

การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋อง
มาใช้ในการอบฝากระป๋องด้วยเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม
พฤษภาคม 2556

การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋อง
มาใช้ในการอบฝากระป๋องด้วยเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม

พฤษภาคม 2556

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋อง
มาใช้ในการอบฝากระป๋องด้วยเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม

พฤษภาคม 2556

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

มนตรี มีคำนิล. (2556). การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องมาใช้ในการอบฝากระป๋องด้วยเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อน. ปรินูญานิพนธ์. วศ. ม.(การจัดการทางวิศวกรรม). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. อาจารย์ที่ปรึกษาปรินูญานิพนธ์: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องมาใช้ในการอบฝากระป๋องด้วยเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดการใช้พลังงานความร้อนจากไฟฟ้า โดยทำการศึกษาถึงความเหมาะสมทั้งทางด้านเทคโนโลยีและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อ แบบแผ่นเพลต และแบบอีโคโนไมเซอร์ แล้วนำไปพิจารณารวมกับฉนวนชนิดใยหิน ใยแก้ว และแคลเซียมซิลิกา และท่อความร้อน ผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอีโคโนไมเซอร์มีความเหมาะสมในการใช้งาน สะดวกในการติดตั้งและไม่ก่อให้เกิดแรงดันย้อนกลับเข้าสู่ระบบ โดยมีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 65 เปอร์เซ็นต์ ใช้ร่วมกับฉนวนแบบแคลเซียมซิลิเกต และท่อความร้อนเบอร์ 40 โดยค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบเท่ากับ 50,000 บาทต่อปี และจากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 2,436,377 บาทต่อปี

A FEASIBILITY STUDY OF WAST HEAT RECOVERY FROM ENAMEL PROCESS
FOR BAKING PROCESS OF CAN END USING HEAT TRANSFER TECHNOLOGY



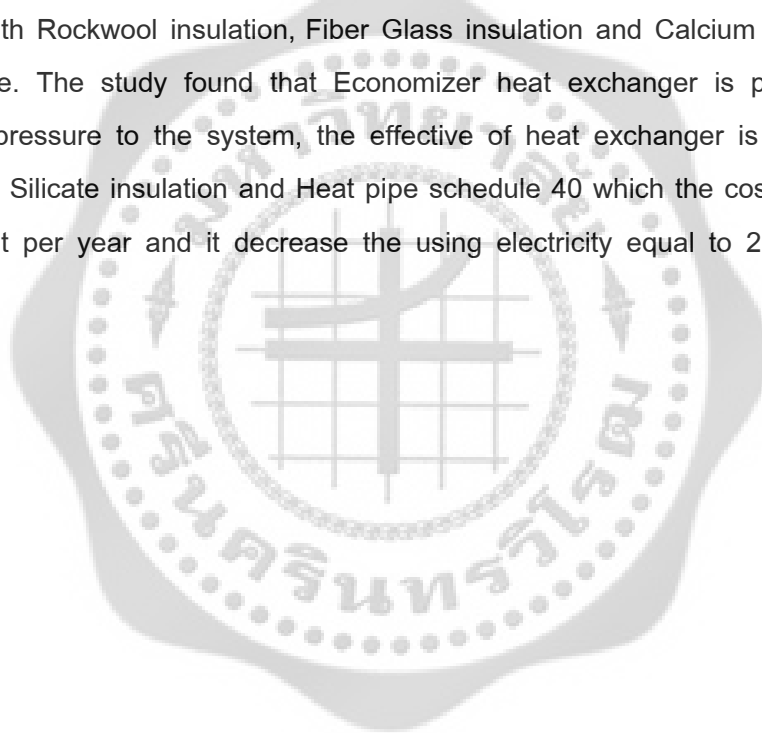
AN ABSTRACT
BY
MONTRI MIKAMNIN

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

May 2013

Montri Mikamnin. (2013). *A Feasibility Study of Waste Heat Recovery from Enamel Process for Baking process of Can End using Heat Transfer Technology*. Master thesis, M.Eng. (Engineering Management). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University.
Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Kitti Sathapornprasath.

The purpose of this research was to study the feasibility of Waste Heat recovery from Enamel process for Baking process of Can End using Heat Transfer technology in the order to decrease the using of energy from electricity. These studies include the proper of technology using, the worth wholeness in economic way caused from Shell and Tube heat exchanger, Plate heat exchanger and Economizer heat exchanger, the use these information to consider with Rockwool insulation, Fiber Glass insulation and Calcium Silicate insulation and Heat pipe. The study found that Economizer heat exchanger is proper to use and protect back pressure to the system, the effective of heat exchanger is 65 percents with using Calcium Silicate insulation and Heat pipe schedule 40 which the cost for maintenance is 50,000 baht per year and it decrease the using electricity equal to 2,436,377 baht per year.



ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋อง
มาใช้ในการอบฝักกระป๋องด้วยเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อน

ของ
มนตรี มีคำนิล

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย สันติวัฒนกุล)
วันที่ เดือน พ.ศ. 25.....

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์) (อาจารย์ ดร.อาจรี ศุภสุธิกุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จัตรชัย นิยมล)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติ สถาพรประสารณ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ช่วยกรุณาให้แนวคิดตลอดจน ข้อเสนอแนะและช่วยแนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทำปริญญานิพนธ์ครั้งนี้ จนสำเร็จสมบูรณ์ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อาจารี ศุภสุธีกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย นิยมมล ซึ่งเป็นคณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.วิซชากร จารุศิริ ที่ให้คำปรึกษาและ ชี้แนะข้อมูลในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี และช่วยให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์จนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท รอยัลแคนธินดัสทรีส์ ที่ให้ความเอื้อเฟื้อทั้งทางด้านสถานที่และข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่างๆ ในการศึกษาปริญญานิพนธ์ครั้งนี้อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไฮเอ็นสแตนดาร์ด จำกัด ที่ให้ความเอื้อเฟื้อทางด้านข้อมูลของเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีโคโนไมเซอร์ ในการศึกษาปริญญานิพนธ์ครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ผู้วิจัย ผู้เขียนตำราวิชาการทุกท่าน ในบทบรรณานุกรมที่เป็นแหล่งข้อมูล และให้ความรู้ทางด้านทฤษฎีอันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาในครั้งนี้เป็นอย่างดี

ท้ายที่สุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้การสนับสนุนและเป็น กำลังใจที่ดียิ่งแก่ผู้วิจัย ตลอดจนเพื่อนๆ ร่วมชั้น ปริญญาโท สาขาการจัดการทางวิศวกรรม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่าน ที่ให้การช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา

มนตรี มีคำนิล

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
กรอบแนวคิดการวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	 5
กระบวนการผลิตกระป๋อง.....	5
การนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่.....	10
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	16
ฉนวนกันความร้อน.....	18
ท่อส่งความร้อน.....	23
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	 33
ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย.....	33
ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย.....	34
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	35
การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	38
การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์และวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
 4 ผลดำเนินการวิจัย.....	 45
การคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการของเครื่องอบฝากระป๋อง..	45
การคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่เกิดจากความร้อนเหลือทิ้ง	
ของเครื่องเคลือบผิวกระป๋อง.....	46
การวิเคราะห์คุณสมบัติของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม	
กับโครงการ.....	47
การวิเคราะห์คุณสมบัติของชนิดของฉนวนที่เหมาะสมกับโครงการ.....	49
การวิเคราะห์คุณสมบัติของขนาดท่อที่ใช้กับโครงการ.....	50

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 (ต่อ)	
การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายของระบบการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ ในการอบผลิตภัณฑ์.....	59
การวิเคราะห์ด้านการเงิน.....	60
การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ.....	62
การวิเคราะห์มูลค่าการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	66
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	68
สรุปผลการวิจัย.....	68
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยระดับต่อไป.....	69
บรรณานุกรม	70
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก	75
ภาคผนวก ข	87
ภาคผนวก ค	92
ภาคผนวก ง	94
ภาคผนวก จ	98
ประวัติย่อผู้วิจัย	101

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ลักษณะสมบัติของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละชนิด.....	14
2 เปรียบเทียบความยากง่ายในการตรวจสอบและบำรุงรักษา.....	15
3 คุณสมบัติของฉนวนเคลือบซีเมนต์.....	23
4 การเติมโลหะเพื่อเพิ่มคุณสมบัติท่อเหล็กคาร์บอน.....	24
5 ขนาดความโตในและความดันสูงสุดของท่อ.....	26
6 รายละเอียดความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋อง.....	36
7 ตัวแปรในการคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการกำเนิดความร้อน เพื่ออบฝากระป๋อง.....	37
8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	47
9 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนกันความร้อน.....	49
10 การวิเคราะห์ขนาดท่อที่ใช้ในโครงการจากการหาค่าความสูญเสียหลัก.....	50
11 การวิเคราะห์ขนาดท่อที่ใช้ในโครงการจากการหาค่าความสูญเสียรอง ของข้อต่อสามทาง.....	52
12 การวิเคราะห์ขนาดท่อที่ใช้ในโครงการจากการหาค่าความสูญเสียรอง ของข้อต่อ.....	54
13 การวิเคราะห์ขนาดท่อที่ใช้ในโครงการจากการหาค่าความสูญเสียรอง ของข้อต่อลดขนาดมุม 30 องศา.....	54
14 ขนาดพัดลมที่ใช้ในโครงการ.....	58
15 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโครงการ.....	59
16 ค่าใช้จ่ายรายปีของโครงการ.....	60
17 ผลการศึกษาความอ่อนไหวของโครงการ กรณีที่ 1 ต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้น ร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่.....	62
18 ผลการศึกษาความอ่อนไหวของโครงการ กรณีที่ 2 ผลกำไรของโครงการลดลง ร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่.....	64

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 กรอบแนวคิดวิจัย.....	2
2 กระบวนการผลิตกระป๋องแบบ 3 ชั้น.....	6
3 กระบวนการผลิตกระป๋องแบบ 2 ชั้น โดยการปั๊มและรีดผนัง (DI).....	7
4 ฝากระป๋องแบบธรรมดา.....	8
5 ฝากระป๋องแบบเปิดง่าย.....	8
6 กระบวนอบฝากระป๋องแบบธรรมดา.....	9
7 กระบวนอบฝากระป๋องแบบเปิดง่าย.....	9
8 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น.....	12
9 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบถังและท่อ.....	12
10 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอีโคโนไมเซอร์.....	12
11 ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของหม้อไอน้ำเมื่อติดตั้งอีโคโนไมเซอร์.....	18
12 จนวนกันความร้อนชนิดใยแก้ว.....	20
13 จนวนกันความร้อนชนิดใยหิน.....	21
14 จนวนกันความร้อนชนิดเคลือบซิลิเกต.....	22
15 ขนาดท่อด้านนอกและด้านใน.....	26
16 บริษัทรอแยลแคน อินดัสทรี จำกัด.....	33
17 ตัวอย่างระบบการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ในการอบผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อน.....	35
18 เครื่องผิวกระป๋อง.....	36
19 เครื่องอบฝากระป๋อง.....	37
20 แผนผังอาคารเคลือบและอบฝากระป๋อง.....	38
21 วิธีการดำเนินงานโครงการ.....	40
22 ความดันสูญเสียรองจากการลดพื้นที่หน้าตัดท่อ.....	51
23 แผนภูมิแสดงขนาดท่อที่ใช้ในโครงการ.....	56
24 แผนภูมิแสดงการสูญเสียในท่อลมเนื่องจากความเสียดทาน.....	57
25 กราฟแสดงสมรรถนะของพัดลมแบบหมุนเหวี่ยงชนิดใบพัดโค้งหลัง.....	58
26 ค่าปัจจุบันสุทธิโครงการ กรณีที่ 1 ต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่.....	63
27 อัตราผลตอบแทนโครงการ กรณีที่ 1 ต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่.....	63

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
28 ระยะเวลาคืนทุนโครงการ กรณีที่ 1 ต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่.....	64
29 ค่าปัจจุบันสุทธิโครงการ กรณีที่ 2 ต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่.....	65
30 อัตราผลตอบแทนโครงการ กรณีที่ 2 ต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่.....	65
31 ระยะเวลาคืนทุนโครงการ กรณีที่ 2 ต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่.....	66



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นปัจจัยที่สำคัญในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของประชาชน และเป็นปัจจัยการผลิตที่สำคัญในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม ในปัจจุบันประเทศไทยมีแหล่งพลังงานเชิงพาณิชย์ภายในประเทศไม่มากพอต่อความต้องการทำให้ต้องมีการพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศ ดังนั้นเพื่อให้มั่นใจว่าในอนาคต เราจะมีพลังงานใช้กันอย่างพอเพียง แนวทางในการพัฒนาพลังงานของประเทศจึงต้องคำนึงถึงการใช้ทรัพยากรพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดให้มีการใช้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และต้องเป็นเชื้อเพลิงที่มีผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยที่สุด

ประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมากที่มีการปล่อยความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตต่างๆ โดยไม่ได้นำกลับมาใช้ใหม่ โดยปริมาณความร้อนเหลือทิ้งจำนวนมากนั้นเกิดจากหม้อไอน้ำ เตาเผาขยะ เตาอบ และเตาเผาเหล็ก เป็นต้น ซึ่งความร้อนเหล่านี้นั้นมีศักยภาพเพียงพอต่อการนำกลับมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นเพื่อเป็นการนำพลังงานที่มีอยู่ในระบบมาทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด การศึกษาศักยภาพของการนำความร้อนเหลือทิ้งดังกล่าวมาใช้ใหม่ก็ถือเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่จะช่วยลดการนำเข้าพลังงานและถือเป็นการใช้พลังงานได้อย่างคุ้มค่า

ความร้อนเหลือทิ้งเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งเกิดจากกระบวนการสันดาปเผาไหม้เชื้อเพลิงหรือปฏิกิริยาเคมีแล้วปล่อยสู่บรรยากาศ ซึ่งพลังงานส่วนนี้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำเพื่อการประหยัดพลังงานได้ วิธีการนำความร้อนนี้กลับคืนมาใช้ได้อย่างไร่นั้นขึ้นกับอุณหภูมิและปริมาณของก๊าซร้อนเหลือทิ้งและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ร่วมกัน

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาศักยภาพของการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องมาใช้ในการอบฝากระป๋อง ของบริษัท รอยัลแคน อินดัสทรี จำกัด ซึ่งเป็นหนึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยความร้อนเหลือทิ้งโดยไม่ได้มีการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยปริมาณความร้อนเหลือทิ้งนั้นเกิดจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องที่มีการใช้อุณหภูมิสูงถึง 1472 องศาฟาเรนไฮต์ ซึ่งจากกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการปล่อยความร้อนทิ้งสู่ภายนอกที่อุณหภูมิสูงถึง 752 องศาฟาเรนไฮต์ ในขณะที่กระบวนการอบฝากระป๋องมีการใช้ความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำจากเครื่องกำเนิดความร้อนด้วยไฟฟ้า ดังนั้นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องมาใช้ในการอบฝากระป๋อง จึงเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตความร้อนในการอบฝา และถือเป็นการใช้พลังงานที่มีอยู่ในกระบวนการผลิตได้คุ้มค่าและเกิดประโยชน์อย่างสูงสุดได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องมาใช้ในการอบฝากระป๋องด้วยเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมต่อโครงการของบริษัท รอยัลแคน อินดัสทรี จำกัด

1.2.2 ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องมาใช้ในการอบฝากระป๋องด้วยเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อนของบริษัท รอยัลแคน อินดัสทรี จำกัด

1.3 กรอบแนวคิดการวิจัย

จากภาพประกอบ 1 แสดงกรอบแนวคิดวิจัยของโครงการ โดยโรงงานมีการปล่อยความร้อนทิ้งอุณหภูมิสูงจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องในรูปของก๊าซร้อนที่ 752 องศาฟาเรนไฮต์ โดยไม่ได้มีการนำกลับไปใช้ประโยชน์ ในขณะที่กระบวนการอบฝากระป๋องมีการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่ 248 องศาฟาเรนไฮต์ โดยได้รับความร้อนจากอุปกรณ์กำเนิดความร้อนด้วยไฟฟ้า ดังนั้นหากสามารถนำความร้อนทั้งดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ได้ก็จะถือเป็นการลดการใช้พลังงานโดยรวมของโรงงานได้ ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องมาใช้ในกระบวนการอบฝากระป๋องแทนพลังงานความร้อนเดิมจากอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยคำนึงถึงเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม และความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของโครงการ



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดวิจัย

1.4 ขอบเขตวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องมาใช้ในการอบฝากระป๋องด้วยเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีขอบเขตวิจัยดังนี้

1.4.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการพิจารณาโครงการมี 3 แบบ คือ แบบเพลต (Plate) แบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube) และแบบอีโคโนไมเซอร์ (Economizer)

1.4.2 ฉนวนที่ใช้ในการพิจารณาโครงการมี 3 แบบ คือ แบบใยแก้ว แบบใยหิน และแบบแคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate)

1.4.3 ขนาดท่อที่ใช้ในโครงการเป็นขนาดท่อที่พิจารณาด้วยวิธีความเสียดทานเท่ากัน (Equal Friction)

1.4.4 ผลตอบแทนในการลงทุนที่ใช้ในการพิจารณาโครงการนี้มี 3 แบบ คือ ค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน และ ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ

1.4.5 การคำนวณพลังงานที่ได้จากเครื่องเคลือบกระป๋องคิดที่สภาวะการทำงานเต็มประสิทธิภาพ

1.4.6 การคำนวณพลังงานที่ได้จากเครื่องอบฝากระป๋องคิดที่สภาวะการทำงานเต็มประสิทธิภาพ

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.5.1 การทบทวนวรรณกรรม และศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องดังนี้

- ข้อมูลเบื้องต้นของบริษัท รอยัลแคน อินดัสทรี จำกัด
- ข้อมูลทางด้านเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อน
- ค่าความร้อนที่ได้จากกระบวนการ
- แนวทางการประมวลราคาที่ได้จากการดำเนินการ
- ต้นทุนที่ใช้ในการดำเนินการ
- ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

1.5.3 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณซึ่งมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องดังนี้

- มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ
- อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุนของโครงการ
- อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ
- การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ

1.5.4 สรุปผลการศึกษาและจัดทำรูปเล่ม

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถประเมินศักยภาพของการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องมาใช้ในการอบฝากระป๋องด้วยเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมต่อโครงการของบริษัท รอยัลแคน อินดัสทรี จำกัด ได้

1.6.2 สามารถประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องมาใช้ในการอบฝากระป๋องด้วยเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อนของบริษัท รอยัลแคน อินดัสทรี จำกัด ได้



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

- 2.1 กระบวนการผลิตกระป๋อง
- 2.2 หลักการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่
- 2.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
- 2.4 ฉนวนกันความร้อน
- 2.5 ท่อความร้อน
- 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตกระป๋อง

2.1.1 กระป๋อง คือบรรจุภัณฑ์ชนิดหนึ่งที่ทำจากแผ่นโลหะม้วนเข้าหากันเป็นทรงกระบอก ปิดผนึกด้วยแผ่นโลหะวงกลมทั้งสองด้านโดยไม่ให้สัมผัสอากาศ สิ่งที่ใช้บรรจุภายในมักเป็นอาหาร เพื่อวัตถุประสงค์หลักของการถนอมอาหารให้สามารถเก็บไว้ได้นาน และจำเป็นต้องใช้การตัดหรือการฉีกฝากระป๋องให้เปิดออกด้วยที่เปิดกระป๋อง ปัจจุบันสามารถผลิตกระป๋องซึ่งเปิดได้ง่ายด้วยมือโดยไม่ต้องใช้ที่เปิดแต่อย่างใด

คุณสมบัติ

- ทนทานต่อความร้อนและความดันสูงจึงสามารถเข้ากระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน (Sterilization) ได้
- มีความแข็งแรงทางกายภาพ ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ ไอน้ำ และแสงได้
- ช่วยเก็บรักษากลิ่นและรสของผลิตภัณฑ์
- สามารถหมุนเวียนกลับเข้ากระบวนการผลิตใหม่ได้

