

การออกแบบระบบการนำน้ำหล่อเย็นกลับมาใช้ในกระบวนการเตรียมน้ำร้อน

จตุพล เลื่อนฤทธิ์

งานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

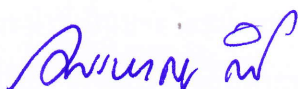
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สิงหาคม 2560

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์และคณะกรรมการควบคุมการสอบปากเปล่า
งานนิพนธ์ได้พิจารณางานนิพนธ์ของ จตุพล เกื้อนฤทธิ์ ฉบับนี้แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์

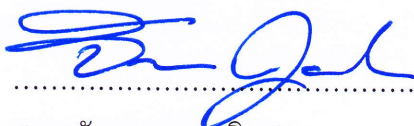


..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรหาญ ลิลา)

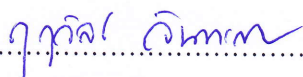
คณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์



..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรหาญ ลิลา)



..... กรรมการ
(ดร. จักรवाल คุณะฉิลิก)



..... กรรมการ
(ดร. ฤทธิชัย จันทรสา)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับงานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ของมหาวิทยาลัยบูรพา



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ ๘ เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2560

กิตติกรรมประกาศ

งานนิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรหาญ ธิลา
อาจารย์ที่ปรึกษางานนิพนธ์ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำงานนิพนธ์ที่ถูกต้อง
ตลอดจนการแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างดำเนินงานนิพนธ์นี้
ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดีเสมอมา รวมถึงคณะกรรมการควบคุมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์
ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนาม
ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัทกรณีสึกษาและเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ
ซึ่งการให้ข้อมูลเหล่านี้มีคุณค่าอย่างยิ่งต่อการนำมาวิเคราะห์ปัญหาของงานนิพนธ์เล่มนี้ และ
ที่สำคัญยิ่งขอขอบพระคุณพ่อแม่และครอบครัวที่คอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของงานนิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูคุณเดวทิตาแม่บุพการี
บูรพาจารย์และผู้ที่มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและ
ประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

จตุพล เลื่อนฤทธิ์

58920673: สาขาวิชา: วิศวกรรมอุตสาหกรรม; วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

คำสำคัญ: ระบบควบคุมอัตโนมัติ/ ระบบน้ำร้อน/ ระบบการหล่อเย็น/ พลังงานไอน้ำ/ การลด
ความสูญเสีย

จุดพล เลื่อนฤทธิ์: การออกแบบระบบการนำน้ำหล่อเย็นกลับมาใช้ในกระบวนการ
เตรียมน้ำร้อน (A DESIGN OF THE COOLANT WATER REUSE SYSTEM FOR HOT WATER
PREPARATION PROCESS) คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์: บรรหาญ ลิลา, Ph.D., 119 หน้า.
ปี พ.ศ. 2560.

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบระบบการนำน้ำหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิเหมาะสมจาก
กระบวนการหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่โดยนำกลับมาผสมกับน้ำร้อนในถังเก็บเพื่อลดการสูญเสีย
น้ำหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิสูงและลดต้นทุนน้ำดิบและไอน้ำในการเตรียมน้ำร้อนใหม่ ด้วยการออกแบบ
และติดตั้งท่อ วาล์วและอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิเพื่อควบคุมการเปิด-ปิดวาล์ว พร้อมทั้งแก้ไข
โปรแกรมการควบคุมเพื่อนำน้ำหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิตามที่กำหนดกลับไปยังถังเก็บน้ำร้อนและ
ส่งน้ำหล่อเย็นที่ไม่ต้องการไปยังบ่อบำบัด จากการติดตามผลการดำเนินงาน พบว่า สามารถ
ลดปริมาณการใช้ไอน้ำในการเตรียมน้ำร้อนเฉลี่ยจาก 44,317.22 เหลือ 26,682.73 เมกะจูลต่อเดือน
มีการเติมน้ำดิบเฉลี่ย 20 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน คิดเป็นค่าใช้จ่ายเฉลี่ยที่ลดลงได้ทั้งหมดจาก
32,987.56 เหลือ 20,461.32 บาทต่อเดือน หรือลดลงได้ร้อยละ 37.97 เมื่อเปรียบเทียบกับ
งบประมาณที่ลงทุน พบว่า มีระยะเวลาการคืนทุนประมาณ 7 ปี 2 เดือน จึงสามารถสรุปได้ว่า
การดำเนินการนี้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในระดับที่ยอมรับได้

58920673: INDUSTRIAL ENGINEERING; M.Eng. (INDUSTRIAL ENGINEERING)

KEYWORDS: AUTOMATIC SYSTEM/ HOT WATER SYSTEM/ COOLING SYSTEM/
STEAM ENGERY/ WASTEFUL REDUCTION

JATUPON LAUNRIT: A DESIGN OF THE COOLANT WATER REUSE SYSTEM
FOR HOT WATER PREPARATION PROCESS. ADVISORY COMMITTEE: BANHAN LILA,
Ph.D., 119 P. 2017.

This study presents a design of a reuse system to direct the coolant water with suitable temperature from the cooling process to mix with the hot water in the storage tank. The design aimed to reduce the waste of coolant water with high temperature and to reduce the cost of fresh water and steam in preparation of refilled hot water. The procedures involved the design and installation of pipe, control valves, thermocouple to control the ON-OFF operations of valves, and the revision of the system program to direct the suitable temperature coolant water to the storage tank and the remaining to the sewage treatment reservoir. The implementation led to reduction of the steam consumption for hot water preparation from 44,317.22 to 26,682.73 Mega Jules per month with the average amount of 20 m³ per month of fresh water to refill the hot water storage. This reduction contributed to the decrement of the total cost in the hot water preparation process from 32,987.56 to 20,461.32 baht per month or 37.97 %. This investment has an acceptable economies of scale with 7 years 2 months of a payback period.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
สมมติฐานของการวิจัย.....	3
กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
ขอบเขตการวิจัย.....	3
ข้อจำกัดของการวิจัย.....	4
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	5
2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
พื้นฐานของการถ่ายโอนความร้อน.....	6
หลักการพื้นฐานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	12
ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	18
หลักการพื้นฐานและคุณสมบัติของของไหล.....	18
สมการพลังงาน.....	20
การไหลภายในท่อ.....	22
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
3 วิธีดำเนินการศึกษา.....	26
การศึกษากระบวนการทำงาน.....	26
การเก็บรวบรวมข้อมูลของปัญหา.....	29

สารบัญ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
การวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดปัญหา.....	33
การนำเสนอแนวทางการแก้ไขปรับปรุง.....	34
การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ.....	41
การดำเนินงานและติดตามผล.....	43
สรุปผลการดำเนินงาน.....	44
4 การดำเนินงานและติดตามผล.....	45
การออกแบบระบบท่อส่งน้ำร้อนใหม่.....	45
การปรับปรุงระบบควบคุมและกราฟฟิคใน DCS.....	49
การติดตามผล.....	51
5 สรุปผลการดำเนินงาน และข้อเสนอแนะ.....	53
สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	53
การอภิปรายกระบวนการดำเนินงานวิจัย.....	54
ข้อเสนอแนะ	54
บรรณานุกรม.....	56
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก.....	58
ภาคผนวก ข.....	61
ภาคผนวก ค.....	113
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	119

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 ความถี่ในการทำงานของระบบหล่อเย็นและปริมาณไอน้ำที่ใช้เพิ่มความร้อน.....	2
2-1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	10
3-1 สรุปปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายทั้งหมด.....	32
3-2 ตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิของน้ำในถึงน้ำร้อนหลังจากเติมน้ำหล่อเย็น.....	38
3-3 เปรียบเทียบปริมาณการใช้ไอน้ำและค่าใช้จ่ายของแต่ละระดับอุณหภูมิ.....	40
3-4 ต้นทุนในการปรับปรุงระบบท่อและระบบควบคุม.....	42
4-1 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายหลังการปรับปรุง.....	52

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 การนำความร้อนผ่านผนังขนาดใหญ่มีความหนา Δx และพื้นที่ A.....	7
2-2 (ก) การพาความร้อนแบบบังคับ (ข) การพาความร้อนแบบธรรมชาติ.....	9
2-3 การพาความร้อนจากแท่งวัสดุผิวร้อน.....	9
2-4 การแผ่รังสีของวัตถุดำที่ปลดปล่อยจากผิวด้วยอัตราความเร็วสูงสุด.....	11
2-5 การดูดกลืนของรังสีตกกระทบบนผิวทึบแสงที่มีสภาพดูดกลืน α_A	11
2-6 การแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิวของวัตถุ 2 ชนิด.....	12
2-7 รูปแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อคู่หรือท่อสองชั้นและลักษณะทิศทาง การไหลภายใน	13
2-8 รูปแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง.....	14
2-9 รูปแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ.....	15
2-10 ลักษณะภายในของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ.....	15
2-11 ของไหลสองอย่างมีอัตราการไหลและความจุความร้อนเท่ากันจะมีความแตกต่าง ของอุณหภูมิเหมือนกันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวนอย่างดี.....	17
2-12 ความแตกต่างระหว่างของเหลวกับก๊าซ.....	19
2-13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหลตามแนวทางการไหล.....	20
2-14 ความสัมพันธ์ของตัวแปรเทอมต่าง ๆ ในสมการเบอร์นูลลี.....	22
2-15 เครื่องมือทดสอบการไหลและพฤติกรรมการไหลของเรย์โนลด์.....	22
3-1 โครงสร้างองค์กร.....	27
3-2 กระบวนการหมัก.....	27
3-3 กระบวนการกลั่นสกัด.....	28
3-4 ไดอะแกรมของระบบการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	29
3-5 อุปกรณ์สำหรับหล่อเย็นผลิตภัณฑ์เหลวในท่อ.....	30
3-6 ระบบน้ำร้อนและถังเก็บ.....	30
3-7 กราฟฟิกของระบบท่อนหัวถังน้ำร้อนในปัจจุบัน.....	31
3-8 กราฟฟิกการทำงานของระบบหล่อเย็น.....	31
3-9 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่าย.....	33
3-10 วิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนภูมิแกงปลา.....	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-11 การออกแบบระบบท่อส่งน้ำร้อนใหม่.....	35
3-12 ลักษณะท่อส่งน้ำหล่อเย็นลงถึงเก็บน้ำร้อน.....	35
4-1 แบบด้านบนของการปรับปรุงท่อน้ำร้อนไหลกลับขนาด 8 นิ้ว.....	46
4-2 แบบด้านหน้าของการปรับปรุงท่อน้ำร้อนไหลกลับขนาด 8 นิ้ว.....	46
4-3 ตำแหน่งของวาล์วควบคุมและอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้ง.....	47
4-4 ตำแหน่งของวาล์วและการหุ้มฉนวนท่อน้ำร้อน.....	47
4-5 ท่อระบายน้ำลงบ่อบำบัดก่อน-หลังการหุ้มฉนวน.....	48
4-6 กราฟฟิคนบนหัวถังน้ำหลังการปรับปรุง.....	49
4-7 กราฟฟิคของระบบหล่อเย็นหลังการปรับปรุง.....	49
4-8 ไคอะแกรมการทำงานของระบบหลังการปรับปรุง.....	50

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสถานะเศรษฐกิจปัจจุบันที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและมีการแข่งขันกันมากขึ้น ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ธุรกิจสามารถดำรงอยู่และแข่งขันกับคู่แข่งทางการค้าได้ก็คือ การลดต้นทุน ในกระบวนการผลิตเริ่มตั้งแต่ระบบสาธารณูปโภคไปจนถึงการให้บริการ ทั้งนี้เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำและคงคุณภาพที่ดีเหมือนเดิมหรือดีกว่า ดังนั้น ระบบสาธารณูปโภค จัดว่าเป็นส่วนที่สำคัญในการลดต้นทุนการผลิตอย่างหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นระบบน้ำ ระบบไฟฟ้า ระบบลมอัดหรือระบบไอน้ำ ถ้าบริษัทสามารถใช้พลังงานเหล่านี้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดหรือสามารถลดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้ก็จะเกิดการสูญเสียในกระบวนการผลิตน้อยลงและส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตต่ำลงด้วย

บริษัทกรณีศึกษาเป็นบริษัทผู้ผลิตสารเคมี ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของ ยา เวชภัณฑ์ เครื่องสำอางค์ เครื่องดื่มและอาหารเสริมหลายชนิด บริษัทเริ่มก่อตั้งในปี พ.ศ. 2555 และทำการผลิต ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2558 เป็นต้น โดยกระบวนการผลิตแบ่งเครื่องจักรออกเป็นหน่วยงาน ตามหน้าที่การใช้งาน ประกอบไปด้วย หน่วยงานวัตถุดิบ (Raw material) หน่วยงานหมัก (Fermentation) หน่วยงานสกัด (Extraction) หน่วยงานบรรจุ (Bagging) หน่วยงานบำบัดน้ำเสีย (Waste water treatment) และหน่วยงานสาธารณูปโภค (Utility)

งานนิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาความสูญเปล่าที่เกิดจากการใช้พลังงานไอน้ำในการผลิต น้ำร้อน เนื่องจากปัจจุบันมีการนำน้ำดิบที่อุณหภูมิ 32°C มาใช้ในการหล่อเย็นให้กับผลิตภัณฑ์เหลว ที่มีอุณหภูมิสูงในท่อ ซึ่งน้ำดิบที่ผ่านระบบการหล่อเย็นออกมาจะมีอุณหภูมิประมาณ 40-90°C แล้วไหลไปสู่ถังเก็บน้ำร้อนที่มีการควบคุมอุณหภูมิการใช้งานอยู่ที่ 85°C เมื่อน้ำดิบที่ผ่านระบบหล่อเย็นมาผสมกับน้ำร้อนที่มีอยู่ในถังเก็บทำให้อุณหภูมิของน้ำในถังลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้งานและน้ำที่ผ่านกระบวนการหล่อเย็นมีปริมาณค่อนข้างมากโดยมีอัตราการไหล 60 ลูกบาศก์เมตรต่อ ชั่วโมง ทำให้น้ำร้อนที่มีอยู่ภายในถังล้นออกมาแล้วไหลไปสู่ระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป ส่วนน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิต่างกันผสมกันในถังเก็บน้ำจะทำให้อุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 85°C ซึ่งจำเป็นต้องใช้ไอน้ำในการเพิ่มความร้อนให้แก่ น้ำที่อยู่ในถังเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ 85°C ตามค่าที่ใช้งาน โดยในการเพิ่มความร้อนให้แก่ น้ำในถังเก็บนั้นก่อให้เกิดการสูญเปล่าในการใช้พลังงานไอน้ำ ส่วนนี้

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลของควมถี่ในการหล่อเย็นผลิตภัณฑ์เหลวในท่อและการใช้พลังงานไอน้ำในการเพิ่มความร้อนให้กับน้ำที่อยู่ในถังเก็บ 6 เดือน โดยเริ่มตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2559 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 ความถี่ในการทำงานของระบบหล่อเย็นและปริมาณไอน้ำที่ใช้เพิ่มความร้อน

ครั้งที่	เดือน	ปริมาณไอน้ำ (MJ)
1	มกราคม พ.ศ. 2559	44,834.40
2	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	34,991.00
3	มีนาคม พ.ศ. 2559	34,878.90
4	เมษายน พ.ศ. 2559	51,476.70
5	พฤษภาคม พ.ศ. 2559	52,982.80
6	มิถุนายน พ.ศ. 2559	46,739.50
	รวม	265,903.30
	เฉลี่ยต่อเดือน	44,317.21

จากข้อมูลของระบบการหล่อเย็นตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2559 พบว่ามีการทำงานทั้งหมด 95 ครั้ง และใช้ไอน้ำในการเพิ่มความร้อนทั้งหมด 265,903.30 เมกกะจูล ซึ่งในมุมมองของการบริหารงานถือว่าก่อให้เกิดการสูญเสียเปล่าที่ไม่ก่อให้เกิดรายได้ต่อบริษัท ดังนั้นทีมผู้วิจัยจึงได้นำการสูญเสียเปล่านั้นมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุและแนวทางในการปรับปรุงปริมาณการใช้ไอน้ำให้น้อยลงและเกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งได้ข้อสรุปว่าการสูญเสียเปล่าที่เกิดขึ้นนี้สามารถปรับปรุงเพื่อทำให้ลดการสูญเสียเปล่าได้ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยในครั้งนี้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบระบบการรักษาสมดุลของความร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อน จากการนำน้ำร้อนที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาเก็บไว้ใช้อีก
2. เพื่อลดปริมาณการใช้ไอน้ำและค่าใช้จ่ายในการเพิ่มความร้อนให้กับน้ำร้อนที่อยู่ในถังในถังเก็บ

สมมติฐานของงานวิจัย

กระบวนการนำทรัพยากรที่ใช้งานแล้วกลับมาหมุนเวียนในระบบได้อีกเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดภายใต้สมมติฐาน ดังนี้

1. บริษัทกรณิศศึกษามีระบบการรักษาสมดุลของน้ำร้อนในถังเก็บ เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิที่ 85°C ตามที่กระบวนการผลิตต้องการใช้งาน
2. บริษัทกรณิศศึกษาสามารถลดปริมาณการใช้ไอน้ำในระบบการทำน้ำร้อน และลดค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อไอน้ำเพื่อใช้ในการผลิตน้ำร้อน

กรอบแนวคิดในการวิจัย

การนำหลักการของระบบการอนุรักษ์พลังงานมาประยุกต์ใช้ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบการรักษาสมดุลอุณหภูมิของน้ำร้อนในถังเก็บ เพื่อการใช้พลังงานไอน้ำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและเหมาะสมให้กับบริษัทกรณิศศึกษา

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. บริษัทกรณิศศึกษาสามารถรักษาสมดุลและควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อนภายในถังเก็บได้ตามอุณหภูมิที่ใช้งานที่ 85°C
2. สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อนภายในถังเก็บ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อไอน้ำเพื่อใช้ในการผลิตน้ำร้อน

ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการออกแบบระบบการรักษาสมดุลอุณหภูมิของน้ำร้อน เพื่อลดปริมาณไอน้ำที่ใช้ในการเพิ่มความร้อนให้แก่น้ำร้อนในถังเก็บของบริษัทกรณิศศึกษา โดยครอบคลุมเนื้อหา ดังนี้

1. การวิจัยนี้เป็นการออกแบบระบบการรักษาสมดุลอุณหภูมิของน้ำร้อนในถังเก็บจากการนำน้ำร้อนที่ผ่านกระบวนการหล่อเย็นแล้วมาใช้ใหม่เท่านั้น
2. การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อนของบริษัทเท่านั้น

ข้อจำกัดของการวิจัย

1. ระบบท่อส่งน้ำร้อนและไอน้ำที่ส่งไปถึงเก็บน้ำร้อนนั้นไม่มีมาตรวัดอัตราการไหล ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้การคำนวณทางด้านทฤษฎีเพื่อเป็นข้อมูลในการวิจัย
2. ถังเก็บน้ำร้อนสามารถเก็บน้ำได้แค่ 100 ลูกบาศก์เมตร แต่ปริมาณน้ำที่ออกจากระบบหล่อเย็นมีอัตราการไหล 60 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งทำให้ถังเก็บสามารถเก็บน้ำได้แค่บางส่วนเท่านั้น ส่วนปริมาณน้ำที่เหลือเมื่อเข้าถังแล้วก็ล้นออกไปบ่อบำบัด

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) คือ เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีการถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกันเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
2. มาตรวัดการไหล (Flow meter) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณการไหลของน้ำในท่อ ซึ่งมีหน่วยเป็นปริมาตรต่อเวลา
3. อุณหภูมิ (Temperature) เป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงระดับความร้อนหรือความเย็นของสสาร
4. ความร้อน (Heat) คือ พลังงานรูปแบบหนึ่งที่สามารถถ่ายเทจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำ
5. ไอน้ำ (Steam) คือ น้ำในสถานะก๊าซที่เกิดขึ้นจากการที่น้ำในสถานะของเหลวที่ได้รับความร้อนภายในหม้อน้ำ (Boiler) จนเปลี่ยนสถานะเป็นไอที่มีอุณหภูมิและแรงดันสูง
6. Total dissolved solids (TDS) หมายถึง ปริมาณของของแข็งที่แขวนลอยหรือละลายอยู่ในน้ำรวมถึงไอออน แร่ธาตุหรือโลหะละลายในปริมาณที่กำหนดของน้ำมีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/ลิตร (mg/l) หรือเรียกอีกอย่างว่า หนึ่งต่อล้านส่วน (ppm)
7. ระบบ DCS (Distributed control system) หมายถึง ระบบการควบคุมและเฝ้าดูการทำงานอัตโนมัติโดยใช้สัญญาณอินเตอร์เน็ต ซึ่งระบบจะทำงานตามที่เรากำหนดแบบระบบไว้
8. อุปกรณ์ตรวจวัดความร้อน (Temperature transmitter or thermocouple) หมายถึง อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิของของเหลวที่อยู่ในท่อหรือภาชนะ
9. อุปกรณ์ตรวจวัดระดับของเหลวภายในภาชนะ (Level transmitter or level sensor) หมายถึง อุปกรณ์ตรวจวัดระดับของของเหลวที่อยู่ในท่อหรือภาชนะ
10. วาล์วควบคุม (Control valve) หมายถึง วาล์วที่ทำงานโดยอาศัยไฟฟ้าหรือลมเพื่อควบคุมการเปิด-ปิด ผ่านระบบการควบคุมอัตโนมัติ

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. การศึกษากระบวนการทำงาน
2. การเก็บรวบรวมข้อมูลของปัญหา
3. การวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดปัญหา
4. การนำเสนอแนวทางการแก้ไขปรับปรุง
5. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ
6. การดำเนินงานและติดตามผล
7. สรุปผลการดำเนินงาน

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทำงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้อ้างอิงพบว่า มีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. พื้นฐานของการถ่ายโอนความร้อน
2. หลักการพื้นฐานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
3. ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์
4. หลักการพื้นฐานและคุณสมบัติของของไหล
5. สมการพลังงาน
6. การไหลภายในท่อ
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พื้นฐานของการถ่ายโอนความร้อน

ผ่องศรี ศิวราศักดิ์ (2555) การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของสารทำงาน (สารตัวกลาง) ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าส่งถ่ายไปยังสารทำงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและมีทิศทางที่แน่นอน เรียกว่าเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient) นิยมใช้ในเทอมของอัตราการถ่ายโอนความร้อนเพื่อบอกถึงเวลาที่ต้องการให้ความร้อนแก่สสารหรือการทำให้สสารเกิดการเย็นตัว โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนจะถูกนำไปใช้เพื่อทำการออกแบบเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) หม้อต้มไอน้ำ (Boiler) เครื่องควบแน่น (Condenser) เครื่องทำความร้อน (Heater) เตาเผา (Furnaces) ตู้เย็น โซลาร์คอลเล็คเตอร์ (Solar corrector) และมีค่านิยามต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. อัตราการถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer rate) คือ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็นจูลต่อวินาที (J/ s) หรือวัตต์ (W) ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย \dot{Q} คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการในช่วงเวลา Δt ดังสมการ

$$\dot{Q} = Q/\Delta t \quad [J/s \text{ หรือ } W] \quad (2-1)$$

2. ฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของการถ่ายโอนความร้อนนั้น ดังสมการ

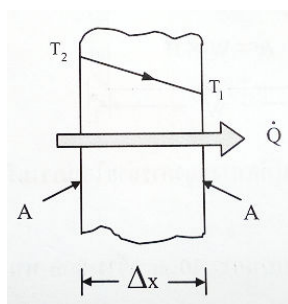
$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (2-2)$$

โดยที่ \dot{q} คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ A คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายโอนความร้อน ระบบหน่วยสากล คือ วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) หรือระบบหน่วยอังกฤษ คือ บีทียูต่อตารางฟุต-ชั่วโมง ($\text{Btu}/\text{ft}^2\cdot\text{h}$)

จากพื้นฐานการถ่ายโอนความร้อนที่กล่าวมา สามารถจำแนกกลไกในการถ่ายเทความร้อนออกได้ดังนี้

1. การถ่ายโอน ด้วยการนำความร้อน (Heat conduction)

การนำความร้อน คือ การถ่ายโอนพลังงานจากอนุภาคของสารที่มีพลังงานมากไปยังอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงซึ่งมีพลังงานน้อยกว่า การนำความร้อนในก๊าซและของเหลวเกิดขึ้นเนื่องจากการชนกันและการแพร่ของโมเลกุลระหว่างการเคลื่อนที่แบบสุ่ม การนำความร้อนในของแข็งเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคของโมเลกุลในโครงผลึกกับอิเล็กตรอนอิสระถ่ายโอนพลังงาน อัตราการนำความร้อนผ่านตัวกลางขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิต ความหนาและชนิดของวัสดุที่เป็นตัวกลาง รวมถึงความแตกต่างของอุณหภูมิตามขวางของตัวกลาง



ภาพที่ 2-1 การนำความร้อนผ่านผนังขนาดใหญ่ที่มีความหนา Δx และพื้นที่ A

การนำความร้อนผ่านผนังขนาดใหญ่ที่มีความหนา $\Delta x = L$ และพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน A ดังแสดงในภาพที่ 2-1 ดังนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{อัตราการนำความร้อน} = \frac{\text{(พื้นที่)}(\text{ความแตกต่างของอุณหภูมิ})}{\text{ความหนา}}$$

$$\text{หรือแทนสัญลักษณ์ } \dot{Q} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [\text{W}] \quad (2-3)$$

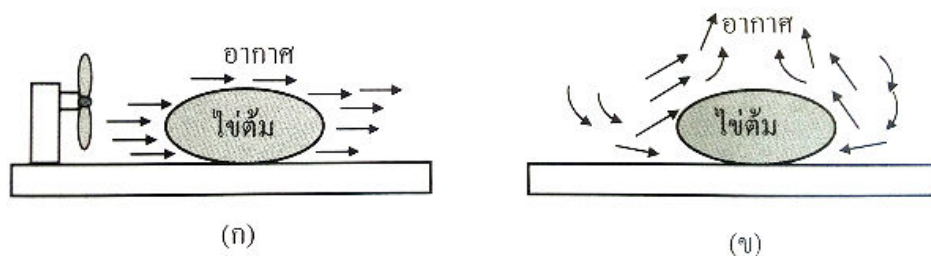
โดยที่ k คือ สภาพการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal conductivity) เป็นค่าคงที่ หมายถึง การวัดค่าความสามารถนำความร้อนของวัสดุ ให้ลิมิตของ $\Delta x \rightarrow 0$ สามารถเขียนสมการ ในรูปของดิฟเฟอเรนเชียลได้ คือ

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad [\text{W}] \quad (2-4)$$

สมการ (2-4) นี้เรียกว่า กฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ (Fourier's law of heat conductivity) dT/dx คือ เกรเดียนต์อุณหภูมิ การนำความร้อนในทิศทางของอุณหภูมิลดลงและ เกรเดียนต์อุณหภูมิจึงทำให้มีค่าเป็นลบ (-) ขณะที่ค่าความหนาเพิ่มขึ้น

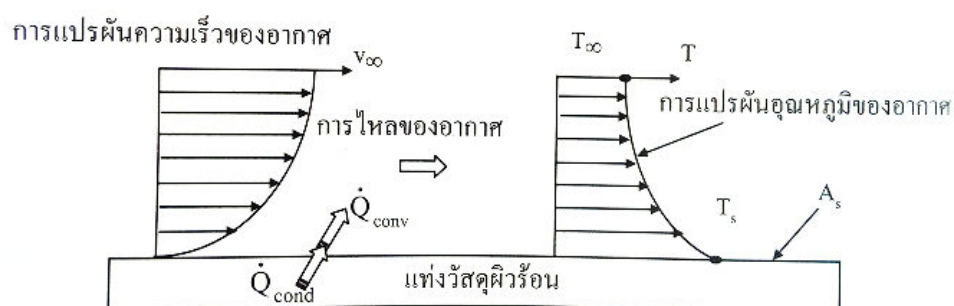
2. การถ่ายโอนด้วยการพาความร้อน (Heat convection)

การพาความร้อน คือ การถ่ายโอนพลังงานที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือ ก๊าซพาความร้อนออกไปจากผิววัสดุของแข็ง การถ่ายโอนด้วยการพาความร้อนได้มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหลว่าไหลเร็วหรือช้า และถ้าไม่มีการเคลื่อนที่ของของไหลนั้น ๆ เหนือผิววัสดุจะไม่มีพาความร้อนเกิดขึ้น การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การพาความร้อนแบบถูกบังคับ (Forced convection) และการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) หรือการพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) การพาความร้อนแบบถูกบังคับ เกิดขึ้นเมื่อมีเครื่องมือหรืออุปกรณ์ เช่น พัดลม เครื่องสูบลม บังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิวของแข็ง และพาความร้อนออกไปจากผิวหน้า ส่วนการพาความร้อนแบบธรรมชาติเกิดจากความแตกต่างของ อุณหภูมิระหว่างผิววัสดุของแข็งที่ร้อนกว่าและของไหลที่อยู่โดยรอบวัสดุ ทำให้ของไหลที่อยู่ใกล้ ผิวร้อนมีความหนาแน่นน้อยกว่า เกิดแรงลอยตัวขึ้นมา และของไหลที่มีความหนาแน่นสูงกว่า เคลื่อนที่ไปแทนที่ ดังแสดงในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 (ก) การพาความร้อนแบบบังคับ (ข) การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

เมื่ออากาศเย็นไหลผ่านผิวของแท่งวัสดุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า จะเกิดการถ่ายเทด้วยการพาเกิดขึ้น โดยวัตถุร้อนจะถ่ายโอนพลังงานออกไปจากผิวส่วนอากาศที่เย็นกว่าจะดูดพลังงาน ความร้อนมีการเคลื่อนที่ของชั้นอากาศที่อยู่ติดกับผิวและอากาศเย็นกว่าไหลเข้ามาแทนที่ ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 การพาความร้อนจากแท่งวัสดุผิวร้อน

กระบวนการถ่ายโอนความร้อนที่มีการเปลี่ยนวัฏภาคของไหลเป็นการพาความร้อน เพราะว่าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ ได้แก่ การเกิดเป็นไอหรือเกิดการควบแน่น

กฎการทำความเย็นของนิวตัน (Newton's law of cooling) ใช้หาอัตราการพาความร้อน โดยได้มาจากการสังเกตว่าเป็นสัดส่วน โดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิและพื้นที่ผิวของวัสดุ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Q_{Convection} = hA (T_s - T_\infty) \quad [W]$$

(2-5)

โดยที่ h , A , T_s และ T_α คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) มีหน่วยเป็น $W/m^2\text{-}^\circ\text{C}$ หรือ $Btu/h\text{-}^\circ\text{F}$ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิที่ผิวของแข็งและอุณหภูมิของของไหลที่อยู่ใกล้

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h หาได้จากการทดลองกับตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพล เช่น รูปทรงของผิว การเคลื่อนที่ของของไหล คุณสมบัติของของไหล และความเร็วนำของของไหล ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Cengel, 2003)

ชนิดของการพาความร้อน	h , $W/m^2\text{-}^\circ\text{C}$
การพาความร้อนแบบธรรมชาติของก๊าซ	2-25
การพาความร้อนแบบธรรมชาติของของเหลว	10-1,000
การพาความร้อนแบบถูกบังคับของก๊าซ	25-250
การพาความร้อนแบบถูกบังคับของของเหลว	50-20,000
การเดือดและการควบแน่น	2,500-100,000

หมายเหตุ: คูณด้วย 0.176 เพื่อเปลี่ยนหน่วยเป็น $Btu/h\text{-}^\circ\text{F}$

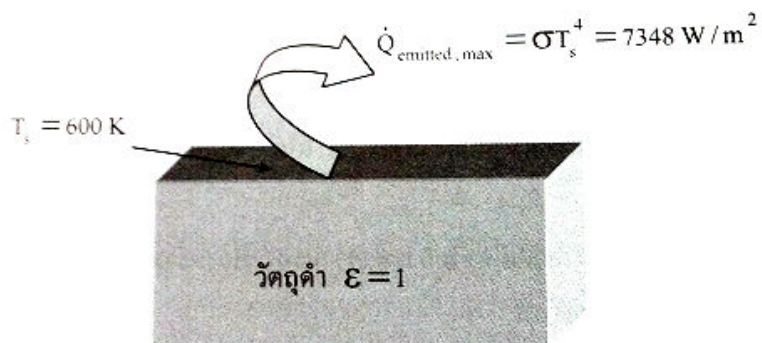
3. กลไกการถ่ายโอนด้วยการแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

