การวิเคราะห์ศักยภาพการใช้พลังงานและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า Co-generation ขนาด 27 MWe ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

รวินท์วัชร ชมภู่

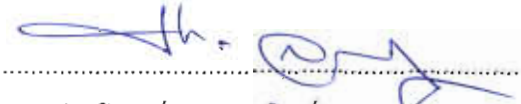
งานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
พฤษภาคม 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์และคณะกรรมการสอบงานนิพนธ์ ได้พิจารณางานนิพนธ์ของ รวินท์วัชร ชมภู่ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

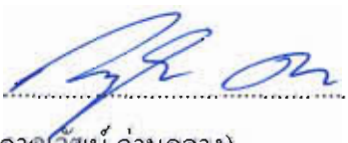
คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ดร. ปราโมทย์ ลายประดิษฐ์)

คณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์


..... ประธาน
(ดร. ปราโมทย์ ลายประดิษฐ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดิ์)


..... กรรมการ
(ดร. ภาณุวัฒน์ ด่านกลาง)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับงานนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยบูรพา

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)
วันที่ 31 เดือน พฤษภาคม พ.ศ 2559

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษางานนิพนธ์นี้ประสบผลสำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ในการสนับสนุนจาก บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลกระบวนผลิตเพื่อใช้ในการศึกษา อีกทั้งยังเป็นผู้อุดหนุนทุนการศึกษา “โครงการทุนเพื่อการศึกษาต่อระดับปริญญาโทในประเทศ รุ่นที่ 3” จนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณ ดร. ปราโมทย์ ลายประดิษฐ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นที่ปรึกษางานนิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำในการค้นคว้าข้อมูล คำปรึกษาความรู้ในด้านต่าง ๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ส่งผลให้งานนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดิ์ และ ดร. ภาณุวัฒน์ ด่านกลาง คณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการคัดกรอง และแก้ไขงานนิพนธ์ทำให้งานนิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียนตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจ

คุณค่าและคุณประโยชน์ของงานนิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

รวินท์วัชร ชมภู่

56920954: สาขาวิชา: การจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม; วศ.ม. (การจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม)
คำสำคัญ: Co-generation/ พลังงานที่ผันกลับไม่ได้/ ประสิทธิภาพพลังงาน/ ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี/ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

รวินท์วัชร ชมภู่: การวิเคราะห์ศักยภาพการใช้พลังงานและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า Co-generation ขนาด 27 MWe ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (ANALYSIS OF THE POTENTIAL ENERGY AND ECONOMIC COST BENEFIT OF 27MWe CO-GENERATION POWER PLANT IN THE PETROCHEMICAL INDUSTRY.) คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์: ปราโมทย์ ลายประดิษฐ์, ปร.ด., 57 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ศักยภาพและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้า Co-generation ขนาด 27 MWe ของบริษัทไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ที่ผลิตไฟฟ้าและไอน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตภายในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการผลิตได้ 3 แบบ คือ แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว และแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว โดยนำข้อมูลการผลิตแต่ละรูปแบบมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency) ตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี (Exergy efficiency) ตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ และเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งผลการประเมินปริมาณการใช้พลังงานแต่ละอุปกรณ์พบว่าหม้อไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่มีพลังงานที่ผันกลับไม่ได้สูงที่สุดคือ 55.86% ส่วนรูปแบบการผลิตแบบผลิตไอน้ำอย่างเดียวจะมีประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดคือ 71.76% ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีสูงสุดคือ 28.08% และต้นทุนไอน้ำถูกที่สุดคือ 1,175.66 Baht/Ton-steam อีกทั้งยังมีประสิทธิผลการใช้ประโยชน์จากผลิตผลที่ผลิตได้สูงสุดคือ 92.81% ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ศักยภาพการใช้พลังงานสามารถพิจารณาถึงอุปกรณ์ที่ต้องปรับปรุงและเลือกรูปแบบการผลิตเพื่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าได้

56920954: MAJOR: ENERGY AND ENVIRONMENT MANAGEMENT; M.ENG. (ENERGY AND ENVIRONMENT MANAGMENT)
KEYWORD: CO-GENERATION/ IRREVERSIBILITY/ ENERGY EFFICIENCY/ EXERGY EFFICIENCY/ ECONOMIC COST BENEFIT
RAWINWAT CHOMPOO: ANALYSIS OF THE POTENTIAL ENERGY AND ECONOMIC COST BENEFIT OF 27MWe CO-GENERATION POWER PLANT IN THE PETROCHEMICAL INDUSTRY. ADVISORSY COMMITTEE: PRAMOTE LAIPRADIT, Ph.D., 57 P. 2016.

This research analyzed the potential and energy efficiency of the 27 MWe Co-generation power plant for IRPC Public Co., Ltd. which produces electricity and steam to be used in manufacturing processes of the petrochemical industry. It can be altered to three manufacturing models; the production of electricity and steam, the production of the steam only, and the production of electricity only. This research compared energy efficiency following the first law of the thermodynamics between each manufacturing model and exergy efficiency following the second law of the thermodynamics, and evaluate the economic of the process.

The results of the energy consumption of each device found in the boiler showed that the highest irreversible energy is at 55.86%. As for the production of only steam model, it has the maximum energy efficiency of 71.76%, the highest exergy efficiency of 28.08%, the lowest cost of steam of 1,175.66 Baht /Ton-steam, and the highest effective utilization of produce of 92.81%. The information analyzed from the potential energy can be used to consider a device which need to be improved and chose the optimum production model .

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

สมมติฐานของการวิจัย 3

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 3

ขอบเขตของการวิจัย 4

แผนการดำเนินงาน 4

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

ระบบ Co-generation ที่ศึกษา 6

แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ 6

แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว 7

แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว 8

การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยี 8

การวิเคราะห์พลังงาน 9

การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี 11

ส่วนประกอบของเอ็กเซอร์ยี 14

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ 15

การวิเคราะห์ประสิทธิผลการใช้ประโยชน์ 16

กรณีศึกษาจากวรรณกรรม 17

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	ขั้นตอนการดำเนินงาน	19
	วิธีการศึกษาและดำเนินงานวิจัย	19
	ข้อมูลของโรงไฟฟ้า Co-generation 27 MWe	21
	ข้อมูลการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ	21
	ข้อมูลการผลิตแบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว	23
	ข้อมูลการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว	24
	ข้อมูลราคาต้นทุน	25
	การคำนวณสมดุลพลังงาน	26
	สมดุลพลังงาน	28
	สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ	28
	สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว	31
	สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว	33
	การประเมินต้นทุนพลังงาน	36
	การประเมินต้นทุนพลังงาน แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ	36
	การประเมินต้นทุนพลังงาน แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว	38
	การประเมินต้นทุนพลังงาน แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว	39
	การใช้ประโยชน์จากทรัพยากร	41
4	ผลการวิจัย	42
	การประเมินปริมาณการใช้พลังงาน ตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์	42
	การประเมินปริมาณการใช้พลังงาน ตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์	44
	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานจำแนกแต่ละอุปกรณ์	46
	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงาน	48
	การเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	49
	การเปรียบเทียบประสิทธิผลการใช้ทรัพยากร	51

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
5	บทสรุป	52
	สรุปผลการศึกษา	53
	ผลการประเมินปริมาณการใช้พลังงานแต่ละอุปกรณ์	53
	ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ	53
	ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	54
	การเปรียบเทียบประสิทธิผลการใช้ทรัพยากร	54
	ข้อเสนอแนะและแนวทางในการปรับปรุง	54
	สำหรับผลการศึกษา	54
	สำหรับกระบวนการผลิต	55
บรรณานุกรม		57
ประวัติย่อของผู้วิจัย		58

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
2-1	สมการที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์ยี แยกเป็นแต่ละอุปกรณ์	13
2-2	สมการที่ใช้ในการประเมินต้นทุนแบบเอ็กเซอร์ยี แยกเป็นแต่ละอุปกรณ์	16
3-1	อุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ในการเก็บข้อมูล	19
3-2	อุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ในการคำนวณหาข้อมูล	21
3-3	ข้อมูลกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ	22
3-4	ข้อมูลกระบวนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว	23
3-5	ข้อมูลกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว	24
3-6	ข้อมูลราคาต้นทุน	25
3-7	สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ ส่วนหม้อน้ำ (Boiler)	28
3-8	สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ (Turbogenerator)	29
3-9	สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ ส่วนเครื่องควบแน่น (Condenser)	30
3-10	สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว ส่วนหม้อน้ำ (Boiler)	31
3-11	สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว ส่วนวาล์วลดความร้อนยวดยิ่ง (De-superheater)	32
3-12	สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว ส่วนหม้อไอน้ำ (Boiler)	33
3-13	สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ (Turbogenerator)	34
3-14	สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว ส่วนเครื่องควบแน่น	35
3-15	ข้อมูลต้นทุนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ	36
3-16	ข้อมูลต้นทุนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว	39
3-17	ข้อมูลต้นทุนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว	40

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-1	เปรียบเทียบอัตราต้นทุนการผลิตรวมต่อชั่วโมงในแต่ละกรณี	49
4-2	อัตราต้นทุนไฟฟ้าต่อชั่วโมงจากแหล่งผลิตไฟฟ้าต่าง ๆ	49

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1-1	แผนผังแสดงกระบวนการผลิตเบื้องต้นของโรงไฟฟ้า Co-generation	1
2-1	ผังกระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ	7
2-2	ผังกระบวนการผลิตแบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว	7
2-3	ผังกระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว	8
2-4	ขอบเขตของการถ่ายเทมวลเข้าและออกจากระบบ	15
3-1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	20
3-2	แผนผังกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ	21
3-3	แผนผังกระบวนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว	23
3-4	แผนผังกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว	24
3-5	แผนผังต้นทุนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ	36
3-6	แผนผังต้นทุนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว	38
3-7	แผนผังต้นทุนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว	40
4-1	ปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ	42
4-2	ปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว	42
4-3	ปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว	43
4-4	ปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ	44
4-5	ปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว	44
4-6	ปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว	45
4-7	ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ	46
4-8	ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว	46
4-9	ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

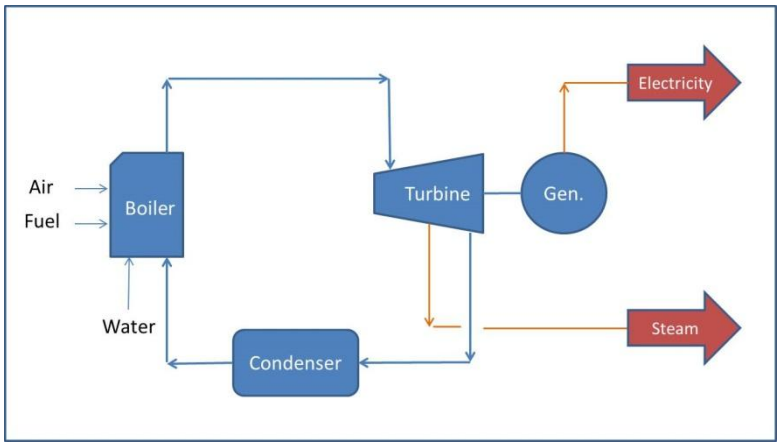
4-10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 48

4-11 เปรียบเทียบประสิทธิผลการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่ผลิตได้ 51

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โรงไฟฟ้าพลังความร้อน (Thermal power plant) ที่สามารถผลิตพลังงานได้ 2 รูปแบบจากแหล่งเชื้อเพลิงชนิดเดียว ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนจะเรียกว่า โรงไฟฟ้า Co-generation ประกอบด้วย หม้อไอน้ำ (Boiler) กังหันไอน้ำ (Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) และเครื่องควบแน่น (Condenser) เมื่อก๊าซธรรมชาติถูกนำเข้าไปยัง Boiler จะถูกเผาไหม้โดยตรงภายในเตาเผาหม้อไอน้ำ เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปใช้ผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำที่ผลิตได้นี้จะถูกนำไปใช้ขับกังหันไอน้ำซึ่งต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้า ส่วนไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำจะมีความดันลดลงและจะถูกนำไปใช้งานในลักษณะ Process steam ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 1-1



ภาพที่ 1-1 แผนผังแสดงกระบวนการผลิตเบื้องต้นของโรงไฟฟ้า Co-generation

การวิเคราะห์ศักยภาพการใช้พลังงานตั้งแต่กระบวนการผลิตจนถึงกระบวนการเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่และการประเมินคุณค่าพลังงานที่มีปริมาณเท่ากันแต่การนำไปใช้ที่ต่างกัน จะมีประโยชน์อย่างยิ่งในการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะใช้หลักการของ “พลังงานที่นำมาใช้งานได้ (Available energy)” ที่นิยามไว้ตามกฎข้อที่ 1 ของอณุพลศาสตร์และกฎการคงมวลของสสารว่า “พลังงานและสสารต่าง ๆ บนโลกนี้ไม่มีวันสูญหายหรือเกิดขึ้นเองได้ แต่พลังงานและสสารสามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแบบอื่นได้” โดยการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพจะ

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบ Co-generation ที่ศึกษา

บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) เป็นบริษัทผู้ผลิตประเภทครบวงจร สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ 2 ประเภท คือ กลุ่มปิโตรเลียม ประกอบด้วย น้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซลีน น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ผลิตภัณฑ์อะโรเมติกส์ และกลุ่มปิโตรเคมี ประกอบด้วย โอเลฟินส์ ผลิตภัณฑ์เม็ดพลาสติกชนิด HDPE, PP, ABS/SAN, PS, EPS ซึ่งในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เหล่านี้ จำเป็นต้องมีโรงไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้าและไอน้ำไว้ใช้ในกระบวนการผลิตอยู่เสมอ

สำหรับโรงไฟฟ้าที่นำมาศึกษานี้เป็นโรงไฟฟ้าประเภท Co-Generation ขนาด 27 MWe สามารถผลิตได้ทั้งไฟฟ้าและไอน้ำ ซึ่งการผลิตจะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน โดยกระบวนการผลิตจะใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ภายในหม้อไอน้ำที่มีความสามารถผลิตไอน้ำสูงสุด 150 ตันไอน้ำต่อชั่วโมง เมื่อให้ความร้อนแก่น้ำจนกลายเป็นไอน้ำชนิด Superheat steam แล้ว จะถูกส่งจ่ายเข้าท่อส่งไอน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตของกลุ่มปิโตรเคมีและกลุ่มปิโตรเลียม ส่วนการผลิตไฟฟ้านั้น จะใช้ไอน้ำจากหม้อไอน้ำมาผ่านเครื่องกังหันไอน้ำที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไฟฟ้าที่ได้จะถูกส่งเข้าระบบเครือข่ายของการไฟฟ้าต่อไปและยังมีไอน้ำบางส่วนที่หมดพลังงานซึ่งมีอุณหภูมิและความดันที่ต่ำ ถูกนำมาผ่านเครื่องควบแน่นเพื่อให้ไอน้ำกลั่นตัวกลายเป็นน้ำและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

ในบางครั้งปริมาณความต้องการไอน้ำและไฟฟ้าไม่คงที่ โดยในกรณีที่มีปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงมากกว่ากำลังการผลิต ระบบไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับระบบเครือข่ายการไฟฟ้า (Grid) สามารถดึงไฟฟ้ามาทดแทนในระบบได้ แต่เมื่อมีปริมาณความต้องการใช้ไอน้ำที่สูงกว่ากำลังการผลิต จำเป็นที่ต้องมีการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตโดยการหยุดใช้กังหันไอน้ำและนำไอน้ำที่ได้จากหม้อไอน้ำโดยตรง ผ่านวาล์วลดความร้อนยวดยิ่งเพื่อทำการลดแรงดันให้เหมาะสมและส่งเข้าระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ เพื่อแลกกับการให้มีปริมาณไอน้ำจ่ายเพียงพอต่อการใช้งาน

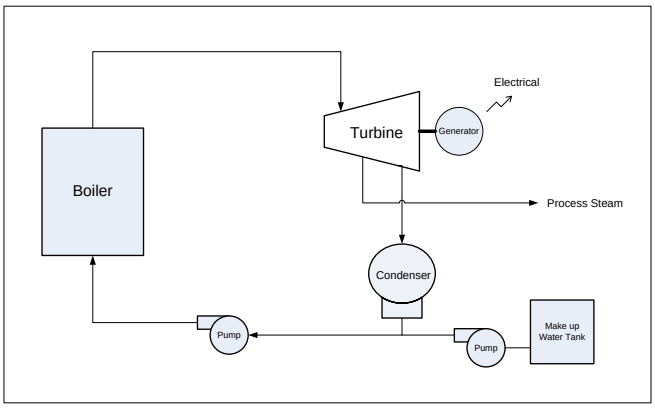
ดังนั้นการผลิตของโรงไฟฟ้าที่นำมาศึกษานี้สามารถแบ่งการผลิตออกเป็น 3 แบบ คือ

1. แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ

ไอน้ำจากหม้อไอน้ำ (Boiler) ปริมาณ 150 ตันไอน้ำต่อชั่วโมง จะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องกังหันไอน้ำ (Turbine) ที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เพื่อผลิตไฟฟ้า และมีไอน้ำที่ได้หลังจากผ่านกังหันไอน้ำแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ไอน้ำส่งไปยังกระบวนการผลิต (Process steam)

และไอน้ำที่หมดพลังงาน จะถูกนำมาผ่านเครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อให้ไอน้ำกลั่นตัวกลายเป็นน้ำและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ แสดงดังภาพที่ 2-1

สิ่งที่ได้จากการผลิตแบบนี้ คือ ไฟฟ้าขนาด 27 MWe และไอน้ำความดัน 45 bar อุณหภูมิ 330 ºC ปริมาณ 30 ตันไอน้ำต่อชั่วโมง

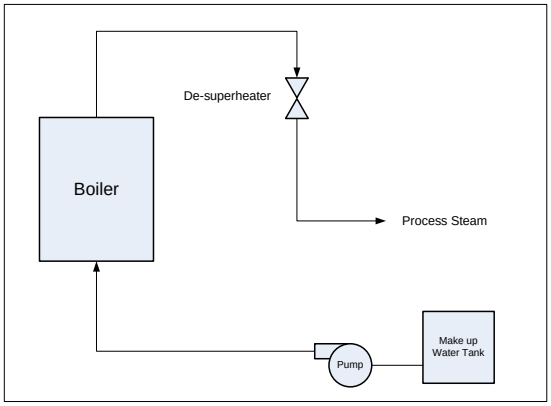


ภาพที่ 2-1 ผังกระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ

2. แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว

ในการผลิตแบบนี้จะหยุดใช้กังหันไอน้ำ (Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) และเครื่องควบแน่น (Condenser) โดยนำไอน้ำที่ได้จากหม้อไอน้ำ (Boiler) ปริมาณ 150 ตันไอน้ำต่อชั่วโมง ผ่านวาล์วลดความร้อนยวดยิ่ง (De-superheater) เพื่อทำการลดแรงดันให้เหมาะสมและส่งเข้าระบบท่อไปยังกระบวนการผลิต (Process steam) แสดงดังภาพที่ 2-2

สิ่งที่ได้จากการผลิตแบบนี้คือ ไอน้ำความดัน 45 bar อุณหภูมิ 330 ºC ปริมาณ 150 ตันไอน้ำต่อชั่วโมง

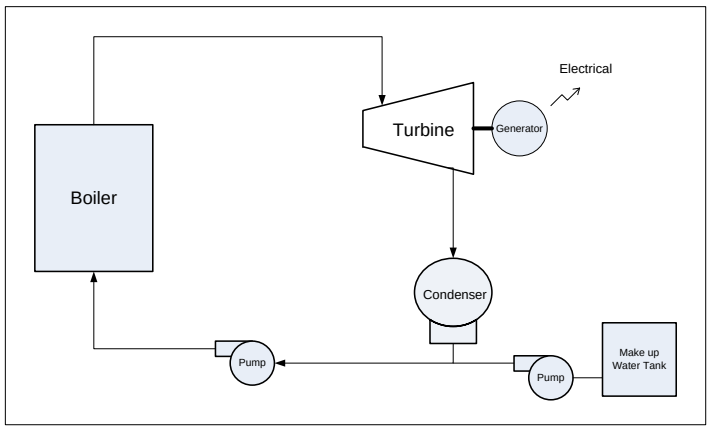


ภาพที่ 2-2 ผังกระบวนการผลิตแบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว

3. แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว

ไอน้ำจากหม้อไอน้ำ (Boiler) ปริมาณ 150 ตันไอน้ำต่อชั่วโมง จะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องกังหันไอน้ำ (Turbine) ที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เพื่อผลิตไฟฟ้า และมีไอน้ำที่ได้ ที่หมดพลังงาน จะถูกนำมาผ่านเครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อให้ไอน้ำกลั่นตัวกลายเป็นน้ำและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ แสดงดังภาพที่ 2-3

สิ่งที่ได้จากการผลิตแบบนี้ คือ ไฟฟ้าขนาด 27 MWe



ภาพที่ 2-3 ผังกระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว

การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยี

การวิเคราะห์พลังงานของระบบทางความร้อนมักใช้พื้นฐานการสมดุลของพลังงาน หรือตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ว่า “พลังงานสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ แต่ไม่สามารถสร้างหรือทำให้พลังงานหายไป” ซึ่งจำเป็นต้องทราบค่าของเอนทัลปี (Enthalpy) เพื่อให้ทราบถึงปริมาณความร้อนที่นำไปใช้งาน ปริมาณความร้อนที่สูญเสียและประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency)

แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงานนั้น ยังไม่สามารถแสดงการทำลายคุณภาพของพลังงานได้ จึงจำเป็นต้องใช้กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ที่กล่าวว่า “ในกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เอง เอนโทรปี (S) ของจักรวาลจะเพิ่มขึ้นและในกระบวนการสมดุล เอนโทรปี ของจักรวาลจะไม่เปลี่ยนแปลง” ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดขึ้นได้เองของกระบวนการกับเอนโทรปี ช่วยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน ซึ่งต้องทราบค่าเอนโทรปี (Entropy) เพื่อให้ทราบถึงคุณภาพของพลังงานที่นำมาใช้ประโยชน์ในรูปเทียบเท่ากับงานและค่าการย้อนกลับไม่ได้ของกระบวนการ

จากกฎ 2 ข้อของเทอร์โมไดนามิกส์ จะมีการผสมผสานเชื่อมโยงถึงกัน พลังงานจะไม่สามารถสร้างหรือทำลายได้ตามกฎอนุรักษ์พลังงาน โดยในกฎข้อแรกจะกล่าวถึงพลังงานที่ป้อนเข้าไปจะเท่ากับพลังงานที่ออกมา แต่ในทางปฏิบัติไม่เป็นเช่นนั้น ซึ่งการทำงานจริงเราจะพบว่า

พลังงานที่ให้ไปกับงานที่ออกมาจะไม่เท่ากัน สาเหตุเนื่องจากมีการสูญเสียประสิทธิภาพทางความร้อนเกิดขึ้น

ไม่มีเครื่องกลใด ๆ ในโลกนี้ที่สามารถทำงานให้ได้มีประสิทธิภาพ 100%

สรุปได้ว่าในกฎข้อแรกของเทอร์โมไดนามิกส์ จะเกิดความแตกต่างระหว่างความร้อนและงาน ขนาดของพลังงานจะเท่ากับพลังงานความร้อนแต่เครื่องหมายจะตรงกันข้าม ส่วนกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นการเปลี่ยนแปลงจากความร้อนไปสู่งานพร้อมกับกล่าวถึงประสิทธิภาพการทำงาน

1. การวิเคราะห์พลังงาน (Energy analysis)

1.1 สมดุลพลังงาน (Energy balance)

พลังงานอาจอยู่ได้หลายรูปแบบ เช่น ความร้อน พลังงานศักย์ พลังงานจลน์ พลังงานเคมี แต่การแยกพลังงานแต่ละอย่างออกมาทำได้ไม่ชัดเจนนัก อย่างไรก็ตาม การใช้สมดุลของพลังงานในการหาลักษณะคุณภาพของการแปรรูปในระบบที่ไม่มีการสร้างพลังงานและไม่มีการใช้พลังงาน ดังสมการที่ 2-1

$$E_i = E_o + E_{accumulation} \tag{2-1}$$

เมื่อ E_i = พลังงานขาเข้าของระบบ

E_o = พลังงานขาออกของระบบ

$E_{accumulation}$ = พลังงานสะสมภายในระบบ

สมดุลของพลังงานอาจคำนวณจากพลังงานภายนอกที่ใช่ต่อหน่วยมวลของผลิตภัณฑ์หนึ่งกิโลกรัม ดังนั้นสมดุลพลังงานจะเขียนได้จากการกำหนดขอบเขตของระบบรอบเครื่องมือต่าง ๆ ในที่นี้สมมุติว่าไม่มีความร้อนเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานรูปอื่น

1.2 เอนทัลปี (Enthalpy)

เอนทัลปี (H) คือ ปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากระบบ เป็นกระบวนการความดันคงที่ ดังสมการที่ 2-2

$$H = U + PV \tag{2-2}$$

เมื่อ H = เอนทัลปี

U = พลังงานภายในระบบ

PV = ผลคูณของความดันสัมบูรณ์และปริมาตรของระบบ

สำหรับกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นโดยที่ความดันของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง การเพิ่มขึ้นของเอนทัลปีของระบบจะมีค่าเท่ากับความร้อนที่ให้เข้าไป และสามารถหาค่าเอนทัลปีได้ดังสมการที่ 2-3

$$\Delta H = q_p \tag{2-3}$$

เอนทัลปีเป็นฟังก์ชันของ E, P, V ซึ่งต่างก็เป็นฟังก์ชันของสถานะ ทำให้ ΔH เป็นฟังก์ชันของสถานะด้วย เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 2-4

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(PV) \tag{2-4}$$

ถ้า ΔH มีค่าเป็นบวก แสดงว่า ระบบจะรับความร้อนเข้าไป แต่ถ้า ΔH มีค่าเป็นลบ แสดงว่าระบบคายความร้อนออกมา

ปริมาณความร้อน *(q)* เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของวัตถุมวลใด ๆ *(m)* สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ 2-5

$$q = mC_p\Delta T \tag{2-5}$$

เมื่อ C_p = ค่าความร้อนจำเพาะ (kJ/kg $°C$)

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ($°C$)

จากที่กล่าวมาสามารถคำนวณปริมาณความร้อนที่ความดันคงที่ในเทอมของความร้อนจำเพาะได้ ดังสมการที่ 2-6

$$q_p - \Delta H = mC_p\Delta T \tag{2-6}$$

การคิดเอนทัลปีจะเลือกสถานะอ้างอิงสำหรับองค์ประกอบทั้งหมดที่เข้าและออกจากระบบ นั่นคือ เป็นการคิดการเปลี่ยนแปลงของค่าเอนทัลปีขององค์ประกอบจากสถานะอ้างอิงไปเป็นสถานะปัจจุบัน ดังนั้นสมดุลเอนทัลปี คือ

เอนทัลปีที่เข้าสู่ระบบ = (เอนทัลปีที่ออกจากระบบ + เอนทัลปีที่สูญเสีย)

หรือ ดังสมการที่ 2-7

$$\Delta H_i = \Delta H_o + \Delta H_L \quad (2\text{-}7)$$

1.3 ประสิทธิภาพเอนทัลปี (Enthalpy efficiency, η_E)

ตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ดังสมการที่ 2-8

$$\% \eta_E = \frac{\text{ปริมาณพลังงานที่ใช้ประโยชน์}}{\text{ปริมาณพลังงานที่ป้อนเข้า}} \text{ x } 100\%$$

$$= \frac{enthalpy\ output}{\Sigma\ enthalpy\ input} \text{ x } 100\% \quad (2\text{-}8)$$

2. การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี (Exergy analysis)

หลักการของเทอร์โมไดนามิกส์มีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์พลังงาน โดยกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างงานและความร้อนที่เกิดขึ้นซึ่งถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการทางอุตสาหกรรม แต่ไม่ได้กำหนดทิศทางของการถ่ายเทของงานและความร้อน โดยทิศทางการถ่ายเทจะเป็นแบบใดก็ได้ และอาจไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริง

แต่กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ จะมีการกำหนดทิศทางการถ่ายเทพลังงานที่เกิดขึ้นได้จริง ดังนั้นกระบวนการจะเกิดขึ้นได้จริง ต้องเป็นไปตามกฎข้อที่หนึ่ง และกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

การวิเคราะห์พลังงานจะทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของพลังงานโดยใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้เอนทัลปี ส่วนการวิเคราะห์หาคุณภาพของพลังงานจะใช้กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้เอนโทรปี ซึ่งทั้งเอนทัลปี และ เอนโทรปี สามารถสร้างความสัมพันธ์กันได้ เรียกว่า เอ็กเซอร์ยี ซึ่งการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี สามารถบอกได้ว่าที่ใดในกระบวนการผลิต มีการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพและสามารถคำนวณหาปริมาณการสูญเสียที่แท้จริงได้

2.1 การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (Entropy change: ΔS)

เอนโทรปี (S) เป็นตัวแปรสำคัญในการบอกทิศทางของการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการต่าง ๆ โดยกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ดังนี้

ในกระบวนการคายความร้อน ระบบจะคายความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมซึ่งจะช่วยให้โมเลกุลของสิ่งแวดล้อมเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ทำให้ระบบมีความไม่เป็นระเบียบลดลง และเอนโทรปีของสิ่งแวดล้อมก็จะสูงขึ้น

ในกระบวนการดูดความร้อน ระบบจะดูดกลืนความร้อนจากสิ่งแวดล้อม ทำให้โมเลกุลของสิ่งแวดล้อมเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ทำให้ระบบมีความเป็นระเบียบสูงขึ้นและเอนโทรปีของสิ่งแวดล้อมก็จะลดลง

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะจาก 1 ไปเป็น 2 ภายใต้อุณหภูมิคงที่ สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ 2-9

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{q}{T} \tag{2-9}$$

โดยที่ ΔS คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในกระบวนการผันกลับไม่ได้

2.2 การเปลี่ยนแปลงเอ็กเซอร์ยี (Exergy change: $\Delta\varepsilon$)

จากนิยามเอ็กเซอร์ยีที่ว่า เอ็กเซอร์ยีคือ งานที่สามารถได้รับจากระบบโดยตรงมีค่าของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเป็นมาตรฐาน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ 2-10

$$\Delta\varepsilon = \Delta H - T_o \Delta S \tag{2-10}$$

สำหรับสมดุลเอ็กเซอร์ยี คือ

เอ็กเซอร์ยีที่ป้อนเข้าสู่ระบบ = เอ็กเซอร์ยีที่ไหลออกจากระบบ + เอ็กเซอร์ยีสูญเสีย + เอ็กเซอร์ยีที่ถูกทำลายเนื่องจากการย้อนกลับไม่ได้

หรือ ดังสมการที่ 2-11

$$\Sigma\, exergy\ input = \Sigma\, exergy\ output + \Sigma\, exergy\ stored + irreversibility \tag{2-11}$$

โดยพลังงานที่มีการใช้จะเรียกพลังงานนี้ว่า availability แต่พลังงานที่เป็น irreversibility คือพลังงานที่ไม่สามารถผันกลับได้

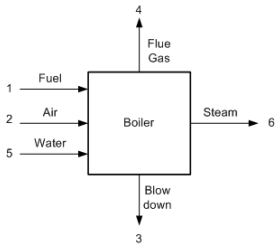
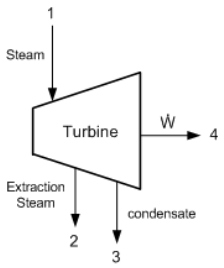
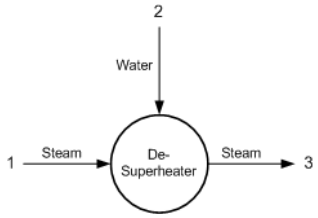
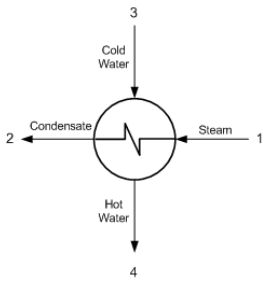
2.3 ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี (Exergy efficiency, η_ε)

สามารถหาได้ ดังสมการที่ 2-12

$$\%\eta_\varepsilon = \frac{\text{เอ็กเซอร์ยีที่ใช้ประโยชน์}}{\text{เอ็กเซอร์ยีที่ป้อนเข้า}} \text{ x } 100\%$$

$$= \frac{\text{exergy output}}{\Sigma\ \text{exergy input}} \text{ x } 100\% \tag{2-12}$$

ตารางที่ 2-1 สมการที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์ยี แยกเป็นแต่ละอุปกรณ์

	Diagram	Exergy efficiency, $\%\eta_\varepsilon$	
Boiler		$\%\eta_\varepsilon = \frac{\dot{E}_6 - \dot{E}_5}{(\dot{E}_1 + \dot{E}_2) - (\dot{E}_3 + \dot{E}_4)}$	(2-13)
Turbine		$\%\eta_\varepsilon = \frac{\dot{W}}{(\dot{E}_1 - \dot{E}_2 - \dot{E}_3)}$	(2-14)
De-superheater (Mixing Unit)		$\%\eta_\varepsilon = \frac{\dot{E}_3}{(\dot{E}_1 + \dot{E}_2)}$	(2-15)
Condenser (Heat Exchanger)		$\%\eta_\varepsilon = \frac{\dot{E}_2 - \dot{E}_1}{\dot{E}_3 - \dot{E}_4}$	(2-16)

3. ส่วนประกอบของเอ็กเซอร์ยี (Exergy component)

การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีที่เข้า-ออกจากระบบ

$$\varepsilon = \varepsilon^{PH} + \varepsilon^{KN} + \varepsilon^{PT} + \varepsilon^{CH} \quad (2\text{-}17)$$