โลหะที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ มี 3 ชนิด คือ

1) เหล็กเคลือบดีบุก เป็นแผ่นเหล็กดำ (Black Plate) ที่มีความหนาแน่นระหว่าง 0.00049 ถึง 0.00164 ฟุต นำมาเคลือบผิวหน้าด้านเดียวหรือทั้งสองหน้าด้วยดีบุกเพื่อให้ทนทานต่อการผุกร่อนและไม่เป็นพิษ เป็นบรรจุภัณฑ์ที่แข็งแรง ป้องกันอันตรายจากสิ่งแวดล้อม และสภาวะอากาศ การลงทุนในการผลิตไม่สูงนักและไม่ซับซ้อนสามารถบรรจุอาหารได้ดีเนื่องจากสามารถปิดผนึกได้สนิทและฆ่าเชื้อได้ด้วยความร้อน ในแง่ของสิ่งแวดล้อมสามารถแยกออกจากขยะได้ง่ายโดยใช้แม่เหล็ก

2) แผ่นเหล็กไม่เคลือบดีบุก (Tin Free Steel หรือ TFS) เป็นแผ่นเหล็กดำ ที่นำมาเคลือบด้วยสารอื่นแทนดีบุก เพื่อลดต้นทุนการผลิต ในปัจจุบันมีการเคลือบอยู่ 3 แบบคือ

- เคลือบด้วยสารผสมฟอสเฟตและโครเมต เป็นฟิล์มบางๆ ใช้ทำกระป๋องบรรจุเบียร์ น้ำผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว และทำถังโลหะชนิดต่างๆ

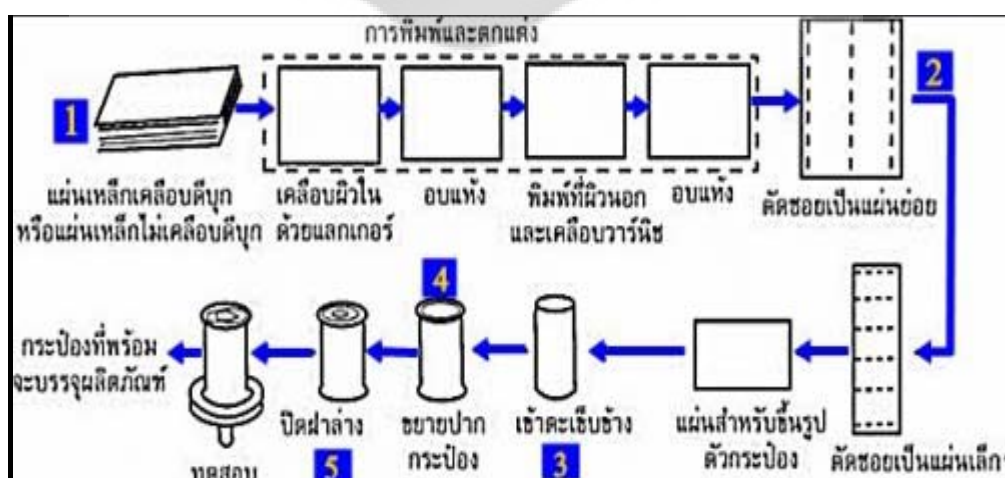
- เคลือบด้วยอะลูมิเนียม มีความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากความชื้นได้ดี แต่ไม่สามารถใช้กับอาหารที่มีความเป็นกรดหรือด่างสูง

- เคลือบด้วยโครเมียมและโครเมียมออกไซด์ เพื่อให้สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดี นิยมใช้ทำกระป๋องบรรจุอาหารทะเล นมข้นหวาน เป็นต้น

3) อะลูมิเนียม มักใช้ในรูปอะลูมิเนียมเปลว คุณสมบัติเด่นคือ น้ำหนักเบา ทนทานต่อการกัดกร่อนสูง ทนต่อการซึมผ่านของอากาศ ก๊าซ แสง และกลิ่นรสได้ดีเยี่ยม นิยมใช้ทำกระป๋อง 2 ชั้น (2 Piece Can) สำหรับบรรจุน้ำอัดลมและเบียร์ กระป๋องฉีดพ่น (Aerosol) สำหรับบรรจุสเปรย์ฉีดพ่นหรือเครื่องสำอางต่างๆ และฝาชนิดที่มีห่วงเพื่อให้เปิดง่าย เช่น ฝากระป๋องน้ำอัดลมหรือขวดน้ำดื่ม ในรูปของอะลูมิเนียมเปลวมักใช้ควบกับวัสดุอื่นซึ่งให้ภาพลักษณ์ที่ดีเนื่องจากความเงางามของอะลูมิเนียมสำหรับแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีหรือแผ่นเหล็กกัลวาไนซ์ (Galvanized Plate) ที่เรานิยมเรียกกันทั่วไปว่า “แผ่นสังกะสี” นั้นจะไม่ใช้ทำกระป๋องบรรจุอาหารอย่างเด็ดขาดเพราะมีโลหะหนัก พริกสังกะสีและตะกั่ว ซึ่งเป็นพิษต่อร่างกาย แต่ใช้กระป๋องและถังบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่อาหารได้ดี เนื่องจากมีราคาถูกกว่าแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก

2.1.2 กระบวนการผลิตกระป๋อง แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่คือ

1) กระป๋อง 3 ชั้น ประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ตัวกระป๋อง ฝาบน และก้นกระป๋อง มีตะเข็บข้างเกิดขึ้นแต่ก่อนนี้การเข้าตะเข็บข้างจะใช้ตะกั่วเป็นตัวบัดกรีเนื่องจากว่าตะกั่วที่ใช้ก่อนอันตรายแก่ผู้บริโภค ปัจจุบันจึงเข้าตะเข็บโดยเชื่อมด้วยไฟฟ้าแทน



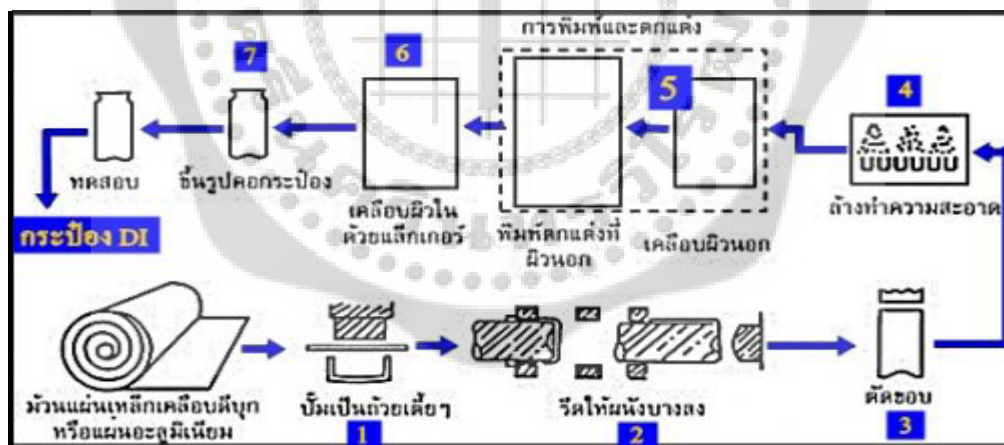
ภาพประกอบ 2 กระบวนการผลิตกระป๋องแบบ 3 ชั้น⁽¹⁾

2) กระป๋อง 2 ชั้น เป็นกระป๋องไร้ตะเข็บข้าง มีตัวกระป๋องและฝาล่างเป็นชั้นเดียวกัน และมีฝาด้านบนอีกชั้นหนึ่งที่จะถูกปิดโดยผู้ผลิตอาหารกระป๋อง หลังจากบรรจุอาหารในกระป๋องแล้ว จัดเป็นภาชนะบรรจุปิดสนิท (Hermetically Sealed Containers) ที่มีความแข็งแรง ทนต่อความร้อน และความดันระหว่างการแปรรูปด้วยความร้อน (Thermal Processing) ในหม้อฆ่าเชื้อ (Retort) โดยวิธีการขึ้นรูปกระป๋อง 2 ชั้น มี 3 วิธีการ คือ

- กระป๋องขึ้นรูปโดยการปั๊มครั้งเดียว (Drawn can) เป็นกระป๋องที่เกิดขึ้นจากการปั๊มขึ้นรูปครั้งเดียวก็ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงตามต้องการ

- กระป๋องขึ้นรูปโดยการปั๊ม 2 ครั้ง (Drawn and Redrawn can หรือ DRD can) โดยปั๊มครั้งแรกจะขึ้นรูปเป็นถ้วยเตี้ยก่อน หลังจากนั้นจะปั๊มอีกครั้ง เพื่อให้เส้นผ่าศูนย์กลางของกระป๋องเล็กลงและความสูงมากขึ้นตามต้องการ กระป๋อง 2 ชั้นที่ผลิตโดยวิธีนี้จะมีความหนาเท่ากันตลอดทั้งตัว และกันกระป๋องสามารถทนความดันและสุญญากาศในกระป๋องได้

- กระป๋องขึ้นรูปโดยการปั๊มและรีดผนัง (Drawn and Wall Ironed can หรือ DI can) โดยปั๊มครั้งแรก จะได้ถ้วยที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับกระป๋องที่ต้องการ หลังจากนั้นผนังกระป๋องจะถูกรีดให้เบาลง และกระป๋องมีความสูงเพิ่มขึ้น กระป๋องประเภทนี้ตัวกระป๋องมีผนังบางกว่ากันกระป๋อง สามารถทนความดันได้ แต่ทนสุญญากาศภายในกระป๋องไม่ได้ จึงนิยมใช้บรรจุเบียร์และน้ำอัดลม



ภาพประกอบ 3 กระบวนการผลิตกระป๋อง 2 ชั้นโดยการปั๊มและรีดผนัง (DI)⁽¹⁾

2.1.3 กระบวนการอบฝากะป๋อง มี 2 ประเภท คือ

1) ฝาแบบธรรมดา (Normal End)



(2)
ภาพประกอบ 4 ฝากระป๋องแบบธรรมดา

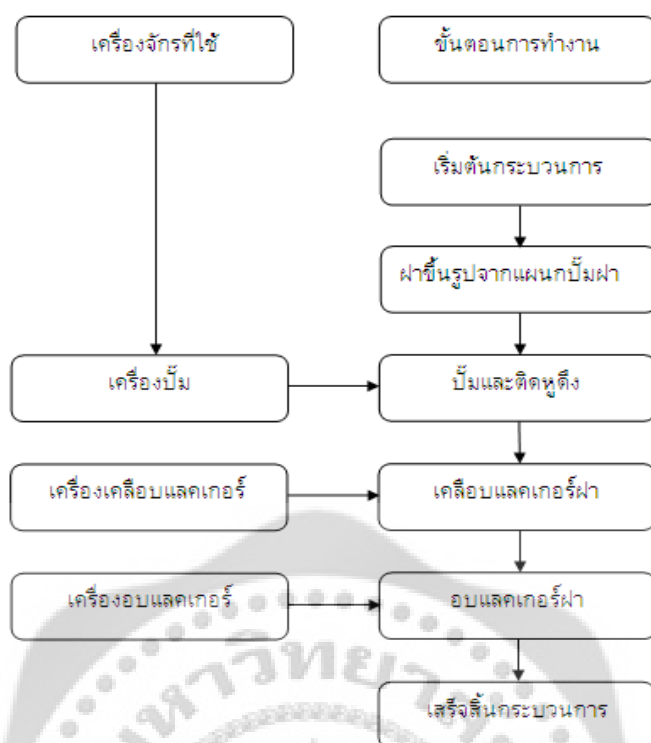
จากภาพประกอบ 6 หลังจากที่มีการผลิตขึ้นรูปฝาจากแผ่นปัมฝาเรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อมาคือการนำฝามาเคลือบแลคเกอร์เพื่อป้องกันการการสัมผัสกับอาหารโดยตรง และป้องกันการกัดกร่อนของฝา หลังจากทำการเคลือบฝาด้วยแลคเกอร์แล้วก็นำมาสู่กระบวนการทำการอบฝาให้แห้ง เพื่อเตรียมบรรจุหีบห่อในกระบวนการต่อไป

2) ฝาแบบเปิดง่าย (Easy Open End)

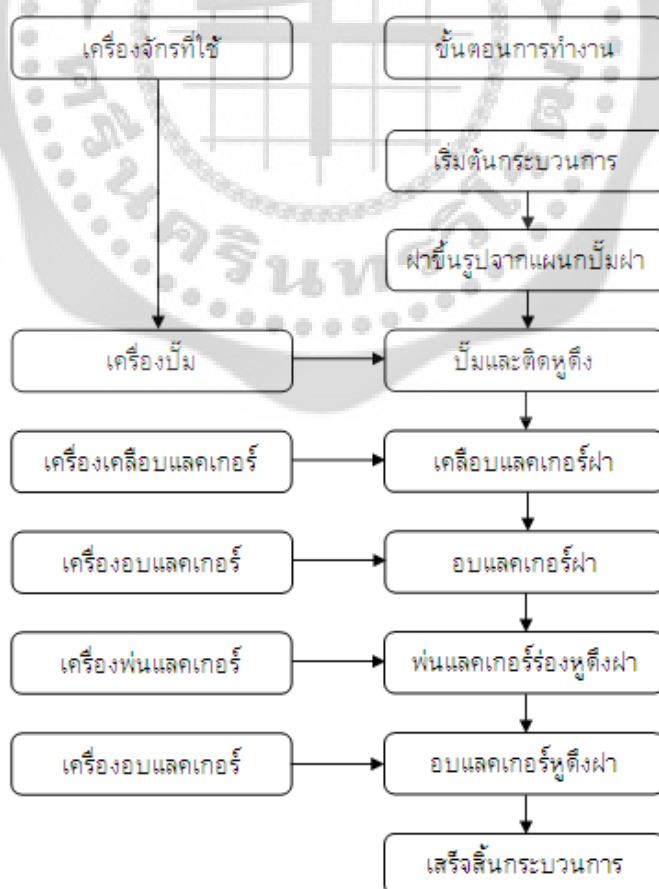


(2)
ภาพประกอบ 5 ฝากระป๋องแบบเปิดง่าย

จากภาพประกอบ 7 หลังจากที่มีการผลิตขึ้นรูปฝาจากแผ่นปัมฝาเรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อมาคือการนำฝามาตีดหุติง จากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการเคลือบแลคเกอร์ฝาดเพื่อป้องกันการการสัมผัสกับอาหารโดยตรง และป้องกันการกัดกร่อนของฝา หลังจากทำการเคลือบฝาด้วยแลคเกอร์แล้วก็นำมาสู่กระบวนการทำการอบฝาให้แห้ง กระบวนการต่อมาคือการนำฝามาพ่นแลคเกอร์ตรงร่องหุติงฝาด จากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการอบฝาดอีกรอบให้แห้ง เพื่อเตรียมบรรจุหีบห่อในกระบวนการต่อไป



ภาพประกอบ 6 กระบวนการอบฝากระป๋องแบบธรรมดา



ภาพประกอบ 7 กระบวนการอบฝากระป๋องแบบเปิดง่าย

2.2 การนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่

โรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานความร้อน มักจะมีความร้อนที่ใช้ไม่หมด แล้วปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ดังนั้น โรงงานควรสำรวจแหล่งของความร้อนที่ปล่อยทิ้ง แล้วหาแนวทางนำกลับมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนการใช้พลังงานความร้อนลดต่ำลง ความร้อนเหลือทิ้งคือพลังงานความร้อนที่ปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศหลังจากผ่านการใช้ประโยชน์แล้วซึ่งอาจอยู่ในรูปของ อากาศ ก๊าซ น้ำ หรือของเหลวอื่นๆ ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศ

2.2.1 ประเภทของความร้อนเหลือทิ้ง

ความร้อนเหลือทิ้งมีคุณภาพแตกต่างกันโดยอุณหภูมิเป็นตัวบอกประเภทและคุณภาพของความร้อนเหลือทิ้งซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้

1) ความร้อนเหลือทิ้งคุณภาพสูง จะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 1112 ถึง 2912 องศาฟาเรนไฮต์ โดยทั่วไปจะเป็นความร้อนทิ้งในรูปก๊าซไอเสียจากเตาเผา ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้ระบบผลิตกำลัง (Power Generation) ระบบผลิตกำลังและความร้อนร่วม (Cogeneration) หรือนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตโดยตรง

2) ความร้อนเหลือทิ้งคุณภาพปานกลาง จะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 392 ถึง 1112 องศาฟาเรนไฮต์ โดยทั่วไปจะเป็นความร้อนทิ้งในรูปก๊าซไอเสียจากหม้อไอน้ำ กังหันก๊าซ เครื่องยนต์ หรือเตาขึ้นรูปโลหะ ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำความดันปานกลางหรือนำไปใช้ในกระบวนการผลิตโดยตรง

3) ความร้อนเหลือทิ้งคุณภาพต่ำ จะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 95 ถึง 392 องศาฟาเรนไฮต์ โดยทั่วไปจะเป็นความร้อนทิ้งในรูปคอนเดนเสท น้ำและของเหลวที่ใช้ระบายความร้อน และอากาศระบายความร้อน ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้ในการให้ความร้อนขั้นต้น เช่น อุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ อุ่นของเหลว อุ่นอากาศ และทำน้ำร้อน หรือนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตโดยตรง

2.2.2 รูปแบบการนำความร้อนเหลือทิ้งไปใช้

รูปแบบของการนำความร้อนเหลือทิ้งไปใช้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) นำไปใช้โดยตรง (Direct Heating) โดยการสัมผัสกับวัสดุอุปกรณ์โดยตรง หรือผสมคลุกเคล้ากับอากาศ ก๊าซ หรือของเหลวที่ต้องการให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงความสะอาด

2) นำไปใช้โดยอ้อม (Indirect Heating) โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เช่น ก๊าซกับก๊าซ ของเหลวกับก๊าซ หรือของเหลวกับของเหลว ดังนั้นปริมาณความร้อนที่นำกลับมาใช้ประโยชน์จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

2.2.3 แนวทางการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่

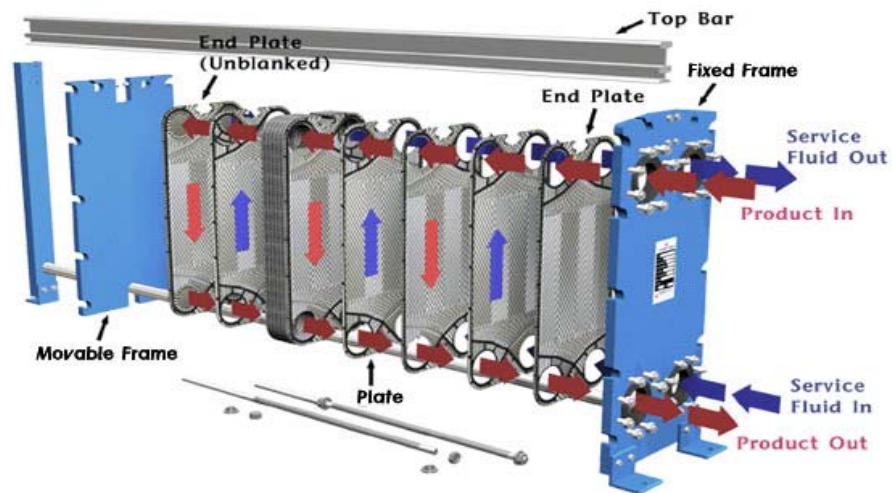
แนวทางการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ สามารถสรุปได้ดังนี้

1) แนวทางการนำความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซไอเสียกลับมาใช้ใหม่ ก๊าซไอเสียที่ปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำหรือเตาเผา ถือเป็นการสูญเสียความร้อนในปริมาณมาก คือประมาณ 10 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นควรนำกลับมาใช้ประโยชน์ในแนวทางดังต่อไปนี้

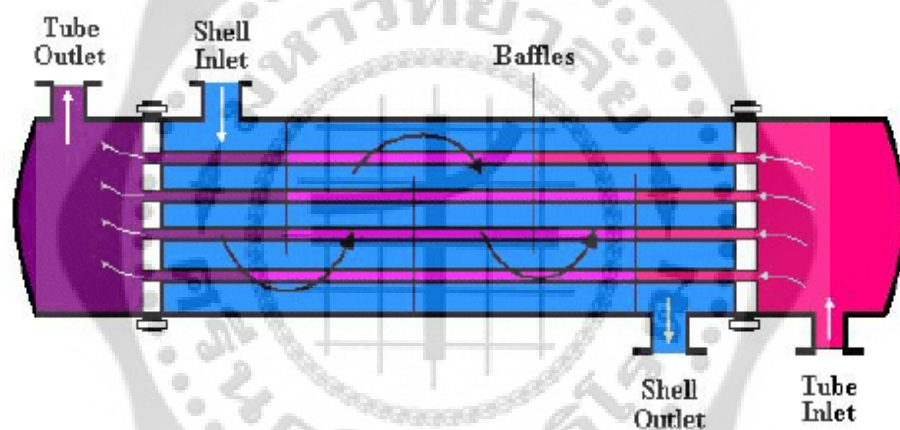
- นำมาใช้อุ่นอากาศก่อนเข้าเผาไหม้
- นำมาใช้ผลิตไอน้ำ
- นำมาใช้อุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ
- นำมาอุ่นชิ้นงานก่อนเข้าเตาเผา
- นำไปใช้ในการอบแห้ง