การแผ่รังสีเกิดจากสสาร (Matter) ที่มีอุณหภูมิแตกต่างกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมรอบพลังงานที่ถูกปลดปล่อยในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) หรือโฟตอน (Photon) เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงทางอิเล็กทรอนิกส์ของอะตอมหรือโมเลกุลต่าง ๆ การแผ่รังสีเป็นการถ่ายโอนพลังงานที่มีความเร็วสูงสุด (เทียบเท่ากับความเร็วของแสง) โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง การแผ่รังสีเกิดขึ้นได้แม้ในสุญญากาศและเปลี่ยนแปลงในรูปของความร้อน สสารสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซจะปลดปล่อย (Emit) ดูดกลืน (Absorb) หรือส่งผ่าน (Transmit) พลังงานจากการแผ่รังสีซึ่งเป็นปรากฏการณ์เชิงปริมาณ เพราะรังสีออกมาจากทั้งก้อนของวัตถุ รังสีถูกปล่อยจากผิวที่อุณหภูมิองศาสมบูรณ์ T_s (ในหน่วย $^\circ\text{K}$ หรือ $^\circ\text{R}$) มีอัตราความเร็วสูงสุด อัตราการแผ่รังสีสามารถคำนวณได้จากกฎของ Stefan-boltzmann law คือ

$$\dot{Q}_{\text{Rad,max}} = \sigma AT^4 \quad \text{surface} \quad [\text{W}] \quad (2-6)$$

โดยที่ $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}^4$ หรือ $0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h-ft}^2\text{-R}^4$ เรียกว่าค่าคงที่ของ Stefan-boltzmann constant

วัตถุดำ (Black body) คือ วัตถุที่มีผิวในอุดมคติสามารถปลดปล่อยรังสีด้วยอัตราที่เร็วที่สุด วัตถุดำจึงมีการเปล่งรังสี (Emissivity, ϵ) ของพื้นผิวเท่ากับ 1 หรือ $\epsilon = 1$ ดังแสดงในภาพที่ 2-4

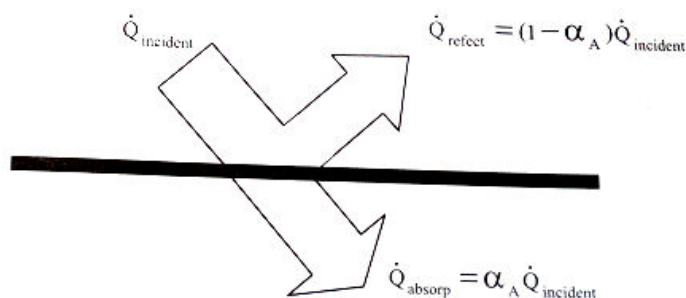


ภาพที่ 2-4 การแผ่รังสีของวัตถุดำที่ปลดปล่อยจากผิวด้วยอัตราความเร็วสูงสุด

สำหรับวัตถุจริง คือ วัตถุที่มีผิวปลดปล่อยรังสีออกจากผิวด้วยอัตราเร็วต่ำกว่าวัตถุดำ ที่มีอุณหภูมิเดียวกัน ϵ ของวัตถุจริงจึงมีค่าน้อยกว่า 1 อัตราการแผ่รังสีของวัตถุจริงหาได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{\text{emit}} = \epsilon \sigma A T_s^4 \quad [\text{W}] \quad (2-7)$$

วัตถุบางชนิดสามารถดูดกลืนและสะท้อนรังสีได้ เมื่อมีอัตราการแผ่รังสีตกกระทบวัตถุ โดยขึ้นอยู่กับสมบัติการแผ่รังสีของผิว คือ สภาพการดูดกลืน (Absorptivity, α_A) คือ สัดส่วนพลังงานที่ผิวดูดกลืนเทียบกับรังสีที่ตกกระทบ มีค่าอยู่ในช่วง $0 \leq \alpha \leq 1$ ดังภาพที่ 1-5



ภาพที่ 2-5 การดูดกลืนของรังสีตกกระทบบนผิวที่บแสงที่มีสภาพดูดกลืน α_A

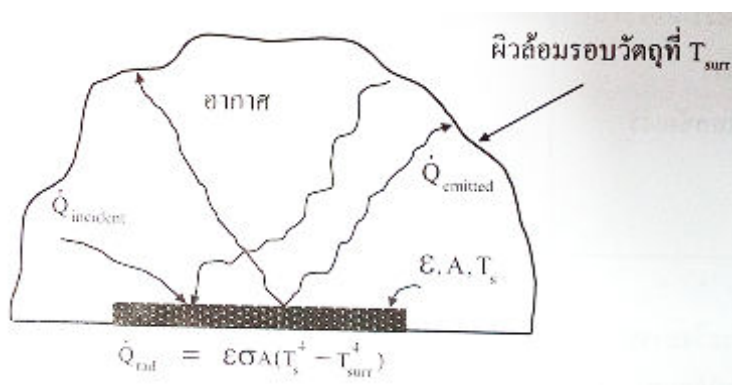
กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's law) สภาพการเปล่งรังสีและสภาพการดูดกลืนของผิว มีค่าเท่ากันที่อุณหภูมิและความยาวคลื่นเดียวกัน กฎนี้สามารถนำไปใช้หาค่า ϵ และ α_A เฉลี่ยของผิวได้ โดยอัตราการแผ่รังสีที่ผิวดูดกลืนหาได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{\text{Absorp}} = \alpha_A \dot{Q}_{\text{incident}} \quad [\text{W}] \quad (2-8)$$

โดยที่ $\dot{Q}_{\text{incident}}$ คือ อัตราการแผ่รังสีที่ตกกระทบผิวและ α_A คือ สภาพการดูดกลืนของผิว สำหรับวัตถุทึบแสงไม่ดูดกลืนรังสีตกกระทบที่ผิว แต่สะท้อนกลับออกไปจากผิวหมด $\alpha_A = 0$

อัตราการแผ่รังสีสุทธิระหว่าง 2 ผิวเมื่อพื้นที่ผิวหนึ่ง (A) มีสภาพการเปล่งรังสี (ϵ) อุณหภูมิสมบูรณ์ที่ T_s และมีพื้นผิวที่มีขนาดใหญ่กว่ามาก (หรือผิวดำ) อีกผิวหนึ่งซึ่งมีอุณหภูมิสมบูรณ์ T_{surr} ล้อมรอบอย่างสมบูรณ์ (Completely enclosed) ระหว่าง 2 ผิวนี้แยกออกจากกัน ด้วยก๊าซ เช่น อากาศ ที่ไม่ได้เข้ามาแทรกการแผ่รังสี ดังแสดงในภาพที่ 1-6 และสามารถคำนวณการแผ่รังสีได้ด้วยสมการ

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \quad [\text{W}] \quad (2-9)$$



ภาพที่ 2-6 การแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิวของวัตถุ 2 ชนิด

หลักการพื้นฐานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) คือ อุปกรณ์ที่ใช้เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลสองชนิดซึ่งมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันและมีการไหลอย่างต่อเนื่อง เช่น เครื่องทำความร้อน เครื่องปรับอากาศ และรวมถึงการผลิตพลังงานไฟฟ้า

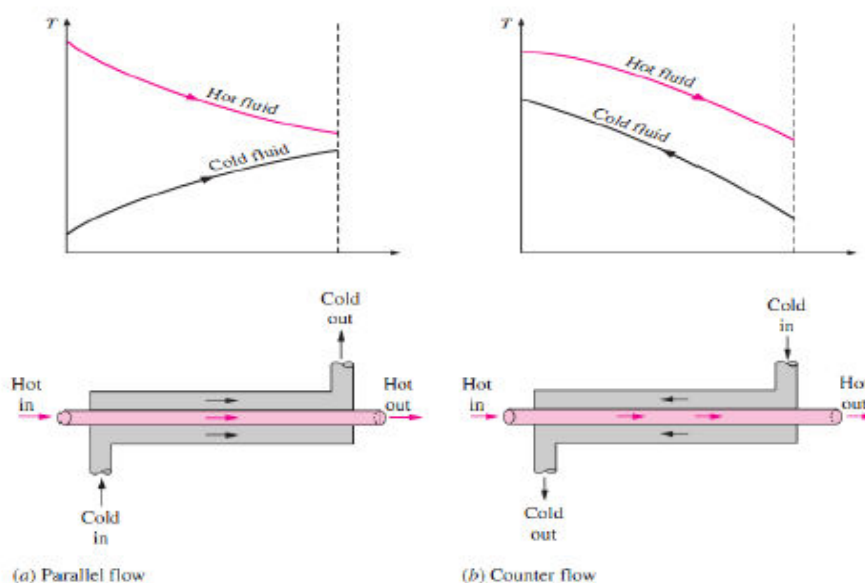
ในโรงงานขนาดใหญ่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถ่ายโอนความร้อนจากของไหลที่มีอุณหภูมิสูงกว่าด้วยการพาความร้อนและการนำความร้อนร่วมกันผ่านผนังของท่อที่กั้นของไหลทั้งสองชนิดไปยังของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เพื่อให้การถ่ายโอนความร้อนของระบบให้ได้ตามความต้องการ จึงมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้เลือกใช้งานหลายชนิด

1. ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Type of heat exchangers) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายแบบหลายชนิด โดยการจำแนกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลภายในและลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นหลัก โดยทั่วไปเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถูกจำแนกออกเป็น 3 แบบ คือ

1.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่หรือเรียกอีกอย่างว่าแบบท่อสองชั้น (Double tube or concentric tube heat exchanger) โดยที่ของไหลร้อนหรือเย็นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อคู่ไหลผ่านท่อที่มีขนาดเล็กกว่า ในขณะที่ของไหลเย็นหรือร้อนอีกชนิดจะไหลผ่านช่องว่างของวงแหวนระหว่างท่อสองท่อ ดังแสดงในภาพที่ 2-7 การไหลของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อคู่มี 2 แบบ คือ

1.1.1 การไหลขนาน (Parallel flow) คือ การที่ของไหลร้อนและเย็นไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ปลายท่อด้านเดียวกันและเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน

1.1.2 การไหลสวนทาง (Counter flow) คือ การที่ของไหลร้อนและเย็นไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ปลายท่อตรงกันข้ามและเคลื่อนที่สวนทางกัน

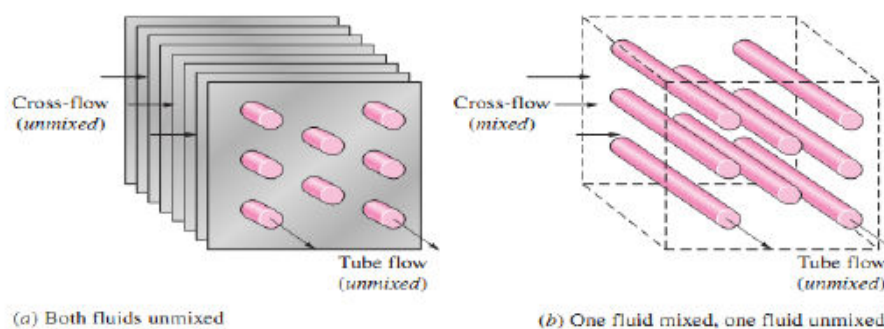


ภาพที่ 2-7 รูปแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อคู่หรือท่อสองชั้นและลักษณะทิศทางการไหลภายใน

1.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบที่ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกัน (Cross flow) โดยที่ของไหลจะไหลในทิศทางตั้งฉากกัน ดังแสดงในภาพที่ 2-8 ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นสามารถทำให้มีลักษณะของไหลเป็นแบบไหลเดี่ยวเดียว (Single pass) หรือไหลสองเที่ยว (Double pass) หรือมากกว่านั้นก็ได้ขึ้นอยู่กับความต้องการพื้นที่ผิวที่ต้องการให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน และการไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

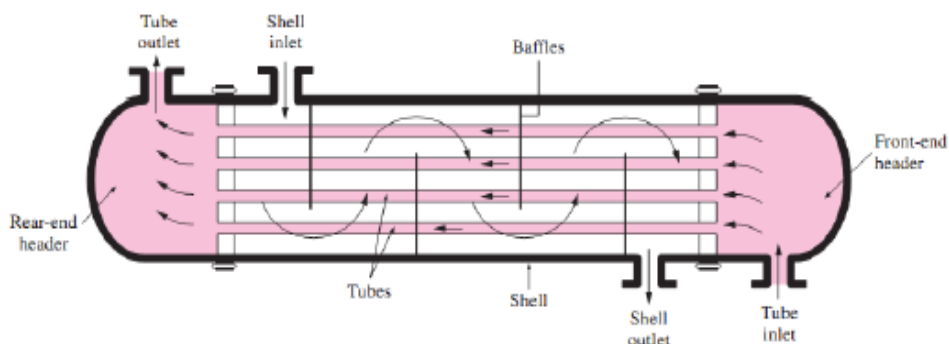
1.2.1 การไหลขวางแบบไม่ถูกผสม (Unmixed flow) เนื่องจากแผ่นคิริบจะแยกของไหลให้ไหลผ่านช่องว่างขนาดเล็กและบังคับไม่ให้ของไหลเคลื่อนที่ในทิศทางไขว้กัน แต่ให้ไหลขนานไปกับท่อ

1.2.2 การไหลขวางแบบถูกผสม (Mixed flow) เนื่องจากของไหลจะถูกปล่อยให้เคลื่อนที่โดยอิสระในทิศทางที่ไขว้กันไปมา



ภาพที่ 2-8 รูปแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง

1.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ (Shell and tube) เครื่องแลกเปลี่ยนชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยส่วนประกอบมีท่อ (Tube) จำนวนมากบรรจุอยู่ในเชลล์ (Shell) โดยวางท่อเหล่านี้ในแนวขนานไปตามแนวของเชลล์ การถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นเมื่อของไหลหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในท่อต่าง ๆ ขณะที่ของไหลอีกชนิดหนึ่งเคลื่อนที่อยู่ภายนอกท่อเหล่านี้ ซึ่งก็คือ เชลล์และไหลผ่านเชลล์ออกไปจากระบบโดยภายในเชลล์จะมีแผ่นกั้น (Baffles) เพื่อให้ของไหลภายในไหลขวางท่อมากขึ้นถือเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อน และรักษาระยะของช่องระหว่างท่อให้มีระยะห่างกันสม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 2-9

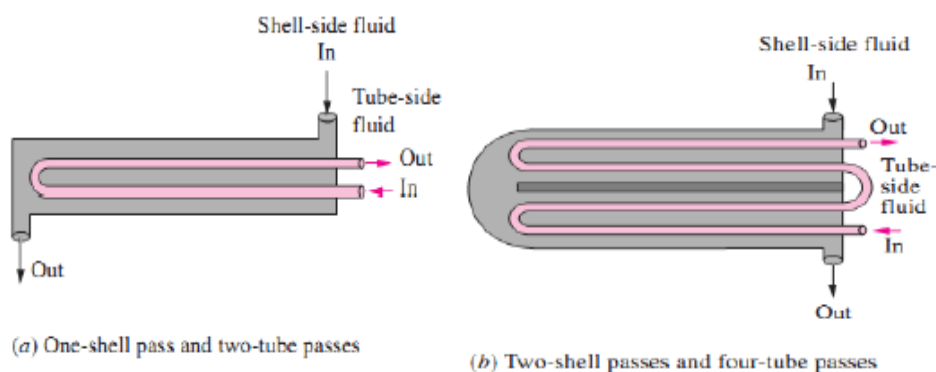


ภาพที่ 2-9 รูปแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ สามารถแบ่งตามการไหลผ่านจำนวนเชลล์และท่อ ได้ดังนี้

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหนึ่งเปลือกที่มีสองท่อ (One-shell pass and two-tube passes) ดังแสดงในภาพที่ 1-10 (a) หรือถ้าต้องการพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนให้มากขึ้นก็สามารถออกแบบให้เป็นแบบหนึ่งเชลล์ที่มี n ท่อ (One-pass and 2,4,6,... tube passes) โดยที่ n คือจำนวนท่อ (tube) ที่อยู่ภายในเชลล์

2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลผ่านท่อสองโค้งในหนึ่งเชลล์และสี่ท่อ เรียกว่า Two-shell passes and four-tube passes ดังแสดงในภาพที่ 2-10 (b)



ภาพที่ 2-10 ลักษณะภายในของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ

2. การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในการเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับนำมาใช้งานนั้น จำเป็นจะต้องทราบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในลำของไหลที่ทางออกของ

ค่าของไหลร้อนและเย็นตามอัตราการไหลที่กำหนดให้ โดยอัตราการถ่ายโอนความร้อนระหว่างของไหลร้อนและเย็นแต่ละจุดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นอยู่กับขนาดของความแตกต่างของอุณหภูมิที่จุดนั้น ๆ ซึ่งแปรผันไปตามเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมี 2 วิธี คือ

2.1 วิธีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (Logarithmic mean temperature difference) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า LMTD

2.2 วิธีเอฟแฟ็กทีฟเนส-เอ็นทียู (Effectiveness-NTU) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า NTU เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นเป็นอุปกรณ์ที่ถูกใช้งานเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนสภาวะ ดังนั้น จึงจำลองให้เป็นอุปกรณ์ที่มีการไหลคงที่ ซึ่งเป็นการจำลองแบบอุดมคติซึ่งใกล้เคียงกับการนำไปใช้งานในทางปฏิบัติ เพื่อให้การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำได้ง่ายขึ้นและสามารถนำไปใช้งานได้โดยทั่วไป ดังนี้

2.2.1 อัตราการไหลเชิงมวลของไหลคงที่

2.2.2 สมบัติของของไหลต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วตรงทางเข้าหรือทางออก โดยมีค่าเท่าเดิม

2.2.3 ค่าของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือความสูง ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ถือว่าน้อยมากจึงตัดทิ้ง

2.2.4 ปกติความร้อนจำเพาะของของไหลเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ แต่ในช่วงอุณหภูมิที่สภาวะคงที่ กำหนดให้มีค่าคงที่ที่ค่าเฉลี่ยได้โดยมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2.2.5 การนำความร้อนในแนวแกนตามความยาวท่อถือว่าไม่มีนัยสำคัญและตัดทิ้งได้

2.2.6 สมมติผิวด้านนอกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหุ้มด้วยฉนวนอย่างสมบูรณ์ จึงไม่มีการสูญเสียความร้อนไปยังตัวกลางที่ล้อมรอบ การถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นระหว่างของไหลสองชนิดเท่านั้น

ภายใต้สมมุติฐานเหล่านี้ สามารถใช้กฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากของไหลร้อนเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อนไปยังของไหลเย็น นั่นคือ

$$\dot{Q} = \dot{m}_c C_{pc} (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad [\text{kW}] \quad (2-10)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C_{ph} (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad [\text{kW}] \quad (2-11)$$

โดยที่ตัวห้อย c, h คือ ของไหลเย็นและร้อน \dot{m}_c , \dot{m}_h คือ อัตราการไหลเชิงมวล C_{pc} , C_{ph} คือ ความร้อนจำเพาะของของไหล $T_{c,in}$, $T_{h,in}$ คือ อุณหภูมิที่ทางเข้า และ $T_{c,out}$, $T_{h,out}$ คือ อุณหภูมิที่ทางออก

การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะรวมผลคูณของอัตราการไหลเชิงมวลและความร้อนจำเพาะของของไหลให้เป็นเทอมเดียวกัน เรียกเทอมนี้ว่า อัตราความจุความร้อน (Heat capacity rate) ดังสมการ

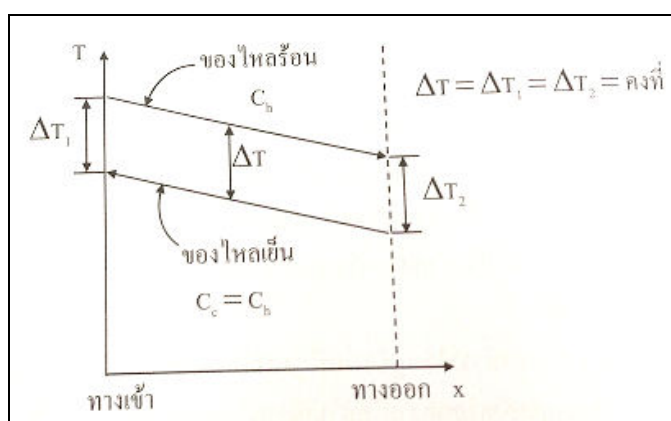
$$C_h = \dot{m}_h C_{ph} \quad \text{และ} \quad C_c = \dot{m}_c C_{pc} \quad [\text{kW}/^{\circ}\text{C}] \quad (2-12)$$

ซึ่งจากนิยามของอัตราความจุความร้อนข้างต้นจะเขียนได้ใหม่เป็น

$$\dot{Q} = C_c (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad [\text{kW}] \quad (2-13)$$

$$\dot{Q} = C_h (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad [\text{kW}] \quad (2-14)$$

นั่นคือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับอัตราความจุความร้อนของของไหลทั้งสองชนิดคูณกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่ออัตราความจุความร้อนของของไหลสองชนิดเท่ากัน อุณหภูมิของไหลเย็นเพิ่มขึ้นเท่ากับอุณหภูมิของไหลร้อนลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 ของไหลสองอย่างมีอัตราการไหลและความจุความร้อนเท่ากันจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิเหมือนกันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวนอย่างดี

ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบปิดและระบบเปิด อัตราการถ่ายโอนความร้อน คือ ปริมาณความร้อนต่อเวลา ซึ่งปริมาณความร้อนสามารถหาได้โดยใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ขึ้นอยู่กับว่าเป็นปริมาณความร้อนในระบบปิด (Close system) เรียกอีกอย่างว่าการควบคุมมวล (Control mass) หรือระบบเปิด (Open system) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการควบคุมปริมาตร (Control volume) การดุลพลังงานในระบบปิดเมื่อไม่มีงานเข้ามาเกี่ยวข้องกับ ปริมาณความร้อน คือ พลังงานภายใน (Internal energy) แทนสัญลักษณ์ด้วย U มีหน่วยเป็นจูล (J) พลังงานภายในถูกนำไปใช้ในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน เช่น กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ในระบบปิดให้หาปริมาณความร้อนของก๊าซจากความแตกต่างของพลังงานภายใน Δt ดังสมการ

$$Q = \Delta U = mC_{v,ave} \Delta t \quad [kJ] \quad (2-15)$$

โดยที่ m , C_v , ave และ Δt คือ มวลของระบบ (kg) ความร้อนเฉลี่ยที่ปริมาตรคงที่ ($kJ/kg \cdot ^\circ C$) และความแตกต่างของอุณหภูมิ ($^\circ C$)

ส่วนของแข็งและของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) ปริมาตรจำเพาะหรือความหนาแน่นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่ไม่ขึ้นอยู่กับความดัน ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ที่ปริมาตรและความดันคงที่จึงมีค่าเท่ากัน แทนสัญลักษณ์ด้วย C นั้น คือ $C_p \cong C_v \cong C$ การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของของแข็งและของเหลวในระบบมีเพียงวัฏจักรเดียวหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรภาค จึงใช้ความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย C_{ave}

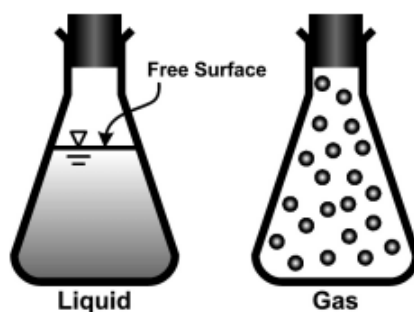
$$Q = \Delta U = mC_{v,ave} \Delta t \quad [kJ] \quad (2-16)$$

หลักการพื้นฐานและคุณสมบัติของของไหล

รัศมีคร ออกระลา (2553) ของไหล (Fluid) หมายถึง สสารที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อถูกกระทำด้วยแรงเฉือน นั้นหมายความว่า เมื่อใดก็ตามที่มีแรงเฉือนมากระทำ ของไหลจะเกิดการขยับตัวและเปลี่ยนรูปร่างไป ของไหลสามารถคงรูปอยู่ได้ 2 สถานะ ได้แก่

1. สถานะของเหลว (Liquid) มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามภาชนะที่บรรจุ แต่จะมีขอบเขตแบ่งระหว่างตัวมันเองกับของไหลอื่นอย่างชัดเจน เรียกว่า “ผิวอิสระ (Free surface)

2. สถานะก๊าซ (Gas) มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามภาชนะที่บรรจุ โดยมีลักษณะการแพร่กระจายไปทั่วภาชนะ ไม่มีผิวอิสระ และสามารถถูกบีบอัดได้ง่ายกว่าของเหลว เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างโมเลกุลมากกว่าของเหลว ดังแสดงความแตกต่างดังภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 ความแตกต่างระหว่างของเหลวกับก๊าซ

คุณสมบัติของของไหลประกอบไปด้วย

1. ความหนาแน่น (Density or mass density) หมายถึง มวลของของไหล (Mass) ในหนึ่งหน่วยปริมาตร (Volume) โดยสัญลักษณ์ที่ใช้แทน คือ ρ เขียนสมการได้ดังนี้

$$\rho = \frac{\text{Mass}}{\text{Volume}} = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/ m}^3] \quad (2-17)$$

2. น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight) หมายถึง น้ำหนักเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของของไหล (Weight) ในหนึ่งหน่วยปริมาตร (Volume) โดยสัญลักษณ์ที่ใช้แทน คือ γ เขียนสมการได้ดังนี้

$$\gamma = \frac{\text{Weight}}{\text{Volume}} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad [\text{N/ m}^3] \quad (2-18)$$

3. ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างแรงดึงดูดที่สนามแรงโน้มถ่วงกระทำกับของเหลวชนิดนั้นเทียบกับน้ำอุณหภูมิ 4°C ความดัน 1 บรรยากาศ ที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยสัญลักษณ์ที่ใช้แทน คือ S หรือ SG สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$\text{SG} = \frac{W}{W_w} = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{\rho g}{\rho_w g} = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (2-19)$$

4. ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) หมายถึง ปริมาตรของไหล (Volume) ต่อหนึ่งหน่วยมวล (Mass) โดยสัญลักษณ์ที่ใช้แทน คือ θ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\theta = \frac{\text{Volume}}{\text{Mass}} = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (2-20)$$

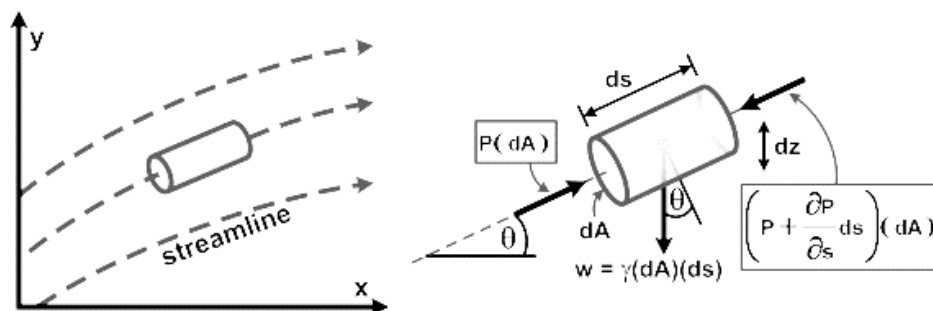
5. ความหนืด (Viscosity) เนื่องจากของไหล คือ สสารที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างต่อเนื่อง (Deformation) หากพิจารณาของไหลเป็นก้อนอนุภาค เมื่อถูกกระทำด้วยแรงเฉือน (Shear stress) อนุภาคของไหลแต่ละชนิดจะมีความสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคและการแลกเปลี่ยน โมเมนตัมระหว่างอนุภาคของไหลนั้น ความหนืดในการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอันเนื่องมาจากแรงเค้นเฉือนนี้เราเรียกว่า ความหนืด (Viscosity) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\theta = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (2-21)$$

สมการพลังงาน

หากพิจารณาอนุภาคของของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ในสนามของการไหล ความดัน ความเร็วของอนุภาค รวมถึงแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องไปตามตำแหน่ง และเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ เราสามารถวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการจากสมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง 3 สมการ คือ สมการความต่อเนื่อง สมการพลังงาน และสมการโมเมนตัม ในการวิจัยนี้จะกล่าวถึงสมการพลังงานเท่านั้น

สมการพลังงานของ Euler (Euler's energy equation) พิจารณาอนุภาคของไหลรูปทรงกระบอกที่กำลังเคลื่อนที่ไปตาม Streamline ดังภาพที่ 1-13



ภาพที่ 2-13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหลตามแนวทางการไหล

ของไหลเคลื่อนที่ไปตาม Streamline ด้วยความเร็ว a ทำมุม θ กับแนวระดับ พิจารณา
แรงภายนอกที่กระทำกับของไหล ประกอบด้วย

1. แรงดันเนื่องจากความดันผิวของทรงกระบอก ที่ทิศทางหักล้างกันหมด ดังนั้น แรงดัน
จึงเหลือเพียงแรงที่กระทำกับปลายด้านหนึ่งมีค่าเท่ากับ $P (dA)$ ส่วนอีกด้านเท่ากับ .

$$\left\{ P + \frac{\partial P}{\partial s} ds \right\} (dA)$$

2. น้ำหนักของก้อนอนุภาค $dW = \gamma (dV) = \gamma (dA * ds)$

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$\sum F = m\bar{a} \quad [N] \quad (2-22)$$

สมการพลังงานของ Leonhard Euler คือ

$$dz + \frac{\partial P}{\gamma} + \frac{V \cdot dV}{g} = 0$$

สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's equation) คือ

$$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = C \quad (2-23)$$

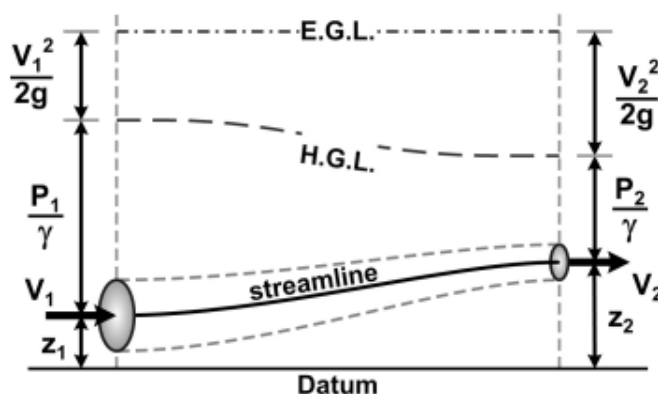
หรือ $Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2-24)$

เมื่อ Z คือ เสดของพลังงานศักย์ซึ่งก็คือ ความสูงจากระดับอ้างอิงถึงแนวเส้นทาง
การไหล หรือเรียกว่า เสดระดับ (Potential head or elevation head)

$\frac{P}{\gamma}$ คือ เสดของพลังงานอันเนื่องมาจากความดันสถิต หรือเรียกว่า เสดความดัน (Pressure
head)

$\frac{V^2}{2g}$ คือ เสดของพลังงานจล หรือเรียกว่า เสดความเร็ว (Velocity heads)

ความหมายของสมการเบอร์นูลี คือ หากไม่มีผลจากพลังงานจากภายนอกและการสูญเสียพลังงานจากภายในระบบ ความสัมพันธ์ของตัวแปรของของไหลที่เดินทางไปตาม Streamline ผ่านจุดที่ 1 และ 2 จะเป็นไปตามสมการข้างต้น ดังแสดงในภาพที่ 2-14

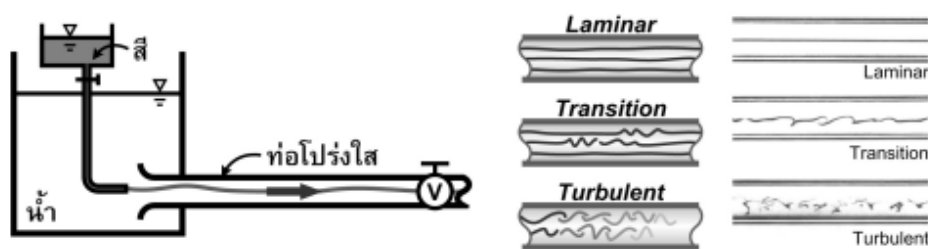


ภาพที่ 2-14 ความสัมพันธ์ของตัวแปรเทอมต่าง ๆ ในสมการเบอร์นูลี

การไหลภายในท่อ

การไหลของของไหลภายในท่อ หมายถึงการไหลของของไหลที่มีผนังปิดล้อมทุกด้าน และมีของไหลไหลอยู่เต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อ ไม่มีผิวอิสระอยู่ด้านบนของหน้าตัดการไหล (ของไหลไม่มีส่วนใดสัมผัสกับอากาศ) การไหลจะอยู่ภายใต้ความดันตลอดช่วงของการพิจารณา

