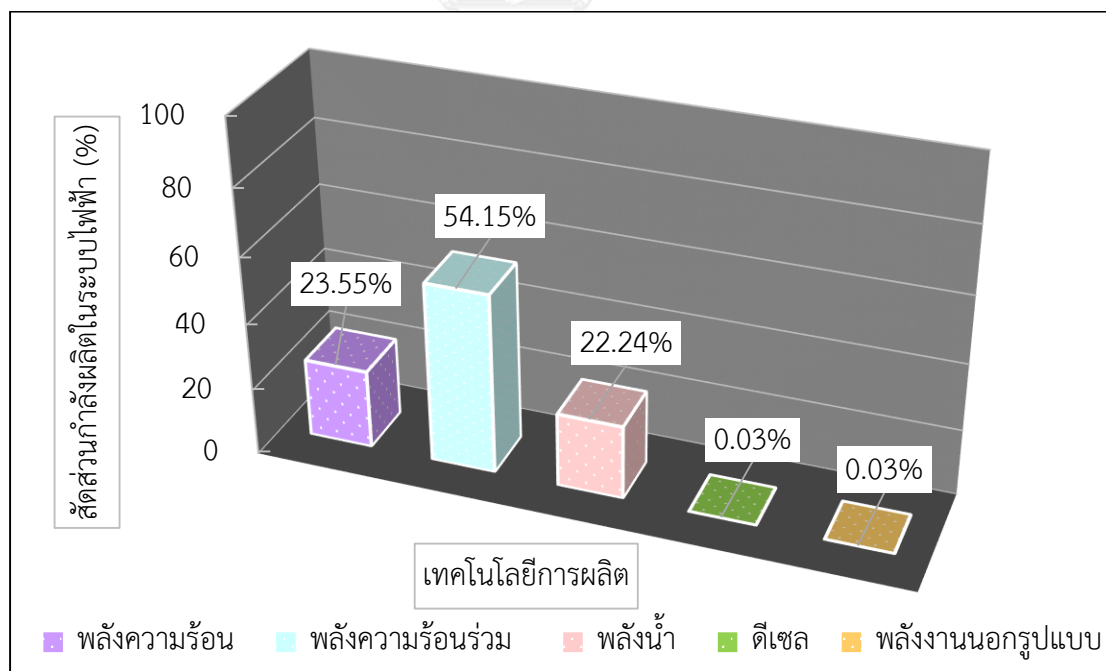
- โรงไฟฟ้าพลังความร้อน (Thermal power plant)
- โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม (Combined cycle power plant)
- โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ (Gas turbine power plant)
- โรงไฟฟ้าดีเซล (Diesel power plant)
- โรงไฟฟ้าพลังงานร่วม (Cogeneration power plant)
- เครื่องยนต์ก๊าซ (Gas engine)
- โรงไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydro power plant)
- โรงไฟฟ้าอื่นๆ อันได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และโรงไฟฟ้าพลังงานลม (สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, 2558)

กำลังการผลิตไฟฟ้าแยกตามเทคโนโลยีการผลิต ได้แก่ พลังความร้อนร่วม พลังความร้อน
พลังน้ำ ดีเซล และพลังงานนอกรูปแบบ คิดเป็นร้อยละ 54.15 23.55 22.24 0.03 และ 0.03
ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.8 และรูปที่ 2.14

ตารางที่ 2.8 สัดส่วนกำลังผลิตติดตั้ง (เมกะวัตต์) จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ปี พ.ศ.
2558 จำแนกตามเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต

เทคโนโลยีการผลิต	กำลังผลิตในระบบไฟฟ้า	
	เมกะวัตต์ (MW)	ร้อยละ
พลังความร้อน	3,647.00	23.55
พลังความร้อนร่วม	8,382.00	54.15
พลังน้ำ	3,444.18	22.24
ดีเซล	4.40	0.03
พลังงานนอกรูปแบบ	4.40	0.03
รวม	15,481.98	100.00

ที่มา : (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2558)



รูปที่ 2.14 สัดส่วนกำลังผลิตติดตั้งจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ปี พ.ศ. 2558 จำแนกตาม
เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต

ที่มา : (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2558)

จากตารางที่ 2.8 พบว่าสัดส่วนกำลังผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีพลังความร้อนร่วมมีสัดส่วนสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 54.15 หากมีการดำเนินมาตรการเพื่อลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และลดการใช้พลังงานในโรงไฟฟ้าประเภทนี้ที่มีสัดส่วนกำลังผลิตติดตั้งที่สูงกว่าโรงไฟฟ้าประเภทอื่นๆ ผลจากการดำเนินงานจะส่งผลต่อการลดปริมาณการปล่อยในสัดส่วนที่สูงกว่าเช่นกัน

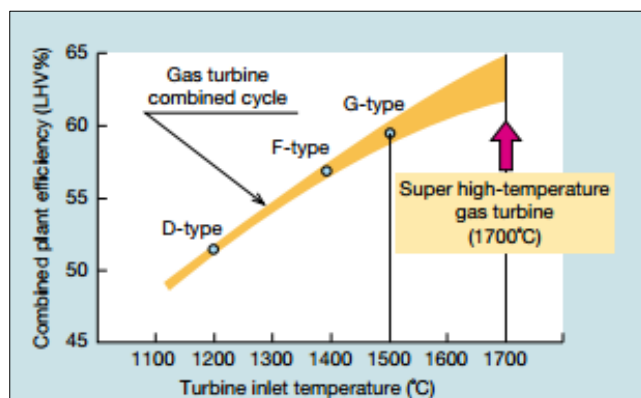
2.4 แนวทาง/มาตรการการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้า

การปรับปรุงประสิทธิภาพขององค์ประกอบในระบบผลิตไฟฟ้า จะนำไปสู่การปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาเทคโนโลยีต่างๆ รวมถึงแนวทางที่สามารถนำมาปรับใช้กับโรงไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพขององค์ประกอบต่างๆในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 การเปลี่ยนชนิดของกังหันก๊าซ Super high-temperature gas turbine

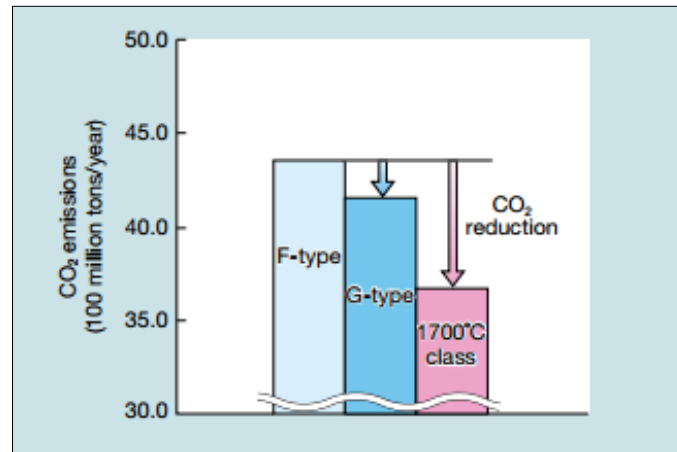
หลักการทำงาน

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยของประเทศญี่ปุ่น มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม โดยการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้าจากการเปลี่ยนมาใช้กังหันก๊าซที่มีประสิทธิภาพสูง โดยในประเทศญี่ปุ่นมีการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมตั้งแต่ ค.ศ. 1984 ใช้กังหันก๊าซรุ่น D-type ที่สามารถใช้กับอุณหภูมิเผาไหม้ที่ 1100 องศาเซลเซียสได้ และต่อมาได้พัฒนา F-type และ G-type ที่สามารถใช้กับอุณหภูมิเผาไหม้ที่ 1300 และ 1500 องศาเซลเซียสตามลำดับ จนมีการปรับปรุงมาใช้กังหันก๊าซรุ่นที่สามารถใช้กับอุณหภูมิเผาไหม้สูงถึง 1700 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพที่สูงขึ้นถึงร้อยละ 62-65 เมื่อเปรียบเทียบกับรุ่น G-type ที่ให้ประสิทธิภาพร้อยละ 59 ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ประสิทธิภาพของกังหันก๊าซรุ่นต่างๆ

การใช้กังหันก๊าซที่สามารถใช้ได้กับอุณหภูมิเผาไหม้ที่สูงๆจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพของอุปกรณ์และยังส่งผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงอีกด้วย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพของกังหันก๊าซที่จะสามารถลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงลงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ISHIKAWA และคณะ, 2008)

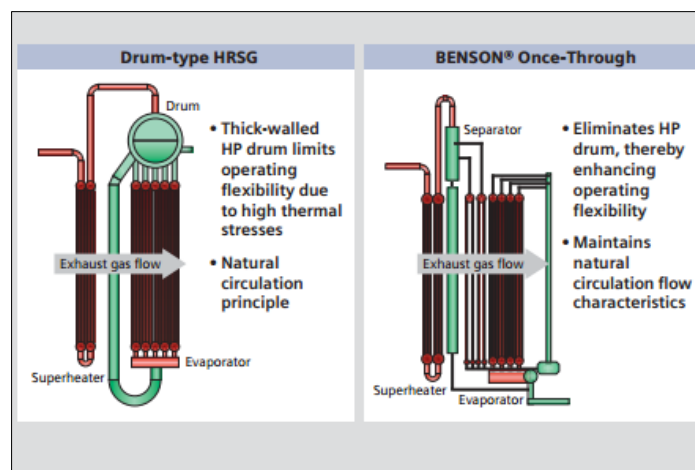


รูปที่ 2.16 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกังหันก๊าซรุ่นต่างๆ

2.4.2 การเปลี่ยนชนิดของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง BENSON Once-Through HRSG

หลักการทำงาน

เทคโนโลยี BENSON Once-Through HRSG เป็นเทคโนโลยีที่มีการเปลี่ยนอุปกรณ์ภายในเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งที่เรียกว่า Drum-Type HRSG เป็น BENSON Once-Through HRSG ดังแสดงในรูปที่ 2.17 SIEMENS (2006)



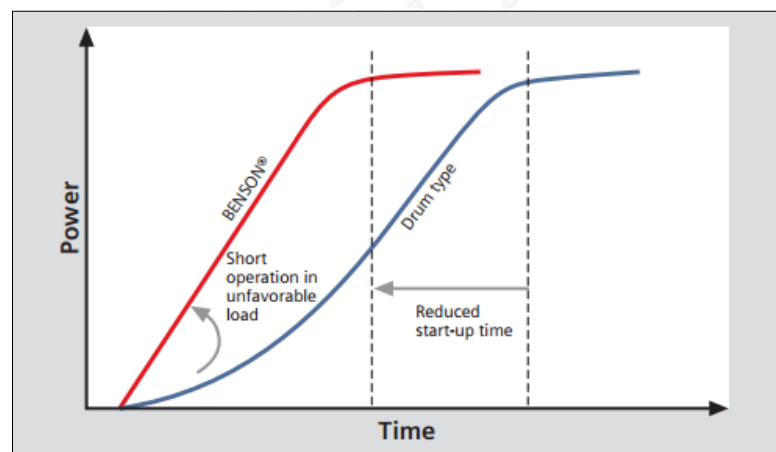
รูปที่ 2.17 อุปกรณ์ BENSON Once-Through

ลักษณะทั่วไปเครื่องแลกเปลี่ยนไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งระหว่างรุ่น Drum-Type และรุ่น BENSON Once-Through แสดงดังตาราง 2.9

ตารางที่ 2.9 ความเหมือนและแตกต่างระหว่าง Drum-Type และ BENSON Once-Through HRSG

Drum-Type	BENSON Once-Through HRSG
1. ก๊าซเผาไหม้วิ่งผ่านในแนวระนาบ	1. ก๊าซเผาไหม้วิ่งผ่านในแนวระนาบ
2. ใช้ Drum เป็นอุปกรณ์ในการแยกไอน้ำและน้ำ	2. ใช้ Separator เป็นอุปกรณ์ในการแยกไอน้ำและน้ำ

หลักการทำงานของระบบ BENSON Once-Through HRSG จะสามารถผลิตไอน้ำได้ภายในระยะเวลารวดเร็วขึ้น เพราะไม่ต้องเสียเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อป้องกันการแตก (crack) ที่ steam drum ส่งผลให้สามารถลดระยะเวลาในการเริ่มต้นเครื่องจักร (start up) เครื่องจักรได้ ในการเดินเครื่องจักรนั้นประสิทธิภาพของระบบจะต่ำในช่วงเริ่มต้นเครื่องจักรซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง ถ้ามีการนำอุปกรณ์ตัวที่สามารถลดระยะเวลาการเริ่มต้นเครื่องจักรมาใช้ ก็จะมีส่วนช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ระยะเวลาการเริ่มต้นเครื่องจักรของ HRSG แต่ละรุ่นแสดงในรูปที่ 2.18

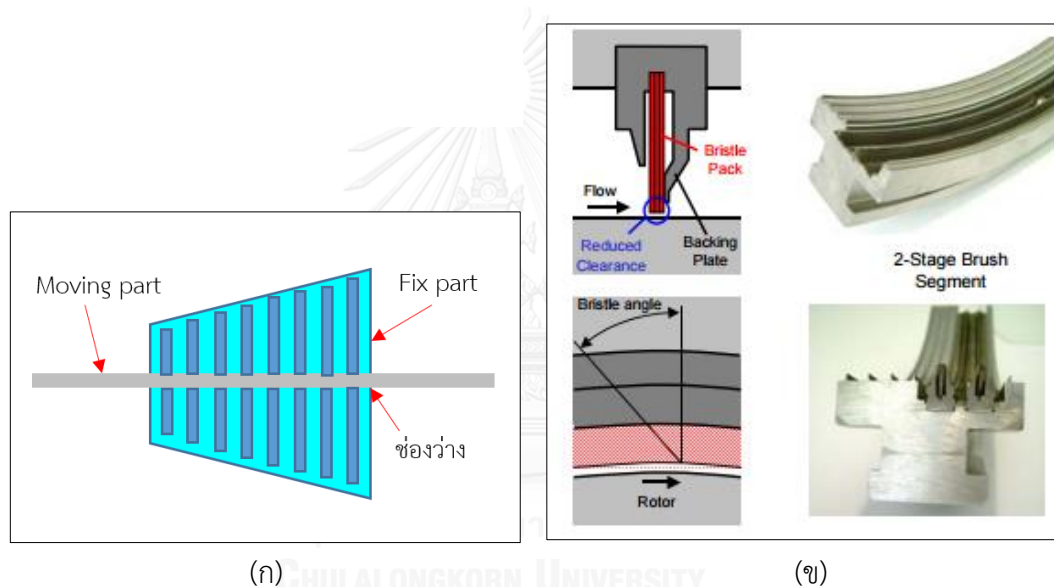


รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบระยะเวลาการเริ่มต้นเครื่องจักรระหว่าง Drum-Type และ BENSON Once-Through HRSG

2.4.3 การใช้อุปกรณ์ป้องกันการสูญเสียพลังงานจากกังหัน Brush Seal

หลักการทำงาน

เทคโนโลยี Brush Seal เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของกังหันไอน้ำ ซึ่งออกแบบเพื่อลดการรั่วไหลของไอน้ำผ่านคอเพลลาของกังหันไอน้ำ โดยการลดช่องว่างระหว่างเพลลา (moving part) กับ Casing (fix part) ดังรูปที่ 2.19 (ก) ให้เหลือน้อยที่สุดจนเกือบเป็นศูนย์ได้ โดยการติดตั้ง Bristle Pack ซึ่งเป็นวัสดุที่นิ่มกว่าเพลลาให้ชิดกับเพลลา เมื่อเพลลาหมุนจะเกิดการเสียดสีในช่วงแรกจนได้ช่องว่างที่น้อยที่สุดของเครื่องจักร และลดการสูญเสียไอน้ำออกไปน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ข) (Smiarowski และคณะ, 2005)



(ก) (ข)

รูปที่ 2.19 เทคโนโลยี Brush Seal

2.4.4 แนวทาง/มาตรการการเพิ่มประสิทธิภาพอื่นๆ

2.4.4.1. เทคโนโลยีการเพิ่มประสิทธิภาพกังหันก๊าซและกังหันไอน้ำ

การเพิ่มความร้อนเข้าไปทั้งในวัฏจักร Rankine (กังหันไอน้ำ) และวัฏจักร Brayton-Rankine (กังหันก๊าซร่วมกับกังหันไอน้ำ) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการผลิตไฟฟ้าได้ ตัวอย่างเทคโนโลยี เช่น

- การใช้เทคโนโลยีการเคลือบผิววัสดุกันความร้อน (thermal barrier coatings) กับกังหันก๊าซ
- การเปลี่ยนวัสดุเซรามิกในกังหันก๊าซใหม่เพื่อป้องกันการรั่วไหลของความร้อนออกจากตัวกังหันก๊าซ (Beer, 2007)

- การนำกลับพลังงานที่มีประโยชน์หรือการนำกลับเอ็กซ์เซอจีของก๊าซไอเสีย (exhaust exergy) จากกังหันก๊าซมาใช้ใหม่จะช่วยเพิ่มศักยภาพของระบบให้ดีขึ้นได้ (Ghazikhani และคณะ, 2014)

2.4.4.2. เทคโนโลยีการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง การเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซที่ทางเข้าเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอจีของวัฏจักรได้ (Kaviri และคณะ, 2012)

2.4.4.3. เทคโนโลยีการเพิ่มประสิทธิภาพห้องเผาไหม้ การเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้จะช่วยลดอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอจีหรือลดการสูญเสียพลังงานที่มีประโยชน์จากห้องเผาไหม้ได้ (Acikkalp และคณะ, 2014)

2.4.4.4. เทคโนโลยีการเพิ่มประสิทธิภาพหม้อต้มไอน้ำ การให้ความร้อนแก่น้ำก่อนป้อนเข้าสู่ระบบ (Preheating) โดยการความร้อนจากก๊าซเหลือทิ้งจากหม้อต้มไอน้ำเพื่อนำมาอุ่นน้ำก่อนเข้าหม้อต้มไอน้ำ (Saidur และคณะ, 2010) และการลดอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงจะช่วยลดการสูญเสียเอ็กซ์เซอจีที่หม้อต้มไอน้ำได้ (Aljundi I.H., 2009)

2.5 พื้นฐานของเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Fundamentals)

สมการสมดุลทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์ระบบแสดงดังสมการ (2.1)

$$\text{Input} + \text{Generation} - \text{Output} - \text{Consumption} = \text{Accumulation} \quad (2.1)$$

2.5.1 พลังงาน (Energy)

2.5.1.1 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (The First Law of Thermodynamics)

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์หรือกฎการอนุรักษ์พลังงาน หลักการคือ พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปได้แต่จะไม่สูญหายหรือถูกทำลายได้ เมื่อพิจารณาการถ่ายโอนพลังงานระหว่างระบบ (system) กับสิ่งแวดล้อม (surrounding) พบว่าพลังงานรวมของระบบกับสิ่งแวดล้อมจะมีค่าคงที่ ตัวอย่างเช่น ในกระบวนการที่ระบบได้รับพลังงานจากสิ่งแวดล้อม ปริมาณพลังงานที่ระบบได้รับ จะเท่ากับปริมาณพลังงานที่สิ่งแวดล้อมสูญเสียให้แก่ระบบ (Cengel และคณะ, 2542) เขียนเป็นสมการสมดุลพลังงานได้ดังสมการ (2.2) และ (2.3)

$$[\text{พลังงานที่เข้าสู่ระบบ}] - [\text{พลังงานที่ออกจากระบบ}] = [\text{พลังงานรวมในระบบที่เปลี่ยนแปลงไป}] \quad (2.2)$$

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (2.3)$$

โดยพลังงานที่เข้าและออกจากระบบ ได้แก่ ความร้อน (Q) และงาน (W) 9จามลำดับ สำหรับพลังงานรวมในระบบนั้นประกอบด้วย พลังงานภายใน (U) พลังงานศักย์ (PE) และพลังงานจลน์ (KE) โดยที่ Q = พลังงานที่สามารถถ่ายเทผ่านขอบเขตของระบบได้ เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

W = พลังงานที่สามารถถ่ายเทผ่านขอบเขตของระบบได้เช่นเดียวกับความร้อน

U = พลังงานภายในระบบ

KE = พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของระบบ

PE = พลังงานของระบบที่อยู่ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้กำหนดพลังงานที่ได้จากการรวมเทอมของพลังงานภายในและพลังงานที่ได้จากผลคูณของความดัน (Pressure; P) และปริมาตร (Volume; V) ค่าค่าเ็นทาลปี (Enthalpy; H) ดังสมการ (2.4)

$$H = U + PV \quad (2.4)$$

เมื่อกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นจากสมการ (2.1) (2.3) และ (2.4) ที่ระบบเปิดแบบควบคุมปริมาตรจึงสามารถเขียนสมการสมดุลและพลังงานได้ดังสมการที่ (2.5) และ (2.6) (Aljundi, 2009)

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (2.5)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i \quad (2.6)$$

โดยที่ \dot{m} = อัตราการไหลโดยมวล (kg/s)

\dot{Q} = อัตราความร้อน (kJ/s)

\dot{W} = อัตราการทำงาน (kJ/s)

h = เ็นทาลปี (kJ/kg)

i = ทางเข้า

e = ทางออก

2.5.1.2 กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ (The Second Law of Thermodynamics)

จากที่ได้กล่าวไว้ในกฎข้อที่หนึ่งๆ กล่าวว่า กระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ เอนโทรปีรวมของระบบและสิ่งแวดล้อมจะหรือไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าทุกกระบวนการที่เกิดขึ้นต้องเป็นไปตามกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการที่เป็นไปตามกฎข้อที่หนึ่งๆ อาจจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงก็เป็นได้ ตัวอย่างเช่น การวางแก้วน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงไว้ภายในห้องที่มีอุณหภูมิต่ำ ความร้อนจากน้ำร้อนจะถูกถ่ายเทให้แก่ห้องทำให้ปริมาณความร้อนของน้ำลดลง ในขณะที่เดียวกันปริมาณความร้อนภายในห้องก็สูงขึ้น และปริมาณพลังงานความร้อนของน้ำที่ลดลงจะเท่ากับปริมาณความร้อนภายในห้องที่เพิ่มขึ้น จึงกล่าวได้ว่ากระบวนการนี้ไม่ละเมิดกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ แต่ในทางกลับกันหากถ้วยน้ำสามารถรับปริมาณความร้อนจากภายในห้องที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าได้ ถ้วยน้ำก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่กระบวนการนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงแต่ก็ไม่เป็นการละเมิดกฎข้อที่หนึ่งๆ เช่นเดียวกัน จากตัวอย่างพบว่ากระบวนการนั้นจะเกิดในทิศทางที่แน่นอนและจะไม่เกิดในทิศทางย้อนกลับหรือเรียกว่ากระบวนการผันกลับไม่ได้ (irreversible processes) แต่กฎข้อที่หนึ่งๆ ไม่ได้อธิบายถึงทิศทางของกระบวนการ ดังนั้นจึงต้องมีกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อใช้พิจารณาว่า กระบวนการนั้นๆ สามารถเกิดขึ้นได้จริงหรือไม่

2.5.2 เอนโทรปี (Entropy, S)

เอนโทรปี เป็นคำที่มาจากภาษากรีก มีความหมายว่าการแปลงรูป เป็นสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกฎข้อที่สองๆ จากสมการดุลพลังงานของกฎข้อที่หนึ่งๆ พบว่าการถ่ายโอนพลังงานนอกจากพลังงานที่มาพร้อมกับมวลสารแล้วยังเกิดขึ้นจากการถ่ายโอนความร้อนหรือจากการทำงานโดยระบบหรือบริเวณล้อมรอบ

การถ่ายโอนพลังงานผ่านกระบวนการสร้างงานหรือใช้งาน เช่น การหมุนแกนใบพัด เป็นกระบวนการที่มีทิศทางชัดเจน โดยทิศทางจะเคลื่อนไปตามทิศทางของแรงที่มากระทำ แต่การถ่ายโอนพลังงานผ่านทางกลไกทางความร้อนโดยใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นปัจจัยในการขับเคลื่อน เป็นกระบวนการที่ไม่สามารถกำหนดทิศทางที่ชัดเจนได้ ดังนั้นการถ่ายโอนพลังงานผ่านกระบวนการสร้างงานหรือใช้งานเป็นกระบวนการที่มีทิศทางชัดเจนไม่ก่อให้เกิดการเพิ่มหรือลดลงของเอนโทรปี แต่การถ่ายโอนพลังงานผ่านกระบวนการทางความร้อนไม่มีทิศทางที่แน่นอนจึงมีผลกระทบต่อค่าเอนโทรปี ดังนั้น เอนโทรปีจึงมีความสัมพันธ์กับปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนเข้าหรือออกจากระบบภายใต้กระบวนการผันกลับได้ (Cengel และคณะ, 2549)

2.5.3 เอ็กซ์เซอจี (Exergy)

เอ็กซ์เซอจีคือปริมาณงานที่มีประโยชน์ (Available work) ที่เกิดจากการนำกฎข้อที่หนึ่งๆ และกฎข้อที่สองมาวิเคราะห์ร่วมกัน เป็นเครื่องมือที่สำคัญที่ช่วยในการวิเคราะห์พลังงาน ระบบและกระบวนการอื่นๆ เอ็กซ์เซอจีของระบบเป็นงานสูงสุดที่สามารถทำได้โดยระบบที่อยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมอ้างอิงที่กำหนด เมื่อมีการนำการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอจีมาใช้กับโรงงาน เช่น โรงไฟฟ้า ความไม่สมบูรณ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์สามารถตรวจวัดได้จากการวิเคราะห์ทำลายเอ็กซ์เซอจี (Exergy Destruction) ซึ่งนำเสนอในรูปของการสูญเสียคุณภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์ (Dincer และคณะ, 2013)

องค์ประกอบของเอ็กซ์เซอจี (Exergy Components)

เอ็กซ์เซอจีทั้งหมดของระบบแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ เอ็กซ์เซอจีทางกายภาพ (Physical Exergy; EPH) เอ็กซ์เซอจีจลน์ (Kinetic Exergy; EKN) เอ็กซ์เซอจีศักย์ (Potential Exergy; EPT) และเอ็กซ์เซอจีทางเคมี (Chemical Exergy; ECH)

- Physical exergy คือ ปริมาณงานสูงสุดที่ได้จากระบบ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแรงดันและอุณหภูมิของระบบจนเทียบเท่ากับสิ่งแวดล้อม
- Chemical exergy คือ งานสูงสุดที่ดึงออกจากระบบได้ ที่แรงดันและอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมอ้างอิงเปลี่ยนไปเช่นเดียวกับระบบ เช่น ในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง

การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอจีและพลังงาน

การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอจีสามารถแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆจากการวิเคราะห์พลังงานได้ การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอจีขึ้นอยู่กับกฎข้อที่สองๆและใช้สำหรับการระบุสาเหตุ ที่ตั้งและกระบวนการที่ไม่มีประสิทธิภาพได้ เอ็กซ์เซอจีจะเกี่ยวข้องกับปริมาณและคุณภาพของพลังงานเป็นการประเมินในเชิงปริมาณพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้หรือมีคุณภาพอยู่ การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอจินำความจริงที่ว่าถึงแม้พลังงานจะไม่สามารถถูกสร้างขึ้นใหม่หรือถูกทำลายได้ แต่จะมีคุณภาพลดลงได้เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุลกับสิ่งแวดล้อม ถึงจะมีพลังงานอยู่แต่พลังงานนั้นจะไม่สามารถก่อให้เกิดงานได้ (Exergy = 0)

ลักษณะของเอ็กซ์เซอจี (Characteristics of Exergy)

- ระบบที่อยู่ในสภาวะสมดุลกับสิ่งแวดล้อมจะไม่มีเอ็กซ์เซอจี ไม่มีแรงขับเคลื่อนกระบวนการใดๆ

- เอ็กส์เซอจีของระบบจะเพิ่มขึ้นหรือไม่เปลี่ยนแปลงโดยการเปรียบเทียบกับสภาวะแวดล้อมอ้างอิง ตัวอย่างเช่น ปริมาณความร้อนของน้ำร้อนจะมีเอ็กส์เซอจีในช่วงหน้าหนาวสูงกว่าน้ำร้อนเนื่องจากหน้าหนาวมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าน้ำร้อน หรือก๊อมน้ำแข็งจะมีเอ็กส์เซอจิน้อยในหน้าหนาวเนื่องจากหน้าหนาวอุณหภูมิของอากาศและน้ำแข็งจะต่ำ ในขณะที่จะมีนัยสำคัญในน้ำร้อนที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าสูงกว่า
- จากนิยามของเอ็กส์เซอจีไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับสถานะของระบบหรือการไหลแต่ยังขึ้นอยู่กับสถานะของสิ่งแวดล้อมด้วย

สมดุลเอ็กส์เซอจี (Exergy Balance)

เอ็กส์เซอจีจะถูกใช้ไปในกระบวนการผันกลับไม่ได้ ซึ่งการใช้เอ็กส์เซอจีเป็นส่วนหนึ่งกับเอนโทรปีที่ถูกสร้างขึ้น จากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์นั้น เราสามารถเขียนสมการสมดุลเอ็กส์เซอจีได้ดังสมการที่ (2.6) (Kaviri และคณะ, 2013)

$$\dot{E}x_Q + \sum_i \dot{m}_i ex_i = \sum_e \dot{m}_e ex_e + \dot{E}x_W + \dot{E}x_D \quad (2.6)$$

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W}$$

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$$

โดยที่ $\dot{E}x_Q$ = อัตราเอ็กส์เซอจีของความร้อน (kJ/s)

$\dot{E}x_W$ = อัตราเอ็กส์เซอจีของงาน (kJ/s)

$\dot{E}x_D$ = อัตราการทำลายเอ็กส์เซอจี (kJ/s)

ex = เอ็กส์เซอจีจำเพาะ (kJ/kg)

m = อัตราการไหลโดยมวล (kg/s)

i = ทางเข้า

e = ทางออก

T = อุณหภูมิ

\dot{Q} = อัตราความร้อน (kJ/s)

\dot{W} = อัตราการทำงาน (kJ/s)

h = เอนทัลปีจำเพาะ (kJ/kg)

s = เอนโทรปีจำเพาะ (kJ/kg)

0 = สภาวะแวดล้อมอ้างอิง

สภาวะแวดล้อมอ้างอิง (Reference Environmental)

สภาวะแวดล้อมอ้างอิงคือที่สภาวะสมดุลที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างองค์ประกอบในสิ่งแวดล้อม จะเกิดขึ้นในกระบวนการผันกลับได้ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เช่น อุณหภูมิ (T_0) และความดัน (P_0) เอ็กส์เซอียที่สภาวะแวดล้อมอ้างอิงหรือที่สภาวะสมดุลกับสิ่งแวดล้อมจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ตารางที่ 2.10 แสดงสภาวะแวดล้อมอ้างอิงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เอ็กส์เซอียในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 2.10 สภาวะแวดล้อมอ้างอิง

$T_0 = 298.15 \text{ K}$	
$P_0 = 1 \text{ atm}$	
Air constituents	Mole fraction
N_2	0.7567
O_2	0.2035
H_2O	0.0303
Ar	0.0091
CO_2	0.0003
H_2	0.0001

ที่มา : (Dincer และคณะ, 2013)

การทำลายเอ็กส์เซอีย (Exergy Destruction) และประสิทธิภาพเอ็กส์เซอีย (Exergy Efficiencies)

เอ็กส์เซอียก็สามารถทำลายได้เช่นกัน ซึ่งการตรวจวัดอัตราการทำลายเอ็กส์เซอียจะทำให้ทราบถึงการสูญเสียปริมาตรพลังงานที่มีประโยชน์ออกไปจากระบบหรือกระบวนการ ในขณะที่ประสิทธิภาพเอ็กส์เซอีย เป็นประสิทธิภาพที่ขึ้นอยู่กับกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ วิศวกรมักใช้การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กส์เซอียในการตรวจวัดศักยภาพของอุปกรณ์และกระบวนการ เพื่อใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์หรือกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เป็นต้น

ข้อแตกต่างระหว่างเอ็กส์เซอียกับพลังงาน

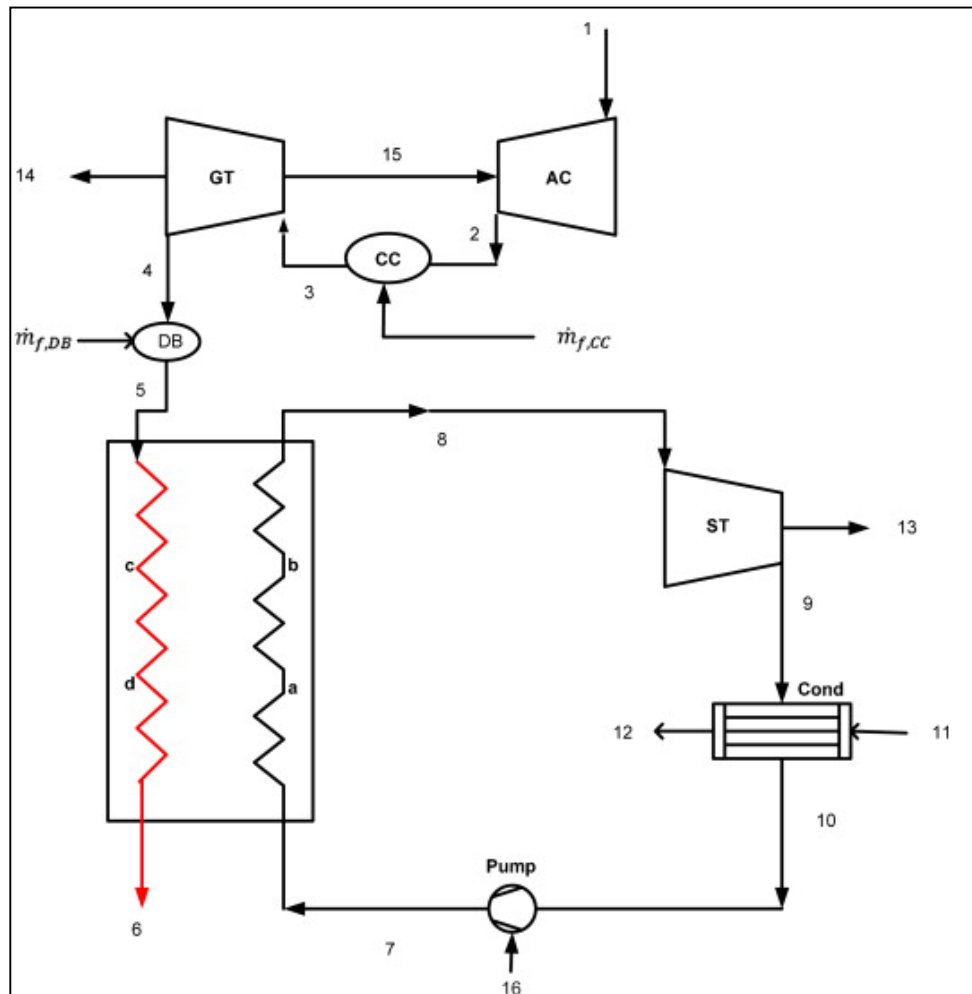
การวิเคราะห์เอ็กส์เซอียทำให้ทราบถึงพลังงานที่สลายไปในกระบวนการและสามารถใช้ในการปรับปรุงการดำเนินงานหรือเทคโนโลยีได้ จุดมุ่งหมายหลักของการวิเคราะห์เอ็กส์เซอีย คือเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพและขนาดการสูญเสียเอ็กส์เซอียของระบบ

ตารางที่ 2.11 เปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างเอ็กซ์เซอียกับพลังงาน