2) ข้อพิจารณาในการนำก๊าซไอเสียปล่อยทิ้งกลับมาใช้ การนำก๊าซไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ จะนำมาใช้โดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นโลหะที่สามารถทนต่ออุณหภูมิก๊าซไอเสียนั้นได้ ถ้าก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิสูงมากอาจใช้เซรามิกส์แต่ราคาจะสูงมาก นอกจากนี้การนำความร้อนจากก๊าซไอเสียกลับมาใช้ ควรคำนึงถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point) ของกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ซึ่งเกิดจากเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของกำมะถัน ส่วนเชื้อเพลิงที่ไม่มีองค์ประกอบของกำมะถันสามารถนำก๊าซไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ได้เต็มที่ ในการคำนวณจะใช้อุณหภูมิต่ำสุดของก๊าซไอเสียหลังจากนำกลับมาใช้ประโยชน์แล้วไม่ต่ำกว่า 356 องศาฟาเรนไฮต์ และประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อน 60 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นปริมาณความร้อนที่สามารถนำกลับมาใช้ได้อย่างขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิของก๊าซไอเสียและขนาดพิกัดของเตาที่ใช้งานด้วย

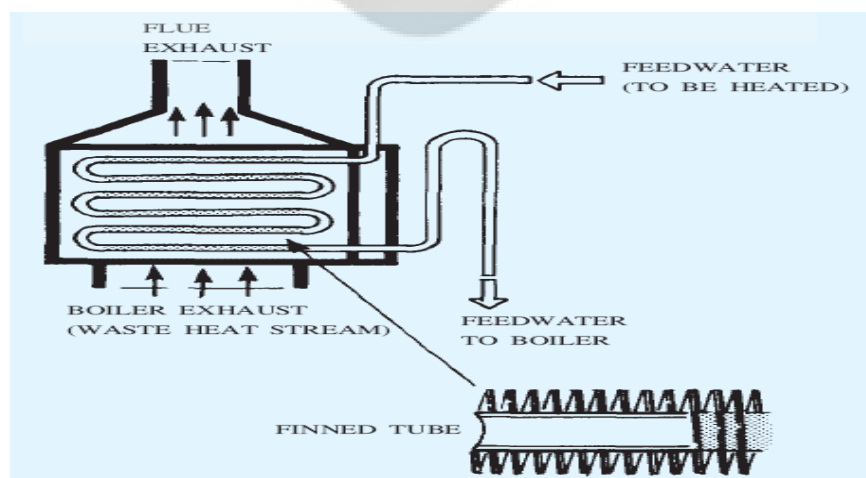
3) แนวทางการนำความร้อนเหลือทิ้งจากน้ำร้อนหรือของเหลวร้อนกลับมาใช้ใหม่ น้ำหรือของเหลวที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ ถือว่าเป็นของเหลวที่มีพลังงานอยู่ภายใน ซึ่งถ้าของเหลวนั้นสะอาด เช่น น้ำคอนเดนเสท หรือน้ำระบายความร้อนในกระบวนการผลิต ก็ควรนำกลับมาใช้โดยตรงกับหม้อไอน้ำหรือนำมาผลิตไอน้ำแฟลชเพื่อนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิต แต่ถ้าของเหลวนั้นสกปรก เช่น น้ำร้อนในกระบวนการฟอกย้อม น้ำระบายของหม้อไอน้ำ หรือน้ำร้อนในกระบวนการผลิตการนำกลับจะต้องใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เช่น การนำความร้อนเหลือทิ้งจากน้ำย้อมกลับมาใช้อุ่นน้ำก่อนเข้า เครื่องย้อม หรือนำน้ำระบายที่มีความดันสูงมาผลิตไอน้ำแฟลชเพื่อนำไปอุ่น น้ำป้อนหม้อไอน้ำประเภทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้โดยทั่วไป มักจะเป็นแบบเพลต (Plate Heat Exchanger) (ภาพประกอบ 8) แบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube Heat Exchanger) (ภาพประกอบ 9) และแบบอีโคโนไมเซอร์ (Economizer) (ภาพประกอบ 10) ซึ่งมักจะเป็นแบบไหลสวนทางกันเพราะมีประสิทธิภาพสูงกว่า



ภาพประกอบ 8 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (3)



ภาพประกอบ 9 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบถังและท่อ (4)



ภาพประกอบ 10 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอีโคโนไมเซอร์ (5)

4) ข้อพิจารณาในการนำน้ำร้อนหรือของเหลวร้อนกลับมาใช้ น้ำร้อนหรือของเหลวร้อนถือเป็นแหล่งพลังงานคุณภาพต่ำ ดังนั้นความคุ้มค่าในการลงทุนและเสถียรภาพในการนำกลับมาใช้ถือว่าเป็นสิ่งที่สำคัญ จึงควรพิจารณาในประเด็นต่อไปนี้คือ ความต่อเนื่องของความร้อนที่ปล่อยทิ้ง ระดับอุณหภูมิของของเหลวที่ปล่อยทิ้ง ปริมาณความร้อนที่ปล่อยทิ้ง ความสะอาดและจุดที่มีจะนำกลับมาใช้ประโยชน์

5) แนวทางการนำความร้อนเหลือทิ้งจากอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ อากาศร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ ถือว่าเป็นอากาศที่มีพลังงานอยู่ภายใน ดังนั้นควรหาแนวทางนำกลับมาใช้ ซึ่งถ้าอากาศนั้นสะอาดก็ควรนำกลับมาใช้ประโยชน์โดยตรงในกระบวนการเดิมหรือกระบวนการใหม่ แต่ถ้าอากาศนั้นสกปรก เช่น มีฝุ่นละอองหรือมีสิ่งเจือปน การนำกลับมาใช้ประโยชน์ เช่น การนำมาใช้อบวัตถุดิบต้องใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยทั่วไปมักจะเป็นแบบวงล้อความร้อน (Heat Wheel) ท่อความร้อน (Heat Pipe) และแบบขดความร้อน (Heat Coil) อากาศร้อนทั้งมักเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น การอบแห้งผักผลไม้ อบแห้งผ้า อบแห้งสี รวมทั้งความร้อนที่เกิดขึ้นจากการระบายความร้อนอุปกรณ์ต่างๆ เช่น จากเครื่องอัดอากาศ และระบบทำความเย็นและปรับอากาศ

6) ข้อพิจารณาในการนำอากาศร้อนปล่อยทิ้งกลับมาใช้ พิจารณาความคุ้มค่าในการลงทุนและเสถียรภาพในการนำกลับมาใช้ เช่น ความต่อเนื่องของความร้อนที่ปล่อยทิ้ง อุณหภูมิของอากาศร้อน ปริมาณความร้อน ความสะอาดและจุดที่จะนำกลับไปใช้ประโยชน์

2.2.4 การเลือกใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้เหมาะสมกับงาน

อุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดในการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ก็คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีให้เลือกใช้อย่างมากมายหลากหลายชนิด โดยทั่วไปปัจจัยที่พิจารณาได้แก่ ภาระทางความร้อน สมบัติของของไหล ความดัน อุณหภูมิทำงานเงื่อนไขเกี่ยวกับการบำรุงรักษาและราคา

ตาราง 1 ลักษณะสมบัติของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละชนิด⁽⁶⁾

ชนิด	ความดัน สูงสุด (บาร์)	อุณหภูมิ (องศาฟา เรนไฮต์)	ข้อจำกัด ของของไหล	พื้นที่ แลกเปลี่ยน ความร้อน (ตารางฟุต)	ข้อสังเกต
ถังและท่อ	307	-328 ถึง 1,112	ขึ้นอยู่กับวัสดุ ที่ใช้	107 ถึง 10,763	มีความยืดหยุ่น ใช้ได้ทุกประเภท
ท่อ 2 ชั้น	>307(ถัง) >1400(ท่อ)	-148 ถึง 1,112	ขึ้นอยู่กับวัสดุ ที่ใช้	2.7 ถึง 2,152	เหมาะกับขนาด ความจุต่ำ มีการ สร้างแบบโมดูล
ก๊าซสู่ก๊าซ	เปลือกกลี บรยากาศ ท่อสูงขึ้น	482	เป็นก๊าซ ตามปกติเป็น ก๊าซไอเสีย	64 ถึง 1,076 แบบเหล็กหล่อ 12,916 ถึง 32,291	มีแบบให้เลือก มาก ขึ้นกับสภาพ การกัดกร่อนของ ก๊าซ
ระบาย ความร้อน ด้วย อากาศ	สูงทางด้าน ท่อ	สูงทาง ด้านท่อ	ขึ้นกับวัสดุที่ ใช้	53 ถึง 2,152	มีการกำหนดแบบ เป็นมาตรฐาน
แผ่นเพลต	25	-13 ถึง 347	ไม่เหมาะกับ ก๊าซหรือของ ไหลสองเฟส	10.7 ถึง 12,916	มีโครงสร้างเป็น แบบโมดูล เป็น แบบประหยัดสุด
โรตารีเจน เนอเร เตอร์	ใกล้ความดัน บรรยากาศ	1,796	ก๊าซความดัน ต่ำ	-	มีการรบกวนกัน ของของไหล

ตาราง 2 เปรียบเทียบความยากง่ายในการตรวจสอบและบำรุงรักษา⁽⁶⁾

รายการตรวจสอบและบำรุงรักษา	ชนิดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน		
	แบบแผ่น	แบบแผ่นม้วน	แบบถังและท่อ
การตรวจหาความสกปรก			
ด้านใดด้านหนึ่ง	ทำได้ง่าย	ทำพอได้	ทำพอได้
ทั้งสองด้าน	ทำได้ง่าย	ทำพอได้/ทำได้ยาก	ทำพอได้/ทำได้ยาก
การตรวจหารอยรั่วซึม			
ด้านใดด้านหนึ่ง	ทำพอได้	ทำได้ง่าย/พอทำได้	ทำได้ง่าย
ทั้งสองด้าน	ทำพอได้	ทำได้ง่าย/พอทำได้	ทำได้ง่าย
การตรวจหาการกัดกร่อน			
ด้านใดด้านหนึ่ง	ทำได้ง่าย	ทำได้ง่าย/ทำไม่ได้	พอทำได้
ทั้งสองด้าน	ทำได้ง่าย	พอทำได้/ทำได้ยาก	พอทำได้/ทำได้ยาก
การทำความสะอาดทางเคมี			
ด้านใดด้านหนึ่ง	ทำได้ง่าย	ทำได้ง่าย	พอทำได้
ทั้งสองด้าน	ทำได้ง่าย	ทำได้ง่าย	พอทำได้/ทำไม่ได้
การทำความสะอาดทางกล			
ด้านใดด้านหนึ่ง	ทำได้ง่าย	พอทำได้/ทำไม่ได้	พอทำได้
ทั้งสองด้าน	ทำได้ง่าย	พอทำได้/ทำได้ยาก	พอทำได้/ทำได้ยาก

1) แนวทางการตรวจวินิจฉัยและบำรุงรักษาเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

แนวทางในการตรวจวินิจฉัย เพื่อหาศักยภาพในการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ ควรคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เหล่านี้

- ประเภทของความร้อนเหลือทิ้ง
- อุณหภูมิที่ปล่อยทิ้ง
- ระยะเวลาในการปล่อยต่อวัน
- ปริมาณความร้อนเหลือทิ้งต่อวัน
- ความสะอาดของความร้อนที่ปล่อยทิ้ง
- ความสามารถในการนำกลับไปใช้ได้โดยตรง
- ความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น

2.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

โรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานความร้อน มักจะมีความร้อนที่ใช้ไม่หมด แล้วปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ดังนั้น โรงงานควรสำรวจแหล่งของความร้อนที่ปล่อยทิ้ง แล้วหาแนวทางนำกลับมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนการใช้พลังงานความร้อนลดต่ำลง ความร้อนเหลือทิ้งคือพลังงานความร้อนที่ปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศหลังจากผ่านการใช้ประโยชน์แล้วซึ่งอาจอยู่ในรูปของ อากาศ ก๊าซ น้ำ หรือของเหลวอื่นๆ ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศ

2.3.1 ประเภทของการแลกเปลี่ยนความร้อน⁽⁷⁾

การแบ่งประเภทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม สามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ แบ่งตามสภาวะของของไหลที่ใช้ และแบ่งตามลักษณะการใช้งาน ดังนี้คือ

1) การแบ่งตามสภาวะของไหลที่ใช้

- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลวกับของเหลว เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของของไหลทั้ง 2 ชนิด เช่น น้ำมันกันหอกกลั่นและน้ำมันดิบที่ป้อนเข้าหอกกลั่น เป็นต้น

- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลวกับของเหลว ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของของไหลทั้ง 2 ชนิด โดยของเหลวชนิดหนึ่งจะเปลี่ยนสภาวะเป็นก๊าซหรือระเหยเป็นไอในระหว่างแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น เครื่องต้มซ้ำ (Reboiler) ของหอกกลั่นน้ำมัน ซึ่งใช้น้ำมันอุณหภูมิสูงเป็นแหล่งความร้อน

- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลว ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ เช่น หม้อไอน้ำแบบท่อ ซึ่งระเหยน้ำให้เป็นไอน้ำด้วยก๊าซสันดาป และเครื่องควบแน่น ซึ่งควบแน่นไอให้เป็นของเหลวด้วยน้ำระบายความร้อน

2) การแบ่งประเภทตามจุดประสงค์การใช้งาน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถแบ่งตามประเภทจุดประสงค์การใช้งานหรือลักษณะการใช้งานนั้น ได้แก่

- เครื่องระเหย (Evaporator) หรือหม้อเคี่ยว (Concentrator) การใช้งานคือการระเหยของเหลวให้เป็นไอเพื่อใช้ไอที่เกิดขึ้นให้เป็นประโยชน์หรือเพื่อให้ได้ของเหลวที่เข้มข้นมากขึ้น

- เครื่องอุ่น หรือเครื่องทำให้ร้อนล่วงหน้า (Preheater) จุดประสงค์ก็เพื่อทำให้ของไหลร้อนล่วงหน้า ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ โดยทั่วไปมักจะเรียกชื่อตามตำแหน่งข้างหน้าของการใช้งานหรือตามประเภทของของไหลที่ถูกอุ่นให้ร้อน เช่น เครื่องอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ (Boiler Feed Water Preheater) เป็นต้น

- เครื่องทำความร้อน (Heater) จุดประสงค์ก็เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับของไหลให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น
- เครื่องทำความร้อนยิ่งยวด (Superheater) เครื่องนี้จะทำหน้าที่เพิ่มความร้อนให้กับของไหลที่ถูกทำความร้อนมาแล้ว เพื่อที่จะให้อยู่ในสภาพร้อน
- เครื่องต้มซ้ำ (Reboiler) เครื่องนี้ทำหน้าที่ให้ความร้อนให้กับของเหลวเพื่อที่จะระเหยให้เป็นไออีกครั้ง
- เครื่องควบแน่น (Condenser) จุดประสงค์ที่สำคัญก็เพื่อควบไอน้ำให้กลายเป็นของเหลว เช่น เครื่องควบแน่นไอน้ำ
- เครื่องระบายความร้อน (Cooler) เครื่องนี้ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับของไหลเพื่อลดอุณหภูมิของของไหล
- เครื่องทำน้ำเย็น (Chillier) ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของของไหลให้ต่ำลงมาก โดยใช้สารทำความเย็น (Refrigeration) เช่น ฟรียอน แอมโมเนีย เป็นต้น

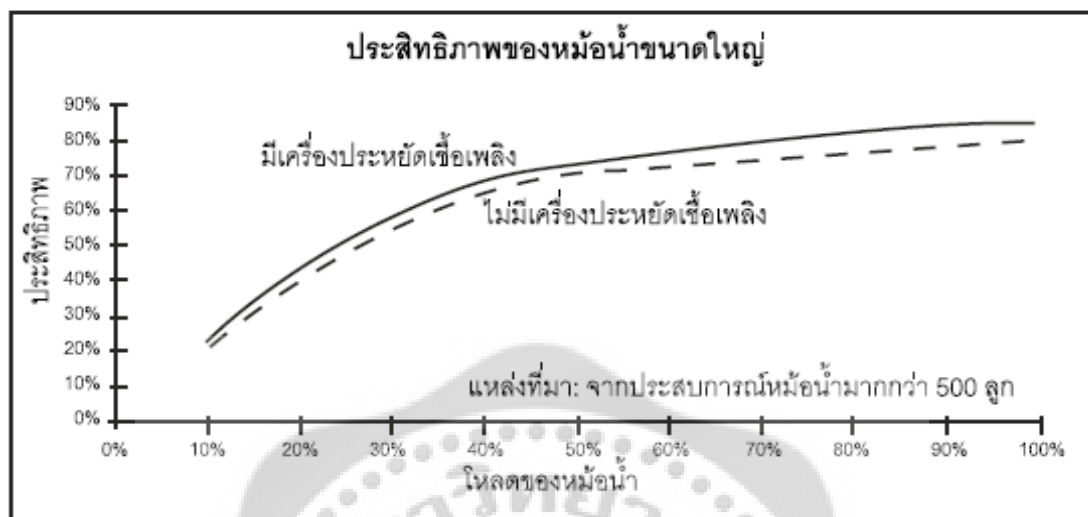
2.3.2 ชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่นิยมใช้งานกันทั่วๆ ไปได้แก่ ชนิดแผ่น ชนิดเปลือกและท่อ⁽⁸⁾ และชนิดค็อคอนโม่ไมเซอร์ โดยมักใช้แบบที่มีการไหลตัดกัน (Cross Flow Type) ถ้าการไหลของไหลทั้งสองไหลในทิศทางเดียวกันแสดงถือว่าเป็นการไหลแบบขนานกัน แต่ถ้าการไหลมีทิศทางตรงข้ามกันจะถือว่าเป็นการไหลแบบสวนทางกัน ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีทิศทางการไหลของของไหลตัดกัน ถ้าของไหลสามารถเคลื่อนที่ไปได้อย่างอิสระในระหว่างที่ไหลผ่านเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อน ลักษณะการไหลของของไหลนี้เรียกว่าเป็นการไหลผสมกัน (Mixed)⁽⁹⁾

2.3.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอีโคโนไมเซอร์

อีโคโนไมเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยรับความร้อนจากแหล่งความร้อน (ก๊าซทิ้งจากกระบวนการผลิตหรือหม้อไอน้ำ) และถ่ายเทให้กับน้ำที่ต้องใช้ในอุปกรณ์หรือกระบวนการผลิต สำหรับระบบหม้อไอน้ำนั้นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลวทำงานโดยรับความร้อนจากก๊าซไอเสียทิ้งจากหม้อไอน้ำโดยส่วนใหญ่และถ่ายเทให้กับน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำ การแลกเปลี่ยนความร้อนนี้อาศัยหลักการนำความร้อนและพาความร้อนผ่านตัวกลางวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง ท่อน้ำที่วิ่งเข้าสู่อีโคโนไมเซอร์จะมีลักษณะเป็นครีปและขดเป็นรูปตัวยูสลับกันไปมาดังภาพประกอบ 10 เพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลว โดยทั่วไปการนำความร้อนของก๊าซทิ้งจากหม้อไอน้ำไปใช้อุ่นน้ำป้อนจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ทุกๆ 71.6 องศาฟาเรนไฮต์ ของก๊าซที่สามารถดึงกลับมาได้หรือในทำนองเดียวกันสำหรับทุกๆ 42.8 องศาฟาเรนไฮต์ ที่เพิ่มขึ้นของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำจากอีโคโนไมเซอร์หรืออุณหภูมิของอากาศก่อนการสันดาปเพิ่มขึ้น

68 องศาฟาเรนไฮต์ จากการอุ่นอากาศจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ เซ็นกัน ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของหม้อไอน้ำเมื่อติดตั้งอีโคโนไมเซอร์⁽⁵⁾