พฤติกรรมของการไหลในท่อ (Behavior of flow in pipe) ในปี ค.ศ. 1883 Osborne Reynolds ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการไหลในท่อ โดยใช้เครื่องมือที่ประกอบด้วยถังน้ำขนาดใหญ่ เชื่อมต่อกับท่อโปร่งใสที่มีวาล์วควบคุมการไหลอยู่ที่ปลายท่อ และถังบรรจุสีขนาดเล็ก เชื่อมต่อกับกับท่อขนาดเล็ก ทำหน้าที่ปล่อยอนุภาคสีเข้าไปในท่อโปร่งใส ดังแสดงในภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-15 เครื่องมือทดสอบการไหลและพฤติกรรมการไหลของเรย์โนลด์

จากผลการทดลองพบว่า สามารถแบ่งพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในท่อออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

1. การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) จะเกิดจากการไหลของของไหลที่มีความหนืดสูงหรือความเร็วในการไหลต่ำ อนุภาคของของไหลจะเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบขนานกับทิศทางของการไหล ซึ่งสังเกตได้จากแนวเส้นสีที่เกิดขึ้นจากการทดลอง จะมีลักษณะที่เป็นเส้นตรงและราบเรียบ

2. การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) จะเกิดกับการไหลของของไหลที่มีความหนืดต่ำหรือความเร็วในการไหลมาก อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ไม่เป็นระเบียบ แนวเส้นทางการเคลื่อนที่มีความแปรปรวนมาก โดยจะสังเกตได้จากแนวเส้นสีที่เกิดขึ้นจากการทดลอง จะกวัดแกว่งไปมาไม่เป็นระเบียบและมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

3. การไหลในช่วงแปรเปลี่ยน (Transition flow) เป็นช่วงของการไหลที่กำลังจะพัฒนาจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เป็นช่วงที่ไม่สามารถคาดเดาพฤติกรรมของการไหลได้อย่างแน่นอน

นอกจากนี้ การศึกษาของเรย์โนลด์ยังค้นพบว่า พฤติกรรมทั้ง 3 ลักษณะยังสอดคล้องกับค่าของกลุ่มตัวแปรไร้มิติกลุ่มหนึ่ง ซึ่งภายหลังถูกเรียกว่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) กล่าว คือ

ถ้า $Re < 2,000$ จะเป็นการไหลแบบราบเรียบ

$2,000 < Re < 4,000$ จะเป็นการไหลในช่วงของการแปรเปลี่ยน

$Re > 4,000$ จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

โดยเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหลในท่อกลมคำนวณได้จากสมการ

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (2-25)$$

เมื่อ V = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

μ = ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity; $\mu_{\text{water}@22C} = 1.0 \cdot 10^{-3}$)

ν = ความหนืดคิเนมาติก (Kinematic Viscosity; $\nu_{\text{water}@22C} = 1.0 \cdot 10^{-6}$)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นคร เกิดผล (2547) ได้ทำการวิจัยเรื่องการลดความสูญเสียในการใช้ไอน้ำในการผลิต อวน ด้วยการศึกษาพลังงานที่ใช้ในการผลิตอวนหาค่าพลังงานที่มีความสิ้นเปลืองมากที่สุด พบว่า พลังงานไอน้ำมีการสูญเสียมากที่สุดร้อยละ 83 ของการสูญเสียทั้งหมด แล้วทำการวิเคราะห์ ด้วยการทำสมดุลของพลังงานทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับระบบพลังงานไอน้ำ พบว่า ก๊อบดักไอน้ำมีรั่ว มีอัตราการสูญเสียไอน้ำมากที่สุดถึงร้อยละ 48 ของความสูญเสียไอน้ำทั้งหมด โดยสาเหตุที่ทำให้รั่ว คือ เกิดการสึกที่บ่าวาล์ว แล้วทำการวิเคราะห์หาสาเหตุการสึกของบ่าวาล์วด้วยสมการถดถอยและ สหสัมพันธ์เชิงซ้อน พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายในน้ำ (TDS) ค่า PH ของไอน้ำ แรงดันของไอน้ำ และระยะของการใช้งานของอุปกรณ์ดักไอน้ำมีผลต่อการสึกของบ่าวาล์ว การแก้ไขปัญหาดังกล่าวมี 2 แนวทาง คือ 1) ทำการควบคุมค่า TDS ในหม้อไอน้ำให้ได้ตามที่ผู้ผลิต ไอน้ำกำหนดโดยใช้การ โบว์ดาวันแบบต่อเนื่อง ซึ่งทำให้ค่าคอนเดนเสทเข้าใกล้ศูนย์ และ ทำการเปลี่ยนอุปกรณ์ดักไอน้ำทุก ๆ 22 เดือน หรือ 2) กำหนดให้เปลี่ยนอุปกรณ์ดักไอน้ำใหม่ ทุก ๆ 3 ปี

เมื่อดำเนินการตามที่แนวทางการแก้ไขตามแนวทางดังกล่าวแล้วทำให้ลดปริมาณการใช้ พลังงานไอน้ำลงและส่งผลให้ปริมาณการใช้น้ำมันเตาลดลงร้อยละ 12.28 ของการใช้น้ำมันเตา ทั้งหมด

ชนาธิป บำรุงบ้าน (2552) ได้วิจัยเรื่อง การลดการสูญเสียไอน้ำจากอุปกรณ์ก๊อบดักไอน้ำ แบบเทอร์โมไดนามิกส์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์ปัญหาการสูญเสียไอน้ำจากอุปกรณ์ ก๊อบดักไอน้ำแบบต่าง ๆ ในแต่ละปีโรงงานตัวอย่างชื่อไอน้ำจากภายนอกจำนวน 963,203 ตัน คิดเป็นเงินประมาณ 979,436,838 บาท และเกิดการสูญเสียไอน้ำปีละจำนวน 100,782 ตัน หรือร้อยละ 10.46

จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใน อุปกรณ์อย่างรวดเร็ว เมื่อมีบางส่วนสัมผัสน้ำและเกิดเฉพาะอุปกรณ์ก๊อบดักไอน้ำแบบ เทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งได้ทำการแก้ไขโดยการออกแบบตัวป้องกันน้ำแล้วทำการทดลองใช้กับก๊อบดัก ไอน้ำ จำนวน 10 ตัว จากจำนวนทั้งหมด 513 ตัว และวัดประสิทธิภาพด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ผลที่ได้คือ ลดการสูญเสียไอน้ำที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด ซึ่งก่อนทำการปรับปรุงมีการสูญเสียไอน้ำ คิดเป็นเงิน 17,801,800 บาท และหลังจากทำการปรับปรุงก็สามารถลดค่าใช้จ่ายได้ 17,801,800 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 2 ของมูลค่าการสูญเสียทั้งหมด

กิตติวุฒิ สุทธิวิโรจน์ (2551) ได้วิจัยเรื่อง พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของ ระบบการทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์หมุนเวียนน้ำร้อนด้วยพลังงานไอน้ำ โดยมี

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อระบบการทำน้ำร้อน เนื่องจากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำแบบเดิม และถังเก็บถูกออกแบบให้มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ระหว่างน้ำร้อนที่มาจากแผงรับรังสีความร้อนกับน้ำภายในถังเก็บ ก่อให้เกิดความร้อนจากกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อปริมาณการจ่ายน้ำมีมากขึ้นระยะเวลาในการหมุนเวียนของน้ำในวงจรก็จะใช้มากขึ้นตามด้วย เป็นผลให้การหมุนเวียนของน้ำในระบบมีค่าน้อยลงและประสิทธิภาพเชิงความร้อนก็ต่ำลงด้วย

จากการปรับปรุงพบว่า ที่ระดับความสูงในการจ่ายน้ำ 1 เมตร มีค่าปริมาณความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนมีค่าเท่ากับ 3,269 kJ สูงกว่าระบบเดิม 1.8 เท่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนร้อยละ 17.4 สูงกว่าระบบเดิม 1.5 เท่า อุณหภูมิเฉลี่ยภายในถังน้ำร้อน 57.4°C สูงกว่าระบบเดิม 1.2 เท่า และสามารถผลิตน้ำร้อนได้ 58.1 ลิตรต่อวัน สูงกว่าระบบเดิม 1.4 เท่า เนื่องจากการส่งน้ำร้อนจากตัวรับรังสีความร้อนไปยังถังเก็บน้ำร้อนโดยตรง ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ คือ รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์และระดับความสูงในการส่งน้ำ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษา

บทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการผลิตและลักษณะของกระบวนการที่ต้องการจะปรับปรุงของบริษัทกรณีศึกษา นอกจากนี้ยังแสดงถึงขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยอาศัยทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 นำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาและหาแนวทางการแก้ไขปรับปรุง ซึ่งเป็นที่มาของการทำการวิจัยในครั้งนี้ โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย มีดังนี้

1. การศึกษากระบวนการทำงาน
2. การเก็บรวบรวมข้อมูลของปัญหา
3. การวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดปัญหา
4. การนำเสนอแนวทางการแก้ไขปรับปรุง
5. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ
6. การดำเนินงานและติดตามผล
7. สรุปผลการดำเนินงาน

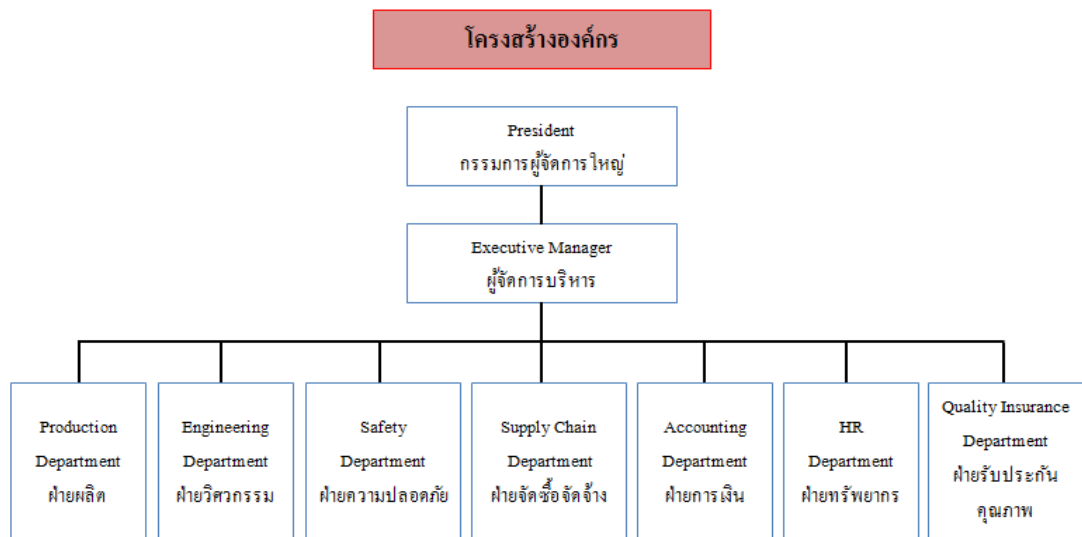
การศึกษากระบวนการทำงาน

1. ข้อมูลเบื้องต้นของบริษัทกรณีศึกษา

บริษัทกรณีศึกษาตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดระยอง ดำเนินการผลิตสารตั้งต้นของเวชภัณฑ์ และอาหารเสริมเพื่อส่งออกด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัยจากบริษัทแม่ โดยบริษัทได้ก่อตั้งในปี พ.ศ. 2555 และเริ่มทำการผลิตเชิงพาณิชย์ในปี พ.ศ. 2558

2. โครงสร้างขององค์กร

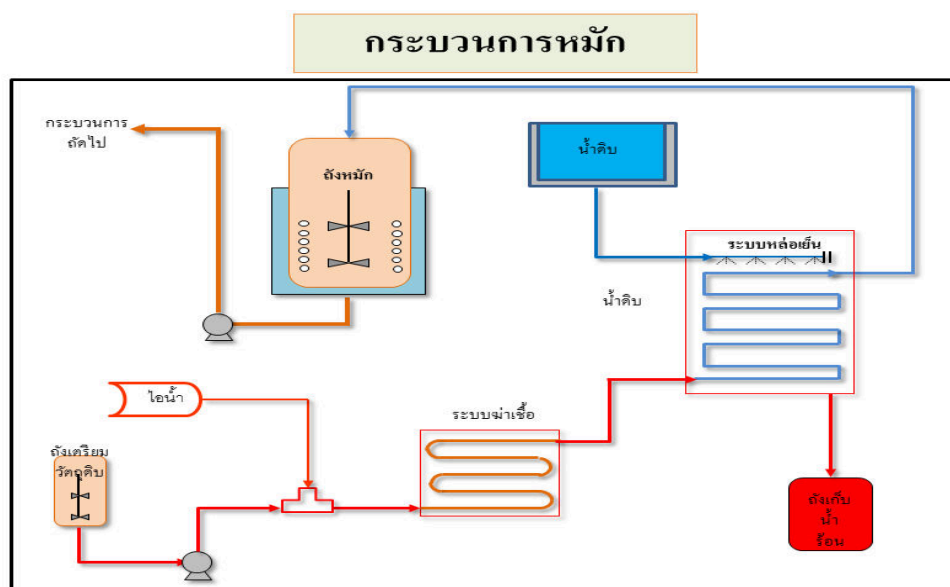
บริษัทกรณีศึกษามีโครงสร้างองค์กรดังภาพที่ 3-1 เพื่ออำนวยความสะดวกในการบริหารงาน โดยแบ่งออกเป็นส่วนงานต่าง ๆ ตามหน้าที่และความรับผิดชอบ ดังนี้



ภาพที่ 3-1 โครงสร้างองค์กร

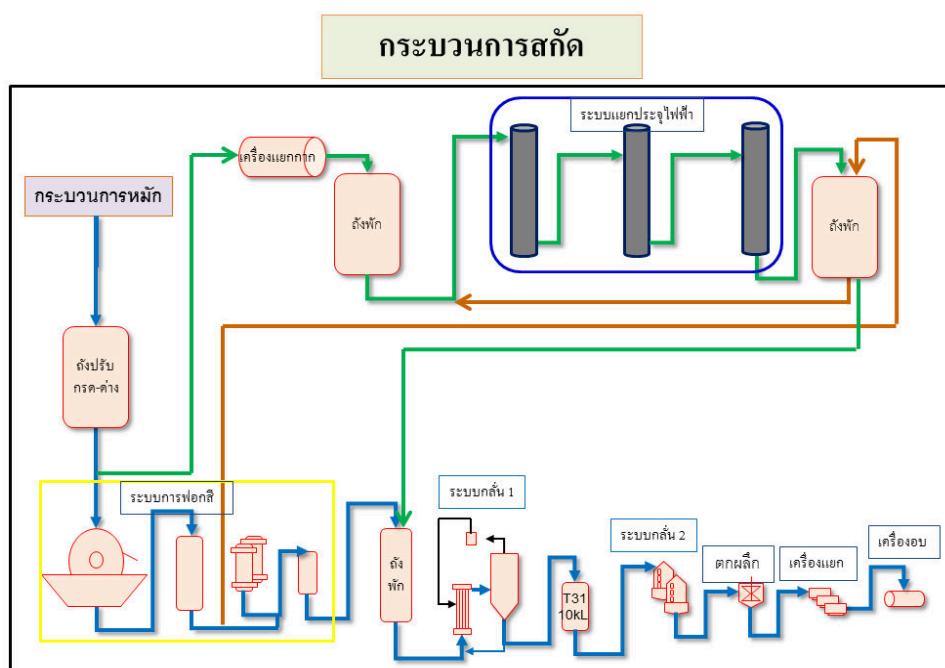
3. กระบวนการผลิต

บริษัทกรณีศึกษาเป็นโรงงานที่ทำการผลิตสารตั้งต้นของ ยา เวชภัณฑ์ เครื่องสำอางค์ เครื่องดื่มและอาหารเสริม ด้วยเทคโนโลยีของเครื่องจักรที่มีความทันสมัยและมีประสิทธิภาพแห่งหนึ่ง โดยประกอบไปด้วยกระบวนการหมักและการสกัดด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่น่าเข้ามาจากบริษัทแม่ ดังภาพที่ 3-2 และ ภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-2 กระบวนการหมัก

จากภาพที่ 3-2 กระบวนการหมัก ประกอบไปด้วยการเตรียมอาหารสำหรับส่งไปเลี้ยง จุลินทรีย์ โดยจะมีการเพาะเชื้อจุลินทรีย์ไว้จนมีการขยายตัวตามอัตราส่วนของการผลิต แล้วส่งไปเลี้ยงในถังหมักภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง โดยมีการให้อาหารที่เตรียมไว้ตลอดเวลาเพื่อเร่งให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตเต็มวัย จากนั้นก็จะ ทำการนำจุลินทรีย์ทั้งหมดเพื่อหยุดการเจริญเติบโตแล้วส่งไปเก็บไว้ในถังพักเพื่อรอส่งเข้าสู่ กระบวนการสกัดต่อไป ดังภาพที่ 3-3



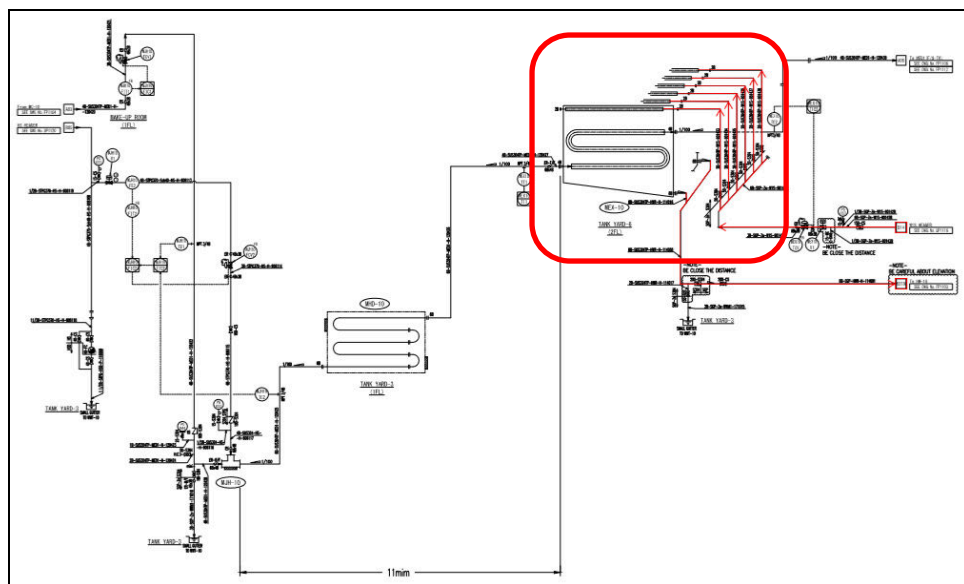
ภาพที่ 3-3 กระบวนการกลั่นสกัด

จากภาพที่ 3-3 เมื่อน้ำหมักถูกส่งมาที่ถังพักเพื่อทำการปรับสภาพความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) แล้วแยกกากออกจากน้ำผลิตภัณฑ์ จากนั้นน้ำหมักจะถูกส่งไปแลกเปลี่ยนประจุที่ กระบวนการเรซินเพื่อทำให้น้ำหมักบริสุทธิ์ขึ้นด้วยการแยกจุลินทรีย์และสิ่งปนเปื้อนออก แล้วส่งไปฟอกสีให้มีสีขาวด้วยการผสมผงคาร์บอนแบล็กแล้วกรองออก หลังจากนั้นก็ส่งเข้าระบบ การสกัดที่ใช้ระบบแรงเหวี่ยงสุญญากาศจนน้ำหมักเหลือแต่สารเคมีที่ต้องการ หลังจากนั้นส่งเข้าสู่ กระบวนการตกผลึกและแยกน้ำออกจากผลิตภัณฑ์แล้วอบให้แห้งจนออกมาเป็นผงผลิตภัณฑ์เพื่อ บรรจุภาชนะต่อไป

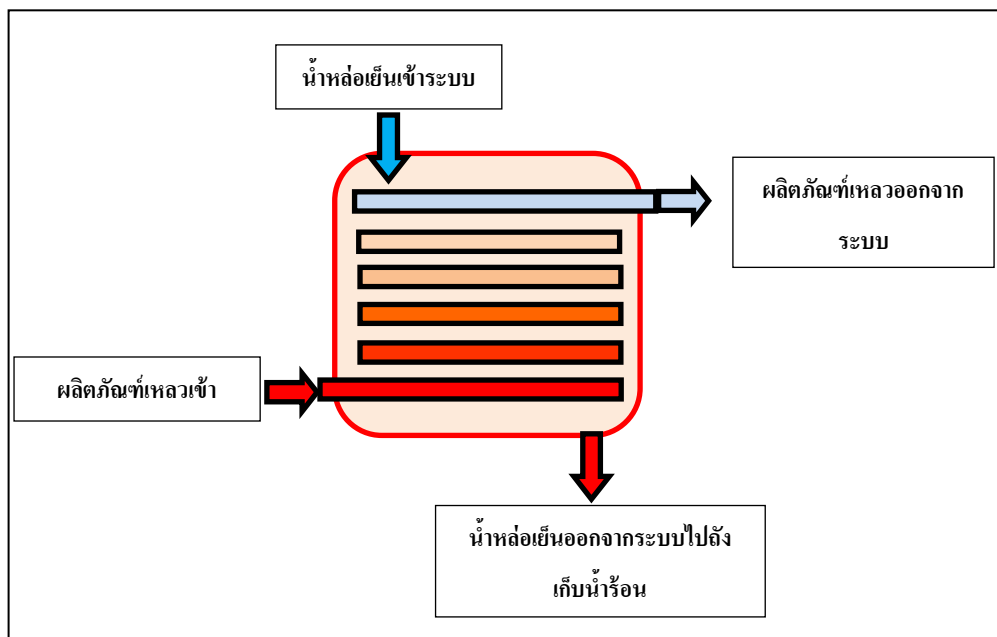
นอกจากฝ่ายผลิตแล้วก็ยังมีหน่วยงานสนับสนุนอื่น ๆ ที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิต โดยจะต่างกันก็ตรงที่ทำหน้าที่อำนวยความสะดวกให้กับกระบวนการผลิต โดยหน่วยงานสนับสนุนประกอบไปด้วย หน่วยงานวัตถุดิบ หน่วยงานบรรจุ หน่วยงานสาธารณสุขปโภคและ หน่วยงานบำบัดน้ำเสีย ซึ่งแต่ละส่วนงานก็มีหน้าที่การทำงานที่ต่างกันออกไป

การเก็บรวบรวมข้อมูลของปัญหา

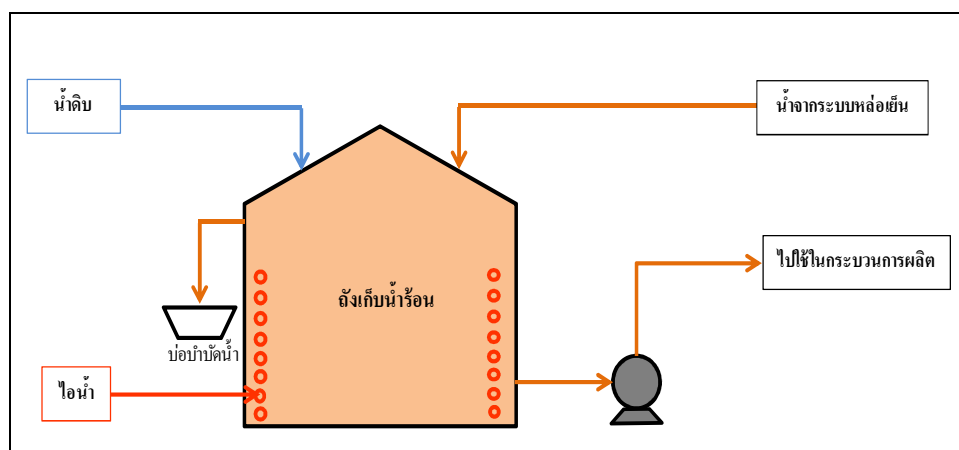
จากการศึกษาการทำงานของระบบหล่อเย็นผลิตภัณฑ์เหลวโดยใช้น้ำดิบในการแลกเปลี่ยนความร้อน ด้วยการอัดให้น้ำกระจายภายในภาชนะปิดที่มีท่อผลิตภัณฑ์เหลวอยู่ภายใน เพื่อเป็นการหล่อเย็นผลิตภัณฑ์เหลวที่อยู่ในท่อ โดยน้ำดิบที่นำไปทำการหล่อเย็นนั้นมีอุณหภูมิ 32°C และหลังจากผ่านการหล่อเย็นแล้วอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 40-90°C ขึ้นอยู่กับปริมาณของผลิตภัณฑ์เหลวที่ไหลในท่อ โดยน้ำที่ผ่านการหล่อเย็นแล้วจะถูกส่งเข้าไปยังถังเก็บน้ำร้อนทั้งหมดถึงถังเก็บน้ำร้อนนี้มีขนาดความจุ 100 kL (เท่ากับ 100 ลูกบาศก์เมตร) และควบคุมอุณหภูมิที่ 85°C สำหรับใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งน้ำที่ไหลมาที่ถังนี้มีปริมาณค่อนข้างมากจะผสมกันกับน้ำร้อนที่มีอยู่ในถังแล้วล้นออกจากถังไปยังบ่อน้ำ ส่วนภายในถังน้ำร้อนนั้น จะมีผลทำให้อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนลดลงต่ำกว่าค่าที่ควบคุม ทำให้ระบบต้องจ่ายไอน้ำเข้ามาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำในถังจนถึงจุดที่ควบคุมที่ 85°C ซึ่งทำให้เกิดความสูญเสียของไอน้ำในระบบ ดังแสดงในไดอะแกรมของระบบการทำงาน ดังภาพที่ 3-4 ถึง 3-6



ภาพที่ 3-4 ไดอะแกรมของระบบการแลกเปลี่ยนความร้อน



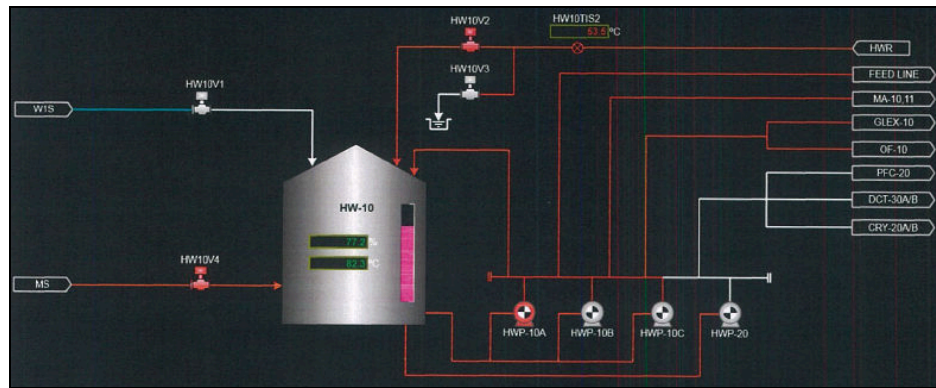
ภาพที่ 3-5 อุปกรณ์สำหรับหล่อเย็นผลิตภัณฑ์เหลวในท่อ



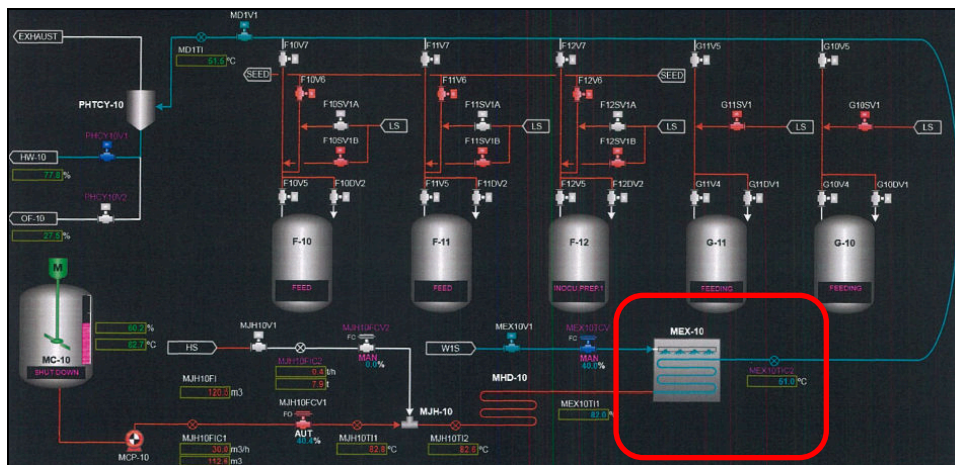
ภาพที่ 3-6 ระบบน้ำร้อนและถังเก็บ

จากภาพที่ 3-4 แสดงไดอะแกรมของระบบท่อส่งน้ำร้อนที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ภาพที่ 3-5 และ ภาพที่ 3-6 แสดงลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและถังเก็บน้ำร้อน ซึ่งเมื่อระบบการหล่อเย็นผลิตภัณฑ์เหลวทำงาน น้ำดิบที่ผ่านกระบวนการหล่อเย็นนั้นจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและไหลไปตามท่อทางเดิมลงที่ถังเก็บน้ำร้อน ระบบการทำงานนั้นถูกออกแบบการควบคุม

ด้วยระบบ DCS เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมการปฏิบัติงานในการผลิต โดยสามารถเฝ้าติดตามและควบคุมการทำงานของระบบจากห้องควบคุมได้ดังแสดงในกราฟฟิกต่อไปนี้



ภาพที่ 3-7 กราฟฟิกของระบบท่อบนหัวถังน้ำร้อนในปัจจุบัน



ภาพที่ 3-8 กราฟฟิกการทำงานของระบบหล่อเย็น

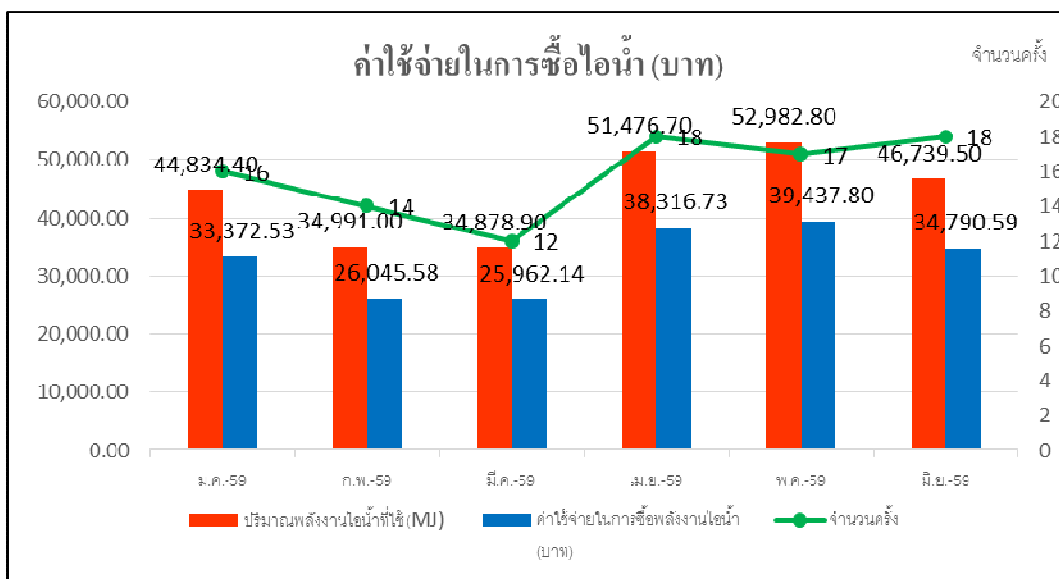
จากภาพที่ 3-7 และ ภาพที่ 3-8 จะเห็นได้ว่าไม่มีกราฟฟิกของไลน์ท่อส่งน้ำจากกระบวนการหล่อเย็นผลิตภัณฑ์เหลวไปที่ถังเก็บน้ำร้อน เนื่องจากระบบท่อส่งน้ำที่ใช้อยู่ในปัจจุบันไม่มีอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ท่อก่อนลงถังรวมถึงวาล์วควบคุมด้วย ซึ่งทำให้ไม่สามารถควบคุมปริมาณของน้ำร้อนที่ไหลกลับลงสู่ถังเก็บได้ ทำให้น้ำทั้งหมดที่ไหลมาเติมลงในถังเก็บผสมกับน้ำร้อนที่มีอยู่ในถังแล้วไหลออกทางท่อน้ำล้นของถัง และยังส่งผลให้น้ำที่อยู่ภายในถังมีอุณหภูมิ