เมื่อ $\mathcal{E}$ = เอ็กเซอร์ยีของทั้งระบบ

$\mathcal{E}^{PH}$ = เอ็กเซอร์ยีของพลังงานทางกายภาพ (Physical exergy)

$\mathcal{E}^{KN}$ = เอ็กเซอร์ยีของพลังงานจลน์ (Kinetic exergy)

$\mathcal{E}^{PT}$ = เอ็กเซอร์ยีของพลังงานศักย์ (Potential exergy)

$\mathcal{E}^{CH}$ = เอ็กเซอร์ยีของพลังงานเคมี (Chemical exergy)

ข้อสมมุติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้ จะไม่คิดค่าเอ็กเซอร์ยีของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ เนื่องจากการเปรียบเทียบ พิจารณาที่สภาวะเดียวกัน

เอ็กเซอร์ยีของพลังงานศักย์ $\varepsilon^{PT} = gz$

เอ็กเซอร์ยีของพลังงานจลน์ $\varepsilon^{KN} = \frac{1}{2}V^2$

3.1 เอ็กเซอร์ยีของพลังงานทางกายภาพ (Physical exergy), $\mathcal{E}^{PH}$

$$\varepsilon^{PH} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \qquad (2\text{-}18)$$

เมื่อ h_o = เอนทัลปีที่พิจารณาที่สภาวะแวดล้อม

S_o = เอนโทรปีที่สภาวะแวดล้อม

T_o = อุณหภูมิที่สภาวะแวดล้อม

3.2 เอ็กเซอร์ยีของพลังงานเคมี (Chemical exergy), $\mathcal{E}^{CH}$

เป็นสารประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนและไนโตรเจน สามารถหาค่าเอ็กเซอร์ยีของเชื้อเพลิง ได้ดังสมการที่ 2-19

$$\varepsilon_f = \text{LHV}\left(1.0438 + 0.0013\frac{H}{C} + 0.1083\frac{O}{C} + 0.0549\frac{N}{C}\right) + 6740\,\text{S} \qquad (2\text{-}19)$$

เมื่อ LHV = ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/kg Fuel)

C = ธาตุคาร์บอนต่อเชื้อเพลิงโดยมวล (kJ/kg Fuel)

H = ธาตุไฮโดรเจนต่อเชื้อเพลิงโดยมวล (kJ/kg Fuel)

O = ธาตุออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงโดยมวล (kJ/kg Fuel)

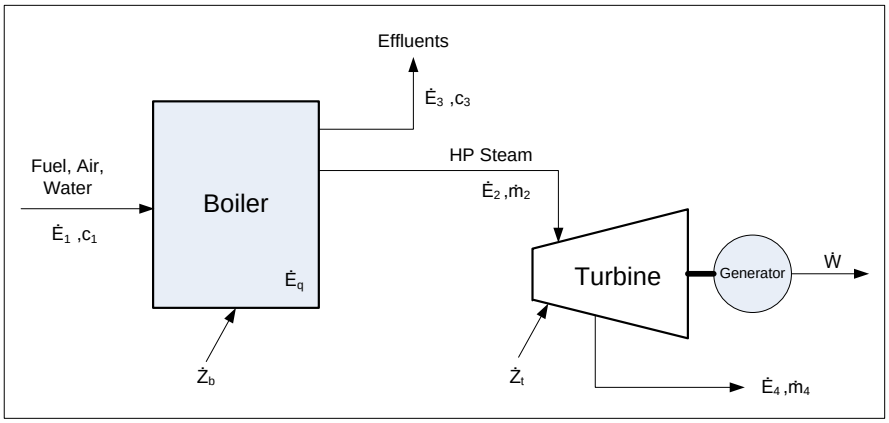
N = ธาตุไนโตรเจนต่อเชื้อเพลิงโดยมวล (kJ/kg Fuel)

S = ธาตุซัลเฟอร์ต่อเชื้อเพลิงโดยมวล (kJ/kg Fuel)

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

พลังงานชนิดต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นไฟฟ้าหรือไอน้ำในทางวิศวกรรมถือว่าพลังงานแต่ละชนิดมีคุณภาพต่างกัน การเปรียบเทียบพลังงานชนิดต่าง ๆ จะต้องอยู่บนมาตรฐานเดียวกันและมาตรฐานนั้นคือ ค่าเอ็กเซอร์ยี ที่บอกถึงศักยภาพในการสร้างงานของพลังงานแต่ละชนิด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการประเมินต้นทุนแบบเอ็กเซอร์ยี (Exergy cost benefit model)

การประเมินต้นทุนแบบเอ็กเซอร์ยี ต้องทำการประเมินค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากใช้อุปกรณ์หรือการดำเนินการต่าง ๆ โดยกำหนดให้อยู่ในรูปของราคาต่อหน่วยเวลา ราคาต่อหน่วยพลังงานและค่าพลังงานต่อหน่วยเวลา และต้องกำหนดขอบเขตการการถ่ายมวลและพลังงานเพื่อให้เกิดความชัดเจนและถูกต้องในผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 ขอบเขตของการถ่ายเทมวลเข้าและออกจากระบบ

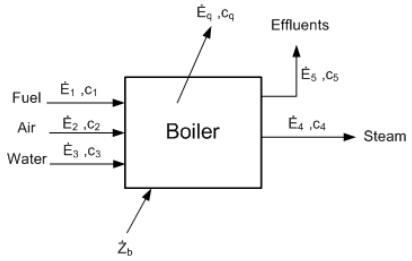
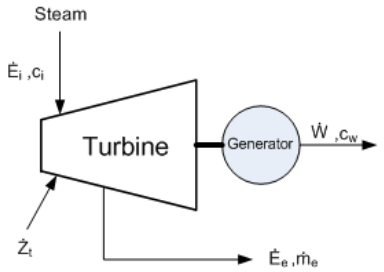
อัตราค่าใช้จ่าย (Bath/hr)

$$\dot{C} = \dot{E}_P \text{ x } c_p \qquad (2\text{-}20)$$

เมื่อ c_p = ราคาต่อหน่วยพลังงาน (Bath/kJ)

$\dot{E}_P$ = ค่าพลังงานต่อหน่วยเวลา (kJ/hr)

ตารางที่ 2-2 สมการที่ใช้ในการประเมินต้นทุนแบบเอ็กเซอร์ยี แยกเป็นแต่ละอุปกรณ์

	Diagram	Exergy cost rate
Boiler		$\dot{C}_4 + \dot{C}_5 + \dot{C}_q = \dot{C}_1 + \dot{C}_2 + \dot{C}_3 + \dot{Z}$ (2-21)
Turbine		$\dot{C}_e + \dot{C}_w = \dot{C}_i + \dot{Z}$ (2-22)

การประเมินต้นทุนแบบเอ็กเซอร์ยี ดังสมการที่ 2-23

$$\dot{E}_{P,tot} = \dot{E}_{F,tot} + \dot{Z}^{CI}_{tot} + \dot{Z}^{OM}_{tot} \quad (2\text{-}23)$$

เมื่อ $\dot{E}_{P,tot}$ = อัตราต้นทุนรวมในการผลิตของระบบ (บาท/วินาที)

$\dot{E}_{F,tot}$ = อัตราต้นทุนรวมของเชื้อเพลิง (บาท/วินาที)

$\dot{Z}^{CI}_{tot}$ = อัตราต้นทุนรวมของเครื่องจักร (บาท/วินาที)

$\dot{Z}^{OM}_{tot}$ = อัตราต้นทุนรวมของค่าดำเนินการและบำรุงรักษา (บาท/วินาที)

การวิเคราะห์ประสิทธิผลการใช้ประโยชน์ (Utilization Factor, UF)

การวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ (Utilization) คือ การวัดความมีประสิทธิผลการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่ผลิตได้ หากค่าที่วัดได้มีน้อยจะบ่งชี้ว่าทรัพยากรได้ถูกใช้อย่างไม่คุ้มค่าและส่งผลกระทบต่อผลตอบแทนการลงทุนในทรัพยากรดังกล่าว

$$\text{ประสิทธิผลการใช้ประโยชน์} = \frac{\text{ผลิตผลที่นำไปใช้ประโยชน์จริง}}{\text{กำลังการผลิตได้}} \quad (2\text{-}24)$$

กรณีศึกษาจากวรรณกรรม

จากการศึกษาของ ปพิชญา บัวโชติ (2550) ได้ทำการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีของโรงงานน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง โดยอาศัยหลักการของเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยี อุปกรณ์หลักในการผลิตประกอบด้วย หน่วยการทำน้ำร้อน หน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ และหน่วยการฆ่าเชื้อ จากการวิเคราะห์พบว่า หน่วยการทำน้ำร้อนมีประสิทธิภาพเอนทัลปี 93% และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 74% หน่วยการพาสเจอร์ไรซ์มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 48% และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 47% และหน่วยการฆ่าเชื้อมีประสิทธิภาพเอนทัลปี 81% และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 69% เมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของทั้ง 3 หน่วยการผลิตของโรงงานน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง พบว่าหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์มีประสิทธิภาพเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีต่ำที่สุด

จากการศึกษาของ ราชัย นาคามดี (2532) ได้ทำการวิเคราะห์พลังงานของระบบโคเจนเนอร์เรชั่นในโรงกลั่นน้ำมัน โดยทำการวิเคราะห์พลังงานและหาสภาวะดีที่สุดในการปฏิบัติการระบบด้วยเครื่องกำเนิดไอน้ำใช้แก๊สและน้ำมัน 4 เครื่อง เครื่องกำเนิดไอน้ำใช้เชื้อเพลิงร่วมกับฟลูแก๊ส 1 เครื่อง โดยวิเคราะห์พลังงาน ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งและข้อสองของเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่า เครื่องกำเนิดไอน้ำมีค่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่ง อยู่ระหว่าง 80.8-89.1% และประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สอง อยู่ระหว่าง 32.1-39.6% ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่ง อยู่ระหว่าง 77.9-83.7% และประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สอง อยู่ระหว่าง 62.6-67.5% และระบบโคเจนเนอเรชั่นมีค่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่ง อยู่ระหว่าง 55.6-58.8% และประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สอง อยู่ระหว่าง 27.2-28.0% และจากการหาสภาวะดีที่สุดในการปฏิบัติการสามารถลดพลังงานที่ให้กับระบบได้ 19.0-21.9 GJ/hr หรือ 9.7-11.2% ของพลังงานที่ให้ระบบก่อนการปรับปรุง

จากการศึกษาของ ไพโรจน์ โรจวัฒนา (2534) ได้ทำการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วย โดยใช้สมการวิเคราะห์พลังงานจาก ASME PTC และสมการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีจากงานเขียนของ Moran และ Ahern ผลการวิเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบผลิตไอน้ำเป็น 88.5% ระบบกังหันไอน้ำมีค่าอัตราความร้อน 9226.8 kJ/kWh ประสิทธิภาพรวมทั้งระบบเป็น 34.5% ประสิทธิภาพตามวิธีของเอ็กเซอร์ยีของระบบผลิตไอน้ำเป็น 42.7% ประสิทธิภาพของกังหันไอน้ำเป็น 64% และประสิทธิภาพรวมทั้งระบบ 32.1%

จากการศึกษาของ Alexandros and Andreas (2014) ได้สร้างแบบจำลองและวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีของระบบกระจายเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติเหลวในโรงผลิต

ไฟฟ้าและความร้อนร่วม โดยแบ่งแบบจำลองเป็น 2 แบบคือ ฤดูหนาวและฤดูร้อนมีอัตราส่วนพลังงานของระบบ 91% และประสิทธิภาพพลังงานในฤดูร้อน 35.6% และในฤดูหนาว 36.5% และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีเฉลี่ย 41.9% ส่วนการวิเคราะห์ต้นทุนสำหรับค่าใช้จ่ายเริ่มต้น 17.1 ล้านยูโร จะมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 4 ปี

ประกอบด้วย ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency) และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี (Exergy efficiency) ซึ่งไม่เพียงแต่ต้องสร้างระบบที่มีประสิทธิภาพของพลังงานที่สูงเท่านั้น แต่ยังต้องเป็นระบบที่ไม่มีความสูญเปล่าในแง่ของเอ็กเซอร์ยีอีกด้วย

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์ยี มักให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ตลอดจนคำนวณศักยภาพในการก่อให้เกิดงานที่เป็นประโยชน์และปริมาณการสูญเสียในระบบ ได้อย่างถูกต้องมากกว่าการใช้การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของพลังงานโดยลำพัง สามารถวิเคราะห์ถึงปริมาณการใช้เอ็กเซอร์ยี การสูญเสียเอ็กเซอร์ยี และประสิทธิภาพการใช้เอ็กเซอร์ยีของระบบต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่การบริหารจัดการการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้เป็นค่าเปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmarking) ได้อีกด้วย

โดยระบบในอุดมคติสำหรับการแปลงพลังงานความร้อนที่มีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีสูงนั้น เริ่มจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อผลิตเป็นไอน้ำแล้วแปลงเป็นแรงขับเคลื่อนกังหันไอน้ำและพลังงานไฟฟ้า แล้วจึงนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในที่ที่ต้องการอุณหภูมิต่ำกว่า เช่น ไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต นำความร้อนทิ้งไปใช้ในงานในอุปกรณ์ที่ต้องการความร้อน เป็นต้น การนำความร้อนมาใช้งานจากระดับอุณหภูมิสูงไล่ลงไปตามลำดับเช่นนี้ สามารถนำพลังงานเคมีที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงฟอสซิล มาใช้งานตามลำดับโดยมีเอ็กเซอร์ยีสูญเสียไปน้อยที่สุด

สำหรับวัตถุประสงค์ของโรงไฟฟ้า Co-generation ที่ผลิตไฟฟ้าและไอน้ำเพื่อสนับสนุนการผลิตภายในโรงงานจะขึ้นอยู่กับความต้องการของกระบวนการผลิต (Process plant) เช่น โรงกลั่น โรงผลิตเม็ดพลาสติก ซึ่งในบางครั้งปริมาณความต้องการไอน้ำและไฟฟ้าไม่คงที่ โดยในกรณีที่มีปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงมากกว่ากำลังการผลิต ระบบไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับระบบเครือข่ายการไฟฟ้า (Grid) สามารถดึงไฟฟ้ามาทดแทนในระบบได้ แต่เมื่อมีปริมาณความต้องการใช้ไอน้ำที่สูงกว่ากำลังการผลิต จำเป็นที่ต้องมีการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตโดยการหยุดใช้กังหันไอน้ำและนำไอน้ำที่ได้จากหม้อไอน้ำโดยตรง ทำการลดแรงดันให้เหมาะสมและส่งเข้าระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียเอ็กเซอร์ยีโดยเปล่าประโยชน์และศักยภาพการใช้พลังงานของระบบต่ำลง เพื่อแลกกับการให้มีปริมาณไอน้ำจ่ายเพียงพอต่อการใช้งาน

ด้วยเหตุนี้ จึงควรทำการวิเคราะห์ศักยภาพการใช้พลังงานโดยใช้หลักการ การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีในการประเมินปริมาณการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้าทั้งระบบและแยกย่อยตามประเภทอุปกรณ์หลักประกอบด้วย หม้อไอน้ำ กังหันไอน้ำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเครื่องควบแน่น รวมทั้งทำการประเมินผลด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ประกอบด้วย การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้า (Economic cost benefit analysis) และหาจุดที่เหมาะสมในการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า

Co-generation กรณีผลิตไฟฟ้าและกรณีไม่ผลิตไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประเมินปริมาณการใช้พลังงานและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้า Co-generation ขนาด 27 MWe ในกรณีผลิตไฟฟ้าและกรณีไม่ผลิตไฟฟ้า
2. เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า Co-generation ขนาด 27 MWe ในกรณีผลิตไฟฟ้าและกรณีไม่ผลิตไฟฟ้า

สมมติฐานของการวิจัย

1. การสูญเสียเอ็กเซอร์ยีโดยเปล่าประโยชน์

1.1 กรณีผลิตไฟฟ้า ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่เครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อให้ไอน้ำกลั่นตัวกลายเป็นน้ำและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

1.2 กรณีไม่ผลิตไฟฟ้า ส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อนำไอน้ำที่ได้จากหม้อไอน้ำโดยตรง ทำการลดแรงดันที่วาล์วลดความร้อนยวดยิ่ง (De-superheater) เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิต

2. อุณหภูมิของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำมีผลต่อปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้

3. การคำนวณต้นทุนการผลิตต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้า อ้างอิงตามการคำนวณการผลิตของโรงไฟฟ้า บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน)

3.1 จำนวนชั่วโมงการผลิต 8,000 ชั่วโมง/ปี

3.2 ราคาเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ 334.8823 บาท/MMBTU

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้มีผลการประเมินปริมาณการใช้พลังงาน เพื่อวิเคราะห์ศักยภาพการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้า และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผลิตแต่ละแบบ
2. ได้ทราบต้นทุนการผลิตและจุดเหมาะสมในการผลิตระหว่างไฟฟ้าและไอน้ำ
3. เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