ก๊าซร้อนทั้งออกจากหม้อไอน้ำจะมีอุณหภูมิประมาณ 392 ถึง 482 องศาฟาเรนไฮต์ ถ้ามีการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ที่รอบนอกปล่อง บางส่วนของความร้อนในก๊าซร้อนทั้งจะถูกนำกลับคืนมาเพื่ออุ่นน้ำป้อนหรือผลิตน้ำร้อนได้ ในทางปฏิบัติจริงต้องคำนวณการประหยัดออกมาเป็นกรณี ๆ ไป การประหยัดจะได้มากที่สุดก็ต่อเมื่ออุณหภูมิก๊าซร้อนทั้งสูงและไม่มีการเก็บคืนคอนเดนเสทกลับเข้าไปในหม้อไอน้ำหรือก็มีน้อยมาก

2.4 ฉนวนกันความร้อน (Insulation)

ฉนวนเป็นวัสดุที่นำมาใช้หุ้มท่อหรือภาชนะเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อการประหยัดพลังงานและเพื่อความปลอดภัยในการเลือกฉนวนมีองค์ประกอบที่พึงพิจารณา

1. ช่วงอุณหภูมิใช้งานที่ฉนวนใช้ได้โดยไม่เสียหายหรือเสื่อมคุณภาพ
2. ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่ต่ำจะลดการสูญเสียพลังงานได้ดีกว่า
3. กำลังการอัดบีบ (Compressive Strength) ควรเลือกที่ฉนวนไม่เสียรูปทรงมาก โดยเทียบจากปริมาณการเสียรูปทรงของฉนวนต่าง ๆ ที่ค่าเดียวกันว่ารับกำลังการอัดบีบได้เท่าไร
4. การทนต่อการติดไฟ

5. โครงสร้างเซลล์ซึ่งจะเป็นสิ่งกำหนดว่าฉนวนสามารถดูดซับความชื้นได้เท่าไร
6. รูปแบบของฉนวน กล่าวคือ ความหมายและรูปทรง ซึ่งจะเป็นสิ่งกำหนดว่าฉนวนมีความเหมาะสมกับการนำมาใช้งานหรือไม่

คุณสมบัติของฉนวนความร้อนที่ดี

ฉนวนความร้อนจะต้องเลือกใช้ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์กับงาน และตามชนิดของฉนวนซึ่งคุณสมบัติที่ได้นั้นพิจารณาได้ดังนี้

1. ควรมีน้ำหนักเบาและมีความหนาแน่นน้อย
2. มีค่าสภาพการนำความร้อนต่ำกล่าวคือยอมให้ความร้อนผ่านตัวฉนวนได้น้อยมาก
3. ในบางชนิดจะต้องมีความคงทนต่อแรงดึงและแรงอัดได้ดี
4. มีอัตราการดูดซับความชื้นที่ต่ำมากหรือไม่มีเลยจะดีมาก
5. สามารถต้านการกัดกร่อนได้ดีโดยเฉพาะทางเคมี
6. มีความคงตัวสูง เปลี่ยนรูปได้ยาก
7. ต้องทนต่อการติดไฟได้ดี
8. ใช้กับระดับอุณหภูมิที่กว้าง
9. ติดตั้งเพื่อใช้งานได้สะดวก
10. มีราคาถูก และหาซื้อได้ง่าย

ฉนวนกันความร้อนมีหลายชนิด ซึ่งในการวิจัยนี้จะกล่าวถึงฉนวน 3 ชนิดคือ ฉนวนใยแก้ว ฉนวนใยหิน และฉนวนแคลเซียมซิลิเกต

2.4.1 ฉนวนใยแก้ว

เป็นฉนวนที่ผลิตจากการหลอมแก้วแล้วปั่นออกมาเป็นเส้นใยละเอียดสีขาว แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นฉนวนกันความร้อนรูปแบบต่างๆ เช่น ฉนวนแบบคลุมห่ม (Blanket) ฉนวนแบบแผ่น (Board) และฉนวนแบบหุ้มท่อ (Pipe Cover) จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนเซลล์เปิด มีความหนาแน่นตั้งแต่ 0.62 ปอนด์ต่อตารางฟุต ถึงมากกว่า 4 ปอนด์ต่อตารางฟุต มีโครงสร้างภายในเป็นเส้นใยและช่องว่างอากาศ (Air Gap) ตัวเส้นใยจะถูกเคลือบด้วยตัวประสาน (Binder) เช่น ฟีนอลิกรีซิน ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมระหว่างเส้นใย ที่พบมากจะเป็นฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งจะให้สีเหลืองหลังการผลิต ตัวใยแก้วเป็นสารอนินทรีย์จึงไม่ติดไฟ แต่ตัวประสานจะติดไฟได้ ฉนวนประเภทนี้ นอกจาก จะกันความร้อนได้ มีค่าการกักไฟได้สูงถึง 572 องศาฟาเรนไฮต์แล้ว ยังกันเสียงได้อีกด้วย แต่ก็มีข้อเสียคือ ไม่ทนทานต่อความเปียกชื้นและการควบแน่นเป็นหยดน้ำ ซึ่งจะสูญเสียคุณสมบัติในการกันความร้อนเมื่อได้รับความเปียกชื้น โดยจะยุบตัวแบนติดกัน ทำให้ความสามารถในการต้านทานความร้อนลดลง จึงต้องมีแผ่นมาประกบเพื่อช่วยต้านทานไอน้ำ เช่นแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ หรือฟิล์มพลาสติกห่อหุ้มขณะใช้งานจริง หากคนที่แพ้เส้นใยสัมผัสหรือแตะถูกโดยตรง อาจเกิดอาการคัน

และระคายเคืองได้ และจากการที่เส้นใยแก้วมีขนาดเล็กและยาวทำให้มีคุณสมบัติในการคืนรูป คือคืนความหนาได้ดี จึงช่วยในการคืนสภาพของฉนวนจากการบรรจุและการขนส่งที่มักมีการบีบอัด การเก็บฉนวนใยแก้วโดยทั่วไปควรจัดเก็บในที่ปิดโล่ง เนื่องจากกลิ่นของตัวประสาน อย่างไรก็ตามฉนวนกันความร้อนที่ดี ที่มีประสิทธิภาพต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- การต้านทานความร้อน (Resistivity, R) สูง
- การนำความร้อน (Conductivity, K) ต่ำ
- ความจุความร้อน (Thermal Capacity) ต่ำ

ฉนวนใยแก้วเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการประหยัดพลังงาน โดยจะทำหน้าที่ป้องกันความร้อนจากภายนอกเข้าสู่อาคาร ทำให้เครื่องปรับอากาศทำงานน้อยลง จึงสามารถประหยัดพลังงานและลดภาระการทำงานของเครื่องปรับอากาศได้



ภาพประกอบ 12 ฉนวนกันความร้อนชนิดใยแก้ว (10)

กลไกการป้องกันความร้อนของฉนวนใยแก้วมีลักษณะดังนี้ คือ

1. การนำความร้อน เส้นใยแก้วมีค่าการนำความร้อนต่ำ และคดไปมา ทำให้เกิดการป้องกันการนำความร้อน
2. การพาความร้อน โพรงอากาศจำนวนมากภายในเนื้อฉนวน เป็นอากาศนิ่ง ทำหน้าที่สกัดกั้นการเคลื่อนที่ของความร้อน ทำให้เกิดการป้องกันการพาความร้อน
3. การแผ่รังสีความร้อน เนื่องจากเส้นใยของฉนวนอยู่ใกล้ชิดกัน ทำให้อุณหภูมิกว้างใกล้เคียงกัน

2.4.2 ฉนวนใยหิน

ฉนวนใยหิน มีทั้งชนิดแผ่น (Slab) ชนิดม้วน (Blanket) และชนิดท่อขึ้นรูป (Sectional Pipe Insulation) นิยมใช้เป็นฉนวนใต้หลังคา ระบบปรับอากาศ ผนังกันความร้อน กันไฟ ผนังกันเสียง (Curtain wall) สำหรับบ้านพักอาศัย อาคารสมัยใหม่ สำนักงาน โรงงาน และใช้กับงานฉนวนหุ้มท่อ เตาอบ ระบบนำความร้อนในงานอุตสาหกรรม โรงไฟฟ้า และโรงงานต่าง ๆ ที่ระบบการผลิตมีความร้อนสูง

ฉนวนใยหินจะใช้ห่อหุ้มอุปกรณ์ที่มีความร้อนสูง เพื่อไม่ให้สูญเสียพลังงานความร้อน และป้องกันอันตรายกับผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งอุณหภูมิที่ฉนวน ร้อยคลุมสามารถใช้ได้คือ ตั้งแต่ 33.8 องศาฟาเรนไฮต์ ถึง 1508 องศาฟาเรนไฮต์ โดยตัวฉนวนร้อยคลุมจะช่วยคงสภาพปกติ และรักษาอุณหภูมิของอุปกรณ์ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ

ฉนวนใยหินผลิตมาจากหินธรรมชาติ น้ำหนักเบา กันความร้อนได้สูง ดูดซับเสียงได้ดี ไม่ติดไฟ ไม่ลามไฟ กันน้ำได้ดี ไม่ดูดซับความชื้น ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะ ช่วยประหยัดพลังงานมีทั้งแบบแผ่นและแบบม้วนยาว ฉนวนใยหิน สามารถเลือกวัสดุปิดผิวหน้าฉนวนได้ตามต้องการ เช่น ปิดด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ หรือลวดตาข่าย เป็นต้น



ภาพประกอบ 13 ฉนวนกันความร้อนชนิดใยหิน⁽¹¹⁾

ฉนวนใยหิน สามารถใช้งานได้ทั้งงานอุณหภูมิสูงและต่ำขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานต้องการจะหุ้มฉนวนส่วนไหน หากงานที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตหรือพื้นที่เรียบกว้าง เช่น แทงค์ เก็บสารเคมี หม้อต้ม เตาอบ หรือบอยเลอร์ นั้นสามารถใช้ฉนวนใยหิน ได้ทั้งแบบแผ่น (Fibertex Board) หรือแบบม้วนยาว (Fibertex Blanket) ก็ได้ แต่หากเป็นอุปกรณ์ที่ไม่เป็น รูปทรงเรขาคณิตก็สามารถใช้ฉนวนใยหินที่มีลวดตาข่ายติดอยู่กับผิวฉนวน (Fibermesh) ได้เช่นกัน ซึ่งลวดตาข่ายนี้จะช่วยให้การยึดเกาะกันของผิวฉนวนแน่นมากขึ้นและลดการร่วงหล่นของแผ่นฉนวน จากการสั่นสะเทือนจากเครื่องจักรอื่นๆ ที่อยู่ข้างเคียง

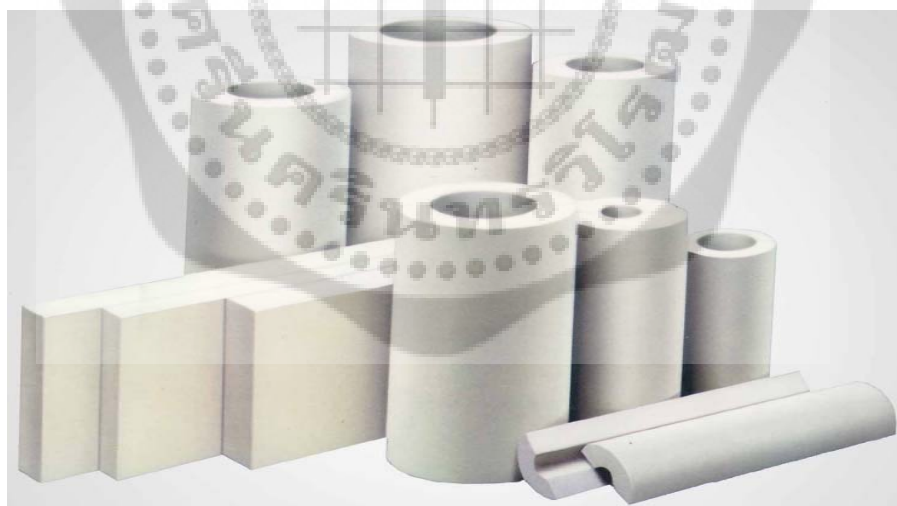
การใช้งานฉนวนใยหิน ขึ้นอยู่กับช่วงของอุณหภูมิและการประยุกต์ใช้งาน โดยปกติช่วงอุณหภูมิที่ฉนวนสามารถป้องกันความร้อนได้สูงสุดถึง 1508 องศาฟาเรนไฮต์ สามารถเลือกขนาดและรูปทรงของฉนวนได้อย่างเหมาะสมกับการใช้งาน

2.4.3 ฉนวนแคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate)

แคลเซียมซิลิเกตเป็นวัสดุฉนวนที่มีลักษณะพรุน ผลิตจากการนำทรายซิลิเซียสมาอบโดยเครื่องอบความร้อนสูงพลังไอน้ำจนเกิดเป็นปูนขาวไฮเดรตที่มีเส้นใยที่ละเอียดมากเป็นส่วนประกอบ ซึ่งมีคุณสมบัติไม่ทำให้เกิดการสันดาป ป้องกันไฟ ไม่มีสารพิษ ไม่ผสมแร่ใยหิน มีทั้งแบบเป็นเส้นใยแร่ และ เส้นใยสังเคราะห์

แคลเซียมซิลิเกตเกิดจากความร้อนค่อนข้างต่ำ ทำให้มีความสามารถในการปรับตั้งค่าในแต่ละอุณหภูมิได้รวดเร็วตามสภาพงาน ซึ่งมักจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละช่วงไม่เท่ากันเหมาะกับอุตสาหกรรมที่ใช้อุณหภูมิสูง เนื่องจากจะทำให้ประหยัดพลังงานได้มาก

แคลเซียมซิลิเกตประกอบด้วยไฮดรอกไซด์แคลเซียมซิลิเกต โดยระหว่างกรรมวิธีการผลิตไอน้ำเปลี่ยนจะรูปเป็นหินปูนและซิลิกาไปเป็นไฮดรอกไซด์แคลเซียมซิลิเกต ซึ่งเป็นวัสดุที่แข็งแรงทนทาน นิยมนำไปใช้ในการหุ้มท่อและภาชนะในกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิสูงและจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความทนต่อแรงอัดสูง



ภาพประกอบ 14 ฉนวนกันความร้อนชนิดแคลเซียมซิลิเกต (12)

(13)
ตาราง 3 คุณสมบัติของฉนวนแคลเซียมซิลิเกต

Term	Unit	ASTM C533	JIS A9510	Zhejiang ASK
Density	Kg/m ³	≤ 240	≤ 220	≤ 220
Maximum service temp.	°C	650	650	650
Thermal conductivity (93 °C)	W/m.k	≤ 0.065	≤ 0.062	≤ 0.060
Compressive	Mpa	≥ 0.688	≥ 0.45	≥ 0.688
Flexural strength	Mpa	≥ 0.344	≥ 0.30	≥ 0.35
Linear shrinkage	%	≤ 2.0	≤ 2.0	≤ 2.0
Mass loss by trunung	First 10 Minutes	≤ 20%		≤ 20%
Mass loss by trunung	Second 10 Minutes	≤ 40%		≤ 40%
Surface burning scharact eristics	Flame spread index	0		0
	Smoke density	0		0
Chlorine content		ASTM C795		ASTM C795

2.5 ท่อความร้อน (Heat Pipe)

ท่อที่ใช้งานทนความดันและอุณหภูมิ จะต้องมียุทธศาสตร์พิเศษ สำหรับท่อเหล็กจะต้องมีการผสมโลหะอื่นๆ เข้าไปด้วย เช่น โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) โมลิบดีนัม (Mo) และซิลิคอน (Si) พวกโลหะต่างๆ เหล่านี้เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ช่วยให้ท่อทนต่อการเสียดสี ทนต่อการกัดกร่อน และปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ทนต่อสภาพธรรมชาติ และมีความแข็งแรงแตกต่างกันไป

ตาราง 4 การเติมโลหะเพื่อเพิ่มคุณสมบัติท่อเหล็กคาร์บอน⁽¹⁴⁾

โลหะเติม	คุณสมบัติการใช้งาน
ไม่ได้เติม	เป็นท่อเหล็กคาร์บอนใช้งานทั่วไป ทนการกัดกร่อนไม่ได้ ใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกิน 1,000 องศาฟาเรนไฮต์
0.5% Mo	แข็งแรงมากกว่าท่อคาร์บอน แต่ทนการกัดกร่อนและปฏิกิริยาไม่ได้เหมือนท่อเหล็กคาร์บอน
0.5% Cr, 0.5% Mo	มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงดี ใช้งานกับท่ออุณหภูมิสูง
1.25% Cr, 0.5% Mo	มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงดี และทนการกัดกร่อนกว่า 0.5% Cr, 0.5% Mo
2.25% Cr, 1% Mo	มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงดี และทนการกัดกร่อนกว่า 1.25% Cr, 0.5% Mo
4-6% Cr, 0.5% Mo	มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงดี และทนการกัดกร่อนได้ดีเป็นพิเศษ
18% Cr, 8% Ni	เป็นเหล็กสแตนเลส 304 มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ทนปฏิกิริยาการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี
16% Cr, 13% Ni, 3% Mo	เป็นเหล็กสแตนเลส 316 ทนปฏิกิริยาการกัดกร่อนของสารเคมีได้สูงกว่าสแตนเลส 304

2.5.1 ท่อมาตรฐาน ASTM

เป็นท่อที่ผลิตตามมาตรฐานของสมาคมการทดสอบวัสดุความเป็นมาตรฐานของอเมริกา หรือ THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ASTM A 120

เป็นท่อเหล็กที่ใช้งานกันทั่วไป เช่น ใช้น้ำ แก๊ส และท่อลม ฯลฯ มีทั้งแบบมีตะเข็บ (Seam) และไร้ตะเข็บ (Seamless) และมีทั้งท่ออาบสังกะสี (Galvanized) และท่อเหล็กดำ ท่อประเภทนี้ไม่เหมาะนำมาใช้ในการขุดเป็นวง ดัดโค้งงอ หรือใช้งานที่อุณหภูมิสูง ตามมาตรฐานไม่ต้องตรวจสอบคุณภาพเชิงกล เพียงแต่ทำการอัดน้ำก็พอ (Hydrostatic Test) การผลิตสามารถทำได้จากกระบวนการเตาเปิดแบบกรด (Open Hearth) หรือเตาไฟฟ้าแบบกรด (Electric Furnace)

ASTM A 53

มีทั้งแบบที่มีตะเข็บและไม่มีตะเข็บ และสามารถเลือกท่อดำหรือท่อสังกะสีก็ได้ ใช้งานพิเศษต่าง ๆ มีคุณสมบัติทางเคมีและการดัดตามต้องการ ใช้สำหรับการอัด การดัดโค้ง การขึ้นรูป

และรับแรงดึงได้ผ่านการทดสอบความดันมาเหมือนกับท่อ A 120 ท่อมาตรฐาน A 53 แบบมีตะเข็บ และไม่มีตะเข็บ ปกติท่อเหล็กชนิดนี้ได้จากกระบวนการเตาเปิดแบบกรด หรือเตาไฟฟ้าแบบกรด

ASTM A 106

เป็นท่อเหล็กดำไม่มีตะเข็บ สำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูง มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกล ใช้ขึ้นรูปดัดโค้ง และรับแรงดึงได้ มีการทดสอบความดันเหมือนกับท่อ A 120

ASTM A 135

เป็นท่อที่เชื่อมต่อตะเข็บด้วยไฟฟ้ามีขนาดเล็กสุดจนถึง 30 นิ้ว เป็นท่อสำหรับของเหลว แก๊ส ได้ผ่านการทดสอบเช่นเดียวกับท่อ A120 เหล็กทำมาจากกระบวนการเตาเปิดแบบกรดหรือเตาไฟฟ้าแบบกรด

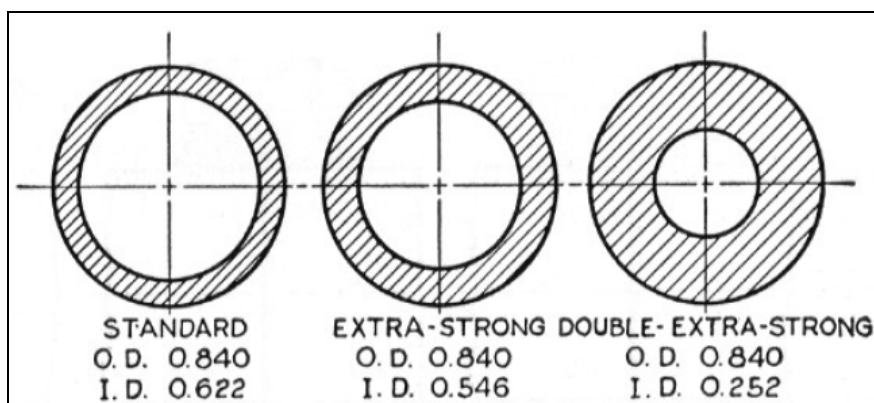
2.5.2 ขนาดท่อ (Pipe Size)