ต่ำกว่า 85 °C ตามที่ต้องการ จึงเป็นสาเหตุให้ต้องมีการใช้พลังงานไอน้ำในการเพิ่มความร้อนให้กับน้ำในถังเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการที่ 85°C ซึ่งก่อให้เกิดความสูญเปล่าในการใช้พลังงานไอน้ำ

เมื่อกำนวณปริมาณความร้อนที่ใช้ไปในแต่ละเดือนได้แล้วก็นำมาหาค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อไอน้ำ โดยปริมาณไอน้ำ 1 ตัน จะมีค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 2,257 เมกะจูล และราคาที่ทางบริษัทซื้อไอน้ำเท่ากับ 1,680 บาทต่อตัน ดังนั้น จึงเอาปริมาณพลังงานไอน้ำที่ใช้ในแต่ละวันหารด้วย 2,257 เมกะจูล แล้วคูณด้วยราคา 1,680 บาทต่อตันก็จะได้ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการซื้อพลังงานไอน้ำของแต่ละเดือนซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สรุปปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายทั้งหมด

ครั้งที่	เดือน	จำนวน ครั้ง	ปริมาณพลังงาน ไอน้ำที่ใช้ (MJ)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ พลังงานไอน้ำ (บาท)
1	มกราคม พ.ศ. 2559	16	44,834.40	33,372.53
2	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	14	34,991.00	26,045.58
3	มีนาคม พ.ศ. 2559	12	34,878.90	25,962.14
4	เมษายน พ.ศ. 2559	18	51,476.70	38,316.73
5	พฤษภาคม พ.ศ. 2559	17	52,982.80	39,437.80
6	มิถุนายน พ.ศ. 2559	18	46,739.50	34,790.59
รวม		95	265,903.30	197,925.36
เฉลี่ยต่อเดือน		15.83	44,317.21	32,987.56
เฉลี่ยต่อครั้ง			2,798.98	2,083.42

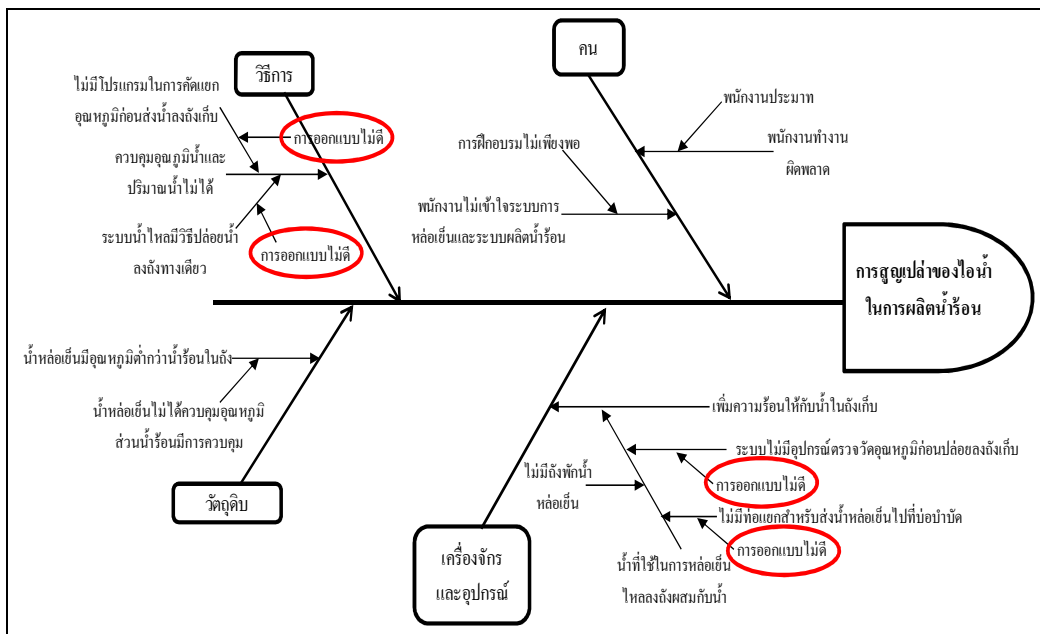


ภาพที่ 3-9 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่าย

ผลการรวบรวมข้อมูลการใช้ไอน้ำในการเพิ่มความร้อนให้กับน้ำที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันที่ผสมกันในถังเก็บน้ำร้อนจนมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 85°C สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตนั้น ผู้วิจัยและทีมงานฝ่ายวิศวกรรมได้มีความเห็นว่าการสิ้นเปลืองไอน้ำดังกล่าวสามารถลดลงได้ด้วยการปรับปรุงระบบท่อส่งและระบบการควบคุมใหม่เพื่อลดต้นทุนในการซื้อไอน้ำและเพื่อเป็นการใช้พลังงานไอน้ำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ด้วยสาเหตุนี้จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

การวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดปัญหา

จากข้อมูลปริมาณการใช้ไอน้ำในการเพิ่มความร้อนให้กับน้ำร้อน หลังจากนั้นผู้วิจัยนำการสูญเสียไอน้ำในการผลิตน้ำร้อนมาวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาโดยการใช้แผนภูมิแกงปลา ดังแสดงในภาพที่ 3-10



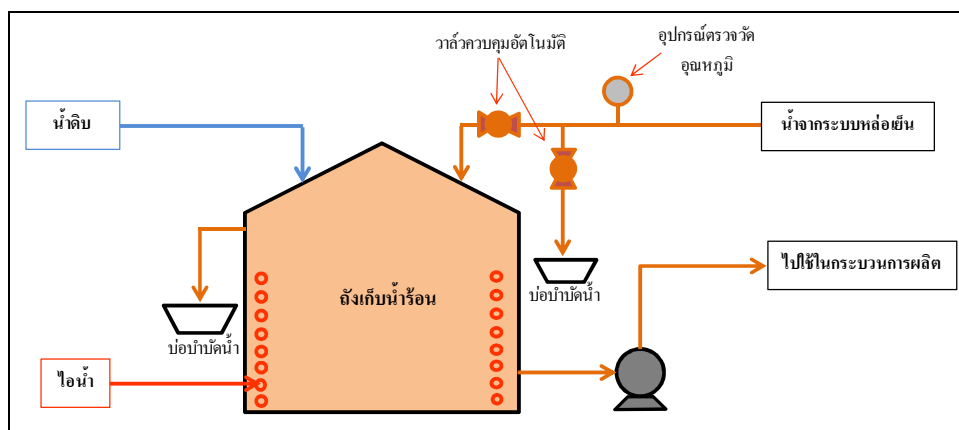
ภาพที่ 3-10 วิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนภูมิก้างปลา

จากการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนภูมิก้างปลา พบว่า สาเหตุของการสูญเสียไอน้ำในการผลิตน้ำร้อนเกิดจาก 2 สาเหตุหลัก คือ

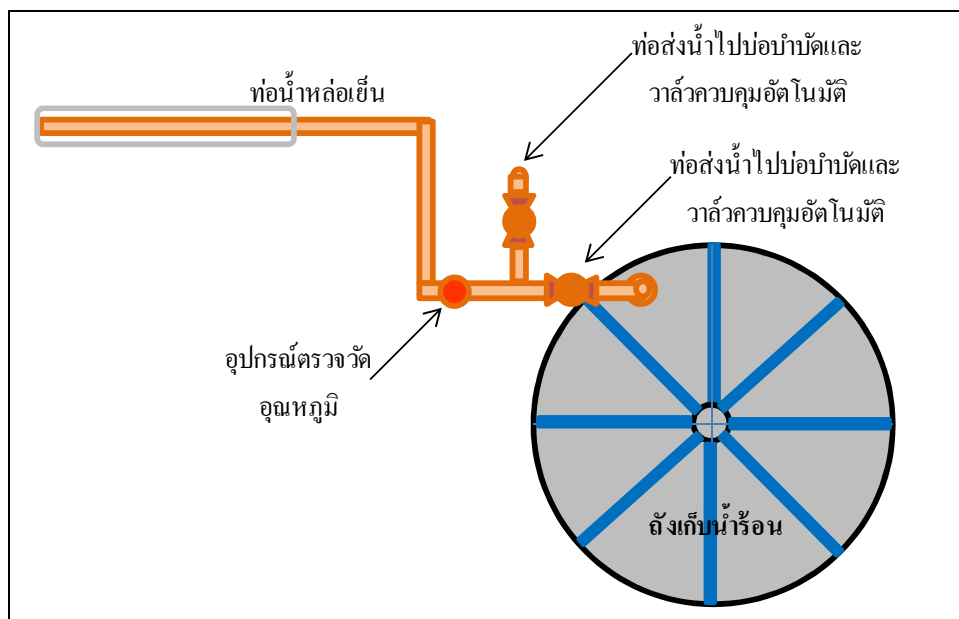
1. น้ำที่ผ่านการหล่อเย็นไม่มีท่อส่งน้ำระหว่างไหลลงถังเก็บกับปล่อยทิ้งลงบ่อบำบัด และไม่มีอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการหล่อเย็นภายในท่อ เพื่อควบคุมอุณหภูมิก่อนที่จะปล่อยลงสู่ถังเก็บน้ำร้อน
2. น้ำที่ผ่านการหล่อเย็นแล้วไหลลงถังเก็บน้ำร้อนไม่มีโปรแกรมควบคุมอัตโนมัติในการเลือกน้ำที่มีอุณหภูมิตามที่ต้องการให้ลงถังเก็บน้ำร้อนและปล่อยน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ต้องการลงบ่อบำบัด

การนำเสนอแนวทางการแก้ไขปรับปรุง

จากปัญหาที่พบผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบระบบท่อน้ำร้อนใหม่ดังแสดงในภาพที่ 3-11 ถึงภาพที่ 3-12 โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิในท่อน้ำร้อนไหลกลับก่อนลงถัง และวาล์วควบคุมอัตโนมัติเพื่อให้สามารถเลือกรับน้ำที่ไหลมาตามค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ในระบบ DCS



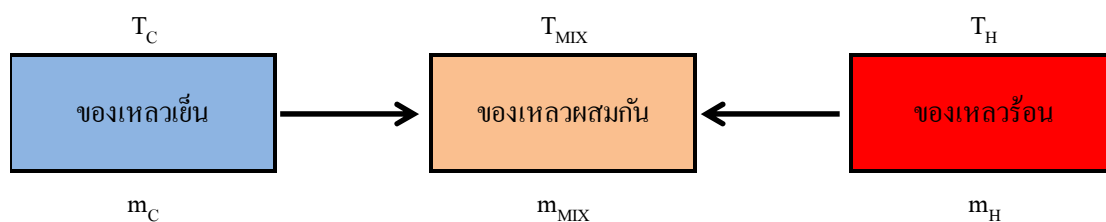
ภาพที่ 3-11 การออกแบบระบบท่อส่งน้ำร้อนใหม่



ภาพที่ 3-12 ลักษณะท่อส่งน้ำหล่อเย็นลงถังเก็บน้ำร้อน

จากการปรับปรุงด้วยการออกแบบระบบท่อส่งน้ำหล่อเย็นไปยังถังเก็บน้ำร้อนและระบบควบคุมใหม่นั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมและสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำในการเพิ่มความร้อนให้กับน้ำในถังเก็บให้น้อยที่สุด โดยค่าอุณหภูมิที่ทำการคำนวณประกอบไปด้วยการเติมน้ำดิบที่อุณหภูมิปกติที่ 32°C, 40°C, 45°C, 50°C, 55°C, 60°C, 65°C, 70°C, 75°C, 80°C และ 85°C ซึ่งตารางการคำนวณของแต่ละระดับอุณหภูมิแสดงไว้ในภาคผนวก ข โดยตัวอย่างวิธีการคำนวณมีรายละเอียด ดังนี้

จากสมการการสมดุลพลังงานของกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่อัตราการถ่ายเทความร้อนจากของไหลร้อนเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อนไปยังของไหลเย็น เนื่องจากข้อมูลอุณหภูมิของของไหลตามจุดต่าง ๆ นั้นมีเครื่องมือวัดติดตั้งไว้ที่หน้างาน ยกเว้นอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ออกมาจากระบวนการหล่อเย็นผลิตภัณฑ์เหลว ($T_{(out)}$) โดยคำนวณจากการสมดุลพลังงานความร้อน ดังนี้



จากสมการสมดุลพลังงานความร้อน (2-10 และ 2-11)

พลังงานความร้อนที่ดูด = พลังงานความร้อนที่คาย

$$Q_C = Q_H$$

$$m_C c_{p,C} (\Delta T)_C = m_H c_{p,H} (\Delta T)_H$$

$$m_C c_{p,C} (T_{MIX} - T_C) = m_H c_{p,H} (T_H - T_{MIX})$$

โดยที่ Q_C คือ พลังงานความร้อนที่ของเหลวเย็นได้รับ: (J)

Q_H คือ พลังงานความร้อนที่ของเหลวร้อนคายออก: (J)

m_C, m_H, m_{MIX} คือ มวลของของเหลวเย็น ของเหลวร้อนและของเหลวผสม: (kg)

$c_{p,C}, c_{p,H}, c_{p,MIX}$ คือ ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของของเหลวเย็น ของเหลวร้อนและของเหลวผสม: (kJ/kg-°C)

T_C, T_H, T_{MIX} คือ อุณหภูมิของของเหลวเย็น ของเหลวร้อนและของเหลวผสม: (°C)

จากตารางข้อมูลข้างต้นต้องการหาค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ออกมาจากระบวนการหล่อเย็นหรือดูจากภาพการสมดุลพลังงานความร้อน ก็คือ อุณหภูมิของของเหลวเย็น (T_C) จากการแปลงสมการสมดุลพลังงานความร้อน

$$\text{จะได้ } T_{MIX} = \frac{m_H c_{p,H} (T_H) + m_C c_{p,C} (T_C)}{(m_C c_{p,C} + m_H c_{p,H})}$$

หมายเหตุ: เนื่องจากปริมาณน้ำที่วัดได้มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร ดังนั้น ในการคำนวณต้องคูณด้วยค่าความหนาแน่นของน้ำด้วย ($\rho \sim 1,000 \text{ kg/m}^3$)

เมื่อได้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ออกจากกระบวนการหล่อเย็นแล้วก็จะสามารถคำนวณปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำในถังซึ่งมีปริมาตร 100 ลูกบาศก์เมตรได้จากสมการพลังงานความร้อน คือ

$$Q = mc_p(\Delta T)$$

$$Q = mc_p(T_H - T_{\text{MIX}})$$

ในการหาค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของของเหลวนั้น โดยการคำนวณอุณหภูมินั้นค่าที่คำนวณได้จะเป็นเป็นตัวเลขที่ไม่ลงตัวตามตารางคุณสมบัติของน้ำ (ภาคผนวก ก) ดังนั้นจึงใช้วิธีการ Interpolation เพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของของเหลว โดยมีวิธีการดังนี้

อุณหภูมิ (T_i ; °C)	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ($C_{p,i}$; kJ/kg-°C)
T_1	$C_{p@T1}$
T_x	$C_{p@Tx}$
T_2	$C_{p@T2}$

จากตารางการหาค่าอินเตอร์พูเลต เมื่อต้องการหาค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ($C_{p@Tx}$) ที่อุณหภูมิ (T_x) สามารถหาได้จากสมการ

$$T_2 - T_1 = C_{p@T2} - C_{p@T1}$$

$$T_x - T_1 = C_{p@Tx} - C_{p@T1}$$

จะได้

$$C_{p@Tx} = \left(\frac{(C_{p@T2} - C_{p@T1})(T_x - T_1)}{(T_2 - T_1)} \right) + C_{p@T1}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนเมื่อเติมน้ำดิบที่อุณหภูมิ 32°C ลงในถังเก็บน้ำร้อนแทนการนำน้ำที่ผ่านกระบวนการหล่อเย็นกลับมา จากสมการในการคำนวณพลังงานความร้อนข้างต้น สามารถคำนวณได้โดยการหาปริมาณพลังงานความร้อนของเดือนมกราคม ดังนี้

ตารางที่ 3-2 ตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนหลังจากเติมน้ำหล่อเย็น

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	น้ำดิบ	อุณหภูมิน้ำในถัง		ระดับน้ำในถัง HW		ปริมาณการใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณน้ำดิบที่เติม (m3)
		(°C)	HW (°C)		(m3)			
		T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
1	5 มกราคม พ.ศ. 2559	32.0	85	61.2	55	100	9,952.2	45
2	6 มกราคม พ.ศ. 2559	32.0	93	77.8	75	100	3,005.9	25
3	6 มกราคม พ.ศ. 2559	32.0	93	73.6	68	100	4,788.0	32

จากตารางที่ 3-2 ข้อมูลต้องการหาค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ($T_{(ออก)}$) ที่ออกจากกระบวนการหล่อเย็นเพื่อไหลไปลงถังเก็บน้ำร้อน โดยสมดุลพลังงานความร้อนของของเหลวเย็นและของเหลวร้อนเมื่อผสมกัน

$$\text{จะได้ } T_{MIX} = \frac{m_H c_{P,H} (T_H) + m_C c_{P,C} (T_C)}{(m_C c_{P,C} + m_H c_{P,H})}$$

เมื่อ m_H คือ มวลของน้ำที่เหลืออยู่ในถังน้ำร้อน $55 \text{ m}^3 \times 1000 \text{ kg/m}^3 = 55,000 \text{ kg}$

m_C คือ มวลของน้ำดิบที่เข้าถัง $(100-55) \text{ m}^3 \times 1000 \text{ kg/m}^3 = 45,000 \text{ kg}$

$c_{P,H}$ คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำร้อนที่เหลือในถังที่ $T=85^\circ\text{C}$ จะได้ 4.201 kJ/kg-K

$c_{P,C}$ คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำดิบที่เข้าถังที่ $T=32^\circ\text{C}$ จะได้ 4.178 kJ/kg-K

T_H คือ อุณหภูมิของน้ำร้อนที่เหลืออยู่ในถังเก็บ = 85°C

T_C คือ อุณหภูมิของน้ำร้อนและน้ำหล่อเย็นที่ผสมกันในถังเก็บ = 32°C

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการ } T_{MIX} &= \frac{(55,000 \times 4.201 \times 85) + (45,000 \times 4.178 \times 32)}{(45,000 \times 4.178) + (55,000 \times 4.201)} \\ &= 61.2^\circ\text{C} \end{aligned}$$

อุณหภูมิที่คำนวณได้จะมีค่าไม่ลงตัวตามตารางคุณสมบัติของน้ำ ซึ่งทำให้ต้องทำการ Interpolation ในช่วงอุณหภูมินั้น ๆ เพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของน้ำ ที่อุณหภูมิ

ดังกล่าวเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณพลังงานความร้อน ดังนั้น การ Interpolation จึงสามารถทำได้ โดย

อุณหภูมิ (T_i : °C)	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ($C_{p,i}$: kJ/ kg-°C)
60	4.185
61.2	???
65	4.187

จากสมการ

$$C_{p@T_x} = \left[\frac{(C_{p@T_2} - C_{p@T_1})(T_x - T_1)}{(T_2 - T_1)} \right] C_{p@T_1}$$

$$\text{แทนค่า } C_{p@T_x} = \left[\frac{(4.187 - 4.185)(61.2 - 60)}{(65 - 60)} + 4.185 \right]$$

$$= 4.18548 \quad \text{kJ/ kg-°C}$$

เมื่อได้ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของน้ำที่ผสมกันในถังเก็บแล้ว ก็สามารถคำนวณพลังงานความร้อนที่ต้องใช้เพื่อทำให้น้ำมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 85°C จากสมการ

$$Q = mc_p(\Delta T)$$

$$Q = mc_p(T_H - T_{MIX})$$

เมื่อ m คือ มวลของน้ำที่ผสมกันในถัง: $100 \text{ m}^3 \times 1,000 \text{ kg/ m}^3 = 100,000 \text{ kg}$

c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของน้ำที่ $61.2^\circ\text{C} = 4.18548 \text{ kJ/ kg-}^\circ\text{C}$

T_H คือ อุณหภูมิควบคุมของน้ำร้อนที่ใช้ในการผลิต = 85°C

T_{MIX} คือ อุณหภูมิของน้ำที่ผสมกันในถังเก็บ = 61.2°C

$$\text{แทนค่า } Q = 100,000 \times 4.18548 \times (85 - 61.2)$$

$$= 9,952,242.40 \text{ kJ}$$

$$= 9,952.2 \text{ MJ}$$

และปริมาณน้ำดิบที่ใช้ในการเติมลงไปในถังเพื่อผลิตน้ำร้อน = 45 m^3

จากการคำนวณปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำในการเพิ่มความร้อนให้กับน้ำที่มีอุณหภูมิต่างกันมาผสมกันในถังเก็บน้ำร้อน โดยต้องการควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อนในถังที่ 85°C เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป ซึ่งสามารถสรุปปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำในแต่ละระดับอุณหภูมิเพื่อเปรียบเทียบและพิจารณาค่าอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านกระบวนการหล่อเย็นเพื่อปล่อยลงถังเก็บน้ำร้อนแล้วทำให้ใช้พลังงานไอน้ำในการเพิ่มความร้อนน้อยที่สุดได้ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 เปรียบเทียบปริมาณการใช้ไอน้ำและค่าใช้จ่ายของแต่ละระดับอุณหภูมิ

ระดับอุณหภูมิ	ปริมาณไอน้ำที่ใช้ทั้งหมด	ปริมาณไอน้ำเฉลี่ยต่อเดือน	ปริมาณน้ำดิบที่เติมทั้งหมด	ปริมาณน้ำดิบเฉลี่ยต่อเดือน	ค่าใช้จ่ายทั้งหมด	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน
(°C)	(MJ)	(MJ)	(ลบ.ม.)	(ลบ.ม.)	(บาท)	(บาท)
ปัจจุบัน	213,996.90	35,666.15	-	-	159,288.78	26,548.13
32	465,609.78	77,601.63	3,091.00	515.17	420,369.70	70,061.62
40	566,027.04	94,337.84	-	-	421,322.74	70,220.46
45	541,686.58	90,281.10	-	-	403,204.90	67,200.82
50	412,045.55	68,674.26	-	-	306,706.48	51,117.75
55	297,601.53	49,600.26	37.00	6.17	222,629.97	37,105.00
60	203,206.76	33,867.79	130.00	21.67	155,157.13	25,859.52
65	131,088.28	21,848.05	275.00	45.83	105,825.68	17,637.61
70	113,213.37	18,868.90	486.00	81.00	98,850.47	16,475.08
75	117,171.95	19,528.66	824.00	137.33	111,937.04	18,656.17
80	139,993.71	23,332.29	1,236.00	206.00	141,284.44	23,547.41
85	174,890.22	29,148.37	1,666.00	277.67	180,159.69	30,026.62

จากตารางที่ 3-3 เปรียบเทียบปริมาณการใช้ไอน้ำและค่าใช้จ่าย พบว่า ที่ระดับอุณหภูมิ 70°C เป็นระดับที่มีค่าใช้จ่ายต่ำสุดเฉลี่ย 16,475.08 บาทต่อเดือน แต่มีปริมาณน้ำดิบที่เติมลงถังเฉลี่ย 81 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน นั้นหมายถึงว่า ในบางครั้งที่ระบบหล่อเย็นทำงานและปริมาณน้ำร้อนที่เติมลงในถังไม่เพียงพอ ทำให้ต้องมีการเติมน้ำดิบเพิ่มมากขึ้นเพื่อรักษาระดับที่ควบคุม ซึ่งเสี่ยงต่อการที่น้ำร้อนที่อยู่ภายในถังจะอุณหภูมิต่ำกว่า 85°C แล้วถูกนำไปใช้

ในกระบวนการผลิต ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกรณีที่มีการนำน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ไปใช้ในกระบวนการ

ดังนั้น ทีมวิจัยจึงพิจารณาเลือกใช้อุณหภูมิของน้ำที่เติมลงในถังที่ระดับ 65°C โดยมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยที่ 17,637.61 บาทต่อเดือน เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 21,848.05 MJ ต่อเดือน และปริมาณน้ำดิบที่เติมลงถังเก็บน้ำร้อนเฉลี่ย 45.83 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน ซึ่งทันต่อปริมาณน้ำร้อนที่ต้องการใช้งานทั้งหมดของกระบวนการผลิต

ทีมวิจัยจึงได้ทำการตั้งค่าระดับอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านกระบวนการหล่อเย็นลงในถังเก็บน้ำร้อนในระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติ (DCS) ไว้ที่ระดับ 65°C โดยรายละเอียดของเงื่อนไขในการทำงานอัตโนมัติมีดังนี้

1. ออกแบบระบบท่อส่งน้ำร้อนที่ผ่านการหล่อเย็นใหม่ โดยการแยกออกเป็น 2 ทาง คือ ท่อที่ 1 ให้น้ำไหลลงถังเก็บน้ำร้อนได้ ส่วนท่อที่ 2 ให้น้ำไหลลงสู่งบอบำบัดบ่อบำบัด

2. ติดตั้ง Control valve และอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ เพื่อตรวจเช็คอุณหภูมิของน้ำร้อนไหลกลับก่อนที่ระบบจะเลือกปล่อยน้ำลงถังหรือปล่อยลงรางระบายน้ำเสีย

3. แก้ไขโปรแกรม DCS เพื่อให้เลือกน้ำร้อนที่ผ่านการหล่อเย็นตามอุณหภูมิที่เราต้องการภายใต้การตั้งเงื่อนไขดังต่อไปนี้

3.1 กรณีที่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิน้ำที่ผ่านการหล่อเย็นได้อุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ 65°C และระดับน้ำในถังเก็บมีปริมาณต่ำกว่า 90% ของถัง วาล์ว HW10V6 จะปิดและวาล์ว HW10V5 จะเปิดเพื่อทำการเติมน้ำร้อนลงในถังเก็บน้ำร้อน

3.2 กรณีที่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิน้ำที่ผ่านการหล่อเย็นได้อุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ 65°C แต่ระดับน้ำในถังเก็บมีปริมาณมากกว่า 90% ของถัง วาล์ว HW10V6 จะเปิดและวาล์ว HW10V5 จะปิดเพื่อทำการปล่อยน้ำร้อนลงบ่อบำบัด

3.3 กรณีที่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิน้ำที่ผ่านการหล่อเย็นได้อุณหภูมิต่ำกว่า 65°C และระดับน้ำในถังเก็บมีปริมาณต่ำกว่า 60% ของถัง วาล์ว HW10V6 จะปิดและวาล์ว HW10V5 จะเปิดเพื่อทำการเติมน้ำร้อนลงในถังเก็บน้ำร้อน

3.4 กรณีที่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิน้ำที่ผ่านการหล่อเย็นได้อุณหภูมิต่ำกว่า 65°C แต่ระดับน้ำในถังเก็บมีปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 60% ของถัง วาล์ว HW10V6 จะเปิดและวาล์ว HW10V5 จะปิดเพื่อทำการปล่อยน้ำร้อนลงบ่อบำบัด

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ปัญหาเพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปรับปรุง โดยการออกแบบระบบท่อน้ำร้อนใหม่ให้มีการคัดแยกน้ำร้อนก่อนที่จะส่งลงถังเก็บ เพื่อให้

อุณหภูมิของน้ำร้อนในถังเก็บสมดุลและสามารถควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อนให้ได้ตามที่กำหนดได้ง่ายขึ้น และที่สำคัญจะทำให้ระบบสามารถลดการสูญเสียค่าของการใช้น้ำในการให้ความร้อนกับน้ำที่อยู่ในถังเก็บได้โดยในการปรับปรุงนั้นค่าใช้จ่าย ดังนี้

ตารางที่ 3-4 ต้นทุนในการปรับปรุงระบบท่อและระบบควบคุม

Vendor Item	บริษัท A				บริษัท B			
	Qty	Unit	Unit price	Amount	Qty	Unit	Unit price	Amount
Piping work								
Piping material [CS Sch 40 A53]	1	lot	39,456	39,456	1	lot	66,659	66,659
Painting	1	job	8,800	8,800	1	job	1,267	1,267
Labor cost	1	job	173,220	173,220	1	job	161,354	161,354
Insulation work								
Insulation work	1	job	61,600	61,600	1	job	46,518	46,519
C&I work								
Modify Solenoid valve box and added 4 ea.	1	job	104,335	104,335	1	job	147,289	147,289
Temperature transmitter[TE3]	1	ea	23,430	23,430	1	ea	16,700	16,700
Control valve [Butterfly]	2	job	110,000	220,000	2	ea	137,500	275,000
Cable ,Tube and conduit	1	job	78,284	78,284	1	job	51,645	51,645
Labor cost	1	ea	66,867	66,867	1	job	43,761	43,761
Commission work								
Commission	1	job	8,250	8,250	1	job	5,500	5,500
Others								
Engineering fee	1	job	60,500	60,500	1	job		0
Accommodation	1	job	31,900	31,900	1	job		0
Site Expense and supervisor	1	job	90,940	90,940	1	job	103,800	103,800
Scaffolding	1	job	16,500	16,500	1	job	16,884	16,884
Tower lift	1	job		0	1	job	17,250	17,250
Consumable	1	job	12,100	12,100	1	job	15,468	15,468

ตารางที่ 3-4 (ต่อ)

Vendor Item	บริษัท A				บริษัท B			
	Qty	Unit	Unit price	Amount	Qty	Unit	Unit price	Amount
Overhead	1	job	99,618	99,618	1	job	96,904	96,904
Total	1	job		1,095,800	1	job		1,066,000
Discount	1	job		5,800				0
Grand Total	1	job		1,090,000				1,066,000
Delivery Date			5 months				4 months	

จากตารางที่ 3-4 ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงทางผู้วิจัยได้ทำการเลือกผู้รับเหมาบริษัท B ดังนั้น จึงสามารถหาระยะเวลาในการคืนทุนได้ดังนี้

ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุง 1,066,000 บาท

ต้นทุนการซื้อไอน้ำเฉลี่ยเดือนละ $(44,317.21 / 2,257) * 1,680 = 32,987.56$ บาท

ต้นทุนการซื้อไอน้ำที่คาดหวังหลังการปรับปรุงเฉลี่ยเดือนละ 17,637.61 บาท

ต้นทุนการซื้อไอน้ำที่คาดว่าจะประหยัดได้เฉลี่ยต่อเดือนคือ

$$32,987.56 - 17,637.61 = 15,349.95 \text{ บาท}$$

หรือต้นทุนในการซื้อไอน้ำประหยัดได้ปีละ $15,349.95 * 12 = 184,199.40$ บาท

ดังนั้น ระยะเวลาในการคืนทุนประมาณ $1,066,000 / 184,199.40 = 5.79$ ปี

หรือประมาณ 5 ปี 10 เดือน

การดำเนินงานและติดตามผล

จากการรวบรวมข้อมูลและนำมาวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนภูมิแก๊งปลาทำให้รู้ถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเปล่าของการใช้พลังงานไอน้ำในกระบวนการรักษาสมดุลความร้อนในถังเก็บน้ำร้อน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอแนวทางการปรับปรุงแก้ไขด้วยการออกแบบระบบท่อส่งน้ำร้อนใหม่ให้สามารถคัดแยกน้ำที่ผ่านกระบวนการหล่อเย็นก่อนส่งลงถังเก็บน้ำร้อน โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิของน้ำที่ไหลในท่อและระบบเปิด-ปิดวาล์วอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยระบบ

ควบคุมอัตโนมัติ (DCS: Distributed control system) เพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้งาน โดยกระบวนการปรับปรุงระบบท่อส่งน้ำร้อนมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

สรุปผลการดำเนินงาน

จากขั้นตอนการทำการวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เป็นกระบวนการค้นหาปัญหา หรือกระบวนการที่ต้องการปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและ เพื่อเป็นการลดความสูญเปล่าของการใช้พลังงานไอน้ำที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้ำร้อน โดยเริ่มต้นจากการสำรวจปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบกระบวนการผลิตเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลใน กระบวนการผลิตทั้งหมดเพื่อพิจารณาที่จะนำมาทำการวิจัย ซึ่งกระบวนการที่เลือกมาทำการวิจัย ในครั้งนี้ คือ การลดความสูญเปล่าของปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำในการรักษาสมดุลความร้อน ของน้ำร้อนในถังเก็บเพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิที่ต้องการใช้ในกระบวนการผลิต โดยการนำข้อมูลของ ปริมาณการใช้ไอน้ำนั้นมาวิเคราะห์หาสาเหตุที่เป็นไปได้ในการก่อให้เกิดความสูญเปล่าของการใช้ พลังงานไอน้ำในการผลิตน้ำร้อน และทำการออกแบบระบบส่งน้ำร้อนใหม่ให้เกิดประสิทธิภาพ สูงสุดในการใช้พลังงานไอน้ำ