ขอบเขตของการวิจัย

1. โรงไฟฟ้าประเภท Co-Generation ขนาด 27 MWe ชนิด Gas Fired Boiler
   1.1 ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง
   1.2 ความสามารถผลิตไอน้ำ 150 ตันไอน้ำต่อชั่วโมง ที่แรงดัน 115 bar อุณหภูมิ 520 ºC
   1.3 ความสามารถผลิตไฟฟ้า 27 MWe
2. เปรียบเทียบกรณีผลิตไฟฟ้ากับกรณีไม่ผลิตไฟฟ้า แบ่งออกเป็น
   2.1 แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ
   2.2 แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว
   2.3 แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว
3. ไม่คิดการสูญเสียในกระบวนการผลิตไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
4. ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ใช้วิธีคำนวณเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าเทียบกับการซื้อไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับระบบเครือข่ายการไฟฟ้า
5. ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจะใช้ข้อมูลการผลิตที่ ขณะที่มีสถานะกำลังการผลิตของหม้อไอน้ำที่เท่ากันต่อเนื่อง 7 วัน

แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1-1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	2557				2558			
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. เลือกหัวข้อที่จะทำการศึกษา								
2. กำหนดวัตถุประสงค์ เป้าหมาย								
3. กำหนดสมมุติฐาน ขอบเขต								
4. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง								
5. ศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง								
6. ศึกษาผังกระบวนการผลิตโรงไฟฟ้า								
7. วางแผนการเก็บข้อมูล เก็บข้อมูล								
8. สอบเค้าโครงงานนิพนธ์								

ตารางที่ 1-1 (ต่อ)

ขั้นตอนการดำเนินงาน	2557				2558			
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
9. คำนวณการใช้พลังงานตามกรณี								
10. ประเมินต้นทุนตามกรณี								
11. เปรียบเทียบผลการวิจัย								
12. วิเคราะห์ผลการวิจัย								
13. สรุปผลการศึกษา								
14. สอบงานนิพนธ์								

บทที่ 3
ขั้นตอนการดำเนินงาน

การวิเคราะห์ศักยภาพการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้า Co-generation จะแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์พลังงานโดยอาศัยหลักการของกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ และการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีโดยอาศัยหลักการของกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ส่วนความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จะประเมินต้นทุนพลังงานและต้นทุนแบบเอ็กเซอร์ยี ซึ่งต้องใช้ข้อมูลในการผลิตจริงและครบถ้วนเพื่อใช้ในการศึกษา โดยมีขั้นตอนการดำเนินการแสดงดังภาพที่ 3-1

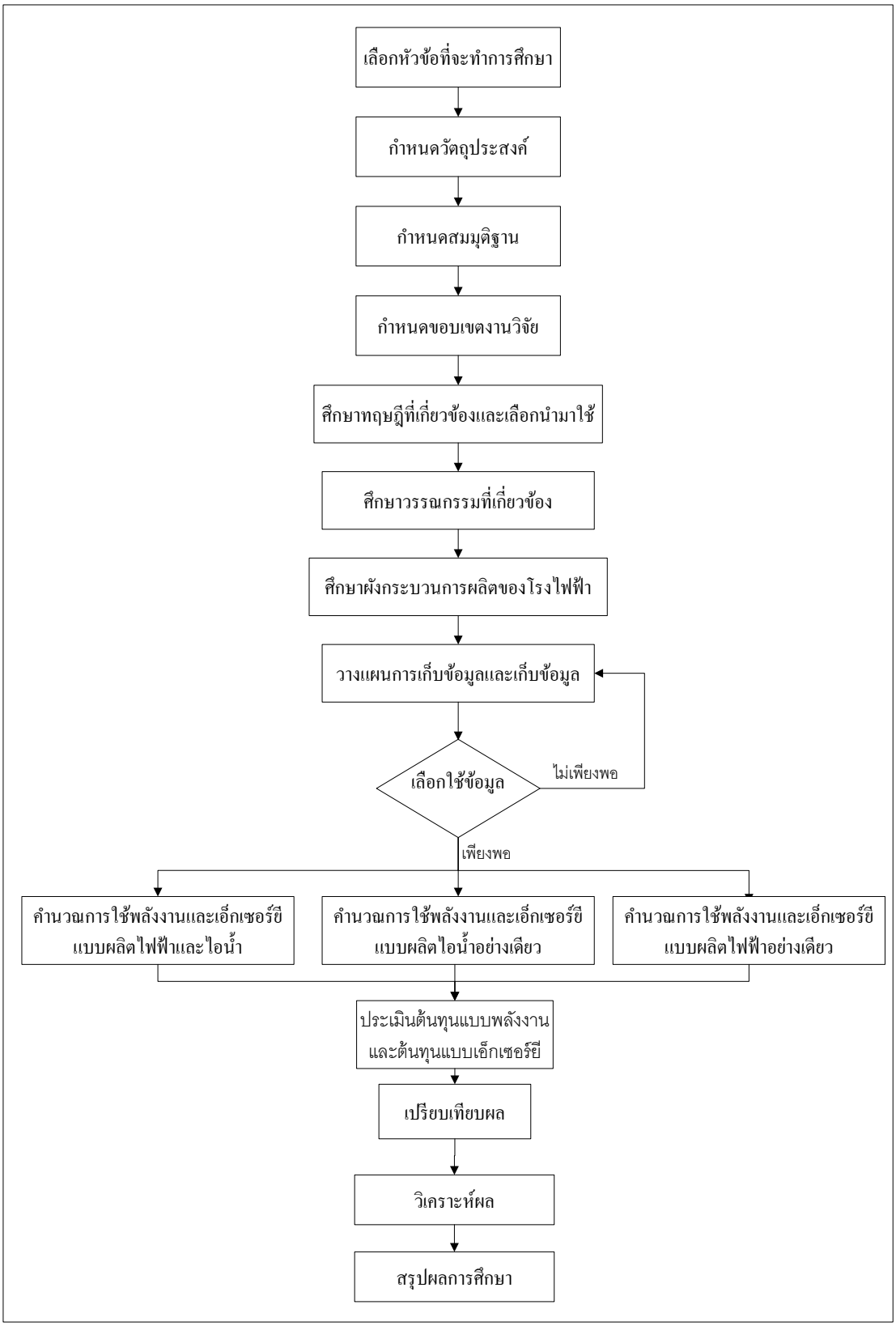
วิธีการศึกษาและดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยที่เลือกทำการศึกษาการ ได้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยี โดยชนิดของข้อมูลที่เก็บแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

1. แหล่งข้อมูลที่เก็บโดยตรง จะเป็นข้อมูลที่ได้มาจากระบบควบคุมอัตโนมัติ (Distributed control system) และการใช้เครื่องมือวัดโดยตรง
2. แหล่งข้อมูลที่เก็บโดยการคำนวณ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรง

ตารางที่ 3-1 อุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

ประเภทข้อมูล	อุปกรณ์เครื่องมือวัด
อุณหภูมิผนังหม้อไอน้ำ	Infrared temperature
อุณหภูมิภายในระบบ	Distributed control system
ความดันไอน้ำ	Distributed control system
ปริมาณน้ำเข้า	Distributed control system
กระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้า	Power meter
อัตราการใช้เชื้อเพลิง	Gas metering
ปริมาณอากาศเข้า	Air flow meter
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	Gas chromatograph online
ขนาดของอุปกรณ์	ตลับเมตร



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 3-2 อุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ในการคำนวณหาข้อมูล

ประเภทข้อมูลที่ต้องการ	วิธีการหา	อุปกรณ์เครื่องมือวัด
ปริมาณน้ำโบลว์ดาวน์แบบต่อเนื่อง	วัดปริมาตรน้ำเทียบกับเวลา	- ถังทรงกระบอกปริมาตร 20 ลิตร - นาฬิกาจับเวลา

ข้อมูลของโรงไฟฟ้า Co-generation 27 MWe

ค่าความร้อนก๊าซธรรมชาติ

$HHV_{Natural\ gas}$ = 46,707 kJ/kg

$LHV_{Natural\ gas}$ = 42,141 kJ/kg

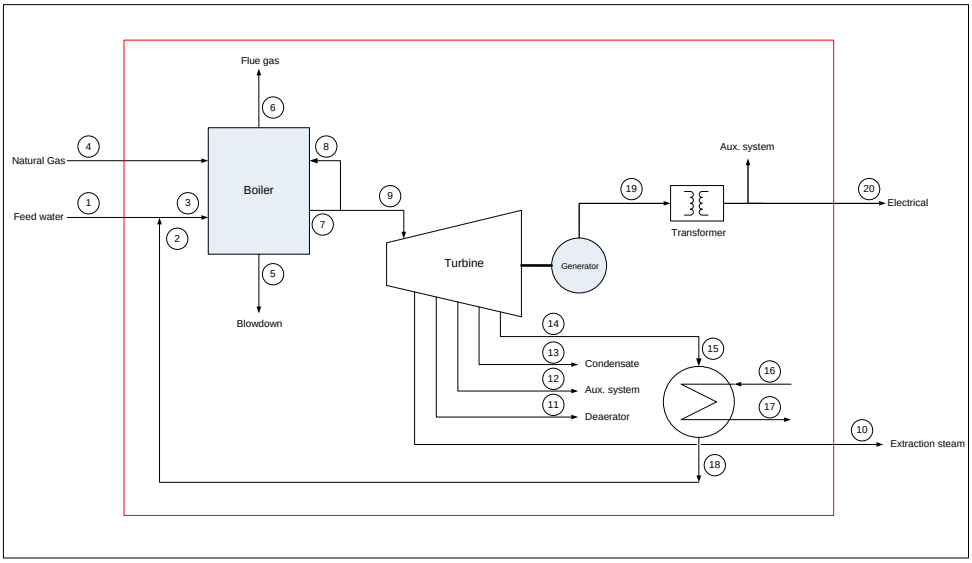
องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติ

C = 66.03%, H = 19.63%, N = 2.98%, O = 11.36%, S = 0%

อุณหภูมิอากาศอ้างอิง

T_o = 25 °C

1. ข้อมูลกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ

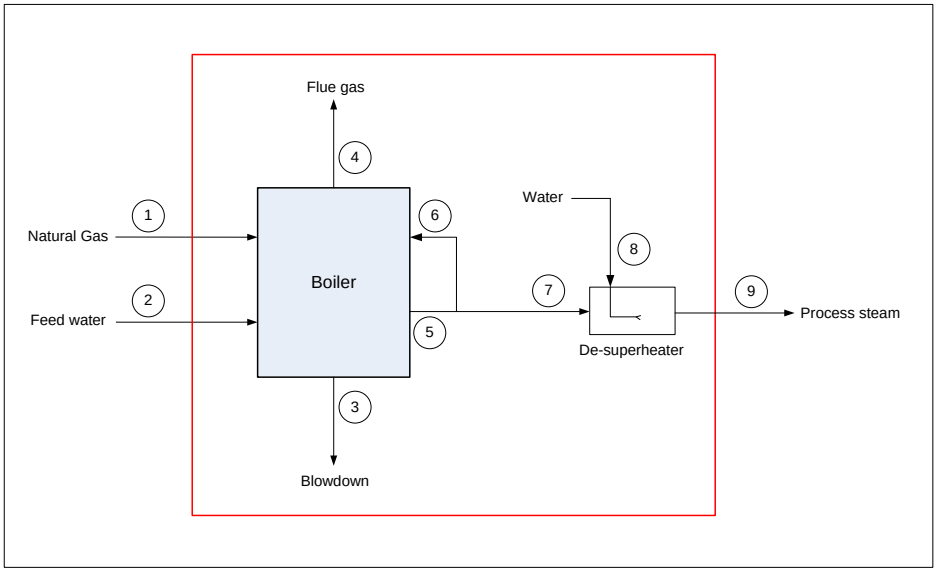


ภาพที่ 3-2 แผนผังกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ

ตารางที่ 3-3 ข้อมูลกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ

No.	Description	T	P	ṁ
		°C	barG	kg/hr
1	Make up feed water	208.0	121.0	86,400
2	Condensate return	208.0	121.0	65,600
3	Boiler feed water	208.0	121.0	152,000
4	Natural gas	24.3	27.2	9,531
5	Blowdown water	326.0	122.0	5,000
6	Flue gas	134.5	ATM	147,867
7	Steam outlet	514.0	112.2	132,000
8	Steam support for boiler	514.0	112.2	15,000
9	Steam inlet to turbine	505.0	110.0	132,000
10	Extraction steam 26 bar	240.0	25.7	25,700
11	Steam to dereator	202.0	7.4	10,500
12	Steam to aux. system	333.0	26.5	22,500
13	Condensate to flash tank	90.0	2.3	7,700
14	Steam to condenser	45.4	0.068	65,600
15	Steam inlet to condenser	45.2	0.068	65,600
16	Cooling water inlet	33.0	3.6	3,852,000
17	Cooling water outlet	41.8	3.0	3,852,000
18	Condensate for make up	44.0	0.095	65,600
19	Gross electrical	27,000 kWh		
20	Net electrical	26,200 kWh		
21	Boiler casing temperature	55.0	-	-
22	Turbine casing temperature	60.0	-	-
23	Condenser casing temperature	37.6	-	-

2. ข้อมูลกระบวนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว

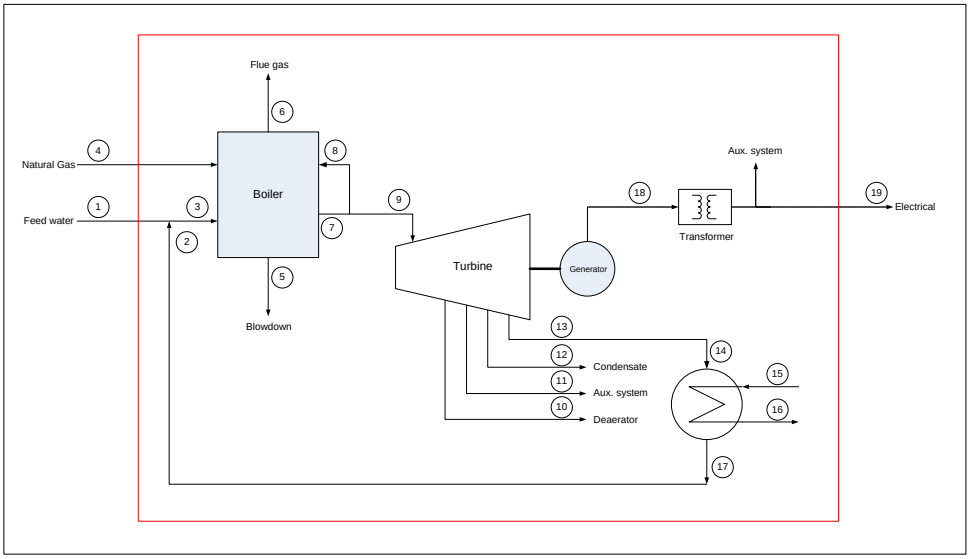


ภาพที่ 3-3 แผนผังกระบวนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว

ตารางที่ 3-4 ข้อมูลกระบวนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว

No.	Description	T	P	ṁ
		°C	barG	kg/hr
1	Natural gas	24.3	27.2	9,531
2	Boiler feed water	208.0	121.0	152,000
3	Blowdown water	326.0	122.0	5,000
4	Flue gas	134.5	ATM	147,867
5	Steam outlet	514.0	112.2	132,000
6	Steam support for boiler	514.0	112.2	15,000
7	Main steam outlet	505.0	110.0	132,000
8	Water spray	194.0	149.0	4,200
9	Process steam	352.0	44.9	136,200
10	De-superheater casing temperature	75.0	-	-

3. ข้อมูลกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว



ภาพที่ 3-4 แผนผังกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว

ตารางที่ 3-5 ข้อมูลกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว

No.	Description	T	P	ṁ
		°C	barG	kg/hr
1	Make up feed water	208.0	121.0	86,400
2	Condensate return	208.0	121.0	65,600
3	Boiler feed water	208.0	121.0	152,000
4	Natural gas	24.3	27.2	9,531
5	Blowdown water	326.0	122.0	5,000
6	Flue gas	134.5	ATM	147,867
7	Steam outlet	514.0	112.2	132,000
8	Steam support for boiler	514.0	112.2	15,000
9	Steam inlet to turbine	505.0	110.0	132,000
10	Steam to dereator	202.0	7.4	10,500
11	Steam to aux. system	333.0	26.5	22,500

ตารางที่ 3-5 (ต่อ)

No.	Description	T	P	ṁ
		°C	barG	kg/hr
12	Condensate to flash tank	90.0	2.3	7,700
13	Steam to condenser	45.4	0.068	91,300
14	Steam inlet to condenser	45.2	0.068	65,600
15	Cooling water inlet	33.0	3.6	3,852,000
16	Cooling water outlet	41.8	3.0	3,852,000
17	Condensate return for make up	44.0	0.095	65,600
18	Gross electrical	27,000 kWh		
19	Net electrical	26,200 kWh		
20	Boiler casing temperature	55.0	-	-
21	Turbine casing temperature	60.0	-	-
22	Condenser casing temperature	41.7	-	-