พลังงาน	เอ็กซ์เซอีย
1. ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุหรืออัตรา การไหลพลังงานและไม่ขึ้นกับคุณสมบัติ ของสิ่งแวดล้อม	1. ขึ้นอยู่กับทั้งคุณสมบัติของวัตถุหรืออัตรา การไหลพลังงานและสิ่งแวดล้อม
2. มีค่าไม่เท่ากับศูนย์เมื่ออยู่ในสภาวะ สมดุลกับสิ่งแวดล้อม	2. มีค่าเท่ากับศูนย์เมื่ออยู่ในสภาวะตาย (dead state) หรือสภาวะสมดุลกับ สิ่งแวดล้อม
3. สำหรับทุกกระบวนการ โดยขึ้นอยู่กับ กฎข้อที่หนึ่งๆ	3. สำหรับกระบวนการผันกลับได้ โดยขึ้นอยู่กับ กฎข้อที่สองๆ
4. ไม่สามารถถูกทำลายและไม่สามารถ สร้างใหม่ได้	4. สามารถถูกทำลายและสร้างใหม่ได้ใน กระบวนการผันกลับได้ แต่จะถูกทำลายใน กระบวนการผันกลับไม่ได้
5. มีหลายรูปแบบ เช่น พลังงานจลน์ พลังงานศักย์ งาน และความร้อน และถูก ตรวจวัดตามรูปแบบของตัวเอง	5. มีหลายรูปแบบ เช่น พลังงานจลน์ พลังงานศักย์ งาน และเอ็กซ์เซอียความร้อน และถูกตรวจวัดอยู่บนพื้นฐานของงานหรือ ความสามารถในการผลิตงาน
6. เป็นตัวชี้วัดแค่ปริมาณ	6. เป็นตัวชี้วัดทั้งปริมาณและคุณภาพ

ตัวอย่างการคำนวณเอ็กซ์เซอียของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม (Combined Cycle Power Plant; CCPP)

รูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพตัวอย่างของกระบวนการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีพลังความร้อนร่วม (Combined Cycle Power Plant)



รูปที่ 2.20 แผนภาพกระบวนการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีพลังความร้อนร่วม (Combined Cycle Power Plant)

ที่มา : (Dincer และคณะ, 2013)

ตารางที่ 2.12 รายละเอียดของหน่วยผลิตต่างๆตามรูปที่ 2.20

จุดที่	รายละเอียด
1	อากาศที่ทางเข้าเครื่องอัดอากาศ (Compressor)
2	อากาศที่ทางออกเครื่องอัดอากาศ(Compressor)
3	ก๊าซเผาไหม้ที่ทางออกห้องเผาไหม้ (combustion chamber)
4	ก๊าซที่ทางออกกังหันก๊าซ (Gas turbine)
5	ก๊าซเผาไหม้ที่ทางออกของ Duct burner
6	ก๊าซที่ทางออกเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง (HRSG)
7	น้ำที่ทางเข้าเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง (HRSG)
8	ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่ทางเข้ากังหันไอน้ำ (steam turbine)
9	ไอน้ำที่ทางออกกังหันไอน้ำ (Steam turbine)
10	คอนเดนเสทที่ออกจากคอนเดนเซอร์ (condenser)
11	น้ำหล่อเย็น (Cooling water) ที่ทางเข้าคอนเดนเซอร์ (condenser)
12	น้ำหล่อเย็นที่ทางออกคอนเดนเซอร์
13	งานที่ผลิตได้จากกังหันไอน้ำ (Work of steam turbine)
14	งานที่ผลิตได้จากกังหันก๊าซ (Work of gas turbine)
15	งานที่ใช้สำหรับเครื่องอัดอากาศ (Work for Compressor)
16	งานที่ใช้สำหรับของปั๊ม (Work for feed water pump)
a	ก๊าซร้อนออกจากอีโคโนไมเซอร์ (Economized)
b	ก๊าซออกจากเครื่องระเหย (Evaporator)
c	ก๊าซร้อนออกจากซูเปอร์ฮีตเตอร์ (superheater)
d	ก๊าซร้อนออกจากเครื่องระเหย

ที่มา : (Dincer และคณะ, 2013)

ตารางที่ 2.13 สมการการคำนวณเอนทัลปีของหน่วยผลิตต่างๆ

องค์ประกอบ	อัตราการทำลายเอนทัลปี	ประสิทธิภาพเอนทัลปี
Air compressor	$\dot{E}_{D,AC} = \dot{E}_{X_1} - \dot{E}_{X_2} + \dot{W}_{AC}$	$\psi_{AC} = \frac{\dot{E}_{X_1} - \dot{E}_{X_2}}{\dot{W}_{AC}}$
Combustion chamber	$\dot{E}_{D,CC} = \dot{E}_{X_2} + \dot{E}_{X_{f,CC}} - \dot{E}_{X_3}$	$\psi_{AC} = \frac{\dot{E}_{X_3}}{\dot{E}_{X_2} + \dot{E}_{X_{f,CC}}}$
Gas turbine	$\dot{E}_{D,GT} = \dot{E}_{X_3} - \dot{E}_{X_4} - \dot{W}_{GT}$	$\psi_{GT} = \frac{\dot{W}_{GT}}{\dot{E}_{X_3} - \dot{E}_{X_4}}$
Duct burner	$\dot{E}_{D,DB} = \dot{E}_{X_4} - \dot{E}_{X_5} + \dot{E}_{X_{f,DB}}$	$\psi_{DB} = \frac{\dot{E}_{X_5}}{\dot{E}_{X_4} + \dot{E}_{X_{f,DB}}}$
Condenser	$\dot{E}_{D,Cond} = \dot{E}_{X_{11}} + \dot{E}_{X_{10}} - \dot{E}_{X_9} - \dot{E}_{X_{12}}$	$\psi_{Cond} = 1 - \frac{\dot{E}_{D,Cond}}{\dot{E}_{X_{11}} + \dot{E}_{X_{10}}}$
Heat recovery steam generator	$\dot{E}_{D,HRSG} = \dot{E}_{X_5} + \dot{E}_{X_7} - \dot{E}_{X_6} - \dot{E}_{X_8}$	$\psi_{HRSG} = \frac{\dot{E}_{X_8} - \dot{E}_{X_7}}{\dot{E}_{X_5} - \dot{E}_{X_6}}$
Steam turbine	$\dot{E}_{D,ST} = \dot{E}_{X_8} - \dot{E}_{X_9} - \dot{W}_{ST}$	$\psi_{ST} = \frac{\dot{W}_{ST}}{\dot{E}_{X_8} - \dot{E}_{X_9}}$
Pump	$\dot{E}_{X_P} = \dot{E}_{X_7} - \dot{E}_{X_{10}} + \dot{W}_P$	$\psi_P = \frac{\dot{E}_{X_7} - \dot{E}_{X_{10}}}{\dot{W}_P}$

ที่มา : (Dincer และคณะ, 2013)

2.6 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Sirintip Juntuenga (2014) ศึกษาค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานของอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทย และคาดการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปี 2050 งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อการประเมินค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานของอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทยและศึกษาแนวโน้มปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตั้งแต่ปี 2011 – 2050 โดยการกำหนดขอบเขตและการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อ้างอิงตามแนวทางของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ค.ศ. 2006

2. สุธรรม ปทุมสวัสดิ์ (2553) ศึกษาและการกำหนดค่าความเข้มข้นคาร์บอนของอุตสาหกรรมพลังงาน (โรงไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล) ในประเทศไทยระหว่างปี 2004 – 2009 งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานของโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงฟอสซิลประกอบด้วย โรงไฟฟ้าพลังความร้อน โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ โรงไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล และโรงไฟฟ้าผลิตพลังงานร่วม โดยการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อ้างอิงตามแนวทางของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพ

ภูมิอากาศ ค.ศ. 2006 จากการศึกษาพบว่า โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติมีค่าความเข้มข้นคาร์บอนต่ำที่สุดคิดเป็น 0.426 kgCO₂/kWh และโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซน้ำมันดีเซลมีค่าความเข้มข้นคาร์บอนสูงที่สุดคิดเป็น 0.970 kgCO₂/kWh ดังแสดงในตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ค่าความเข้มข้นคาร์บอนตามเทคโนโลยีและเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า

เทคโนโลยีการผลิต	ชนิดเชื้อเพลิงฟอสซิล	ความเข้มข้นคาร์บอน (kgCO ₂ /kWh)
พลังความร้อนร่วม	ก๊าซธรรมชาติ	0.426
	ก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซล	0.469
พลังความร้อน	ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเตาและน้ำมันดีเซล	0.622
	ก๊าซธรรมชาติและน้ำมันเตา	0.600
	ถ่านหิน/ลิกไนต์	0.914
กังหันก๊าซ	น้ำมันดีเซล	0.970
เครื่องยนต์ดีเซล	น้ำมันดีเซล	0.842

นอกจากนั้นผู้วิจัยยังได้กล่าวถึงค่าความเข้มข้นคาร์บอนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าชนิดต่างๆ ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา และถ่านหินและลิกไนต์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.503 0.620 0.752 และ 0.920 kgCO₂/kWh ตามลำดับ

3. ยุทธศักดิ์ ศิริสินธว์ (2553) ได้ประเมินรอยเท้าคาร์บอนของโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงฟอสซิลในประเทศไทย กรณีศึกษา : โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมบางปะกง โรงไฟฟ้าพลังความร้อนกระบี่ และโรงไฟฟ้าดีเซลแม่ฮ่องสอน งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล โดยใช้หลักการประเมินรอยเท้าคาร์บอน พิจารณาตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ การขนส่งวัตถุดิบ และกระบวนการผลิตไฟฟ้า เพื่อประเมินรอยเท้าคาร์บอนและการลดลงของรอยเท้าคาร์บอนที่เกิดจากการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าในประเทศไทยรวม 4 กรณี ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมบางปะกงชุดที่ 1-2 โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมบางปะกงชุดที่ 3-4 โรงไฟฟ้าพลังความร้อนกระบี่และโรงไฟฟ้าดีเซลแม่ฮ่องสอน ตลอดจนเสนอแนะแนวทางเบื้องต้นในการลดรอยเท้าคาร์บอน ในการประเมินรอยเท้าคาร์บอนนี้จะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 7.2.4 โดยมีการประเมินแบบ Business-to-Business (B2B) ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าในทุกกรณีศึกษาจะก่อให้เกิดรอยเท้าคาร์บอนมากที่สุดในช่วงเวลา 20 ปี รองลงมาคือในช่วงเวลา 100 ปี และน้อยที่สุด

คือเมื่อในช่วงเวลา 500 ปี โดยโรงไฟฟ้าดีเซลแม่ฮ่องสอนซึ่งใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงหลักก่อให้เกิดรอยเท้าคาร์บอนมากที่สุดคือ 1.06 0.977 และ 0.947 kgCO₂ eq/kWh ตามลำดับ รองลงมาคือโรงไฟฟ้าพลังความร้อนกระบี่ซึ่งใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงหลักก่อให้เกิดรอยเท้าคาร์บอน 0.966 0.918 และ 0.898 kg CO₂ eq/kWh ตามลำดับ ส่วนโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมบางปะกงชุดที่ 1-4 ซึ่งใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลัก ก่อให้เกิดรอยเท้าคาร์บอนน้อยที่สุดคือ 0.89 0.748 และ 0.692 kgCO₂ eq/kWh ตามลำดับ โดยรอยเท้าคาร์บอนทั้งหมดจะเกิดขึ้นจากขั้นตอนการผลิตไฟฟ้ามากที่สุด รองลงมาคือขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบ ส่วนขั้นตอนการขนส่งวัตถุดิบจะก่อให้เกิดรอยเท้าคาร์บอนน้อยที่สุด ส่วนแนวทางเบื้องต้นในการลดรอยเท้าคาร์บอนของโรงไฟฟ้าได้แก่ การใช้พลังงานหมุนเวียน ได้แก่ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานนิวเคลียร์มาผลิตไฟฟ้าเสริมกับการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าที่ใช้เป็นกรณีศึกษาและการใช้ตัวดักจับและกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4. Gouw และคณะ (2014) ศึกษาการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในตรัสออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าจากการเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงจากถ่านหินเป็นก๊าซธรรมชาติโดยใช้เทคโนโลยีพลังความร้อนร่วมของสหรัฐอเมริกา จากการศึกษาพบว่าปริมาณการปล่อย CO₂ ต่อหน่วยพลังงานที่ผลิตได้จากการเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงมีค่าเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 44 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ถ่านหิน และเมื่อพิจารณาปริมาณการปล่อย NO_x และ SO₂ พบว่าปริมาณการปล่อย NO_x และ SO₂ จากการใช้ก๊าซธรรมชาติมีค่าน้อยกว่าการใช้ถ่านหินอย่างมาก ดังนั้นการเพิ่มปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติจะนำไปสู่การลดการปล่อย NO_x และ SO₂ ลงร้อยละ 40 และ 44 ตามลำดับ

นอกจากนั้นผู้วิจัยยังได้ศึกษาค่าความเข้มข้นคาร์บอนของโรงไฟฟ้าถ่านหิน โรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติ และโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ พบว่ามีค่าความเข้มข้นคาร์บอนเท่ากับ 0.915 ± 0.0008 , 0.5494 ± 0.0011 and 0.436 ± 0.0014 kgCO₂/kWh ตามลำดับ

5. Nyberg (2011) ศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติในแคลิฟอร์เนีย จากการศึกษาพบว่า ในระหว่างปี 2001 – 2010 ที่มีการใช้เทคโนโลยีพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่มีการติดตั้งใหม่ ส่งผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้มากกว่าร้อยละ 17 และมีปริมาณการใช้พลังงานเฉลี่ยเท่ากับ 7.585 GJ/MWh

6. จากเอกสารการสัมมนาเรื่องการแบ่งปันประสบการณ์การดำเนินการตามระบบประเมินคุณภาพรัฐวิสาหกิจในองค์กรของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2558) จากข้อมูลที่ใช้ในการสัมมนาพบว่าโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติมีค่าความเข้มข้นพลังงานต่ำที่สุดคิดเป็น

7.947 GJ/MWh สำหรับเทคโนโลยีพลังความร้อนเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติและน้ำมันเตาคิดเป็น 9.665 GJ/MWh และเทคโนโลยีพลังความร้อนเชื้อเพลิงถ่านหินคิดเป็น 10.480 GJ/MWh

7. Beer (2007) ศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง ผู้วิจัยได้กล่าวสรุปถึงส่วนสำคัญดังต่อไปนี้

- โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ มีประสิทธิภาพสูงที่สุด สะอาดที่สุดและใช้ต้นทุนต่ำที่สุด
- การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิต เป็นวิธีการที่ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หากมีการพัฒนาเทคโนโลยีการเผาไหม้ (Combustion) และการแปรสภาพเป็นก๊าซ (Gasification technology) และจะช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างเป็นนัยสำคัญ
- การลดลงของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลจากกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น หากแสดงในรูปของปริมาณการปล่อยต่อหน่วยผลิตไฟฟ้า (per kWh) ของโรงไฟฟ้าหรือการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นคาร์บอน จะทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนมากขึ้น

8. Aljundi I.H. (2009) ได้วิเคราะห์พลังงานและเอ็กซ์เซอียของโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำในประเทศจอร์แดน มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของระบบและเพื่อระบุและหาตำแหน่งที่มีการสูญเสียพลังงานเอ็กซ์เซอียสูงสุด องค์ประกอบของระบบประกอบด้วย หม้อต้มไอน้ำ (Boiler) เครื่องควบแน่น (Condenser) และกังหัน (Turbine) จากการศึกษาพบว่าอัตราการสูญเสียเอ็กซ์เซอียสูงสุดเกิดจากระบบหม้อต้มไอน้ำ รองลงมาคือกังหัน และสุดท้ายคือพัดลมดูดอากาศในเครื่องควบแน่น มีค่าเท่ากับร้อยละ 77 13 และ 9 ตามลำดับ

9. Kamate และคณะ (2009) ได้วิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของโรงไฟฟ้าพลังงานร่วม (Cogeneration plant) ของโรงงานน้ำตาลในประเทศอินเดีย ผู้วิจัยได้วิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของโรงไฟฟ้าพลังงานร่วมที่ใช้ซานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตน้ำตาล ที่ใช้กังหันไอน้ำแบบความดันด้านกลับ (Back Pressure Turbine) และกังหันไอน้ำแบบควบแน่น (Extraction Condensing Turbine) ในการวิเคราะห์นั้นจะใช้วิธีการเอ็กซ์เซอียมาประเมินประสิทธิภาพของส่วนประกอบต่างๆ

เพื่อระบุและประเมินการสูญเสียทางเทอร์โมไดนามิกส์ ผลจากการวิเคราะห์พบว่าการปรับปรุงสถานะทางเข้าไอน้ำของกังหันจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียได้ โดยสถานะที่เหมาะสมคือที่ความดัน 61 บาร์ และอุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส โรงไฟฟ้าพลังงานร่วมแบบที่ใช้กังหันไอน้ำแบบความดันต่ำกลับจะมีประสิทธิภาพทางพลังงานและเอ็กซ์เซอียร้อยละ 86.3 และ 30.7 ตามลำดับ และโรงไฟฟ้าพลังงานร่วมแบบที่ใช้กังหันไอน้ำแบบความดันสูงจะมีประสิทธิภาพทางพลังงานและเอ็กซ์เซอียร้อยละ 68.2 และ 26.0 ตามลำดับ

10. Saidur และคณะ (2010) ได้วิเคราะห์พลังงานและเอ็กซ์เซอียของหม้อไอน้ำที่ใช้ในอุตสาหกรรมในประเทศมาเลเซีย ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กซ์เซอียมาใช้กับระบบหม้อต้มไอน้ำ จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กซ์เซอียของหม้อต้มไอน้ำมีค่าเท่ากับร้อยละ 72.46 และ 24.89 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอุปกรณ์อื่นๆพบว่าหม้อต้มไอน้ำ มีการสูญเสียเอ็กซ์เซอียสูงสุด รองลงมาคือเตาเผาไหม้ และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) มีอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียต่ำที่สุด โดยวิธีการที่ช่วยประหยัดพลังงาน ตัวอย่างเช่น การใช้ความเร็วรอบใบพัดในพัดลมของกังหันที่ 19 kW เป็นต้น

11. Al-Sulaiman และคณะ (2011) ได้ประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและเอ็กซ์เซอียของโรงไฟฟ้าที่ใช้ระบบ Organic Rankine cycle (ORC) กับเตาเผาชีวมวลสำหรับกระบวนการผลิตต่างๆของประเทศแคนาดา จากการศึกษาพบว่า 1) จุดที่มีการสูญเสียเอ็กซ์เซอียหลัก คือ เตาเผาชีวมวลและเครื่องระเหย ORC และ 2) ในกรณีการผลิตแบบ tri-generation ได้แก่ Power Heat และ Cooling สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียได้และยังส่งผลต่อการลดความเข้มข้นคาร์บอนอีกด้วย

12. Kaviri และคณะ (2012) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง (Heat Recovery Steam Generator: HRSG) ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมในประเทศมาเลเซียจากการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กซ์เซอีย โดยเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งนั้นเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญและยังเป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมระหว่างกังหันก๊าซและกังหันไอน้ำในเทคโนโลยีพลังความร้อนร่วม จากการศึกษาพบว่าเครื่องระเหยความดันสูง (high pressure evaporator) มีการสูญเสียเอ็กซ์เซอียสูงสุด

13. Açikkalp และคณะ (2014) ได้วิเคราะห์เอ็กซ์เซอียขององค์ประกอบที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติของประเทศตุรกี จากการศึกษาพบว่าอุปกรณ์ที่มีอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียสูงที่สุด คือห้องเผาไหม้ ในขณะที่กังหันไอน้ำความดันสูงมีอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียต่ำที่สุด สำหรับประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียพบมากที่สุดในกังหันก๊าซ ดังนั้นห้องเผาไหม้เป็นองค์ประกอบที่ควรให้ความสำคัญในการปรับปรุงระบบ

จากงานวิจัยที่ 1 ถึง 7 แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มข้นพลังงานเป็นตัวชี้วัดที่มีการใช้อย่างแพร่หลายสำหรับประเมินปริมาณการปล่อยและปริมาณการใช้พลังงานของอุตสาหกรรมต่างๆได้ ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งจากงานวิจัยข้างต้นใช้วิธีการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามแนวทางคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือ IPCC ค.ศ. 2006 ซึ่งองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ก็ได้อ้างอิงวิธีการคำนวณตามหน่วยงานนี้เช่นเดียวกัน

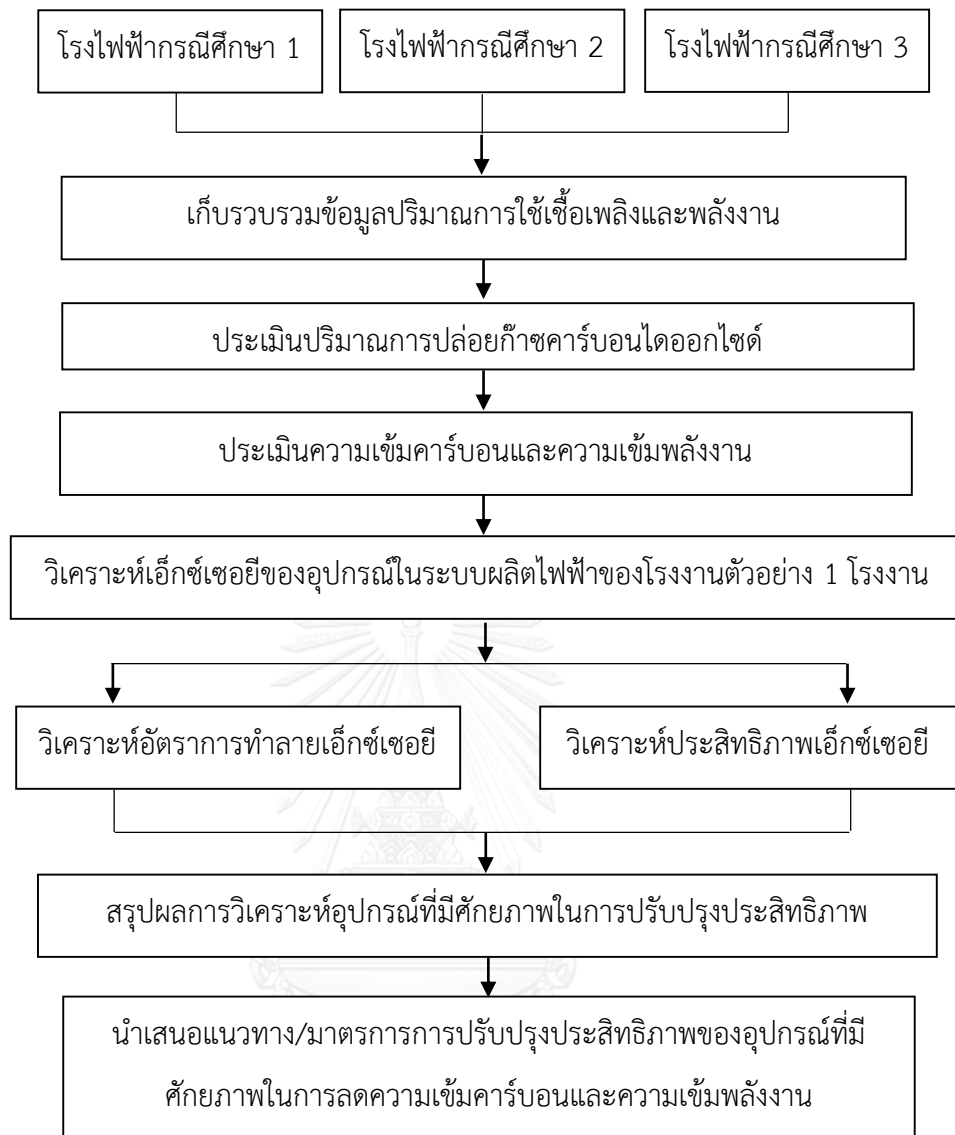
จากงานวิจัยที่ 8 ถึง 13 แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าในหลายๆเทคโนโลยีการผลิต ตัวอย่างเช่น โรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ โรงไฟฟ้าพลังงานร่วม โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม เป็นต้น และยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพขององค์ประกอบหลายๆส่วนที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น หม้อไอน้ำ กังหันก๊าซ เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง เป็นต้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ตระหนักถึงความสำคัญของการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคพลังงานซึ่งเป็นภาคที่มีปริมาณการปล่อยสูงที่สุดทั่วโลกรวมทั้งประเทศไทย โดยศึกษาโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษาในประเทศไทย ภายใต้วัตถุประสงค์ คือ ประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ทราบถึงปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษา และใช้ผลจากการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมาประเมินค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงาน นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษา โดยการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียเพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบของระบบที่ยังมีศักยภาพในการปรับปรุงประสิทธิภาพอันจะส่งผลต่อปริมาณการใช้พลังงานและปริมาณการปล่อยที่ลดลง ในส่วนสุดท้ายนั้นผู้วิจัยจะศึกษาเทคโนโลยีหรือแนวทางต่างๆที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าที่สามารถนำประยุกต์ใช้กับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติทั้งในงานวิจัยนี้และโรงไฟฟ้าอื่นๆในประเทศไทย ผังการไหลวิธีการศึกษาดังรูปที่ 3.1





รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ทบทวนเอกสารและรายงานการศึกษาต่างๆเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

งานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาและค้นคว้าข้อมูลดังต่อไปนี้

1. จัดประเภทและกระบวนการทำงานของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบต่างๆในประเทศไทย
2. ศึกษาข้อดี/ข้อเสียของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ
3. ศึกษากำลังผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในประเทศไทย ทั้งกำลังผลิตติดตั้งจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผู้ผลิตเอกชนรายใหญ่ (IPP) ผู้ผลิตเอกชนรายเล็ก (SPP) และผู้ผลิตจากภายนอกประเทศ
4. ศึกษาสถานการณ์ด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและนโยบายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการดำเนินการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของอุตสาหกรรมไฟฟ้า
5. ทบทวนเอกสารและรายงานการศึกษาในด้านนโยบายและแผนการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

3.2 รับสมัครโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษา

3.2.1 รับสมัครโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่สนใจเข้าร่วมงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่สมัครใจเข้าร่วมงานวิจัย การค้นคว้าจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2558) พบว่า โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่มีกำลังผลิตติดตั้งจากผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กและรายใหญ่ในประเทศไทย ซึ่งมีทั้งหมด 37 โรงงาน ดังตารางที่ 2.3

จากหัวข้อ 2.1.2.3 ในบทที่ 2 พบว่ากำลังผลิตในระบบไฟฟ้าของประเทศ ประกอบด้วย การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กและรายใหญ่ และกำลังผลิตจากภายนอกประเทศ มีกำลังผลิตติดตั้งรวมทั้งหมดเท่ากับ 34,689.28 เมกะวัตต์ แบ่งเป็นกำลังผลิตติดตั้งจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กและรายใหญ่ และกำลังผลิตจากภายนอกประเทศ เท่ากับ 15,481.98 16,803.30 และ 2,404.00 เมกะวัตต์ ตามลำดับ คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 44.63 48.44 และ 6.93 ของกำลังผลิตติดตั้งทั้งหมดในระบบไฟฟ้าของประเทศไทย ตามลำดับ โดยโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาเอกชนในงานวิจัยนี้จำนวน 3 โรงงาน มีกำลังผลิตรวมเท่ากับ 1,648.00 เมกะวัตต์

คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 9.81 ของกำลังผลิตติดตั้งจากผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กและรายใหญ่ และคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 4.75 ของกำลังผลิตติดตั้งรวมของระบบไฟฟ้าในประเทศไทย ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนกำลังผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ
กรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ ข้อมูลปี พ.ศ. 2558

แหล่งผลิต	กำลังผลิตติดตั้งรวม (เมกะวัตต์)	สัดส่วน (%)
กำลังผลิตติดตั้งทั่วประเทศ	34,689.28	100.00
กำลังผลิตติดตั้งของเทคโนโลยีพลังความร้อนร่วม เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในประเทศ	16,803.30	48.44
โรงไฟฟ้ากรณีศึกษาเอกชน 3 โรงงาน (สัดส่วนเทียบกับกำลังผลิตติดตั้งทั่วประเทศ)		4.75
โรงไฟฟ้ากรณีศึกษาเอกชน 3 โรงงาน (สัดส่วนเทียบกับกำลังผลิตติดตั้งของเทคโนโลยีพลัง ความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในประเทศ)	1,648.00	10.97

ที่มา : (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2558)

3.2.2 ศึกษากระบวนการผลิตของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาที่เข้าร่วมงานวิจัย

1. สอบถามจากพนักงานหรือผู้รับผิดชอบในหน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาและศึกษากระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงงานตัวอย่าง เพื่อให้ทราบถึงแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิต

2. ศึกษากระบวนการเพื่อให้เกิดความเข้าใจในการศึกษาสมดุลความร้อนและมวลสาร (Heat and Mass Balance) ที่เข้าและออกจากระบบมากขึ้น สำหรับใช้ในการวิเคราะห์เอ็กซีเซอีย

3.3 การกำหนดขอบเขตการประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยกำหนดขอบเขตการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอ้างอิงตามแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (พัฒนาโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน)) ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1 พ.ศ. 2556 โดยกำหนดขอบเขตการประเมินออกเป็น 2 ขอบเขต ดังนี้

ขอบเขตที่ 1 : การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางตรง ประกอบด้วย

- การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่อยู่กับที่ ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซิน ดีเซลและก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquid Petroleum Gas : LPG) ในอุปกรณ์หรือเครื่องจักร การเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า การรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากท่อส่ง และการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ (Demin Water)
- การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่มีการเคลื่อนที่ ได้แก่ เผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซินและดีเซลจากกิจกรรมการขนส่งของยานพาหนะ การรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุปกรณ์ดับเพลิง

ขอบเขตที่ 2 : การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางอ้อม ประกอบด้วย

- การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการผลิตไฟฟ้า ความร้อนหรือไอน้ำที่ถูกนำเข้ามาจากภายนอกเพื่อใช้งานภายในองค์กร

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นคาร์บอนเฉลี่ยและความเข้มพลังงานเฉลี่ยของโรงไฟฟ้าการศึกษา 3 โรงงาน ผู้วิจัยเก็บรวบรวมข้อมูลแบบทุติยภูมิ (Secondary data) โดยการบันทึกข้อมูลต่างๆลงในแบบฟอร์มการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อต่างๆ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษา

ข้อมูล	รายละเอียด
1. ข้อมูลทั่วไปของสถานประกอบการ	1.1 จำนวนบุคลากร 1.2 พื้นที่สถานประกอบการ
2. ข้อมูลส่วนการผลิต	2.1 ข้อมูลกระบวนการผลิต ประกอบด้วย <ul style="list-style-type: none"> ▪ แผนผังกระบวนการผลิต (Heat and Mass Balance Diagram) ▪ กระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ (Demin water) 2.2 ข้อมูลเชื้อเพลิง ประกอบด้วย <ul style="list-style-type: none"> ▪ ปริมาณการใช้น้ำมันเบนซินและดีเซลในอุปกรณ์/เครื่องจักร ได้แก่ เครื่องผลิตไฟฟ้าสำรอง รถยนต์ ปั้มน้ำดับเพลิง ซ่อมดับเพลิง 2.3 การรั่วซึมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุปกรณ์ ประกอบด้วย <ul style="list-style-type: none"> ▪ การรั่วซึมจากท่อส่ง ▪ การรั่วซึมจากระบบดับเพลิง
3. ข้อมูลส่วนพลังงาน	3.1 ข้อมูลเชื้อเพลิง ประกอบด้วย <ul style="list-style-type: none"> ▪ ชนิด องค์ประกอบและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า ▪ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า 3.2 ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าที่นำเข้ามาจากภายนอกโรงงาน ประกอบด้วย <ul style="list-style-type: none"> ▪ ปริมาณการใช้ไฟฟ้า ▪ ค่าแพคเกจการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้าของแหล่งที่รับไฟฟ้าเข้ามาใช้งาน 3.3 ข้อมูลการใช้ไอน้ำที่นำเข้ามาจากภายนอกโรงงาน ประกอบด้วย <ul style="list-style-type: none"> ▪ ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าแพคเกจการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของไอน้ำ ได้แก่ ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ ชนิดและปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า

3.5 การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

งานวิจัยนี้จะประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยของโรงไฟฟ้าการศึกษาจำนวน 3 โรงงาน โดยอ้างอิงตามแนวทางต่างๆดังต่อไปนี้

1. แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (พัฒนาโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน)) ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1 พ.ศ. 2556 ใช้สำหรับการคำนวณการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล เบนซินและก๊าซปิโตรเลียมเหลว การใช้อุปกรณ์ดับเพลิง และการผลิตไฟฟ้าที่นำเข้ามาจากภายนอก

2. สถาบันปิโตรเลียมแห่งสหรัฐอเมริกา (American Petroleum Institute : API) ค.ศ. 2009 ใช้สำหรับการคำนวณการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) และการรั่วไหล (Fugitive emission) จากท่อส่ง

3. สถาบันทรัพยากรแห่งโลก (World Resources Institute : WRI) และคณะกรรมการนักธุรกิจเพื่อสิ่งแวดล้อมโลก (World Business Council for Sustainable Development : WBCSD) ค.ศ. 2006 ใช้สำหรับการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไอน้ำที่นำเข้ามาจากภายนอก

วิธีการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ขอบเขตดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ได้แก่ การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางตรง และการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางอ้อม ดังสมการ (3.1)

$$\text{Emission}_{\text{CO}_2} = \text{Emission}_{\text{direct}} + \text{Emission}_{\text{indirect}} \quad (3.1)$$

โดยที่ $\text{Emission}_{\text{CO}_2}$ = การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด (kgCO₂)

$\text{Emission}_{\text{direct}}$ = การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางตรง (kgCO₂)

$\text{Emission}_{\text{indirect}}$ = การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางอ้อม (kgCO₂)

3.5.1 ขอบเขตที่ 1 การการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางตรง (Direct emission)

3.5.1.1 การเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า คำนวณตามวิธีการของสถาบันปิโตรเลียมแห่งสหรัฐอเมริกา (API)

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

1. ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติในแต่ละเดือน (หน่วย : ล้านบีทียูต่อเดือน)

2. ร้อยละโดยมวลขององค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิด (%C_i by mole) ซึ่งองค์ประกอบก๊าซประกอบไปด้วย มีเทน (CH₄) อีเทน (C₂H₆) โพรเพน (C₃H₈) บิวเทน (C₄H₁₀) เพนเทน (C₅H₁₂) เฮกเซน (C₆H₁₄) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)
3. ค่าความร้อน (Gross Heating Value : GHV) ของก๊าซธรรมชาติเฉลี่ยรายเดือน

วิธีการคำนวณ

- 1) คำนวณร้อยละโดยมวลขององค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิดและค่าความร้อน (Gross Heating Value : GHV) เฉลี่ยรายเดือน
- 2) คำนวณร้อยละโดยมวลของคาร์บอนในองค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิด (% Carbon content by mole; %C_{ci}) ในแต่ละเดือน จากสมการ (3.1) และคำนวณร้อยละโดยมวลของเชื้อเพลิง (%C_{Fuel}) จากสมการ (3.2)

$$\%C_{ci} = X_{C_{ci}} \times \%C_i \text{ by mass} \quad (3.1)$$

$$\%C_{Fuel} = \frac{(\%C_{ci} + \dots + \%C_{ci})}{100} \quad (3.2)$$

- โดยที่
- %C_{ci} = ร้อยละโดยมวลของคาร์บอนในองค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิด
 - X_{C_{ci}} = จำนวนคาร์บอนอะตอมขององค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิด
(เช่น C₃H₈ มี X_{C₃H₈} = 3)
 - %C_i by mass = ร้อยละโดยมวลขององค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิด
 - %C_{Fuel} = ร้อยละโดยมวลของเชื้อเพลิง

- 3) เปลี่ยนหน่วยปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติโดยใช้ค่าความร้อนเฉลี่ยของแต่ละเดือน จากสมการ (3.3)

$$NG \text{ (scf)} = \frac{NG1 \text{ (mmbtu)} \times 10^6}{\text{Average GHV (Btu/scf)}} \quad (3.3)$$

- โดยที่
- NG (ลูกบาศก์ฟุต) = ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ
 - NG1 (ล้านบีทียู) = ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ
 - Average GHV (บีทียูต่อลูกบาศก์ฟุต) = ค่าความร้อนเฉลี่ยในแต่ละเดือน

4) คำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ จากสมการ (3.4)

$$E_{\text{CO}_2, \text{NG}} (\text{kgCO}_2) = \text{NG} (\text{scf}) \times \%C_{\text{Fuel}} \times \text{MW CO}_2 \times \frac{1}{\text{Molar volume conversion}} \times \text{Mass conversion factor} \quad (3.4)$$