ท่อที่บอกขนาดเป็นเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน มีขนาดตั้งแต่ 1/8 นิ้ว ถึง 12 นิ้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกของท่อขนาดต่างๆ ก็เหมือนกับน้ำหนักท่อ เช่น ท่อขนาด 1 นิ้ว จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกคงที่ค่าหนึ่ง แต่ความหนาของท่อจะเปลี่ยนไป คือ เปลี่ยนเส้นผ่าศูนย์กลางภายในอย่างเดียว นั่นหมายถึงน้ำหนักของท่อก็เปลี่ยนไปด้วย

ประมาณปี 1862 Robert Briggs ได้กำหนดขนาดท่อ และเกลียวท่อ ซึ่งเรียกว่า “Briggs Standards” ซึ่งกำหนดเป็นแบบมาตรฐาน (Standard) แบบแข็งแรงพิเศษ (Extra Strong) และแบบดับเบิลเอ็กซ์ทราสตรอง (Double Extra Strong) และได้ทำการแก้ไขเล็กน้อยในปี 1919 ซึ่งได้นำมาใช้เป็นมาตรฐานในงานอุตสาหกรรมท่อที่มีขนาดใหญ่กว่า 12 นิ้ว จะรู้โดยเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกความหนาของท่อที่ผนังท่อด้านนอกของแบบมาตรฐาน และ แบบแข็งแรงพิเศษ จะไม่ได้บอกสัญลักษณ์ไว้ให้ โดยทั่วไปท่อที่มีความหนาของผนังท่อ 3/8 นิ้ว ก็จะพิจารณาเป็นน้ำหนักมาตรฐานและขนาด 1/2 นิ้ว ก็พิจารณาเป็นน้ำหนักแบบแข็งแรงพิเศษ

ส่วนค่าพิกัดความเผื่อในการผลิตท่อ หรือความหนาของผนังท่อที่จุดใดๆ จะต้องไม่น้อยกว่า 87.5 เปอร์เซ็นต์ ของความหนามาตรฐาน เช่น ท่อ 6 นิ้ว มีความหนามาตรฐาน 0.280 นิ้ว ถ้าท่อมีขนาดความหนาน้อยกว่า 0.245 นิ้ว จะจุดใดจุดหนึ่งก็ตามแสดงว่าท่อนั้นใช้ไม่ได้

บางครั้งจะเห็นว่า กำหนดมาตรฐานเป็นความหนาน้อยสุดของท่อ เช่น ท่อ 6 นิ้ว จะมีค่าความหนาไม่น้อยกว่า 0.280 นิ้ว ทุกๆ จุด เช่น ท่อที่ใช้กับหม้อต้มไอน้ำจะกำหนดความหนาน้อยสุดเป็นหลัก โดยทั่วไปโรงงานผลิตท่อจะบอกขนาดท่อเป็นความหนาของผนังท่อ (Nominal Wall Thickness) เช่น ท่อ 6 นิ้ว กำหนดให้ผนังท่อหนา 0.280 นิ้ว ความหนาของผนังท่อเท่ากับ 0.329 นิ้ว เป็นต้น



ภาพประกอบ 15 แสดงขนาดท่อด้านนอกและด้านใน (15)

ท่อจะระบุความหนาบางโดยที่ขนาดโตนอก (OD) คงเดิม แต่ขนาดโตใน (ID) เปลี่ยนไป ดังนั้นเกลียวท่อก็ยังคงเหมือนกันโดยใช้ขนาดโตนอกเป็นหลัก ถึงแม้ขนาดโตในจะเปลี่ยนไปก็ตาม

จะเห็นว่าเวลาระบุขนาดท่อ 2 นิ้ว ขนาดที่จำเป็น คือ ขนาดท่อ และ ความหนาท่อ ตาราง 5 แสดงขนาดโตใน และความดันสูงสุดที่ท่อจะทนได้เมื่อใช้กับของเหลว ขนาดของท่อที่จะใช้ในงาน ไฮดรอลิก (Hydraulic) แต่ละประเภทนั้นถูกกำหนดด้วยความดันที่จะรับได้และอัตราการไหลของของเหลวที่ต้องการ

ตาราง 5 ขนาดโตใน และความดันสูงสุดของท่อ (14)

Nomin al pipe size	OD of pipe	No. of Threads per in.	Length of Effective Threads	Sch.40 Standard		Sch.80 Extra Heavy		Sch.160		Double Extra Heavy	
1/8"	0.405	27	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-
1/4"	0.540	18	0.40	0.364	16,000	0.302	22,000	-	-	-	-
3/8"	0.675	18	0.41	0.492	13,500	0.423	19,000	-	-	-	-
1/2"	0.840	14	0.53	0.622	13,200	0.546	17,500	0.466	21,000	0.252	35,000

ตาราง 5 ขนาดโตะใน และความดันสูงสุดของท่อ⁽¹⁴⁾ (ต่อ)

Nomin al pipe size	OD of pipe	No. of Threads per in.	Length of Effective Threads	Sch.40 Standard		Sch.80 Extra Heavy		Sch.160		Double Extra Heavy	
3/4"	1.050	14	0.55	0.824	11,000	0.742	15,000	0.614	21,000	0.434	30,000
1"	1.315	11.5	0.68	1.049	10,000	0.957	13,600	0.815	21,000	0.599	27,000
1-1/2"	1.900	11.5	0.72	1.610	7,600	1.500	10,500	1.338	15,000	1.200	21,000
2"	2.375	11.5	0.76	2.067	6,500	1.939	9,100	1.689	14,800	1.503	19,000
2-1/2"	2.875	8	1.14	2.469	7,000	2.323	9,600	2.125	14,500	1.771	18,000
3"	3.500	8	1.20	3.068	6,100	2.900	8,500	2.624	12,500	-	-

2.5.3 น้ำหนักต่อฟุต (Weights per Foot)

สามารถจำแนกน้ำหนักออกเป็น 2 แบบ คือ น้ำหนักตามทฤษฎี และน้ำหนักตามกรรมวิธีผลิตน้ำหนักตามทฤษฎีคำนวณโดยใช้สูตร ซึ่งใช้ได้กับขนาดท่อทุกขนาด

$$\text{น้ำหนักต่อฟุต} = (\text{ขนาดโตะนอก} - \text{ความหนาท่อ}) \times \text{ความหนาท่อ} \times 10.68 \text{ ปอนด์}$$

ตัวอย่างเช่น

$$\text{ท่อขนาดมาตรฐาน 6 นิ้ว มีขนาดโตะนอก} = 6.625 \text{ นิ้ว ความหนา} = 0.280 \text{ นิ้ว}$$

$$\text{น้ำหนักต่อฟุต} = (6.625 - 0.280) \times 0.280 \times 10.68$$

$$= 18.97 \text{ ปอนด์/ฟุต}$$

แต่เนื่องจากวิธีการทำจริง ๆ นั้นมีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้น้ำหนักไม่เป็นไปตามทฤษฎี เช่น แม่แบบอาจจะเก่า การตั้งระยะต่าง ๆ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ทำให้น้ำหนักท่อเปลี่ยนไป ซึ่งถ้าเป็นท่อแบบมาตรฐาน หรือ แบบเชิงพิเศษ ยอมให้เปลี่ยนแปลงไปจากค่าทางทฤษฎีได้ ± 5 เปอร์เซ็นต์

และ แบบดับเบิลเอ็กstrasตรง และท่อขนาดใหญ่ยอมให้เบา หรือหนักกว่าทฤษฎีได้ ± 10 เปอร์เซ็นต์ และจะเห็นว่าท่ออาจสังกะสีจะหนักกว่าท่อผิวดำเนื่องจากน้ำหนักของสังกะสีที่เคลือบท่ออยู่ ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้เป็นสิ่งสำคัญมากที่เราต้องยอมรับท่อ ขนาด 8 นิ้ว 10 นิ้ว และ 12 นิ้ว จะแสดงน้ำหนักแต่ละขนาดแตกต่างกันไป ดังนั้นในการเลือกใช้เราจำเป็นต้องบ่งบอกให้ทราบถึงน้ำหนักที่ต้องการด้วยเสมอ

2.5.4 ASA SCHEDULE NUMBERS

ASA ได้ร่วมมือกับโรงงานทำท่อ เพื่อให้ได้ท่อที่เป็นมาตรฐานเหมาะสมกับงานอุตสาหกรรม เช่น กำหนดท่อเป็น SCH 40 และ SCH 80 ซึ่งมีความหนาต่อเท่ากับแบบมาตรฐาน และ แบบแข็งพิเศษ จะมีความหนามากกว่าท่อ SCH 160 จึงต้องจำไว้ว่าถ้าต้องการความหนา SCH 160 ก็เลือกท่อระหว่าง ท่อแบบแข็งพิเศษ กับแบบดับเบิลเอ็กstrasตรง และท่อที่ขนาดโตกว่า 8 นิ้ว ต้องระวังในการสั่งเพราะมาตรฐานเริ่มแตกต่างกันไป

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทศพร ปรีดาพันธุ์⁽¹⁶⁾ ศึกษาการประหยัดพลังงานในอุตสาหกรรมปลาป่น โดยทำการศึกษาโรงปลาป่นจำนวน 2 โรง ผลการศึกษาพบว่าโรงงานปลาป่นมีศักยภาพในการประหยัดได้ประมาณ 5.8 - 35.4 ล้านบาทต่อปี หรือเฉลี่ย 20.6 ล้านบาทต่อปี จากการนำความร้อนไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ การลดความร้อนสูญเสียที่ท่อไอน้ำ และท่อน้ำป้อน โดยการหุ้มฉนวน การลดความร้อนสูญเสียโดยการติดตั้งกับดักไอน้ำ และลดการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยการปรับปรุงค่าตัวประกอบภาระ จากแนวทางทั้ง 4 ประการ โรงงานที่ 1 มีโอกาสลดค่าใช้จ่ายพลังงานได้ประมาณ 93,193 บาทต่อปี เทียบเป็นสัดส่วนค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงลดลงร้อยละ 1.9 และค่าใช้จ่ายไฟฟ้าลดลงร้อยละ 3.2 หรือมีโอกาสดำเนินค่าใช้จ่ายพลังงานลดลงร้อยละ 2.4 โรงงานแห่งที่ 2 มีโอกาสลดค่าใช้จ่ายพลังงานได้ประมาณ 570,563 บาทต่อปี เทียบเป็นสัดส่วนค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงลดลงร้อยละ 10.1 และค่าใช้จ่ายไฟฟ้าลดลงร้อยละ 2.7 หรือมีโอกาสดำเนินค่าใช้จ่ายพลังงานลดลงร้อยละ 8.6

สุพจน์ มุณินทรานกุล⁽⁷⁾ ศึกษาเกณฑ์การเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในอุตสาหกรรมระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น โดยสารทำงานที่ใช้เป็นน้ำกับน้ำ และไอน้ำกับน้ำ จากการทดลองพบว่าในกรณีที่สารทำงานเป็นน้ำกับน้ำ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อจะดีกว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ส่วนในกรณีที่สารทำงานเป็นไอน้ำกับน้ำ ถ้าอัตราความร้อนต่ออุณหภูมิต่ำ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อจะดีกว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ถ้าอัตราความร้อนต่ออุณหภูมิสูง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นจะดีกว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ

เจนจิรา เปี่ยมดี⁽¹⁷⁾ ได้ศึกษาการออกแบบและสร้างระบบนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้คอนเดนเซอร์รถยนต์เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระจัดรัดที่หาได้ง่ายตามท้องตลาด เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้งานกลับทิศทาง โดยความร้อนที่เข้ามาจากกระบวนการผลิตที่มีอุณหภูมิระหว่าง 248 ถึง 284 องศาฟาเรนไฮต์ โดยความร้อนถูกนำมาให้แก่ น้ำป้อนที่ถูกส่งไปยังหม้อไอน้ำที่อัตราการไหล 21 ลิตรต่อนาที โดยผลการทดลองพบว่าที่น้ำป้อนอุณหภูมิ 86 องศาฟาเรนไฮต์ ไหลผ่านคอนเดนเซอร์รถยนต์ขนาด 3.92×16.28 ฟุต ที่ต่อขนานกัน 8 ชุด โดยแต่ละชุดต่ออนุกรมกัน 6 ตัว ได้น้ำร้อนที่ออกจากระบบที่อุณหภูมิเฉลี่ย 352.04 องศาฟาเรนไฮต์ และค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับระยะเวลาคืนทุนของโครงการที่ 1.24 ปี

อิศเรศ ฐชกัลยา⁽¹⁸⁾ วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการ วิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีปแผ่นเรียบชนิดไหลขวางกัน ซึ่งมีน้ำเป็นของไหลที่ให้ความร้อนและอากาศเป็นของไหลที่ใช้ระบายความร้อน โดยพิจารณาบนพื้นฐานของค่าการย้อนกลับไม่ได้ต่ำสุด และเศรษฐศาสตร์ความร้อน สภาวะที่เหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วนคือ สภาวะการทำงานที่เหมาะสมและลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสม ส่วนในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ความร้อน เป็นการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากการทดลองปรากฏว่า ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิของข้อมูลการทดลองประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง -5 ถึง +5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความคลาดเคลื่อนของความดันลดของข้อมูลการทดลองประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง -10 ถึง +10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองนี้ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จึงเป็นเครื่องมือสำหรับการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงได้

ขวัญชัย ไกรทอง และ อติพงศ์ นันทพันธุ์⁽⁹⁾ ศึกษาการนำความร้อนทิ้งจากน้ำคอนเดนเซอร์ระบบปรับอากาศรถยนต์มาใช้อุ่นอากาศ โดยศึกษาคุณลักษณะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางที่ดัดแปลงจากคอนเดนเซอร์ระบบปรับอากาศรถยนต์ และใช้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำที่อุณหภูมิ 149 องศาฟาเรนไฮต์กับอุณหภูมิห้อง อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอยู่ที่ 0.1 และ 0.4 กิโลกรัมต่อวินาที มีคอนเดนเซอร์ 1 - 3 ชุด ทิศทางการไหลของน้ำร้อนและอากาศ 2 แบบคือ แบบไหลสวนทางและไหลตามกัน จากการศึกษาพบว่าค่าประสิทธิผลของการแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ที่ 0.4 - 0.9 ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ จำนวนคอนเดนเซอร์ และทิศทางการไหลของอากาศ

กัลยลักษณ์ เอาเอกสิทธิ์ และ สุรเทพ เขียวหอม⁽¹⁹⁾ ศึกษาแบบจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และพิจารณาผลของตะกอนต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยเลือกใช้สมการการเกิดตะกอนแบบมีเส้นแนวโน้ม (Asymptote) ในรูปแบบเวลาต่อเนื่อง โดยศึกษาอัตราการเกิดตะกอน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิขาออกของสายร้อนและสายเย็น และอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับเวลา เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการหาเวลาการทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าการเกิดตะกอน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิขาออกของสายร้อนและสายเย็น และอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและคงที่ในช่วงหลังและอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเทียบกับเวลาในสภาวะที่ไม่ล้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อทำนายอุณหภูมิขาออกเพื่อใช้ เป็นข้อมูลในการล้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม โดยอุณหภูมิขาออกของสายเย็นในสภาวะที่ล้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดน้อยลงกว่าอุณหภูมิขาออกของสายเย็นในสภาวะที่ไม่ได้ทำการล้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในสภาวะที่ล้างเครื่องน้อยกว่าในสภาวะที่ไม่มีการล้างเครื่อง

David J. Kukulka; et al.⁽²⁰⁾ ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบท่อ โดยเปรียบเทียบการใช้ท่อแบบผิวเรียบกับท่อแบบปั่นป่วน ที่ได้มาตรฐาน ASTM โดยวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและปริมาณของตะกอนในระบบ จากการเพิ่มความปั่นป่วน การสร้างรูปแบบการไหลของของไหลรอง และการเพิ่มปริมาณความร้อนเข้าไปในระบบ จากการทดลองพบว่าท่อแบบปั่นป่วนมีปริมาณตะกอนในระบบน้อยกว่าท่อแบบผิวเรียบ ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีกว่าแบบผิวเรียบ โดยมีค่าเข้าใกล้ 100 เปอร์เซ็นต์ และเนื่องจากท่อแบบปั่นป่วนเป็นท่อโลหะผสม (Alloy) จึงมีพิสัยการทำงานที่กว้างกว่าท่อแบบผิวเรียบ

A. Mehta Kushal K. and B. Lakdawala A M.⁽²¹⁾ ศึกษาเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบท่อ 2 ชั้น โดยการใส่ท่อด้านในที่มีความยาว 2 ระยะคือ ที่ 0.65 ฟุต และ 1.64 ฟุตและทดลองติดปีกกับท่อด้านใน โดยค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 1,500 ถึง 6,500 จากการทดลองพบว่าท่อที่มีการติดตั้งปีกที่ระยะ 0.65 ฟุต ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น 27 เปอร์เซ็นต์ส่วนท่อที่มีการติดตั้งปีกที่ระยะ และ 1.64 ฟุตให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น 53 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเพียงอย่างเดียว

เอกอาทิตย์ ปรามมะณี และคณะ⁽²²⁾ ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยจากการตรวจวัดหม้อไอน้ำ (Boiler) พบว่ามีความร้อนจากก๊าซเสียที่ปล่อยสู่บรรยากาศถึง 12.2 เปอร์เซ็นต์ จึงได้ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนกลับมาใช้ ทำให้ได้อุณหภูมิน้ำป้อนหม้อไอน้ำสูงขึ้น สามารถประหยัดพลังงานได้ 0.0683 ktoe ต่อปี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดย

การใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (SolidWorks Flow Simulation) โดยทำการสร้างแบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม (ติดตั้งจริง) แบบท่อสี่เหลี่ยม และแบบท่อสามเหลี่ยม ซึ่งจากการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าท่อรูปทรงสามเหลี่ยมมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเฉลี่ยดีที่สุด ได้น้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำมีอุณหภูมิเฉลี่ยถึง 234.1 องศาฟาเรนไฮต์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานมากกว่า 21 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับท่อกลมที่ได้น้ำอุณหภูมิเฉลี่ย 229.6 องศาฟาเรนไฮต์

ธิตินุญณ์ เปลี่ยนมณี⁽²³⁾ การศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ เพื่อป้องกันกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกลั่นตัว ซึ่งจะส่งผลให้ผิวถ่ายเทความร้อนของอีโคโนไมเซอร์เกิดการผุกร่อนได้ โดยในการศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้ความร้อนจากน้ำที่อุ่นได้จากอีโคโนไมเซอร์และเสริมด้วยความร้อนจากไอน้ำที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการควบคุม จากการศึกษพบว่าเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิกลิ้งตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ต่างกัน โดยเมื่อการเผาไหม้มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหมดพอดี เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซปิโตรเลียมเหลว น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา และถ่านหิน จะมีอุณหภูมิไอรดกลั่นตัวที่ 139.3 องศาฟาเรนไฮต์ 129.9 องศาฟาเรนไฮต์ 122.3 องศาฟาเรนไฮต์ 116.6 องศาฟาเรนไฮต์ และ 107.9 องศาฟาเรนไฮต์ ตามลำดับ สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ดังนั้น จึงได้มีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ให้สูงกว่า 129.9 องศาฟาเรนไฮต์ โดยได้มีการกำหนดอุณหภูมิไว้ที่ 158 องศาฟาเรนไฮต์