4. ข้อมูลราคาต้นทุน

ตารางที่ 3-6 ข้อมูลราคาต้นทุน

ข้อมูล	หน่วย	ค่าที่ได้
ก๊าซธรรมชาติ	Baht/kg	15.38
น้ำ	บาท/m^3	50
ค่าดำเนินการและบำรุงรักษา	บาท/เดือน	1,838,000
ราคาเครื่องจักรรวม	บาท	1,200,000,000

อัตราค่าไฟฟ้าที่ซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทกิจการขนาดใหญ่ (4.1.2) มีค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุด = 74.14 Baht/kW และพลังงานไฟฟ้าช่วง Peak = 3.5982 Baht/kWh, ช่วง Off-Peak = 2.1572 Baht/kWh

การคำนวณสมดุลพลังงาน

Point 1) boiler feed water

Point 2) natural gas

Point 3) steam outlet to turbine

Point 4) steam support for boiler

Point 5) blowdown water

Point 6) flue gas

Point 7) other loss

Point 8) irreversibility

เอนทัลปี

Input

1) $H_{\text{boiler feed water}} = \dot{m}_1 \times h_1$

= 152,000 x 892.47 = 135.66 x 10^6 kJ/h

2) $H_{\text{natural gas}} = \dot{m}_2 \times h_2$

= 9,531 x 46,707 = 445.16x 10^6 kJ/h

Output

3) $H_{\text{steam outlet to turbine}} = \dot{m}_3 \times h_3$

= 132,000 x 3,396.73 = 448.37 x 10^6 kJ/h

4) $H_{\text{steam support for boiler}} = \dot{m}_4 \times h_4$

= 15,000 x 3,396.73 = 50.95 x 10^6 kJ/h

5) $H_{\text{blowdown water}} = \dot{m}_5 \times h_5$

= 5,000 x 2,681.69 = 13.41 x 10^6 kJ/h

6) $H_{\text{flue gas}} = \dot{m}_6 \times c_{p,flue\ gas} \times \Delta T$

= 147,867 x 1.023 x (148-25) = 18.61 x 10^6 kJ/h

7) $\Sigma H_{\text{input}} = \Sigma H_{\text{output}} + H_{\text{loss}}$

H_{loss} = (135.66+445.16)-(448.37+50.95+13.41+18.61)) x 10^6

= 49.48 x 10^6 kJ/h

เอ็กเซอร์ยี

Input

1) $\mathcal{E}_{\text{boiler feed water}} = \dot{m}_1 \times (h_1 - (T_o \times s_1))$

= 152,000 x (892.47-(298 x 2.3892))

= 27.43 x 10^6 kJ/h

2) $\mathcal{E}_{\text{natural gas}} = \dot{m}_2 \times \text{LHV} \left(1.0438 + 0.0013\frac{H}{C} + 0.1083\frac{O}{C} + 0.0549\frac{N}{C}\right) + 6740\ \text{S}$

$= 9{,}531 \text{ x } \left(42{,}141 \text{ x } \left(1.0438 + 0.0013\left(\frac{19.63}{66.03}\right) + 0.1083\left(\frac{11.36}{66.03}\right) + 0.0549\left(\frac{2.98}{66.03}\right) + 6740(0)\right)\right)$

= 485.42 x 10^6 kJ/h

Output

3) $\mathcal{E}_{\text{steam outlet to turbine}} = \dot{m}_3 \times (h_3 - (T_o \times s_3))$

= 132,000 x (3,396.73 -(298 x 6.5783))

= 189.60 x 10^6 kJ/h

4) $\mathcal{E}_{\text{steam support for boiler}} = \dot{m}_4 \times (h_4 - (T_o \times s_4))$

= 15,000 x (3,396.73 -(298 x 6.5783))

= 21.55 x 10^6 kJ/h

5) $\mathcal{E}_{\text{blowdown water}} = \dot{m}_5 \times (h_5 - (T_o \times s_5))$

= 5,000 x (2,681.69 -(298 x 5.4829))

= 5.24 x 10^6 kJ/h

6) $\mathcal{E}_{\text{flue gas}} = H_6 - T_0\Delta S = H_6 - \left(\frac{T_0 H_6}{T_6}\right)$

$= 18.61 \text{ x } 10^6 - \left(\frac{298 \text{ x } 18.61}{421}\right)$

= 5.44 x 10^6 kJ/h

7) $\mathcal{E}_{\text{loss}} = H_{\text{loss}} - T_0\Delta S = H_{\text{loss}} - \left(\frac{T_0 H_{\text{loss}}}{T_7}\right)$

$= 49.48 \text{ x } 10^6 - \left(\frac{298 \text{ x } 49.48 \text{ x } 10^6}{328}\right)$

= 4.53 x 10^6 kJ/h

8) irreversibility = $\Sigma\mathcal{E}_{\text{input}} - \Sigma\mathcal{E}_{\text{output}} - \Sigma\mathcal{E}_{\text{loss}}$

= ((27.43 + 485.42) - (189.60 + 21.55 + 5.24 + 5.44) - 4.53) x 10^6

= 286.50 x 10^6 kJ/h

สมดุลพลังงาน

1. สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ

ตารางที่ 3-7 สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ ส่วนหม้อน้ำ (Boiler)

			T	P	ṁ	h	s	H	Ɛ	%	
			℃	bar	kg/h	kJ/kg	kJ/(kg.k)	x 10^6 kJ/h	x 10^6 kJ/h	H	Ɛ
Input		boiler feed water	208.0	121.0	152,000	892.47	2.3892	135.66	27.43	23.36	5.35
		natural gas	24.3	27.2	9,531	46,707.00		445.16	485.42	76.64	94.65
Output	ใช้ประโยชน์ได้	steam outlet to turbine	514.0	112.2	132,000	3,396.73	6.5783	448.37	189.60	77.20	36.97
		steam support for boiler	514.0	112.2	15,000	3,396.73	6.5783	50.95	21.55	8.77	4.20
	สูญเสีย	blowdown water	326.0	122.0	5,000	2,681.69	5.4829	13.41	5.24	2.31	1.02
		flue gas	134.5					18.61	5.44	3.20	1.06
		other loss						49.48	4.53	8.52	0.88
		irreversibility						-	286.50		55.86

ประสิทธิภาพเอนทัลปี

$$\%\,\eta_E = \frac{448.37 + 50.95}{135.66 + 445.16} \times 100\%$$

$$= 77.20\%$$

ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี

$$\%\,\eta_\varepsilon = \frac{189.60 + 21.55}{27.43 + 485.42} \times 100\%$$

$$= 36.97\%$$

ตารางที่ 3-8 สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ (Turbogenerator)

			T	P	$\dot{m}$	h	s	H	ε	%	
			°C	bar	kg/h	kJ/kg	kJ/(kg.k)	x 10^6 kJ/h	x 10^6 kJ/h	H	ε
Input		steam inlet to turbine	505.0	110.0	132,000	3,375.78	6.5599	445.60	187.56	100	100
Output	ใช้ประโยชน์ได้	extraction steam (26 bar)	240.0	25.7	25,700	2,848.59	6.3369	73.21	24.68	16.43	13.16
		steam to deaerator	202.0	7.4	10,500	2,847.62	6.8686	29.90	8.41	6.71	4.48
		steam to AUX system	333.0	26.5	22,500	3,084.20	6.7472	69.39	24.15	15.57	12.88
		Generator (26.2 MWe)						94.32			
	สูญเสีย	condensate to flash tank	90	2.3	7,700	377.09	1.1925	2.90	0.17	0.65	0.09
		steam to condenser	45.4	0.068	65,600	2,584.10	8.3271	169.52	6.73	38.04	3.59
		other loss						6.36	0.67	1.43	0.36
		irreversibility						-	28.44		15.16

ประสิทธิภาพเอนทัลปี

$$\%\,\eta_E = \frac{73.21 + 29.90 + 69.39}{445.60} \times 100\%$$

$$= 38.71\%$$

ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี

$$\%\,\eta_\varepsilon = \frac{24.68 + 8.41 + 24.15}{187.56} \times 100\%$$

$$= 30.52\%$$

ตารางที่ 3-9 สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ ส่วนเครื่องควบแน่น (Condenser)

			T	P	ṁ	h	s	H	Ɛ	%	
			℃	bar	kg/h	kJ/kg	kJ/(kg.k)	x 10^6 kJ/h	x 10^6 kJ/h	H	Ɛ
Input		steam inlet to condenser	45.2	0.068	65,600	2583.72	8.3259	169.49	6.73	24.10	31.64
		cooling water inlet	33.0	3.6	3,852,000	138.61	0.4778	533.93	14.54	75.90	68.36
Output	ใช้ประโยชน์ได้	cooling water outlet	41.8	3	3,852,000	175.32	0.5963	675.33	9.16	96.01	43.06
	สูญเสีย	condensate for make-up	44.0	0.095	65,600	184.25	0.6255	12.09	0.14	1.72	0.66
		other loss						16.00	0.85	2.27	3.99
		irreversibility						-	11.12		52.29

ประสิทธิภาพเอนทัลปี

$$\%\,\eta_E = \frac{675.33}{169.49 + 533.93} \times 100\%$$

$$= 96.01\%$$

ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี

$$\%\,\eta_\varepsilon = \frac{9.16}{6.73 + 14.54} \times 100\%$$

$$= 43.06\%$$

2. สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว

ตารางที่ 3-10 สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว ส่วนหม้อน้ำ (Boiler)

			T	P	$\dot{m}$	h	s	H	Ɛ	%	
			℃	bar	kg/h	kJ/kg	kJ/(kg.k)	x 10^6 kJ/h	x 10^6 kJ/h	H	Ɛ
Input		boiler feed water	208.0	121.0	152,000	892.47	2.3892	135.66	27.43	23.36	5.35
		natural gas	24.3	27.2	9,531	46,707.00		445.16	485.42	76.64	94.65
Output	ใช้ประโยชน์ได้	steam outlet to turbine	514.0	112.2	132,000	3,396.73	6.5783	448.37	189.60	77.20	36.97
		steam support for boiler	514.0	112.2	15,000	3,396.73	6.5783	50.95	21.55	8.77	4.20
	สูญเสีย	blowdown water	326.0	122.0	5,000	2,681.69	5.4829	13.41	5.24	2.31	1.02
		flue gas	134.5					18.61	5.44	3.20	1.06
		other loss						49.48	4.53	8.52	0.88
		irreversibility						-	286.50		55.86

ประสิทธิภาพเอนทัลปี

$$\%\,\eta_E = \frac{448.37 + 50.95}{135.66 + 445.16} \times 100\%$$

$$= 77.20\%$$

ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี

$$\%\,\eta_\varepsilon = \frac{189.60 + 21.55}{27.43 + 485.42} \times 100\%$$

$$= 36.97\%$$

ตารางที่ 3-11 สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว ส่วนวาล์วลดความร้อนยวดยิ่ง (De-superheater)

			T	P	ṁ	h	s	H	Ɛ	%	
			℃	bar	kg/h	kJ/kg	kJ/(kg.k)	x 10^6 kJ/h	x 10^6 kJ/h	H	Ɛ
Input		main steam outlet	505.0	110	132,000	3375.78	6.5599	445.60	187.56	99.22	99.64
		water spray	194.0	149.0	4,200	831.61	2.2541	3.49	0.67	0.78	0.36
Output	ใช้ประโยชน์ได้	process steam	322.0	25.7	136,200	3,060.31	6.7208	416.81	144.03	92.81	76.52
	สูญเสีย	other loss						32.28	1.71	7.19	0.91
		irreversibility						-	42.49		22.57

ประสิทธิภาพเอนทัลปี

$$\%\,\eta_E = \frac{416.81}{445.60 + 3.49} \times 100\%$$

$$= 92.81\%$$

ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี

$$\%\,\eta_\varepsilon = \frac{144.03}{187.56 + 0.67} \times 100\%$$

$$= 76.52\%$$

3. สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว

ตารางที่ 3-12 สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว ส่วนหม้อไอน้ำ (Boiler)

			T	P	ṁ	h	s	H	Ɛ	%	
			℃	bar	kg/h	kJ/kg	kJ/(kg.k)	x 10^6 kJ/h	x 10^6 kJ/h	H	Ɛ
Input		boiler feed water	208.0	121.0	152,000	892.47	2.3892	135.66	27.43	23.36	5.35
		natural gas	24.3	27.2	9,531	46,707.00		445.16	485.42	76.64	94.65
Output	ใช้ประโยชน์ได้	steam outlet to turbine	514.0	112.2	132,000	3,396.73	6.5783	448.37	189.60	77.20	36.97
		steam support for boiler	514.0	112.2	15,000	3,396.73	6.5783	50.95	21.55	8.77	4.20
	สูญเสีย	blowdown water	326.0	122.0	5,000	2,681.69	5.4829	13.41	5.24	2.31	1.02
		flue gas	134.5					18.61	5.44	3.20	1.06
		other loss						49.48	4.53	8.52	0.88
		irreversibility						-	286.50		55.86

ประสิทธิภาพเอนทัลปี

$$\%\,\eta_E = \frac{448.37 + 50.95}{135.66 + 445.16} \times 100\%$$

$$= 77.20\%$$

ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี

$$\%\,\eta_\varepsilon = \frac{189.60 + 21.55}{27.43 + 485.42} \times 100\%$$

$$= 36.97\%$$

ตารางที่ 3-13 สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ (Turbogenerator)

			T	P	ṁ	h	s	H	Ɛ	%	
			℃	bar	kg/h	kJ/kg	kJ/(kg.k)	x 10^6 kJ/h	x 10^6 kJ/h	H	Ɛ
Input		steam inlet to turbine	505.0	110.0	132,000	3,375.78	6.5599	445.60	187.56	100	100
Output	ใช้ประโยชน์ได้	steam to deaerator	202.0	7.4	10,500	2,847.62	6.8686	29.90	8.41	6.71	4.48
		steam to AUX system	333.0	26.5	22,500	3,084.20	6.7472	69.39	24.15	15.57	12.88
		Generator (26.2 MWe)						94.32			
	สูญเสีย	condensate to flash tank	90	2.3	7,700	377.09	.1925	2.90	0.17	0.65	0.09
		steam to condenser	45.4	0.068	91,300	2,584.10	8.3271	235.93	9.37	52.95	5.00
		other loss						13.16	1.38	2.95	0.74
		irreversibility						-	49.76		26.53

ประสิทธิภาพเอนทัลปี

$$\%\,\eta_E = \frac{29.90 + 69.39}{445.60} \times 100\%$$

$$= 22.28\%$$

ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี

$$\%\,\eta_\varepsilon = \frac{8.41 + 24.15}{187.56} \times 100\%$$

$$= 17.36\%$$

ตารางที่ 3-14 สมดุลพลังงานของกระบวนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว ส่วนเครื่องควบแน่น

			T	P	ṁ	h	s	H	Ɛ	%	
			℃	bar	kg/h	kJ/kg	kJ/(kg.k)	x 10^6 kJ/h	x 10^6 kJ/h	H	Ɛ
Input		steam inlet to condenser	45.2	0.068	91,300	2583.72	8.3259	235.89	9.37	30.64	39.18
		cooling water inlet	33.0	3.6	3,852,000	138.61	0.4778	533.93	14.54	69.36	60.82
Output	ใช้ประโยชน์ได้	cooling water outlet	43.4	2.9	3,852,000	181.58	0.6161	699.45	7.77	90.86	32.51
	สูญเสีย	condensate for make-up	44.2	0.095	65,600	185.09	0.6281	12.14	0.14	1.58	0.57
		other loss						58.23	3.09	7.56	12.93
		irreversibility						-	12.91		53.99

ประสิทธิภาพเอนทัลปี

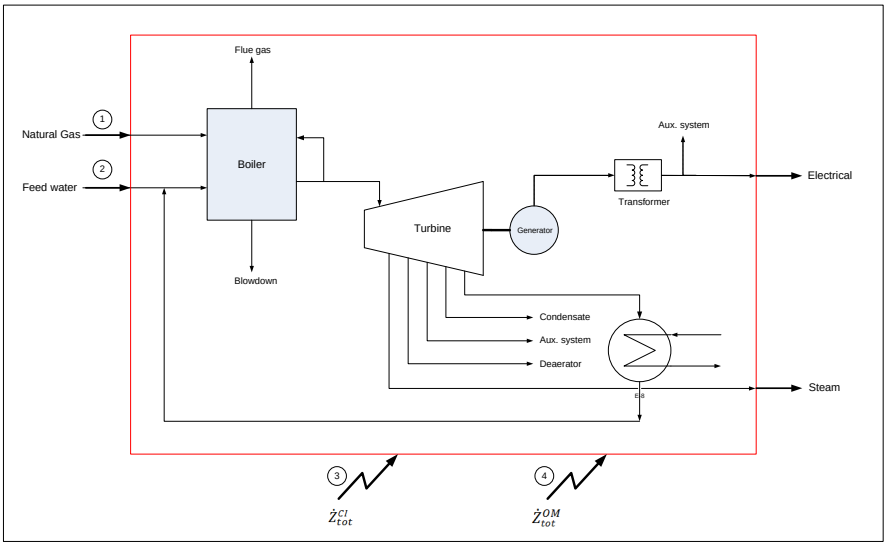
$$\%\,\eta_E = \frac{699.45}{235.89 + 533.93} \times 100\%$$
$$= 90.86\%$$

ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี

$$\%\,\eta_\varepsilon = \frac{7.77}{9.37 + 14.54} \times 100\%$$
$$= 32.51\%$$

การประเมินต้นทุนพลังงาน

1. การประเมินต้นทุนพลังงาน แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ



ภาพที่ 3-5 แผนผังต้นทุนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ

ตารางที่ 3-15 ข้อมูลต้นทุนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ

No.	Description	C	$\dot{m}$	$\dot{E}$	Output
		Baht/kg	kg/hr	Baht/hr	
1	Natural gas	15.38	9,531	146,587	
2	Feed water	50.00	86	4,300	
3	Capital investment			6,667	
4	O&M cost			2,552	
5	Net electrical				26,200 kWh
6	Steam				25.7 Ton-steam

อัตราต้นทุน Natural gas

$$\dot{E_F} = 15.38 \text{ x } 9{,}531$$

$$= 146{,}587 \text{ Baht/hr}$$

อัตราต้นทุน Feed water

$$\dot{E_W} = 50 \text{ x } 86$$

$$= 4{,}300 \text{ Baht/hr}$$

อัตราต้นทุนรวมเครื่องจักร

$$\dot{Z}_{tot}^{CI} = \frac{1{,}200{,}000{,}000}{24 \text{ x } 300 \text{ x } 25}$$

$$= 6{,}667 \text{ Baht/hr}$$

อัตราต้นทุนรวมของค่าดำเนินการและบำรุงรักษา

$$\dot{Z}_{tot}^{OM} = \frac{840{,}000+998{,}000}{24 \text{ x } 30}$$

$$= 6{,}667 \text{ Baht/hr}$$

อัตราต้นทุนรวมในการผลิตของระบบ

$$\dot{E}_{P,tot} = 146{,}586 + 4{,}320 + 6{,}667 + 2{,}552$$

$$= 160{,}125 \text{ Baht/hr}$$

การปันส่วนพลังงาน

สัดส่วนพลังงานของไฟฟ้า $= \frac{94.32}{94.32+73.21}$

$$= 56.30\%$$

สัดส่วนพลังงานของไอน้ำ $= \frac{73.21}{94.32+73.21}$

$$= 43.70\%$$

ดังนั้น

<u>ไฟฟ้า</u>

อัตราต้นทุนของไฟฟ้า = 160,125 x 56.30%

$$= 90{,}150.38 \text{ Baht/hr}$$

หรือ

ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย $= \frac{90{,}150.38}{26{,}200}$

$$= 3.44 \text{ Baht/kWh}$$

ไอน้ำ

อัตราต้นทุนของไอน้ำ = 160,125 x 43.70%

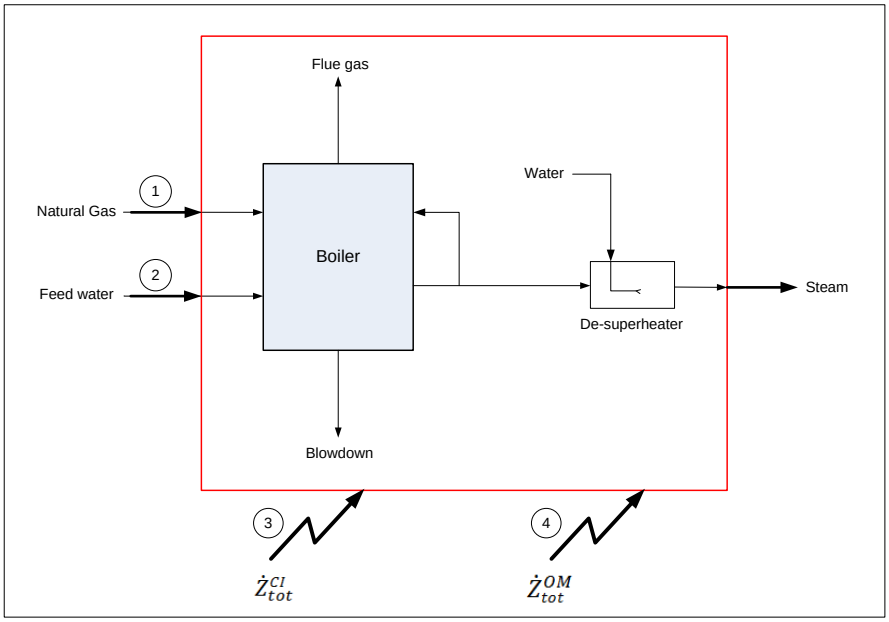
= 69,974.63 Baht/hr

หรือ

$$\text{ราคาไอน้ำต่อหน่วย} = \frac{69{,}974.63}{25.7}$$

= 2,722.75 Baht/Ton-steam

2. การประเมินต้นทุนพลังงาน แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว



ภาพที่ 3-6 แผนผังต้นทุนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว

ตารางที่ 3-16 ข้อมูลต้นทุนการผลิต แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว

No.	Description	C	ṁ	Ė	Output
		Baht/kg	kg/hr	Baht/hr	
1	Natural gas	15.38	9,531	146,587	
2	Feed water	50	86	4,300	
3	Capital investment			6,667	
4	O&M cost			2,552	
5	Steam				136.2 Ton-steam

อัตราต้นทุน Natural gas

$$\dot{E_F} = 15.38 \text{ x } 9,531$$

$$= 146,587 \text{ Baht/hr}$$

อัตราต้นทุน Feed water

$$\dot{E_W} = 50 \text{ x } 86$$

$$= 4,300 \text{ Baht/hr}$$

อัตราต้นทุนรวมเครื่องจักร

$$\dot{Z}_{tot}^{CI} = \frac{1,200,000,000}{24 \text{ x } 300 \text{ x } 25}$$

$$= 6,667 \text{ Baht/hr}$$

อัตราต้นทุนรวมของค่าดำเนินการและบำรุงรักษา

$$\dot{Z}_{tot}^{OM} = \frac{840,000+998,000}{24 \text{ x } 30}$$

$$= 6,667 \text{ Baht/hr}$$

อัตราต้นทุนรวมในการผลิตของระบบ

$$\dot{E}_{P,tot} = 146,586 + 4,320 + 6,667 + 2,552$$

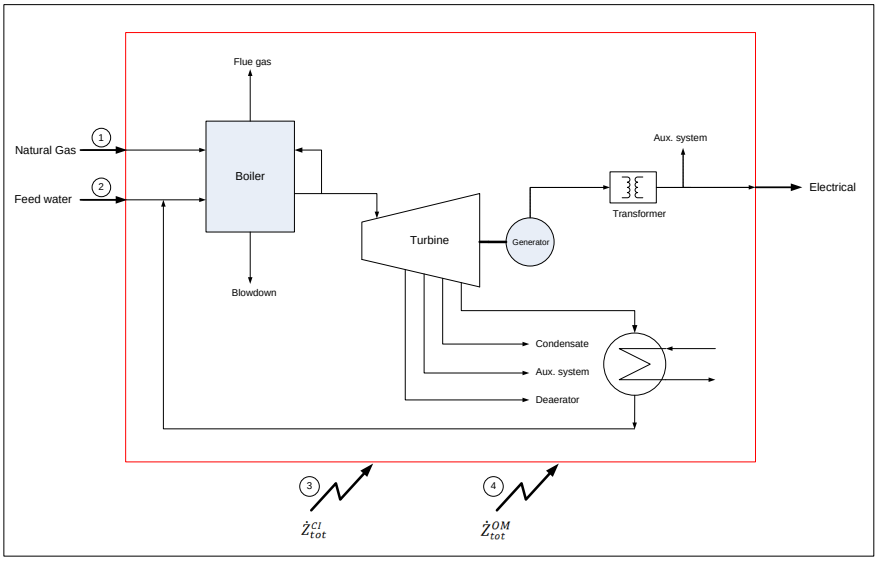
$$= 160,125 \text{ Baht/hr}$$

ดังนั้น

ราคาไอน้ำต่อหน่วย $= \frac{160,125}{136.2}$

$$= 1,175.66 \text{ Baht/Ton-steam}$$

3. การประเมินต้นทุนพลังงาน แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว



ภาพที่ 3-7 แผนผังต้นทุนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว

ตารางที่ 3-17 ข้อมูลต้นทุนการผลิต แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว

No.	Description	C	ṁ	Ė	Output
		Baht/kg	kg/hr	Baht/hr	
1	Natural gas	15.38	9,531	146,587	
2	Feed water	50	86	4,300	
3	Capital investment			6,667	
4	O&M cost			2,552	
5	Net electrical				26,200 kWh

อัตราต้นทุน Natural gas

$$\dot{E_F} = 15.38 \text{ x } 9{,}531$$

$$= 146{,}587 \text{ Baht/hr}$$

อัตราต้นทุน Feed water

$$\dot{E_W} = 50 \text{ x } 86$$

= 4,300 Baht/hr

อัตราต้นทุนรวมเครื่องจักร

$$\dot{Z}_{tot}^{CI} = \frac{1{,}200{,}000{,}000}{24 \text{ x } 300 \text{ x } 25}$$

= 6,667 Baht/hr

อัตราต้นทุนรวมของค่าดำเนินการและบำรุงรักษา

$$\dot{Z}_{tot}^{OM} = \frac{840{,}000+998{,}000}{24 \text{ x } 30}$$

= 6,667 Baht/hr

อัตราต้นทุนรวมในการผลิตของระบบ

$$\dot{E}_{P,tot} = 146{,}586 + 4{,}320 + 6{,}667 + 2{,}552$$

= 160,125 Baht/hr

ดังนั้น

$$\text{ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย} = \frac{160{,}125}{26{,}200}$$

= 6.11 Baht/kWh

การใช้ประโยชน์จากทรัพยากร (Utilization Factor)

1. แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ (Useful output : Electrical 26.2 kWh, steam 25.7 t/hr)

$$\text{UF}_{\text{ผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ}} = \frac{\text{ผลิตผลที่นำไปใช้ประโยชน์จริง}}{\text{กำลังการผลิตได้}}$$

$$= \frac{73.21+94.32}{73.21+29.90+69.39+ 94.32+169.52+2.9+6.36}$$

= 37.60%

2. แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว (Useful output : steam 136.2 t/hr)

$$\text{UF}_{\text{ผลิตไอน้ำอย่างเดียว}} = \frac{416.81}{416.81+32.28}$$

= 92.81%

3. แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว (Useful output : Electrical 26.2 kWh)

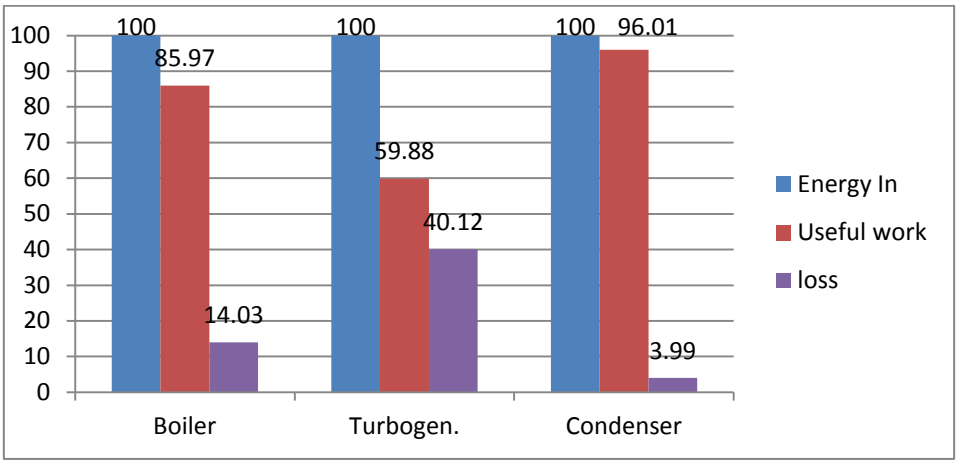
$$\text{UF}_{\text{ผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว}} = \frac{94.32}{29.90+69.39+94.31+2.90+235.93+13.16}$$

= 21.17%

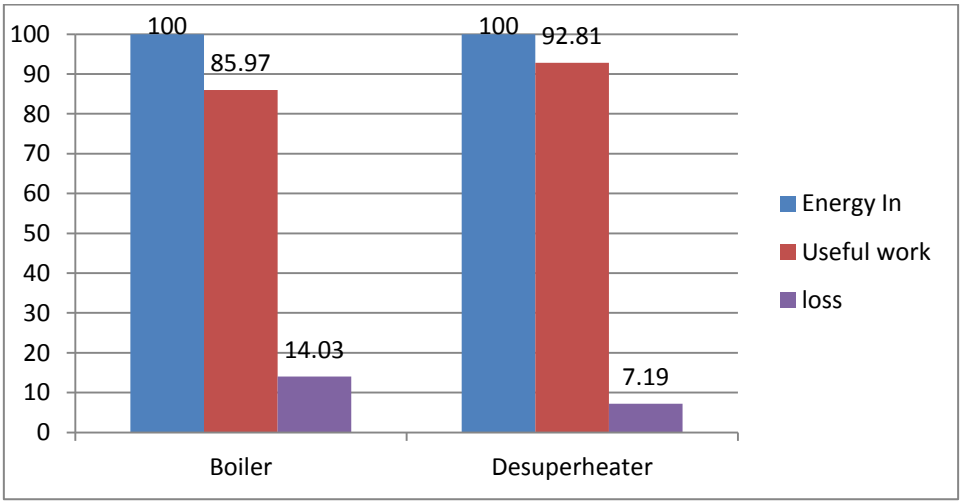
บทที่ 4
ผลการวิจัย

การประเมินปริมาณการใช้พลังงาน ตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

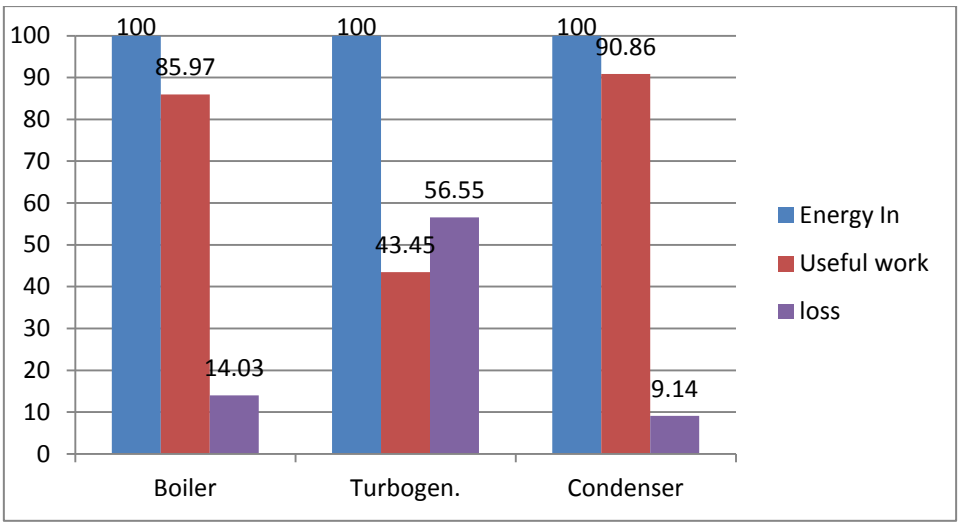
การศึกษาการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้า Co-generation ขนาด 27 MWe โดยทำการประเมินจำแนกแต่ละอุปกรณ์เปรียบเทียบ 3 กรณี คือ แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียวและแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว ตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้เอนทัลปี