โดยที่	$E_{\text{CO}_2, \text{NG}}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์)	=	การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ
	NG (ลูกบาศก์ฟุต)	=	ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ
	$\%C_{\text{Fuel}}$	=	ร้อยละโดยมวลของเชื้อเพลิง
	MW CO ₂	=	มวลโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (44 lb/lbmole)
	Molar volume conversion factor	=	ค่าแฟกเตอร์การแปลงหน่วย (379.3 scf/lbmole)
	Mass conversion factor	=	ค่าแฟกเตอร์การแปลงหน่วย (1 ปอนด์ = 0.4536 กิโลกรัม)

3.5.1.2. การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้สำหรับอุปกรณ์หรือเครื่องจักรและยานพาหนะ

คำนวณตามวิธีการของแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร จากสมการ (3.5)

$$E_{\text{CO}_2, \text{fuel}} (\text{kg CO}_2) = \text{Fuel Consumption}_{\text{fuel}} (\text{unit}) \times \text{EF}_{\text{CO}_2, \text{fuel}} (\text{kg CO}_2/\text{unit}) \quad (3.5)$$

โดยที่	$E_{\text{CO}_2, \text{fuel}}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์)	=	การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง
	Fuel Consumption _{fuel} (หน่วย)	=	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้
	EF _{CO₂, fuel} (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วย)	=	ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้

3.5.1.3. การผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ คำนวณตามหลักปริมาณสัมพันธ์ จากสมการ (3.6)

$$E_{\text{CO}_2, \text{DW}} (\text{kg CO}_2) = \text{DW} (\text{m}^3) \times \text{EF}_{[\text{CO}_2(\text{aq})]} \quad (3.6)$$

โดยที่ $E_{CO_2,DW}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) = การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

DW (ลูกบาศก์เมตร) = ปริมาณน้ำปราศจากแร่ธาตุ

$EF_{[CO_2(aq)]}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อลูกบาศก์เมตร) = ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.5.1.4. การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้งานของอุปกรณ์หรือจากการรั่วไหล สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.7)

ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนนี้ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนของโมเลกุล และขึ้นอยู่กับอายุของก๊าซนั้นๆ ในบรรยากาศ และจะคิดเทียบกับการแผ่รังสีความร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เช่น 20 ปี 50 ปี หรือ 100 ปี ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า GWP ในช่วงเวลา 100 ปี ดังแสดงในบทที่ 2 ตารางที่ 2.6

$$E_{CO_2,GWP}(\text{kgCO}_2) = \text{CO}_2 \text{ emission}(\text{kgCO}_2) \times \text{GWP} \quad (3.7)$$

โดยที่ $E_{CO_2,GWP}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) = การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้งานของอุปกรณ์หรือจากการรั่วไหลโดยใช้ค่าศักยภาพการเกิดภาวะโลกร้อน

$\text{CO}_2 \text{ emission}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) = ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากการใช้งานอุปกรณ์หรือจากการรั่วไหล

GWP = ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ($\text{GWP}_{CO_2} = 1$)

3.5.1.5. การรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากท่อส่ง สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.8)

$$E_{CO_2,\text{fugitive}}(\text{kgCO}_2) = \frac{\% \text{Mole}_{CO_2}}{\text{Gas Content Basis of Factor}} \times L_P \text{ (m)} \times EF_{\text{Converted units}} \quad (3.8)$$

โดยที่ $E_{CO_2,\text{fugitive}}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) = การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการรั่วไหลจากท่อส่ง

%Mole _{CO₂}	= เปอร์เซ็นต์โดยโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซธรรมชาติ
L _p (เมตร)	= ความยาวท่อส่ง
EF _{Converted units}	= ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (0.1313 tonnesCO ₂ /km-yr)

3.5.2 ขอบเขตที่ 2 การการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางอ้อม (Indirect emission)

3.5.2.1. การผลิตไฟฟ้าที่นำเข้ามาจากภายนอกเพื่อใช้งานภายในองค์กร สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.9)

$$E_{CO_2,P} \text{ (kgCO}_2\text{)} = EC \text{ (kWh)} \times EF_{CO_2} \text{ (kgCO}_2\text{/kWh)} \quad (3.9)$$

โดยที่ $E_{CO_2,P}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) = การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้าที่นำเข้ามาจากภายนอก

EC (กิโลวัตต์ชั่วโมง) = ปริมาณการใช้ไฟฟ้า

EF_{CO₂} (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง) = ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.5.2.2. การผลิตไอน้ำที่นำเข้ามาจากภายนอกเพื่อใช้งานภายในองค์กร สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.10)

ไอน้ำที่นำเข้ามาจากภายนอกนั้นเป็นไอน้ำที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่ผลิตทั้งไฟฟ้าและไอน้ำ ดังนั้นในการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไอน้ำที่นำเข้ามาจากภายนอกจะคำนวณโดยใช้วิธีการจัดสรร (allocation) เป็นปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการผลิตไอน้ำจากการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำร่วมกัน (World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2006)

$$E_H = \frac{\frac{H}{e_H}}{\frac{H}{e_H} + \frac{P}{e_P}} \times E_T \quad (3.10)$$

โดยที่ E_H (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) = ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไอน้ำ

H (หน่วยพลังงาน)	= ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้
P (หน่วยพลังงาน)	= ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้
e_H (ร้อยละ)	= ประสิทธิภาพการผลิตไอน้ำ
e_P (ร้อยละ)	= ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า
E_T (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์)	= ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

3.5.3 การประเมินความเข้มคาร์บอน

งานวิจัยนี้นอกจากประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปตัน (กิโลกรัม) คาร์บอนไดออกไซด์ ยังได้มีการประเมินค่าความเข้มคาร์บอน (Carbon Intensity : CI) จากปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้ทราบถึงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาต่อหนึ่งหน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยจะใช้ข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาทั้ง 3 โรงงานโดยใช้ข้อมูลในปี พ.ศ. 2556-2557 ในการประเมินและจะแสดงผลในรูปค่าความเข้มคาร์บอนเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักด้วยกำลังผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษา ซึ่งสมการการประเมินค่าความเข้มคาร์บอนแสดงดังสมการ (3.11)

$$CI \text{ (kgCO}_2\text{/kWh)} = \frac{\text{CO}_2 \text{ emission (kgCO}_2\text{)}}{\text{Electricity Produced (kWh)}} \quad (3.11)$$

โดยที่ CI = ความเข้มคาร์บอน (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ ชั่วโมง)

$\text{CO}_2 \text{ emission}$ = ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์)

Electricity produced = ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิโลวัตต์ ชั่วโมง)

3.5.4 การประเมินความเข้มพลังงาน

การประเมินค่าความเข้มการใช้พลังงานจะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์หนึ่งหน่วย โดยแบ่งการประเมินออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การใช้พลังงานจากกระบวนการผลิตทางตรงและการใช้พลังงานจากกระบวนการผลิตทางอ้อม โดยจะใช้ข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาทั้ง 3 โรงงาน โดยใช้ข้อมูลในปี พ.ศ. 2556-2557 ในการประเมินและจะ

แสดงผลในรูปค่าความเข้มพลังงานเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักด้วยกำลังผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าการศึกษา ซึ่งสมการการประเมินค่าความเข้มพลังงานแสดงดังสมการ (3.12)

$$EI \text{ (GJ/MWh)} = \frac{EC \text{ (MJ)}}{P \text{ (MWh)} \times 1000} \quad (3.12)$$

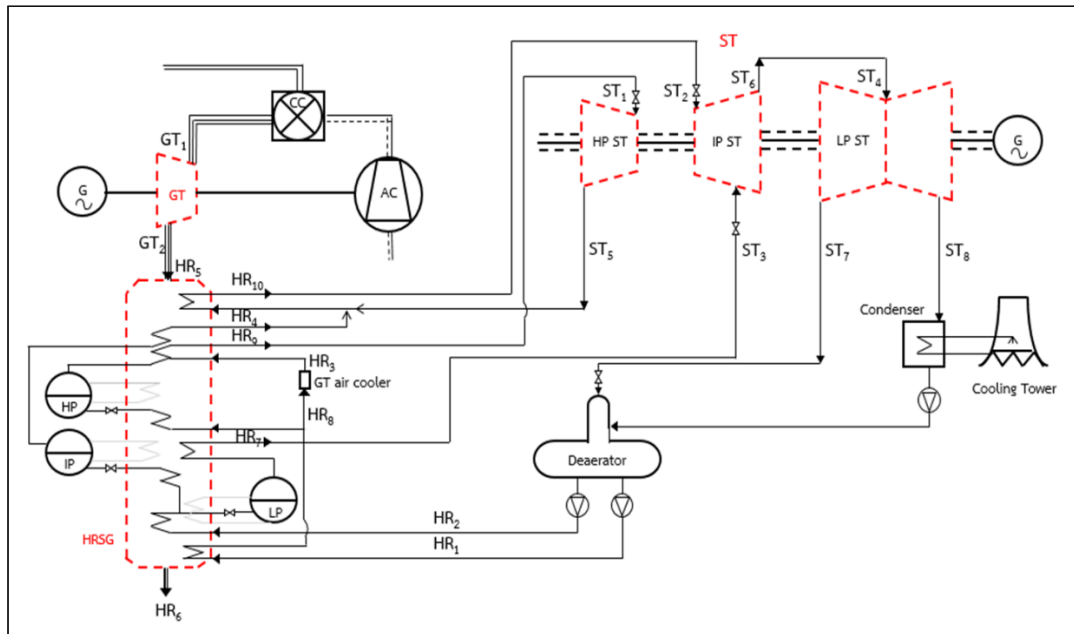
โดยที่ EI = ความเข้มพลังงาน (จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง)
 EC = ปริมาณการใช้พลังงาน (เมกะจูล) จากสมการ (3.13)
 P = ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ (เมกะวัตต์ชั่วโมง)

$$EC \text{ (MJ)} = \sum(\text{Fuel Consumption}_{\text{fuel}} \times \text{NCV}) \quad (3.13)$$

โดยที่ EC = ปริมาณการใช้พลังงาน (เมกะจูล)
 Fuel Consumption_{fuel} = ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (หน่วย)
 NCV = ค่าความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด (เมกะจูลต่อหน่วย)

3.6 การประเมินศักยภาพการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอีย

ในการประเมินศักยภาพการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าการศึกษา จะใช้วิธีการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอีย (Exergy Analysis) ซึ่งเป็นวิธีการใหม่ที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณการสูญเสียพลังงานที่มีประโยชน์และวิเคราะห์อุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าที่มีศักยภาพในการปรับปรุง เพื่อนำไปสู่การลดลงของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณการใช้พลังงาน โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลจากแผนภาพสมดุลความร้อนและมวลซึ่งเป็นค่าจากการออกแบบของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติการศึกษา 1 โรงงาน มาใช้ในการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียขององค์ประกอบในระบบผลิตไฟฟ้า รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพสมดุลความร้อนและมวลของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติการศึกษา



รูปที่ 3.2 แผนภาพสมดุลความร้อนและมวลของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

กรณีศึกษา

จากรูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพสมดุลความร้อนและมวล (Heat and Mass Balance Diagram) ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นกรณีศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วย ห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber; CC) กังหันก๊าซ (Gas Turbine; GT) เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor; AC) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) กังหันไอน้ำ (Steam Turbine; ST) เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง (Heat recovery steam generator; HRSG) เครื่องทำความเย็น (GT air cooler) อุปกรณ์ขจัดอากาศ (Deaerator) เครื่องควบแน่น (Condenser) และหอหล่อเย็น (Cooling Tower) ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียขององค์ประกอบในโรงไฟฟ้ากรณีศึกษา ได้แก่ กังหันก๊าซ เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง และกังหันไอน้ำ ซึ่งประกอบด้วย กังหันไอน้ำความดันสูง (High pressure steam turbine; HPST) กังหันไอน้ำความดันปานกลาง (Intermediate pressure steam turbine; IPST) และกังหันไอน้ำความดันต่ำ (Low pressure steam turbine; LPST) ในตารางที่ 3.3 แสดงเส้นทางการไหลของมวลสารระหว่างองค์ประกอบที่ใช้ในการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอีย

ตารางที่ 3.3 เส้นทางการไหลของมวลสาร

จุดที่	รายละเอียด	จุดที่	รายละเอียด
GT ₁	ก๊าซเผาไหม้เข้า GT	HR ₉	ไอน้ำออกจาก HRSG เข้า HP ST
GT ₂	ก๊าซเผาไหม้เข้า HRSG	HR ₁₀	ไอน้ำออกจาก HRSG เข้า IP ST
HR ₁	น้ำเข้า HRSG	ST ₁	ไอน้ำจาก HRSG เข้า HP ST
HR ₂	น้ำเข้า HRSG	ST ₂	ไอน้ำจาก HRSG เข้า IP ST
HR ₃	ไอน้ำจาก GT air cooler เข้า HRSG	ST ₃	ไอน้ำจาก HRSG เข้า IP ST
HR ₄	ไอน้ำจาก HP ST เข้า HRSG	ST ₄	ไอน้ำจาก IP ST เข้า LP ST
HR ₅	ก๊าซจาก GT เข้า HRSG	ST ₅	ไอน้ำจาก HP ST เข้า HRSG
HR ₆	ก๊าซเหลือทิ้งออกจาก HRSG	ST ₆	ไอน้ำจาก IP ST เข้า LP ST
HR ₇	ไอน้ำจาก HRSG เข้า IP ST	ST ₇	ไอน้ำจาก LP ST เข้า HRSG
HR ₈	น้ำเข้า GT air cooler	ST ₈	ไอน้ำจาก LP ST เข้า condenser

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียโดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทำลายเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอีย สำหรับการวิเคราะห์การทำลายเอ็กซ์เซอียนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงการสูญเสียงานที่เป็นประโยชน์ไปจากระบบ และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ศักยภาพของอุปกรณ์/เครื่องจักรและกระบวนการผลิตของโรงไฟฟ้า จากที่ได้

กล่าวไว้ข้างต้นในบทที่ 2 หัวข้อ 2.6.3 ว่าเอ็กซ์เซอียของระบบแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ เอ็กซ์เซอียทางกายภาพ เอ็กซ์เซอียจลน์ เอ็กซ์เซอียศักย์และเอ็กซ์เซอียทางเคมี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะสมมติให้เอ็กซ์เซอียจลน์และเอ็กซ์เซอียศักย์ไม่มีนัยสำคัญเนื่องจากที่จุดทางเข้าและทางออกของของไหลอยู่ในระดับความสูงที่แตกต่างกันน้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญ อีกทั้งความเร็วของของไหลที่จุดทางเข้าและทางออกมีค่าแตกต่างกันน้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญเช่นกัน และผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของหน่วยผลิตต่างๆ ได้แก่ กังหันก๊าซ เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งและกังหันไอน้ำ ซึ่งการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียทางกายภาพจะใช้กับองค์ประกอบต่างๆอันได้แก่ กังหันก๊าซ เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง และกังหันไอน้ำ และสำหรับเอ็กซ์เซอียทางเคมีนั้นจะใช้ในการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียที่ทางเข้าของกังหันก๊าซเพียงจุดเดียว เนื่องจากการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียทางเคมีจะใช้ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีเท่านั้น นั่นหมายถึง ก๊าซจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติจากห้องเผาไหม้ที่ไหลเข้าสู่กังหันก๊าซนั่นเอง

สมมูลเอ็กซ์เซอียสำหรับการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมกรณีศึกษา

จากบทที่ 2 หัวข้อ 2.6.3 สามารถเขียนสมการสมมูลเอ็กซ์เซอียพื้นฐาน แสดงดังสมการที่ (3.14)

$$\dot{E}x_Q + \sum_i \dot{m}_i ex_i = \sum_e \dot{m}_e ex_e + \dot{E}x_W + \dot{E}x_D \quad (3.14)$$

จากสมการสมมูลเอ็กซ์เซอียพื้นฐานข้างต้น สำหรับงานวิจัยนี้จะไม่คำนึงถึงเอ็กซ์เซอียจากการถ่ายโอนความร้อน ($\dot{E}x_Q$) เนื่องจากกำหนดให้องค์ประกอบต่างๆของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาไม่มีการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ

สมการเอ็กซ์เซอียทางกายภาพ (ex_{ph}) แสดงดังสมการที่ (3.15)

$$ex = ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3.15)$$

สมการเอ็กซ์เซอียทางกายเคมี (ex_{ch}) แสดงดังสมการที่ (3.16)

$$ex = ex_{ch} = \sum X_k \overline{ex_{ch}^k} + RT_0 \sum X_k \ln(X_k) \quad (3.16)$$

สมการวิเคราะห์อัตราเอ็กซ์เซอีย ($\dot{E}x$) แสดงดังสมการที่ (3.17)

$$\dot{E}x = \dot{m} ex \quad (3.17)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (3.15) (3.16) และ (3.17) สามารถเขียนเป็นสมการวิเคราะห์อัตราเอ็กซ์เซอียทางกายภาพ ($\dot{E}x_{ph}$) และอัตราเอ็กซ์เซอียทางเคมี ($\dot{E}x_{ch}$) ได้ดังสมการที่ (3.18) และ (3.19)

$$\dot{E}x = \dot{E}x_{ph} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (3.18)$$

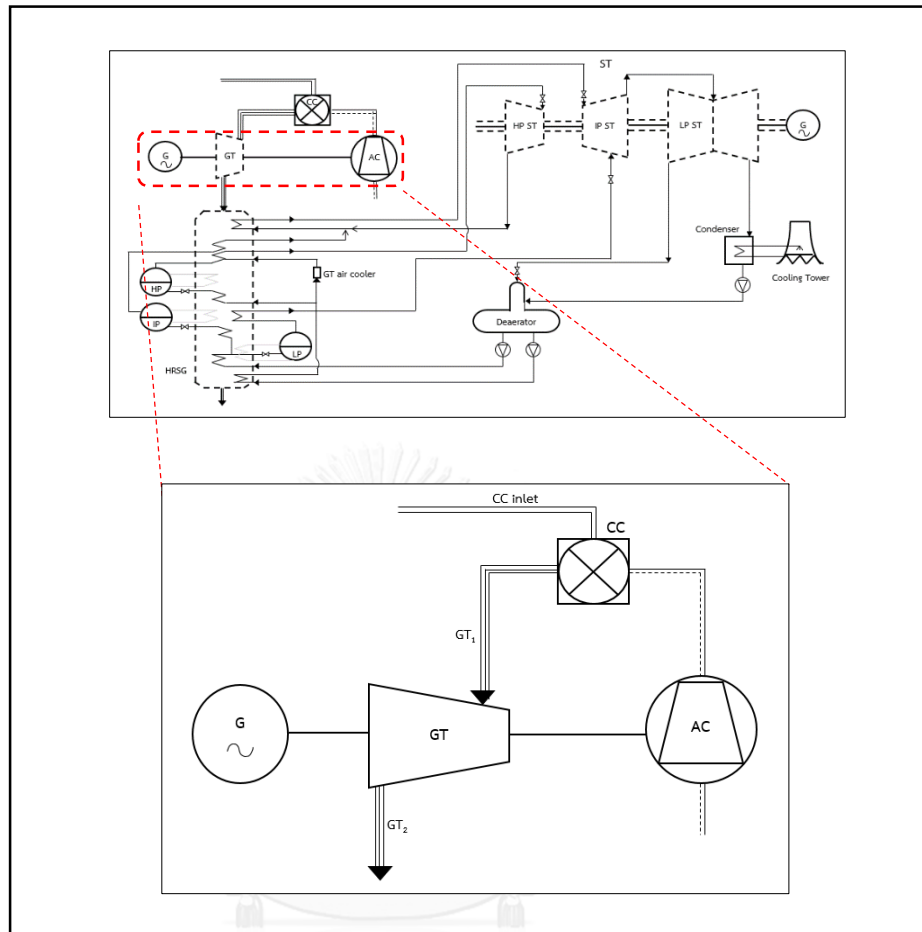
$$\dot{E}x = \dot{E}x_{ch} = \dot{m} \left(\sum X_k \overline{ex}_{ch}^k + RT_0 \sum X_k \ln(X_k) \right) \quad (3.19)$$

และสมการวิเคราะห์อัตราเอนทาลปีของงาน ($\dot{E}x_W$) แสดงดังสมการที่ (3.20)

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (3.20)$$

โดยที่	$\dot{E}x_Q$ (กิโลจูลต่อวินาที)	= อัตราเอนทาลปีของการถ่ายเทความร้อน
	ex (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)	= เอนทาลปีจำเพาะ
	ex_{ph} (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)	= เอนทาลปีทางกายภาพ
	ex_{ch} (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)	= เอนทาลปีทางเคมี
	$\dot{E}x_{ph}$ (กิโลจูลต่อวินาที)	= อัตราเอนทาลปีทางกายภาพ
	$\dot{E}x_{ch}$ (กิโลจูลต่อวินาที)	= อัตราเอนทาลปีทางเคมี
	$\dot{E}x_W$ (กิโลจูลต่อวินาที)	= อัตราเอนทาลปีของงาน
	$\dot{E}x_D$ (กิโลจูลต่อวินาที)	= อัตราการทำลายเอนทาลปี
	\dot{m} (กิโลกรัมต่อวินาที)	= อัตราการไหลโดยมวล
	h (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)	= เอนทาลปีจำเพาะ
	s (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน)	= เอนโทรปีจำเพาะ
	T (เคลวิน)	= อุณหภูมิสัมบูรณ์
	\dot{W} (กิโลจูลต่อวินาที)	= อัตราเอนทาลปีของงาน
	X_k (%)	= สัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิง
	\overline{ex}_{ch}^k (กิโลจูลต่อโมล)	= Standard molar chemical exergy
	R	= ค่าคงตัวของก๊าซ (8.31 kJ/kmol-K)
	i	= ทางเข้า
	e	= ทางออก
	0	= สภาวะแวดล้อมอ้างอิง

3.6.1 การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของกังหันก๊าซ



รูปที่ 3.3 แผนภาพของกังหันก๊าซ

3.6.1.1. การวิเคราะห์การทำลายเอ็กซ์เซอียของกังหันก๊าซ ($\dot{E}_{X_{D,GT}}$)

จากสมการที่ (3.14) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการการทำลายเอ็กซ์เซอียของกังหันก๊าซ ได้ดังสมการที่ (3.21) โดยอัตราเอ็กซ์เซอียที่ทางเข้าและทางออกของกังหันก๊าซ ได้แก่ GT_1 และ GT_2 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

$$\begin{aligned}\dot{E}_{X_{D,GT}} &= \sum_i \dot{E}X_i - \sum_e \dot{E}X_e - \dot{W}_{GT} \\ &= \dot{E}X_{GT_1} - \dot{E}X_{GT_2} - \dot{W}_{GT}\end{aligned}\quad (3.21)$$

อัตราเอ็กซ์เซอียทางกายภาพของก๊าซเผาไหม้ (GT_1) ที่ทางเข้าของกังหันก๊าซ ($\dot{E}X_{ph,i}$) คำนวณได้จากสมการที่ (3.22) โดยสมมติให้ก๊าซเผาไหม้มีคุณสมบัติเป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal gas)

$$\dot{E}X_{ph,i,cg} = \dot{m}_i \left[C_{p,g,mix} \times (T_i - T_0) - T_0 \left\{ C_{p,g} \times \ln \left(\frac{T_i}{T_0} \right) - R \ln \left(\frac{P_i}{P_0} \right) \right\} \right] \quad (3.22)$$

อัตราเอนทัลปีของเอนทัลปีทางเคมีของก๊าซเผาไหม้ (GT_1) ที่ทางเข้าของห้องเผาไหม้ ($\dot{E}_{ch,i}$) คำนวณได้จากสมการที่ (3.23)

$$\dot{E}_{ch,i,CG} = \frac{\dot{m}_i}{MW} \left(\sum X_k \overline{ex}_{ch}^k + RT_0 \sum X_k \ln(X_k) \right) \quad (3.23)$$

อัตราเอนทัลปีของเอนทัลปีทางกายภาพของก๊าซ (GT_2) ที่ทางออกของกังหันก๊าซ ($\dot{E}_{ph,e}$) คำนวณได้จากสมการที่ (3.24) โดยสมมติให้ก๊าซเผาไหม้มีคุณสมบัติเป็นก๊าซอุดมคติ

$$\dot{E}_{ph,e} = \dot{m}_e \left[C_{p,g,mix} \times (T_e - T_0) - T_0 \left\{ C_{p,g} \times \ln \left(\frac{T_e}{T_0} \right) - R \ln \left(\frac{P_e}{P_0} \right) \right\} \right] \quad (3.24)$$

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซ ($C_{p,g}$) คำนวณได้จากสมการที่ (3.25) อ้างอิงจาก Cengel และคณะ (2549)

$$C_{p,g} = a + bT_{avg} + cT_{avg}^2 + dT_{avg}^3 \quad (3.25)$$

งานของกังหันก๊าซ (\dot{W}_{GT}) คำนวณได้จากสมการที่ (3.26)

$$\dot{W}_{GT} = \dot{m} \times c_{p,g,avg} \times (T_i - T_e) \quad (3.26)$$

โดยที่	$\dot{E}_{D,GT}$ (กิโลจูลต่อวินาที)	= อัตราการทำลายเอนทัลปีของกังหันก๊าซ
	\dot{E}_{ph} (กิโลจูลต่อวินาที)	= อัตราเอนทัลปีทางกายภาพ
	\dot{E}_{ch} (กิโลจูลต่อวินาที)	= อัตราเอนทัลปีทางเคมี
	\dot{W}_{GT} (กิโลจูลต่อวินาที)	= อัตราการทำงานของกังหันก๊าซ
	\dot{m} (กิโลกรัมต่อวินาที)	= อัตราการไหล
	$C_{p,g}$ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน)	= ความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซที่ความดันคงที่
	T (เคลวิน)	= อุณหภูมิ
	T_{avg0} (เคลวิน)	= อุณหภูมิเฉลี่ยที่จุด T และ T_0
	P (พาสคาล)	= ความดัน
	X_k (%)	= สัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิง
	\overline{ex}_{ch}^k (กิโลจูลต่อโมล)	= Standard molar chemical exergy
	R	= ค่าคงตัวของก๊าซ (8.31 KJ/kmol-K หรือ 0.287 kJ/kg-K)
	MW	= มวลโมเลกุล
	cg	= ก๊าซเผาไหม้

i	=	ทางเข้า
e	=	ทางออก
0	=	สภาวะแวดล้อมอ้างอิง
a, b, c, d	=	ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณของก๊าซแต่ละชนิด ได้แก่ O ₂ CO ₂ H ₂ O และ N ₂

3.6.2.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กซีเซอียของกังหันก๊าซ (ψ_{GT})

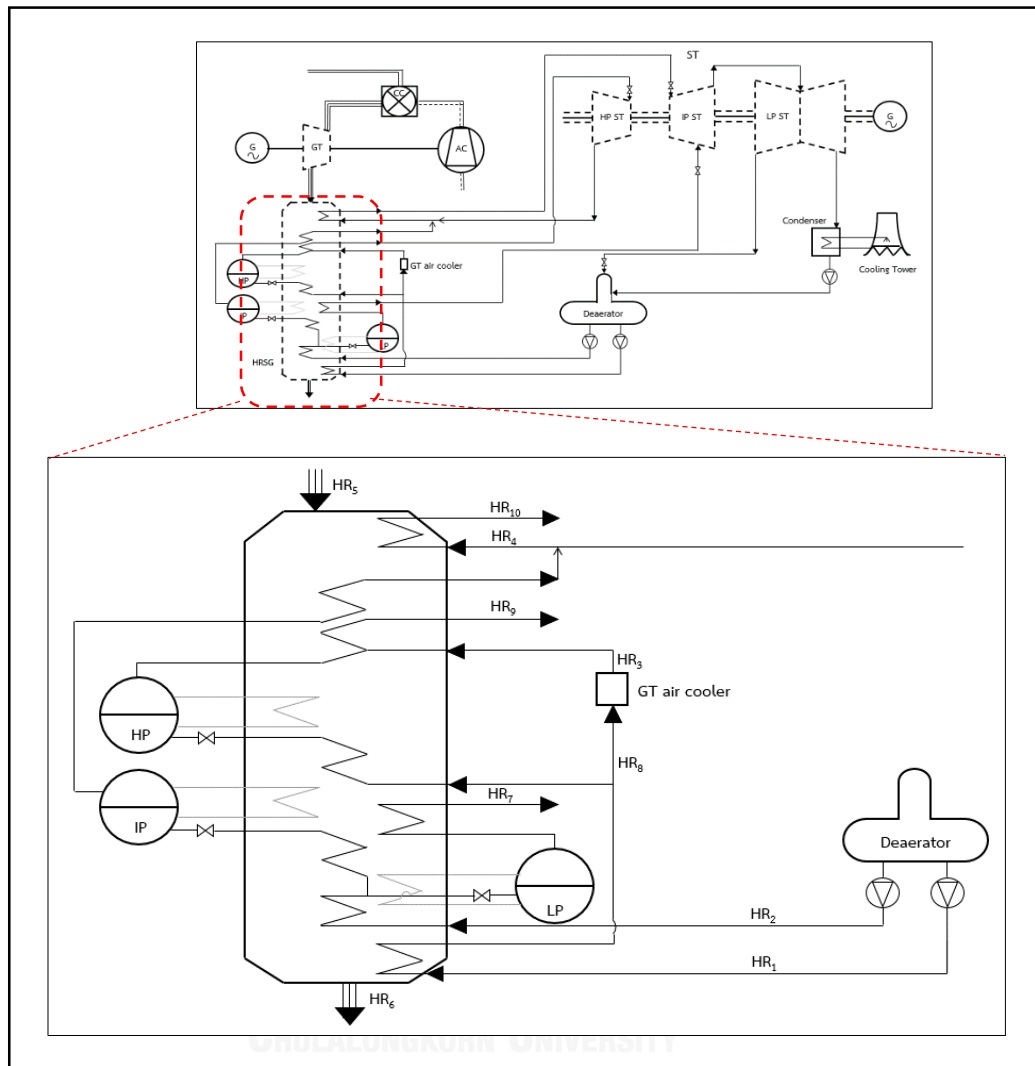
สมการการคำนวณประสิทธิภาพเอ็กซีเซอียของกังหันก๊าซ คำนวณได้จากสมการที่ (3.27)

$$\psi_{GT} = \frac{\dot{W}_{GT}}{\dot{E}x_{i,GT} - \dot{E}x_{e,GT}} \quad (3.27)$$

$$= \frac{\dot{W}_{GT}}{\dot{E}x_{GT1} - \dot{E}x_{GT2}}$$

โดยที่ ψ_{GT}	=	ประสิทธิภาพเอ็กซีเซอียของกังหันก๊าซ
\dot{W}_{GT} (กิโลจูลต่อวินาที)	=	อัตราการทำงานของกังหันก๊าซ
$\dot{E}x_{i,GT}$ (กิโลจูลต่อวินาที)	=	อัตราเอ็กซีเซอียที่ทางเข้าของกังหันก๊าซ
$\dot{E}x_{e,GT}$ (กิโลจูลต่อวินาที)	=	อัตราเอ็กซีเซอียที่ทางออกของกังหันก๊าซ

3.6.2 การวิเคราะห์เอ็กส์เซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง



รูปที่ 3.4 แผนภาพของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง

3.6.2.1 การวิเคราะห์การทำลายเอ็กส์เซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง

($\dot{E}X_{D,HRSG}$)

จากสมการที่ (3.14) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการการทำลายเอ็กส์เซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง ได้ดังสมการที่ (3.28) โดยอัตราเอ็กส์เซอียที่ทางเข้า ได้แก่ HR_1 HR_2 HR_3 HR_4 และ HR_5 และอัตราเอ็กส์เซอียที่ทางออก ได้แก่ HR_6 HR_7 HR_8 HR_9 และ HR_{10} ดังแสดงในรูปที่ 3.3

$$\dot{E}X_{D,HRSG} = \sum_i \dot{E}X_i - \sum_e \dot{E}X_e \quad (3.28)$$

$$= (\dot{E}X_{HR_1} + \dot{E}X_{HR_2} + \dot{E}X_{HR_3} + \dot{E}X_{HR_4} + \dot{E}X_{HR_5}) \\ - (\dot{E}X_{HR_6} + \dot{E}X_{HR_7} + \dot{E}X_{HR_8} + \dot{E}X_{HR_9} + \dot{E}X_{HR_{10}})$$

อัตราเอนทัลปีของไอ้ทางกายภาพของไอน้ำ (HR_3, HR_4) และน้ำ (HR_1, HR_2) ที่ทางเข้าของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง ($\dot{E}X_{ph,i}$) คำนวณได้จากสมการที่ (3.29)

$$\dot{E}X_{ph,i,s} = \dot{m}_i [(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)] \quad (3.29)$$

อัตราเอนทัลปีของไอ้ทางกายภาพของก๊าซ (HR_5) ที่ทางเข้าของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง ($\dot{E}X_{ph,i}$) คำนวณได้จากสมการที่ (3.30) โดยสมมติให้ก๊าซเผาไหม้มีคุณสมบัติเป็นก๊าซอุดมคติ

$$\dot{E}X_{ph,i,g} = \dot{m}_i \left[C_{p,g} \times (T_i - T_0) - T_0 \left\{ C_{p,g} \times \ln \left(\frac{T_i}{T_0} \right) - R \ln \left(\frac{P_i}{P_0} \right) \right\} \right] \quad (3.30)$$

อัตราเอนทัลปีของไอ้ทางกายภาพของไอน้ำ ($HR_7, HR_8, HR_9, HR_{10}$) ที่ทางออกของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง ($\dot{E}X_{ph,e}$) คำนวณได้จากสมการที่ (3.31)

$$\dot{E}X_{ph,e,s} = \dot{m}_e [(h_e - h_0) - T_0(s_e - s_0)] \quad (3.31)$$

อัตราเอนทัลปีของไอ้ทางกายภาพของก๊าซ (HR_6) ที่ทางออกของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง ($\dot{E}X_{ph,e}$) คำนวณได้จากสมการที่ (3.32) โดยสมมติให้ก๊าซเผาไหม้มีคุณสมบัติเป็นก๊าซอุดมคติ

$$\dot{E}X_{ph,e,g} = \dot{m}_e \left[C_{p,g} \times (T_i - T_0) - T_0 \left\{ C_{p,g} \times \ln \left(\frac{T_e}{T_0} \right) - R \ln \left(\frac{P_e}{P_0} \right) \right\} \right] \quad (3.32)$$

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซ ($C_{p,g}$) คำนวณได้จากสมการที่ (3.33) อ้างอิงจาก Ibrahim Dincer (2013)

$$C_{p,g} = a + bT_{avg} + cT_{avg}^2 + dT_{avg}^3 \quad (3.33)$$

โดยที่ $\dot{E}X_{D,HRSG}$ (กิโลจูลต่อวินาที) = อัตราการทำลายเอนทัลปีของไอ้ของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง

$\dot{E}X_{ph}$ (กิโลจูลต่อวินาที) = อัตราเอนทัลปีของไอ้ทางกายภาพ

\dot{m} (กิโลกรัมต่อวินาที) = อัตราการไหล

h (กิโลจูลต่อกิโลกรัม) = เอนทัลปีจำเพาะ

s (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน) = เอนโทรปีจำเพาะ

$C_{p,g}$ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน) = ความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซที่ความดันคงที่

T (เคลวิน) = อุณหภูมิ

T_{avg0} (เคลวิน) = อุณหภูมิเฉลี่ยที่จุด T และ T_0

P (พาสคาล)	= ความดัน
g	= ก๊าซ
l	= น้ำ
s	= ไอน้ำ
i	= ทางเข้า
e	= ทางออก
0	= สภาวะแวดล้อมอ้างอิง
a, b, c, d	= ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณของก๊าซแต่ละชนิด ได้แก่ O ₂ CO ₂ H ₂ O และ N ₂

3.6.2.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กซีเซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง (ψ_{HRSG})

สมการการคำนวณประสิทธิภาพเอ็กซีเซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งคำนวณได้จากสมการที่ (3.34)

$$\psi_{HRSG} = \frac{\sum \dot{E}x_{e,l,s} - \sum \dot{E}x_{i,l,s}}{\dot{E}x_{i,g} - \dot{E}x_{e,g}} \quad (3.34)$$

$$= \frac{(\dot{E}x_{HR7} + \dot{E}x_{HR8} + \dot{E}x_{HR9} + \dot{E}x_{HR10}) - (\dot{E}x_{HR1} + \dot{E}x_{HR2} + \dot{E}x_{HR3} + \dot{E}x_{HR4})}{\dot{E}x_{HR5} - \dot{E}x_{HR6}}$$