จากการวิจัยได้ทำการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ทั้งหมด 3 วิธี คือ ควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุมซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด ควบคุมโดยใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำ ซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด และสุดท้ายได้ใช้การควบคุมแบบปิด โดยมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าการควบคุมอุณหภูมิในแต่ละวิธีนั้นสามารถประหยัดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้เมื่อเทียบกับช่วงก่อนที่มีการอุ่นน้ำได้ 1.41 เปอร์เซ็นต์ 3.32 เปอร์เซ็นต์ และ 5.77 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ประสิทธิ์ เกี้ยวสุนทร⁽²⁴⁾ ศึกษาด้วยการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับหม้อไอน้ำ หม้อไอน้ำที่ทำการศึกษามีขนาด 3 ตันต่อชั่วโมง เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) เพื่อนำก๊าซเสียจากปล่องของหม้อไอน้ำมาอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ โดยทำการออกแบบ สร้างและติดตั้งทดลองจนใช้งานจริงที่โรงพยาบาลปทุมธานี ลักษณะของอีโคโนไมเซอร์ มีการจัดเรียงท่อแบบแนวเอียงกัน (Staggered) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ ประสิทธิภาพของอีโคโนไมเซอร์ที่สร้างกับการออกแบบ และผลการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ จากผลการทดลองหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์กับปล่องของหม้อไอน้ำ พบว่าอีโคโนไมเซอร์สามารถอุ่นน้ำป้อนได้จาก 217 องศาฟาเรนไฮต์ เป็น 230 องศาฟาเรนไฮต์ ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นจาก 81 เปอร์เซ็นต์ เป็น 86 เปอร์เซ็นต์

ประสิทธิภาพของอีโคโนไมเซอร์เท่ากับ 0.423 สามารถประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงได้ 13 เปอร์เซ็นต์ โดยประโยชน์ของงานวิจัยนี้สามารถนำไปออกแบบอีโคโนไมเซอร์หรือนำไปประยุกต์ใช้งานกับโรงพยาบาลหรืออุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ ที่มีอุณหภูมิของก๊าซเสียสูงและมีปริมาณมากเพียงพอที่จะนำความร้อนสูญเสียมาอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อประหยัดพลังงานการใช้เชื้อเพลิงของโรงพยาบาลหรืออุตสาหกรรมต่อไป

(25) ยงยุทธ เครือวงษา ศึกษา ออกแบบ สร้าง และทดสอบหาคุณลักษณะทางความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดกะทัดรัด เพื่อนำความร้อนทั้งจากก๊าซไอเสียในระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอ็อกไซด์ของแข็งกลับมาใช้ใหม่ก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศภายนอก โดยกำหนดให้ความร้อนทั้งอยู่ในรูปของอากาศร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 392 ถึง 644 องศาฟาเรนไฮต์ ซึ่งถูกใช้แลกเปลี่ยนกับน้ำเย็นเพื่อผลิตน้ำอุ่น ในการออกแบบกำหนดให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบกะทัดรัด มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดความกว้าง 0.65 ฟุต ความยาว 0.72 ฟุต และสูง 0.72 ฟุต ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใช้ท่อทองแดง ครอบลู่มีเนื้อเยื่อแบบบรอยหยัก ชนิดไหลขวาง โดยอากาศร้อนจะไหลอยู่ภายนอกในขณะที่น้ำไหลอยู่ภายในท่อ ทิศทางการไหลของน้ำและร้อนเป็นแบบไหลสวนทางกัน โดยการศึกษาจะทำการแปรผันค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อน ผลการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดกะทัดรัดที่อุณหภูมิอากาศร้อนเข้า 644 องศาฟาเรนไฮต์ อุณหภูมิน้ำเข้า 86 องศาฟาเรนไฮต์ อัตราการไหลของอากาศร้อน 0.00404 กิโลกรัม/วินาที และอัตราการไหลของน้ำ 0.0094 กิโลกรัม/วินาที พบว่าสามารถดึงความร้อนทั้งของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอ็อกไซด์ของแข็งให้กับน้ำได้มากที่สุด โดยมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยเฉลี่ย 1.243 กิโลวัตต์ ค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 97.10 เปอร์เซ็นต์ และค่า NTU เท่ากับ 5.6 อีกทั้งสามารถลดอุณหภูมิอากาศร้อนออกให้เหลือต่ำเพียง 95 องศาฟาเรนไฮต์ และเพิ่มอุณหภูมิของน้ำได้เป็น 143 องศาฟาเรนไฮต์ โดยเกิดความดันอากาศร้อนตกคร่อมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดประมาณ 5.128 ปาสคาล

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปโดยนัยได้ว่า ในเบื้องต้นนั้นมีหลากหลายวิธีที่เป็นแนวทางในการนำความร้อนทั้งกลับมาใช้ใหม่ในหลายส่วนของอุตสาหกรรม และสามารถนำความร้อนทั้งเหล่านี้กลับเข้าสู่ระบบผลิตได้ เช่น การอุ่นอากาศ การอุ่นน้ำร้อน หรือการต้มน้ำต่างๆ ได้โดยผ่านอุปกรณ์ต่างๆ เช่น อีโคโนไมเซอร์ หรือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะทำให้การใช้เครื่องจักรเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้พลังงาน แต่การศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่เกี่ยวกับความคุ้มค่าในการพิจารณาลงทุนตลอดจนการวิเคราะห์ด้านความอ่อนไหวของโครงการในการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอบผลิตภัณฑ์ในประเทศไทยนั้นมิงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องค่อนข้างน้อย ดังนั้นเพื่อเป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ทั้งในด้านศักยภาพ ค่าใช้จ่ายโครงการ ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ตลอดจนความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอบผลิตภัณฑ์ จึงเป็นเหตุผลในการทำวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

- 3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย
- 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย
- 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
- 3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล
- 3.5 การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์และวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นข้อมูลปฐมภูมิ ที่ได้จากการสอบถามผู้ดูแลโรงงาน และพนักงานของโรงงานผลิตกระป๋อง ของบริษัท รอยัลแคนอินดัสทรีส์ จำกัด ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ประกอบด้วยข้อมูลต่างๆ ดังนี้

3.1.1 ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานผลิตกระป๋อง



ภาพประกอบ 16 บริษัท รอยัลแคนอินดัสทรีส์ จำกัด

บริษัท รอยัลแคนอินดัสทรีส์ จำกัด เป็นบริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายภาชนะบรรจุอาหาร ฝา และภาชนะบรรจุภัณฑ์อ่อนตัว เป็นผู้นำทางด้านการผลิตกระป๋องเปล่าสำหรับบรรจุอาหาร โรงงาน ตั้งอยู่เลขที่ 68 ม.3 ถ.เลียบคลองแคราย ต.แคราย อ.กระทุ่มแบน จ.สมุทรสาคร โรงงาน ประกอบด้วยอาคารที่ติดตั้งเครื่องจักรเพื่อผลิตกระป๋อง อันได้แก่ เครื่องผลิตกระป๋อง 2 ชั้น เครื่องผลิตกระป๋อง 3 ชั้น แบบเชื่อมตะเข็บข้างด้วยไฟฟ้า เครื่องเคลือบแลคเกอร์และพิมพ์สี เครื่องผลิตฝา

แบบเปิดง่าย ที่ได้รับการรับรองระบบคุณภาพ (ISO 9001: 2000) และได้รับการรับรองระบบอาชีวอนามัยและความปลอดภัย (OHSAS 18001: 1999)

3.1.2 ข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องเคลือบผิวกระป๋องและเครื่องอบฝากระป๋อง

ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีรายละเอียดดังนี้

- 1) เครื่องเคลือบผิวกระป๋องที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาดความกว้างของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน x ความสูงของปล่องไอเสียเท่ากับ 1.6 x 32.8 ฟุต อยู่ห่างจากเครื่องอบฝากระป๋องประมาณ 328 ฟุต ใช้ก๊าซธรรมชาติเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิงในการกำเนิดความร้อน
- 2) เครื่องอบฝากระป๋องที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาดความกว้างของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน x ความสูง เท่ากับ 1.9 x 4.9 ฟุต ประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้า 3 ชุดดังนี้
 1. เครื่องกำเนิดความร้อน ขนาด 15000 วัตต์ 1 เครื่อง
 2. เครื่องเป่าลม ขนาด 1100 วัตต์ 1 เครื่อง
 3. ชุดวงจรควบคุมอุณหภูมิเครื่อง ขนาด 120 วัตต์ 1 ชุด

3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เงินลงทุนของโครงการ คือ ค่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอีโคโนไมเซอร์ ท่อความร้อน ฉนวนกันความร้อน และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการก่อสร้าง

3.2.2 ต้นทุนการผลิตของโครงการ คือ ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นการผลิต ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายต่างๆ ดังนี้

1. ค่าสาธารณูปโภค ค่าไฟฟ้ากำหนดหน่วยละ 3.5 บาท
2. ค่าอบรมพนักงานเกี่ยวกับเทคโนโลยีและการใช้งานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยแบ่งเป็นพนักงานจากฝ่ายเคลือบกระป๋องและพนักงานจากฝ่ายอบฝากระป๋อง กำหนดฝ่ายละ 2 คน ค่าใช้จ่ายในการอบรม คนละ 25,000 บาท
3. ค่าบำรุงรักษาระบบ กำหนดเป็น 50,000 บาทต่อปี

3.2.3 รายได้ของโครงการ คือ ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตความร้อนของเครื่องอบฝากระป๋องที่ลดลง 2,516,377 บาทต่อปี

3.2.4 ระยะเวลาของโครงการ กำหนดเป็น 10 ปี

3.2.5 ระยะเวลาทำงานของโรงงาน กำหนดให้เครื่องทำงาน 26 วันต่อเดือน

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 โปรแกรมสำเร็จรูปประเภทสเปรดชีต (Spread Sheet) หรือโปรแกรมตารางทำงาน สำหรับใช้ในคำนวณต้นทุนในการผลิตของโครงการ

3.3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การนำก๊าซไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ จะนำมาใช้โดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นโลหะที่สามารถทนต่ออุณหภูมิก๊าซไอเสียนั้นได้ ถ้าก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิสูงมากอาจใช้เซรามิกส์ แต่ราคาจะสูงมาก นอกจากนี้การนำความร้อนจากก๊าซไอเสียกลับมาใช้ ควรคำนึงถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point) ของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ซึ่งเกิดจากเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของกำมะถัน ส่วนเชื้อเพลิงที่ไม่มีองค์ประกอบของกำมะถันสามารถนำก๊าซไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ได้เต็มที่



ภาพประกอบ 17 ตัวอย่างระบบการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ใหม่ด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เนื่องจากบางกระบวนการในการผลิตเป็นกระบวนการที่มีการใช้ความร้อนสูงและทำให้เกิดความร้อนทิ้งอุณหภูมิสูงตามมา ซึ่งหากมีการนำความร้อนดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตด้านอื่นๆ ได้ก็ถือเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการลดการใช้ทรัพยากรด้านพลังงานของโรงงานลงได้ จากภาพประกอบ 17 แสดงถึงการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิสูงมาใช้ในกระบวนการอบผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในการใช้งานต่ำด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้โรงงานมีการใช้ไฟฟ้าในการอบผลิตภัณฑ์ลดลง และต้นทุนในการผลิตของโรงงานลดลง ถือได้ว่าเป็นการใช้พลังงานที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์เพิ่มมากขึ้น

3.3.3 เครื่องเคลือบผิวกระป๋อง



ภาพประกอบ 18 ปล่องความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องเคลือบผิวกระป๋อง

เครื่องเคลือบผิวกระป๋องที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีจำนวน 1 เครื่องจากทั้งหมด 6 เครื่อง ซึ่งเป็นเครื่องเคลือบผิวกระป๋องที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิงในการกำเนิดความร้อน และมีการควบคุมการทำงานด้วยตัวควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ โดยเครื่องจะทำงานตลอดเวลา จะหยุดเพื่อทำความสะอาดระบบเดือนละ 1 ครั้งๆ ละ 1 วัน ซึ่งมีรายละเอียดด้านความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบกระป๋องดังนี้

ตาราง 6 รายละเอียดของความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋อง

ที่	รายละเอียด	จำนวน	หน่วย
1	จำนวนเครื่อง	1	เครื่อง
2	อุณหภูมิทำงานของกระบวนการเคลือบผิวกระป๋อง	1292	องศาฟาเรนไฮต์
3	อุณหภูมิเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋อง โดยวัด ณ ปากปล่องไอเสีย	752	องศาฟาเรนไฮต์
4	อัตราการไหลของความร้อนเหลือทิ้งโดยวัดจากปล่องไอเสีย	741608	ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง
5	ขนาดของปล่องไอเสียเท่ากับ	1.6	ฟุต
6	ความสูงของปล่องไอเสีย	32.8	ฟุต
7	ระยะห่างจากจุดใช้งาน (เครื่องอบฝากระป๋อง)	328	ฟุต

3.3.4 เครื่องอบฝากระป๋อง

เครื่องอบฝากระป๋องที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีขนาดความกว้างของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน x ความสูง เท่ากับ 1.9 x 4.9 ฟุต ประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้า 3 ชุดดังนี้

1. เครื่องกำเนิดความร้อน ขนาด 15 กิโลวัตต์ 1 เครื่อง
2. เครื่องเป่าลม ขนาด 1.1 กิโลวัตต์ 1 เครื่อง
3. ชุดวงจรควบคุมอุณหภูมิเครื่อง ขนาด 0.12 กิโลวัตต์ 1 ชุด



ภาพประกอบ 19 เครื่องอบฝากระป๋อง

ตัวแปรของเครื่องอบฝากระป๋องที่ใช้ในการหาค่าพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการกำเนิดความร้อนมีดังนี้

ตาราง 7 ตัวแปรในการคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการกำเนิดความร้อนเพื่ออบฝากระป๋อง

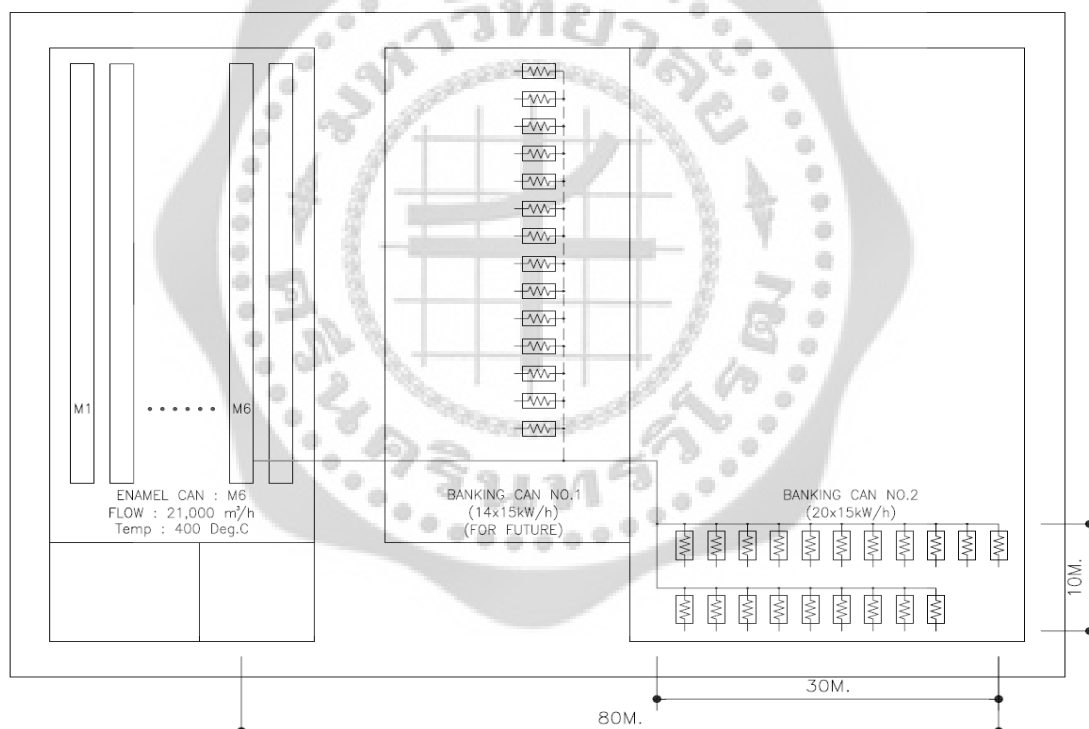
ที่	รายละเอียด	จำนวน	หน่วย
1	จำนวนเครื่อง	20	เครื่อง
2	ขนาดเครื่องกำเนิดความร้อนที่ 120 อกตาเซลเซียส	15	กิโลวัตต์
3	เวลาเปิด/ปิดเครื่อง	48/86	วินาที
4	ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย	3.50	บาท
5	การทำงานของเครื่องต่อ 1 เดือน	26	วัน

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมทางการเงินของการลงทุนโครงการปรับปรุงเครื่องอบฝากระป้องกันจากเดิมที่ใช้ไฟฟ้าในการให้ความร้อนให้เป็นระบบที่ใช้ความร้อนจากความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องเคลือบผิวและพิมพ์ฉลากกระป๋องแทน เป็นข้อมูลทุติยภูมิที่ได้รวบรวมมาจากแหล่งต่างๆ ข้อมูลเหล่านี้ ได้แก่

3.4.1 ข้อมูลเกี่ยวกับการจัดการความร้อนเหลือทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรม และผลที่เกิดจากการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ จากเอกสารงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้อง

3.4.2 ข้อมูลจากบริษัท รอยัลแคนอินดัสทรีส์ จำกัด ซึ่งเป็นข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิ ปริมาณและอัตราการไหลของพลังงานความร้อนเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นจากเครื่องเคลือบผิวและพิมพ์ฉลากกระป๋อง และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องอบฝากระป้องกัน



ภาพประกอบ 20 แผนผังอาคารเคลือบและอบฝากระป้องกัน

จากภาพประกอบ 20 แสดงข้อมูลแผนผังของอาคารเคลือบผิวและอาคารอบฝากระป้องกัน โดยอาคารเคลือบกระป๋องจะประกอบไปด้วยเครื่องเคลือบกระป๋องทั้งหมด 6 เครื่อง ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเครื่องเคลือบหมายเลข 6 เนื่องจากเป็นเครื่องเคลือบที่มีการปล่อยความร้อนเหลือทิ้งในอุณหภูมิสูงที่สุด คือ 752 องศาฟาเรนไฮต์และมีระยะทางใกล้กับเครื่องอบฝากระป้องกัน

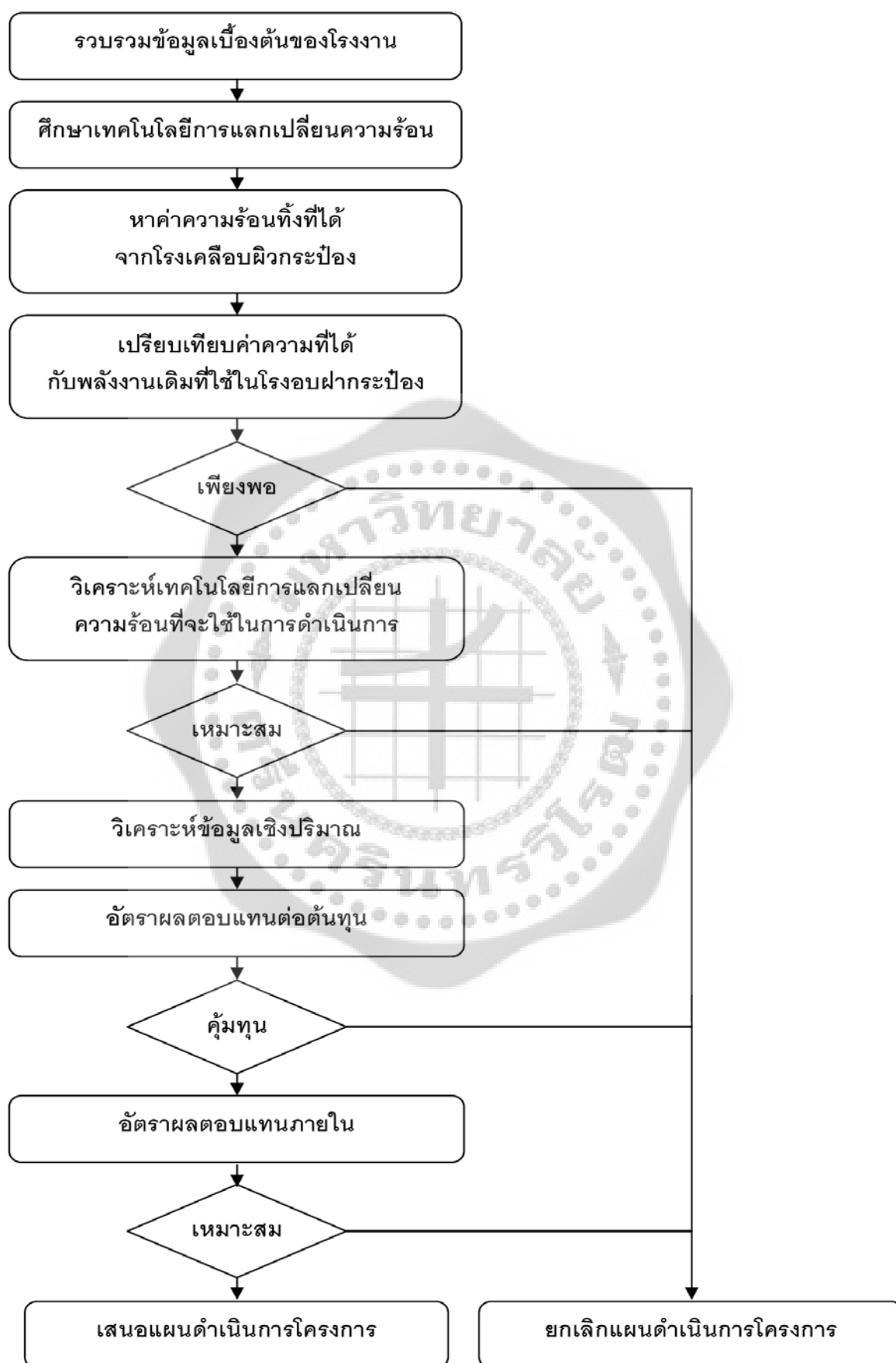
จากภาพประกอบจะเห็นว่าระยะทางจากเครื่องเคลือบหมายเลข 6 มายังเครื่องอบฝากระป้องกันชุดที่ 2 จะมีระยะทางประมาณ 328 ฟุต ในขณะที่อาคารอบฝากระป้องกันจะแบ่งออกเป็น 2 ชุด โดยเครื่องอบชุดที่ 1 ประกอบด้วยเครื่องอบฝากระป้องกันขนาด 15 กิโลวัตต์ จำนวน 14 เครื่อง มี