ภาพที่ 4-1 ปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ



ภาพที่ 4-2 ปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว

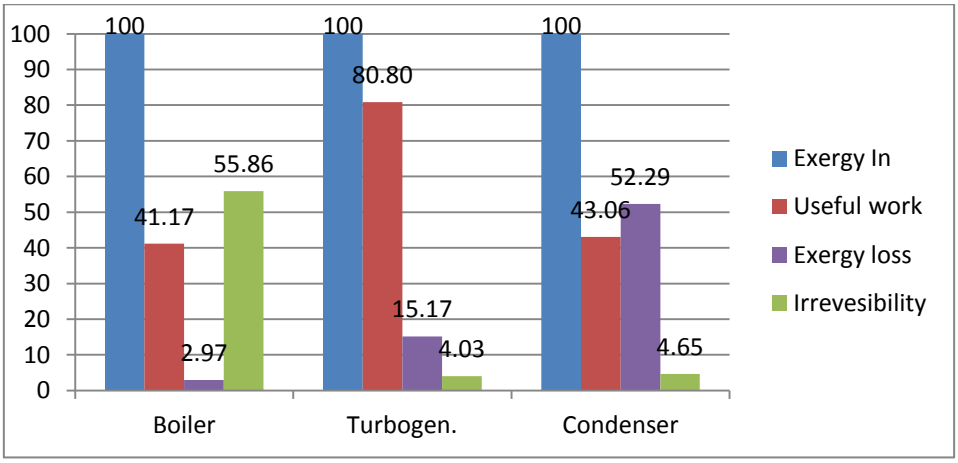


ภาพที่ 4-3 ปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว

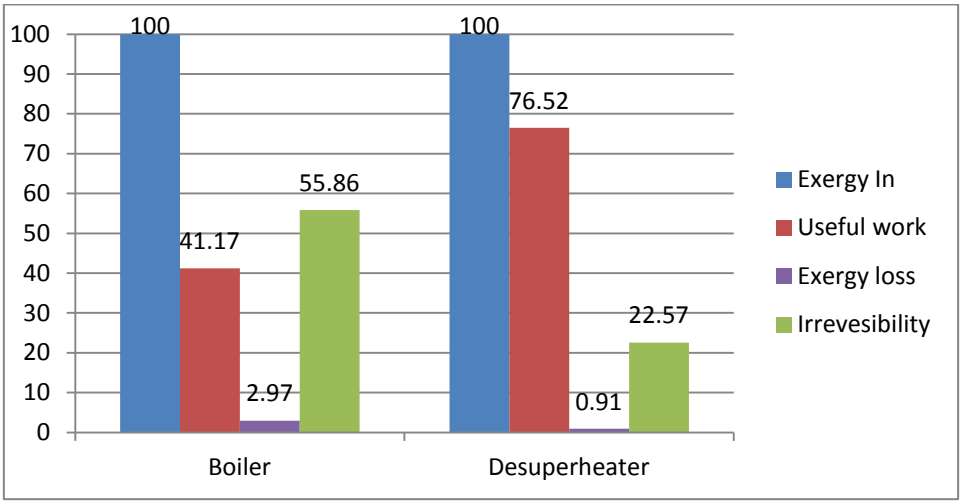
จากผลการศึกษาปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่า 1) กระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ จะมีการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้มากที่สุดที่เครื่องควบแน่น 96.01% และมีการสูญเสียพลังงานมากที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ 40.12% 2) กระบวนการผลิตแบบผลิตไอน้ำอย่างเดียวจะมีการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้มากที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ 92.81% และมีการสูญเสียพลังงานมากที่สุดที่หม้อไอน้ำ 14.03% 3) กระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียวจะมีการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้มากที่สุดที่เครื่องควบแน่น 90.86% และมีการสูญเสียพลังงานมากที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ 56.55%

การประเมินปริมาณการใช้พลังงาน ตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

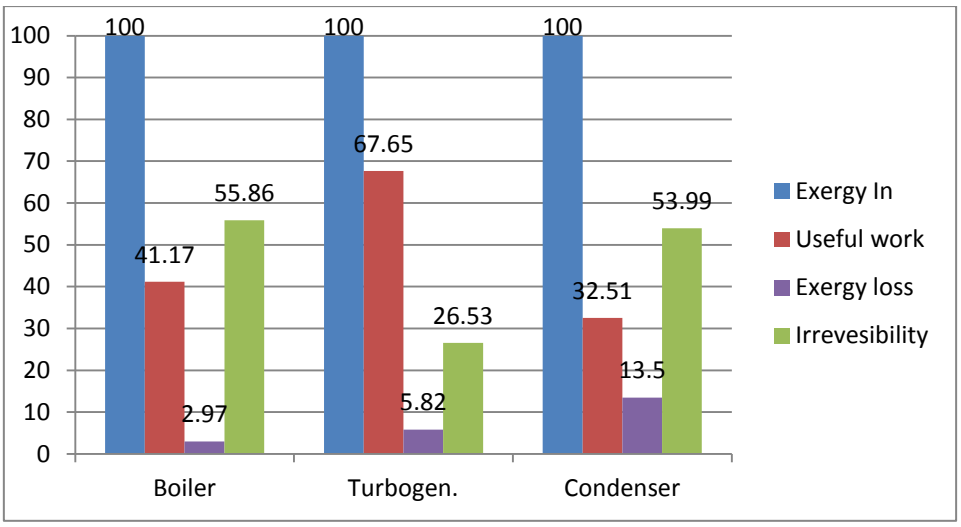
การศึกษาการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้า Co-generation ขนาด 27 MWe โดยทำการประเมินจำแนกแต่ละอุปกรณ์เปรียบเทียบ 3 กรณี คือ แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียวและแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว ตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้เอ็กเซอร์ยี



ภาพที่ 4-4 ปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ



ภาพที่ 4-5 ปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว



ภาพที่ 4-6 ปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว

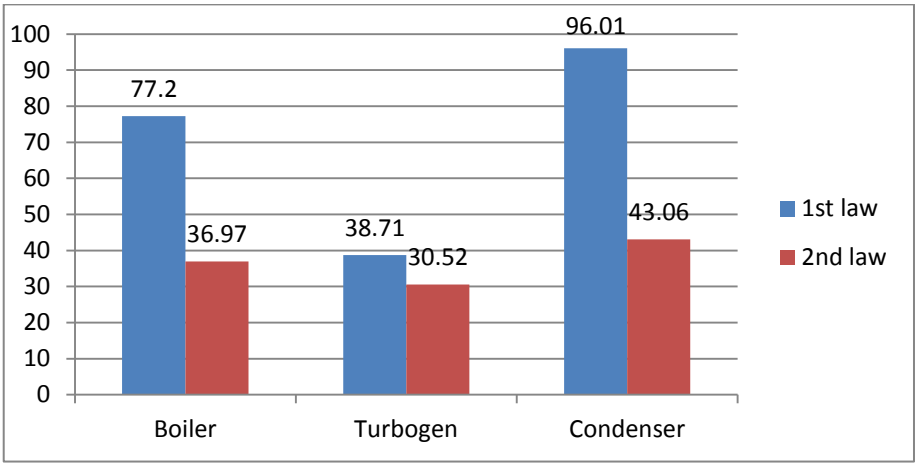
จากผลการศึกษาปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่า 1) กระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ จะมีการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้มากที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ 80.80% มีการสูญเสียพลังงานมากที่สุดที่เครื่องควบแน่น 52.29% และพลังงานที่ผันกลับไม่ได้มากที่สุดที่หม้อไอน้ำ 55.86%
2) กระบวนการผลิตแบบผลิตไอน้ำอย่างเดียวจะมีการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้มากที่สุดที่วาล์วลดความร้อนยวดยิ่ง 76.52% และมีการสูญเสียพลังงานมากที่สุดที่หม้อไอน้ำ 2.97% และพลังงานที่ผันกลับไม่ได้มากที่สุดที่หม้อไอน้ำ 55.86% 3) กระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียวจะมีการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้มากที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ 67.65% และมีการสูญเสียพลังงานมากที่สุดที่เครื่องควบแน่น 13.5% และพลังงานที่ผันกลับไม่ได้มากที่สุดที่หม้อไอน้ำ 55.86%

ทั้งนี้ จากผลการศึกษาปริมาณการใช้พลังงานตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้เอ็กเซอร์ยีนั้นสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ เพราะเอ็กเซอร์ยีสามารถถูกทำลายได้โดยการผันกลับไม่ได้ของระบบ (Irreversibility) ซึ่งเมื่อระบบมวลควบคุมเปลี่ยนสภาวะมายังสภาวะคงที่ (สภาวะตาย) โดยไม่มีงานที่ได้จากระบบแล้ว จะทำให้ศักยภาพของการทำงานสูญเสียไปหมด

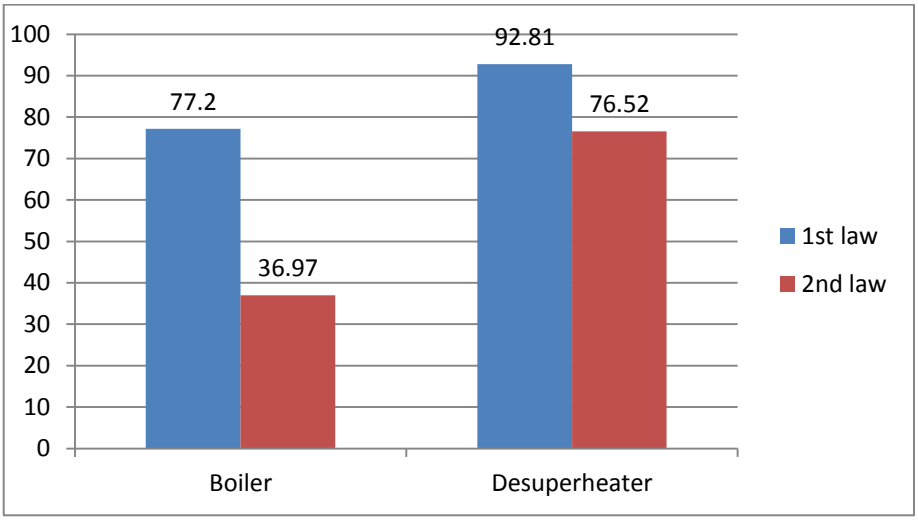
ดังนั้น ศักยภาพของการทำงานของกระบวนการผลิตทั้ง 3 แบบ จะมีสูญเสียศักยภาพพลังงานเนื่องจากพลังงานที่ผันกลับไม่ได้มากที่สุดที่หม้อไอน้ำ

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานจำแนกแต่ละอุปกรณ์

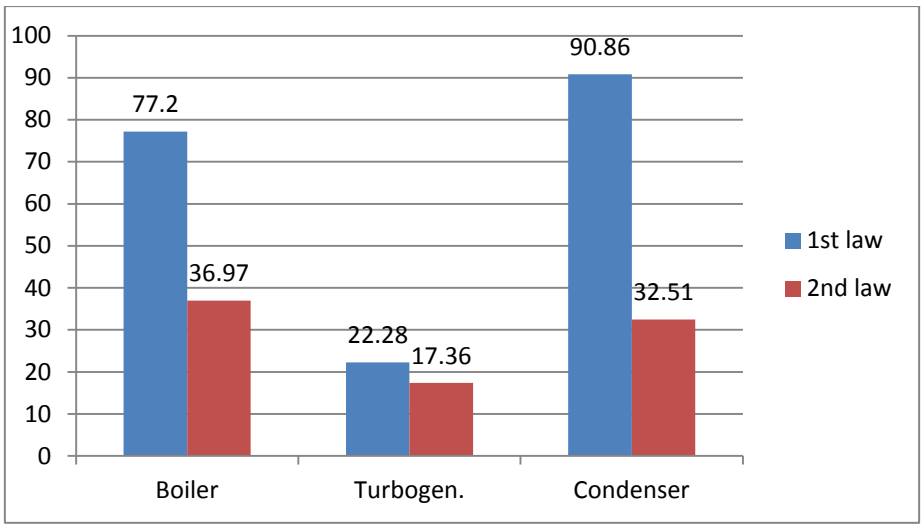
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้า Co-generation ขนาด 27 MWe โดยทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal Efficiency) จำแนกแต่ละอุปกรณ์ ตามกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ และทำการเปรียบเทียบ 3 กรณี คือ แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียวและแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว



ภาพที่ 4-7 ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ



ภาพที่ 4-8 ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว



ภาพที่ 4-9 ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว

จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางความร้อนของการใช้พลังงาน จำแนกแต่ละอุปกรณ์ตามกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่า 1) กระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากที่สุดที่เครื่องควบแน่น 96.01% 43.06% และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานน้อยที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ 38.71% 30.52% 2) กระบวนการผลิตแบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากที่สุดที่วาล์วลดความร้อนยวดยิ่ง 92.81% 76.52% และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานน้อยที่สุดที่หม้อไอน้ำ 77.20% 36.97% 3) กระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากที่สุดที่เครื่องควบแน่น 90.86% 32.51% และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานน้อยที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ 22.28% 17.36%

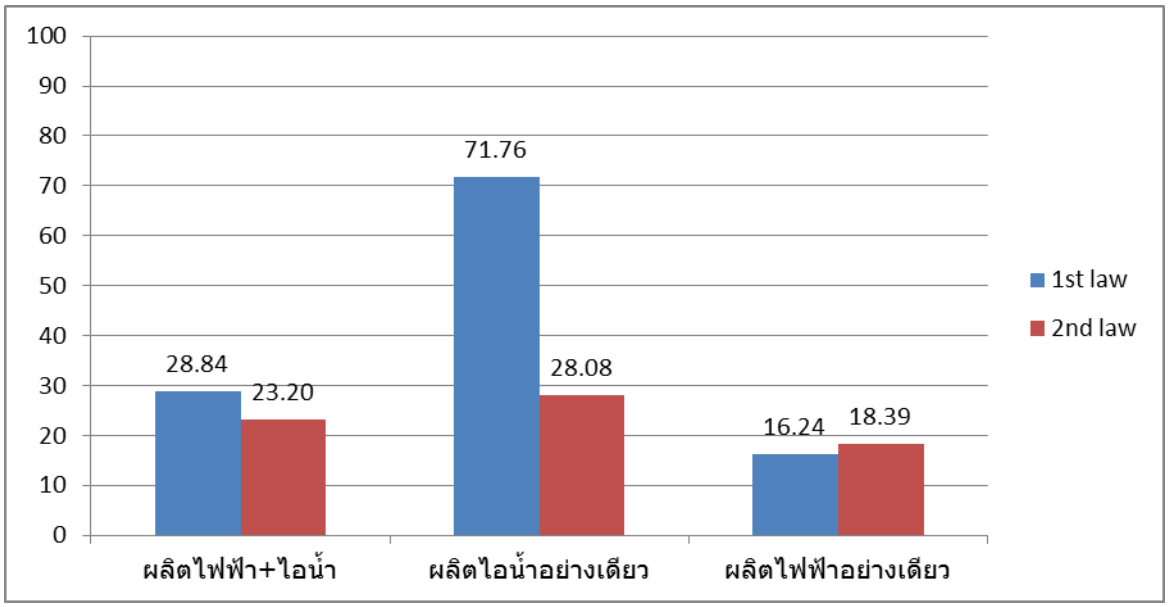
ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของการใช้พลังงานตามกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ที่มีค่าต่างกันมากที่สุดคือ เครื่องควบแน่น ดังนั้นจึงทำให้ทราบว่าเครื่องควบแน่นมีการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ส่วนหม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพทางความร้อน 77.20% ซึ่งเมื่อเทียบกับมาตรฐานแล้วนั้น หม้อน้ำประเภท Gas Boiler จะมีประสิทธิภาพมาตรฐาน 75% ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน

ทั้งนี้ จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานพบว่าในกระบวนการผลิตทั้ง 3 กรณี มีค่าประสิทธิภาพเอนทัลปี (กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์) จะมีค่าสูงกว่าค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี (กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์) เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยกฎข้อที่สองของ

เทอร์โมไดนามิกส์สามารถบอกถึงพลังงานที่ผันกลับไม่ได้ที่สูญเสียในกระบวนการผลิตซึ่งเป็นการสูญเสียศักยภาพพลังงาน จึงได้ค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่น้อยกว่า

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโรงไฟฟ้า Co-generation ขนาด 27 MWe โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal efficiency) รวมของทั้งกระบวนการผลิต ตามกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ทั้ง 3 กรณี คือ แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียวและแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว



ภาพที่ 4-10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานตามกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่า 1) กระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 28.84% และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 23.20% 2) แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 71.76% และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 28.08% 3) แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 16.24% และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 18.39%

จากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์นั้น พลังงานที่ผันกลับไม่ได้ในกระบวนการผลิตจะมีผลต่อค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีโดยตรง ดังนั้น 1) กรณีผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว ที่เครื่องควบแน่นจะมีค่าพลังงานที่ผันกลับไม่ได้ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีที่

ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ และ 2) กรณีผลิตไอน้ำอย่างเดียว การทำงานของวาล์วลดความร้อนยวดยิ่งจะมีการฉีดน้ำเข้าไป เพื่อลดอุณหภูมิด้วยน้ำที่เย็นกว่า ส่งผลให้แรงดันและอุณหภูมิของไอน้ำต่ำลง แต่ไม่ทำให้ค่าเอนทัลปีและเอนโทรปีลดลงมาก ดังนั้นจึงไม่มีผลต่อค่าพลังงานที่ผันกลับไม่ได้ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการผลิตแบบนี้สูงที่สุด

การเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์คือการเปรียบเทียบอัตราต้นทุนการผลิตรวมต่อชั่วโมง ทั้ง 3 กรณี คือ แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียวและแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว ดังนี้

ตารางที่ 4-1 เปรียบเทียบอัตราต้นทุนการผลิตรวมต่อชั่วโมงในแต่ละกรณี

	อัตราต้นทุนการผลิตรวมต่อชั่วโมง (Baht/h)	ผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อชั่วโมง	ราคาต้นทุนของผลิตภัณฑ์	
			ไฟฟ้า (Baht/kWh)	ไอน้ำ (Baht/Ton-steam)
ผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ	160,125	ไฟฟ้า 26,200 kWh ไอน้ำ 25.7 Ton-steam	3.44	2,722.75
ผลิตไอน้ำอย่างเดียว	160,125	ไอน้ำ 136.2 Ton-steam	-	1,175.66
ผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว	160,125	ไฟฟ้า 26,200 kWh	6.11	-