โดยที่ ψ_{HRSG} = ประสิทธิภาพเอ็กซีเซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง

$\dot{E}x$ (กิโลจูลต่อวินาที) = อัตราเอ็กซีเซอียทางกายภาพ

g = ก๊าซ

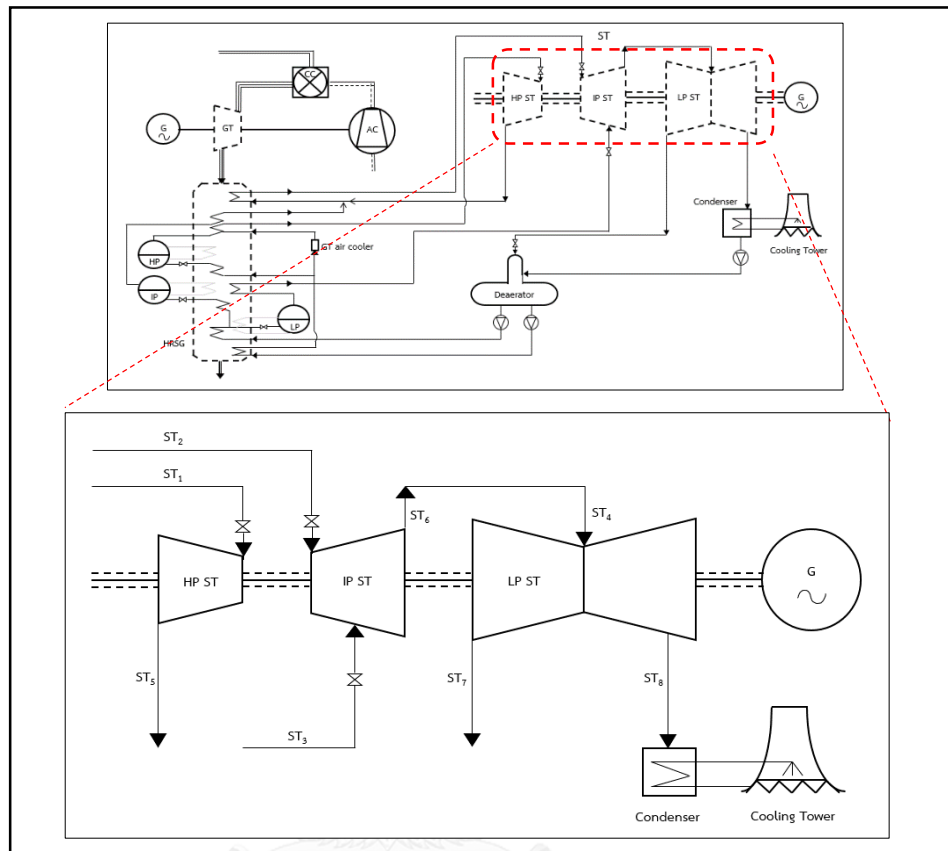
l = น้ำ

s = ไอน้ำ

i = ทางเข้า

e = ทางออก

3.6.3 การวิเคราะห์เอ็กส์เซอียของกังหันไอน้ำ



รูปที่ 3.5 แผนภาพของกังหันไอน้ำ

3.6.3.1 การวิเคราะห์การทำลายเอ็กส์เซอียของกังหันไอน้ำ ($\dot{E}_{X_{D,ST}}$)

จากสมการที่ (3.14) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการการทำลายเอ็กส์เซอียของกังหันไอน้ำ ได้ดังสมการที่ (3.35)

$$\dot{E}_{X_{D,ST}} = \sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e - \dot{W}_{ST} \quad (3.35)$$

$$\dot{E}_{X_{D,HPST}} = \dot{E}x_{ST_1} - \dot{E}x_{ST_5} - \dot{W}_{HPST}$$

$$\dot{E}_{X_{D,IPST}} = (\dot{E}x_{ST_2} + \dot{E}x_{ST_3}) - \dot{E}x_{ST_6} - \dot{W}_{IPST}$$

$$\dot{E}_{X_{D,LPST}} = \dot{E}x_{ST_4} - (\dot{E}x_{ST_7} + \dot{E}x_{ST_8}) - \dot{W}_{LPST}$$

อัตราเอ็กส์เซอียทางกายภาพของไอน้ำ (ST_1, ST_2, ST_3, ST_4) ที่ทางเข้าของกังหันไอน้ำ ($\dot{E}x_{ph,i}$) คำนวณได้จากสมการที่ (3.36)

$$\dot{E}x_{ph,i} = \dot{m}_i [(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)] \quad (3.36)$$

อัตราเอนทัลปีของไอ้ทางกายภาพของไอ้ (ST₅, ST₆, ST₇, ST₈) ที่ทางออกของกังหันไอ้ (E_{x_{ph,e}}) คำนวณได้จากสมการที่ (3.37)

$$\dot{E}_{x_{ph,e}} = \dot{E}_{x_e} = \dot{m}_e [(h_e - h_0) - T_0(s_e - s_0)] \quad (3.37)$$

งานของกังหันไอ้ (W_{ST}) คำนวณได้จากสมการที่ (3.38)

$$\dot{W}_{ST} = \sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_e h_e \quad (3.38)$$

โดยที่	$\dot{E}_{x_{D,ST}}$ (กิโลจูลต่อวินาที)	=	อัตราการทำลายเอนทัลปีของกังหันไอ้
	$\dot{E}_{x_{ph}}$ (กิโลจูลต่อวินาที)	=	อัตราเอนทัลปีทางกายภาพ
	\dot{W}_{ST} (กิโลจูลต่อวินาที)	=	อัตราการทำงานของกังหันไอ้
	\dot{m} (กิโลกรัมต่อวินาที)	=	อัตราการไหลโดยมวล
	h (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)	=	เอนทัลปีจำเพาะ
	s (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน)	=	เอนโทรปีจำเพาะ
	T (เคลวิน)	=	อุณหภูมิ
	i	=	ทางเข้า
	e	=	ทางออก
	0	=	สภาวะแวดล้อมอ้างอิง

3.6.3.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีของกังหันไอ้ (ψ_{ST})

สมการการคำนวณประสิทธิภาพเอนทัลปีของกังหันไอ้ คำนวณได้จากสมการที่ (3.39)

$$\psi_{ST} = \frac{\dot{W}_{ST}}{\dot{E}_{x_{i,ST}} - \dot{E}_{x_{e,ST}}} \quad (3.39)$$

$$\psi_{HPST} = \frac{\dot{W}_{HPST}}{\dot{E}_{x_{ST_1}} - \dot{E}_{x_{ST_5}}}$$

$$\psi_{IPST} = \frac{\dot{W}_{IPST}}{(\dot{E}_{x_{ST_2}} + \dot{E}_{x_{ST_3}}) - \dot{E}_{x_{ST_6}}}$$

$$\psi_{LPST} = \frac{\dot{W}_{LPST}}{\dot{E}_{x_{ST_4}} - (\dot{E}_{x_{ST_7}} + \dot{E}_{x_{ST_8}})}$$

โดยที่	ψ_{ST}	=	ประสิทธิภาพเอนทัลปีของกังหันไอ้
	\dot{W}_{ST} (กิโลจูลต่อวินาที)	=	อัตราการทำงานของกังหันไอ้
	$\dot{E}_{x_{i,ST}}$ (กิโลจูลต่อวินาที)	=	อัตราเอนทัลปีที่ทางเข้าของกังหันไอ้

$$Ex_{e,ST} \text{ (กิโลจูลต่อวินาที)} = \text{อัตราเอนทาลปีที่ทางออกของกังหันไอน้ำ}$$

3.6.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงาน

นอกจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทาลปีแล้ว ผู้วิจัยยังได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงาน (energy efficiency) ขององค์ประกอบของระบบในโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาอีกด้วย เพื่อจะได้มีข้อมูลในการวิเคราะห์ร่วมกับการวิเคราะห์เอนทาลปี โดยสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันก๊าซ เครื่องผลิตน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งและกังหันไอน้ำทั้ง 3 เครื่อง แสดงดังสมการ (3.40) (3.41) และ (3.42) ดังนี้

3.6.4.1 ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันก๊าซ (η_{GT})

$$\eta_{GT} = \frac{W_{GT,act}}{W_{GT,isen}} = \frac{\dot{m}_i C_{p,g,avg}(T_i - T_{e,act})}{\dot{m}_e C_{p,g,avg}(T_i - T_{e,isen})} \quad (3.40)$$

$$\eta_{GT} = \frac{\dot{m}_{GT1} C_{p,g,avg}(T_{GT1} - T_{GT2,act})}{\dot{m}_{GT2} C_{p,g,avg}(T_{GT1} - T_{GT2,isen})}$$

$$T_{e,isen} = \frac{T_i}{\left(\frac{P_e}{P_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = \frac{T_{GT1}}{\left(\frac{P_{GT2}}{P_{GT1}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

$$\gamma = \frac{C_{p,g}}{C_v}$$

โดยที่ W_{GT} = อัตราการทำงานของกังหันก๊าซ

\dot{m} (กิโลกรัมต่อวินาที) = อัตราการไหลโดยมวล

P (พาสคาล) = ความดัน

T (เคลวิน) = อุณหภูมิ

act = สภาวะจริง

isen = กระบวนการ Isentropic

γ = ratio of specific heat

$C_{p,g}$ = ความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซที่ความดันคงที่

C_v = ความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซที่ปริมาตรคงที่

i = ทางเข้า
e = ทางออก

3.6.4.2 ประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง (η_{HRSG})

$$\eta_{\text{HRSG}} = \frac{\sum(\dot{m}_{e,l,s} \times h_{e,l,s}) - \sum(\dot{m}_{i,l,s} \times h_{e,l,s})}{\dot{m}_{i,g} \times h_{i,g}} \quad (3.41)$$

$$\eta_{\text{HRSG}} = \frac{(\dot{m}h_{\text{HR}_7} + \dot{m}h_{\text{HR}_8} + \dot{m}h_{\text{HR}_9} + \dot{m}h_{\text{HR}_{10}}) - (\dot{m}h_{\text{HR}_1} + \dot{m}h_{\text{HR}_2} + \dot{m}h_{\text{HR}_3} + \dot{m}h_{\text{HR}_4})}{\dot{m}h_{\text{HR}_5}}$$

โดยที่ \dot{m} (กิโลกรัมต่อวินาที) = อัตราการไหลโดยมวล
 h (กิโลจูลต่อกิโลกรัม) = เอนทัลปีจำเพาะ
 g = ก๊าซ
 l = น้ำ
 s = ไอน้ำ
 i = ทางเข้า
 e = ทางออก

3.6.4.3 ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันไอน้ำ (η_{ST})

การคำนวณประสิทธิภาพพลังงานของกังหันไอน้ำจะสมมติให้กระบวนการไม่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อนหรือเอ็นโทรปีมีค่าคงที่ กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการไอเซนโทรปิก (Isentropic) (Cengel และคณะ, 2542)

$$\eta_{\text{ST}} = \frac{W_{\text{ST,act}}}{W_{\text{ST,isen}}} = \frac{\dot{m}_i h_{i,\text{act}} - \dot{m}_e h_{e,\text{act}}}{\dot{m}_i h_{i,\text{act}} - \dot{m}_e h_{e,\text{isen}}} \quad (3.42)$$

$$\eta_{\text{HPST}} = \frac{\dot{m}_{\text{ST}_1} h_{\text{ST}_1} - \dot{m}_{\text{ST}_5} h_{\text{ST}_5}}{\dot{m}_{\text{ST}_1} h_{\text{ST}_1} - \dot{m}_{\text{ST}_5} h_{\text{ST}_5,\text{isen}}}$$

$$\eta_{\text{IPST}} = \frac{(\dot{m}_{\text{ST}_2} h_{\text{ST}_2} + \dot{m}_{\text{ST}_3} h_{\text{ST}_3}) - \dot{m}_{\text{ST}_6} h_{\text{ST}_6}}{(\dot{m}_{\text{ST}_2} h_{\text{ST}_2} - \dot{m}_{\text{ST}_2} h_{\text{ST}_6,\text{isen}}) + (\dot{m}_{\text{ST}_3} h_{\text{ST}_3} - \dot{m}_{\text{ST}_3} h_{\text{ST}_6,\text{isen}})}$$

$$\eta_{\text{LPST}} = \frac{\dot{m}_{\text{ST}_4} h_{\text{ST}_4} - (\dot{m}_{\text{ST}_7} h_{\text{ST}_7} + \dot{m}_{\text{ST}_8} h_{\text{ST}_8})}{(\dot{m}_{\text{ST}_7} h_{\text{ST}_4} - \dot{m}_{\text{ST}_7} h_{\text{ST}_7,\text{isen}}) + (\dot{m}_{\text{ST}_8} h_{\text{ST}_4} - \dot{m}_{\text{ST}_8} h_{\text{ST}_8,\text{isen}})}$$

โดยที่ W_{ST} = อัตราการทำงานของกังหันไอน้ำ

m (กิโลกรัมต่อวินาที)	=	อัตราการไหลโดยมวล
h (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)	=	เอนทัลปีจำเพาะ
act	=	สภาวะจริง
isen	=	กระบวนการ Isentropic
i	=	ทางเข้า
e	=	ทางออก

3.7 ศึกษาแนวทาง/มาตรการการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

ในการศึกษาแนวทาง/มาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้านั้น ผู้วิจัยนำเสนอแนะแนวทาง/มาตรการที่สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติตัวอย่างที่นำข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอีย โดยจะวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียกับองค์ประกอบในระบบผลิตไฟฟ้าซึ่งได้แก่ กังหันก๊าซ เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง และกังหันไอน้ำ โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. การวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอีย จะทำให้ทราบถึงการสูญเสียงานที่มีประโยชน์ที่อาจนำกลับมาใช้ได้อีกออกไปจากองค์ประกอบของระบบผลิตไฟฟ้า

2. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอีย จะทำให้ทราบถึงโอกาสในการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ในระบบ ว่าอุปกรณ์ใดที่มีศักยภาพในการปรับปรุงสูงสุดในระบบ

เมื่อพิจารณาอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียร่วมกับแล้ว จะทำให้สามารถระบุอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าที่มีศักยภาพในการปรับปรุงประสิทธิภาพ และการปรับปรุงนี้จะนำไปสู่การลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และลดการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาได้อีกด้วย

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงาน

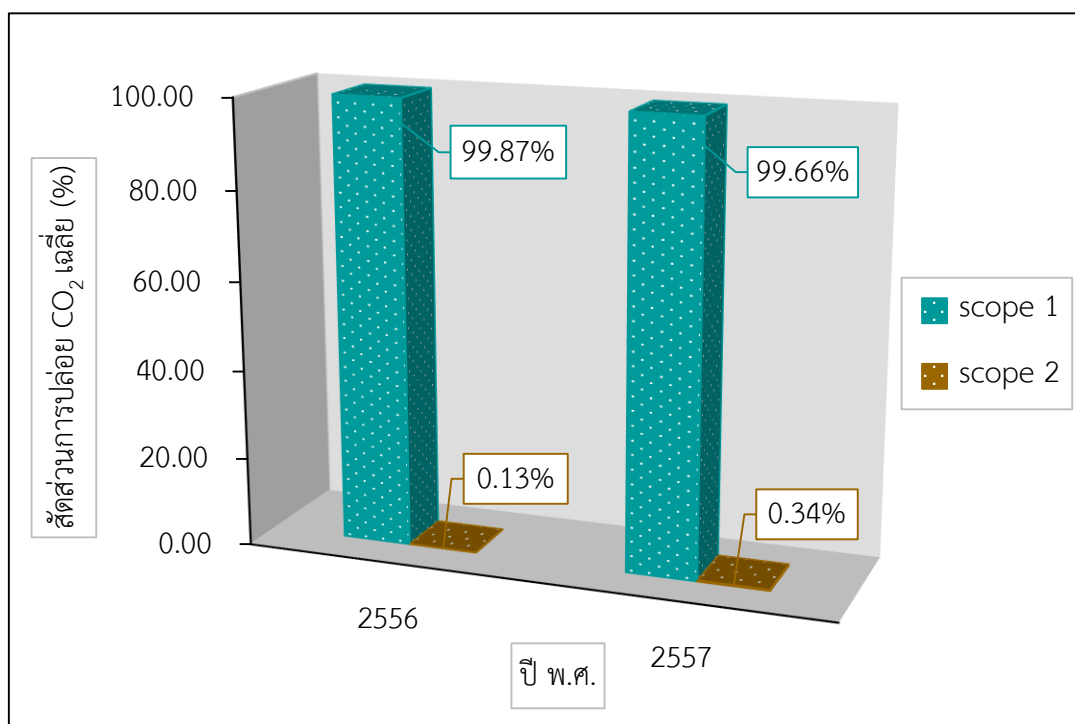
ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษา โดยประเมินเฉพาะปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียงชนิดเดียวเท่านั้น โดยแสดงผลในรูปสัดส่วนปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากขอบเขตที่ 1 แหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางตรง และขอบเขตที่ 2 แหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางอ้อม ในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ (kgCO_2)

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ค่าความเข้มข้นคาร์บอน ซึ่งแสดงถึงปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ได้มาซึ่งผลผลิตหนึ่งหน่วย คำนวณออกมาในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (kgCO_2/kWh) และค่าความเข้มพลังงาน ซึ่งแสดงถึงปริมาณการใช้พลังงานต่อผลผลิตหนึ่งหน่วย คำนวณออกมาในหน่วยจิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง (GJ/MWh) โดยการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานนั้นจะใช้ข้อมูลจากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษาในประเทศไทยจำนวน 3 โรงงาน ใช้ข้อมูลเป็นระยะเวลา 2 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 – 2557

4.1.1 การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การกำหนดขอบเขตการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษานั้น อ้างอิงตามแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1 พ.ศ. 2556 ซึ่งได้รับการพัฒนาโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) แบ่งขอบเขตการประเมินออกเป็น 2 ขอบเขตตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยแหล่งปล่อยจากขอบเขตที่ 1 ประกอบด้วย การเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า การเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซิน (Benzene) ดีเซล (Diesel) และก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas : LPG) การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการรั่วไหลจากท่อส่ง การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการรั่วไหลของการใช้อุปกรณ์ดับเพลิง และการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ (Demin water) ในส่วนของแหล่งปล่อยจากขอบเขตที่ 2 ประกอบด้วย การผลิตไฟฟ้าและไอน้ำที่นำเข้ามาจากภายนอกโรงงาน

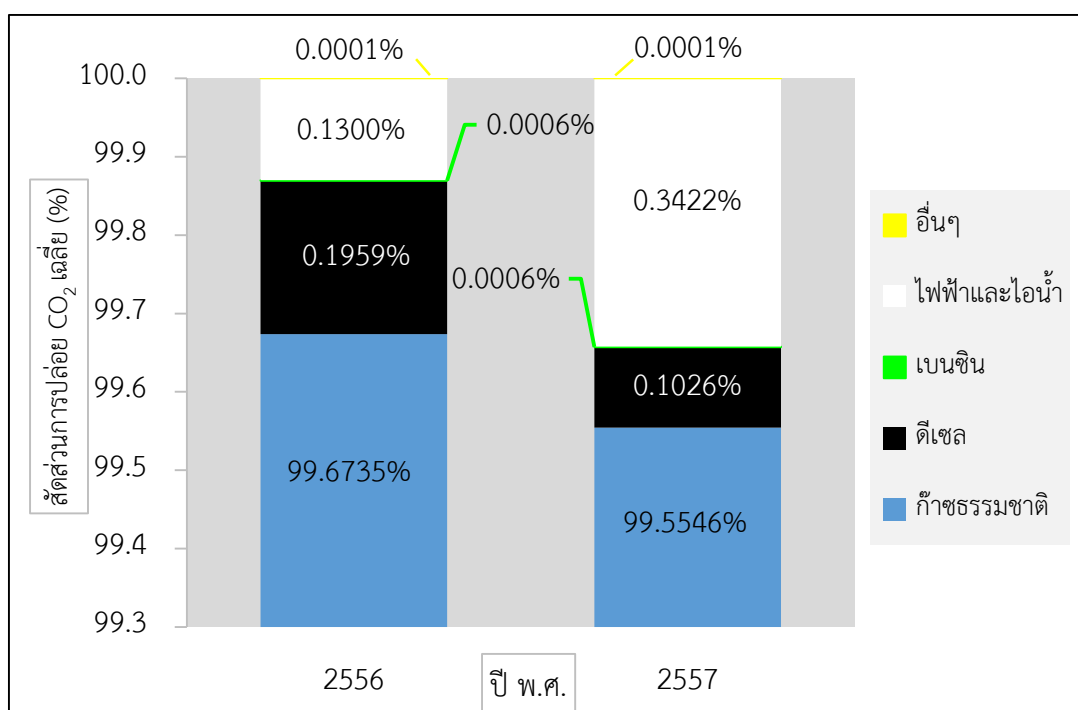
ซึ่งในการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าการศึกษา จะอ้างอิงวิธีการคำนวณตามแนวทางต่างๆ ในหัวข้อ 3.5 ได้ผลการคำนวณสัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษาจำนวน 3 โรงงาน แสดงผลในปี พ.ศ. 2556-2557 ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยจำแนกตามขอบเขตที่ 1 และ 2

จากการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติตัวอย่างทั้ง 3 โรงงาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556-2557 โดยคำนวณปริมาณการปล่อยฯในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ และแสดงผลในรูปสัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยจากแต่ละขอบเขตการประเมิน ได้แก่ ขอบเขตที่ 1 แหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางตรง ประกอบด้วย การเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า การเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซิน ดีเซล และก๊าซปิโตรเลียมเหลว การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการรั่วไหลจากท่อส่ง การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการรั่วไหลของการใช้อุปกรณ์ดับเพลิง และการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ และขอบเขตที่ 2 แหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางอ้อม ประกอบด้วย การผลิตไฟฟ้าและไอน้ำที่นำเข้ามาจากภายนอกโรงงาน ผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยจากขอบเขตที่ 1 และ ขอบเขตที่ 2 ในปี พ.ศ. 2556 คิดเป็นร้อยละ 99.87 และ 0.13 ตามลำดับ และปี พ.ศ. 2557 คิดเป็นร้อยละ 99.66 และ 0.34 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่

4.1 ซึ่งแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลักเกิดจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าและเป็นกิจกรรมที่อยู่ภายใต้ขอบเขตที่ 1 มีสัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยในปี พ.ศ. 2556 สูงถึงร้อยละ 99.67 รองลงมาคือการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล มีสัดส่วนเฉลี่ยร้อยละ 0.19 และในปี พ.ศ. 2557 มีสัดส่วนเฉลี่ยร้อยละ 99.55 รองลงมาคือการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ โดยมีสัดส่วนเฉลี่ยร้อยละ 0.34 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากทุกๆกิจกรรมในขอบเขตที่ 1 และขอบเขตที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.2

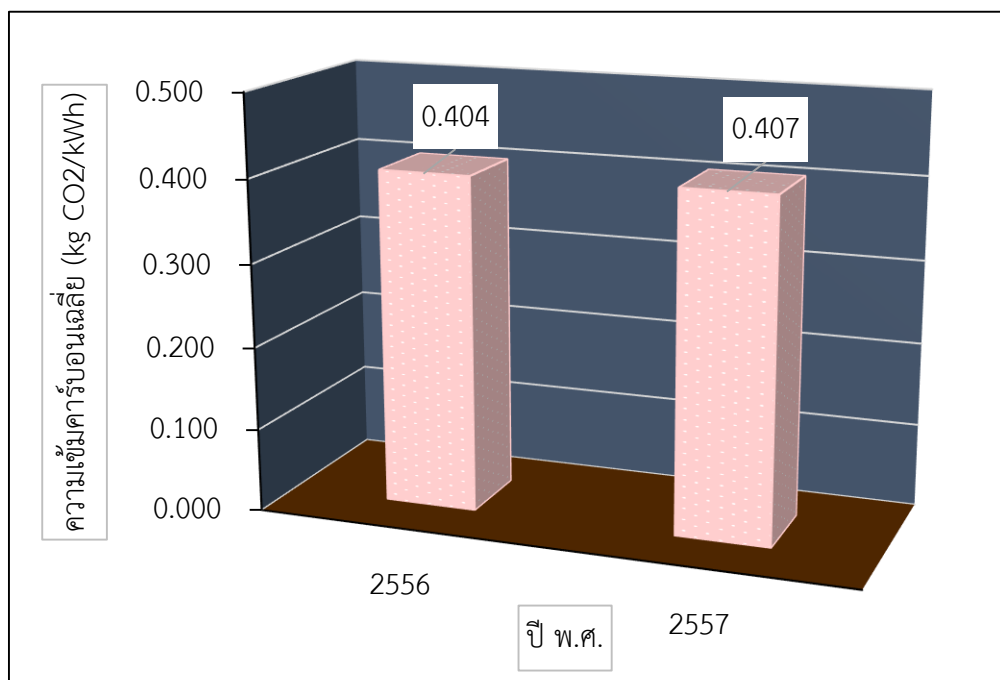


รูปที่ 4.2 สัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยจำนวน 3 โรงงานในปี พ.ศ. 2556 - 2557 โดยจำแนกตามแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.1.2 การประเมินความเข้มคาร์บอน

ความเข้มคาร์บอน เป็นดัชนีชี้วัดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก กล่าวคือ เป็นปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นเพื่อให้ได้มาซึ่งผลผลิตหนึ่งหน่วย คำนวณได้จากปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) ต่อปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง) ในส่วนของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะใช้ผลจากการคำนวณปริมาณการปล่อยฯ ในหัวข้อ 4.1.1 ในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์มาประเมินค่าความเข้มคาร์บอนของแต่ละโรงไฟฟ้า กรณีศึกษา และนำผลที่ได้มาประเมินค่าความเข้มคาร์บอนเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก ซึ่งผลการประเมิน

ค่าความเข้มข้นคาร์บอนเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ
กรณีศึกษาจำนวน 3 โรงงาน ใช้ข้อมูลตั้งแต่ พ.ศ. 2556-2557 แสดงดังรูปที่ 4.3

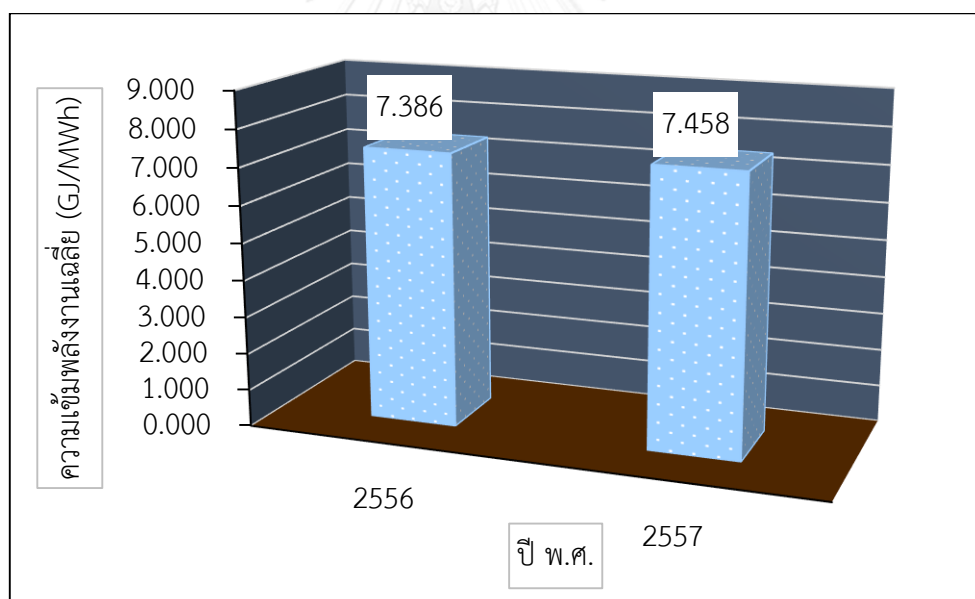


รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นคาร์บอนเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษาจำนวน 3 โรงงาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556-2557

รูปที่ 4.3 แสดงผลการประเมินค่าความเข้มข้นของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษาทั้ง 3 โรงงาน ในปี พ.ศ. 2556-2557 พบว่าค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของทั้ง 3 โรงงานนั้นมีค่าเท่ากับ 0.438 และ 0.434 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ (กรณีประเมินแบบถ่วงน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 0.404 และ 0.407 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ) ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.436 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (กรณีประเมินแบบถ่วงน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 0.406 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง) โดยแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลักเกิดจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ โดยมีสัดส่วนเฉลี่ยจากข้อมูลทั้ง 2 ปี สูงถึงร้อยละ 99.61 รองลงมาคือการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำที่นำเข้ามาจากภายนอกโรงงานมีสัดส่วนเฉลี่ยร้อยละ 0.24

4.1.3 การประเมินความเข้มพลังงาน

ค่าความเข้มพลังงาน (Energy Intensity Indicators) เป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและสามารถนำมาประเมินประสิทธิภาพในการใช้พลังงานได้ ประเมินได้จากปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า(จิกะจูล) ต่อปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ (เมกะวัตต์ชั่วโมง) ซึ่งปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ปริมาณพลังงานที่ใช้ทางตรง ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในกระบวนการผลิต การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ เบนซิน (Benzene) ดีเซล (Diesel) และก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas : LPG) และปริมาณพลังงานที่ใช้ทางอ้อม ได้แก่ การผลิตไฟฟ้าและไอน้ำที่นำเข้ามาจากภายนอกโรงงาน โดยจะนำผลจากการประเมินค่าความเข้มพลังงานของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาแต่ละโรงงานมาประเมินค่าความเข้มพลังงานเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก ซึ่งผลการประเมินค่าความเข้มพลังงานเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษาจำนวน 3 โรงงาน ใช้ข้อมูลตั้งแต่ พ.ศ. 2556-2557 แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความเข้มพลังงานเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษาจำนวน 3 โรงงาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556-2557

รูปที่ 4.4 แสดงผลการประเมินค่าความเข้มพลังงานเฉลี่ยของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษาทั้ง 3 โรงงาน ในปี พ.ศ. 2556-2557 พบว่าค่าความเข้มพลังงานเฉลี่ยของทั้ง 3 โรงงานนั้นมีค่าเท่ากับ 8.030 และ 7.960 จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ (กรณีประเมินแบบถ่วงน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 7.386 และ 7.458 จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ)

ส่งผลให้ค่าความเข้มพลังงานเฉลี่ยของโรงไฟฟ้าการศึกษาในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 7.995 จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง (กรณีประเมินแบบถ่วงน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 7.422 จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง)

4.1.4 การเปรียบเทียบความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติศึกษากับงานวิจัยอื่น

เมื่อผู้วิจัยดำเนินการประเมินความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานของโรงไฟฟ้าการศึกษาเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยจะนำผลการศึกษาไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ เพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานของโรงไฟฟ้าการศึกษาในงานวิจัยนี้ว่ายังมีศักยภาพในการปรับปรุงเพื่อที่จะนำไปสู่การลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และลดการใช้พลังงานลงได้อีกหรือไม่ ซึ่งผลการเปรียบเทียบความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติศึกษากับการผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีและเชื้อเพลิงชนิดอื่นแสดงดังตารางที่ 4.1



ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษากับงานวิจัยอื่น จำแนกตามเทคโนโลยีและชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิต

เทคโนโลยีการผลิต	ชนิดเชื้อเพลิง	ความเข้มคาร์บอน (kgCO ₂ /kWh)	ความเข้มพลังงาน (GJ/MWh)	แหล่งที่มา
พลังความร้อนร่วม	ก๊าซธรรมชาติ	0.406	7.422	การวิจัยนี้
		0.426	-	สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, 2553
		0.436	-	Gouw และคณะ, 2014
		-	7.947	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2558
		-	7.585	Nyberg, 2011
	ก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซล	0.469	-	สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, 2553
พลังความร้อน	ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเตาและ น้ำมันดีเซล	0.622	-	สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, 2553
		0.600	-	สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, 2553
	ถ่านหิน/ลิกไนต์	-	9.665	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2558
		0.914	-	สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, 2553
		-	10.480	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2558
กังหันก๊าซ	น้ำมันดีเซล	0.970	-	สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, 2553
เครื่องยนต์ดีเซล	น้ำมันดีเซล	0.842	-	สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, 2553

จากตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษากับงานวิจัยอื่นๆ โดยจำแนกตามเทคโนโลยีและชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า พบว่าการใช้เทคโนโลยีพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในการผลิตไฟฟ้าส่งผลต่อค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานที่ต่ำกว่าการใช้เทคโนโลยีการผลิตและเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ สำหรับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษานั้นพบว่าค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานมีค่าค่อนข้างต่ำแล้วเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่ใช้เทคโนโลยีการผลิตและชนิดเชื้อเพลิงเดียวกัน ถึงแม้ว่าโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาจะมีค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานอยู่ในช่วงที่ต่ำแล้ว แต่ผู้วิจัยต้องการทราบถึงศักยภาพของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาว่ายังมีศักยภาพในการปรับปรุงอีกหรือไม่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำวิธีการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียซึ่งเป็นวิธีการใหม่ที่กำลังได้รับความนิยมในการนำมาประเมินศักยภาพในการปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพของระบบหรือกระบวนการใดๆ มาใช้ในการประเมินศักยภาพการปรับปรุงของโรงไฟฟ้าในงานวิจัยนี้

4.2 การประเมินศักยภาพการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอีย

ในงานวิจัยนี้นอกจากมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาแล้ว ผู้วิจัยได้นำการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียซึ่งเป็นวิธีการใหม่ที่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ศักยภาพในการปรับปรุงอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้า ซึ่งผลจากการปรับปรุงประสิทธิภาพนั้นจะนำไปสู่การลดลงของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณการใช้พลังงานได้ ซึ่งผู้วิจัยได้จำแนกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียและการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอีย สภาวะแวดล้อมอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์คือ อุณหภูมิ 298.15 เคลวิน และความดัน 1 บรรยากาศ และดำเนินการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียกับโรงไฟฟ้าตัวอย่าง 1 โรงงาน โดยวิเคราะห์อุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้า 3 อุปกรณ์ ได้แก่

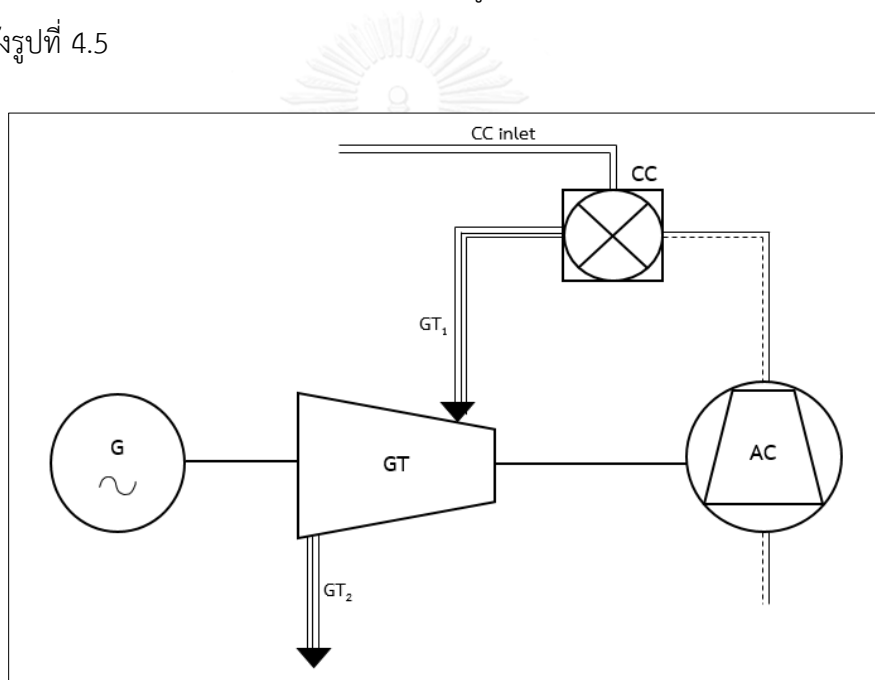
1. การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของกังหันก๊าซ
2. การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง
3. การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของกังหันไอน้ำ ประกอบด้วย กังหันไอน้ำความดันสูง กังหันไอน้ำความดันปานกลาง และกังหันไอน้ำความดันต่ำ