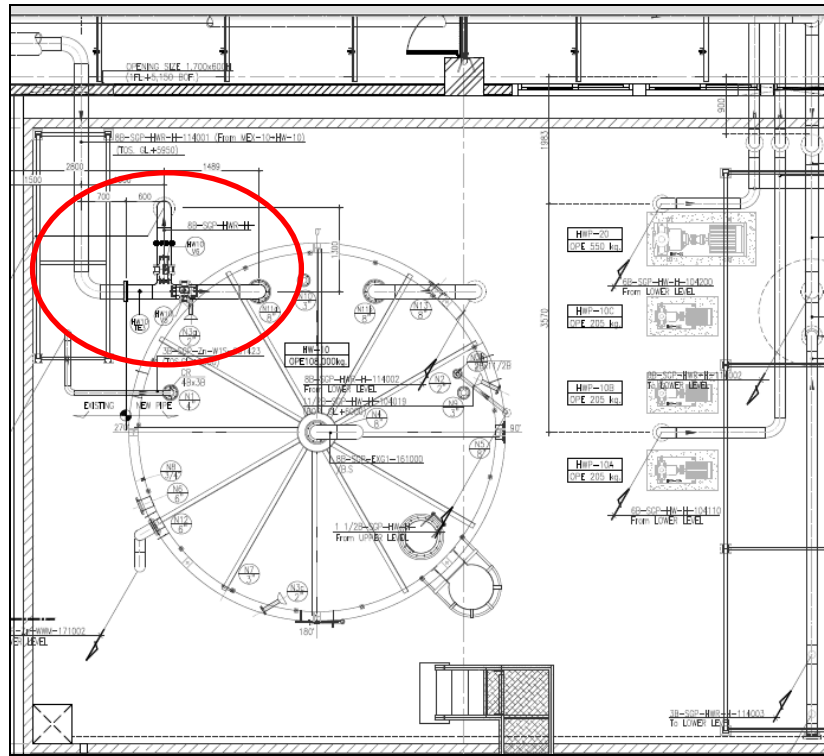
บทที่ 4

การดำเนินงานและติดตามผล

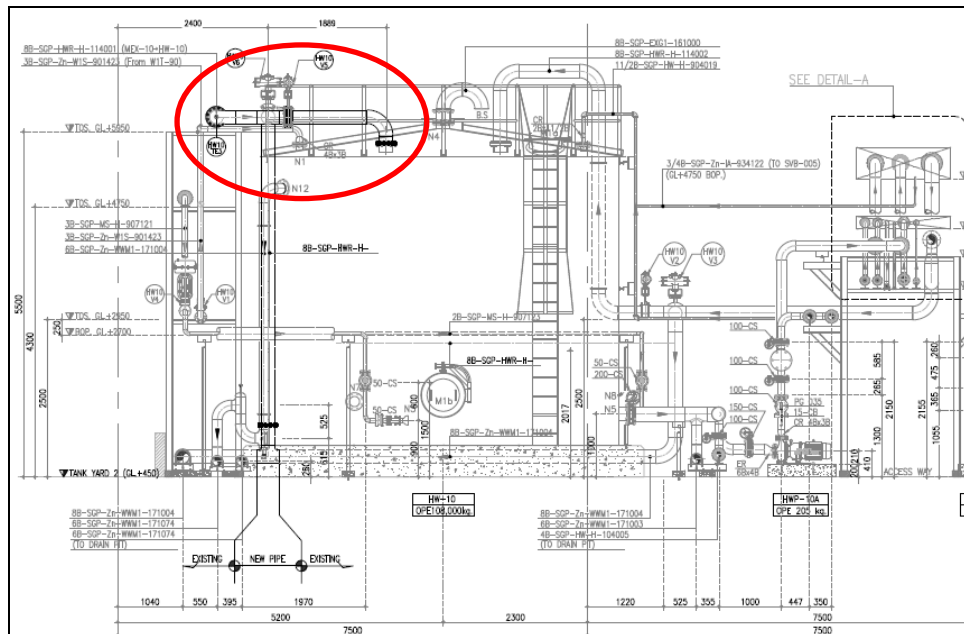
จากการเก็บรวบรวมข้อมูลของการใช้พลังงานไอน้ำในการเพิ่มความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อนให้กับระบบการผลิต และน้ำได้นำข้อมูลดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของการเกิดปัญหา เพื่อทำการออกแบบระบบการปรับปรุงแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยในการออกแบบระบบการปรับปรุงนั้นแบ่งออกเป็น 2 ด้าน คือ การออกแบบระบบท่อส่งน้ำร้อนใหม่ให้สามารถส่งน้ำร้อนเข้าไปในถังเก็บหรือส่งน้ำร้อนนั้นสู่ระบบบำบัดน้ำเสียได้ และการออกแบบระบบควบคุมใหม่ (DCS) ให้สามารถคัดแยกน้ำร้อนที่ไหลมาตามท่อด้วยการแบ่งตามอุณหภูมิของน้ำตามที่ต้องการเพื่อให้สามารถเลือกเก็บน้ำที่มีอุณหภูมิที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิของน้ำที่มีอยู่ในถังเก็บน้ำร้อนเพื่อลดการสูญเสียของการใช้พลังงานไอน้ำในการผลิตน้ำร้อนป้อนเข้าสู่ระบบการผลิต โดยการปรับปรุงดังกล่าวมีขั้นตอนดังนี้

การออกแบบระบบท่อส่งน้ำร้อนใหม่

การตัดต่อท่อน้ำร้อนที่ไหลกลับมาจากระบบหล่อเย็นผลิตภัณฑ์เหลวในท่อ ด้วยการแยกท่อน้ำที่ไหลกลับบนหัวถังน้ำร้อนให้สามารถส่งน้ำร้อนเข้าไปในถังเก็บหรือส่งน้ำร้อนไปยังระบบบำบัดน้ำเสียได้ โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำร้อนตามที่ตั้งค่าไว้ในระบบ ซึ่งมีการดำเนินงานตามแบบที่แสดงในภาพที่ 4-1 ถึง 4-7

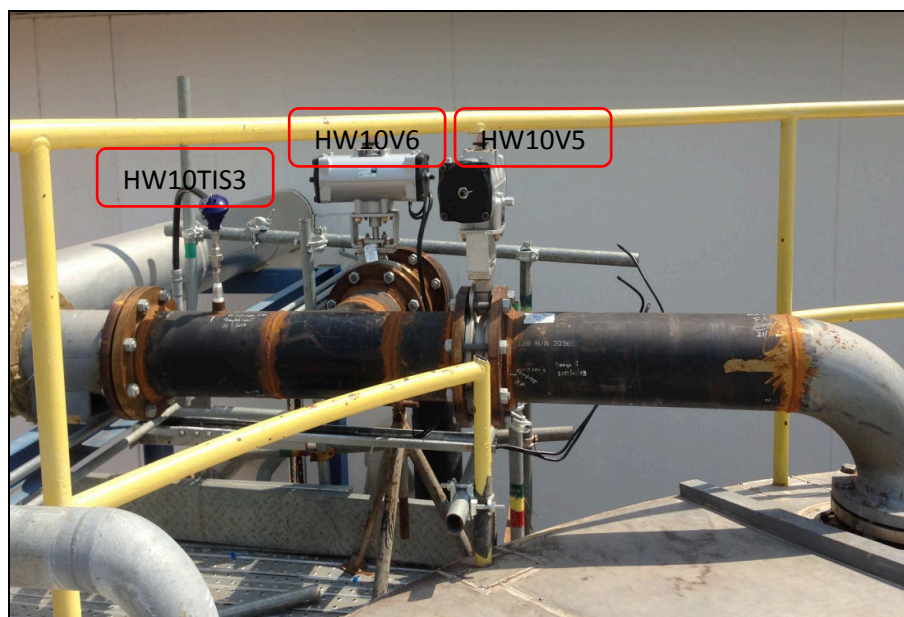


ภาพที่ 4-1 แบบด้านบนของการปรับปรุงท่อน้ำร้อนไหลกลับขนาด 8 นิ้ว



ภาพที่ 4-2 แบบด้านหน้าของการปรับปรุงท่อน้ำร้อนไหลกลับขนาด 8 นิ้ว

จากภาพที่ 4-1 และภาพที่ 4-2 เป็นแบบการปรับปรุงระบบท่อส่งน้ำร้อนไหลกลับจากระบบหล่อเย็นผลิตภัณฑ์เหลวขนาด 8 นิ้วเพื่อทำการแยกท่อทางออกเป็น 2 ทาง คือ ท่อส่งน้ำร้อนลงถึงเก็บน้ำร้อนและท่อสำหรับส่งน้ำร้อนไปยังบ่อน้ำเสียเพื่อส่งไปที่ระบบบำบัดต่อไป



ภาพที่ 4-3 ตำแหน่งของวาล์วควบคุมและอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้ง



ภาพที่ 4-4 ตำแหน่งของวาล์วและการหุ้มฉนวนท่อน้ำร้อน

ภาพที่ 4-1 ถึงภาพที่ 4-4 แสดงลักษณะของวาล์วควบคุมและตำแหน่งการติดตั้ง ซึ่งติดตั้งที่ตำแหน่งท่อก่อนที่จะลงถึงและท่อก่อนที่จะปล่อยน้ำร้อนทิ้งลงในบ่อน้ำเสีย โดยวาล์ว HW10V5 ทำหน้าที่ควบคุมน้ำที่ไหลลงสู่ถังเก็บน้ำร้อน วาล์ว WH10V6 ทำหน้าที่ควบคุมน้ำที่ปล่อยลงรางระบายน้ำเพื่อส่งไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย และอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำ HW10TIS3 จะทำหน้าที่ตรวจวัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ไหลกลับมาว่าอุณหภูมิอยู่ในสถานะที่จะปล่อยน้ำไปไหน วาล์วนี้อาจทำหน้าที่เปิด-ปิดโดยอัตโนมัติเพื่อควบคุมการไหลของน้ำร้อนไปตามท่อทางที่ต้องการตามที่ตั้งค่าไว้ การทำงานของวาล์วนี้จะเชื่อมต่อกับระบบ DCS เพื่อตั้งค่าให้ระบบทำงานอัตโนมัติ และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ (Level transmitter) ในถังน้ำร้อนและอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature transmitter) ที่ติดตั้งในตำแหน่งท่อที่มีการตัดต่อใหม่

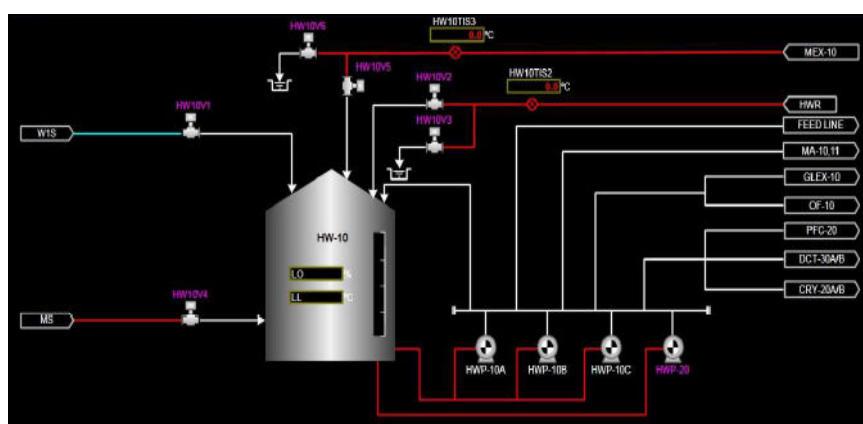


ภาพที่ 4-5 ท่อระบายน้ำลงบ่อน้ำบำบัดก่อน-หลังการหุ้มฉนวน

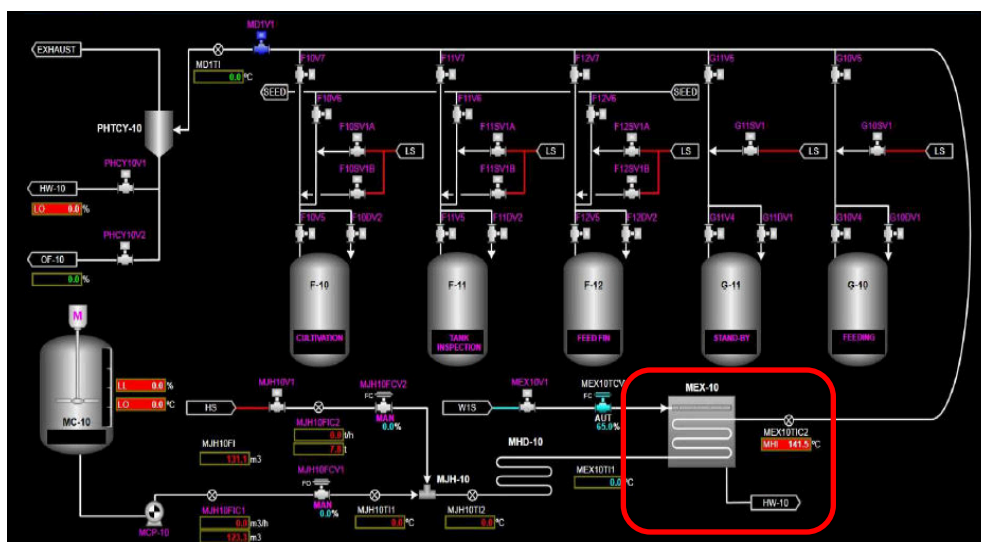
ภาพที่ 4-5 แสดงตำแหน่งของท่อระบายน้ำร้อนไหลกลับลงสู่บ่อน้ำบำบัดน้ำเสีย ซึ่งท่อจะเชื่อมต่อเข้ากับท่อระบายน้ำหลักจากระบบการผลิตลงสู่บ่อน้ำบำบัดน้ำเสีย

การปรับปรุงระบบควบคุมและกราฟฟิคใน DCS

จากการออกแบบระบบท่อส่งน้ำไหลกลับใหม่ด้วยการเพิ่มวาล์วควบคุมเพื่อให้ระบบการส่งน้ำทำงานโดยอัตโนมัติ จึงจำเป็นต้องออกแบบระบบกราฟฟิคใหม่ให้ง่ายต่อการควบคุมผ่านทางหน้าจอแสดงผล (DCS) โดยทำการเขียนกราฟฟิคไลน์ท่อน้ำไหลกลับจากระบบหล่อเย็นผลิตภัณฑ์เหลว (MEX-10) และเพิ่มวาล์วควบคุมในกราฟฟิค 2 ตัวเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานผ่านระบบ DCS ผ่านหน้าจอแสดงผลและสามารถใช้งานได้ทั้งระบบด้วยมือ (Manual system) และระบบอัตโนมัติ (Automatic system) ดังแสดงในภาพที่ 4-6 และ 4-7

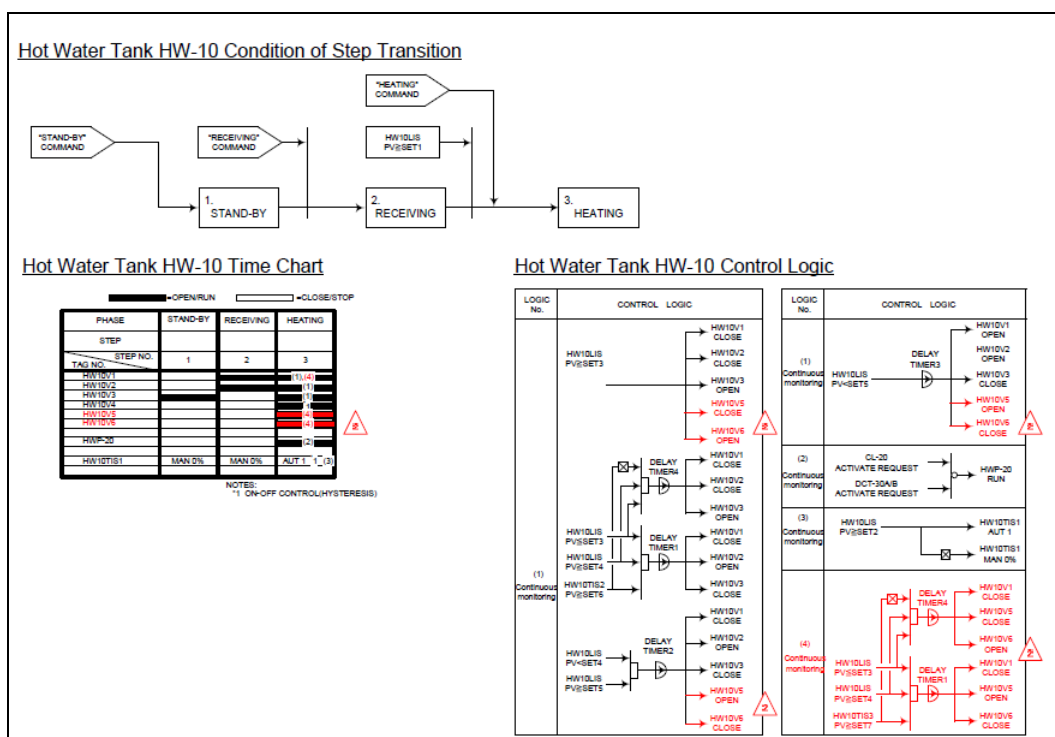


ภาพที่ 4-6 กราฟฟิคบนหัวถังก่อนน้ำหลังการปรับปรุง



ภาพที่ 4-7 กราฟฟิคของระบบหล่อเย็นหลังการปรับปรุง

จากภาพที่ 4-6 และ ภาพที่ 4-7 แสดงการออกแบบระบบใหม่เพื่อปรับปรุงและลดการสูญเสียของการใช้พลังงานไอน้ำในการผลิตน้ำร้อนในถังเก็บอันเนื่องมาจากการที่มีน้ำร้อนไหลกลับมาจากกระบวนการหล่อเย็นผลิตภัณฑ์เหลวภายในท่อแล้วส่งน้ำร้อนกลับมาเพื่อเก็บไว้ใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป จะสังเกตได้ว่าบนหัวถังของภาพที่ 4-6 มีการเพิ่มกราฟฟิกของท่อน้ำไหลกลับจากระบบการหล่อเย็นพร้อมทั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิและวาล์วควบคุม ซึ่งทำให้ง่ายต่อการเฝ้าติดตามและควบคุมการทำงานของระบบ และภาพที่ 4-7 จะเห็นว่าด้านล่างของระบบหล่อเย็น (MEX-10) จะมีการกราฟฟิกไลน์ท่อระบุสัญลักษณ์เพื่อบ่งชี้ว่าน้ำที่ผ่านการใช้งานในการหล่อเย็นแล้วจะถูกส่งไปที่ถังเก็บน้ำร้อน (HW-10) ซึ่งระบบการทำงานทั้งหมดจะเป็นไปตามไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบดังแสดงในภาพที่ 4-8



ภาพที่ 4-8 ไดอะแกรมการทำงานของระบบหลังการปรับปรุง

ระบบการทำงานของวาล์วควบคุม (Control valve) จะสัมพันธ์กับอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature transmitter) และอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในถังน้ำร้อน โดยจะทำการคัดแยกน้ำร้อนที่ไหลกลับมาจากระบบหล่อเย็นผลิตภัณฑ์เหลวในท่อด้วยอุณหภูมิตาม โปรแกรมที่เขียนไว้ในระบบ DCS ด้วยเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. กรณีที่อุณหภูมิวัตอุณหภูมิน้ำที่ผ่านการหล่อเย็นได้อุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ 65°C และระดับน้ำในถังเก็บมีปริมาณต่ำกว่า 90% ของถัง วาล์ว HW10V6 จะปิดและวาล์ว HW10V5 จะเปิดเพื่อทำการเติมน้ำร้อนลงในถังเก็บน้ำร้อน

2. กรณีที่อุณหภูมิวัตอุณหภูมิน้ำที่ผ่านการหล่อเย็นได้อุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ 65°C แต่ระดับน้ำในถังเก็บมีปริมาณมากกว่า 90% ของถัง วาล์ว HW10V6 จะเปิดและวาล์ว HW10V5 จะปิดเพื่อทำการปล่อยน้ำร้อนลงบ่อบำบัด

3. กรณีที่อุณหภูมิวัตอุณหภูมิน้ำที่ผ่านการหล่อเย็นได้อุณหภูมิต่ำกว่า 65°C และระดับน้ำในถังเก็บมีปริมาณต่ำกว่า 60% ของถัง วาล์ว HW10V6 จะปิดและวาล์ว HW10V5 จะเปิดเพื่อทำการเติมน้ำร้อนลงในถังเก็บน้ำร้อน

4. กรณีที่อุณหภูมิวัตอุณหภูมิน้ำที่ผ่านการหล่อเย็นได้อุณหภูมิต่ำกว่า 65°C แต่ระดับน้ำในถังเก็บมีปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 60% ของถัง วาล์ว HW10V6 จะเปิดและวาล์ว HW10V5 จะปิดเพื่อทำการปล่อยน้ำร้อนลงบ่อบำบัด

การติดตามผล

หลังจากที่ทำการปรับปรุงระบบการส่งน้ำร้อนที่ผ่านการหล่อเย็นไหลกลับไปยังถังเสร็จแล้ว ทีมงานผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระบบการทำงานจริง (Commissioning) เพื่อยืนยันว่าระบบมีการทำงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้ทำการออกแบบไว้ และหลังจากนั้นก็ได้มีการใช้งานระบบใหม่ในกระบวนการผลิตเพื่อติดตามผลการดำเนินงาน ซึ่งผลของการใช้งานดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายหลังการปรับปรุง

ครั้งที่	เดือน	จำนวน ครั้ง	ปริมาณพลังงาน ไอน้ำที่ใช้ (MJ)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ พลังงานไอน้ำ (บาท)	ปริมาณน้ำดิบ ที่เติม (ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ น้ำดิบ (บาท)
1	มีนาคม พ.ศ. 2560	13	25,594.55	19,051.33	0	-
2	พฤษภาคม พ.ศ. 2560	17	27,770.91	20,671.30	40	1,200
รวม		30	53,365.46	39,722.63	40.00	1,200
				รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด		40,922.63
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน		20,461.32
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้ง		1,364.09

จากผลการเก็บข้อมูลของระบบการผลิตน้ำร้อนหลังการปรับปรุงระบบใหม่ จะเห็นได้ว่า ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำของเดือนเมษายนไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากในเดือนเมษายนเกิด ปัญหาในกระบวนการผลิต จึงต้องหยุดการผลิตเพื่อแก้ไขปัญหา ดังนั้น ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย จึงคำนวณจากเดือนมีนาคมและเดือนพฤษภาคมเท่านั้น โดยมีปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 26,682.73 เมกะจูลต่อเดือน และปริมาณการเติมน้ำดิบเฉลี่ย 20 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน คิดเป็น ค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำร้อนรวมเฉลี่ย 20,461.32 บาทต่อเดือน โดยรายละเอียดของการคำนวณ ปริมาณไอน้ำและค่าใช้จ่ายหลังการปรับปรุงระบบแสดงในภาคผนวก ก

จากผลการใช้งานระบบการผลิตน้ำร้อนหลังการปรับปรุงสามารถคำนวณระยะเวลา การคืนทุนจากการใช้งานจริงได้ ดังนี้

ต้นทุนการซื้อไอน้ำก่อนการปรับปรุงเฉลี่ยเดือนละ 32,987.56 บาท

ต้นทุนการซื้อไอน้ำหลังการปรับปรุงเฉลี่ยเดือนละ 20,461.32 บาท

ต้นทุนการซื้อไอน้ำที่ประหยัดได้เฉลี่ยต่อเดือน คือ

$$32,987.56 - 20,461.32 = 12,526.24 \text{ บาท}$$

หรือต้นทุนในการซื้อไอน้ำประหยัดได้ปีละ $12,526.24 \times 12 = 150,314.88$ บาท

ดังนั้น ระยะเวลาในการคืนทุนประมาณ $1,066,000 / 150,314.88 = 7.09$ ปี

หรือประมาณ 7 ปี 2 เดือน

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการที่บริษัทเทคโนโลยีศึกษามีการนำน้ำที่ผ่านการหล่อเย็นที่ระดับอุณหภูมิ 40-90 °C ไปเติมลงในถังเก็บน้ำร้อนที่มีการควบคุมอุณหภูมิการใช้งานที่ 85 °C เมื่อน้ำที่อุณหภูมิต่างกัน มาผสมกันจึงทำให้อุณหภูมิของน้ำภายในถังลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ จึงทำให้ต้องใช้พลังงานไอน้ำมาแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บให้มีอุณหภูมิเท่ากับระดับที่ควบคุมที่ 85 °C ซึ่งก่อให้เกิดความสูญเสียของพลังงานไอน้ำที่นำมาใช้งาน

โดยการทำงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบการรักษาสมดุลพลังงาน ความร้อนภายในถังน้ำร้อนในกรณีที่มีการนำน้ำที่ผ่านระบบการหล่อเย็นกลับมาใช้งานใหม่ และ เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้ไอน้ำรวมถึงค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อนด้วย ซึ่งหลังจากที่นำ ปัญหามาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงอย่างเป็นระบบแล้ว ทีมผู้วิจัยจึงได้ทำการแก้ไขและ ปรับปรุงปัญหาการสูญเสียของพลังงานไอน้ำในการผลิตน้ำร้อน โดย 1) ปรับปรุงระบบท่อส่งน้ำ ที่ผ่านการหล่อเย็นใหม่ด้วยการแยกท่อออกเป็นสองทางเพื่อส่งน้ำลงถังเก็บและส่งน้ำลงบ่อบำบัด พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิก่อนถึงท่อแยกด้วย 2) ปรับปรุงโปรแกรมของระบบ การทำงานอัตโนมัติ (DCS) เพื่อให้ระบบสามารถเลือกรับน้ำตามอุณหภูมิที่กำหนดได้

หลังจากการปรับปรุงระบบใหม่และมีการใช้งานผลปรากฏว่า ปริมาณไอน้ำที่ใช้และ ค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำร้อนลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยระบบเดิมก่อนการปรับปรุงมีปริมาณ การใช้พลังงานไอน้ำเฉลี่ย 44,317.22 เมกะจูล (MJ) ต่อเดือน และปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำ หลังการปรับปรุงเฉลี่ยเป็น 26,682.73 เมกะจูล (MJ) ต่อเดือน โดยสามารถเทียบค่าใช้จ่ายใน การผลิตน้ำร้อนก่อนทำการปรับปรุงระบบเฉลี่ยต่อเดือน 32,987.56 บาทต่อเดือน และค่าใช้จ่าย หลังการปรับปรุงเฉลี่ย 20,461.32 บาทต่อเดือน ลดลงได้ 37.97% ต่อครั้ง

ดังนั้น จากการปรับปรุงระบบการนำน้ำที่ผ่านระบบการหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่ เพื่อรักษาสมดุลความร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนนี้สามารถลดต้นทุนในการผลิตน้ำร้อนได้ประมาณ 150,314.88 บาทต่อปี และระยะการคืนทุนในการลงทุนครั้งนี้ประมาณ 7 ปี 2 เดือน ซึ่งระยะเวลา การคืนทุนนั้นนานกว่าค่าที่ออกแบบข้างต้น เนื่องจากระบบการผลิตเพิ่งผ่านการหยุดซ่อมบำรุง ประจำปีในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จึงทำให้กระบวนการผลิตทั้งหมดยังไม่สมบูรณ์และส่งผลให้ ข้อมูลการใช้พลังงานไอน้ำในการผลิตน้ำร้อนยังไม่อยู่ในสภาวะการทำงานปกติ

การอภิปรายกระบวนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการศึกษากระบวนการทำงานของบริษัทกรณีศึกษาและทำการเก็บรวบรวมข้อมูลของระบบที่เกิดปัญหา นั่นก็คือ การสูญเสียเปลวของพลังงานไอน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อน ซึ่งเมื่อนำปัญหามาวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริง พบว่า การออกแบบระบบไม่สมบูรณ์โดยระบบท่อส่งน้ำและระบบโปรแกรมการควบคุมการทำงานอัตโนมัติเป็นสาเหตุหลัก ดังนั้นทีมผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบเพื่อแก้ไขปรับปรุงระบบท่อส่งน้ำร้อนและทำการแก้ไขโปรแกรมการควบคุมการทำงานอัตโนมัติใหม่ และผลที่ได้รับหลังการปรับปรุงระบบนั้น บริษัทกรณีศึกษาสามารถลดปริมาณไอน้ำและค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำร้อนได้ถึง 37.97% โดยในระหว่างการแก้ไขและปรับปรุงระบบนั้นทีมผู้วิจัยก็พบปัญหาและอุปสรรค ได้แก่

1. ระยะเวลาในการแก้ไขปรับปรุง เนื่องจากบริษัทกรณีศึกษาดำเนินการผลิตต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง จึงทำให้การปรับปรุงแก้ไขต้องรอช่วงเวลาของการหยุดซ่อมประจำปีเท่านั้น ซึ่งกว่าจะได้ดำเนินการปรับปรุงก็เกิดการสูญเสียมากพอสมควร

2. การใช้งานระบบหลังการปรับปรุง เนื่องจากคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีความไวต่อสิ่งปนเปื้อน เมื่อมีการปรับปรุงระบบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตจะต้องทำความสะอาดทั้งระบบตามข้อกำหนดของกฎหมายด้านอาหารและยา ซึ่งใช้ระยะเวลาที่ยาวนานเพื่อให้มั่นใจว่าระบบปราศจากเชื้อโรค 100%

การปรับปรุงระบบรักษาสมดุลพลังงานความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนครั้งนี้ส่งผลดีต่อกระบวนการผลิตเป็นอย่างมาก โดยทำให้ง่ายต่อการรักษาสมดุลความร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนให้เท่ากับหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ 85°C และยังช่วยให้ลดปริมาณการใช้ไอน้ำและค่าใช้จ่ายลงได้ 37.97%

ข้อเสนอแนะ

1. การเก็บข้อมูลควรรีใช้ระยะเวลาที่นานกว่านี้ เนื่องจากระบบเพิ่งผ่านการหยุดซ่อมประจำปี ดังนั้น ระบบของกระบวนการผลิตยังไม่สมบูรณ์ 100% ทำให้ปริมาณการใช้ไอน้ำไม่เป็นไปตามค่าที่มีการใช้งานในสภาวะการผลิตปกติ

2. การตั้งค่าระดับอุณหภูมิของน้ำที่ไหลกลับลงถังเก็บน้ำร้อนที่ 65°C นั้นเป็นค่าเริ่มต้นของการใช้งาน ซึ่งจะต้องมีการตั้งค่าระดับอุณหภูมิที่ 70°C ในการใช้งาน เพื่อนำผลของการใช้ปริมาณไอน้ำมาคำนวณเพื่อเปรียบเทียบดูการลดความสูญเสียเปลวที่เกิดขึ้นจริง

3. บริษัทอยู่ระหว่างการขยายกำลังการผลิตโดยจะใช้ระบบน้ำร้อนร่วมกัน ดังนั้น เมื่อมีการใช้งานร่วมกัน จึงจำเป็นต้องทดลองตั้งค่าน้ำที่ไหลกลับใหม่เพื่อหาระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของทั้งสองโรงงาน

บรรณานุกรม

- กิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์. (2551). พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบการทำความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์หมุนเวียนน้ำร้อนด้วยพลังงานไอน้ำ. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชนาธิป บำรุงบ้าน. (2552). การลดการสูญเสียไอน้ำจากอุปกรณ์กับดักไอน้ำแบบเทอร์โมไดนามิกส์. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชัยคร ออกระลา. (2553). กลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นคร เกิดผล. (2547). การลดความสูญเสียการใช้พลังงานไอน้ำในการผลิตอวน. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ผ่องศรี ศิวราชศักดิ์. (2554). การถ่ายโอนความร้อน (พิมพ์ครั้งที่ 2) . กรุงเทพฯ: ทริปเพิ้ล เอ็ดดูเคชั่น.
- มนตรี พิรุณเกษตร. (2548). การถ่ายเทความร้อน ฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์ (พิมพ์ครั้งที่ 4) . กรุงเทพฯ: วิทย์พัฒนา.
- มนตรี พิรุณเกษตร. (2553). กลศาสตร์ของไหล (พิมพ์ครั้งที่ 6) . กรุงเทพฯ: วิทย์พัฒนา.
- ศรัทธา อารณรัตน์. (2558). เทอร์โมไดนามิกส์ขั้นพื้นฐาน. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- Cengal, Y. A. (2003). *Heat transfer: A practical approach*. New York: McGraw-Hill.
- Yunus, A. C., & Afshin, J. G. (2015) . *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