อุณหภูมิใช้งานโดยเฉลี่ยเท่ากับ 212 องศาฟาเรนไฮต์ และเครื่องอบชุดที่ 2 ประกอบด้วยเครื่องอบฝากรอบขนาด 15 กิโลวัตต์ จำนวน 20 เครื่อง มีอุณหภูมิใช้งานโดยเฉลี่ยเท่ากับ 248 องศาฟาเรนไฮต์ จากภาพประกอบจะเห็นว่าหากพิจารณาเครื่องอบชุดที่ 1 จะได้เครื่องอบจำนวน 14 เครื่อง ซึ่งมีจำนวนน้อยกว่าชุดที่ 2 ทำให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ลดลง แต่อาจไม่ได้ใช้ความร้อนเหลือทิ้งได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเครื่องอบชุดที่ 2 เนื่องจากเป็นชุดที่มีอุณหภูมิใช้งานโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกันและมีจำนวนเครื่องมากที่สุด เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงจึงตั้งสมมุติฐานว่าค่าความร้อนดังกล่าวน่าจะเพียงพอต่อการใช้งานกับเครื่องอบชุดที่ 2 และถือเป็นการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากกว่า

3.4.3 ข้อมูลเกี่ยวกับการลงทุน ค่าอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน และผลประโยชน์ทางด้านพลังงานของโครงการ

3.4.4 การดำเนินงานโครงการ จากภาพประกอบที่ 3-6 โครงการมีขั้นตอนดำเนินงานต่าง ๆ ดังนี้

- 1) รวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของโรงงาน เช่น ที่ตั้ง ประเภทของธุรกิจ ข้อมูลของอุปกรณ์เครื่องจักรที่ต้องการศึกษา เช่น เครื่องเคลือบผิวกระป๋อง และเครื่องอบฝากรอบ เป็นต้น
- 2) ศึกษาการนำเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อนไปใช้งาน จากวารสารและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ท่อร้อนและฉนวนกันความร้อน เป็นต้น
- 3) คำนวณค่าความร้อนที่ได้อาจได้จากเครื่องเคลือบผิวกระป๋อง และนำมาเปรียบเทียบกับความร้อนที่ป้อนให้กับเครื่องอบฝากรอบว่าเพียงพอหรือไม่ หากเพียงพอก็ศึกษาขั้นตอนที่ 4 ต่อไป หากไม่เพียงพอก็ทำการสรุปและยกเลิกโครงการ
- 4) พิจารณาการนำเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมมาใช้ในโครงการ ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 3 แบบในการพิจารณา คือ แบบแผ่น แบบเปลือกและท่อ และแบบฮีโคโนไมเซอร์ และใช้ฉนวนกันความร้อน 3 แบบในการพิจารณา คือ แบบใยแก้ว แบบใยหิน และแบบแคลเซียมซิลิเกต โดยพิจารณาถึงศักยภาพตลอดจนความเหมาะสมในการติดตั้งและบำรุงรักษาว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ หากเหมาะสมก็ศึกษาขั้นตอนที่ 5 ต่อไป หากไม่เหมาะสมก็ทำการสรุปผลและยกเลิกโครงการ
- 5) วิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์ เช่น อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน อัตราผลตอบแทนภายใน ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ และการวิเคราะห์ความอ่อนไหวที่มีผลต่อผลตอบแทนของโครงการเพื่อดูแนวโน้มของโครงการว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ หากมีความเหมาะสมก็สรุปผลเพื่อเสนอโครงการ หากไม่เหมาะสมก็ทำการสรุปผลและยกเลิกโครงการ



ภาพประกอบ 21 วิธีการดำเนินงานโครงการ

3.5 การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์และวิเคราะห์ข้อมูล

การนำข้อมูลมาใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ความเหมาะสมทางการเงินของการลงทุนโครงการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องเคลือบผิวกระเบื้องมาใช้ในการอบฝากระเบื้องแทนการใช้ความร้อนจากไฟฟ้านี้ แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์ผลตอบแทนและค่าใช้จ่ายของโครงการ และส่วนที่ 2 การวิเคราะห์ทางการเงิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.5.1 การวิเคราะห์ผลตอบแทนและค่าใช้จ่ายของโครงการ

1) การวิเคราะห์ปริมาณพลังงานความร้อนที่ได้จากปล่องไอเสียของเครื่องเคลือบผิวกระเบื้อง คำนวณได้สมการดังนี้

$$Q = mc(T_{in} - T_{out}) \quad (3-2)$$

โดยที่

Q คือ ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อน (บีทียู/ชั่วโมง)

m คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อน (ลูกบาศก์ฟุต/ชั่วโมง)

T_{in} คือ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (องศาฟาเรนไฮต์)

T_{out} คือ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (องศาฟาเรนไฮต์)

ค่าคงที่สำหรับการคำนวณ

c คือ ค่าความจุความร้อนของอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 752 องศาฟาเรนไฮต์
มีค่าเท่ากับ 0.244 บีทียู/ปอนด์-ฟาเรนไฮต์

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 752 องศาฟาเรนไฮต์
มีค่าเท่ากับ 0.047 ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต

2) การวิเคราะห์ผลตอบแทนจากการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าที่ลดได้จากการนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องเคลือบผิวและพิมพ์ฉลากกระเบื้องมาใช้ ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้พิจารณาเลือกการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องเคลือบผิวและพิมพ์ฉลากกระเบื้องมาทดแทนพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบฝากระเบื้อง เนื่องจากสำรวจพบว่าความร้อนดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงสามารถนำมาใช้ในกระบวนการอบฝากระเบื้องได้ และถือเป็นการใช้พลังงานที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเหมาะสมต่อการดำเนินงานในส่วนอุตสาหกรรมในปัจจุบัน การหาค่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอบฝากระเบื้อง สามารถคำนวณหาได้จากข้อมูลดังนี้

- เครื่องอบไฟฟ้าขนาด 15 กิโลวัตต์ จำนวน 20 เครื่อง
- เวลาทำงาน (เปิด-ปิด) ของเครื่องเท่ากับ 48 ต่อ 86 วินาทีตามลำดับ
หรือเท่ากับ 8 ชั่วโมง 35 นาที ต่อ 15 ชั่วโมง 25 นาทีตามลำดับ
- โรงงานกำหนดเดินเครื่องอบฝากระเบื้องเดือนละ 26 วัน

3) การวิเคราะห์มูลค่าของ CERs ของโครงการ เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขายคาร์บอนเครดิตในรูป CERs ให้กับประเทศอุตสาหกรรมที่มีพันธกรณีในการลดก๊าซเรือนกระจกตามพิธีสารเกียวโต⁽²⁶⁾ สามารถคำนวณปริมาณเทียบเท่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ตันต่อปี) ได้โดยนำปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ลดลง มาคำนวณมูลค่าการขายคาร์บอนเครดิตได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} & \text{ปริมาณเทียบเท่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ตันต่อปี) เท่ากับ} \\ & \text{ปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ลดลง (เมกกะวัตต์ชั่วโมง) x 0.561}^{(27)} \\ & \text{มูลค่าการขายคาร์บอนเครดิต เท่ากับ} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณเทียบเท่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ตันต่อปี) x มูลค่าของ CERs}$$

4) การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายของระบบการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ในการอบผลิตภัณฑ์ โดยค่าใช้จ่ายของระบบประกอบด้วย

- เงินลงทุน อันได้แก่ ค่าก่อสร้างระบบการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ในการอบผลิตภัณฑ์, ค่าเครื่องจักรอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ท่อส่งความร้อน ฉนวนกันความร้อน ค่าที่ปรึกษาออกแบบและเดินระบบ ค่าจ้างในการเตรียมเอกสารการออกแบบระบบ ค่าจ้างหน่วยงานตรวจสอบเอกสารโครงการ และค่าใช้จ่ายอื่นๆ
- ค่าใช้จ่ายรายปี ซึ่งประกอบด้วย ค่าไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ควบคุมการทำงานในระบบ ค่าแรงงานดูแลระบบ ค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและระบบส่งผ่านความร้อน ค่าใช้จ่ายในการบริหาร ค่าจ้างหน่วยงานติดตามและตรวจสอบการดำเนินโครงการ

3.5.2 การวิเคราะห์ทางการเงิน

ในการประเมินค่าโครงการลงทุนจะต้องมีการรวบรวมข้อมูลกระแสเงินสดที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กระแสเงินสดจ่ายจากการลงทุนเริ่มแรก กระแสเงินสดจากการดำเนินงาน และกระแสเงินสดเมื่อสิ้นสุดโครงการแล้ว จากนั้นทำการเปรียบเทียบระหว่างรายรับกับรายจ่ายเพื่อตัดสินใจว่าจะปฏิเสธหรือยอมรับโครงการ⁽²⁸⁾ ในการศึกษาี้ กำหนดให้มีตัววัดทางการเงิน คือ ค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนจากโครงการ และระยะเวลาการคืนทุน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

1) ค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value หรือ NPV) คือ ผลต่างระหว่างค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับที่คาดว่าจะได้รับจากการลงทุนแต่ละปีตลอดอายุโครงการเปรียบเทียบกับกระแสเงินสดจ่ายของเงินลงทุน

$$NPV = B - C \quad (3-2)$$

โดย

NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value)

B คือ มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับ

C คือ มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดจ่าย

จากข้อมูลข้างต้นโครงการมีความเป็นไปได้อยู่ 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 $NPV = 0$ หมายความว่า ผลตอบแทนมีค่าเท่ากับต้นทุน หรือจุดคุ้มทุน
โครงการไม่มีผลกำไรหรือขาดทุน

กรณีที่ 2 $NPV > 0$ หมายความว่า ผลตอบแทนมีค่ามากกว่าต้นทุน โครงการมีผลกำไร

กรณีที่ 3 $NPV < 0$ หมายความว่า ผลตอบแทนมีค่าน้อยกว่าต้นทุน โครงการขาดทุน

จากสมการที่ 1 เป็นการพิจารณาโครงการที่มีการลงทุนเพียงแค่ปีเดียว ถ้าโครงการมีการลงทุนมากกว่า 1 ปีขึ้นไป กระแสเงินสดรับหรือผลตอบแทนจะมีหลายจำนวน ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - I \quad (3-3)$$

โดย

NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

CF_t คือ กระแสเงินสดรับสุทธิรายปี (Annual net cash flow) ตลอดอายุโครงการ

t คือ อายุของโครงการ

I คือ เงินสดจ่ายลงทุนเริ่มแรก

K คือ อัตราผลตอบแทนที่ต้องการจากการลงทุน

ในการตัดสินใจจะยอมรับโครงการที่ค่า NPV มากกว่าศูนย์ ซึ่งหมายความว่าผลตอบแทนที่ได้รับนั้นคุ้มค่าต่อการลงทุน

2) อัตราผลตอบแทนจากโครงการลงทุน (Internal Rate of Return หรือ IRR) คือ อัตราผลตอบแทนเฉลี่ยต่อปีที่ผู้ลงทุนจะได้รับจากการลงทุนในโครงการนั้นตลอดอายุการลงทุน หรือหมายถึงอัตราดอกเบี้ยใดๆ ที่ใช้เป็นอัตราคิดลดซึ่งมีผลทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยอัตราผลตอบแทนภายในโครงการนี้จะทำการศึกษาดังนี้

Financial Internal Rate of Return (FIRR) เป็นการวิเคราะห์โครงการด้านการเงินเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าเสียโอกาสของทุน หรืออัตราดอกเบี้ยเงินกู้ยืม ถ้าหาก FIRR มีค่ามากกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ยืม แสดงว่าโครงการนั้นมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนทางการเงิน โดยสูตรการคำนวณหาค่า IRR นั้นมีดังนี้

$$\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} = I \quad (3-4)$$

การคำนวณค่า r ทำได้โดยการทดลองแบบลองผิดลองถูก (Trial and error) โดยจะยอมรับโครงการที่ค่า IRR มากกว่าผลตอบแทนขั้นต่ำจากการลงทุน (Minimum Attractive Rate of Return หรือ MARR) ซึ่งหมายความว่าผลตอบแทนที่ได้รับนั้นคุ้มค่าต่อการลงทุน

3) ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) คือ ระยะเวลาการดำเนินงานโครงการที่ทำให้ผลตอบแทนสุทธิของโครงการ มีค่าเท่ากับค่าใช้จ่ายในการลงทุนพอดี หรืออาจกล่าวได้ว่า ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ คือ จำนวนปีในการดำเนินงานซึ่งทำให้ผลกำไรที่ได้รับในแต่ละปีรวมกันแล้ว มีค่าเท่ากับเงินลงทุนเริ่มแรก

โดยระยะเวลาคืนทุน(จำนวนปี) สามารถคำนวณได้ตามสูตรการคำนวณดังนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรก}}{\text{ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี}}$$

หากโครงการมีระยะเวลาคืนทุนน้อยแสดงว่าเป็นโครงการที่มีความคุ้มค่าและมีความเสี่ยงน้อย เหมาะต่อสมการพิจารณาลงทุน

3.5.3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ

การศึกษาและวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการถือเป็นอีกหนึ่งข้อมูลในการสนับสนุนผลการวิจัย เกี่ยวกับการตัดสินใจว่าจะลงทุนหรือไม่ลงทุนโครงการในกรณีที่ตัวแปรของโครงการเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีผลกระทบต่อต้นทุนและผลกำไรของโครงการ และนำตัวแปรดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์ว่ามีผลกระทบต่อโครงการในด้านใด โดยการศึกษาครั้งนี้ จะทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ ซึ่งกำหนดให้ตัวแปรมีการเปลี่ยนแปลง 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 เมื่อตัวแปรทางต้นทุนเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้ต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ในขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่ ตามสภาวะความผันผวนของเศรษฐกิจที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน และการปรับตัวของตัวแปรที่มีผลต่อต้นทุนของโครงการ เช่น ราคาไฟฟ้า ราคาวัสดุและอุปกรณ์อื่นๆ ในการติดตั้งระบบที่เป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อต้นทุนของโครงการ

กรณีที่ 2 เมื่อตัวแปรทางผลกำไรเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้กำไรของโครงการลดลงร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ในขณะที่ต้นทุนของโครงการคงที่ จากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้เกิดเหตุขัดข้องของชุดอุปกรณ์ ตลอดจนการบำรุงรักษาเครื่อง ที่มีผลต่อการหยุดทำงานของระบบ

บทที่ 4

ผลดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยมีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์และเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมมาใช้ในการอบผลิตภัณฑ์เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งได้มีการเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับต้นทุนที่แท้จริงจากโรงงานและการคำนวณผลตอบแทนที่จะได้รับการลงทุน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการตัดสินใจลงทุนโครงการของโรงงานได้

4.1 การคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการของเครื่องอบผากระป๋อง

สามารถหาได้ดังนี้

การใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอบขนาด 15 กิโลวัตต์ จำนวน 20 เครื่องใน 1 ชั่วโมง

ขนาดเครื่องอบ (กิโลวัตต์)	จำนวน (เครื่อง)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
15	20	300

เวลาทำงานของเครื่องเท่ากับ 8 ชั่วโมง 35 นาทีต่อวัน และโรงงานกำหนดเดินเครื่อง 26 วันต่อเดือน

เวลาทำงานของเครื่องอบ (ชั่วโมง)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)		
	ต่อวัน	ต่อเดือน	ต่อปี
8 ชั่วโมง 35 นาที	2,579	67,056	804,679

เมื่อ 1 กิโลวัตต์ชั่วโมงเท่ากับ 3,410 บีทียู จะได้ค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ

เวลาทำงานของเครื่องอบ (ชั่วโมง)	พลังงานความร้อนที่ใช้ (บีทียู)		
	ต่อวัน	ต่อเดือน	ต่อปี
8 ชั่วโมง 35 นาที	8,794,731	228,663,006	2,743,956,072

เมื่อ 1 ปีที่ยูเท่ากับ 1,055 จูล จะได้ค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ

เวลาทำงานของ เครื่องอบ (ชั่วโมง)	พลังงานความร้อนที่ใช้ (กิโลจูล)		
	ต่อวัน	ต่อเดือน	ต่อปี
8 ชั่วโมง 35 นาที	9,278,441	241,239,471	2,894,873,655

กำหนดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 3.50 บาท จะได้ค่าไฟฟ้าที่ต้องจ่ายเท่ากับ

เวลาทำงานของ เครื่องอบ (ชั่วโมง)	ค่าไฟฟ้า (บาท)		
	ต่อวัน	ต่อเดือน	ต่อปี
8 ชั่วโมง 35 นาที	9,026	234,698	2,816,377

4.2 การคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่เกิดจากความร้อนเหลือทิ้งของเครื่องเคลือบผิวกระป๋อง

สามารถหาได้ดังนี้

$$Q = mc(T_{in} - T_{out}) \quad (3-2)$$

โดยที่

Q คือ ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อน (บีทียู/ชั่วโมง)

m คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อน (ลูกบาศก์ฟุต/ชั่วโมง)

T_{in} คือ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (องศาฟาเรนไฮต์)

T_{out} คือ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (องศาฟาเรนไฮต์)

ค่าคงที่สำหรับการคำนวณ

c คือ ค่าความจุความร้อนของอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 752 องศาฟาเรนไฮต์

มีค่าเท่ากับ 0.244 บีทียู/ปอนด์-ฟาเรนไฮต์

p คือ ความหนาแน่นของอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 752 องศาฟาเรนไฮต์

มีค่าเท่ากับ 0.047 ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต

จากข้อมูลอุณหภูมิที่วัดได้จากปล่องไอเสียของเครื่องเคลือบผิวกระป๋องได้เท่ากับ 752 องศาฟาเรนไฮต์ และอุณหภูมิสภาพแวดล้อมเท่ากับ 95 องศาฟาเรนไฮต์ และวัดจำนวนลมจากปล่องไอเสียได้เท่ากับ 741,608 ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง ดังนั้น จะได้ค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ

$$\begin{aligned} Q(\text{บีทียู/ชั่วโมง}) &= 741,608(\text{ลูกบาศก์ฟุต/ชั่วโมง}) \times 0.047(\text{ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต}) \\ &\quad \times 0.244(\text{บีทียู/ปอนด์-ฟาเรนไฮต์}) \times (752 - 95)(\text{ฟาเรนไฮต์}) \\ &= 5,587,627 \text{ บีทียู/ชั่วโมง} \end{aligned}$$

จากค่าความร้อนทั้งที่ได้จากเครื่องเคลือบกระเบื้องพบว่า ค่าความร้อนดังกล่าวมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ทดแทนความร้อนที่จ่ายให้เครื่องอบฝากระเบื้องได้