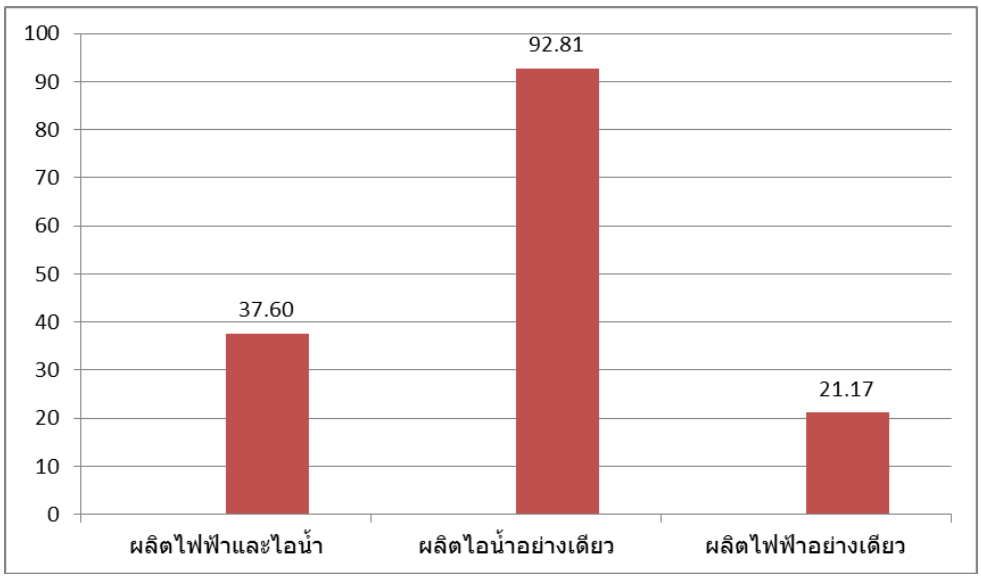
จากผลการศึกษาอัตราต้นทุนการผลิตรวมต่อชั่วโมงเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้ในการผลิตต่อชั่วโมง 1) เปรียบเทียบอัตราต้นทุนไอน้ำพบว่า กระบวนการผลิตแบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว จะมีต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่ากระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ 1,547.09 Baht/Ton-steam 2) เปรียบเทียบอัตราต้นทุนไฟฟ้าพบว่า กระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ จะมีต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่ากระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว 2.67 Baht/kWh

ตารางที่ 4-2 อัตราต้นทุนไฟฟ้าต่อชั่วโมงจากแหล่งผลิตไฟฟ้าต่าง ๆ

แหล่งผลิตไฟฟ้า	ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้า (Baht/kWh)
อัตราค่าไฟฟ้าที่ซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Peak / Off-Peak)	3.5982 / 2.1572
ต้นทุนการผลิตของโรงไฟฟ้าประเภท	
-ถ่านหิน	2.94
-กังหันแก๊ส	13.65
-พลังงานแสงอาทิตย์	12.50
-ลม	5.20

เมื่อนำผลการศึกษาในส่วนผลิตไฟฟ้าเปรียบเทียบ 1) เปรียบเทียบกับการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พบว่ากระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ จะมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าซื้อการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในช่วง Peak = 0.1582 Baht/kWh และจะมีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าซื้อการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในช่วง Off-Peak = 1.2828 Baht/kWh ส่วนกระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียวจะมีต้นทุนที่สูงกว่าการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทั้ง Peak และ Off-Peak 2) เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) กับโรงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ พบว่า มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำรองจากโรงไฟฟ้าประเภทเชื้อเพลิงถ่านหิน นอกนั้นจะมีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่า

การเปรียบเทียบประสิทธิผลการใช้ทรัพยากร



ภาพที่ 4-11 เปรียบเทียบประสิทธิผลการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่ผลิตได้

จากผลการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิผลการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่ผลิตได้ (Utilization factor) พบว่ากระบวนการผลิตแบบผลิตไอน้ำอย่างเดียวจะมีประสิทธิผลสูงสุด คือ 92.81% ซึ่งบ่งชี้ได้ว่ามีการใช้ประโยชน์จากผลิตผลได้ถูกใช้อย่างคุ้มค่ามากที่สุด เนื่องจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการฉีด Water spray เพื่อลดความดันและอุณหภูมิของไอน้ำที่ De-superheater สุดท้ายแล้ว Water spray จะถูกรวมกลายเป็นไอน้ำและยังคงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ ส่วนกระบวนการผลิตแบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียวจะมีประสิทธิผลการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่ผลิตได้ต่ำสุดคือ 21.17% เนื่องจากไอน้ำที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำเกินความต้องการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ ที่สามารถรับได้ จึงจำเป็นต้องมีการทิ้งไอน้ำที่เครื่องควบแน่นไปโดยเปล่าประโยชน์ซึ่งบ่งชี้ได้ว่ามีการใช้ประโยชน์จากผลิตผลได้ต่ำที่สุด

ทั้งนี้ จากผลการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิผลการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่ผลิตได้สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้จากกฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งพลังงานที่ผันกลับไม่ได้ในกระบวนการผลิตสูง จะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีที่ต่ำที่สุด

บทที่ 5
บทสรุป

กระบวนการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำของหม้อไอน้ำชนิด Gas fired boiler ขนาด 150 ตัน ไอน้ำต่อชั่วโมง โดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำจนได้ไอน้ำแรงดัน 115 bar และอุณหภูมิ 520 °C เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าขนาด 27 MWe นั้น ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปริมาณการใช้พลังงานและวิเคราะห์ประสิทธิภาพ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 กรณี ประกอบด้วยกรณี แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว

ในการศึกษาได้อาศัยแนวคิดจากหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ ตามกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งว่าด้วยเรื่องเกี่ยวกับพลังงาน ความร้อน งาน รวมไปทั้งกลไกการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น โดยกฎข้อหนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์จะบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นภายในระบบต่าง ๆ ซึ่งใช้การวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปี ส่วนกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์จะอธิบายเกี่ยวกับตัวแปรที่เป็นตัวกำหนดทิศทางของการเกิดกระบวนการต่าง ๆ ซึ่งใช้การวิเคราะห์พลังงานด้วยเอ็กเซอร์ยี ซึ่งทั้งสองกฎให้ค่าผลลัพธ์ที่ต่างกัน แต่ลักษณะผลลัพธ์ มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน

โดยการประเมินปริมาณการใช้พลังงาน จะทำการพิจารณาพลังงานใน 2 ค่า คือ พลังงานที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversibility) และความสูญเสียเอ็กเซอร์ยี (Exergy loss) ซึ่งพลังงานที่ผันกลับไม่ได้ที่มีค่าสูงจะแสดงให้เห็นว่า มีการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และนำไปใช้ในการชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เกิดประสิทธิภาพ

การเก็บข้อมูลและเลือกใช้ข้อมูลจากระบบควบคุมแบบกระจาย (DCS) เพื่อใช้ในการคำนวณ จะเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการผลิตรายวัน โดยเก็บข้อมูลในขณะที่กระบวนการผลิตภายใต้สถานการณ์เดียวกัน เพื่อไม่ให้ผลลัพธ์คลาดเคลื่อน จากนั้นจึงนำมาคำนวณปริมาณการใช้พลังงานและประสิทธิภาพในแต่ละกรณี รวมถึงคำนวณต้นทุนการผลิตในแต่ละกรณี สามารถสรุปได้ดังนี้

สรุปผลการศึกษา

1. ผลการประเมินปริมาณการใช้พลังงานแต่ละอุปกรณ์

1.1 หม้อไอน้ำที่มีกำลังการผลิตเหมือนในทุกกรณี จะมีพลังงานที่ผันกลับไม่ได้ 55.86%

1.2 ปริมาณการใช้พลังงานแต่ละกรณี

1.2.1 แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ มีพลังงานที่ผันกลับไม่ได้มากที่สุด ที่เครื่องควบแน่น 4.65%

1.2.2 แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว มีพลังงานที่ผันกลับไม่ได้มากที่สุด ที่วาล์วลดความร้อนยวดยิ่ง 22.57%

1.2.3 แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว มีพลังงานที่ผันกลับไม่ได้มากที่สุดคือ ที่เครื่องควบแน่น 53.99%

2. ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

2.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพแต่ละอุปกรณ์

2.1.1 แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 38.71% และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 30.52%

2.1.2 แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดที่หม้อไอน้ำ มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 77.20% และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 36.97%

2.1.3 แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 22.28% และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 17.36%

2.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพทั้งระบบ

2.2.1 แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 28.84% และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 23.20%

2.2.2 แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 71.76% และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 28.08%

2.2.3 แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 16.24% และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 18.39%

3. ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

3.1 แบบผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ มีต้นทุนไฟฟ้า 3.44 Baht/kWh และต้นทุนไอน้ำ 2,722.75 Baht/Ton-steam

3.2 แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว ต้นทุนไอน้ำ 1,175.66 Baht/Ton-steam

3.3 แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว มีต้นทุนไฟฟ้า 6.11 Baht/kWh

4. การเปรียบเทียบประสิทธิผลการใช้ทรัพยากร

4.1 แบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว มีประสิทธิผลการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่ผลิตได้สูงสุดคือ 92.81%

4.2 แบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว มีประสิทธิผลการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่ผลิตได้ต่ำสุดคือ 21.17%

ข้อเสนอแนะและแนวทางในการปรับปรุง

1. ข้อเสนอแนะและแนวทางในการปรับปรุงสำหรับผลการศึกษา

1.1 ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำสำหรับการศึกษาครั้งนี้ ใช้วิธีคำนวณโดยใช้ทฤษฎี Direct method หรือ Input-Output method เป็นการหาประสิทธิภาพในรูปแบบของอัตราส่วนของ Input ต่อ Output ที่ออกมา (Input คือ เชื้อเพลิงที่ใส่เข้าไปในหม้อไอน้ำ Output คือ ไอน้ำที่ผลิตได้) โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าทางทฤษฎีเท่านั้น เนื่องจากยังมีปัจจัยอื่น ๆ ในการเปลี่ยนรูปพลังงานเพื่อเปลี่ยนพลังงานความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง จนมาเป็นพลังงานความร้อนที่ออกมาในรูปของไอน้ำ

ดังนั้น ในการปรับปรุงการคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องตามมาตรฐานสากล จึงควรใช้ทฤษฎี Indirect method หรือ Heat loss method ซึ่งเป็นการหาผลรวมของค่าที่สูญเสียอย่างแท้จริงที่ออกจากระบบต่อหนึ่งหน่วยเชื้อเพลิงในขณะนั้น ๆ ประกอบด้วย

L1: พลังงานที่ออกไปในรูปแบบของไอเสียแห้ง (Dry flue gas)

L2: พลังงานที่สูญเสียจากความร้อนแฝงของ Hydrogen ในเชื้อเพลิง

L3: พลังงานที่ทำให้ความชื้นของเชื้อเพลิงกลายเป็นไอ (Moisture in fuel/ H2O ใน fuel)

L4: พลังงานที่ทำให้ความชื้นในอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้กลายเป็นไอ (Moisture in air/ H2O ใน air)

L5: พลังงานที่สูญเสียในรูปแบบของการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์หรือ Incomplete combustion

L6: พลังงานที่สูญเสียออกไปในรูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่ตัวพื้นผิวหม้อไอน้ำ

แต่ในขั้นตอนการหาค่าที่สูญเสียตามทฤษฎี Indirect method จะต้องมีการวัดและบันทึกข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณที่ค่อนข้างซับซ้อนและต้องใช้เครื่องมือพิเศษในการตรวจวัด เช่น Flue gas analyzer สำหรับวัด %CO2, %CO และ %O2 หรือการเก็บตัวอย่างของเชื้อเพลิงในขณะที่ทำการ

ทดสอบเพื่อนำส่งห้องทดลอง (Laboratory) หรือคุณภาพน้ำในขณะนั้น ๆ ดังนั้นจึงควรพิจารณาการเลือกใช้ทฤษฎีให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ เพื่อวางแผนการวัดและบันทึกข้อมูลที่เหมาะสมกับการศึกษาต่อไป

1.2 กระบวนการผลิตไฟฟ้าเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปจากพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีพลังงานถูกทำลายโดยผันกลับไม่ได้ของระบบ ตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์รวมอยู่ด้วย ดังนั้นการใช้วิธีปันส่วน (Allocate) สำหรับกระบวนการที่ได้ผลิตภัณฑ์ 2 ชนิด (ไฟฟ้าและไอน้ำ) จะไม่สามารถใช้วิธีแปลงหน่วย (Convert unit) จากพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง เพราะไม่ได้รวมเอ็กเซอร์ยีถูกทำลายโดยการผันกลับไม่ได้ของระบบ ส่งผลให้ผลการศึกษาคลาดเคลื่อน

2. ข้อเสนอแนะและแนวทางในการปรับปรุงสำหรับกระบวนการผลิต

2.1 จากผลการศึกษาการใช้พลังงานตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้เอ็กเซอร์ยี พบว่าในการผลิตทุกกรณี ส่วนของหม้อไอน้ำมีการสูญเสียเอ็กเซอร์ยีนอกเหนือจาก loss ทั่วไปมาก ดังนั้นจึงควรจะวิเคราะห์การสูญเสียอย่างแท้จริงว่าออกไปยังจุดใด เพื่อที่จะนำมาแก้ไขให้ตรงจุด และสามารถที่จะตั้งเป้าหมาย ในการเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้อีกด้วย

2.2 จากผลการศึกษาคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พิจารณาร่วมกับอัตราค่าไฟฟ้าที่ซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทกิจการขนาดใหญ่ (4.1.2) พบว่า

ในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าและไอน้ำ ควรเลือกกระบวนการผลิตแบบผลิตไอน้ำอย่างเดียวและซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแทน จะทำให้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด

ในช่วงที่มีความต้องการไอน้ำอย่างเดียว ควรเลือกกระบวนการผลิตแบบผลิตไอน้ำอย่างเดียว จะทำให้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด

ในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าอย่างเดียว ควรจะซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแทน จะทำให้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด

หม้อน้ำประเภท Gas fired boiler ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงนั้นไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าและไอน้ำเป็นหลัก เนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตสูง แต่เหมาะสำหรับใช้สนับสนุนการผลิตในกรณีที่แรงดันไอน้ำในระบบมีแรงดันต่ำ ในกรณีที่มีความต้องการไอน้ำอย่างเดียว อาจพิจารณาไปใช้หน่วยผลิตไอน้ำอื่นที่มีต้นทุนการผลิตไอน้ำที่ถูกกว่า เช่น Heat recovery steam generation (HRSG) แทน และในกรณีที่มีความต้องการไฟฟ้าควรจะซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแทน ทำให้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด

บรรณานุกรม

เซนเจล และไมเคิล. *เทอร์โมไดนามิกส์* (รศ.ดร.สมชัย อัครทิวา, ดร.ขวัญจิต วงษ์ชารี, แปล). กรุงเทพฯ: แมคกรอ-ฮิล.

ปพิชญา บัวโชติ. (2550). *การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีของโรงงานน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง,* วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ไพโรจน์ โรจวัฒนา. (2534). *การวิเคราะห์พลังงานและเอกเซอร์ยีของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วย,* วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

โยชิฮิโกะ ทาคามูระ. (2543). *เทคนิคการประหยัดพลังงานความร้อนในอุตสาหกรรม* (ระนอง พยัคฆพันธ์ วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และบัณฑิต โรจน์อารยานนท์, แปล). กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.

ราชัย นาคามดี. (2532). *การวิเคราะห์พลังงานของระบบโคเจนเนอเรชั่นในโรงกลั่นน้ำมัน,* วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สิทธิพร พึ่งใหญ่. (2542). *หลักพื้นฐานและประยุกต์ทางอุณหพลศาสตร์.* กรุงเทพฯ: ศูนย์การพิมพ์แก่นจันทร์.

สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. (2543). นโยบายการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า. *วรสารนโยบายพลังงาน, 48*, 12-13.

สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2553). การอนุรักษ์พลังงานในระบบความร้อน. *ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน(ผชพ)ด้านความร้อน*, 15-19.

Alexandros & Andreas. (2014). *Thermoeconomic modeling and exergy analysis of a decentralized liquefied natural gas-fueled combined-cooling heating and power plant.* Department of mechanical and manufacturing engineering, University of Cyprus.

Bejan, Tsatsaronis & Michael Moran. (1996). *Thermal Design and Optimization.* United States of America: A Wiley-Interscience Publication.

Deok-Jin Kim & Byung-Ryeal Choi. (2011). *Cost allocation of electricity and heat,* Korea Energy Economics Institute, Korea.

Raznjeric, K. (1978). *Handbook of Thermodynamic Tables and Charts*. New York: McGraw-Hill.