- ภาพตารางคุณสมบัติของไอน้ำอิมตัว
- ตารางคุณสมบัติของไอน้ำที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษา
- ตารางคุณสมบัติของน้ำดิบที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษา

Temp. T, °C	Saturation Pressure P _{sat} , kPa	Density ρ, kg/m ³		Enthalpy of Vaporization h _g , kJ/kg	Specific Heat c _p , J/kg·K		Thermal Conductivity k, W/m·K		Dynamic Viscosity μ, kg/m·s		Prandtl Number Pr		Volume Expansion Coefficient β, 1/K
		Liquid	Vapor		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	0.922 × 10 ⁻⁵	13.5	1.00	-0.068 × 10 ⁻³
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁵	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁵	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4185	1863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁵	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁵	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁵	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁵	5.42	1.00	0.337 × 10 ⁻³
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁵	4.83	1.00	0.461 × 10 ⁻³
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁵	4.32	1.00	0.607 × 10 ⁻³
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁵	3.91	1.00	0.815 × 10 ⁻³
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁵	3.55	1.00	1.09 × 10 ⁻³
55	15.76	985.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁵	3.25	1.00	1.484 × 10 ⁻³
60	19.94	983.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁵	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁵	2.75	1.00	0.578 × 10 ⁻³
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁵	2.55	1.00	0.670 × 10 ⁻³
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁵	2.38	1.00	0.807 × 10 ⁻³
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁵	2.22	1.00	0.983 × 10 ⁻³
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁵	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁵	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³
95	84.55	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0245	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁵	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³
100	101.33	957.9	0.5978	2257	4217	2029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2230	4229	2071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³
120	198.53	943.4	1.121	2203	4244	2120	0.683	0.0275	0.232 × 10 ⁻³	1.296 × 10 ⁻⁵	1.44	1.00	0.858 × 10 ⁻³
130	270.1	934.6	1.496	2174	4263	2177	0.684	0.0288	0.213 × 10 ⁻³	1.330 × 10 ⁻⁵	1.33	1.01	0.913 × 10 ⁻³
140	361.3	921.7	1.965	2145	4286	2244	0.683	0.0301	0.197 × 10 ⁻³	1.365 × 10 ⁻⁵	1.24	1.02	0.970 × 10 ⁻³
150	475.8	916.6	2.546	2114	4311	2314	0.682	0.0316	0.183 × 10 ⁻³	1.399 × 10 ⁻⁵	1.16	1.02	1.025 × 10 ⁻³
160	617.8	907.4	3.256	2083	4340	2420	0.680	0.0331	0.170 × 10 ⁻³	1.434 × 10 ⁻⁵	1.09	1.05	1.145 × 10 ⁻³
170	791.7	897.7	4.119	2050	4370	2490	0.677	0.0347	0.160 × 10 ⁻³	1.468 × 10 ⁻⁵	1.03	1.05	1.178 × 10 ⁻³
180	1,002.1	887.3	5.153	2015	4410	2590	0.673	0.0364	0.150 × 10 ⁻³	1.502 × 10 ⁻⁵	0.983	1.07	1.210 × 10 ⁻³
190	1,254.4	876.4	6.388	1979	4460	2710	0.669	0.0382	0.142 × 10 ⁻³	1.537 × 10 ⁻⁵	0.947	1.09	1.280 × 10 ⁻³
200	1,553.8	864.3	7.852	1941	4500	2840	0.663	0.0401	0.134 × 10 ⁻³	1.571 × 10 ⁻⁵	0.910	1.11	1.350 × 10 ⁻³
220	2,318	840.3	11.60	1859	4610	3110	0.650	0.0442	0.122 × 10 ⁻³	1.641 × 10 ⁻⁵	0.855	1.15	1.520 × 10 ⁻³
240	3,344	813.7	16.73	1767	4760	3520	0.632	0.0487	0.111 × 10 ⁻³	1.712 × 10 ⁻⁵	0.856	1.24	1.720 × 10 ⁻³
260	4,688	783.7	23.69	1663	4970	4070	0.609	0.0540	0.102 × 10 ⁻³	1.788 × 10 ⁻⁵	0.852	1.35	2.000 × 10 ⁻³
280	6,412	750.8	33.15	1544	5280	4835	0.581	0.0605	0.094 × 10 ⁻³	1.870 × 10 ⁻⁵	0.854	1.49	2.380 × 10 ⁻³
300	8,581	713.8	46.15	1405	5750	5980	0.548	0.0695	0.086 × 10 ⁻³	1.965 × 10 ⁻⁵	0.902	1.69	2.950 × 10 ⁻³
320	11,274	667.1	64.57	1239	6540	7900	0.509	0.0836	0.078 × 10 ⁻³	2.084 × 10 ⁻⁵	1.00	1.97	
340	14,586	610.5	92.62	1028	8240	11,870	0.469	0.110	0.070 × 10 ⁻³	2.255 × 10 ⁻⁵	1.23	2.43	
360	18,651	528.3	144.0	720	14,690	25,800	0.427	0.178	0.060 × 10 ⁻³	2.571 × 10 ⁻⁵	2.06	3.73	
374.14	22,090	317.0	317.0	0					0.043 × 10 ⁻³	4.313 × 10 ⁻⁵			

ภาพภาคผนวก ก-1 ตารางคุณสมบัติของไอน้ำอิ่มตัว (Cengel, 2003, p. 918)

ตารางภาคผนวก ก-1 คุณสมบัติของไอน้ำที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษา

ประเภทของไอน้ำ	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความร้อนจำเพาะ (Cp: kJ/ kg·K)	ราคาต่อตัน (บาท/ ตัน)
HS steam	350	4.5	18.84	1,680
MS steam	160	0.4	2.42	1,680
LS steam	145	0.25	2.28	1,680

หมายเหตุ: ไอน้ำ 1 ตันมีค่าพลังงานเท่ากับ 2,257 MJ

ตารางภาคผนวก ก-2 คุณสมบัติของน้ำดิบที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษา

ประเภทของน้ำ	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ราคาต่อตัน (บาท/ลบ.ม.)
น้ำดิบ	32	ATM	30

ภาคผนวก ข

- ตารางคำนวณปริมาณการใช้ไอน้ำก่อนการปรับปรุง
- ตารางคำนวณความปั่นป่วนได้ของโครงการในการใช้ไอน้ำ ด้วยการควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่เข้าถังเก็บน้ำร้อนที่ 32°C, 40°C, 45°C, 50°C, 55°C, 60°C, 65°C, 70°C, 75°C, 80°C และ 85°C

ตารางภาคผนวก ข-1 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำ เดือนมกราคม พ.ศ. 2559

ครั้ง ที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์		อุณหภูมิน้ำ		อุณหภูมิน้ำในถัง		ระดับน้ำ		ปริมาณการใช้ ไอน้ำ (MJ)
		เหลวในท่อ (°C)		หล่อเย็น (°C)		HW (°C)		ในถัง HW (m3)		
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)	
1	5 มกราคม พ.ศ. 2559	132	41	32	52.1	85	45	55	100	7,568.0
2	6 มกราคม พ.ศ. 2559	131	40	32	79.3	93	74	75	100	2,167.0
3	6 มกราคม พ.ศ. 2559	132	41	32	78.0	93	73	68	100	2,364.0
4	8 มกราคม พ.ศ. 2559	131	42	32	74.9	92	70	70	100	2,943.0
5	9 มกราคม พ.ศ. 2559	131	40	32	77.1	90	70	85	100	2,904.0
6	9 มกราคม พ.ศ. 2559	132	41	32	80.9	92	78	67	100	1,368.5
7	10 มกราคม พ.ศ. 2559	131	42	32	76.7	93	72	60	100	2,550.6
8	11 มกราคม พ.ศ. 2559	131	40	32	72.9	90	65	85	100	3,852.0
9	15 มกราคม พ.ศ. 2559	132	42	32	73.0	95	68	50	100	3,335.4
10	16 มกราคม พ.ศ. 2559	131	39	32	74.2	93	65	85	100	3,852.0
11	17 มกราคม พ.ศ. 2559	132	38	32	80.8	95	76	70	100	1,765.8
12	18 มกราคม พ.ศ. 2559	132	36	32	76.6	92	72	60	100	2,550.6
13	19 มกราคม พ.ศ. 2559	132	40	32	81.6	92	78	70	100	1,379.0
14	20 มกราคม พ.ศ. 2559	131	38	32	80.0	93	70	85	100	2,904.0

ตารางภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

เครื่อง ที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์		อุณหภูมิน้ำ		อุณหภูมิน้ำในถัง		ระดับน้ำ		ปริมาณการใช้ ไอน้ำ (MJ)
		เหลวในท่อ (°C)		หล่อเย็น (°C)		HW (°C)		ในถัง HW (m3)		
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)	
15	21 มกราคม พ.ศ. 2559	132	39	32	79.9	92	75	75	100	1,962.0
16	23 มกราคม พ.ศ. 2559	132	38	32	81.6	95	78	55	100	1,368.5
ปริมาณไอน้ำที่ใช้รวม										44,834.40

ตารางภาคผนวก ข-2 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำ เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์		อุณหภูมิน้ำหล่อ		อุณหภูมิน้ำในถัง		ระดับน้ำในถัง		ปริมาณการใช้ ไอน้ำ (MJ)
		เฉลี่ยในท่อ (°C)		เย็น (°C)		HW (°C)		HW (m3)		
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)	
1	1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	41	32	76.5	86	72	68	100	2,550.6
2	6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	40	32	71.4	92	65	60	100	3,852.0
3	6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	38	32	80.8	95	74	70	100	2,150.5
4	10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	41	32	83.0	93	78	48	100	1,368.5
5	14 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	40	32	75.6	95	68	65	100	3,282.7
6	15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	41	32	78.9	93	74	60	100	2,150.5
7	16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	38	32	81.0	88	78	70	100	1,368.5
8	17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	42	32	71.2	93	65	65	100	3,852.0
9	18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	41	32	81.4	95	75	75	100	1,962.0
10	20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	40	32	84.6	96	78	68	100	1,373.4
11	22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	39	32	72.3	95	67	55	100	3,475.8
12	23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	40	32	82.0	95	76	58	100	1,777.5
13	24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	38	32	81.0	95	75	70	100	1,975.0
14	26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	39	32	67.6	95	65	45	100	3,852.0
ปริมาณไอน้ำที่ใช้รวม										34,991.00

ตารางภาคผนวก ข-3 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำ เดือน มีนาคม พ.ศ. 2559

ครั้ง ที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์		อุณหภูมิน้ำหล่อ		อุณหภูมิน้ำในถัง		ระดับน้ำในถัง		ปริมาณการใช้ ไอน้ำ (MJ)
		เหลวในท่อ (°C)		เย็น (°C)		HW (°C)		HW (m3)		
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)	
1	1 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	40	32	71.3	94	68	58	100	3,282.7
2	3 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	40	32	82.3	94	78	65	100	1,348.2
3	18 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	38	32	66.9	95	63	58	100	4,226.2
4	19 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	39	32	73.8	87	68	70	100	3,364.3
5	20 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	38	32	80.8	95	75	68	100	1,979.0
6	21 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	39	32	71.3	94	65	65	100	3,852.0
7	23 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	38	32	80.3	95	76	65	100	1,777.5
8	24 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	39	32	67.4	95	64	55	100	4,038.3
9	25 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	37	32	83.0	95	78	68	100	1,368.5
10	27 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	38	32	68.4	95	65	55	100	3,852.0
11	29 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	40	32	80.6	88	77	74	100	1,564.0
12	30 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	39	32	65.9	85	63	65	100	4,226.2
ปริมาณไอน้ำที่ใช้รวม										34,878.90

ตารางภาคผนวก ข-4 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำเดือนมีเมษายน พ.ศ. 2559

ครั้ง ที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์		อุณหภูมิน้ำหล่อ		อุณหภูมิน้ำในถัง		ระดับน้ำในถัง		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)
		เฉลี่ย (°C)		เย็น (°C)		HW (°C)		HW (m3)		
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)	
1	1 เมษายน พ.ศ. 2559	132	40	32	83.3	95	78	75	100	1,378.3
2	2 เมษายน พ.ศ. 2559	131	37	32	83.2	95	78	78	100	1,368.5
3	4 เมษายน พ.ศ. 2559	132	41	32	66.6	95	62	68	100	4,416.0
4	7 เมษายน พ.ศ. 2559	131	40	32	81.7	95	76	68	100	1,765.8
5	8 เมษายน พ.ศ. 2559	132	38	32	68.0	95	64	65	100	4,040.4
6	9 เมษายน พ.ศ. 2559	132	38	32	79.2	94	72	72	100	2,522.0
7	10 เมษายน พ.ศ. 2559	132	40	32	71.5	94	65	70	100	3,852.0
8	11 เมษายน พ.ศ. 2559	132	41	32	79.8	95	72	80	100	2,559.7
9	12 เมษายน พ.ศ. 2559	132	41	32	83.2	94	78	76	100	1,368.5
10	14 เมษายน พ.ศ. 2559	131	39	32	67.4	95	60	60	100	4,790.0
11	16 เมษายน พ.ศ. 2559	132	43	32	79.0	95	72	72	100	2,550.6
12	17 เมษายน พ.ศ. 2559	132	41	32	77.7	94	70	75	100	2,904.0
13	18 เมษายน พ.ศ. 2559	131	40	32	78.5	94	74	55	100	2,165.9
14	19 เมษายน พ.ศ. 2559	131	39	32	72.7	95	62	70	100	4,416.0

ตารางภาคผนวก ข-4 (ต่อ)

ครั้ง ที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์		อุณหภูมิน้ำหล่อ		อุณหภูมิน้ำในถัง		ระดับน้ำในถัง		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)
		هلونโท (°C)		เย็น (°C)		HW (°C)		HW (m3)		
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)	
15	21 เมษายน พ.ศ. 2559	132	40	32	82.5	92	78	75	100	1,368.5
16	24 เมษายน พ.ศ. 2559	132	40	32	68.1	92	65	55	100	3,852.0
17	26 เมษายน พ.ศ. 2559	131	41	32	63.5	95	60	50	100	4,790.0
18	28 เมษายน พ.ศ. 2559	131	42	32	82.5	95	78	65	100	1,368.5
ปริมาณไอน้ำที่ใช้รวม										51,476.70

ตารางภาคผนวก ข-5 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำ เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2559

ครั้งที่ ที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์		อุณหภูมิ		อุณหภูมิน้ำในถัง		ระดับน้ำในถัง		ปริมาณการใช้ ไอน้ำ (MJ)
		เหลวในท่อ (°C)		น้ำหล่อเย็น (°C)		HW (°C)		HW (m3)		
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)	
1	2 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	37	32	71.3	94	64	60	100	4,040.4
2	7 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32	79.2	95	72	72	100	2,522.0
3	8 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	39	32	75.0	95	65	75	100	3,852.0
4	10 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	38	32	81.4	92	78	55	100	1,378.3
5	11 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32	83.1	94	78	70	100	1,368.5
6	13 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32	70.4	94	60	75	100	4,790.0
7	14 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32	76.3	90	72	55	100	2,550.6
8	16 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	37	32	72.6	94	70	50	100	2,904.0
9	18 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	39	32	79.6	92	74	65	100	2,165.9
10	19 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	39	32	70.9	93	62	72	100	4,416.0
11	22 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	40	32	70.7	95	60	70	100	4,790.0
12	23 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32	78.5	95	72	80	100	2,550.6
13	23 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	39	32	79.0	95	70	76	100	2,904.0
14	25 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	39	32	81.8	93	76	75	100	1,772.1

ตารางภาคผนวก ข-5 (ต่อ)

ครั้ง ที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์		อุณหภูมิ		อุณหภูมิน้ำในถัง		ระดับน้ำในถัง		ปริมาณการใช้ ไอน้ำ (MJ)
		เหลวในท่อ (°C)		น้ำหล่อเย็น (°C)		HW (°C)		HW (m3)		
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)	
15	27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	39	32	67.3	95	62	78	100	4,416.0
16	28 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	39	32	72.7	94	64	68	100	4,040.4
17	29 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	40	32	78.2	94	72	68	100	2,522.0
ปริมาณไอน้ำที่ใช้รวม										52,982.80

ตารางภาคผนวก ข-6 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำ เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2559

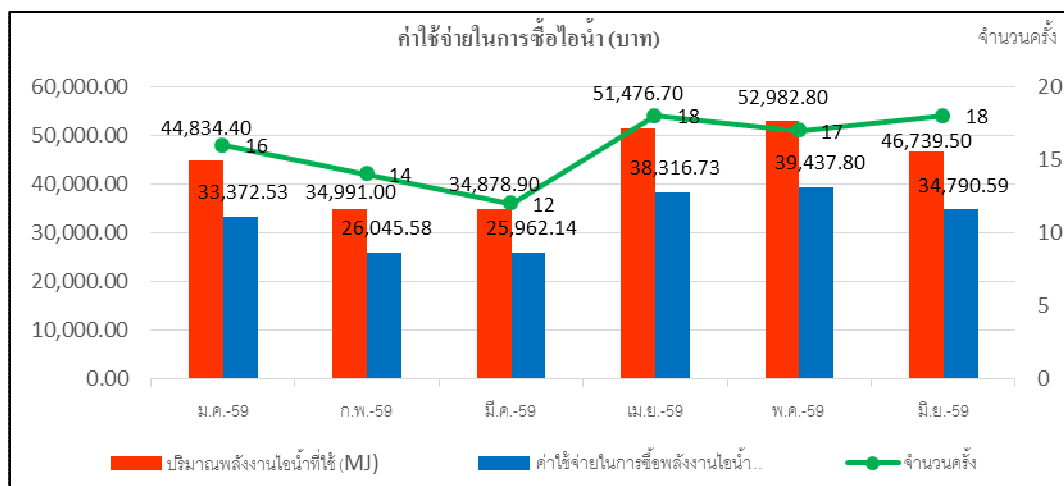
ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์		อุณหภูมิ		อุณหภูมิน้ำในถัง		ระดับน้ำในถัง		ปริมาณการใช้ไอน้ำ (MJ)
		เฉลี่ยในท่อ (°C)		น้ำหล่อเย็น (°C)		HW (°C)		HW (m3)		
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)	
1	2 มิถุนายน พ.ศ. 2559	131	41	32	69.5	90	65	85	100	3,852.0
2	3 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32	81.8	95	78	50	100	1,373.4
3	6 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	41	32	69.7	93	65	85	100	3,852.0
4	8 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	41	32	82.4	95	77	70	100	1,569.6
5	9 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32	80.4	92	76	60	100	1,765.8
6	10 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	41	32	82.6	92	78	70	100	1,385.3
7	14 มิถุนายน พ.ศ. 2559	131	41	32	80.0	93	70	85	100	2,904.0
8	15 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32	76.6	92	74	75	100	2,158.2
9	17 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	36	32	82.2	95	78	55	100	1,368.5
10	19 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32	52.6	85	45	55	100	7,568.0
11	20 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	37	32	83.1	93	76	75	100	1,781.1
12	21 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	39	32	82.5	93	78	68	100	1,385.3
13	22 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	39	32	74.7	92	72	70	100	2,550.6
14	24 มิถุนายน พ.ศ. 2559	131	40	32	77.6	90	70	85	100	2,904.0

ตารางภาคผนวก ข-6

ครั้งที่ วัด	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์		อุณหภูมิ		อุณหภูมิน้ำในถัง		ระดับน้ำในถัง		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)
		เหลวในท่อ (°C)		น้ำหล่อเย็น (°C)		HW (°C)		HW (m3)		
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)	
15	25 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32	82.2	92	78	67	100	1,368.5
16	26 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32	78.6	93	72	60	100	2,550.6
17	28 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	41	32	69.8	90	65	85	100	3,852.0
18	30 มิถุนายน พ.ศ. 2559	131	38	32	78.2	95	72	58	100	2,550.6
ปริมาณไอน้ำที่ใช้รวม										46,739.50

ตารางภาคผนวก ข-7 สรุปปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายก่อนการปรับปรุง

ครั้งที่	เดือน	จำนวนครั้ง	ปริมาณพลังงานไอน้ำ ที่ใช้ (MJ)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ พลังงานไอน้ำ (บาท)
1	มกราคม พ.ศ. 2559	16	44,834.40	33,372.53
2	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	14	34,991.00	26,045.58
3	มีนาคม พ.ศ. 2559	12	34,878.90	25,962.14
4	เมษายน พ.ศ. 2559	18	51,476.70	38,316.73
5	พฤษภาคม พ.ศ. 2559	17	52,982.80	39,437.80
6	มิถุนายน พ.ศ. 2559	18	46,739.50	34,790.59
รวม		95	265,903.30	197,925.36
เฉลี่ยต่อเดือน		15.83	44,317.21	32,987.56
เฉลี่ยต่อครั้ง			2,798.98	2,083.42



ภาพภาคผนวก ข-1 กราฟการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่าย

ตัวอย่างวิธีการคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการ เมื่อเติมน้ำดิบที่ระดับอุณหภูมิ 32°C ลงในถังเก็บน้ำร้อนแทนการนำน้ำที่ได้จากกระบวนการหล่อเย็นกลับมาใช้อีก

ครั้งที่	วัน/ เดือน/ ปี	น้ำดิบ		อุณหภูมิน้ำในถัง		ระดับน้ำในถัง HW		ปริมาณการใช้ ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณน้ำดิบ ที่เติม (m3)
		(°C)		HW (°C)		(m3)			
		T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)			
1	5 มกราคม พ.ศ. 2559	32.0	85	61.2	55	100	9,952.2	45	
2	6 มกราคม พ.ศ. 2559	32.0	93	77.8	75	100	3,005.9	25	
3	6 มกราคม พ.ศ. 2559	32.0	93	73.6	68	100	4,788.0	32	

จากตารางข้อมูลต้องการหาค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ($T_{(ออก)}$) ที่ออกจากกระบวนการหล่อเย็นเพื่อไหลไปลงถังเก็บน้ำร้อน โดยสมดุลพลังงานความร้อนของของเหลวเย็นและของเหลวร้อนเมื่อผสมกัน

$$\text{จะได้ } T_{MIX} = \frac{m_H c_{p,H} (T_H) + m_C c_{p,C} (T_C)}{(m_C c_{p,C} + m_H c_{p,H})}$$

เมื่อ m_H คือ มวลของน้ำที่เหลืออยู่ในถังน้ำร้อน $55 \text{ m}^3 \times 1000 \text{ kg/m}^3 = 55,000 \text{ kg}$

m_C คือ มวลของน้ำดิบที่เข้าถัง $(100-55) \text{ m}^3 \times 1000 \text{ kg/m}^3 = 45,000 \text{ kg}$

$c_{p,H}$ คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำร้อนที่เหลือในถังที่ $T=85^\circ\text{C}$ จะได้ 4.201 kJ/kg-K

$c_{p,C}$ คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำดิบที่เข้าถังที่ $T=32^\circ\text{C}$ จะได้ 4.178 kJ/kg-K

T_H คือ อุณหภูมิของน้ำร้อนที่เหลืออยู่ในถังเก็บ = 85°C

T_C คือ อุณหภูมิของน้ำร้อนและน้ำหล่อเย็นที่ผสมกันในถังเก็บ = 32°C

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการ } T_{MIX} &= \frac{(55,000 \times 4.201 \times 85) + (45,000 \times 4.178 \times 32)}{(45,000 \times 4.178) + (55,000 \times 4.201)} \\ &= 61.2^\circ\text{C} \end{aligned}$$

อุณหภูมิที่คำนวณได้จะมีค่าไม่ลงตัวตามตารางคุณสมบัติของน้ำ ซึ่งทำให้ต้องทำการ Interpolation ในช่วงอุณหภูมินั้น ๆ เพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของน้ำ ที่อุณหภูมิ ดังกล่าวเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณพลังงานความร้อน ดังนั้น การ Interpolation จึงสามารถทำได้โดย

อุณหภูมิ (T_i : °C)	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ($C_{p,i}$: kJ/ kg-°C)
60	4.185
61.2	???
65	4.187

จากสมการ

$$C_{p@T_x} = (C_{p@T_2} - C_{p@T_1}) \left(\frac{(T_x - T_1) + C_{p@T_1}}{(T_2 - T_1)} \right)$$

$$\text{แทนค่า } C_{p@T_x} = (4.187 - 4.185) \left(\frac{(61.2 - 60) + 4.185}{(65 - 60)} \right)$$

$$= 4.18548 \text{ kJ/ kg-°C}$$

เมื่อได้ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของน้ำที่ผสมกันในถังเก็บแล้ว ก็สามารถคำนวณพลังงานความร้อนที่ต้องใช้เพื่อทำให้น้ำมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 85°C

จากสมการ

$$Q = mc_p(\Delta T)$$

$$Q = mc_p(T_H - T_{MIX})$$

เมื่อ m คือ มวลของน้ำที่ผสมกันในถัง: $100 \text{ m}^3 \times 1,000 \text{ kg/ m}^3 = 100,000 \text{ kg}$

c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของน้ำที่ 61.2°C = 4.18548 kJ/ kg-°C

T_H คือ อุณหภูมิควบคุมของน้ำร้อนที่ใช้ในการผลิต = 85°C

T_{MIX} คือ อุณหภูมิของน้ำที่ผสมกันในถังเก็บ = 61.2°C

$$\text{แทนค่า } Q = 100,000 \times 4.18548 \times (85 - 61.2)$$

$$= 9,952,242.40 \text{ kJ}$$

$$= 9,952.2 \text{ MJ}$$

และปริมาณน้ำดิบที่ใช้ในการเติมลงไปในถังเพื่อผลิตน้ำร้อน = 45 m³

โดยการคำนวณจะทำแบบนี้ทุกค่าเพื่อหาค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการใช้งานในการคำนวณความเป็นไปได้ของโครงการ ดังแสดงในตารางดังต่อไปนี้

ตารางภาคผนวก ข-8 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 32°C เดือนมกราคม พ.ศ. 2559

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ น้ำดิบ		อุณหภูมิน้ำในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW (m ³)		ปริมาณการใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณน้ำดิบที่เติม (m ³)	
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)			L _(หลัง)
1	5 มกราคม พ.ศ. 2559	132	41	32.0	85	61.2	55	100	9,952.2	45
2	6 มกราคม พ.ศ. 2559	131	40	32.0	93	77.8	75	100	3,005.9	25
3	6 มกราคม พ.ศ. 2559	132	41	32.0	93	73.6	68	100	4,788.0	32
4	8 มกราคม พ.ศ. 2559	131	42	32.0	92	74.1	70	100	4,573.8	30
5	9 มกราคม พ.ศ. 2559	131	40	32.0	90	81.3	85	100	1,532.7	15
6	9 มกราคม พ.ศ. 2559	132	41	32.0	92	72.3	67	100	5,325.1	33
7	10 มกราคม พ.ศ. 2559	131	42	32.0	93	68.7	60	100	6,824.9	40
8	11 มกราคม พ.ศ. 2559	131	40	32.0	90	81.3	85	100	1,532.7	15
9	15 มกราคม พ.ศ. 2559	132	42	32.0	95	63.6	50	100	8,948.3	50
10	16 มกราคม พ.ศ. 2559	131	39	32.0	93	83.9	85	100	458.5	15
11	17 มกราคม พ.ศ. 2559	132	38	32.0	95	76.2	70	100	3,685.3	30

ตารางภาคผนวก ข-8 (ต่อ)

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ น้ำดิบ			อุณหภูมิน้ำในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW (m3)		ปริมาณการใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณน้ำดิบที่เติม (m3)
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
12	18 มกราคม พ.ศ. 2559	132	36	32.0	92	68.1	60	100	7,077.9	40
13	19 มกราคม พ.ศ. 2559	132	40	32.0	92	74.1	70	100	4,573.8	30
14	20 มกราคม พ.ศ. 2559	131	38	32.0	93	83.9	85	100	458.5	15
15	21 มกราคม พ.ศ. 2559	132	39	32.0	92	77.1	75	100	3,321.8	25
16	23 มกราคม พ.ศ. 2559	132	38	32.0	95	66.8	55	100	7,633.2	45
ปริมาณไอน้ำและน้ำดิบที่ใช้รวม									73,692.46	485

ตารางภาคผนวก ข-9 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 32°C เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์เหลว ในท่อ (°C)		น้ำดิบ (°C)	อุณหภูมิน้ำ ในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW(m3)		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (m3)
		T _(เข้า)	T _(ออก)		T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)		
1	1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	41	32.0	86	68.8	68	100	6,792.5	32
2	6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	40	32.0	92	68.1	60	100	7,077.9	40
3	6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	38	32.0	95	76.2	70	100	3,685.3	30
4	10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	41	32.0	93	61.4	48	100	9,881.0	52
5	14 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	40	32.0	95	73.1	65	100	5,003.1	35
6	15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	41	32.0	93	68.7	60	100	6,824.9	40
7	16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	38	32.0	88	71.3	70	100	5,753.2	30
8	17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	42	32.0	93	71.8	65	100	5,552.0	35
9	18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	41	32.0	95	79.3	75	100	2,373.2	25
10	20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	40	32.0	96	75.6	68	100	3,927.4	32
11	22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	39	32.0	95	66.8	55	100	7,633.2	45
12	23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	40	32.0	95	68.7	58	100	6,844.3	42
13	24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	38	32.0	95	76.2	70	100	3,685.3	30
14	26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	39	32.0	95	60.5	45	100	10,264.5	55
ปริมาณไอน้ำและน้ำดิบที่ใช้รวม									85,297.78	523

ตารางภาคผนวก ข-10 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 32°C เดือน มีนาคม พ.ศ. 2559

ครั้ง ที่	วัน/ เดือน/ ปี	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์เหลว ในท่อ (°C)		น้ำดิบ (°C)	อุณหภูมิน้ำใน ถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW (m3)			ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณน้ำ ดิบที่เติม (m3)
		T _(เข้า)	T _(ออก)		T _(ออก)	T _(ก่อน)	T (หลัง)	L (ก่อน)	L (หลัง)		
1	1 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	40	32.0	94	68.1	58	100	7,089.3	42	
2	3 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	40	32.0	94	72.4	65	100	5,277.6	35	
3	18 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	38	32.0	95	68.7	58	100	6,844.3	42	
4	19 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	39	32.0	87	70.6	70	100	6,047.6	30	
5	20 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	38	32.0	95	75.0	68	100	4,214.2	32	
6	21 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	39	32.0	94	72.4	65	100	5,277.6	35	
7	23 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	38	32.0	95	73.1	65	100	5,003.1	35	
8	24 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	39	32.0	95	66.8	55	100	7,633.2	45	
9	25 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	37	32.0	95	75.0	68	100	4,214.2	32	
10	27 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	38	32.0	95	66.8	55	100	7,633.2	45	
11	29 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	40	32.0	88	73.5	74	100	4,818.4	26	
12	30 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	39	32.0	85	66.5	65	100	7,741.5	35	
ปริมาณไอน้ำและน้ำดิบที่ใช้รวม									71,794.20	434	

ตารางภาคผนวก ข-11 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 32°C เดือนเมษายน พ.ศ. 2559

ครั้ง ที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์		น้ำดิบ (°C)	อุณหภูมิน้ำ ในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW (m3)		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (m3)
		เหลวในท่อ (°C)			T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
1	1 เมษายน พ.ศ. 2559	132	40	32.0	95	79.3	75	100	2,373.2	25
2	2 เมษายน พ.ศ. 2559	131	37	32.0	95	81.2	78	100	1,583.9	22
3	4 เมษายน พ.ศ. 2559	132	41	32.0	95	75.0	68	100	4,214.2	32
4	7 เมษายน พ.ศ. 2559	131	40	32.0	95	75.0	68	100	4,214.2	32
5	8 เมษายน พ.ศ. 2559	132	38	32.0	95	73.1	65	100	5,003.1	35
6	9 เมษายน พ.ศ. 2559	132	38	32.0	94	76.7	72	100	3,466.1	28
7	10 เมษายน พ.ศ. 2559	132	40	32.0	94	75.5	70	100	3,983.6	30
8	11 เมษายน พ.ศ. 2559	132	41	32.0	95	82.5	80	100	1,057.6	20
9	12 เมษายน พ.ศ. 2559	132	41	32.0	94	79.2	76	100	2,430.7	24
10	14 เมษายน พ.ศ. 2559	131	39	32.0	95	69.9	60	100	6,318.2	40
11	16 เมษายน พ.ศ. 2559	132	43	32.0	95	77.5	72	100	3,162.3	28
12	17 เมษายน พ.ศ. 2559	132	41	32.0	94	78.6	75	100	2,689.6	25
13	18 เมษายน พ.ศ. 2559	131	40	32.0	94	66.2	55	100	7,865.6	45
14	19 เมษายน พ.ศ. 2559	131	39	32.0	95	76.2	70	100	3,685.3	30