โดยจะยกตัวอย่างรายละเอียดการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของของไหลที่เป็นก๊าซจากการวิเคราะห์กังหันก๊าซ และวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของของไหลที่เป็นน้ำและไอน้ำจากการวิเคราะห์เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง สำหรับกังหันไอน้ำนั้นมีของไหลเป็นไอน้ำซึ่งใช้วิธีการวิเคราะห์

เช่นเดียวกับเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง จึงได้แสดงวิธีการวิเคราะห์ที่ไว้ในภาคผนวก ค. โดยรายละเอียดการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของกังหันก๊าซและเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งแสดงดังต่อไปนี้

4.2.1 การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของกังหันก๊าซ

กังหันก๊าซเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม เป็นอุปกรณ์ที่มีการทำงานร่วมกันกับเครื่องอัดอากาศ ห้องเผาไหม้ และเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเครื่องอัดอากาศจะอัดอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่รับเชื้อเพลิงเข้ามาจากอีกทางหนึ่ง เชื้อเพลิงจะเกิดการเผาไหม้ได้ก๊าซเผาไหม้ออกมาและส่งออกไปยังกังหันก๊าซที่เชื่อมติดอยู่กับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภาพกังหันก๊าซ

ขั้นตอนการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียของกังหันก๊าซ มีขั้นตอนดังนี้

1. รวบรวมข้อมูลที่ใช้สำหรับการคำนวณ ได้แก่ อุณหภูมิ (เคลวิน) ความดัน (เมกะพาสคาล) และอัตราการไหลของก๊าซเผาไหม้ (กิโลกรัมต่อวินาที) ที่ทางเข้าและทางออกของกังหันก๊าซ และอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที) ที่ทางเข้าของห้องเผาไหม้ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของก๊าซสำหรับใช้ในการคำนวณเอ็กซ์เซอียของกังหันก๊าซ

จุด	T	T_{avg0} (ระหว่าง T กับ T_0)	P_{abs}	\dot{m}_{cg}	\dot{m}_f	\dot{m}_a
	K	K	MPa	kg/s	kg/s	kg/s
CC inlet	-	-	-	-	18.82	563.47
GT ₁	1553.2	925.65	3.0	582.293	-	-
GT ₂	896.85	597.50	0.1	582.293	-	-

โดยที่ GT₁ และ GT₂ คือ จุดทางเข้าและทางออกของกังหันก๊าซ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

2. คำนวณอัตราการไหลเชิงโมลขององค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิง (\dot{m}_f) ในหน่วยกิโลโมลต่อวินาที มีขั้นตอนดังนี้

- คำนวณมวลโมลเฉลี่ย (B) จากสมการ $\Sigma (\% \text{ mole} \times MW)$ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยใช้ค่าร้อยละโดยโมล (%mole) และมวลโมลเฉลี่ย (MW) ขององค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงแต่ละชนิด
- คำนวณอัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซเชื้อเพลิง (C) ในหน่วยกิโลโมลต่อวินาที จากสมการ $\dot{m}_f \text{ (kg/s)} / B$
- คำนวณอัตราการไหลเชิงโมลขององค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ในหน่วยกิโลโมลต่อวินาที จากสมการ $(\% \text{ mole} \times C) / 100$

ตารางที่ 4.3 การคำนวณอัตราไหลขององค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงในหน่วยกิโลโมลต่อวินาที (kmol/s)

สัญลักษณ์ ทางเคมี	ร้อยละโดยโมล (% mole)	มวลโมเลกุล (MW)	\dot{m}_f	สมการคำนวณ
		kg/kmol	Kmol/s	
CH ₄	86.84	16	0.848	(% mole x C) / 100
C ₂ H ₆	3.80	29	0.037	(% mole x C) / 100
C ₃ H ₈	1.42	44	0.014	(% mole x C) / 100
C ₄ H ₁₀	0.63	58	0.006	(% mole x C) / 100
C ₅ H ₁₂	0.19	72	0.002	(% mole x C) / 100
C ₆ H ₁₄	0.05	86	0.001	(% mole x C) / 100
CO ₂	7.07	44	0.069	(% mole x C) / 100
มวลโมเลกุลเฉลี่ย		19.28 (B)	0.976 (C)	C = \dot{m}_f (kg/s) / B

3. คำนวณอัตราการไหลเชิงโมลขององค์ประกอบในอากาศ (\dot{m}_a) ในหน่วยกิโลโมลต่อวินาที โดยมีขั้นตอนดังนี้

- คำนวณมวลโมเลกุลเฉลี่ย (B) จากสมการ Σ (% mole x MW) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยใช้ค่าร้อยละโดยโมล (% mole) และมวลโมเลกุล (MW) ขององค์ประกอบของอากาศแต่ละชนิด
- คำนวณอัตราการไหลเชิงโมลของอากาศ (C) ในหน่วยกิโลโมลต่อวินาที จากสมการ \dot{m}_a (kg/s) / B
- คำนวณอัตราการไหลเชิงโมลขององค์ประกอบในอากาศแต่ละชนิด ในหน่วยกิโลโมลต่อวินาที จากสมการ (% mole x C) / 100

ตารางที่ 4.4 การคำนวณอัตราไหลเชิงโมลขององค์ประกอบของอากาศ ในหน่วยกิโลโมลต่อวินาที (kmol/s)

สัญลักษณ์ ทางเคมี	ร้อยละโดยโมล (% mole)	มวลโมเลกุล (MW)	\dot{m}_a	สมการคำนวณ
		kg/kmol	Kmol/s	
CO ₂	0.03	44.01	0.006	(% mole x C) / 100
H ₂ O	3.03	18	0.596	(% mole x C) / 100
O ₂	20.35	32	4.004	(% mole x C) / 100
N ₂	75.67	28.02	14.889	(% mole x C) / 100
H ₂	0.01	2.02	0.002	(% mole x C) / 100
Ar	0.91	39.94	0.179	(% mole x C) / 100
มวลโมเลกุลเฉลี่ย		28.64 (B)	19.68 (C)	C = \dot{m}_a (kg/s) / B

4. คำนวณหาสัดส่วนโดยโมล (mole fraction) ขององค์ประกอบก๊าซหลังเผาไหม้ มีขั้นตอนดังนี้

- คำนวณอัตราการไหลเชิงโมลรวมขององค์ประกอบก๊าซที่เหลือหลังการเผาไหม้แต่ละชนิด ในหน่วยกิโลโมลต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยใช้สมการการเผาไหม้ขององค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิดจากตารางที่ 4.6
- คำนวณสัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบก๊าซเผาไหม้แต่ละชนิด จากสมการ ($\sum \dot{m}_{cg,i} / \sum \dot{m}_{cg}$) $\times 100$

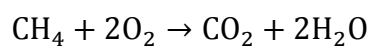
ตารางที่ 4.5 สัดส่วนโมล (mole fraction) ขององค์ประกอบก๊าซเผาไหม้

อัตราการไหลของก๊าซเผาไหม้, \dot{m}_{cg} (kmol/s)						
องค์ประกอบของก๊าซ เชื้อเพลิงก่อนเผาไหม้	องค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้, i					
	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	H ₂	Ar
CH ₄	0.848	1.696	-1.696	-	-	-
C ₂ H ₆	0.074	0.111	-0.130	-	-	-
C ₃ H ₈	0.042	0.056	-0.069	-	-	-
C ₄ H ₁₀	0.024	0.031	-0.040	-	-	-
C ₅ H ₁₂	0.009	0.011	-0.015	-	-	-
C ₆ H ₁₄	0.003	0.004	-0.005	-	-	-
CO ₂	0.069	-	-	-	-	-
องค์ประกอบของอากาศ หลังการเผาไหม้	0.006	0.596	4.004	14.889	0.002	0.179
ผลรวมอัตราการไหลของ ก๊าซเผาไหม้; $\Sigma \dot{m}_{cg,i}$	1.075	2.504	2.050	14.889	0.002	0.179
สัดส่วนโมล (%)	5.19%	12.10%	9.90%	71.93%	0.01%	0.87%

ตารางที่ 4.6 สมการการเผาไหม้ที่ใช้สำหรับคำนวณองค์ประกอบก๊าซหลังเผาไหม้

สัญลักษณ์ทางเคมี	สมการการเผาไหม้
CH ₄	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
C ₂ H ₆	$\text{C}_2\text{H}_6 + 3.5\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$
C ₃ H ₈	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$
C ₄ H ₁₀	$\text{C}_4\text{H}_{10} + 13/2\text{O}_2 \rightarrow 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$
C ₅ H ₁₂	$\text{C}_5\text{H}_{12} + 8\text{O}_2 \rightarrow 5\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
C ₆ H ₁₄	$\text{C}_6\text{H}_{14} + 19/2\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 7\text{H}_2\text{O}$

ยกตัวอย่างการคำนวณองค์ประกอบก๊าซหลังเผาไหม้ CH₄



- ปริมาณ O_2 ที่ลดลงหลังเผาไหม้ = - [mf (kmol/s) x 2]
 = - [0.848 x 2]
 = - 1.696 kmol/s
- ปริมาณ CO_2 ที่เพิ่มขึ้นหลังเผาไหม้ = [mf (kmol/s) x 1]
 = [0.848 x 1]
 = 0.848 kmol/s
- ปริมาณ H_2O ที่เพิ่มขึ้นหลังเผาไหม้ = [mf (kmol/s) x 2]
 = [0.848 x 2]
 = 1.696 kmol/s

5. คำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะรวม ($C_{p,g,mixture}$) และค่าเฉลี่ย ($C_{p,g,avg}$) ของก๊าซเผาไหม้ จากสมการต่อไปนี้

$$C_{p,g} = a + bT_{avg0} + cT_{avg0}^2 + dT_{avg0}^3$$

- คำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซแต่ละชนิด ($C_{p,g}$) จากสมการข้างต้น โดยใช้ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณของก๊าซแต่ละชนิด ประกอบด้วย O_2 N_2 CO_2 และ H_2O อุณหภูมิเฉลี่ยที่จุดทางเข้าและทางออกของกังหันก๊าซ สัดส่วนโดยโมลและมวลโมเลกุลของก๊าซแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.7
- คำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะรวม ($C_{p,g,mixture}$) สำหรับใช้คำนวณอัตราเอนทัลปีทางกายภาพที่ทางเข้าและทางออกของกังหันก๊าซ จากสมการ $\Sigma(\text{mole fraction} \times C_{p,g}) / MW_{avg}$
- คำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ย $C_{p,g, avg}$ สำหรับใช้คำนวณอัตราการทำงานของกังหันก๊าซ

ตารางที่ 4.7 ค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซ

แฟกเตอร์ตัวคูณ	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
a	22.26	32.24	25.48	28.9
b	0.05981	0.001923	0.0152	-0.001571
c	-0.00003501	0.00001055	-0.000007155	0.000008081
d	7.469E-09	-3.595E-09	1.312E-09	-2.873E-09
Tavg ₀ at GT ₁	925.65			
Cp,g (kJ/kmol - K) at GT ₁	53.55	40.21	34.46	32.09
Cpg,mix (kJ/kg - K) at GT ₁	1.2284			
Tavg ₀ at GT ₂	597.50			
Cp,g (kJ/kmol - K) at GT ₂	47.09	36.39	32.29	30.23
Cpg,mix (kJ/kg - K) at GT ₂	1.1439			
Cpg,avg (kJ/kg - K)	1.1862			

ที่มา : (Cengel และคณะ, 2549)

หมายเหตุ : เนื่องจากสัดส่วนโมลของ H₂ และ Ar มีค่าต่ำ จึงไม่นำมาใช้ในการคำนวณ

ยกตัวอย่างการคำนวณ Cp,g ของก๊าซ O₂

$$\begin{aligned}
 C_{p,g} \text{ at } GT_1 &= 25.48 + (0.0152 \times 925.65) + (-0.000007155 \times 925.65^2) + \\
 &\quad (1.312E^{-9} \times 925.65^3) \\
 &= 34.46 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \text{K}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } C_{p,g,mix} &= [(0.099 \times 34.36) + (0.7193 \times 32.29) + (0.0519 \times 53.33) + \\
 &\quad (0.1210 \times 40.21)] \times \frac{1 \text{ kmol}}{27.79 \text{ kg}} \\
 &= 1.2284 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{K}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{และ } C_{p,g,avg} &= \frac{1.2284 + 1.1439}{2} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{K} \\
 &= 1.1862 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{K}
 \end{aligned}$$

6. คำนวณอัตราเอนทาลปีทางกายภาพของก๊าซเผาไหม้ที่ทางเข้า ($\dot{E}x_{GT_1} = \dot{E}x_{ph,i,cg}$) และทางออก ($\dot{E}x_{GT_2} = \dot{E}x_{ph,e}$) ของกังหันก๊าซ โดยใช้ค่าอัตราการไหล อุณหภูมิ ความดัน จากตารางที่ 4.2 และค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซรวม จากตารางที่ 4.7

- อัตราเอนทาลปีทางกายภาพของก๊าซเผาไหม้ที่ทางเข้า คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\dot{E}x_{GT_1} &= \dot{E}x_{ph,i,cg} \\ &= \dot{m}_{GT_1} \left[C_{p,g,mix} \times (T_{GT_1} - T_0) - T_0 \left\{ C_{p,g,mix} \times \ln \left(\frac{T_{GT_1}}{T_0} \right) - R \ln \left(\frac{P_{GT_1}}{P_0} \right) \right\} \right] \\ &= 582.293 \text{ kg/s} \times \left[\left\{ 1.2284 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} \times (1553.2 - 298.15 \text{ K}) \right\} - 298.15 \text{ K} \times \right. \\ &\quad \left. \left\{ 1.2284 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} \times \ln \left(\frac{1553.2 \text{ K}}{298.15 \text{ K}} \right) - 0.2870 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} \times \ln \left(\frac{3.0 \text{ MPa}}{0.1 \text{ MPa}} \right) \right\} \right] \\ &= 715,191.43 \text{ kJ/s}\end{aligned}$$

- อัตราเอนทาลปีทางกายภาพของก๊าซเผาไหม้ที่ทางออก คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\dot{E}x_{GT_1} &= \dot{E}x_{ph,e} \\ &= \dot{m}_{GT_1} \left[C_{p,g,mix} \times (T_{GT_1} - T_0) - T_0 \left\{ C_{p,g,mix} \times \ln \left(\frac{T_{GT_1}}{T_0} \right) - R \ln \left(\frac{P_{GT_1}}{P_0} \right) \right\} \right] \\ &= 582.293 \text{ kg/s} \times \left[\left\{ 1.1439 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} \times (896.85 - 298.15 \text{ K}) \right\} - 298.15 \text{ K} \times \right. \\ &\quad \left. \left\{ 1.1439 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} \times \ln \left(\frac{896.85 \text{ K}}{298.15 \text{ K}} \right) - 0.2870 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} \times \ln \left(\frac{0.1 \text{ MPa}}{0.1 \text{ MPa}} \right) \right\} \right] \\ &= 180,081.97 \text{ kJ/s}\end{aligned}$$

7. คำนวณอัตราเอนทาลปีทางเคมีของก๊าซเผาไหม้ที่ทางเข้าของกังหันก๊าซ ($\dot{E}x_{GT_1} = \dot{E}x_{ch,i,cg}$) โดยใช้ค่าสัดส่วนโมล จากตารางที่ 4.5 และค่า Standard molar chemical exergy ค่าคงตัวของก๊าซ อุณหภูมิที่สภาวะแวดล้อมอ้างอิง อัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิง มวลโมเลกุลเฉลี่ย จากตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าที่ใช้ในการคำนวณอัตราเอนทาลปีของแก๊ส

	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O
สัดส่วนโมล; X _k (%)	9.90%	71.93%	5.19%	12.10%
Standard molar chemical exergy, \overline{ex}_{ch}^k (kJ/mol)	3.97	0.72	19.87	9.49
ค่าคงตัวของแก๊ส; R (kJ/kmol)	8.314			
อุณหภูมิที่สถานะแวดล้อมอ้างอิง; T ₀ (K)	298.15			
อัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้; \dot{m}_{cg} (kg/s)	582.293			
มวลโมลเฉลี่ย; MW _{avg}	27.79			

- อัตราเอนทาลปีของแก๊สเผาไหม้ที่ทางเข้า คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \dot{E}x_{GT1} &= \dot{E}x_{ch,i,cg} = \frac{\dot{m}_{GT1}}{MW_{avg}} \left(\sum X_k \overline{ex}_{ch}^k + RT_0 \sum X_k \ln(X_k) \right) \\ &= 582.293 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times [(0.099 \times 3.97) + (0.7193 \times 0.72) + (0.0519 \times 19.87) \\ &\quad + (0.1210 \times 9.49) \text{ kJ/mol}] \\ &\quad + \left[\frac{8.314 \text{ kJ}}{1000 \text{ mol-K}} \times 298.15 \text{ K} \right. \\ &\quad \times \{ (0.099 \times \ln 0.099) + (0.7193 \times \ln 0.7193) \\ &\quad \left. + (0.0519 \times \ln 0.0519) + (0.1210 \times \ln 0.1210) \} \right] \times \left[\frac{1 \text{ mol}}{27.79 \text{ g}} \right] \\ &\quad \times \left[\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right] \\ &= 19,337.95 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

- คำนวณอัตราการทำงานของกังหันแก๊ส (\dot{W}_{GT}) จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \dot{W}_{GT} &= \dot{m} \times c_{pg,avg} \times (T_i - T_e) \\ &= \dot{m} \times c_{pg,avg} \times (T_{GT1} - T_{GT2}) \\ &= 582.293 \text{ kg/s} \times 1.1862 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} \times (1553.2 - 896.85 \text{ K}) \\ &= 453,311.21 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

- คำนวณอัตราการทำลายเอนทาลปีของกังหันแก๊ส ($\dot{E}x_{D,GT}$) จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \dot{E}x_{D,GT} &= \sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e - \dot{W}_{GT} \\ &= \dot{E}x_{GT1} - \dot{E}x_{GT2} - \dot{W}_{GT} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= (715,191.43 + 19,337.95) - 180,081.97 - 453,311.21 \text{ kJ/s} \\
 &= 101,136.20 \text{ kJ/s} \\
 &= 101.14 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

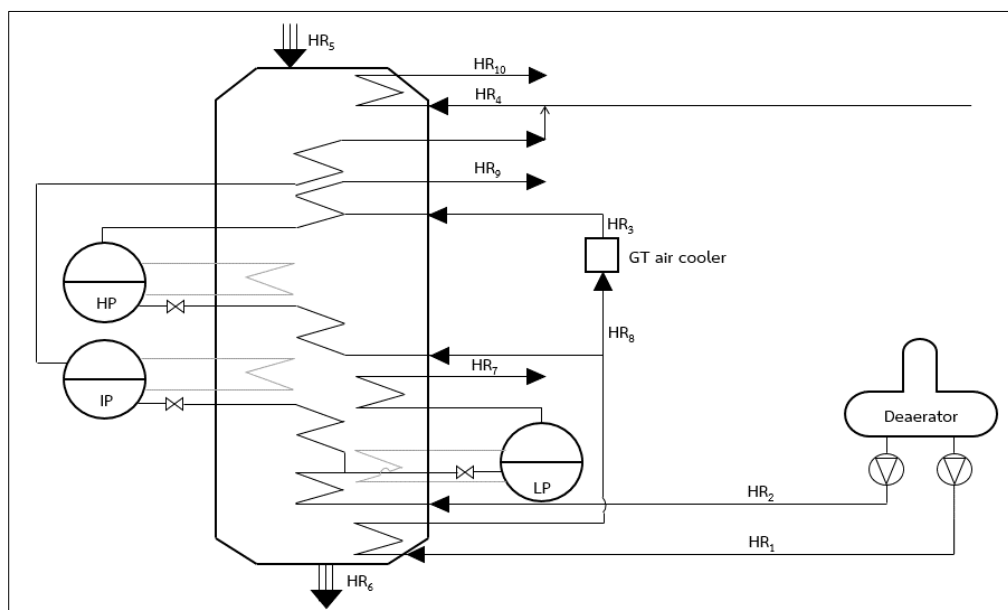
10. คำนวณประสิทธิภาพเอ็กซีเซอียของกังหันก๊าซ (ψ_{GT}) จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \psi_{GT} &= \frac{\dot{W}_{GT}}{\dot{E}x_i - \dot{E}x_e} \\
 &= \frac{\dot{W}_{GT}}{\dot{E}x_{GT_1} - \dot{E}x_{GT_2}} \\
 &= \frac{453,311.21 \text{ kJ/s}}{(715,191.43 + 19,337.95) - 180,081.97} \times 100 \\
 &= 81.76\%
 \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการทำลายเอ็กซีเซอียของกังหันก๊าซเท่ากับ 101.14 MW และประสิทธิภาพเอ็กซีเซอียเท่ากับร้อยละ 81.76

4.2.2 การวิเคราะห์เอ็กซีเซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง

เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม มีหน้าที่ผลิตไอน้ำโดยรับความร้อนเหลือทิ้งจากกังหันก๊าซ โดยก๊าซไอเสียที่ออกจากกังหันก๊าซจะวิ่งผ่านเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งซึ่งภายในจะมีกลุ่มท่อที่มีน้ำไหลอยู่ น้ำที่ไหลภายในท่อจะได้รับความร้อนจากก๊าซเหลือทิ้งนี้จนเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำยิ่งยวดและถูกส่งไปยังกังหันไอน้ำเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภาพเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง

ขั้นตอนการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง มีขั้นตอนดังนี้

1. รวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน เอนทัลปีและเอนโทรปีจำเพาะ และอัตราการไหลของของไหล ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 คุณสมบัติของก๊าซ น้ำ และไอน้ำสำหรับใช้ในการคำนวณเอ็กซ์เซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง

จุด	สถานะ	T (C)	T (K)	T_{avg0}	P_{abs} (MPa)	h_0 (kJ/kg)	s_0 (kJ/kg.K)	\dot{m} (kg/s)
HR ₁	น้ำ	77	350.15	-	17.500	104.8	0.3672	167.965
HR ₂	น้ำ	75.5	348.65	-	4.0000	104.8	0.3672	38.949
HR ₃	ไอน้ำ	483.7	756.85	-	2.8642	104.8	0.3672	56.23608
HR ₄	ไอน้ำ	350.4	623.55	-	2.9810	104.8	0.3672	83.313
HR ₅	ก๊าซ	623.7	896.85	597.50	0.1000	-	-	582.293
HR ₆	ก๊าซ	110.9	384.05	341.1	0.1000	-	-	582.293
HR ₇	ไอน้ำ	283.9	557.05	-	0.5640	104.8	0.3672	7.909
HR ₈	ไอน้ำ	279.4	552.55	-	15.460	104.8	0.3672	13.780
HR ₉	ไอน้ำ	567.7	840.85	-	13.420	104.8	0.3672	83.983
HR ₁₀	ไอน้ำ	565.8	838.95	-	2.8040	104.8	0.3672	94.879

โดยที่ HR₁ HR₂ HR₃ HR₄ HR₅ HR₆ HR₇ HR₈ HR₉ และ HR₁₀ คือ จุดทางเข้าและทางออกของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.6

2. คำนวณค่าเอนทัลปีและเอนโทรปีจำเพาะของน้ำที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ใช้ค่าอุณหภูมิและความดันของจุดที่ต้องการคำนวณเอนทัลปีและเอนโทรปีจำเพาะ จากตารางที่ 4.9 และใช้ค่าจากตารางคุณสมบัติของของเหลวอัดตัว ในช่วงอุณหภูมิและความดันที่ครอบคลุมจุดที่ต้องการคำนวณ จากตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 คุณสมบัติของของเหลวอัดตัว (Compressed Liquid Water Properties)

T (C)		P _y (MPa)		P _z (MPa)	
		15		20	
		h _y (kJ/kg)	s _y (kJ/kg.K)	h _z (kJ/kg)	s _z (kJ/kg.K)
T _y	60	263.7	0.8234	267.9	0.8208
T _z	80	346.9	1.0659	350.9	1.0627

ที่มา : (Cengel และคณะ, 2549)

ยกตัวอย่างการคำนวณเอนทัลปีและเอนโทรปีจำเพาะของน้ำที่จุด HR₁

ที่จุด HR₁ มี P_{abs} = 17.5 MPa และ T = 77 °C

ดังนั้น เลือกช่วงความดัน 15 MPa ถึง 20 MPa และช่วงอุณหภูมิ 60 °C ถึง 80 °C

- คำนวณเอนทัลปี ที่ P_{abs} = 17.5 MPa และ T_y = 60 °C

$$\begin{aligned}
 &= h_y - \left[\frac{(h_y - h_z)}{(P_z - P_y)} \times (P_{abs} - P_y) \right] \\
 &= 263.7 - \left[\frac{(263.7 - 267.9 \text{ kJ/kg})}{(20.0 - 15.0 \text{ MPa})} \times (17.5 - 15 \text{ MPa}) \right] \\
 &= 265.8 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

- คำนวณเอนทัลปี ที่ P_{abs} = 17.5 MPa และ T_z = 80 °C

$$\begin{aligned}
 &= h_y - \left[\frac{(h_y - h_z)}{(P_z - P_y)} \times (P_{abs} - P_y) \right] \\
 &= 346.9 - \left[\frac{(346.9 - 350.9 \text{ kJ/kg})}{(20.0 - 15.0 \text{ MPa})} \times (17.5 - 15 \text{ MPa}) \right] \\
 &= 348.9 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

- ดังนั้น เอนทัลปี ที่ P_{abs} = 17.5 MPa และ T = 77 °C

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{\Delta h_{T_z, T_y}}{\Delta T_{z, y}} \times \Delta T_{inlet, y} \right) + h_{T_y} \\
 &= \left[\frac{(348.9 - 265.8 \text{ kJ/kg})}{(80 - 60 \text{ C})} \times (77 - 60 \text{ C}) \right] + 265.8 \text{ kJ/kg} \\
 &= 336.3 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

- คำนวณเอนโทรปี ที่ P_{abs} = 17.5 MPa และ T_y = 60 °C

$$\begin{aligned}
&= s_y - \left[\frac{(s_y - s_z)}{(P_z - P_y)} \times (P_{abs} - P_y) \right] \\
&= 0.8234 - \left[\frac{(0.8234 - 0.8208 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}})}{(20.0 - 15.0 \text{ MPa})} \times (17.5 - 15 \text{ MPa}) \right] \\
&= 0.8221 \text{ kJ/kg-K}
\end{aligned}$$

- คำนวณเอนโทรปี ที่ $P_{abs} = 17.5 \text{ MPa}$ และ $T_z = 80 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}
&= s_y - \left[\frac{(s_y - s_z)}{(P_z - P_y)} \times (P_{abs} - P_y) \right] \\
&= 1.0659 - \left[\frac{(1.0659 - 1.0627 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}})}{(20.0 - 15.0 \text{ MPa})} \times (17.5 - 15 \text{ MPa}) \right] \\
&= 1.0643 \text{ kJ/kg-K}
\end{aligned}$$

- ดังนั้น เอนโทรปี ที่ $P_{abs} = 17.5 \text{ MPa}$ และ $T = 77 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}
&= \left(\frac{\Delta s_{T_z, T_y}}{\Delta T_{z,y}} \times \Delta T_{inlet,y} \right) + s_{T_y} \\
&= \left[\frac{(1.0643 - 0.8221 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}})}{(80 - 60 \text{ C})} \times (77 - 60 \text{ C}) \right] + 0.8221 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\
&= 1.02797 \text{ kJ/kg-K}
\end{aligned}$$

ดังนั้น เอนทาลปีและเอนโทรปีของน้ำที่ทางเข้า (จุด HR₁) เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง เท่ากับ 336.3 kJ/kg และ 1.028 kJ/kg-K ตามลำดับ

3. คำนวณค่าเอนทาลปีและเอนโทรปีจำเพาะของไอน้ำที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ใช้ค่าอุณหภูมิและความดันของจุดที่ต้องการคำนวณเอนทาลปีและเอนโทรปีจำเพาะ จากตารางที่ 4.9 และใช้ค่าจากตารางคุณสมบัติไอรอนยิ่งยวดในช่วงอุณหภูมิและความดันที่ครอบคลุมจุดที่ต้องการคำนวณ จากตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 คุณสมบัติของไอร้อนยิ่งยวด (Superheated Vapor Steam Properties)

T		P _y (MPa)		P _z (MPa)	
		2.5		3.0	
		h _y (kJ/kg)	s _y (kJ/kg.K)	h _z (kJ/kg)	s _z (kJ/kg.K)
T _y (C)	450	3351.6	7.177	3344.8	7.086
T _z (C)	500	3462.7	7.325	3457.2	7.236

ที่มา : (Cengel และคณะ, 2549)

ยกตัวอย่างการคำนวณหาลัพและเอนโทรปีจำเพาะของไอน้ำที่จุด HR₃

ที่จุด HR₃ มี P_{abs} = 2.8642 MPa และ T = 483.7 °C

ดังนั้น เลือกช่วงความดัน 2.5 MPa ถึง 3.0 MPa และช่วงอุณหภูมิ 450 °C ถึง 500 °C

- คำนวณเอนทาลปี ที่ P_{abs} = 2.8642 MPa และ T_y = 450 °C

$$\begin{aligned}
 &= h_y - \left[\frac{(h_y - h_z)}{(P_z - P_y)} \times (P_{abs} - P_y) \right] \\
 &= 3351.6 - \left[\frac{(3351.6 - 3344.8 \text{ kJ/kg})}{(3.0 - 2.5 \text{ MPa})} \times (2.8642 - 2.5 \text{ MPa}) \right] \\
 &= 3,346.65 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

- คำนวณเอนทาลปี ที่ P_{abs} = 2.8642 MPa และ T_z = 500 °C

$$\begin{aligned}
 &= h_y - \left[\frac{(h_y - h_z)}{(P_z - P_y)} \times (P_{abs} - P_y) \right] \\
 &= 3462.7 - \left[\frac{(3462.7 - 3457.2 \text{ kJ/kg})}{(3.0 - 2.5 \text{ MPa})} \times (2.8642 - 2.5 \text{ MPa}) \right] \\
 &= 3,458.69 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

- ดังนั้น เอนทาลปี ที่ P_{abs} = 2.8642 MPa และ T = 483.7 °C

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{\Delta h_{T_z, T_y}}{\Delta T_{z, y}} \times \Delta T_{inlet, y} \right) + h_{T_y} \\
 &= \left[\frac{(3,458.69 - 3,346.65 \text{ kJ/kg})}{(500 - 450 \text{ C})} \times (483.7 - 450 \text{ C}) \right] + 3,346.65 \text{ kJ/kg} \\
 &= 3,422.16 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

- คำนวณเอนโทรปี ที่ P_{abs} = 2.8642 MPa และ T_y = 450 °C

$$\begin{aligned}
&= s_y - \left[\frac{(s_y - s_z)}{(P_z - P_y)} \times (P_{\text{abs}} - P_y) \right] \\
&= 7.177 - \left[\frac{(7.177 - 7.086 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}})}{(3.0 - 2.5 \text{ MPa})} \times (2.8642 - 2.5 \text{ MPa}) \right] \\
&= 7.1107 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}
\end{aligned}$$

- คำนวณเอนโทรปี ที่ $P_{\text{abs}} = 2.8642 \text{ MPa}$ และ $T_z = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}
&= s_y - \left[\frac{(s_y - s_z)}{(P_z - P_y)} \times (P_{\text{abs}} - P_y) \right] \\
&= 7.325 - \left[\frac{(7.325 - 7.236 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}})}{(3.0 - 2.5 \text{ MPa})} \times (2.8642 - 2.5 \text{ MPa}) \right] \\
&= 7.2602 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}
\end{aligned}$$

- ดังนั้น เอนโทรปี ที่ $P_{\text{abs}} = 2.8642 \text{ MPa}$ และ $T = 483.7 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}
&= \left(\frac{\Delta s_{T_z, T_y}}{\Delta T_{z, y}} \times \Delta T_{\text{inlet}, y} \right) + s_{T_y} \\
&= \left[\frac{(7.2602 - 7.1107 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}})}{(500 - 450 \text{ C})} \times (483.7 - 450 \text{ C}) \right] + 7.1107 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \\
&= 7.2114 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}
\end{aligned}$$

ดังนั้น เอนทาลปีและเอนโทรปีของไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่จุดทางเข้าเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง เท่ากับ 3,422.2 kJ/kg และ 7.2114 kJ/kg-K ตามลำดับ

4. คำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซรวม ($C_{p, g, \text{mixture}}$) จากสมการต่อไปนี้

$$C_{p, g} = a + bT_{\text{avg}0} + cT_{\text{avg}0}^2 + dT_{\text{avg}0}^3$$

ซึ่งวิธีการคำนวณนั้น วิธีเดียวกับการคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของกังหันก๊าซ

5. คำนวณอัตราเอนทาลปีของก๊าซ น้ำ และไอน้ำที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยใช้ค่าจากตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าที่ใช้สำหรับการคำนวณอัตราเอนทาลปีของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง

จุด	สถานะ	T (K)	P _{abs} (MPa)	h ₀ (kJ/kg)	s ₀ (kJ/kg.K)	\dot{m} (kg/s)	C _{p,g,mixture} (kJ/kg.K)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)
HR ₁	น้ำ	350.15	17.500	104.8	0.3672	167.965	-	336.4	1.028
HR ₂	น้ำ	348.65	4.0000	104.8	0.3672	38.949	-	319.3	1.0191
HR ₃	ไอน้ำ	756.85	2.8642	104.8	0.3672	56.23608	-	3,422.2	7.2115
HR ₄	ไอน้ำ	623.55	2.9810	104.8	0.3672	83.313	-	3119.4	6.7501
HR ₅	ก๊าซ	896.85	0.1000	298.18	1.69528	582.293	1.1439	702.3	2.8148
HR ₆	ก๊าซ	384.05	0.1000	298.18	1.69528	582.293	1.0380	118.3	1.9430
HR ₇	ไอน้ำ	557.05	0.5640	104.8	0.3672	7.909	-	3029.8	7.3440
HR ₈	ไอน้ำ	552.55	15.460	104.8	0.3672	13.780	-	1229.6	3.0337
HR ₉	ไอน้ำ	840.85	13.420	104.8	0.3672	83.983	-	3510.8	6.6407
HR ₁₀	ไอน้ำ	838.95	2.8040	104.8	0.3672	94.879	-	3605.7	7.4674

ยกตัวอย่างการคำนวณอัตราเอนทาลปีของก๊าซ น้ำ และไอน้ำ

- คำนวณอัตราเอนทาลปีของน้ำที่จุด HR₁ จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \dot{E}_{X_{HR_1}} &= \dot{m}_i [(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)] \\
 &= \dot{m}_{HR_1} [(h_{HR_1} - h_0) - T_0(s_{HR_1} - s_0)] \\
 &= 167.965 \text{ kg/s} \times [(336.3 - 104.8 \text{ kJ/kg}) - 298.15 \text{ K} (1.028 - 0.3672 \text{ kJ/kg.K})] \\
 &= 5,793.35 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

- คำนวณอัตราเอนทาลปีของไอน้ำที่จุด HR₃ จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \dot{E}_{X_{HR_3}} &= \dot{m}_i [(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)] \\
 &= \dot{m}_{HR_3} [(h_{HR_3} - h_0) - T_0(s_{HR_3} - s_0)] \\
 &= 56.23608 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \left[\left(3422.2 - 104.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) - 298.15 \text{ K} \left(7.2115 - 0.3672 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \right) \right] \\
 &= 71,799.61 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

- คำนวณอัตราเอนทัลปีของก๊าซที่จุด HR₅ จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\dot{E}x_{HR_5} &= \dot{m}_i \left[C_{p,g} \times (T_i - T_0) - T_0 \left\{ C_{p,g} \times \ln \left(\frac{T_i}{T_0} \right) - R \ln \left(\frac{P_i}{P_0} \right) \right\} \right] \\ &= \dot{m}_{HR_5} \left[C_{p,g} \times (T_{HR_5} - T_0) - T_0 \left\{ C_{p,g} \times \ln \left(\frac{T_{HR_5}}{T_0} \right) - R \ln \left(\frac{P_{HR_5}}{P_0} \right) \right\} \right] \\ &= 582.293 \text{ kg/s} \times \left[\left\{ 1.1439 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} \times (896.85 - 298.15 \text{ K}) \right\} - 298.15 \text{ K} \times \right. \\ &\quad \left. \left\{ 1.1439 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} \times \ln \left(\frac{896.85 \text{ K}}{298.15 \text{ K}} \right) - 0.2870 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} \times \ln \left(\frac{0.1 \text{ MPa}}{0.1 \text{ MPa}} \right) \right\} \right] \\ &= 180,081.97 \text{ kJ/s}\end{aligned}$$

6. คำนวณอัตราการทำลายเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอนทัลปีของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยใช้ค่าจากตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ค่าที่ใช้สำหรับการคำนวณอัตราการทำลายเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอนทัลปีของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง

จุด	สถานะ	T (K)	P _{abs} (MPa)	h ₀ (kJ/kg)	s ₀ (kJ/kg.K)	\dot{m} (kg/s)	C _{p,g} (kJ/kg-K)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	$\dot{E}x$ (kJ/s)
HR ₁	น้ำ	350.15	17.500	104.8	0.3672	167.965	-	336.4	1.028	5,793.35
HR ₂	น้ำ	348.65	4.0000	104.8	0.3672	38.949	-	319.3	1.0191	782.53
HR ₃	ไอน้ำ	756.85	2.8642	104.8	0.3672	56.23608	-	3,422.2	7.2115	71,799.61
HR ₄	ไอน้ำ	623.55	2.9810	104.8	0.3672	83.313	-	3119.4	6.7501	92,605.37
HR ₅	ก๊าซ	896.85	0.1000	298.18	1.69528	582.293	1.1439	702.3	2.8148	180,081.97
HR ₆	ก๊าซ	384.05	0.1000	298.18	1.69528	582.293	1.0380	118.3	1.9430	6,295.64
HR ₇	ไอน้ำ	557.05	0.5640	104.8	0.3672	7.909	-	3029.8	7.3440	6,681.94
HR ₈	ไอน้ำ	552.55	15.460	104.8	0.3672	13.780	-	1229.6	3.0337	4,544.33
HR ₉	ไอน้ำ	840.85	13.420	104.8	0.3672	83.983	-	3510.8	6.6407	128,960.15
HR ₁₀	ไอน้ำ	838.95	2.8040	104.8	0.3672	94.879	-	3605.7	7.4674	131,311.51

- คำนวณอัตราการทำลายเอนทัลปี จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\dot{E}x_{D,HRSG} &= \sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e \\ &= (\dot{E}x_{HR_1} + \dot{E}x_{HR_2} + \dot{E}x_{HR_3} + \dot{E}x_{HR_4} + \dot{E}x_{HR_5}) - (\dot{E}x_{HR_6} + \dot{E}x_{HR_7} + \dot{E}x_{HR_8} + \dot{E}x_{HR_9} + \dot{E}x_{HR_{10}}) \\ &= (5,793.35 + 782.53 + 71,799.61 + 92,605.37 + 180,081.97) \\ &\quad - (6,295.64 + 6,681.94 + 4,544.33 + 128,960.15 + 131,311.51) \\ &= 351,062.83 - 277,793.57 \text{ kJ/s}\end{aligned}$$

$$= 73,269.27 \text{ kJ/s}$$

$$= 73.27 \text{ kW}$$

- คำนวณประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียู จากสมการต่อไปนี้

$$\psi_{\text{HRSG}} = \frac{\sum \dot{E}x_{e,l,s} - \sum \dot{E}x_{i,l,s}}{\dot{E}x_{i,g} - \dot{E}x_{e,g}}$$

$$= \frac{(\dot{E}x_{\text{HR7}} + \dot{E}x_{\text{HR8}} + \dot{E}x_{\text{HR9}} + \dot{E}x_{\text{HR10}}) - (\dot{E}x_{\text{HR1}} + \dot{E}x_{\text{HR2}} + \dot{E}x_{\text{HR3}} + \dot{E}x_{\text{HR4}})}{\dot{E}x_{\text{HR5}} - \dot{E}x_{\text{HR6}}}$$

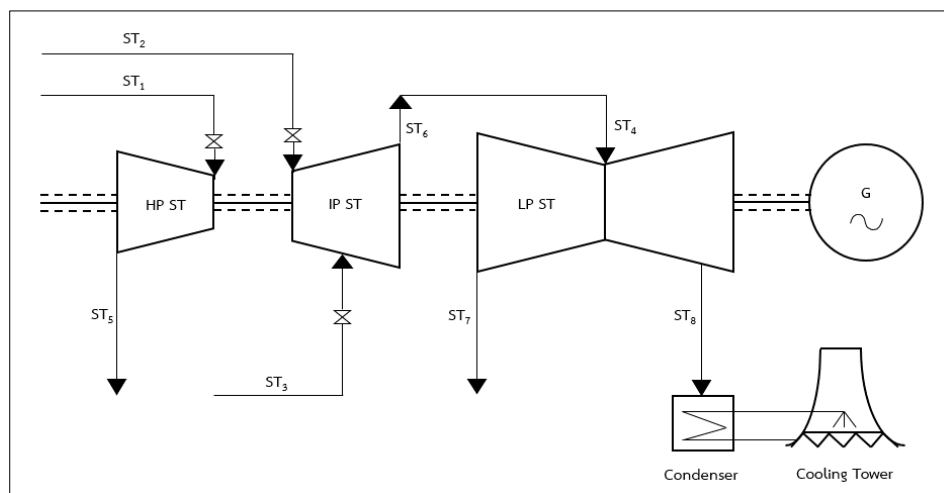
$$= \frac{(6,681.94 + 4,544.33 + 128,960.15 + 131,311.51) - (5,793.35 + 782.53 + 71,799.61 + 92,605.37)}{180,081.97 - 6,295.64}$$

$$= 57.84 \%$$

ดังนั้น อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียูของเครื่องผลิตไอน้ำจากร้อนเหลือทิ้ง เท่ากับ 73.27 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียูเท่ากับร้อยละ 57.84

4.2.3 การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียูของกังหันไอน้ำ

กังหันไอน้ำเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม เป็นอุปกรณ์ที่ต่อเข้ากับเครื่องผลิตไอน้ำจากร้อนเหลือทิ้งและเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า โดยจะรับไอน้ำมาจากเครื่องผลิตไอน้ำจากร้อนเหลือทิ้งมาใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้จำควมกังหันน้ำทั้ง 3 เครื่อง ได้แก่ กังหันไอน้ำความดันสูง กังหันไอน้ำความดันปานกลาง และกังหันไอน้ำความดันต่ำ แผนภาพของกังหันไอน้ำแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แผนภาพของกังหันไอน้ำ

ขั้นตอนการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียของกังหันไอน้ำ มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียของกังหันไอน้ำ ทั้ง 3 เครื่อง มีวิธีการวิเคราะห์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง วิธีการวิเคราะห์โดยละเอียดแสดงในภาคผนวก ค ซึ่งการวิเคราะห์จะใช้ข้อมูลดังตารางที่ 4.14 ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.14 ค่าที่ใช้สำหรับการคำนวณอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียของกังหันไอน้ำ

จุด	T (C)	T (K)	P _{abs} (MPa)	h ₀ (kJ/kg)	s ₀ (kJ/kg.K)	ṁ (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	W _{ST} (kJ/s)	Ẹ _x (kJ/s)	
HPST	ST ₁	565	838.2	12.82	104.8	0.3672	167.965	3510.0	6.654	69,388.33	257,090.24
	ST ₅	351.4	624.6	3.054	104.8	0.3672	166.726	3119.6	6.741		185,817.04
IPST	ST ₂	565	838.15	2.711	104.8	0.3672	189.757	3604.5	7.465	89,478.83	262,517.68
	ST ₃	281.9	555.05	0.5406	104.8	0.3672	15.818	3026.2	7.357		13,246.01
	ST ₆	323.5	596.65	0.5203	104.8	0.3672	206.357	3112.9	7.525		180,349.09
LPST	ST ₄	323.4	596.55	0.5151	104.8	0.3672	206.357	3112.9	7.529	130,499.09	180,092.16
	ST ₇	139.8	412.95	0.0872	104.8	0.3672	8.761	2757.2	7.647		4,222.02
	ST ₈	48.2	321.35	0.0113	104.8	0.3672	197.984	2463.4	7.718		33,055.21

โดยที่ ST₁ ST₅ ST₂ ST₃ ST₆ ST₄ ST₇ และ ST₈ คือจุดทางเข้าและทางออกของกังหันไอน้ำแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.7

1. การคำนวณอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียของกังหันไอน้ำความดันสูง (HPST)

- อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียของ HPST คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\dot{E}_{x,D,HPST} &= \dot{E}_{x,ST_1} - \dot{E}_{x,ST_5} - \dot{W}_{HPST} \\ &= 257,090.24 - 185,817.04 - 69,388.33 \text{ kJ/s} \\ &= 1,884.88 \text{ kJ/s} \\ &= 1.88 \text{ kw}\end{aligned}$$

- ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียของ HPST คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\psi_{HPST} &= \frac{\dot{W}_{HPST}}{\dot{E}_{x,ST_1} - \dot{E}_{x,ST_5}} \\ &= \frac{69,388.33 \text{ kJ/s}}{257,090.24 \text{ kJ/s} - 185,817.04 \text{ kJ/s}}\end{aligned}$$

$$= 97.36 \%$$

ดังนั้น อัตราการทำลายเอนทาลปีของ HPST เท่ากับ 1.88 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพเอนทาลปีเท่ากับร้อยละ 97.36

2. การคำนวณอัตราการทำลายเอนทาลปีของกังหันไอน้ำความดันปานกลาง (IPST)

- อัตราการทำลายเอนทาลปีของ IPST คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\dot{E}_{D,IPST} &= (\dot{E}_{ST_2} + \dot{E}_{ST_3}) - \dot{E}_{ST_6} - \dot{W}_{IPST} \\ &= (262,517.68 + 13,246.01) - 180,349.09 - 89,478.83 \text{ kJ/s} \\ &= 5,935.77 \text{ kJ/s} \\ &= 5.94 \text{ kw}\end{aligned}$$

- ประสิทธิภาพเอนทาลปีของ IPST คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\psi_{IPST} &= \frac{\dot{W}_{IPST}}{(\dot{E}_{ST_2} + \dot{E}_{ST_3}) - \dot{E}_{ST_6}} \\ &= \frac{89,478.83 \text{ kJ/s}}{(262,517.68 + 13,246.01 \text{ kJ/s}) - 180,349.09 \text{ kJ/s}} \\ &= 93.78 \%\end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการทำลายเอนทาลปีของ IPST เท่ากับ 5.94 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพเอนทาลปีเท่ากับร้อยละ 93.78

3. การคำนวณอัตราการทำลายเอนทาลปีของกังหันไอน้ำความดันต่ำ (LPST)

- อัตราการทำลายเอนทาลปีของ LPST คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\dot{E}_{D,LPST} &= \dot{E}_{ST_4} - (\dot{E}_{ST_7} + \dot{E}_{ST_8}) - \dot{W}_{LPST} \\ &= 180,092.16 - (4,222.02 + 33,055.21) - 130,499.09 \text{ kJ/s} \\ &= 12,315.85 \text{ kJ/s} \\ &= 12.32 \text{ kw}\end{aligned}$$

- ประสิทธิภาพเอนทาลปีของ LPST คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\psi_{LPST} &= \frac{\dot{W}_{LPST}}{\dot{E}_{ST_4} - (\dot{E}_{ST_7} + \dot{E}_{ST_8})} \\ &= \frac{130,499.09 \text{ kJ/s}}{180,092.16 - (4,222.02 + 33,055.21) \text{ kJ/s}}\end{aligned}$$

$$= 91.38 \%$$

ดังนั้น อัตราการทำลายเอ็กซีเซอียของ LPST เท่ากับ 12.32 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพเอ็กซีเซอีย เท่ากับร้อยละ 91.38

4.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency)

ประสิทธิภาพพลังงาน เป็นวิธีที่ใช้ในการจัดการการใช้พลังงาน ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์ที่ง่ายที่สุด และใช้ต้นทุนต่ำที่สุดในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการจัดการการใช้พลังงาน ในงานวิจัยนี้ นอกจากการวิเคราะห์เอ็กซีเซอียของอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าแล้ว ผู้วิจัยยังดำเนินการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานด้วย เนื่องจากประสิทธิภาพเอ็กซีเซอียนั้นเป็นวิธีการที่วิเคราะห์ได้ทั้งปริมาณและคุณภาพของพลังงาน แต่ประสิทธิภาพพลังงานจะวิเคราะห์ได้เพียงแค่ปริมาณของพลังงานเท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำผลจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทั้ง 2 รูปแบบมาใช้ในการประเมินศักยภาพในการปรับปรุงองค์ประกอบในระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกัน โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานขององค์ประกอบในระบบผลิตไฟฟ้าทั้ง 3 อุปกรณ์ ได้แก่ กังหันก๊าซ เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง และกังหันไอน้ำ มีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันก๊าซ

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันก๊าซจะใช้วิธีวิเคราะห์แบบไอเซนโทรปิก โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. คำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซเฉลี่ยที่ปริมาตรคงที่ ($C_{v,avg}$) โดยเลือกช่วงอุณหภูมิให้ครอบคลุมอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดที่ต้องการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซเฉลี่ยที่ปริมาตรคงที่

T (K)		T_{avg} (K)	C_v (kJ/kg-K)	$C_{v,avg}$ (kJ/kg-K)
T_y (C)	1200	1225.0	0.886	0.89025
T_z (C)	1300		0.903	

ที่มา : (Cengel และคณะ, 2549)

ที่จุด GT_1 และ GT_2 มี $T_{avg} = 1225.0$ K

ดังนั้น เลือกค่า C_v ที่ช่วงอุณหภูมิ 1200 K ถึง 1300 K คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 C_{v,avg} &= C_{v,T_y} + \left[\frac{(C_{v,T_z} - C_{v,T_y})}{(T_z - T_y)} \times (T_{avg} - T_y) \right] \\
 &= 0.886 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{K} + \left[\frac{(0.903 - 0.886 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{K})}{(1300 - 1200 \text{ K})} \times (1225.0 - 1200 \text{ K}) \right] \\
 &= 0.89025 \text{ kJ/kg} - \text{K}
 \end{aligned}$$

2. คำนวณอัตราส่วนความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซ (γ) โดยใช้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซเฉลี่ยที่ความดันคงที่ ($C_{p,g,avg}$) จากหัวข้อ 4.2.1 การวิเคราะห์เอ็กซีเซอียของกังหันก๊าซ ในตารางที่ 4.7 คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \gamma &= \frac{C_{p,g,avg}}{C_{v,avg}} \\
 &= \frac{1.1862 \text{ kJ/kg} - \text{K}}{0.89025 \text{ kJ/kg} - \text{K}} \\
 &= 1.380
 \end{aligned}$$

3. คำนวณอุณหภูมิที่ทางออกของกังหันไอน้ำแบบไอเซนโทรปิก ($T_{e,isen} = T_{GT_2,isen}$) โดยใช้ค่าอุณหภูมิที่ทางเข้า ความดันที่ทางเข้าและทางออก จากหัวข้อ 4.2.1 การวิเคราะห์เอ็กซีเซอียของกังหันก๊าซ ในตารางที่ 4.2 คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 T_{e,isen} &= T_{GT_2,isen} = \frac{T_i}{\left(\frac{P_e}{P_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \\
 &= \frac{1553.2 \text{ K}}{\left(\frac{3.0 \text{ MPa}}{0.1 \text{ MPa}} \right)^{\frac{1.380-1}{1.380}}} \\
 &= 608.93 \text{ K}
 \end{aligned}$$

4. คำนวณประสิทธิภาพพลังงานของกังหันก๊าซ โดยใช้ข้อมูลจากตาราง 4.16

ตารางที่ 4.16 ค่าที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพพลังงานของกังหันก๊าซ

State	T (K)	T_{avg} (K)	P_{abs} (MPa)	\dot{m} (kg/s)	$C_{p,g,avg}$ at $T_{e,act}$ (kJ/kg-K)	$C_{p,g,avg}$ at $T_{e,isen}$ (kJ/kg-K)
GT ₁	1553.2	1225.0	3.0	582.293	1.1862	1.1684
GT ₂	896.85		0.1	582.293		

หมายเหตุ : ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซเฉลี่ยที่ความดันคงที่ที่ไอเซนโทรปิก ($C_{p,g,avg}$ at $T_{e,isen}$) คำนวณจากอุณหภูมิที่ทางเข้าจริงกับอุณหภูมิที่ทางออกแบบไอเซนโทรปิก ($T_{e,isen}$)

$$\begin{aligned}
 \eta_{GT} &= \frac{W_{GT,act}}{W_{GT,isen}} \\
 &= \frac{\dot{m}_{GT1} C_{p,g,avg}(T_{GT1} - T_{GT2,act})}{\dot{m}_{GT2} C_{p,g,avg}(T_{GT1} - T_{GT2,isen})} \\
 &= \frac{582.293 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1.1862 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{K} \times (1553.2 - 896.85 \text{ K})}{582.293 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1.1684 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{K} \times (1553.2 - 608.93 \text{ K})} \times 100 \\
 &= 70.56\%
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันก๊าซ เท่ากับร้อยละ 70.56

4.3.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องผลิตน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องผลิตน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง มีขั้นตอนดังนี้

1. รวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ อัตราการไหลและเอนทัลปีจำเพาะ ดังแสดงในตารางที่

4.17

ตารางที่ 4.17 ค่าที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง

จุด	สถานะ	\dot{m} (kg/s)	h (kJ/kg)
HR ₁	น้ำ	167.965	336.4
HR ₂	น้ำ	38.949	319.3
HR ₃	ไอน้ำ	56.23608	3,422.2
HR ₄	ไอน้ำ	83.313	3119.4
HR ₅	ก๊าซ	582.293	702.3
HR ₆	ก๊าซ	582.293	118.3
HR ₇	ไอน้ำ	7.909	3029.8
HR ₈	ไอน้ำ	13.780	1229.6
HR ₉	ไอน้ำ	83.983	3510.8
HR ₁₀	ไอน้ำ	94.879	3605.7

2. คำนวณประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง จากสมการต่อไปนี้

$$\eta_{HRSG} = \frac{\sum(\dot{m}_{e,l,s} \times h_{e,l,s}) - \sum(\dot{m}_{i,l,s} \times h_{i,l,s})}{\dot{m}_{i,g} \times h_{i,g}}$$

$$= \frac{(\dot{m}h_{HR7} + \dot{m}h_{HR8} + \dot{m}h_{HR9} + \dot{m}h_{HR10}) - (\dot{m}h_{HR1} + \dot{m}h_{HR2} + \dot{m}h_{HR3} + \dot{m}h_{HR4})}{\dot{m}h_{HR5}}$$

$$= \frac{[(7.909 \times 3029.8) + (13.780 \times 1229.6) + (83.983 \times 3510.8) + (94.879 \times 3605.7)] - [(167.965 \times 336.4) + (38.949 \times 319.3) + (56.23608 \times 3,422.22) + (83.313 \times 3119.4)]}{582.293 \times 702.3} \times 100$$

$$= 38.29\%$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งเท่ากับร้อยละ 38.29

4.3.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันไอน้ำ

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันไอน้ำจะใช้วิธีวิเคราะห์แบบไอเซนโทรปิก โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. รวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ อัตราการไหล เอนทัลปีจำเพาะ และเอนโทรปีจำเพาะ ดังแสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ค่าที่ใช้ในการคำนวณเอนทัลปีไอเซนโทรปิกและประสิทธิภาพพลังงานของกังหันไอน้ำ

จุด		\dot{m} (kg/s)	h_{act} (kJ/kg)	s_{act} (kJ/kg-K)
HPST	ST ₁	167.965	3510.0	6.654
	ST ₅	166.726	3119.6	6.741
IPST	ST ₂	189.757	3604.5	7.465
	ST ₃	15.818	3026.2	7.357
	ST ₆	206.357	3112.9	7.525
LPST	ST ₄	206.357	3112.9	7.529
	ST ₇	8.761	2757.2	7.647
	ST ₈	197.984	2463.4	7.718

2. คำนวณค่าเอนทัลปีจำเพาะแบบไอเซนโทรปิก ($h_{e,isen}$) โดยอ้างอิงจากค่าเอนโทรปีจริงที่ทางออก (s_{act}) จากตารางที่ 4.18 และเลือกช่วงเอนโทรปีจากตารางไอร้อนยิ่งยวดให้ครอบคลุมค่าเอนโทรปีที่จุดทางออกนั้นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ค่าที่ใช้ในการคำนวณเอนทัลปีไอเซนโทรปิก

T (K)		h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	$h_{e,isen}$ (kJ/kg)
T_y (C)	300	2994.3	6.5412	3113.71
T_z (C)	350	3116.1	6.7450	

ที่มา : (Cengel และคณะ, 2549)

ยกตัวอย่างการคำนวณเอนทัลปีจำเพาะแบบไอเซนโทรปิก ของ HPST

ที่จุด ST_5 มี $s_{act} = 6.741$ kJ/kg.K ดังนั้นเลือกช่วงค่าเอนโทรปีที่ครอบคลุมจุดนี้

$$\begin{aligned}
 h_{e,isen} &= h_{T_y} + \left[\frac{(h_{T_z} - h_{T_y})}{(s_{T_z} - s_{T_y})} \times (s_e - s_{T_y}) \right] \\
 &= 2994.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \left[\frac{(3116.1 - 2994.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{(6.745 - 6.5412 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}})} \times (6.741 - 6.5412 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}) \right] \\
 &= 3113.71 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

3. คำนวณประสิทธิภาพพลังงานของกังหันไอน้ำแต่ละเครื่อง โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ตัวอย่างค่าที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพพลังงานของกังหันไอน้ำ

จุด		\dot{m} (kg/s)	h_{act} (kJ/kg)	s_{act} (kJ/kg-K)	$h_{e,isen}$ (kJ/kg)
HPST	ST_1	167.965	3510.0	6.654	-
	ST_5	166.726	3119.6	6.741	3113.71
IPST	ST_2	189.757	3604.5	7.465	-
	ST_3	15.818	3026.2	7.357	-
	ST_6	206.357	3112.9	7.525	3102.61
LPST	ST_4	206.357	3112.9	7.529	-
	ST_7	8.761	2757.2	7.647	2757.13
	ST_8	197.984	2463.4	7.718	2311.2

- คำนวณประสิทธิภาพพลังงานของกังหันไอน้ำความดันสูง (HPST) จากสมการต่อไปนี้

$$\eta_{HPST} = \frac{\dot{m}_{ST_1} h_{ST_1} - \dot{m}_{ST_5} h_{ST_5}}{\dot{m}_{ST_1} h_{ST_1} - \dot{m}_{ST_5} h_{ST_5,isen}}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\left(167.965 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3510.0 \text{ kJ/kg}\right) - \left(166.726 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3119.6 \text{ kJ/kg}\right)}{\left(167.965 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3510.0 \text{ kJ/kg}\right) - \left(166.726 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3113.71 \text{ kJ/kg}\right)} \times 100 \\
&= 98.60 \%
\end{aligned}$$

- คำนวณประสิทธิภาพพลังงานของกังหันไอน้ำความดันปานกลาง (IPST) จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
\eta_{\text{IPST}} &= \frac{(\dot{m}_{\text{ST}_2} h_{\text{ST}_2} + \dot{m}_{\text{ST}_3} h_{\text{ST}_3}) - \dot{m}_{\text{ST}_6} h_{\text{ST}_6}}{(\dot{m}_{\text{ST}_2} h_{\text{ST}_2} - \dot{m}_{\text{ST}_2} h_{\text{ST}_6, \text{isen}}) + (\dot{m}_{\text{ST}_3} h_{\text{ST}_3} - \dot{m}_{\text{ST}_3} h_{\text{ST}_6, \text{isen}})} \\
&= \frac{\left[\left(189.757 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3604.5 \text{ kJ/kg}\right) + \left(15.818 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3026.2 \text{ kJ/kg}\right)\right] - \left(206.357 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3112.9 \text{ kJ/kg}\right)}{\left[\left(189.757 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3604.5 \text{ kJ/kg}\right) - \left(189.757 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3102.61 \text{ kJ/kg}\right)\right] - \left[\left(15.818 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3026.2 \text{ kJ/kg}\right) - \left(15.818 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3102.61 \text{ kJ/kg}\right)\right]} \times 100 \\
&= 95.16 \%
\end{aligned}$$

- คำนวณประสิทธิภาพพลังงานของกังหันไอน้ำความดันต่ำ (LPST) จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
\eta_{\text{LPST}} &= \frac{\dot{m}_{\text{ST}_4} h_{\text{ST}_4} - (\dot{m}_{\text{ST}_7} h_{\text{ST}_7} + \dot{m}_{\text{ST}_8} h_{\text{ST}_8})}{(\dot{m}_{\text{ST}_7} h_{\text{ST}_4} - \dot{m}_{\text{ST}_7} h_{\text{ST}_7, \text{isen}}) + (\dot{m}_{\text{ST}_8} h_{\text{ST}_4} - \dot{m}_{\text{ST}_8} h_{\text{ST}_8, \text{isen}})} \\
&= \frac{\left(206.357 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3112.9 \text{ kJ/kg}\right) - \left[\left(8.761 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 2757.2 \text{ kJ/kg}\right) + \left(197.984 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 2463.4 \text{ kJ/kg}\right)\right]}{\left[\left(8.761 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3112.9 \text{ kJ/kg}\right) - \left(8.761 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 2757.13 \text{ kJ/kg}\right)\right] + \left[\left(197.984 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3112.9 \text{ kJ/kg}\right) - \left(197.984 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 2311.2 \text{ kJ/kg}\right)\right]} \times 100 \\
&= 80.64 \%
\end{aligned}$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพพลังงานของ HPST IPST และ LPST เท่ากับร้อยละ 98.60 95.16 และ 80.64 ตามลำดับ

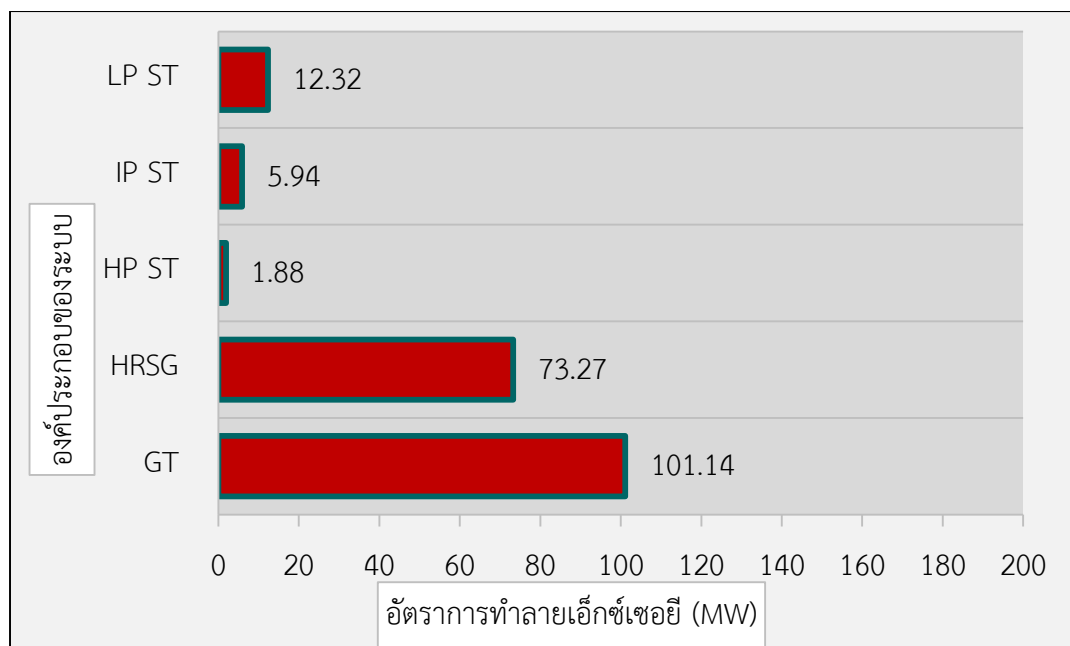
4.4 ผลการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอีย ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอีย และประสิทธิภาพพลังงาน

จากการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอีย ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอีย และประสิทธิภาพพลังงานขององค์ประกอบในระบบผลิตไฟฟ้าทั้ง 3 อุปกรณ์ อันได้แก่ กังหันก๊าซ เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง และกังหันไอน้ำ ในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตาราง 4.21

ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียขององค์ประกอบของระบบ

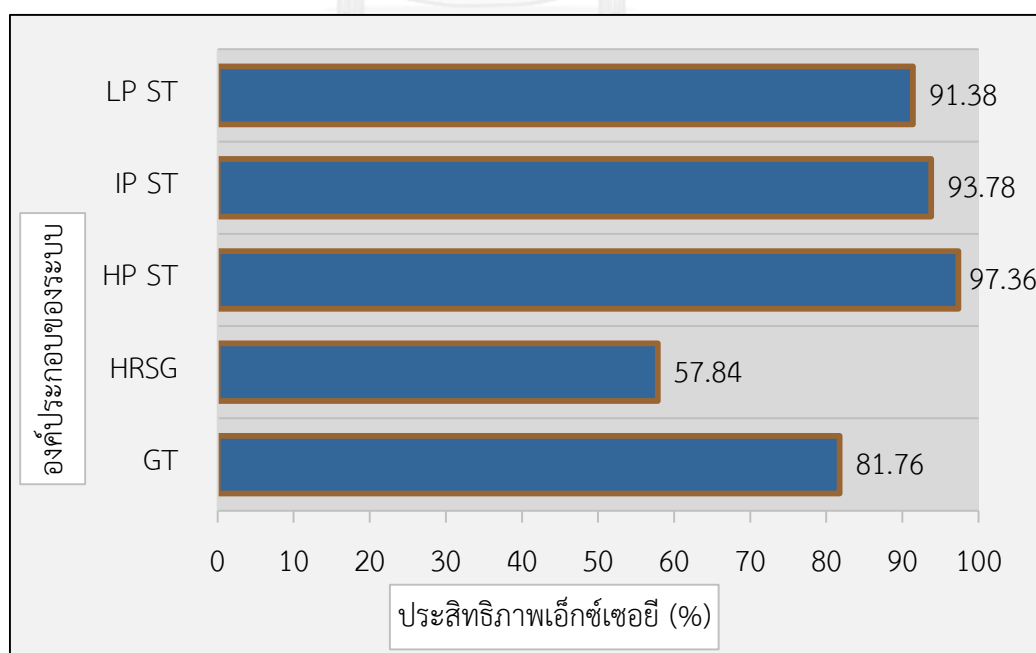
องค์ประกอบของระบบ	อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอีย (เมกะวัตต์)	ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอีย (%)
กังหันก๊าซ (GT)	101.14	81.76
เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง (HRSG)	73.27	57.84
กังหันไอน้ำความดันสูง (HPST)	1.88	97.36
กังหันไอน้ำความดันปานกลาง (IPST)	5.94	93.78
กังหันไอน้ำความดันต่ำ (LPST)	12.32	91.38

จากผลการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียในตารางที่ 4.21 แสดงผลในรูปกราฟแท่ง ดังรูปที่ 4.8 โดยพบว่ากังหันก๊าซมีอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียสูงสุดในองค์ประกอบทั้งหมดของระบบ รองลงมาคือเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง กังหันไอน้ำความดันต่ำ กังหันไอน้ำความดันปานกลาง และกังหันไอน้ำความดันสูงมีอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 101.14 73.27 12.32 5.94 และ 1.88 เมกะวัตต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียขององค์ประกอบของระบบ

ในส่วนของการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียนั้น พบว่ากังหันไอน้ำความดันสูงมีประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียสูงสุด รองลงมาคือกังหันไอน้ำความดันปานกลาง กังหันไอน้ำความดันต่ำ กังหันก๊าซ และเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งมีประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 97.36 93.78 91.38 81.76 และ 57.84 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



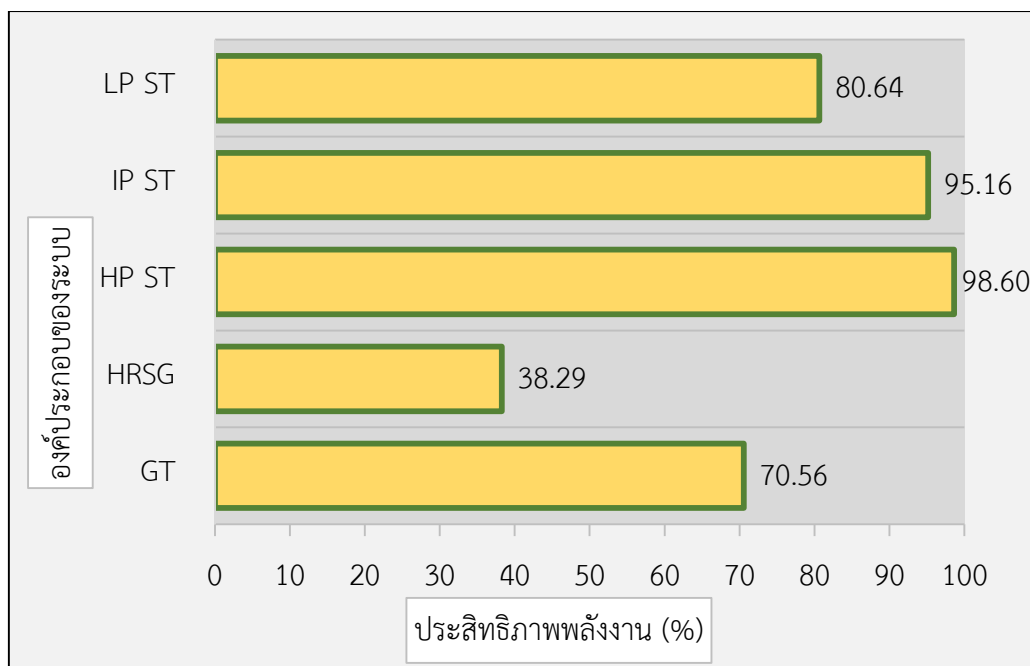
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียขององค์ประกอบของระบบ

จากการวิเคราะห์พบว่าเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งเป็นองค์ประกอบที่มีโอกาสในการที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพสูง ถึงแม้ว่าอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งจะไม่ได้มีค่าสูงที่สุด แต่เมื่อพิจารณาพร้อมกับประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียแล้วพบว่าเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งมีโอกาสนในการปรับปรุงสูงและมีโอกาสในการปรับปรุงมากกว่ากังหันก๊าซที่ถึงแม้ว่าจะมีอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียที่สูงกว่าเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง แต่ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียของกังหันก๊าซนั้นมีค่าค่อนข้างสูงอยู่แล้ว โอกาสในการปรับปรุงจึงน้อยกว่า แต่กังหันก๊าซก็เป็นอีกอุปกรณ์ที่มีโอกาสในการปรับปรุงรองลงมาจากเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้วิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียร่วมกับประสิทธิภาพพลังงาน (energy efficiency) ขององค์ประกอบของระบบ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพพลังงานขององค์ประกอบของระบบ

องค์ประกอบของระบบ	ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอีย; ψ (%)	ประสิทธิภาพพลังงาน; η (%)
กังหันก๊าซ (GT)	81.76	70.56
เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง (HRSG)	57.84	38.29
กังหันไอน้ำความดันสูง (HP ST)	97.36	98.60
กังหันไอน้ำความดันปานกลาง (IP ST)	93.78	95.16
กังหันไอน้ำความดันต่ำ (LP ST)	91.38	80.64

จากตารางที่ 4.22 ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพพลังงานขององค์ประกอบในระบบผลิตไฟฟ้าได้รับการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์พบว่ากังหันไอน้ำความดันสูงมีประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียสูงที่สุด และเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งมีประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียต่ำที่สุดดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว (รูปที่ 4.9) เช่นเดียวกับประสิทธิภาพพลังงาน โดยพบว่ากังหันไอน้ำความดันสูงมีประสิทธิภาพพลังงานสูงที่สุด รองลงมาคือ กังหันไอน้ำความดันปานกลาง กังหันไอน้ำความดันต่ำ กังหันก๊าซ และเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งมีประสิทธิภาพพลังงานต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.60 95.16 80.64 70.56 และ 38.29 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพพลังงานขององค์ประกอบของระบบ

เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพพลังงานร่วมกัน พบว่าประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งมีค่าต่ำที่สุด แต่ยังไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีโอกาสในการปรับปรุงประสิทธิภาพมากที่สุด เนื่องจากประสิทธิภาพพลังงานนั้นสามารถระบุได้เพียงแค่ว่าปริมาณพลังงานเท่านั้น ไม่สามารถระบุถึงคุณภาพของพลังงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นเดียวกับประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอีย ดังนั้นผู้วิจัยจึงพิจารณาค่าประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียร่วมด้วย โดยผลการศึกษาก็แสดงให้เห็นว่าเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งมีประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียต่ำที่สุดเช่นกัน จากการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอีย การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอีย และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงาน จึงสรุปได้ว่าเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งมีนัยสำคัญมากที่สุดของระบบ ในแง่ของโอกาสในการปรับปรุงสูงที่สุด สำหรับกังหันก๊าซก็เช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไว้ในส่วนของวิเคราะห์การทำลายเอ็กซ์เซอียแล้วว่ามีศักยภาพในการปรับปรุงรองลงมาจากเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพพลังงานร่วมกันพบว่าโอกาสในการปรับปรุงนั้นไม่สูงมาก เนื่องจากประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียมีค่าค่อนข้างสูงนั่นเอง

4.5 แนวทาง/มาตรการการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

4.5.1 แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพเอ็กซีเซอียและพลังงาน

การวิเคราะห์เอ็กซีเซอียจะช่วยในการวิเคราะห์พลังงานของระบบและกระบวนการอื่นๆ ซึ่งเอ็กซีเซอียเป็นลักษณะเฉพาะเมื่อทุกกระบวนการเกิดขึ้นในระบบและสิ่งแวดล้อมที่สามารถผันกลับได้ และจะถูกทำลายเมื่อเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ ซึ่งนี่เองเป็นสาเหตุที่ทำให้อุปกรณ์หรือระบบมีประสิทธิภาพลดลง กล่าวคือพลังงานที่นำมาใช้ประโยชน์ได้จริงมีปริมาณที่น้อยและจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของพลังงานที่มีอยู่ทั้งหมด เมื่อมีการนำการวิเคราะห์เอ็กซีเซอียมาใช้ในการวิเคราะห์ห้องประกอบในโรงงาน เช่น โรงไฟฟ้า เราจะสามารถระบุองค์ประกอบที่มีศักยภาพในการปรับปรุงประสิทธิภาพได้ จากการวิเคราะห์การทำลายเอ็กซีเซอียหรือการวิเคราะห์ปริมาณการสูญเสียพลังงานที่เป็นประโยชน์นั่นเอง และจากการวิเคราะห์นี้เองจะนำไปสู่กระบวนการปรับปรุงประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าต่อไป เนื่องจากเอ็กซีเซอียนั้นเป็นตัวที่สามารถใช้ตรวจวัดได้ทั้งปริมาณและคุณภาพ ในขณะที่พลังงานนั้นสามารถตรวจวัดได้เพียงแค่ปริมาณเท่านั้น ดังนั้นการวิเคราะห์เอ็กซีเซอียจึงเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่ดีที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ศักยภาพของระบบ นอกเหนือไปจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency) ตัวอย่างงานวิจัยที่นำการวิเคราะห์พลังงาน (ตามกฎข้อที่หนึ่งๆ) และการวิเคราะห์เอ็กซีเซอีย (ตามกฎข้อที่สองๆ) มาใช้ในการวิเคราะห์ศักยภาพในการปรับปรุงอุปกรณ์ เช่น งานวิจัยของ Saidur และคณะ (2010) การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กซีเซอียของหม้อไอน้ำที่ใช้ในอุตสาหกรรมในประเทศมาเลเซีย ผลงานวิจัยพบว่าอุปกรณ์ที่มีโอกาสในการปรับปรุงมากที่สุดคือหม้อต้มไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.11

Energy and exergy analysis for combustor, heat exchanger and boiler.		
	Energy consumption, kJ/s	Exergy destruction, kJ/s
Combustor	15,417.8	6660
Heat Exchanger	3853.00	3660
Boiler	19,270.8	10,320
Energy and exergy efficiencies of combustor, heat exchanger and boiler.		
	Energy efficiency, η (%)	Exergy efficiency, ψ (%)
Combustor	100	45.18
Heat exchanger	72.13	48.054
Boiler	72.46	24.89

รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กซีเซอียจากงานวิจัยอื่น

จากรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาในส่วนของอัตราการทำลายเอ็กซ์เชนเจอร์พบว่าหม้อต้มไอน้ำมีการสูญเสียเอ็กซ์เชนเจอร์สูงที่สุด รองลงมาคือเตาเผาไหม้ และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) มีอัตราการทำลายเอ็กซ์เชนเจอร์ต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาในส่วนของประสิทธิภาพเอ็กซ์เชนเจอร์ร่วมกับประสิทธิภาพพลังงาน พบว่าหม้อต้มไอน้ำมีโอกาสในการปรับปรุงสูงที่สุดเช่นกัน

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้นำการวิเคราะห์เอ็กซ์เชนเจอร์มาใช้ในการประเมินศักยภาพในการปรับปรุงระบบ เพื่อนำไปสู่การลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการลดการใช้พลังงาน โดยจากการวิเคราะห์พบว่าเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งมีโอกาสในการปรับปรุงมากที่สุดในระบบ เนื่องจากมีอัตราการทำลายเอ็กซ์เชนเจอร์ที่ค่อนข้างสูงในขณะที่ประสิทธิภาพเอ็กซ์เชนเจอร์มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงมีศักยภาพในการปรับปรุงมากกว่าอุปกรณ์ตัวอื่น อุปกรณ์ที่มีศักยภาพในการปรับปรุงรองลงมา คือ กังหันก๊าซ เนื่องจากมีอัตราการทำลายเอ็กซ์เชนเจอร์สูงที่สุดในระบบแต่เนื่องด้วยประสิทธิภาพเอ็กซ์เชนเจอร์ที่ค่อนข้างสูงอยู่แล้วโอกาสในการปรับปรุงจึงน้อยกว่า สำหรับงานวิจัยนี้กังหันไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่มีโอกาสในการปรับปรุงต่ำที่สุด เนื่องจากมีอัตราการทำลายเอ็กซ์เชนเจอร์ที่ต่ำมากในขณะที่ประสิทธิภาพเอ็กซ์เชนเจอร์ก็มีค่าที่สูงมาก

จากการศึกษาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งและกังหันก๊าซในงานวิจัยอื่นๆ ทำให้ทราบแนวทางการปรับปรุงอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

1. แนวทางการปรับปรุงเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง เช่น การเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซที่ทางเข้าของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง การนำกลับความร้อนจากก๊าซเหลือทิ้งมาใช้ใหม่ และการใช้ระบบ Once-through (Benson) HRSG ที่สามารถลดระยะเวลาในการเริ่มเดินเครื่องจักร เนื่องจากช่วงที่เริ่มเดินเครื่องจักรประสิทธิภาพของระบบจะต่ำจึงเป็นช่วงที่มีปริมาณการปล่อยมลพิษสูง เป็นต้น

2. แนวทางการปรับปรุงกังหันก๊าซ เช่น การเพิ่มปริมาณความร้อนในวัฏจักร Brayton-Rankine หรือวัฏจักรกังหันก๊าซร่วมกับกังหันไอน้ำโดยการเปลี่ยนวัสดุเซรามิกที่ใช้ในกังหันก๊าซใหม่ เนื่องจากวัสดุเซรามิกที่ใช้ในกังหันก๊าซเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อนและทนอุณหภูมิสูงได้ดี จึงสามารถป้องกันการรั่วไหลของความร้อนออกจากตัวกังหันก๊าซได้ และการอัพเกรดใช้ Super high-temperature gas turbine ที่สามารถใช้ได้กับก๊าซที่มีอุณหภูมิเผาไหม้ได้สูงถึง 1700 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบที่สูงขึ้น เป็นต้น

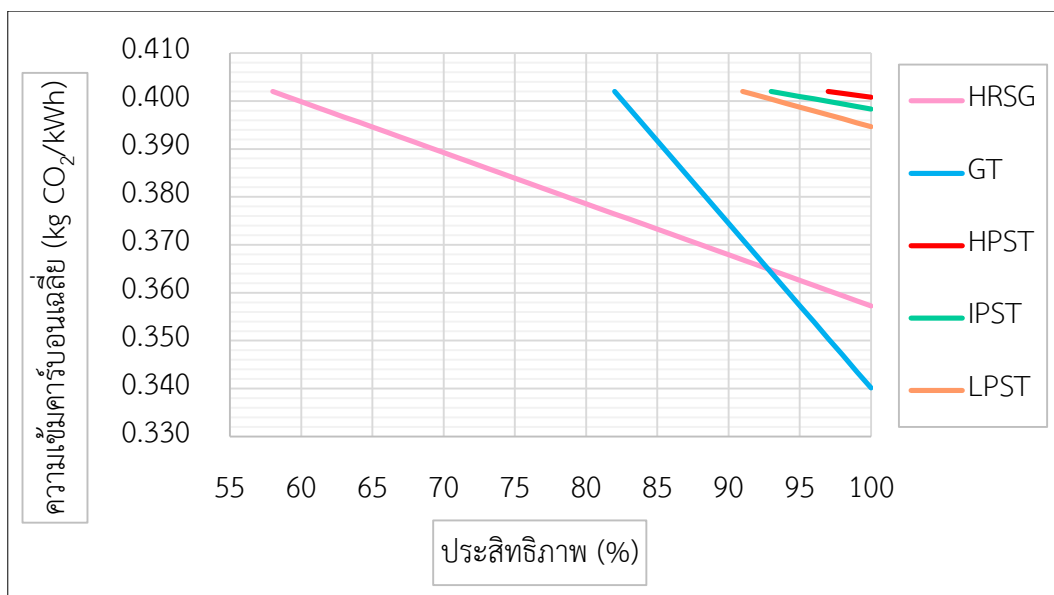
4.5.2 การประมาณศักยภาพการลดลงของค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานทางทฤษฎี

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่าการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบนั้นจะนำไปสู่ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงและยังสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ประมาณศักยภาพการลดลงของความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานทางทฤษฎีของโรงไฟฟ้า ตัวอย่างที่นำข้อมูลมาวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียและจะใช้ข้อมูลค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานในปีล่าสุดมาใช้ในการประมาณการลดลงของความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานหากมีการดำเนินการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ในระบบจนสามารถดึงพลังงานที่มี ประโยชน์ที่สูญเสียออกไปกลับมาใช้ได้ โดยสมมติฐานในการประมาณ คือ ถ้าสามารถดึงพลังงานที่มีประโยชน์ที่สูญเสียไปจากอุปกรณ์แต่ละตัวกลับมาได้ จะทำให้ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียเพิ่มขึ้นและส่งผลกระทบต่อค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานที่ลดลง

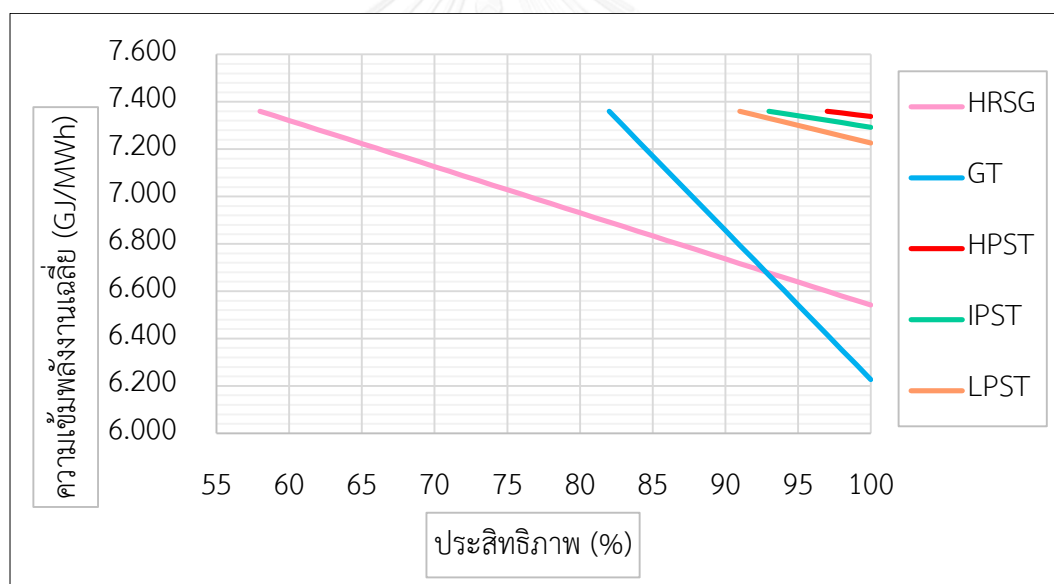
ยกตัวอย่างแนวทางการประมาณศักยภาพการลดลงของค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานทางทฤษฎีจากการปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องกังหันก๊าซ

1. ใช้ข้อมูลการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของกังหันก๊าซจากตาราง 4.21 โดยที่อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียมีค่าเท่ากับ 101.14 เมกะวัตต์ และประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียมีค่าเท่ากับร้อยละ 81.76
2. คำนวณอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียที่สามารถนำกลับมาได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าปรับปรุงประสิทธิภาพกังหันก๊าซได้เพิ่มร้อยละ 9 จะส่งผลต่ออัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียที่สามารถนำกลับมาได้ 50.50 เมกะวัตต์
3. คำนวณปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในกรณีที่สามารถนำกลับอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียของกังหันก๊าซ โดยนำปริมาณงานพลังงานที่ใส่เข้าไปเดิมซึ่งมีค่าเท่ากับ 656 เมกะวัตต์ ลบด้วยปริมาณพลังงานที่นำกลับมาได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 50.50 เมกะวัตต์
4. คำนวณความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานที่ลดลง จาก 0.402 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมงและ 7.360 จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น
 - ค่าความเข้มข้นคาร์บอนที่ลดลง = $\frac{0.402}{656} \times 605.5 = 0.371$ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง
 - ค่าความเข้มพลังงานที่ลดลง = $\frac{7.360}{656} \times 605.5 = 6.793$ จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง

ซึ่งผลการประมาณศักยภาพการลดลงของค่าความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 การประมาณศักยภาพการลดลงของค่าความเข้มข้นคาร์บอนทางทฤษฎี



รูปที่ 4.13 การประมาณศักยภาพการลดลงของค่าความเข้มพลังงานทางทฤษฎี

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานที่ลดลงในทางทฤษฎี หากสามารถดึงพลังงานที่มีประโยชน์ที่สูญเสียไปจากอุปกรณ์แต่ละตัวกลับมาได้ กล่าวคือถ้าสามารถดึงพลังงานที่สูญเสียไปไม่ว่าจะเป็นจากกังหันก๊าซ เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งหรือกังหันไอน้ำกลับมาได้ ประสิทธิภาพขององค์ประกอบก็จะได้รับการปรับปรุงและส่งผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณการใช้พลังงานได้ที่ลดลงได้ และจากรูปดังกล่าวยังแสดงให้เห็นว่าเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งมีโอกาสนในการปรับปรุงประสิทธิภาพ

เพื่อนำไปสู่การลดลงของความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานสูงกว่ากังหันก๊าซ เนื่องจากเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งมีประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกังหันก๊าซที่มีประสิทธิภาพสูงอยู่แล้ว ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งและกังหันก๊าซ จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบเพื่อลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และลดปริมาณการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมกรณีศึกษา



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นคาร์บอนเฉลี่ยและความเข้มพลังงานเฉลี่ยของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ 3 โรงงาน ในประเทศไทย และเพื่อวิเคราะห์ศักยภาพการปรับปรุงประสิทธิภาพอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียกับโรงไฟฟ้าการผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีอื่น ๆ เพื่อนำไปสู่การเสนอแนะแนวทาง/มาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพ โดยในการประเมินความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานจะใช้ข้อมูลจากโรงไฟฟ้าการผลิตไฟฟ้าจำนวน 3 โรงงาน ใช้ข้อมูลการวิเคราะห์เป็นระยะเวลา 2 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 – 2557 ขณะที่การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียจะใช้ข้อมูลจากแผนภาพสมดุลความร้อนและมวลของโรงไฟฟ้าการผลิตไฟฟ้าจำนวน 1 โรงงาน ซึ่งจะนำไปสู่การเสนอแนะแนวทาง/มาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าการผลิตไฟฟ้า โดยผลการศึกษารูปได้ดังนี้

5.1 การประเมินความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงาน

ผลการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ 3 โรงงาน พบว่าสัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยจากขอบเขตที่ 1 และขอบเขตที่ 2 ในปี พ.ศ. 2556 คิดเป็นร้อยละ 99.87 และ 0.13 ตามลำดับ และปี พ.ศ. 2557 คิดเป็นร้อยละ 99.66 และ 0.34 ตามลำดับ ซึ่งแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลักเกิดจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าและเป็นกิจกรรมที่อยู่ภายใต้ขอบเขตที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากทุกกิจกรรมในขอบเขตที่ 1 และขอบเขตที่ 2 พบว่ามีสัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยในปี พ.ศ. 2556 และ พ.ศ. 2557 สูงถึงร้อยละ 99.67 และ 99.55 ตามลำดับ ข้อมูลจากการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นำมาใช้ในการประเมินความเข้มข้นคาร์บอน ซึ่งผลการประเมินพบว่าค่าความเข้มข้นคาร์บอนเฉลี่ยในปี พ.ศ. 2556 และ 2557 มีค่าเท่ากับ 0.438 และ 0.434 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ (กรณีประเมินแบบถ่วงน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 0.404 และ 0.407 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ) ส่งผลต่อค่าความเข้มข้นคาร์บอนเฉลี่ยของโรงไฟฟ้าการผลิตไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.436 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (กรณีประเมินแบบถ่วงน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 0.406 กิโลกรัม

คาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง) ซึ่งแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลักเกิดจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ มีสัดส่วนเฉลี่ยในปี พ.ศ. 2556 และ พ.ศ. 2557 สูงถึงร้อยละ 99.67 และ 99.55 ตามลำดับ และผลการประเมินค่าความเข้มพลังงานเฉลี่ยพบว่าในปี พ.ศ. 2556 และ 2557 มีค่าเท่ากับ 8.030 และ 7.960 จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ (กรณีประเมินแบบถ่วงน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 7.386 และ 7.458 จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ) ส่งผลให้ค่าความเข้มพลังงานเฉลี่ยของโรงไฟฟ้าการศึกษาในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 7.995 จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง (กรณีประเมินแบบถ่วงน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 7.422 จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง) และจากการเปรียบเทียบค่าความเข้มคาร์บอนและความเข้มพลังงานของโรงไฟฟ้าศึกษากับงานวิจัยอื่นๆ โดยจำแนกตามเทคโนโลยีและชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า พบว่าโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติการศึกษาในงานวิจัยนี้มีค่าความเข้มคาร์บอนและความเข้มพลังงานต่ำที่สุด และมีค่าอยู่ในช่วงที่ต่ำแล้วเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆที่ใช้เทคโนโลยีการผลิตและเชื้อเพลิงชนิดเดียวกัน

5.2 การประเมินศักยภาพการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอีย

ผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของโรงไฟฟ้าตัวอย่างนั้นทำให้ทราบว่าองค์ประกอบที่มีนัยสำคัญที่สุดในการปรับปรุงศักยภาพ ได้แก่ เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง เนื่องจากมีอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียที่ค่อนข้างสูง มีค่าเท่ากับ 73.27 เมกะวัตต์ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียที่ต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 57.84 จึงทำให้เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งมีโอกาสนในการปรับปรุงประสิทธิภาพสูงกว่าอุปกรณ์ตัวอื่น รองลงมาคือกังหันก๊าซซึ่งมีอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียสูงที่สุดในระบบ มีค่าเท่ากับ 101.14 เมกะวัตต์ แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียที่มาจากค่าเท่ากับร้อยละ 81.76 ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงอยู่แล้ว ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของกังหันก๊าซจึงเป็นทางเลือกที่สองรองลงมาจากปรับปรุงเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง และในงานวิจัยนี้พบว่าองค์ประกอบที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในระบบ คือ กังหันไอน้ำความดันสูง มีประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียคิดเป็นร้อยละ 97.36 อีกทั้งยังมีอัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียที่ต่ำมาก คิดเป็น 1.88 เมกะวัตต์เท่านั้น

ในส่วนของการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียร่วมกับประสิทธิภาพพลังงานขององค์ประกอบในระบบนั้น ผลการวิเคราะห์พบว่าเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งมีประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพพลังงานต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 57.84 และ 38.29

ตามลำดับ และกังหันไอน้ำความดันสูงมีประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพพลังงานสูงที่สุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 97.36 และ 98.60 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอีย การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอีย และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงาน จึงสรุปได้ว่าเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งมีนัยสำคัญมากที่สุดของระบบในแง่ของโอกาสในการปรับปรุงสูงที่สุด รองลงมาคือกังหันก๊าซ

5.3 แนวทาง/มาตรการการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

จากการศึกษาข้างต้นทำให้ทราบว่าโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้มีความเข้มข้นคาร์บอนเฉลี่ยและความเข้มพลังงานเฉลี่ยอยู่ในระดับที่ต่ำแล้วเมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆที่มีการใช้เทคโนโลยีการผลิตและชนิดเชื้อเพลิงทั้งที่เหมือนและแตกต่างกันต่างๆ แต่ผู้วิจัยต้องการทราบถึงศักยภาพในการปรับปรุงว่าโรงไฟฟ้าดังกล่าวยังมีศักยภาพในการปรับปรุงเพื่อนำไปสู่การลดลงของความเข้มข้นคาร์บอนและความเข้มพลังงานอีกหรือไม่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำแนวทางการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียซึ่งเป็นแนวทางใหม่มาใช้ในการวิเคราะห์อุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาตัวอย่าง 1 โรงงาน เพื่อให้ทราบถึงอุปกรณ์ที่มีศักยภาพในการปรับปรุง โดยผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียพบว่า อุปกรณ์ที่มีศักยภาพในการปรับปรุงสูงที่สุดคือเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง รองลงมาคือ กังหันก๊าซ โดยจากการค้นคว้าในงานวิจัยอื่นๆ ผู้วิจัยได้เสนอแนะแนวทาง/มาตรการที่สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง ได้แก่ การเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซที่ทางเข้าของเครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้ง การนำกลับความร้อนจากก๊าซเหลือทิ้งมาใช้ใหม่ และการใช้ระบบ Once-through (Benson) HRSG และสำหรับแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของกังหันก๊าซนั้น ได้แก่ การเปลี่ยนวัสดุเซรามิคที่ใช้ในกังหันก๊าซใหม่และการอัพเกรดไปใช้ Super high-temperature gas turbine ซึ่งแนวทางที่ผู้วิจัยเสนอแนะข้างต้นสามารถนำมาปรับใช้กับโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาตัวอย่างนี้ได้ อาทิเช่น การใช้ระบบ Once-through (Benson) HRSG ซึ่งโรงไฟฟ้าตัวอย่างนี้ใช้เครื่องผลิตไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งที่เป็นระบบ drum type (ดังรายละเอียดในบทที่ 2 หัวข้อ 2.4.2) หากมีการดำเนินการเปลี่ยนมาใช้แนวทาง/มาตรการที่เสนอแนะนี้ก็จะมีผลกระทบต่อปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงได้ นอกจากนั้นในส่วนของกังหันก๊าซยังพบว่าโรงไฟฟ้าตัวอย่างนี้ใช้กังหันก๊าซรุ่น G-type ซึ่งผู้วิจัยพิจารณาได้จากช่วงอุณหภูมิของก๊าซที่ทางเข้าของกังหันก๊าซ (ดังแสดงในบทที่ 2 หัวข้อ 2.4.1) หากมีการดำเนินการเปลี่ยนมาใช้แนวทาง/มาตรการที่เสนอแนะนี้ก็จะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ

ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าประมาณร้อยละ 3-6 และการปรับปรุงประสิทธิภาพขององค์ประกอบของระบบเหล่านี้จะนำไปสู่การปรับปรุงประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าและยังส่งผลต่อการลดปริมาณการใช้พลังงานและลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าได้อีกด้วย แต่ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยไม่ได้วิเคราะห์ในส่วนของคุณค่าใช้จ่ายในการลงทุนและข้อจำกัดของโรงงานในการปรับเปลี่ยนไปใช้แนวทาง/มาตรการที่ผู้วิจัยแนะนำ โดยผู้วิจัยเพียงแค่เสนอแนะแนวทาง/มาตรการเท่านั้น ดังนั้นหากผู้ประกอบการจะนำแนวทาง/มาตรการใดไปปรับใช้จึงควรวิเคราะห์ในส่วนของต้นทุนและและข้อจำกัดของโรงงานอีกครั้ง

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียขององค์ประกอบในระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีพลังงานความร้อนร่วมให้ครอบคลุมทุกองค์ประกอบ ได้แก่ ห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber) เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) อุปกรณ์ขจัดอากาศ (Deaerator) และหอหล่อเย็น (Cooling Tower) เป็นต้น เพื่อจะได้มีข้อมูลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานที่ครบถ้วนที่สุด
2. นำหลักการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียมาใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีอื่นๆในประเทศไทย ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ โรงไฟฟ้าพลังงานร่วม โรงไฟฟ้าเครื่องยนต์ก๊าซ และโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ

รายการอ้างอิง

- Açikkalp, E. and Aras, H. and A., Hepbasli. 2014. Advanced exergy analysis of an electricity-generating facility using natural gas. Energy Conversion and Management **82**: 146–153.
- Al-Sulaiman, F.A. and Hamdullahpur, F. and Dincer, I. . 2011. Greenhouse gas emission and exergy assessments of an integrated organic Rankine cycle with a biomass combustor for combined cooling, heating and power production. Applied Thermal Engineering **31**: 439-446.
- Aljundi, I.H. 2009. Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan. Applied Thermal Engineering **29**: 324–328.
- Beer, J.M. . 2007. High efficiency electric power generation: The environmental role. Energy and Combustion Science **33**: 107–134.
- Botkwamdee. 2555. โรงไฟฟ้าชีวมวล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://botkwamdee.blogspot.com/2012/2001/2012-tsbiomas.html>. [2558, มิถุนายน 7]
- Cengel, Y.A. and Boles, M.A. 2542. Thermodynamics. ส. รัตนาพันธุ์. กรุงเทพมหานคร, แมคกรอ-ฮิล อินเทอร์เน็ต เนชั่นแนล เอ็นเตอร์ไพรส์, อิงค์
- Cengel, Y.A. and Boles, M.A. 2549. Thermodynamics an Engineering Approach. ว. พันธุ์สว่าง. กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล
- Dincer, I. and Rosen, M.A. . 2013. Exergy, Energy, Environment and Sustainable Development. United Kingdom, Elsevier Ltd. Second edition.
- Electricity Generating Authority of Thailand. 2014. SEPA Conference 2014 : Driving for Excellence [Online]. Available from: http://www.irdp.org/2015/news_files/2249/attachment2012.pdf. [2015, February 24]

- Ghazikhani, M. and Khazaee, I. and Abdekhodaie, E. 2014. Exergy analysis of gas turbine with air bottoming cycle. *Energy* **72**: 599-607.
- Gouw, J.A. de. and Parrish, D.D. and Frost, G.J. and Trainer, M. . 2014. Reduced Emissions of CO₂, NO_x and SO₂ from U.S. Power Plants Due to the Switch from Coal to Natural Gas with Combined Cycle Technology. [Online]. Available from: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013EF000196/pdf>. [2015, September 10]
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change. [Online]. Available from: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-12.html [2015, January 2]
- ISHIKAWA, M. and TERAUCHI, M. and KOMORI, T. and YASURAOKA, J. 2008. Development of High Efficiency Gas Turbine Combined Cycle Power Plant. [Online]. Available from: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e451/e451015.pdf>. [2015, June 22]
- Kamate, S.C. and Gangavati, P.B. . 2009. Exergy analysis of cogeneration power plants in sugar industries. *Applied Thermal Engineering* **29**: 1187–1194.
- Kaviri, A.G. and Jaafar, M.N.M. and Lazim, T.M. and Barzegaravval, H. 2013. Exergoenvironmental optimization of Heat Recovery Steam Generators in combined cycle power plant through energy and exergy analysis. *Energy Conversion and Management* **67**: 27–33.
- Nyberg, M. 2011. THERMAL EFFICIENCY OF GAS-FIRED GENERATION IN CALIFORNIA. [Online]. Available from: <http://www.energy.ca.gov/2014publications/CEC-2200-2014-2005/CEC-2200-2014-2005.pdf>. [2015, September 17]
- Pom Relay. 2553. โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://protectionrelay.blogspot.com/2010/2510/blog-post_2525.html. [2558, มิถุนายน 14]

- Pom Relay. 2553. โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://protectionrelay.blogspot.com/2010/2510/blog-post_2510.html. [2558, กรกฎาคม 8]
- Powerplant. 2558. โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://powerplant2.wordpress.com/>. [2558, มีนาคม 18]
- Saidur, R.andAhamed, J.U. and Masjuki, H.H. . 2010. Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers. Energy Policy **38**: 2188–2197.
- SIEMENS. 2006. BENSON Once-Through Heat Recovery Steam Generator. [Online]. Available from: <http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-generation/power-plants/gas-fired-power-plants/combined-cycle-powerplants/scc5-4000f-4001s/A96001-S96090-A96496-X-96004A96000.pdf>. [2015, May 15]
- Sirintip Juntuenga, Sirintornthep Towprayoona, and Siriluk Chiarakornc. 2014. Energy and carbon dioxide intensity of Thailand’s steel industry and greenhouse gas emission projection toward the year 2050. Resources, Conservation and Recycling **87**: 46–56.
- Smiarowski, M.W.andLeo, R. and Scholten, C. 2005. STEAM TURBINE MODERNIZATION SOLUTIONS PROVIDE A WID SPECTRUM OF OPTIONS TO IMPROVE PERFORMANCE [Online]. Available from: <http://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-generation/power-plants/steam-power-plant-solutions/coal-fired-power-plants/Steam-Turbine-Modernization-Solutions.pdf>. [2015 August 10]
- Solar Smile Knowledge. 2558. ไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://solarsmileknowledge.wordpress.com/tag/>. [2558, มีนาคม 20]
- Thailandindustry. 2558. โรงไฟฟ้าพลังงานขยะ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.thailandindustry.com/news/view.php?id=13017§ion=13013>. [2558, มิถุนายน 28]

World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development.

2006. Allocation of GHG Emissions from a Combined Heat and Power (CHP) Plant. [Online]. Available from:

http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/tools/CHP_guidance_v1.0.pdf. [2015, September 30]

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2558. การวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็ก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<http://www2552.dede.go.th/kmberc/datacenter/factory/iron/chapter2553.doc>. [2558, กุมภาพันธ์ 17]

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2558. การพัฒนาที่ยั่งยืน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.aseangreenhub.in.th/envinat-ac/en/developmentsection/103-development-102>. [2558, พฤษภาคม 27]

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2558. Gas Turbine Power Plant. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.egat.co.th/index.php?option=com_glossary&letter=G&id=2177. [2558, มีนาคม 12]

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2558. กระบวนการผลิตไฟฟ้า. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://chana.egat.co.th/home/technical-process.php>. [2558, มีนาคม 25]

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2558. กำลังผลิตในระบบไฟฟ้า. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=116. [2558, กรกฎาคม 15]

บริษัทผลิตไฟฟ้าจำกัด (มหาชน). 2558. รู้จักโรงไฟฟ้า. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.egco.com/th/energy_knowledge_about_powerplant.asp. [2558, เมษายน 12]

บริษัทผลิตไฟฟ้าจำกัด (มหาชน). 2558. หลากหลายเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.egco.com/th/energy_knowledge_electricity_gen.asp. [2558, พฤษภาคม 6]

บริษัทสแกนอินเตอร์จำกัด (มหาชน). 2558. องค์ประกอบถ่านหิน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.scan-inter.com/en/node/2542>. [2558, เมษายน 26]

- ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2558. ข้อดีและข้อเสียของ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Combution_and_Cogeneration/content/content_2553_2552/body2553_2552.htm. [2558, เมษายน 5]
- ยุทธศักดิ์ ศิริสินธร. 2553. การประเมินรอยเท้าคาร์บอนของโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงฟอสซิลในประเทศไทย กรณีศึกษา: โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมบางปะกง โรงไฟฟ้าพลังความร้อนกระบี่และ โรงไฟฟ้าดีเซลแม่ฮ่องสอน. ปรินฤณมหาบัณฑิต. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิชาการดอทคอม. 2558. ก๊าซธรรมชาติ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.vcharkarn.com/varticle/43984>. [2558, เมษายน 19]
- สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2554. โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.erd.cmu.ac.th/index.php/news/621?category=611>. [2558, มิถุนายน 21]
- สภาวิศวกร. 2558. โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.coe.or.th/e_engineers/news_detail.php?id=311. [2558, พฤษภาคม 20]
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2556. Energy Statistic [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/info/emission/index.html>. [2558, สิงหาคม 16]
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2558. ชนิด ประเภท และเทคโนโลยีของ โรงไฟฟ้าต่างๆ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.touchtechdesign.com/eppo/>. [2558, มีนาคม 4]
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2558. แหล่งเชื้อเพลิงและแหล่งพลังงานที่ใช้ ในการผลิตไฟฟ้า. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.touchtechdesign.com/eppo/>. [2558, พฤษภาคม 13]
- สุธรรม ปทุมสวัสดิ์. 2553. การศึกษาและการกำหนดค่าความเข้มข้นคาร์บอนของอุตสาหกรรมพลังงาน (โรงไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://conference.tgo.or.th/download/tgo_or_th/seminar/presentation/2010/221110/CarbonIntensity_KMUTNB.pdf. [2558, กุมภาพันธ์ 10]

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2556. แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร: 16. พิมพ์ครั้งที่ 2. ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2558. ก๊าซเรือนกระจกคืออะไร.

[ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://www.tgo.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=46:what-is-ghg&catid=35:greenhouse-effect&Itemid=55. [2558, มกราคม 22]

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2558. การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

[ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://www.tgo.or.th/index.php?option=com_content&view=section&id=5&Itemid=54. [2558, มกราคม 9]

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2558. ปรากฏการณ์ก๊าซเรือนกระจก.

[ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://www.tgo.or.th/index.php?option=com_content&view=category&id=35:greenhouse-effect&Itemid=55&layout=default. [2558, มกราคม 16]

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2558. ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับโลก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://www.tgo.or.th/index.php?option=com_content&view=category&id=36&Itemid=57. [2558, มกราคม 23]

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2558. ผลกระทบในประเทศไทย.

[ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://www.tgo.or.th/index.php?option=com_content&view=category&id=37&Itemid=59. [2558, กุมภาพันธ์ 3]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor; EF)

ชื่อ	หน่วย	ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วย)	แหล่งอ้างอิง
ขอบเขต 1 : แหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางตรง			
ก๊าซธรรมชาติ (A/1)	ล้านบีทียู	58.0120	โรงงาน A ปี 2556
ก๊าซธรรมชาติ (B/1)	ล้านบีทียู	57.9581	โรงงาน B ปี 2556
ก๊าซธรรมชาติ (C/1)	ล้านบีทียู	58.0363	โรงงาน C ปี 2556
ก๊าซธรรมชาติ (A/2)	ล้านบีทียู	57.8277	โรงงาน A ปี 2557
ก๊าซธรรมชาติ (B/2)	ล้านบีทียู	57.8320	โรงงาน B ปี 2557
ก๊าซธรรมชาติ (C/2)	ล้านบีทียู	57.8620	โรงงาน C ปี 2557
น้ำมันดีเซล	ลิตร	2.698722	แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร โดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1, ตุลาคม 2556)
น้ำมันเบนซิน	ลิตร	2.181564	แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร โดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1, ตุลาคม 2556)
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	กิโลกรัม	3.110596	แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร โดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1, ตุลาคม 2556)

ตาราง ก-1 ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor; EF) (ต่อ)

ชื่อ	หน่วย	ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วย)	แหล่งอ้างอิง
ขอบเขต 1 : แหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางตรง			
การผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ (A/1)	ลูกบาศก์เมตร	0.00044	Stoichiometry
การผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ (A/2)	ลูกบาศก์เมตร	0.00044	Stoichiometry
การใช้สารดับเพลิง	กิโลกรัม	1.0000	Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015
การสอบเทียบอุปกรณ์โดยใช้ CO ₂	กิโลกรัม	1.0000	Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015
การรั่วไหลของ CO ₂ จากท่อส่ง	กิโลกรัม	1.0000	Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015
ขอบเขต 2 : แหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางอ้อม			
ไฟฟ้า	กิโลวัตต์ ชั่วโมง	0.5813	Thailand Grid Mix Electricity LCI Database, 2552
ไอน้ำ (A/2)	ตัน	214.16	โรงงาน A ปี 2557
ไอน้ำ (B/2)	ตัน	215.55	โรงงาน B ปี 2557

ตัวอย่าง ก-1 การคำนวณปริมาณการปล่อยจากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากองค์ประกอบของเชื้อเพลิง

1) คำนวณร้อยละโดยโมลขององค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิดและค่าความร้อน (Gross Heating Value : GHV) เฉลี่ยรายเดือน ดังแสดงในตาราง ก-2

ตาราง ก-2 ตัวอย่างการคำนวณองค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิดเฉลี่ยรายเดือน

เดือนที่ 1								
วันที่	ร้อยละโดยโมลขององค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิด (%Ci by mole)							ค่าความร้อน (ปีที่อยู่ต่อลูกบาศก์ฟุต)
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	CO ₂	
1	84.958	3.457	1.050	0.438	0.153	0.035	8.003	955.385
30	84.072	3.916	1.489	0.652	0.196	0.043	7.754	974.534
เฉลี่ย	84.515	3.6865	1.2695	0.545	0.1745	0.039	7.8785	964.9595

หมายเหตุ : ในการคำนวณองค์ประกอบก๊าซเฉลี่ยจะเฉลี่ยแบบรายเดือนและนำข้อมูลในแต่ละเดือนมาเฉลี่ยรายปี แต่ตัวอย่างการคำนวณในตาราง ก-2 ยกตัวอย่างเฉลี่ยเพียงแค่ 2 วันในเดือนที่ 1

2) คำนวณร้อยละโดยมวลของคาร์บอนในองค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิด (% Carbon content by mass; %C_{Cl}) ในแต่ละเดือน จากสมการ (ก-1) และคำนวณร้อยละโดยมวลของเชื้อเพลิง (%C_{Fuel}) จากสมการ (ก-2) ดังแสดงในตาราง ก-3

ตาราง ก-3 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละโดยมวลของคาร์บอนในองค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิดและร้อยละโดยมวลของเชื้อเพลิงของเดือนที่ 1

องค์ประกอบ ก๊าซ	ร้อยละโดยโมลของ องค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิด (%Ci by mole)	จำนวน คาร์บอน อะตอม	ร้อยละโดยมวลของ คาร์บอนในองค์ประกอบ ก๊าซแต่ละชนิด (%C _{Cl})	ร้อยละโดยมวล ของเชื้อเพลิง (%C _{Fuel})
CH ₄	84.515	1	84.515	1.068615
C ₂ H ₆	3.6865	2	7.3730	
C ₃ H ₈	1.2695	3	3.8085	
C ₄ H ₁₀	0.5450	4	2.1800	
C ₅ H ₁₂	0.1745	5	0.8725	
C ₆ H ₁₄	0.0390	6	0.2340	
CO ₂	7.8785	1	7.8785	

หมายเหตุ : ในการคำนวณร้อยละโดยมวลของคาร์บอนในองค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิดจะใช้ข้อมูลร้อยละโดยโมลขององค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิดที่เฉลี่ยรายปีมาคำนวณ แต่ตัวอย่างการคำนวณในตาราง ก-3 ยกตัวอย่างค่าจากตาราง ก-2 มาใช้

$$\%C_{ci} = X_{C_{ci}} \times \%C_i \text{ by mass} \quad (\text{ก-1})$$

โดยที่ $\%C_{ci}$ = ร้อยละโดยมวลของคาร์บอนในองค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิด
 $X_{C_{ci}}$ = จำนวนคาร์บอนอะตอมขององค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิด
 (เช่น C_3H_8 มี $X_{C_{C_3H_8}} = 3$)
 $\%C_i \text{ by mole}$ = ร้อยละโดยโมลขององค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิด

$$\%C_{Fuel} = \frac{(\%C_{ci} + \dots + \%C_{ci})}{100} \quad (\text{ก-2})$$

โดยที่ $\%C_{Fuel}$ = ร้อยละโดยมวลของเชื้อเพลิง
 $\%C_{ci}$ = ร้อยละโดยมวลของคาร์บอนในองค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิด

วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned} \%C_{C_2H_6} &= 2 \times 3.6865 \\ &= 7.3730 \\ \%C_{Fuel} &= \frac{84.515 + 7.3730 + 3.8085 + 2.1800 + 0.8725 + 0.2340 + 7.8785}{100} \\ &= 1.068615 \text{ (ดังตาราง ก-3)} \end{aligned}$$

3) เปลี่ยนหน่วยปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติโดยใช้ค่าความร้อนเฉลี่ยของแต่ละเดือน โดยใช้ค่าจากตาราง ก-4 แทนลงในสมการ (ก-3)

ตาราง ก-4 ตัวอย่างปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ

เดือนที่ 1	
ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านบีทียู)	ค่าความร้อนเฉลี่ย (บีทียูต่อลูกบาศก์ฟุต)
344,699.00	964.9595

$$NG \text{ (scf)} = \frac{NG1 \text{ (mmbtu)} \times 10^6}{\text{Average GHV (Btu/scf)}} \quad (\text{ก-3})$$

โดยที่ NG (ลูกบาศก์ฟุต) = ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ
 NG1 (ล้านบีทียู) = ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ

Average GHV (ปีที่ยู่ต่อลูกบาศก์ฟุต) = ค่าความร้อนเฉลี่ยในแต่ละเดือน

วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{NG} &= \frac{344,699.00 \times 10^6}{964.9595} \\ &= 357,216,028.24 \text{ ลูกบาศก์ฟุต} \end{aligned}$$

4) คำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ โดยใช้ค่าจากตาราง ก-5 แทนลงในสมการ (ก-4)

ตาราง ก-5 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ

ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านปีทิว)	344,699.00
ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ลูกบาศก์ฟุต)	357,216,028.24
ร้อยละโดยมวลของเชื้อเพลิง (%C _{Fuel})	1.068615
มวลโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (lb/lbmole)	44
Molar volume conversion factor (scf/lbmole)	379.3
Mass conversion factor (กิโลกรัม)	0.4536

$$E_{\text{CO}_2, \text{NG}} (\text{kgCO}_2) = \text{NG} (\text{scf}) \times \%C_{\text{Fuel}} \times \text{MW CO}_2 \times \frac{1}{\text{Molar volume conversion}} \times \text{Mass conversion factor} \quad (\text{ก-4})$$

โดยที่ $E_{\text{CO}_2, \text{NG}}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) = การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ

NG (ลูกบาศก์ฟุต) = ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ

%C_{Fuel} = ร้อยละโดยมวลของเชื้อเพลิง

MW CO₂ = มวลโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
(44 lb/lbmole)

Molar volume conversion factor = ค่าแฟกเตอร์การแปลงหน่วย
(379.3 scf/lbmole)

Mass conversion factor = ค่าแฟกเตอร์การแปลงหน่วย
(1 ปอนด์ = 0.4536 กิโลกรัม)

วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 E_{\text{CO}_2, \text{NG}} &= \frac{357,216,028.24 \times 1.068615 \times 44 \times 0.4536}{379.3} \\
 &= 20,086,075.14 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์} \\
 \text{EF} &= \frac{20,086,075.14}{344,699.00} \\
 &= 58.27 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อล้านบีทียู}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ เท่ากับ 20,086,075.14 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ เท่ากับ 58.27 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อล้านบีทียู

ตัวอย่าง ก-2 การคำนวณปริมาณการปล่อยจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซิน ดีเซลและก๊าซปิโตรเลียมเหลวในอุปกรณ์หรือเครื่องจักรและยานพาหนะ โดยใช้ค่าจากตาราง ก-6 แทนลงในสมการ (ก-5)

ตารางที่ ก-6 ตัวอย่างปริมาณการใช้เชื้อเพลิง

ชนิดเชื้อเพลิง	ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	หน่วย
ดีเซล (diesel)	1,200.00	ลิตร (L)
เบนซิน (benzene)	2,119.18	ลิตร (L)
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG)	15.00	กิโลกรัม (kg)

$$E_{\text{CO}_2, \text{fuel}} (\text{kg CO}_2) = \text{Fuel Consumption}_{\text{fuel}} (\text{unit}) \times \text{EF}_{\text{CO}_2, \text{fuel}} (\text{kg CO}_2/\text{unit})$$

(ก-5)

โดยที่ $E_{\text{CO}_2, \text{fuel}}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) = การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

$\text{Fuel Consumption}_{\text{fuel}}$ (หน่วย) = ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้

$\text{EF}_{\text{CO}_2, \text{fuel}}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วย) = ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้

วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 E_{\text{CO}_2, \text{diesel}} (\text{kg CO}_2) &= 1,200.00 \times 2.698722 \\
 &= 3,238.46 \text{ kg CO}_2 \\
 E_{\text{CO}_2, \text{benzene}} (\text{kg CO}_2) &= 2,119.18 \times 2.181564
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 4,623.13 \text{ kg CO}_2 \\
 E_{\text{CO}_2, \text{LPG}} \text{ (kg CO}_2) &= 15.00 \times 3.110596 \\
 &= 46.66 \text{ kg CO}_2
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล เบนซิน และ ก๊าซปิโตรเลียมเหลว เท่ากับ 3,238.46 4,623.13 และ 46.66 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ ตามลำดับ

ตัวอย่าง ก-3 การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ โดยใช้ค่าจากตาราง ก-7 แทนลงในสมการ (ก-6)

ตาราง ก-7 ตัวอย่างปริมาณการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

กิจกรรม	ปริมาณการผลิต	หน่วย
การผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ	232,123.00	ลูกบาศก์เมตร (m ³)

$$E_{\text{CO}_2, \text{DW}} \text{ (kg CO}_2) = \text{DW (m}^3) \times \text{EF}_{[\text{CO}_2(\text{aq})]} \quad (\text{ก-6})$$

โดยที่ $E_{\text{CO}_2, \text{DW}}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) = การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

DW (ลูกบาศก์เมตร) = ปริมาณน้ำปราศจากแร่ธาตุ

$\text{EF}_{[\text{CO}_2(\text{aq})]}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อลูกบาศก์เมตร) = ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

วิธีการคำนวณ

1) ความสามารถในการละลายในน้ำได้สูงสุดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.00001 โมลต่อลิตร

2) สมมติให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกำจัดออกจากอุปกรณ์แยกก๊าซ (degasifier) คิดเป็นร้อยละ 100

$$\begin{aligned}
 3) \text{EF}_{[\text{CO}_2(\text{aq})]} &= \frac{0.00001 \text{ mole}}{\text{L}} \times \frac{44 \text{ gCO}_2}{\text{mole}} \times \frac{1 \text{ kgCO}_2}{1000 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \\
 &= 0.00044 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วย}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 4) E_{\text{CO}_2, \text{DW}} &= 232,123.00 \times 0.00044 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วย} \\
 &= 102.13 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ เท่ากับ 102.13 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ เท่ากับ 0.00044 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อลูกบาศก์เมตร

ตัวอย่าง ก-4 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้อุปกรณ์ โดยใช้ค่าจากตาราง ก-8

ตาราง ก-8 ตัวอย่างข้อมูลกิจกรรมการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุปกรณ์

กิจกรรม	ปริมาณการใช้	หน่วย
การใช้สารดับเพลิง	15.00	กิโลกรัม (kg)

วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์} &= \text{ปริมาณการใช้สารดับเพลิง} \times \text{ค่าศักยภาพที่ทำให้เกิด} \\ &\quad \text{ภาวะโลกร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์} \\ &= 15.00 \times 1 \\ &= 15.00 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์} \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้สารดับเพลิง เท่ากับ 15.00 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวอย่าง ก-5 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการรั่วไหลจากท่อส่งคำนวณจากสมการ (ก-7) โดยใช้ค่าจากตาราง ก-9

$$E_{\text{CO}_2, \text{fugitive}} (\text{kgCO}_2) = \frac{\frac{\% \text{Mole}_{\text{CO}_2}}{100}}{\text{Gas Content Basis of Factor}} \times L_p (\text{km}) \times EF_{\text{Converted units}} \quad (\text{ก-7})$$

โดยที่ $E_{\text{CO}_2, \text{fugitive}}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) = การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการรั่วไหลจากท่อส่ง

$\% \text{Mole}_{\text{CO}_2}$ = ร้อยละโดยโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซธรรมชาติ

Gas Content Basis of Factor = 2

L_p (เมตร) = ความยาวท่อส่ง

$EF_{\text{Converted units}}$ = ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
(0.1313 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลเมตร)

ตาราง ก-9 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการรั่วไหลจากท่อส่ง

เดือน	%mole CO ₂	L _p (กิโลเมตร)	E _{CO₂,fugitive}
1	5.404	0.739	2.622
2	8.527		4.137
3	6.908		3.351
4	7.593		3.684
5	7.363		3.572
6	6.765		3.282
รวม			20.65

หมายเหตุ : การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะใช้ร้อยละโดยโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซธรรมชาติเฉลี่ยรายปี แต่ตัวอย่างการคำนวณในตาราง ก-9 ยกตัวอย่างเฉลี่ยเพียงแค่ 6 เดือน

วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 E_{\text{CO}_2,\text{fugitive}} &= \left[\frac{(5.404/100)}{2} \right] \times 0.739 \text{ กิโลเมตร} \times 0.1313 \text{ ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลเมตร} \times 1000 \\
 &= 2.622 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์} \times 1 \\
 &= 2.622 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการรั่วไหลจากท่อส่ง เท่ากับ 2.622 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวอย่าง ก-6 การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้าที่นำเข้ามาจากภายนอกองค์กร คำนวณจากสมการ (ก-8)

$$E_{\text{CO}_2,\text{P}} \text{ (kgCO}_2\text{)} = EC \text{ (kWh)} \times EF_{\text{CO}_2} \text{ (kgCO}_2\text{/kWh)} \quad (\text{ก-8})$$

โดยที่ $E_{\text{CO}_2,\text{P}}$ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) = การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้าที่นำเข้ามาจากภายนอก

$$\begin{aligned}
 \text{EC (กิโลวัตต์ชั่วโมง)} &= \text{ปริมาณการใช้ไฟฟ้า} \\
 \text{EF}_{\text{CO}_2} (\text{กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง}) &= \text{ค่าแฟกเตอร์การปล่อย} \\
 &\quad \text{ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์}
 \end{aligned}$$

วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 E_{\text{CO}_2, \text{P}} &= 1,984,800.00 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง} \times 0.5813 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ} \\
 &\quad \text{กิโลวัตต์ชั่วโมง} \\
 &= 1,153,764.24 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้าที่นำเข้ามาจากภายนอกองค์กร เท่ากับ 1,153,764.24 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวอย่าง ก-7 การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไอน้ำที่นำเข้ามาจากภายนอกองค์กร คำนวณจากสมการ (ก-9) และการคำนวณค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คำนวณจากสมการ (ก-10) โดยใช้ค่าจากตาราง ก-10

ตารางที่ ก-10 ตัวอย่างค่าที่ใช้คำนวณค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไอน้ำ

Process Steam		แหล่งอ้างอิง
เอ็นทาลปีจำเพาะ (จิกะจูลต่อตัน)	3	โรงงานกรณีศึกษา
ไอน้ำที่ผลิตได้จาก Process Steam (ตัน)	50,000	โรงงานกรณีศึกษา
ไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	700,000,000	โรงงานกรณีศึกษา
ประสิทธิภาพการผลิตไอน้ำ (ร้อยละ)	80.00	US.EPA, 2015
ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (ร้อยละ)	50.00	US.EPA, 2015
ปริมาณการปล่อยจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์)	300,000,000	โรงงานกรณีศึกษา

$$E_H = \frac{\frac{H}{e_H}}{\frac{H}{e_H} + \frac{P}{e_P}} \times E_T$$

(ก-9)

$$\text{EF} = \left(\frac{E_H}{H} \right) \times \text{specific enthalpy}$$

(ก-10)

$$H \text{ (energy)} = \text{Process steam generation} \times \text{specific enthalpy}$$

(ก-11)

$$P \text{ (energy)} = \text{Electricity generation} \times \text{conversion factor}$$

(ก-12)

โดยที่ EF (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตัน) = ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการการผลิตไอน้ำ

E_H (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) = ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไอน้ำ

H (หน่วยพลังงาน) = ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ จากสมการ (ก-11)

P (หน่วยพลังงาน) = ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ จากสมการ (ก-12)

e_H (ร้อยละ) = ประสิทธิภาพการผลิตไอน้ำ

e_P (ร้อยละ) = ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า

E_T (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) = ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

วิธีการคำนวณ

$$H = 50,000 \text{ ตัน} \times 3 \text{ จิกะจูลต่อตัน}$$

$$= 150,000 \text{ จิกะจูล}$$

$$P = 700,000,000 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง} \times 0.0036 \text{ จิกะจูลต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง}$$

$$= 2,520,000 \text{ จิกะจูล}$$

$$E_H = \left\{ \frac{150,000 \text{ จิกะจูล}}{0.80} \right\} / \left\{ \frac{150,000 \text{ จิกะจูล}}{0.80} \right\} +$$

$$\left\{ \frac{2,520,000 \text{ จิกะจูล}}{0.50} \right\} \times 300,000,000 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์}$$

$$= 10,760,401.72 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์}$$

$$EF = 10,760,401.72 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์} / 150,000 \text{ จิกะจูล} \times 3 \text{ จิกะจูลต่อตัน}$$

$$= 215.21 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตัน}$$

ดังนั้น ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไอน้ำที่นำเข้ามาจากภายนอกองค์กร เท่ากับ 10,760,401.72 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไอน้ำ เท่ากับ 215.21 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตัน

ภาคผนวก ข

ตาราง ข-1 ค่าความร้อนสุทธิ (Net Calorific Value) ของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง	หน่วย	ค่าความร้อนสุทธิ (เมกะจูลต่อหน่วย)	แหล่งอ้างอิง
ขอบเขต 1 : แหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางตรง			
ก๊าซธรรมชาติ	ลูกบาศก์ฟุต	1.04	สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2015
เบนซิน	ลิตร	31.48	สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2015
ดีเซล	ลิตร	36.42	สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2015
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	กิโลกรัม	26.62	สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2015
ขอบเขต 2 : แหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางอ้อม			
ไฟฟ้า	กิโลวัตต์ชั่วโมง	3.60	สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2015
ไอน้ำ	ตัน	2900	โรงงาน A และ B

ตัวอย่าง ข-1 ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นคาร์บอน โดยใช้สมการ (ข-1) และค่าจากตาราง ข-2

$$CI \text{ (kgCO}_2\text{/kWh)} = \frac{\text{CO}_2\text{emission (kgCO}_2\text{)}}{\text{Product output (kWh)}} \quad (\text{ข-1})$$

โดยที่ CI (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง) = ความเข้มข้นคาร์บอน

CO₂emission (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) = ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Product output (กิโลวัตต์ชั่วโมง) = ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้

ตาราง ข-2 ตัวอย่างค่าที่ใช้สำหรับการคำนวณความเข้มข้นคาร์บอน

ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์)	ปริมาณการผลิตไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
326,000,000	727,000

วิธีการคำนวณ

$$CI = \frac{326,000,000 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์}}{727,000 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง}}$$

$$= 0.448 \text{ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/กิโลวัตต์ชั่วโมง}$$

ดังนั้น ค่าความเข้มข้นคาร์บอน เท่ากับ 0.448 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/กิโลวัตต์ชั่วโมง

ตัวอย่าง ข-2 ตัวอย่างการคำนวณความเข้มพลังงาน โดยใช้สมการ (ข-2) และค่าจากตาราง ข-3

$$EI \text{ (GJ/MWh)} = \frac{EC \text{ (MJ)}}{P \text{ (MWh)} \times 1000}$$

(ข-2)

โดยที่ EI = ความเข้มพลังงาน (GJ/MWh)

EC = ปริมาณการใช้พลังงาน (MJ) จากสมการ (ข-3)

P = ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ (MWh)

$$EC \text{ (MJ)} = \sum(\text{Fuel Consumption}_{\text{fuel}} \times \text{NCV})$$

(ข-3)

โดยที่ EI (จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง) = ความเข้มพลังงาน

EC (เมกะจูล) = ปริมาณการใช้พลังงาน จากสมการ (3.13)

P (เมกะวัตต์ชั่วโมง) = ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้

ตาราง ข-3 ตัวอย่างค่าที่ใช้ในการคำนวณปริมาณการใช้พลังงานและความเข้มพลังงาน

กิจกรรม (หน่วย)	ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในกิจกรรม	ค่าความร้อนสุทธิ (เมกะจูล/หน่วย)	ปริมาณการใช้พลังงาน (เมกะจูล)	ปริมาณการผลิตไฟฟ้า (เมกะวัตต์ ชั่วโมง)	ความเข้มพลังงาน (จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง)
การเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ (ลูกบาศก์ฟุต)	5,660,000,000	1.04	5,886,400,000	711,000	8.30
การเผาไหม้เบนซิน (ลิตร)	20	31.48	629.6		
การเผาไหม้ดีเซล (ลิตร)	1200	36.42	43,704		
การใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (กิโลกรัม)	15	26.62	399.3		
การใช้ไฟฟ้าที่ซื้อมาจากภายนอกโรงงาน (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	1,570,000	3.60	5,652,000		
การใช้ไอน้ำซื้อมาจากภายนอกโรงงาน (ตัน)	2,300	2900	6,670,000		
รวม			5,898,766,733		

ดังนั้น ค่าความเข้มพลังงาน เท่ากับ 8.30 จิกะจูลต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการวิเคราะห์เอ็กซ์เซอียของกังหันไอน้ำ

ขั้นตอนการวิเคราะห์อัตราการทำลายเอ็กซ์เซอียและประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอียของกังหันไอน้ำ มีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณค่าเอนทาลปีและเอนโทรปีจำเพาะที่จุดทางเข้าและทางออกของกังหันไอน้ำ โดยใช้ค่าอุณหภูมิและความดันที่จุดทางเข้าและทางออกของไอน้ำ จากตาราง ค-1 และใช้ค่าจากตารางคุณสมบัติของไอร้อนยิ่งยวดในช่วงอุณหภูมิและความดันที่ครอบคลุมจุดที่ต้องการหา ดังแสดงในตาราง ค-2

ตาราง ค-1 คุณสมบัติของไอน้ำสำหรับใช้ในการคำนวณเอ็กซ์เซอียของกังหันไอน้ำ

จุด		T (C)	T (K)	P _{abs} (MPa)	h ₀ (kJ/kg)	s ₀ (kJ/kg.K)	\dot{m} (kg/s)
HPST	ST ₁	565	838.2	12.82	104.8	0.3672	167.965
	ST ₅	351.4	624.6	3.054	104.8	0.3672	166.726
IPST	ST ₂	565	838.15	2.711	104.8	0.3672	189.757
	ST ₃	281.9	555.05	0.5406	104.8	0.3672	15.818
	ST ₆	323.5	596.65	0.5203	104.8	0.3672	206.357
LPST	ST ₄	323.4	596.55	0.5151	104.8	0.3672	206.357
	ST ₇	139.8	412.95	0.0872	104.8	0.3672	8.761
	ST ₈	48.2	321.35	0.0113	104.8	0.3672	197.984

ตาราง ค-2 คุณสมบัติของไอร้อนยิ่งยวด (Superheated Vapor Steam Properties)

T		P _y (MPa)		P _z (MPa)	
		12.5		15.0	
		h _y (kJ/kg)	s _y (kJ/kg.K)	h _z (kJ/kg)	s _z (kJ/kg.K)
T _y (C)	500	3343.6	6.465	3310.8	6.348
T _z (C)	600	3604.6	6.783	3583.1	6.680

ที่มา : (Cenge และคณะ, 2549)

ยกตัวอย่างการคำนวณเอนทัลปีและเอนโทรปีจำเพาะที่จุด ST_1

ที่จุด ST_1 มี $P_{abs} = 12.82 \text{ MPa}$ และ $T = 565 \text{ C}$

ดังนั้น เลือกช่วงความดัน 12.5 MPa ถึง 15.0 MPa และอุณหภูมิช่วง $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ถึง $600 \text{ }^\circ\text{C}$

- คำนวณเอนทัลปี ที่ $P_{abs} = 12.82 \text{ MPa}$ และ $T_y = 500 \text{ C}$

$$\begin{aligned}
 &= h_y - \left[\frac{(h_y - h_z)}{(P_z - P_y)} \times (P_{abs} - P_y) \right] \\
 &= 3343.6 - \left[\frac{(3343.6 - 3310.8 \text{ kJ/kg})}{(15.0 - 12.5 \text{ MPa})} \times (12.82 - 12.5 \text{ MPa}) \right] \\
 &= 3,339.40 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$
- คำนวณเอนทัลปี ที่ $P_{abs} = 12.82 \text{ MPa}$ และ $T_z = 600 \text{ C}$

$$\begin{aligned}
 &= h_y - \left[\frac{(h_y - h_z)}{(P_z - P_y)} \times (P_{abs} - P_y) \right] \\
 &= 3604.6 - \left[\frac{(3604.6 - 3583.1 \text{ kJ/kg})}{(15.0 - 12.5 \text{ MPa})} \times (12.82 - 12.5 \text{ MPa}) \right] \\
 &= 3,601.85 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$
- ดังนั้น เอนทัลปี ที่ $P_{abs} = 12.82 \text{ MPa}$ และ $T = 565 \text{ C}$

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{\Delta h_{T_z, T_y}}{\Delta T_{z, y}} \times \Delta T_{inlet, y} \right) + h_{T_y} \\
 &= \left[\frac{(3,601.85 - 3,339.40 \text{ kJ/kg})}{(600 - 500 \text{ C})} \times (565 - 500 \text{ C}) \right] + 3,339.40 \text{ kJ/kg} \\
 &= 3,510.0 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$
- คำนวณเอนโทรปี ที่ $P_{abs} = 12.82 \text{ MPa}$ และ $T_y = 500 \text{ C}$

$$\begin{aligned}
 &= s_y - \left[\frac{(s_y - s_z)}{(P_z - P_y)} \times (P_{abs} - P_y) \right] \\
 &= 6.465 - \left[\frac{(6.465 - 6.348 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}})}{(15.0 - 12.5 \text{ MPa})} \times (12.82 - 12.5 \text{ MPa}) \right] \\
 &= 6.450024 \text{ kJ/kg-K}
 \end{aligned}$$
- คำนวณเอนโทรปี ที่ $P_{abs} = 12.82 \text{ MPa}$ และ $T_z = 600 \text{ C}$

$$\begin{aligned}
 &= s_y - \left[\frac{(s_y - s_z)}{(P_z - P_y)} \times (P_{abs} - P_y) \right] \\
 &= 6.783 - \left[\frac{(6.783 - 6.680 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}})}{(15.0 - 12.5 \text{ MPa})} \times (12.82 - 12.5 \text{ MPa}) \right] \\
 &= 6.769816 \text{ kJ/kg-K}
 \end{aligned}$$
- ดังนั้น เอนโทรปี ที่ $P_{abs} = 12.82 \text{ MPa}$ และ $T = 565 \text{ C}$

$$\begin{aligned}
&= \left(\frac{\Delta s_{T_z, T_y}}{\Delta T_{z,y}} \times \Delta T_{\text{inlet},y} \right) + s_{T_y} \\
&= \left[\frac{(6.769816 - 6.450024 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}})}{(600 - 500 \text{ C})} \times (565 - 500 \text{ C}) \right] + 6.450024 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \\
&= 6.654 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}
\end{aligned}$$

ดังนั้น เอนทัลปีและเอนโทรปีของไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่จุดทางเข้าของกังหันไอน้ำความดันสูงเท่ากับ 3,510.0 kJ/kg และ 6.654 kJ/kg-K ตามลำดับ

2. คำนวณอัตราการเอ็กส์เซอียและงานของกังหันไอน้ำ โดยใช้ค่าจากตาราง ค-3

ตาราง ค-3 ค่าที่ใช้สำหรับการคำนวณงานและการทำลายเอ็กส์เซอียของกังหันไอน้ำ

จุด	T (C)	T (K)	P _{abs} (MPa)	h ₀ (kJ/kg)	s ₀ (kJ/kg·K)	\dot{m} (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	
HPST	ST ₁	565	838.2	12.82	104.8	0.3672	167.965	3510.0	6.654
	ST ₅	351.4	624.6	3.054	104.8	0.3672	166.726	3119.6	6.741
IPST	ST ₂	565	838.15	2.711	104.8	0.3672	189.757	3604.5	7.465
	ST ₃	281.9	555.05	0.5406	104.8	0.3672	15.818	3026.2	7.357
	ST ₆	323.5	596.65	0.5203	104.8	0.3672	206.357	3112.9	7.525
LPST	ST ₄	323.4	596.55	0.5151	104.8	0.3672	206.357	3112.9	7.529
	ST ₇	139.8	412.95	0.0872	104.8	0.3672	8.761	2757.2	7.647
	ST ₈	48.2	321.35	0.0113	104.8	0.3672	197.984	2463.4	7.718

ยกตัวอย่างการคำนวณอัตราเอ็กส์เซอียของ HPST

$$\begin{aligned}
\dot{E}x_{ST_1} &= \dot{m}_{ST_1} [(h_{ST_1} - h_0) - T_0 (s_{ST_1} - s_0)] \\
&= 167.965 \frac{\text{kg}}{\text{s}} [(3510.0 - 104.8 \text{ kJ/kg}) - 298.15 \text{ K} (6.654 - 0.3672 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} - \text{K})] \\
&= 257,090.24 \text{ kJ/s}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{E}x_{ST_2} &= \dot{m}_{ST_2} [(h_{ST_2} - h_0) - T_0 (s_{ST_2} - s_0)] \\
&= 166.726 \frac{\text{kg}}{\text{s}} [(3119.6 - 104.8 \text{ kJ/kg}) - 298.15 \text{ K} (6.741 - 0.3672 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} - \text{K})] \\
&= 185,817.04 \text{ kJ/s}
\end{aligned}$$

ยกตัวอย่างการคำนวณงานของ HPST

$$\begin{aligned}
\dot{W}_{\text{HPST}} &= \dot{m}_{ST_1} h_{ST_1} - \dot{m}_{ST_5} h_{ST_5} \\
&= \left(167.965 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3510.0 \text{ kJ/kg} \right) - \left(166.726 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3119.6 \text{ kJ/kg} \right) \\
&= 69,388.33 \text{ kJ/s}
\end{aligned}$$

3. คำนวณอัตราการทำลายเอ็กซีเชอียและประสิทธิภาพเอ็กซีเชอียของกังหันไอน้ำ โดยใช้ค่าจากตาราง ค-4

ตาราง ค-4 ค่าที่ใช้สำหรับการคำนวณอัตราการทำลายเอ็กซีเชอียและประสิทธิภาพเอ็กซีเชอียของกังหันไอน้ำ

จุด	T (C)	T (K)	P _{abs} (MPa)	h ₀ (kJ/kg)	s ₀ (kJ/kg.K)	ṁ (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	Ẇ _{ST} (kJ/s)	Ẽx (kJ/s)	
HPST	ST ₁	565	838.2	12.82	104.8	0.3672	167.965	3510.0	6.654	69,388.33	257,090.24
	ST ₅	351.4	624.6	3.054	104.8	0.3672	166.726	3119.6	6.741		185,817.04
IPST	ST ₂	565	838.15	2.711	104.8	0.3672	189.757	3604.5	7.465	89,478.83	262,517.68
	ST ₃	281.9	555.05	0.5406	104.8	0.3672	15.818	3026.2	7.357		13,246.01
	ST ₆	323.5	596.65	0.5203	104.8	0.3672	206.357	3112.9	7.525		180,349.09
LPST	ST ₄	323.4	596.55	0.5151	104.8	0.3672	206.357	3112.9	7.529	130,499.09	180,092.16
	ST ₇	139.8	412.95	0.0872	104.8	0.3672	8.761	2757.2	7.647		4,222.02
	ST ₈	48.2	321.35	0.0113	104.8	0.3672	197.984	2463.4	7.718		33,055.21

- คำนวณอัตราการทำลายเอ็กซีเชอียของ HPST จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \dot{E}x_{D,HPST} &= \dot{E}x_{ST_1} - \dot{E}x_{ST_5} - \dot{W}_{HPST} \\
 &= 257,090.24 - 185,817.04 - 69,388.33 \text{ kJ/s} \\
 &= 1,884.88 \text{ kJ/s} \\
 &= 1.88 \text{ kw}
 \end{aligned}$$

- คำนวณประสิทธิภาพเอ็กซีเชอียของ HPST จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \psi_{HPST} &= \frac{\dot{W}_{HPST}}{\dot{E}x_{ST_1} - \dot{E}x_{ST_5}} \\
 &= \frac{69,388.33 \text{ kJ/s}}{257,090.24 \text{ kJ/s} - 185,817.04 \text{ kJ/s}} \\
 &= 97.36 \%
 \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการทำลายเอ็กซีเชอียของ HPST เท่ากับ 1.88 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพเอ็กซีเชอียเท่ากับร้อยละ 97.36

- คำนวณอัตราการทำลายเอ็กซีเชอียของ IPST จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \dot{E}x_{D,IPST} &= (\dot{E}x_{ST_2} + \dot{E}x_{ST_3}) - \dot{E}x_{ST_6} - \dot{W}_{IPST} \\
 &= (262,517.68 + 13,246.01) - 180,349.09 - 89,478.83 \text{ kJ/s} \\
 &= 5,935.77 \text{ kJ/s} \\
 &= 5.94 \text{ kw}
 \end{aligned}$$

- คำนวณประสิทธิภาพเอ็กซีเชอียของ IPST จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\Psi_{IPST} &= \frac{\dot{W}_{IPST}}{(\dot{E}_{x_{ST_2}} + \dot{E}_{x_{ST_3}}) - \dot{E}_{x_{ST_6}}} \\ &= \frac{89,478.83 \text{ kJ/s}}{(262,517.68 + 13,246.01 \text{ kJ/s}) - 180,349.09 \text{ kJ/s}} \\ &= 93.78 \%\end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการทำลายเอ็กส์เซอียของ IPST เท่ากับ 5.94 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพเอ็กส์เซอีย เท่ากับร้อยละ 93.78

- คำนวณอัตราการทำลายเอ็กส์เซอียของ LPST จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\dot{E}_{D,LPST} &= \dot{E}_{x_{ST_4}} - (\dot{E}_{x_{ST_7}} + \dot{E}_{x_{ST_8}}) - \dot{W}_{LPST} \\ &= 180,092.16 - (4,222.02 + 33,055.21) - 130,499.09 \text{ kJ/s} \\ &= 12,315.85 \text{ kJ/s} \\ &= 12.32 \text{ kw}\end{aligned}$$

- คำนวณประสิทธิภาพเอ็กส์เซอียของ LPST จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\Psi_{LPST} &= \frac{\dot{W}_{LPST}}{\dot{E}_{x_{ST_4}} - (\dot{E}_{x_{ST_7}} + \dot{E}_{x_{ST_8}})} \\ &= \frac{130,499.09 \text{ kJ/s}}{180,092.16 - (4,222.02 + 33,055.21) \text{ kJ/s}} \\ &= 91.38 \%\end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการทำลายเอ็กส์เซอียของ LPST เท่ากับ 12.32 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพเอ็กส์เซอีย เท่ากับร้อยละ 91.38

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวญาติา บุญยะมนิตย์ เกิดเมื่อวันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2533 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปี การศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้เผยแพร่ในงานประชุม 2016 The 3rd International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA 2016) ที่ โรงแรม The Cityview Hotel เมืองเกาลูน เขตบริหารพิเศษฮ่องกงแห่งสาธารณรัฐประชาชนจีน ระหว่างวันที่ 28-30 เมษายน 2559 ในชื่อหัวข้อ An analysis of energy and carbon intensities and exergy efficiency in Natural Gas Combined-Cycle Power Plants: A case study of Thailand และยังเผยแพร่ในงานประชุม The 4th Conference in Eastern Seaboard Industrial Estate ที่วิทยาลัยพาณิชยศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา บางแสน จังหวัดชลบุรี ในวันที่ 19 ธันวาคม 2558 ในชื่อหัวข้อ Evaluation of Carbon Intensity and Energy Intensity of Natural Gas Combined Cycle Power Plants