ตารางภาคผนวก ข-11 (ต่อ)

ครั้ง ที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์		น้ำดิบ	อุณหภูมิน้ำ		ระดับน้ำในถัง		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (m3)
		เหลวในท่อ (°C)		(°C)	ในถัง HW (°C)		HW (m3)			
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
15	21 เมษายน พ.ศ. 2559	132	40	32.0	92	77.1	75	100	3,321.8	25
16	24 เมษายน พ.ศ. 2559	132	40	32.0	92	65.1	55	100	8,330.6	45
17	26 เมษายน พ.ศ. 2559	131	41	32.0	95	63.6	50	100	8,948.3	50
18	28 เมษายน พ.ศ. 2559	131	42	32.0	95	73.1	65	100	5,003.1	35
ปริมาณไอน้ำและน้ำดิบที่ใช้รวม									77,651.62	571

ตารางภาคผนวก ข-12 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 32°C เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2559

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์เหลว ในท่อ (°C)		น้ำดิบ (°C)	อุณหภูมิน้ำ ในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW (m3)		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (m3)
		T _(เข้า)	T _(ออก)		T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)		
1	2 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	37	32.0	94	69.3	60	100	6,571.7	40
2	7 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32.0	95	77.5	72	100	3,162.3	28
3	8 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	39	32.0	95	79.3	75	100	2,373.2	25
4	10 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	38	32.0	92	65.1	55	100	8,330.6	45
5	11 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32.0	94	75.5	70	100	3,983.6	30
6	13 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32.0	94	78.6	75	100	2,689.6	25
7	14 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32.0	90	64.0	55	100	8,794.3	45
8	16 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	37	32.0	94	63.1	50	100	9,159.8	50
9	18 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	39	32.0	92	71.1	65	100	5,825.9	35
10	19 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	39	32.0	93	76.0	72	100	3,769.7	28
11	22 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	40	32.0	95	76.2	70	100	3,685.3	30
12	23 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32.0	95	82.5	80	100	1,057.6	20
13	23 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	39	32.0	95	80.0	76	100	2,110.1	24
14	25 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	39	32.0	93	77.8	75	100	3,005.9	25

ตารางภาคผนวก ข-12 (ต่อ)

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ		น้ำดิบ (°C)	อุณหภูมิน้ำ		ระดับน้ำในถัง		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (m3)
		ผลิตภัณฑ์เหลว			ในถัง HW (°C)		HW (m3)			
		T _(เข้า)	T _(ออก)		T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)		
15	27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	39	32.0	95	81.2	78	100	1,583.9	22
16	28 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	39	32.0	94	74.3	68	100	4,501.0	32
17	29 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	40	32.0	94	74.3	68	100	4,501.0	32
ปริมาณไอน้ำและน้ำดิบที่ใช้รวม									75,105.58	536

ตารางภาคผนวก ข-13 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 32°C เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2559

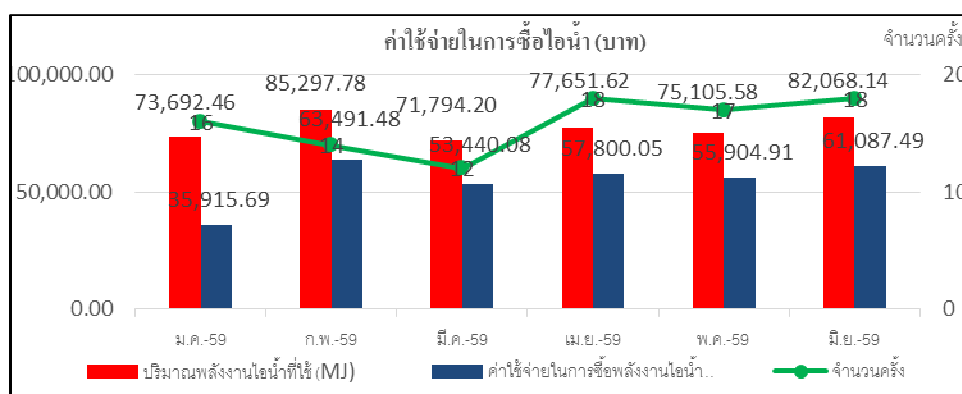
ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์เหลว ในท่อ (°C)		น้ำดิบ (°C)	อุณหภูมิน้ำในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW (m3)		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (m3)
		T _(เข้า)	T _(ออก)		T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)		
1	2 มิถุนายน พ.ศ. 2559	131	41	32.0	90	81.3	85	100	1,532.7	15
2	3 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32.0	95	63.6	50	100	8,948.3	50
3	6 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	41	32.0	93	83.9	85	100	458.5	15
4	8 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	41	32.0	95	76.2	70	100	3,685.3	30
5	9 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32.0	92	68.1	60	100	7,077.9	40
6	10 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	41	32.0	92	74.1	70	100	4,573.8	30
7	14 มิถุนายน พ.ศ. 2559	131	41	32.0	93	83.9	85	100	458.5	15
8	15 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32.0	92	77.1	75	100	3,321.8	25
9	17 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	36	32.0	95	66.8	55	100	7,633.2	45
10	19 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32.0	85	61.2	55	100	9,952.8	45
11	20 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	37	32.0	93	77.8	75	100	3,005.9	25
12	21 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	39	32.0	93	73.6	68	100	4,786.0	32
13	22 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	39	32.0	92	74.1	70	100	4,573.8	30
14	24 มิถุนายน พ.ศ. 2559	131	40	32.0	90	81.3	85	100	1,532.7	15

ตารางภาคผนวก ข-13 (ต่อ)

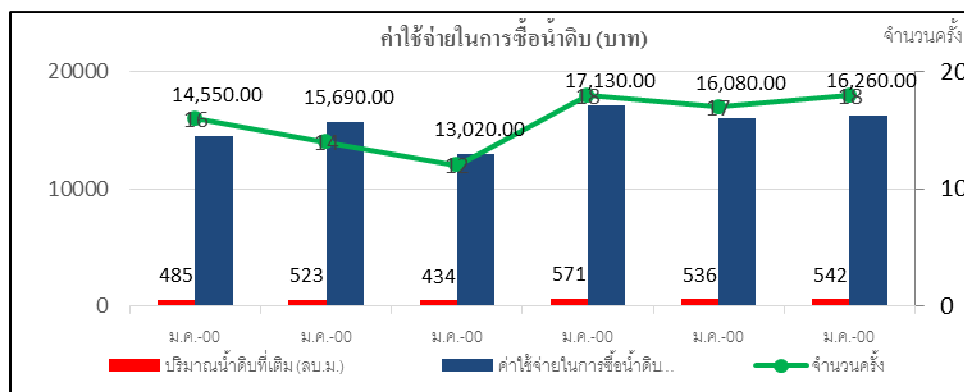
ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์เหลว ในท่อ (°C)		น้ำดิบ (°C)	อุณหภูมิน้ำในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW (m3)		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (m3)
		T _(เข้า)	T _(ออก)		T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)		
15	25 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32.0	92	72.3	67	100	5,325.1	33
16	26 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32.0	93	68.7	60	100	6,824.9	40
17	28 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	41	32.0	90	81.3	85	100	1,532.7	15
18	30 มิถุนายน พ.ศ. 2559	131	38	32.0	95	68.7	58	100	6,844.3	42
ปริมาณไอน้ำและน้ำดิบที่ใช้รวม									82,068.14	542

ตารางภาคผนวก ข-14 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 32°C ในการผลิตน้ำร้อน

ครั้งที่	เดือน	จำนวนครั้ง	ปริมาณพลังงานไอน้ำที่ใช้ (MJ)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อพลังงานไอน้ำ (บาท)	ปริมาณน้ำดิบที่เติม (ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อน้ำดิบ (บาท)
1	มกราคม พ.ศ. 2559	16	73,692.46	35,915.69	485	14,550.00
2	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	14	85,297.78	63,491.48	523	15,690.00
3	มีนาคม พ.ศ. 2559	12	71,794.20	53,440.08	434	13,020.00
4	เมษายน พ.ศ. 2559	18	77,651.62	57,800.05	571	17,130.00
5	พฤษภาคม พ.ศ. 2559	17	75,105.58	55,904.91	536	16,080.00
6	มิถุนายน พ.ศ. 2559	18	82,068.14	61,087.49	542	16,260.00
รวม		95	465,609.78	327,639.70	3,091	92,730.00
				รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด		420,369.70
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน		70,061.62
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้ง		4,424.94



ภาพภาคผนวก ข-2 กราฟการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อเติมน้ำดิบที่ 32°C



ภาพภาคผนวก ข-3 กราฟการใช้น้ำดิบที่ 32°C เติมลงในถังและค่าใช้จ่าย

ตารางภาคผนวก ข-15 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 65°C เดือนมกราคม พ.ศ. 2559

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ		อุณหภูมิ		อุณหภูมิ		ระดับน้ำในถัง		ปริมาณการใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณน้ำดิบที่เติม (m3)
		ผลิตภัณฑ์เหลว		น้ำหล่อเย็น		ในถัง		HW (m3)			
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
1	5 มกราคม พ.ศ. 2559	132	41	32	65.0	85	72.2	55	100	5,339.1	10
2	6 มกราคม พ.ศ. 2559	131	40	32	65.0	93	84.1	75	100	380.6	0
3	6 มกราคม พ.ศ. 2559	132	41	32	65.0	93	83.5	68	100	634.1	0
4	8 มกราคม พ.ศ. 2559	131	42	32	65.0	92	83.0	70	100	837.4	0
5	9 มกราคม พ.ศ. 2559	131	40	32	65.0	90	82.7	85	100	959.5	0
6	9 มกราคม พ.ศ. 2559	132	41	32	65.0	92	82.7	67	100	948.2	0
7	10 มกราคม พ.ศ. 2559	131	42	32	65.0	93	79.7	60	100	2,208.0	5
8	11 มกราคม พ.ศ. 2559	131	40	32	65.0	90	82.7	85	100	959.5	0
9	15 มกราคม พ.ศ. 2559	132	42	32	65.0	95	74.1	50	100	4,560.0	15
10	16 มกราคม พ.ศ. 2559	131	39	32	65.0	93	84.8	85	100	69.8	0
11	17 มกราคม พ.ศ. 2559	132	38	32	65.0	95	85.0	70	100	-	0
12	18 มกราคม พ.ศ. 2559	132	36	32	65.0	92	79.1	60	100	2,452.1	5
13	19 มกราคม พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	92	83.0	70	100	837.4	0
14	20 มกราคม พ.ศ. 2559	131	38	32	65.0	93	84.8	85	100	69.8	0

ตารางภาคผนวก ข-15 (ต่อ)

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ		อุณหภูมิ		อุณหภูมิน้ำ		ระดับน้ำในถัง		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (m3)
		ผลิตภัณฑ์เหลว		น้ำหล่อเย็น		ในถัง		HW (m3)			
		ในท่อ (°C)		(°C)		HW (°C)					
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
1	21 มกราคม	132	39	32	65.0	92	83.4	75	100	666.1	0
5	พ.ศ. 2559										
1	23 มกราคม	132	38	32	65.0	95	77.4	55	100	3,173.3	10
6	พ.ศ. 2559										
ปริมาณไอน้ำที่ใช้รวม										24,095.09	45.00

ตารางภาคผนวก ข-16 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 65°C เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เหลวในท่อ (°C)		อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น (°C)		อุณหภูมิไอน้ำในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW(m3)		ปริมาณการใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณน้ำดิบที่เติม (m3)
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
1	1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	41	32	65.0	86	78.9	68	100	2,569.1	0
2	6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	40	32	65.0	92	79.1	60	100	2,452.1	5
3	6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	38	32	65.0	95	85.0	70	100	-	0
4	10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	41	32	65.0	93	72.0	48	100	5,451.0	17
5	14 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	95	84.5	65	100	209.4	0
6	15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	41	32	65.0	93	79.7	60	100	2,208.0	5
7	16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	38	32	65.0	88	80.3	70	100	1,953.9	0
8	17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	42	32	65.0	93	83.2	65	100	753.7	0
9	18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	41	32	65.0	95	85.5	75	100	-	0
10	20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	96	85.5	68	100	-	0
11	22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	39	32	65.0	95	77.4	55	100	3,173.3	10
12	23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	131	40	32	65.0	95	79.5	58	100	2,308.5	7
13	24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	38	32	65.0	95	85.0	70	100	-	0
14	26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	132	39	32	65.0	95	71.0	45	100	5,867.1	20
ปริมาณไอน้ำที่ใช้รวม										26,946.09	64.00

ตารางภาคผนวก ข-17 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 65°C เดือน มีนาคม พ.ศ. 2559

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์เหลว ในท่อ (°C)		อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น (°C)		อุณหภูมิ น้ำ ในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW (m3)		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (m3)
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
1	1 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	94	78.9	58	100	2,541.5	7
2	3 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	40	32	65.0	94	83.9	65	100	481.5	0
3	18 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	38	32	65.0	95	79.5	58	100	2,308.5	7
4	19 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	39	32	65.0	87	79.7	70	100	2,233.1	0
5	20 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	38	32	65.0	95	84.8	68	100	81.3	0
6	21 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	39	32	65.0	94	83.9	65	100	481.5	0
7	23 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	38	32	65.0	95	84.5	65	100	209.4	0
8	24 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	39	32	65.0	95	77.4	55	100	3,173.3	10
9	25 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	37	32	65.0	95	84.8	68	100	81.3	0
10	27 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	38	32	65.0	95	77.4	55	100	3,173.3	10
11	29 มีนาคม พ.ศ. 2559	131	40	32	65.0	88	80.6	74	100	1,836.1	0
12	30 มีนาคม พ.ศ. 2559	132	39	32	65.0	85	78.0	65	100	2,930.9	0
ปริมาณไอน้ำที่ใช้รวม										19,531.73	34.00

ตารางภาคผนวก ข-18 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 65°C เดือนเมษายน พ.ศ. 2559

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เหลว		อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น		อุณหภูมิ น้ำในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW (m3)		ปริมาณการใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณน้ำดิบที่เติม (m3)
		ในท่อ (°C)		(°C)		ในถัง HW (°C)		HW (m3)			
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
1	1 เมษายน พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	95	85.5	75	100	-	0
2	2 เมษายน พ.ศ. 2559	131	37	32	65.0	95	85.7	78	100	-	0
3	4 เมษายน พ.ศ. 2559	132	41	32	65.0	95	84.8	68	100	81.3	0
4	7 เมษายน พ.ศ. 2559	131	40	32	65.0	95	84.8	68	100	81.3	0
5	8 เมษายน พ.ศ. 2559	132	38	32	65.0	95	84.5	65	100	209.3	0
6	9 เมษายน พ.ศ. 2559	132	38	32	65.0	94	84.5	72	100	203.5	0
7	10 เมษายน พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	94	84.3	70	100	279.1	0
8	11 เมษายน พ.ศ. 2559	132	41	32	65.0	95	85.9	80	100	-	0
9	12 เมษายน พ.ศ. 2559	132	41	32	65.0	94	84.9	76	100	60.4	0
10	14 เมษายน พ.ศ. 2559	131	39	32	65.0	95	80.9	60	100	1,719.7	5
11	16 เมษายน พ.ศ. 2559	132	43	32	65.0	95	85.2	72	100	-	0
12	17 เมษายน พ.ศ. 2559	132	41	32	65.0	94	84.8	75	100	95.2	0
13	18 เมษายน พ.ศ. 2559	131	40	32	65.0	94	76.9	55	100	3,389.9	10
14	19 เมษายน พ.ศ. 2559	131	39	32	65.0	95	85.0	70	100	-	0

ตารางภาคผนวก ข-18 (ต่อ)

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์เหลว		อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น		อุณหภูมิ น้ำในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW (m3)		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (m3)
		ในท่อ (°C)		(°C)		ในถัง HW (°C)		HW (m3)			
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
15	21 เมษายน พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	92	83.4	75	100	666.1	0
16	24 เมษายน พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	92	75.9	55	100	3,823.1	10
17	26 เมษายน พ.ศ. 2559	131	41	32	65.0	95	74.1	50	100	4,560.0	15
18	28 เมษายน พ.ศ. 2559	131	42	32	65.0	95	84.5	65	100	209.3	0
ปริมาณไอน้ำที่ใช้รวม										15,378.20	40.00

ตารางภาคผนวก ข-19 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 65°C เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2559

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ		อุณหภูมิ		อุณหภูมิ		ระดับน้ำ		ปริมาณการใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณน้ำดิบที่เติม (m3)
		ผลิตภัณฑ์เหลว		น้ำหล่อเย็น		ไอน้ำ		ในถัง HW			
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
1	2 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	37	32	65.0	94	80.3	60	100	1,963.9	5
2	7 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	95	85.2	72	100	-	0
3	8 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	39	32	65.0	95	85.5	75	100	-	0
4	10 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	38	32	65.0	92	75.9	55	100	3,823.1	10
5	11 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	94	84.3	70	100	279.1	0
6	13 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	94	84.8	75	100	95.2	0
7	14 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	90	74.8	55	100	4,256.2	10
8	16 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	37	32	65.0	94	73.7	50	100	4,749.5	15
9	18 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	39	32	65.0	92	82.6	65	100	1,025.8	0
10	19 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	39	32	65.0	93	83.8	72	100	485.2	0
11	22 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	40	32	65.0	95	85.0	70	100	-	0
12	23 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	95	85.9	80	100	-	0
13	23 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	39	32	65.0	95	85.5	76	100	-	0
14	25 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	39	32	65.0	93	84.1	75	100	380.6	0

ตารางภาคผนวก ข-19 (ต่อ)

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์เหลว		อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น		อุณหภูมิ น้ำในถัง HW (°C)		ระดับน้ำ ในถัง HW (m3)		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (m3)
		ในท่อ (°C)		(°C)		ในถัง HW (°C)		(m3)			
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
15	27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	39	32	65.0	95	85.7	78	100	-	0
16	28 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	132	39	32	65.0	94	84.1	68	100	357.7	0
17	29 พฤษภาคม พ.ศ. 2559	131	40	32	65.0	94	84.1	68	100	357.7	0
						ปริมาณไอน้ำที่ใช้				17,774.08	40.00
						รวม					

ตารางภาคผนวก ข-20 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 65°C เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2559

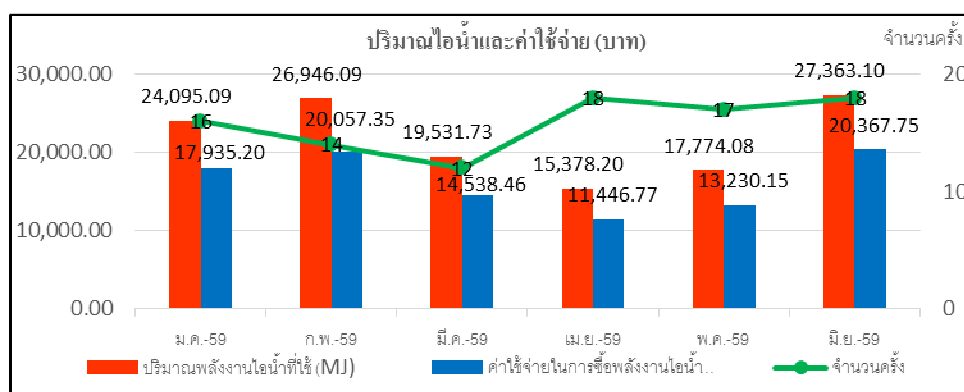
เครื่อง ที่	วัน/ เดือน/ ปี	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์เหลว		อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น		อุณหภูมิ น้ำในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW(m3)		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (m3)
		ในท่อ (°C)		(°C)		ในถัง HW (°C)		HW(m3)			
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
1	2 มิถุนายน พ.ศ. 2559	131	41	32	65.0	90	82.7	85	100	959.5	0
2	3 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	95	74.1	50	100	4,560.0	15
3	6 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	41	32	65.0	93	84.8	85	100	69.8	0
4	8 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	41	32	65.0	95	85.0	70	100	-	0
5	9 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	92	79.1	60	100	2,452.1	5
6	10 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	41	32	65.0	92	83.0	70	100	837.4	0
7	14 มิถุนายน พ.ศ. 2559	131	41	32	65.0	93	84.8	85	100	69.8	0
8	15 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	92	83.4	75	100	666.1	0
9	17 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	36	32	65.0	95	77.4	55	100	3,173.3	10
10	19 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	85	72.2	55	100	5,339.1	10
11	20 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	37	32	65.0	93	84.1	75	100	380.6	0
12	21 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	39	32	65.0	93	83.5	68	100	634.1	0
13	22 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	39	32	65.0	92	83.0	70	100	837.4	0
14	24 มิถุนายน พ.ศ. 2559	131	40	32	65.0	90	82.7	85	100	959.5	0

ตารางภาคผนวก ข-20 (ต่อ)

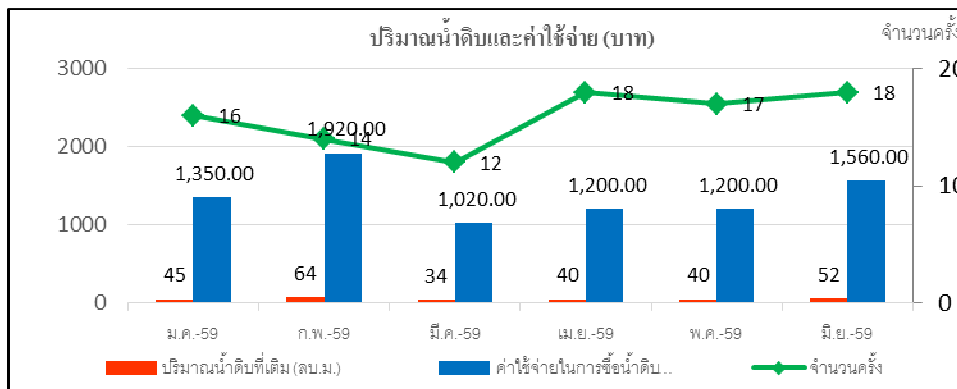
ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์เหลว ในท่อ (°C)		อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น (°C)		อุณหภูมิ น้ำในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW(m3)		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (m3)
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
15	25 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	92	82.7	67	100	948.2	0
16	26 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	40	32	65.0	93	79.7	60	100	2,208.0	5
17	28 มิถุนายน พ.ศ. 2559	132	41	32	65.0	90	82.7	85	100	959.5	0
18	30 มิถุนายน พ.ศ. 2559	131	38	32	65.0	95	79.5	58	100	2,308.5	7
ปริมาณไอน้ำที่ใช้รวม										27,363.10	52.00

ตารางภาคผนวก ข-21 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น
ที่ 65°C

ครั้งที่	เดือน	จำนวน ครั้ง	ปริมาณ พลังงานไอน้ำที่ใช้ (MJ)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ พลังงานไอน้ำ (บาท)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่าย ในการซื้อน้ำดิบ (บาท)
1	มกราคม พ.ศ. 2559	16	24,095.09	17,935.20	45	1,350.00
2	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	14	26,946.09	20,057.35	64	1,920.00
3	มีนาคม พ.ศ. 2559	12	19,531.73	14,538.46	34	1,020.00
4	เมษายน พ.ศ. 2559	18	15,378.20	11,446.77	40	1,200.00
5	พฤษภาคม พ.ศ. 2559	17	17,774.08	13,230.15	40	1,200.00
6	มิถุนายน พ.ศ. 2559	18	27,363.10	20,367.75	52	1,560.00
รวม		95	131,088.28	97,575.68	275	8,250.00
				รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด		105,825.68
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน		17,637.61
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้ง		1,113.95



ภาพภาคผนวก ข-4 กราฟการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 65°C



ภาพภาคผนวก ข-5 กราฟการใช้น้ำดิบและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 65°C

ส่วนผลของการคำนวณในระดับอุณหภูมิอื่น ๆ ที่เหลือนั้นจะใช้รูปแบบและสมการในการคำนวณเหมือนกันกับการคำนวณที่ระดับอุณหภูมิ 32°C และ 65°C ดังแสดงข้างต้น ต่างกันเพียงแค่ค่าของอุณหภูมิที่ต้องการคำนวณจะเปลี่ยนเป็น 40°C, 45°C, 50°C, 55°C, 60°C, 70°C, 75°C, 80°C และ 85°C ตามลำดับ โดยคำนวณจากการสมดุลพลังงานความร้อนดังนี้



จากสมการสมดุลพลังงานความร้อน (2-10 และ 2-11)

พลังงานความร้อนที่ดูด = พลังงานความร้อนที่คาย

$$Q_C = Q_H$$

$$m_C c_{p,C} (\Delta T)_C = m_H c_{p,H} (\Delta T)_H$$

$$m_C c_{p,C} (T_{MIX} - T_C) = m_H c_{p,H} (T_H - T_{MIX})$$

$$\text{จะได้ } T_{MIX} = \frac{m_H c_{p,H} (T_H) + m_C c_{p,C} (T_C)}{(m_C c_{p,C} + m_H c_{p,H})}$$

เมื่อได้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ออกจากกระบวนการหล่อเย็นแล้วก็จะสามารถคำนวณปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำในถังซึ่งมีปริมาตร 100 ลูกบาศก์เมตรได้จากสมการพลังงานความร้อน คือ

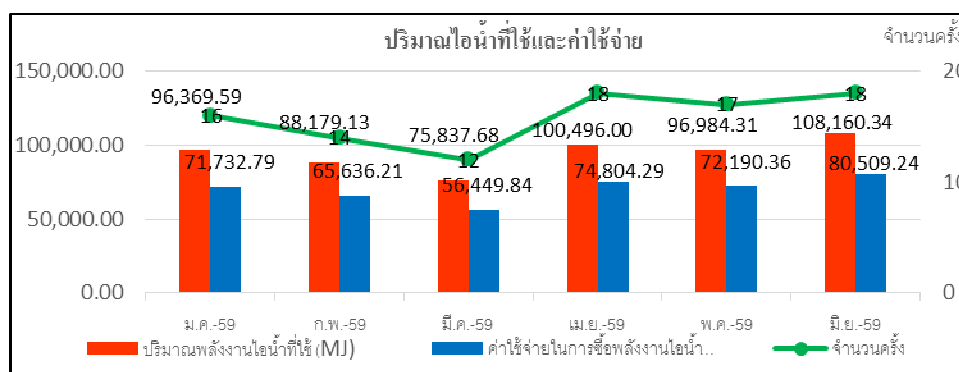
$$Q = mc_p (\Delta T)$$

$$Q = mc_p (T_H - T_{MIX})$$

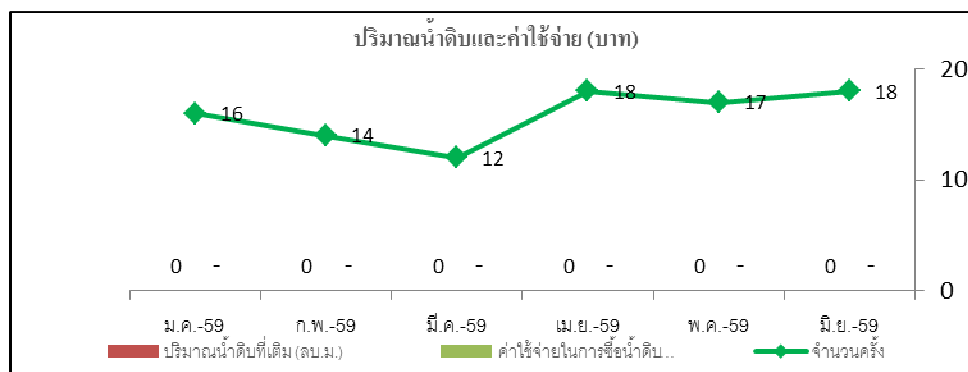
การคำนวณของแต่ละระดับอุณหภูมินั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางภาคผนวก ข-22 สรุปปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิ
น้ำหล่อเย็นที่ 40°C

ครั้งที่	เดือน	จำนวน ครั้ง	ปริมาณ พลังงานไอน้ำที่ ใช้ (MJ)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ พลังงานไอน้ำ (บาท)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ น้ำดิบ (บาท)
1	มกราคม พ.ศ. 2559	16	96,369.59	71,732.79	0	-
2	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	14	88,179.13	65,636.21	0	-
3	มีนาคม พ.ศ. 2559	12	75,837.68	56,449.84	0	-
4	เมษายน พ.ศ. 2559	18	100,496.00	74,804.29	0	-
5	พฤษภาคม พ.ศ. 2559	17	96,984.31	72,190.36	0	-
6	มิถุนายน พ.ศ. 2559	18	108,160.34	80,509.24	0	-
รวม		95	566,027.04	421,322.74	-	-
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด						421,322.74
ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน						70,220.46
ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้ง						4,434.98



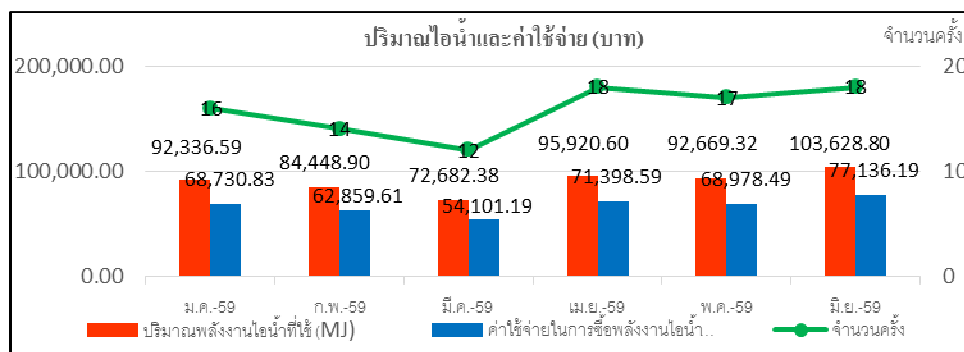
ภาพภาคผนวก ข-6 กราฟการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 40°C



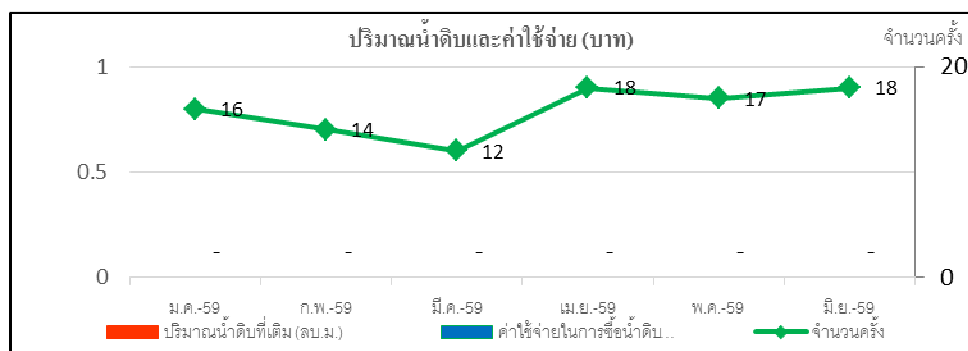
ภาพภาคผนวก ข-7 กราฟการใช้น้ำดิบและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 40°C

ตารางภาคผนวก ข-23 สรุปปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิ
น้ำหล่อเย็นที่ 45°C

ครั้งที่	เดือน	จำนวนครั้ง	ปริมาณพลังงานไอน้ำที่ใช้ (MJ)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อพลังงานไอน้ำ (บาท)	ปริมาณน้ำดิบที่เติม (ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อน้ำดิบ (บาท)
1	มกราคม พ.ศ. 2559	16	92,336.59	68,730.83	0	-
2	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	14	84,448.90	62,859.61	0	-
3	มีนาคม พ.ศ. 2559	12	72,682.38	54,101.19	0	-
4	เมษายน พ.ศ. 2559	18	95,920.60	71,398.59	0	-
5	พฤษภาคม พ.ศ. 2559	17	92,669.32	68,978.49	0	-
6	มิถุนายน พ.ศ. 2559	18	103,628.80	77,136.19	0	-
รวม		95	541,686.59	403,204.90	-	-
				รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด	403,204.90	
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน	67,200.82	
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้ง	4,244.26	



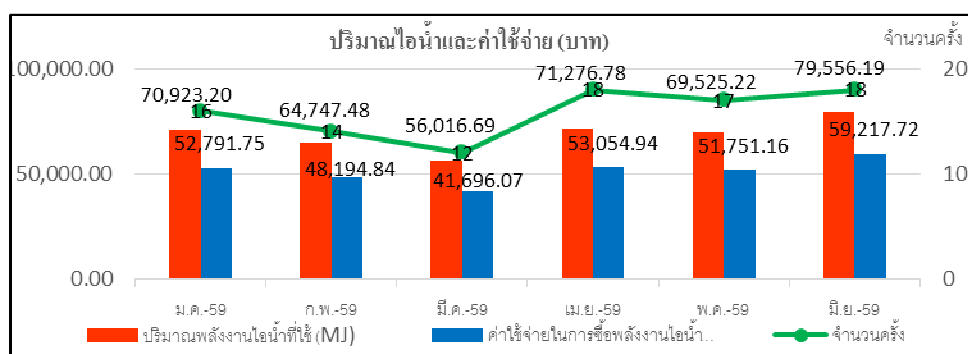
ภาพภาคผนวก ข-8 กราฟการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 45°C



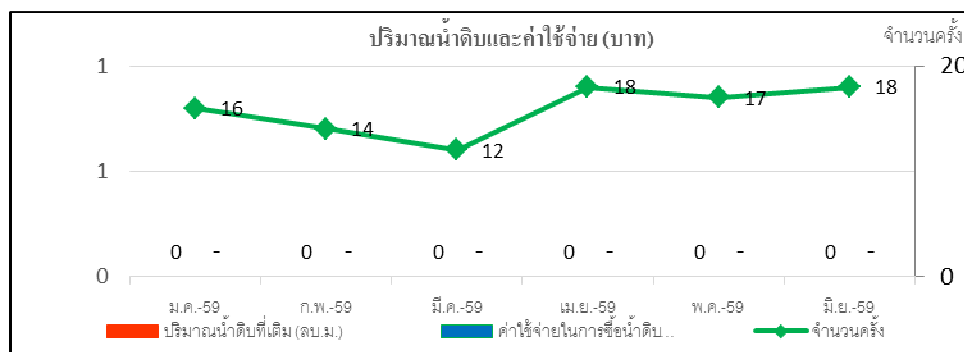
ภาพภาคผนวก ข-9 กราฟการใช้น้ำดิบและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 45°C

ตารางภาคผนวก ข-24 สรุปปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิ
น้ำหล่อเย็นที่ 50°C

ครั้งที่	เดือน	จำนวน ครั้ง	ปริมาณ พลังงานไอน้ำที่ใช้ (MJ)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ พลังงานไอน้ำ (บาท)	ปริมาณน้ำดิบ ที่เติม (ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ น้ำดิบ (บาท)	
1	มกราคม พ.ศ. 2559	16	70,923.20	52,791.75	0	-	
2	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	14	64,747.48	48,194.84	0	-	
3	มีนาคม พ.ศ. 2559	12	56,016.69	41,696.07	0	-	
4	เมษายน พ.ศ. 2559	18	71,276.78	53,054.94	0	-	
5	พฤษภาคม พ.ศ. 2559	17	69,525.22	51,751.16	0	-	
6	มิถุนายน พ.ศ. 2559	18	79,556.19	59,217.72	0	-	
รวม		95	412,045.55	306,706.48	-	-	
						รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด	306,706.48
						ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน	51,117.75
						ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้ง	3,228.49



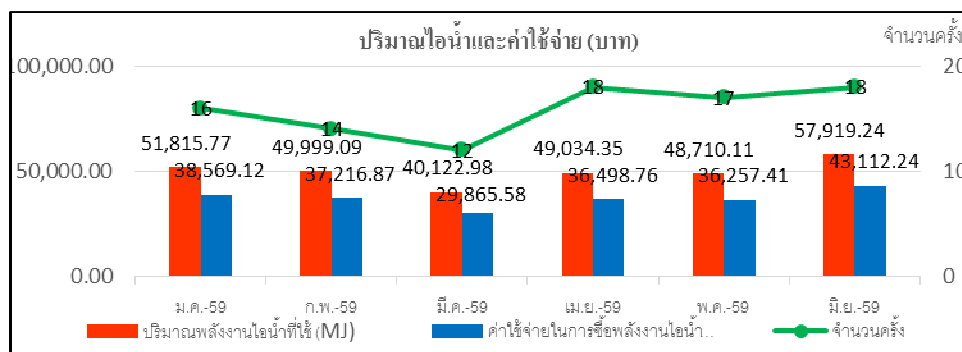
ภาพภาคผนวก ข-10 กราฟการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิ
น้ำหล่อเย็นที่ 50°C



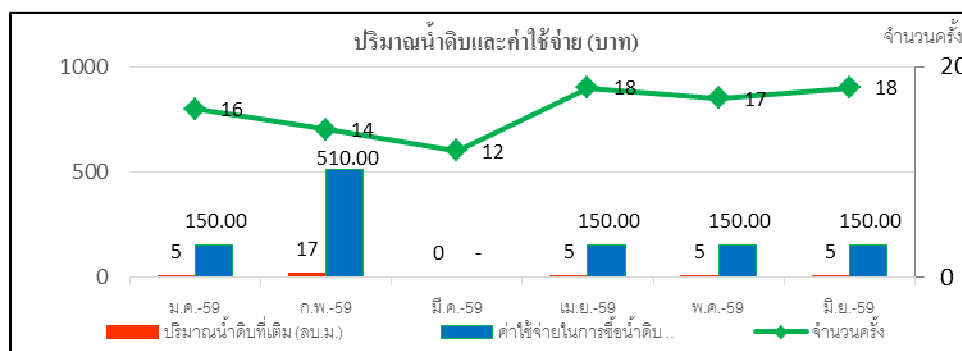
ภาพภาคผนวก ข-11 กราฟการใช้น้ำดิบและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 50°C

ตารางภาคผนวก ข-25 สรุปปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิ
น้ำหล่อเย็นที่ 55°C

ครั้งที่	เดือน	จำนวน ครั้ง	ปริมาณ	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ	ปริมาณ	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ
			พลังงานไอน้ำที่ใช้ (MJ)	พลังงานไอน้ำ (บาท)	น้ำดิบที่เติม (ลบ.ม.)	น้ำดิบ (บาท)
1	มกราคม พ.ศ. 2559	16	51,815.77	38,569.12	5	150.00
2	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	14	49,999.09	37,216.87	17	510.00
3	มีนาคม พ.ศ. 2559	12	40,122.98	29,865.58	0	-
4	เมษายน พ.ศ. 2559	18	49,034.35	36,498.76	5	150.00
5	พฤษภาคม พ.ศ. 2559	17	48,710.11	36,257.41	5	150.00
6	มิถุนายน พ.ศ. 2559	18	57,919.24	43,112.24	5	150.00
รวม		95	297,601.54	221,519.97	37.00	1,110.00
				รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด		222,629.97
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน		37,105.00
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้ง		2,343.47



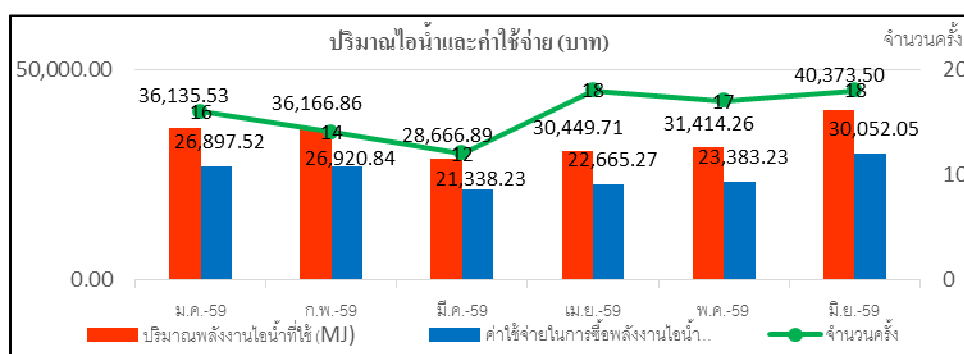
ภาพภาคผนวก ข-12 กราฟการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 55°C



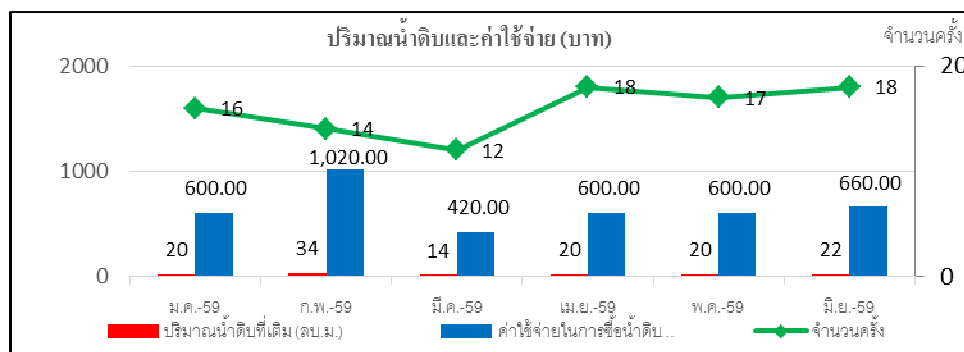
ภาพภาคผนวก ข-13 กราฟการใช้น้ำดิบและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 55°C

ตารางภาคผนวก ข-26 สรุปปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิ
น้ำหล่อเย็นที่ 60°C

ครั้งที่	เดือน	จำนวน ครั้ง	ปริมาณ พลังงานไอน้ำที่ใช้ (MJ)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ พลังงานไอน้ำ (บาท)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อน้ำ ดิบ (บาท)
1	มกราคม พ.ศ. 2559	16	36,135.53	26,897.52	20	600.00
2	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	14	36,166.86	26,920.84	34	1,020.00
3	มีนาคม พ.ศ. 2559	12	28,666.89	21,338.23	14	420.00
4	เมษายน พ.ศ. 2559	18	30,449.71	22,665.27	20	600.00
5	พฤษภาคม พ.ศ. 2559	17	31,414.26	23,383.23	20	600.00
6	มิถุนายน พ.ศ. 2559	18	40,373.50	30,052.05	22	660.00
รวม		95	203,206.76	151,257.14	130.00	3,900.00
				รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด		155,157.14
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน		25,859.52
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้ง		1,633.23



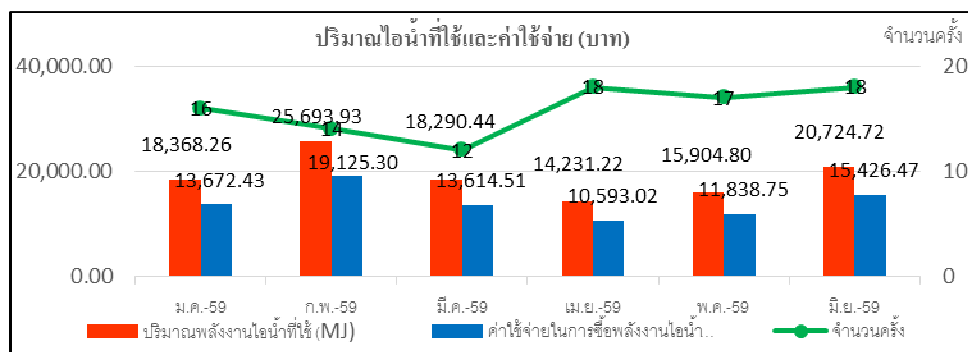
ภาพภาคผนวก ข-14 กราฟการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิ
น้ำหล่อเย็นที่ 60°C



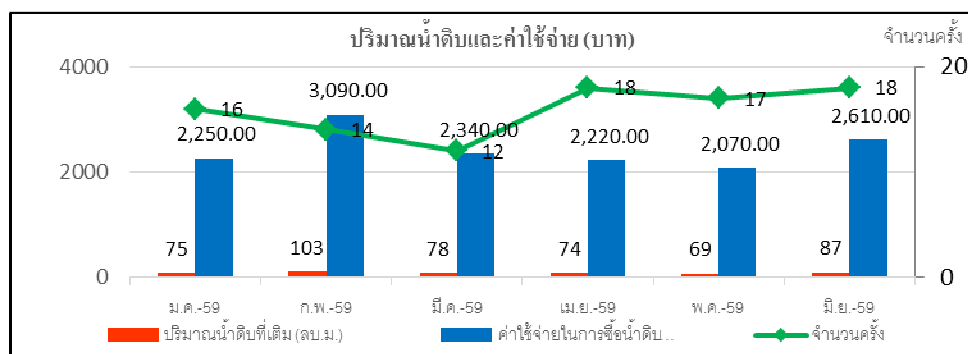
ภาพภาคผนวก ข-15 กราฟการใช้น้ำดิบและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 60°C

ตารางภาคผนวก ข-27 สรุปปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิ
น้ำหล่อเย็นที่ 70°C

ครั้งที่	เดือน	จำนวน ครั้ง	ปริมาณ พลังงานไอน้ำที่ใช้ (MJ)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ พลังงานไอน้ำ (บาท)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ น้ำดิบ (บาท)
1	มกราคม พ.ศ. 2559	16	18,368.26	13,672.43	75	2,250.00
2	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	14	25,693.93	19,125.30	103	3,090.00
3	มีนาคม พ.ศ. 2559	12	18,290.44	13,614.51	78	2,340.00
4	เมษายน พ.ศ. 2559	18	14,231.22	10,593.02	74	2,220.00
5	พฤษภาคม พ.ศ. 2559	17	15,904.80	11,838.75	69	2,070.00
6	มิถุนายน พ.ศ. 2559	18	20,724.72	15,426.47	87	2,610.00
รวม		95	113,213.38	84,270.48	486	14,580.00
				รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด		98,850.48
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน		16,475.08
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้ง		1,040.53



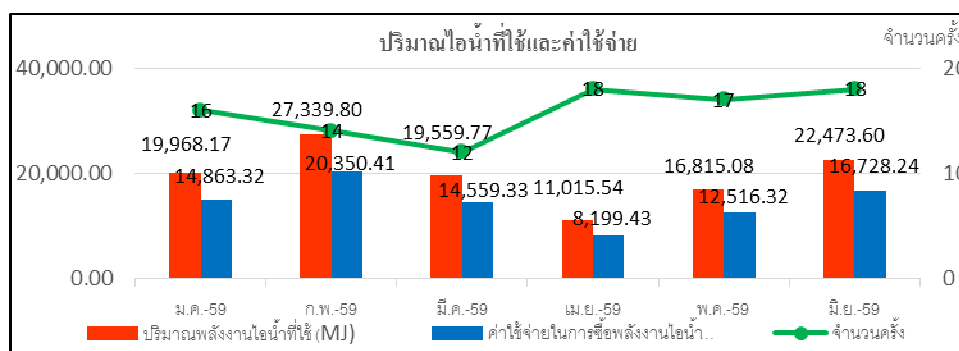
ภาพภาคผนวก ข-16 กราฟการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 70°C



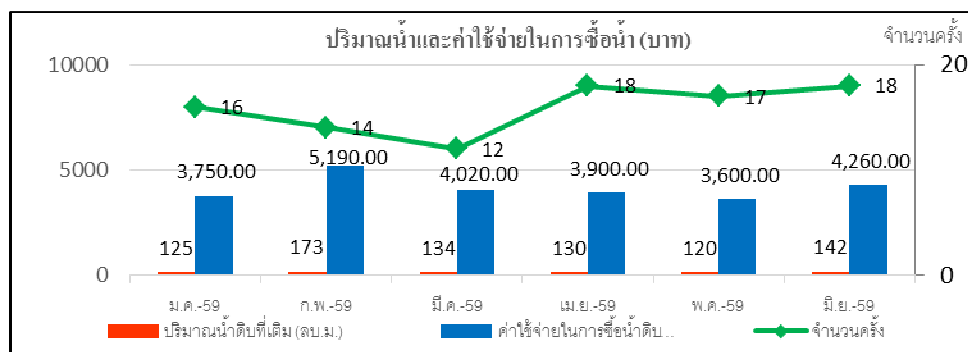
ภาพภาคผนวก ข-17 กราฟการใช้น้ำดิบและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 70°C

ตารางภาคผนวก ข-28 สรุปปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิ
น้ำหล่อเย็นที่ 75°C

ครั้งที่	เดือน	จำนวน ครั้ง	ปริมาณ พลังงานไอน้ำที่ใช้ (MJ)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ พลังงานไอน้ำ (บาท)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ น้ำดิบ (บาท)
1	มกราคม พ.ศ. 2559	16	19,968.17	14,863.32	125	3,750.00
2	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	14	27,339.80	20,350.41	173	5,190.00
3	มีนาคม พ.ศ. 2559	12	19,559.77	14,559.33	134	4,020.00
4	เมษายน พ.ศ. 2559	18	11,015.54	8,199.43	130	3,900.00
5	พฤษภาคม พ.ศ. 2559	17	16,815.08	12,516.32	120	3,600.00
6	มิถุนายน พ.ศ. 2559	18	22,473.60	16,728.24	142	4,260.00
รวม		95	117,171.95	87,217.05	824	24,720.00
				รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด		111,937.05
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน		18,656.17
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้ง		1,178.28



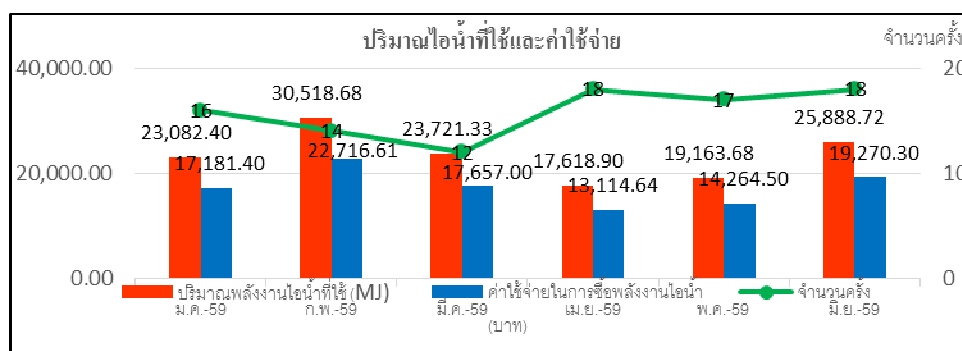
ภาพภาคผนวก ข-18 กราฟการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น
ที่ 75°C



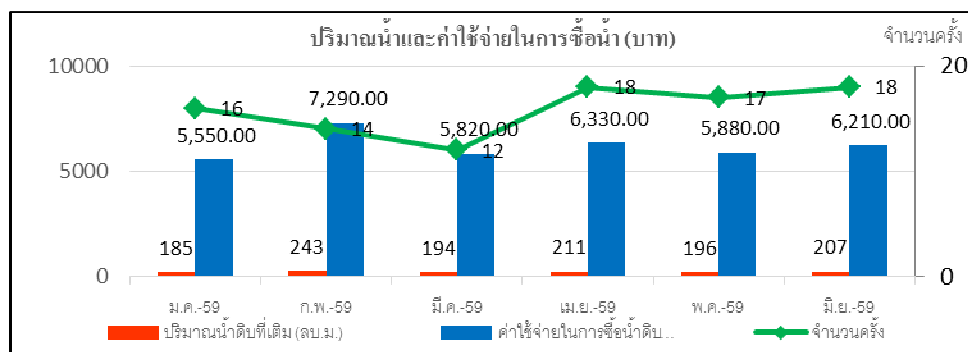
ภาพภาคผนวก ข-19 กราฟการใช้น้ำดิบและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 75°C

ตารางภาคผนวก ข-29 สรุปปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิ
น้ำหล่อเย็นที่ 80°C

ครั้งที่	เดือน	จำนวน ครั้ง	ปริมาณ พลังงานไอน้ำ ที่ใช้ (MJ)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ พลังงานไอน้ำ (บาท)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ น้ำดิบ (บาท)
1	มกราคม พ.ศ. 2559	16	23,082.40	17,181.40	185	5,550.00
2	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	14	30,518.68	22,716.61	243	7,290.00
3	มีนาคม พ.ศ. 2559	12	23,721.33	17,657.00	194	5,820.00
4	เมษายน พ.ศ. 2559	18	17,618.90	13,114.64	211	6,330.00
5	พฤษภาคม พ.ศ. 2559	17	19,163.68	14,264.50	196	5,880.00
6	มิถุนายน พ.ศ. 2559	18	25,888.72	19,270.30	207	6,210.00
รวม		95	139,993.71	104,204.45	1,236	37,080.00
				รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด		141,284.45
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน		23,547.41
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้ง		1,487.20



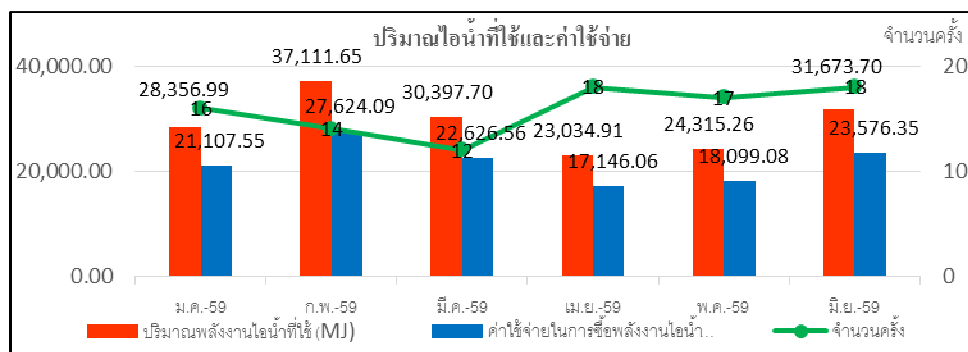
ภาพภาคผนวก ข-20 กราฟการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิ
น้ำหล่อเย็นที่ 80°C



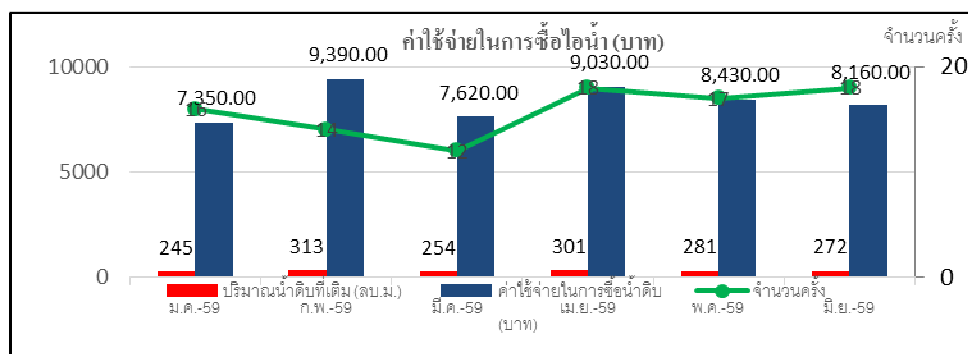
ภาพภาคผนวก ข-21 กราฟการใช้น้ำดิบและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 80°C

ตารางภาคผนวก ข-30 สรุปปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิ
น้ำหล่อเย็นที่ 85°C

ครั้งที่	เดือน	จำนวน ครั้ง	ปริมาณ พลังงานไอน้ำที่ใช้ (MJ)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ พลังงานไอน้ำ (บาท)	ปริมาณ น้ำดิบที่เติม (ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ น้ำดิบ (บาท)
1	มกราคม พ.ศ. 2559	16	28,356.99	21,107.55	245	7,350.00
2	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	14	37,111.65	27,624.09	313	9,390.00
3	มีนาคม พ.ศ. 2559	12	30,397.70	22,626.56	254	7,620.00
4	เมษายน พ.ศ. 2559	18	23,034.91	17,146.06	301	9,030.00
5	พฤษภาคม พ.ศ. 2559	17	24,315.26	18,099.08	281	8,430.00
6	มิถุนายน พ.ศ. 2559	18	31,673.70	23,576.35	272	8,160.00
รวม		95	174,890.22	130,179.70	1,666	49,980.00
				รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด		180,159.70
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน		30,026.62
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้ง		1,896.42



ภาพภาคผนวก ข-22 กราฟการใช้พลังงานไอน้ำและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 85°C



ภาพภาคผนวก ข-23 กราฟการใช้น้ำดิบและค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 85°C

ภาคผนวก ค

- ตารางคำนวณปริมาณการใช้ไอน้ำหลังการปรับปรุง ด้วยการควบคุมอุณหภูมิของน้ำ
เข้าถังเก็บน้ำร้อนที่ 65°C

ตารางภาคผนวก ค-1 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 65°C เดือน มีนาคม พ.ศ. 2560

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เหลว		อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น		อุณหภูมิ น้ำในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW (m3)		ปริมาณการใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณน้ำดิบที่เติม (m3)
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
1	5 มีนาคม พ.ศ. 2560	132	40	32	65.0	90	82.5	70	100	1,042.0	0
2	7 มีนาคม พ.ศ. 2560	132	40	32	65.0	90	82.5	70	100	1,042.0	0
3	10 มีนาคม พ.ศ. 2560	132	40	32	65.0	85	82.0	85	100	1,253.8	0
4	12 มีนาคม พ.ศ. 2560	132	40	32	65.0	85	80.0	75	100	2,090.1	0
5	16 มีนาคม พ.ศ. 2560	132	46	32	65.0	85	82.0	85	100	1,253.8	0
6	21 มีนาคม พ.ศ. 2560	132	46	32	65.0	85	80.0	75	100	2,090.1	0
7	22 มีนาคม พ.ศ. 2560	131	40	32	65.0	80	74.8	65	100	4,288.6	0
8	23 มีนาคม พ.ศ. 2560	131	47	32	65.0	85	78.0	65	100	2,926.8	0
9	24 มีนาคม พ.ศ. 2560	132	42	32	65.0	85	78.0	65	100	2,926.8	0
10	25 มีนาคม พ.ศ. 2560	120	38	32	65.0	85	79.0	70	100	2,508.4	0
11	26 มีนาคม พ.ศ. 2560	120	38	32	65.0	90	81.3	65	100	1,565.0	0
12	27 มีนาคม พ.ศ. 2560	132	40	32	65.0	90	82.5	70	100	1,042.0	0
13	28 มีนาคม พ.ศ. 2560	132	41	32	65.0	90	81.3	65	100	1,565.0	0
ปริมาณไอน้ำที่ใช้รวม										25,594.55	0

ตารางภาคผนวก ค-2 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 65°C เดือนเมษายน พ.ศ. 2560

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เหลว		อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น		อุณหภูมิน้ำในถัง		ระดับน้ำในถัง		ปริมาณการใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณน้ำดิบที่เติม (m3)
		ในท่อ (°C)		(°C)		HW (°C)		HW(m3)			
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
1	2 เมษายน พ.ศ. 2560	132	41	32	65.0	85	77.0	60	100	3,345.3	5
2	3 เมษายน พ.ศ. 2560	131	40	32	65.0	90	80.0	60	100	2,088.1	5
3	4 เมษายน พ.ศ. 2560	132	38	32	65.0	90	88.8	95	100	-	0
4	5 เมษายน พ.ศ. 2560	131	41	32	65.0	85	84.0	95	100	417.8	0
5	8 เมษายน พ.ศ. 2560	132	40	32	65.0	90	80.0	60	100	2,088.1	5
6	10 เมษายน พ.ศ. 2560	132	41	32	65.0	90	83.8	75	100	519.2	0
7	11 เมษายน พ.ศ. 2560	132	38	32	65.0	85	77.0	60	100	3,345.3	5
8	16 เมษายน พ.ศ. 2560	131	42	32	65.0	90	83.8	75	100	519.2	0
9	19 เมษายน พ.ศ. 2560	131	41	32	65.0	90	85.0	80	100	-	0
10	20 เมษายน พ.ศ. 2560	132	40	32	65.0	90	83.8	75	100	519.2	0
11	21 เมษายน พ.ศ. 2560	131	39	32	65.0	95	83.0	60	100	830.9	5
12	23 เมษายน พ.ศ. 2560	131	40	32	65.0	90	85.0	80	100	-	0
13	25 เมษายน พ.ศ. 2560	132	38	32	65.0	95	86.0	70	100	-	0
14	27 เมษายน พ.ศ. 2560	132	38	32	65.0	95	84.5	65	100	203.2	0
ปริมาณไอน้ำที่ใช้รวม										13,876.17	25.00

ตารางภาคผนวก ค-3 ปริมาณการใช้พลังงานไอน้ำและน้ำดิบที่ 65°C เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2560

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เหลว		อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น		อุณหภูมิไอน้ำ		ระดับน้ำในถัง		ปริมาณการใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณน้ำดิบที่เติม (m3)
		ในท่อ (°C)		(°C)		ในถัง HW (°C)		HW(m3)			
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
1	2 พฤษภาคม พ.ศ. 2560	132	40	32	65.0	85	82.0	85	100	1,253.8	0
2	3 พฤษภาคม พ.ศ. 2560	132	40	32	65.0	90	80.0	60	100	2,088.1	5
3	6 พฤษภาคม พ.ศ. 2560	131	38	32	65.0	90	86.3	85	100	-	0
4	7 พฤษภาคม พ.ศ. 2560	132	39	32	65.0	80	75.5	70	100	3,974.8	0
5	8 พฤษภาคม พ.ศ. 2560	132	38	32	65.0	95	83.0	60	100	830.9	5
6	9 พฤษภาคม พ.ศ. 2560	132	39	32	65.0	90	82.5	70	100	1,042.0	0
7	11 พฤษภาคม พ.ศ. 2560	132	38	32	65.0	90	86.3	85	100	-	0
8	12 พฤษภาคม พ.ศ. 2560	131	39	32	65.0	95	87.5	75	100	-	0
9	14 พฤษภาคม พ.ศ. 2560	132	37	32	65.0	90	78.8	55	100	2,611.3	10
10	18 พฤษภาคม พ.ศ. 2560	131	38	32	65.0	95	81.5	55	100	1,458.8	10
11	21 พฤษภาคม พ.ศ. 2560	132	40	32	65.0	88	82.3	75	100	1,147.5	0
12	22 พฤษภาคม พ.ศ. 2560	132	40	32	65.0	85	78.6	68	100	2,675.8	0
13	25 พฤษภาคม พ.ศ. 2560	132	39	32	65.0	90	82.5	70	100	1,042.0	0
14	26 พฤษภาคม พ.ศ. 2560	132	40	32	65.0	90	86.3	85	100	-	0

ตารางภาคผนวก ค-3 (ต่อ)

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์เหลว		อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น		อุณหภูมิ น้ำในถัง HW (°C)		ระดับน้ำในถัง HW(m3)		ปริมาณ การใช้ไอน้ำ (MJ)	ปริมาณ น้ำดิบ ที่เติม (m3)
		ในท่อ (°C)		(°C)		ในถัง HW (°C)		HW(m3)			
		T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(เข้า)	T _(ออก)	T _(ก่อน)	T _(หลัง)	L _(ก่อน)	L _(หลัง)		
1	28 พฤษภาคม	132	40	32	65.0	85	78.4	67	100	2,759.4	0
5	พ.ศ. 2560										
1	29 พฤษภาคม	132	38	32	65.0	95	81.5	55	100	1,458.8	10
6	พ.ศ. 2560										
1	31 พฤษภาคม	132	39	32	65.0	85	72.0	65	100	5,427.7	0
7	พ.ศ. 2560										
ปริมาณไอน้ำที่ใช้รวม										27,770.91	40.00

ตารางภาคผนวก ค-4 สรุปปริมาณการใช้ไอน้ำในการผลิตน้ำร้อนหลังการปรับปรุงระบบ

ครั้ง ที่	เดือน	จำนวน ครั้ง	ปริมาณพลังงาน ไอน้ำที่ใช้ (MJ)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ พลังงานไอน้ำ (บาท)	ปริมาณน้ำ ดิบที่เติม (ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อ น้ำดิบ (บาท)
1	มีนาคม พ.ศ. 2560	13	25,594.55	19,051.33	0	-
2	พฤษภาคม พ.ศ. 2560	17	27,770.91	20,671.30	40	1,200
	รวม	30	53,365.46	39,722.63	40.00	1,200
				รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด		40,922.63
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน		20,461.32
				ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้ง		1,364.09

ผลจากการใช้ระบบหลังการปรับปรุง พบว่า ในเดือนเมษายน พ.ศ. 2560 นั้น มีปริมาณการใช้ไอน้ำต่ำกว่าปกติซึ่งมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิตมีปัญหาทำให้ต้องหยุดระบบการผลิตเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ดังนั้น ในการคำนวณระยะเวลาในการคืนทุนจึงคำนวณปริมาณพลังงานไอน้ำเฉลี่ยของเดือน มีนาคมและเดือนพฤษภาคมแค่ 2 เดือนเท่านั้น โดยมีปริมาณไอน้ำเฉลี่ย 26,682.73 เมกะจูล และปริมาณการเติมน้ำดิบเฉลี่ย 20 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน คิดเป็นค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำร้อน 20,461.32 บาท