4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมกับโครงการ

จากตาราง 8 พบว่าความเหมาะสมด้านการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเพลตมีน้ำหนักเบาติดตั้งได้ง่ายแต่ความร้อนต้องผ่านเข้าตัวอุปกรณ์ทำให้เกิดแรงดันย้อนกลับเข้าสู่ระบบได้และอุณหภูมิการใช้งานไม่ได้ตามข้อกำหนดของโครงการ ส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อมีน้ำหนักค่อนข้างมากไม่เหมาะแก่การติดตั้งในที่สูงหรือที่มีพื้นที่จำกัดและความร้อนต้องผ่านเข้าตัวอุปกรณ์ทำให้เกิดแรงดันย้อนกลับเข้าสู่ระบบได้ และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบอีโคโนไมเซอร์มีน้ำหนักปานกลางและสามารถติดตั้งรอบปล่องความร้อนทั้งได้ ซึ่งสามารถลดการเกิดแรงดันย้อนกลับเข้าสู่ระบบได้ ความเหมาะสมด้านการบำรุงรักษา อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเพลตเกิดความสกปรกและการอุดตันของระบบได้ง่าย ส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อมีขนาดใหญ่จึงลดโอกาสการอุดตันและใช้แผ่นปะเก็นน้อยจึงลดโอกาสการรั่วซึมของระบบ และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบอีโคโนไมเซอร์ต้องดูแลเรื่องความสะอาดของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากการใช้งานอาจมีคราบสกปรกเกาะติดทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง⁽⁵⁾ ซึ่งการทำความสะอาดสามารถทำได้โดยการใช้ลมอัดหรือน้ำฉีดและใช้แปรงขัดทำความสะอาด จากการพิจารณาข้อมูลทั้งทางด้านความเหมาะสมด้านการติดตั้งและการบำรุงรักษาตามข้อกำหนดของโครงการจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบอีโคโนไมเซอร์มีความเหมาะสมในการใช้งานในโครงการนี้

ตาราง 8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน⁽⁵⁾

รายละเอียด	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน			หมายเหตุ
	แบบเพลต	แบบเปลือกและท่อ	แบบอีโคโนไมเซอร์	
อุณหภูมิใช้งาน (องศาฟาเรนไฮต์)	สูงสุด 392	-328 ถึง 1,112	สูงสุด 842 (คาร์บอน) สูงสุด 1,292 (สแตนเลส)	
ความดันใช้งาน (บาร์)	สูงสุด 30	สูงสุด 300	สูงสุด 20	

ตาราง 8 (ต่อ)

รายละเอียด	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน			
	แบบเพลต	แบบเปลือกและท่อ	แบบอีโคโนไมเซอร์	หมายเหตุ
พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (ตารางฟุต)	10 ถึง 13,454	107 ถึง 10,763	107 ถึง 10,763	ขึ้นกับความต้องการของการใช้งาน
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	3,500 ถึง 7,000 วัตต์/ตารางเมตร-เคลวิน	50 ถึง 2,000 วัตต์/ตารางเมตร-เคลวิน	50 ถึง 2,000 วัตต์/ตารางเมตร-เคลวิน	ขึ้นกับความต้องการของการใช้งาน
ข้อได้เปรียบ	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง สร้างเป็นชุดสำเร็จ มีหลายขนาด การบำรุงรักษาง่าย	โครงสร้างเป็นแบบง่าย ราคาถูก การรั่วซึมน้อย ทนต่ออุณหภูมิและแรงดันสูง	สามารถใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูง น้ำหนักปานกลาง บำรุงรักษาง่าย	
ข้อเสียเปรียบ	เกิดความสกปรกง่าย ไม่สามารถใช้กับงานที่มีความดันและอุณหภูมิสูง	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำ มีขนาดค่อนข้างใหญ่ มีน้ำหนักมาก	หากเชื้อเพลิงมีกำมะถันอาจเกิดการกัดกร่อน ราคาสูง	

4.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของชนิดของฉนวนที่เหมาะสมกับโครงการ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตาราง 9 พบว่าฉนวนชนิดใยแก้วโดยทั่วไปจะกันไฟไม่ได้แม้จะมีอุณหภูมิใช้งานสูงแต่ไม่ทนต่อความเปียกชื้นและการควบแน่นเป็นหยดน้ำโดยจะสูญเสียคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนไปเมื่อเปียกชื้น ฉนวนชนิดใยหินประเภทที่ไม่มีสารประกอบของแร่ใยหินที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ มีคุณสมบัติในการกันความร้อนได้เทียบเท่ากับฉนวนใยแก้ว แต่สามารถทนไฟได้ดีกว่า จึงนำมาใช้เป็นฉนวนที่กันไฟได้ด้วยแต่มีข้อจำกัดคือไม่ทนทานต่อความเปียกชื้น ดังนั้นหากจะนำไปใช้งานควรห่อหุ้มด้วยวัสดุป้องกันความชื้น ส่วนฉนวนชนิดแคลเซียมซิลิเกตเป็นฉนวนกันความร้อนแบบเป็นโพรงหรือช่องกลวงประกอบด้วยไฮดรอกไซด์แคลเซียมซิลิเกตโดยระหว่างกรรมวิธีการผลิตไอน้ำจะเปลี่ยนรูปหินปูนและซิลิกาไปเป็นไฮดรอกไซด์แคลเซียมซิลิเกต ซึ่งเป็นวัสดุที่แข็งแรงทนทาน สามารถใช้ในการห่อหุ้มท่อและภาชนะที่มีอุณหภูมิสูงและจำเป็นต้องใช้วัสดุที่ทนต่อแรงอัดสูง จากการพิจารณาข้อมูลทั้งทางด้านคุณสมบัติและความเหมาะสมตามข้อกำหนดของโครงการ จะเห็นได้ว่าฉนวนแบบแคลเซียมซิลิเกตจึงเป็นฉนวนที่มีความเหมาะสมในการใช้งานในโครงการนี้

ตาราง 9 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนกันความร้อน⁽⁶⁾

ชนิดของฉนวน	ประเภท	อุณหภูมิใช้งาน ปลอดภัย (องศาฟาเรนไฮต์)	สภาพการนำ ความร้อน (วัตต์/ฟุต)	จุดเด่น
ใยแก้ว	ฉนวนแผ่น ทรงกระบอก ฉนวนแถบ	572 ถึง 662	0.15 ถึง 0.11 ไม่เกิน 0.10 ไม่เกิน 0.12	เป็นวัสดุฉนวนที่นิยมใช้กันมากที่สุด มีความสามารถในการรักษาอุณหภูมิได้ดี
ใยหิน	ฉนวนแผ่น ทรงกระบอก ฉนวนแถบ	752 ถึง 1,112	0.11 ถึง 0.13	เหมาะสมกับอุณหภูมิสูง ใช้เป็นฉนวนของหม้อไอน้ำ ถัง ท่อ และทางไฟ เป็นต้น
แคลเซียมซิลิเกต	ฉนวนแผ่น ทรงกระบอก	1,202	ไม่เกิน 0.16 ไม่เกิน 0.15	มีความแข็งแรงมากถ้าทำเป็นแบบสำเร็จรูป การติดตั้งและความทนทานได้ดี

4.5 การวิเคราะห์ขนาดท่อที่เหมาะสมกับโครงการ

ในการวิจัยครั้งนี้มีการพิจารณาขนาดท่อด้วยวิธีความเสียดทานเท่ากันทั้งระบบ (Equal Friction Method) โดยกำหนดให้ความสูญเสียความเสียดทานอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.7 นิ้วของน้ำ ต่อ 100 ฟุต และระบบมีความเร็วของอากาศสูงสุดไม่เกิน 3,200 ฟุต/นาที่⁽²⁹⁾ ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากโครงการตามภาพประกอบ 24 สามารถแสดงผลได้ดังตาราง 10

ตาราง 10 การวิเคราะห์ขนาดท่อที่ใช้ในโครงการจากการหาค่าความสูญเสียหลัก (Major Loss)

ท่อน	อัตราการไหล (ลูกบาศก์ฟุต/ นาที่)	ขนาด ท่อ (นิ้ว)	ความเร็ว (ฟุต/นาที่)	ความสูญเสียความ เสียดทานหลักต่อ 100 ฟุต (นิ้วน้ำ)	ความ ยาวท่อ (ฟุต)	ความดัน สูญเสีย (นิ้วของน้ำ)
AB	10,000	24	3,200	0.55	278.87	1.534
BC ₁	5,500	20	2,600	0.45	21.32	0.096
C ₁₂	5,000	18	2,900	0.62	4.92	0.030
C ₂₃	4,500	18	2,600	0.50	4.92	0.024
C ₃₄	4,000	18	2,300	0.40	4.92	0.019
C ₄₅	3,500	16	2,600	0.56	4.92	0.028
C ₅₆	3,000	16	2,150	0.40	4.92	0.019
C ₆₇	2,500	14	2,400	0.60	4.92	0.029
C ₇₈	2,000	14	2,000	0.40	4.92	0.019
C ₈₉	1,500	12	2,000	0.50	4.92	0.024
C ₉₁₀	1,000	10	2,000	0.60	4.92	0.029
C ₁₀₁₁	500	8	1,500	0.45	4.92	0.022
BD ₁	4,500	18	2,600	0.50	54.11	0.270
D ₁₂	4,000	18	2,300	0.40	4.92	0.019

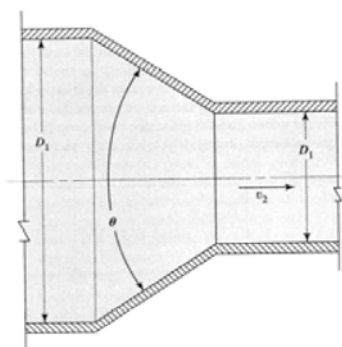
ตาราง 10 (ต่อ)

ท่อน	อัตราการไหล (ลูกบาศก์ฟุต/ นาทีก)	ขนาด ท่อ (นิ้ว)	ความเร็ว (ฟุต/นาทีก)	ความสูญเสียความ เสียดทานหลักต่อ 100 ฟุต (นิ้วน้ำ)	ความ ยาวท่อ (ฟุต)	ความดัน สูญเสีย (นิ้วของน้ำ)
D ₂₃	3,500	16	2,600	0.56	4.92	0.028
D ₃₄	3,000	16	2,150	0.40	4.92	0.019
D ₄₅	2,500	14	2,400	0.60	4.92	0.029
D ₅₆	2,000	14	2,000	0.40	4.92	0.019
D ₆₇	1,500	12	2,000	0.50	4.92	0.024
D ₇₈	1,000	10	2,000	0.60	4.92	0.029
D ₈₉	500	8	1,500	0.45	4.92	0.022
ความดันสูญเสียหลักของระบบ						2.366

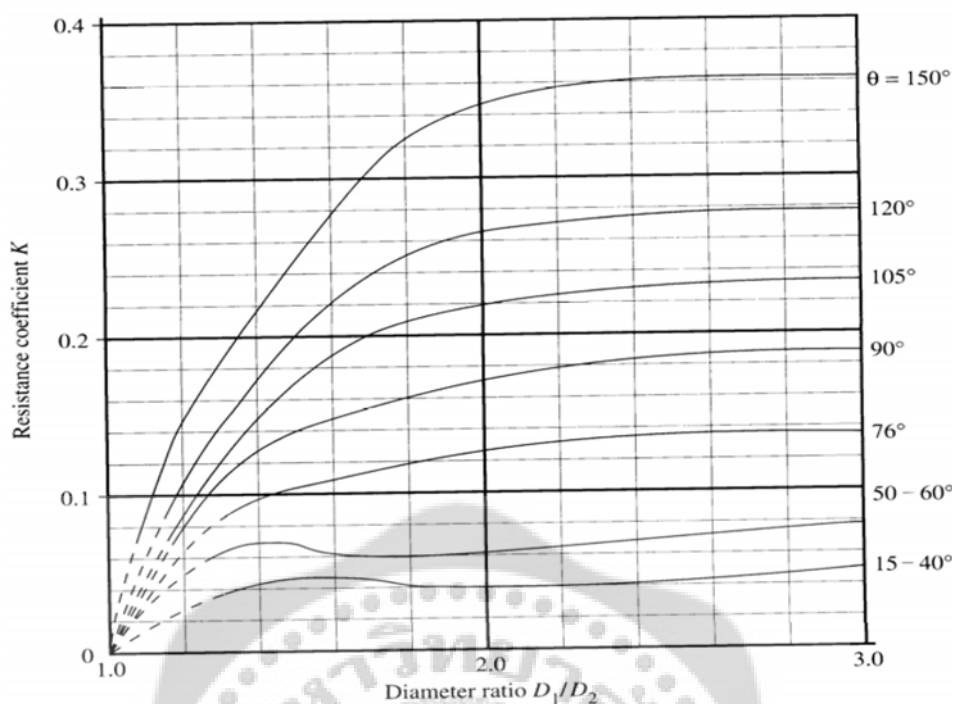
การวิเคราะห์ขนาดท่อที่ใช้ในโครงการจากการหาค่าความดันสูญเสียรอง (Minor Loss)

จากสมการ $h_f = k(V/4000)^{2(30)}$ ซึ่งประกอบด้วย

- 1) ข้อต่อสามทางท่อหลัก ค่า $k = 0.1$
- 2) ข้องอท่อหลัก ค่า $k = 0.22$
- 3) ข้อต่อลดขนาดมุม 30 องศา ค่า k แสดงดังภาพประกอบที่ 4-1



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 22(ก) และ (ข) ความดันสูญเสียรองจากการลดพื้นที่หน้าตัดท่อ (31)

ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากโครงการตามภาพประกอบ 22(ก) และ (ข) สามารถแสดงผลได้ดังตาราง 11, 12 และ 13

ตาราง 11 การวิเคราะห์ขนาดท่อที่ใช้ในโครงการจากการหาความสูญเสียรอง (Minor Loss) ของข้อต่อสามทาง

ท่อน	อัตราการไหล (ลูกบาศก์ฟุต/ นาทีก)	ขนาด ท่อ (นิ้ว)	ความเร็ว (ฟุต/นาทีก)	ความสูญเสียความ เสียดทานรองของข้อ ต่อสามทางต่อ 100 ฟุต (นิ้วของน้ำ)	ความดันสูญเสีย (นิ้วของน้ำ)
B	10,000	24	3,200	0.10	0.064
C ₁	5,500	20	2,600	0.10	0.042
C ₂	5,000	18	2,900	0.10	0.052
C ₃	4,500	18	2,600	0.10	0.042

ตาราง 11 (ต่อ)

ท่อ	อัตราการไหล (ลูกบาศก์ฟุต/ นาทีก)	ขนาด ท่อ (นิ้ว)	ความเร็ว (ฟุต/นาทีก)	ความสูญเสียความ เสียดทานรองของข้อ ต่อสามทางต่อ 100 ฟุต (นิ้วของน้ำ)	ความดันสูญเสีย (นิ้วของน้ำ)
C ₄	4,000	18	2,300	0.10	0.033
C ₅	3,500	16	2,600	0.10	0.042
C ₆	3,000	16	2,150	0.10	0.029
C ₇	2,500	14	2,400	0.10	0.036
C ₈	2,000	14	2,000	0.10	0.025
C ₉	1,500	12	2,000	0.10	0.025
C ₁₀	1,000	10	2,000	0.10	0.025
D ₁	4,500	18	2,600	0.10	0.042
D ₂	4,000	18	2,300	0.10	0.033
D ₃	3,500	16	2,600	0.10	0.042
D ₄	3,000	16	2,150	0.10	0.029
D ₅	2,500	14	2,400	0.10	0.036
D ₆	2,000	14	2,000	0.10	0.025
D ₇	1,500	12	2,000	0.10	0.025
D ₈	1,000	10	2,000	0.10	0.025
ความดันสูญเสียรองของข้อต่อสามทาง					0.673

ตาราง 12 การวิเคราะห์ขนาดท่อที่ใช้ในโครงการจากการหาค่าความสูญเสียรอง (Minor Loss) ของข้องอ

ท่อน	อัตราการไหล (ลูกบาศก์ฟุต/ นาทีก)	ขนาด ท่อ (นิ้ว)	ความเร็ว (ฟุต/นาทีก)	ความสูญเสียความ เสียดทานรองของข้อ งอต่อ 100 ฟุต (นิ้ว ของน้ำ)	ความดันสูญเสีย (นิ้วของน้ำ)
AB	10,000	24	3,200	0.22	0.141
BD	4,500	18	2,600	0.22	0.093
C11	500	8	1,500	0.22	0.031
D9	500	8	1,500	0.22	0.031
ความดันสูญเสียรองของข้องอ					0.295

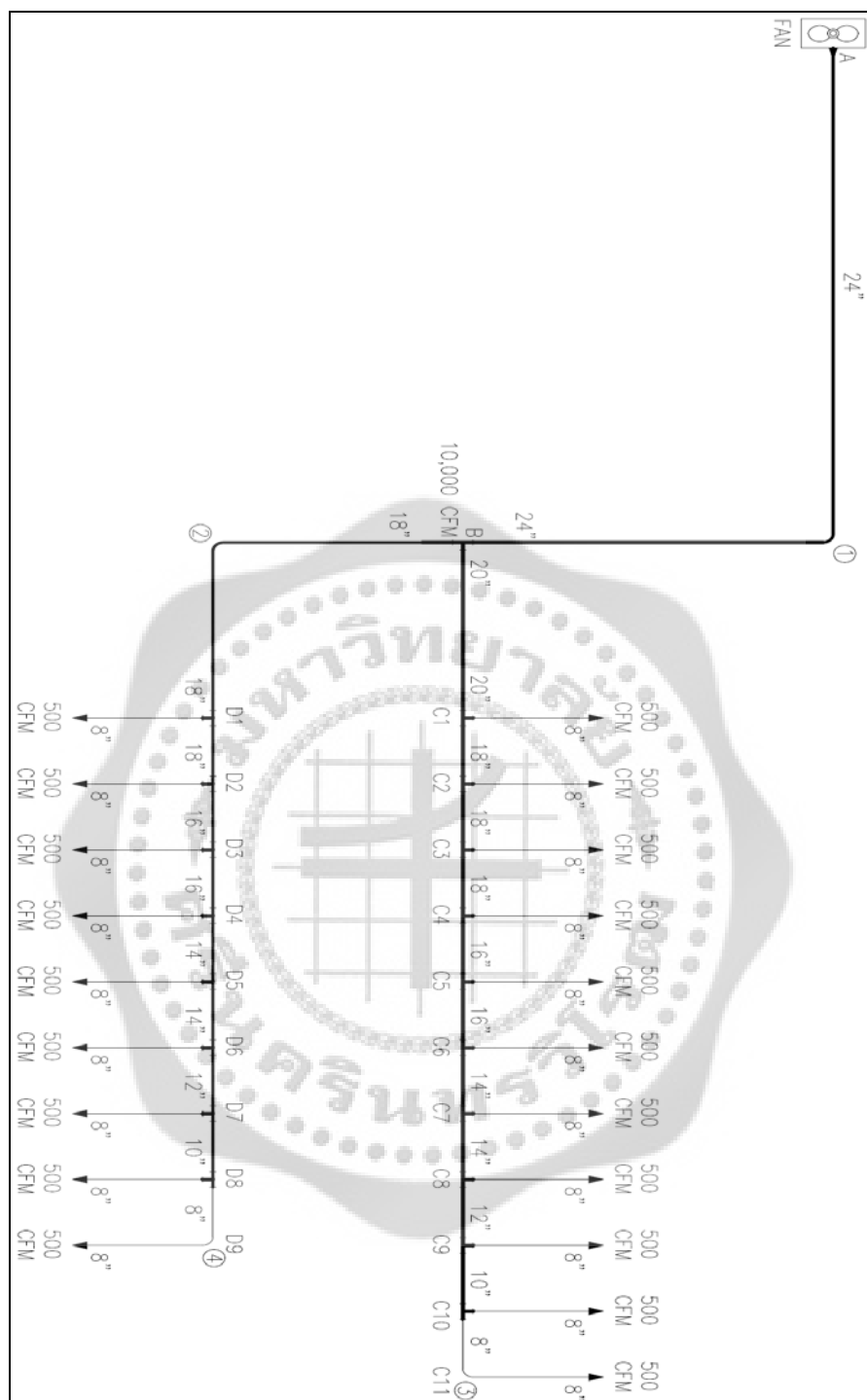
ตาราง 13 การวิเคราะห์ขนาดท่อที่ใช้ในโครงการจากการหาค่าความสูญเสียรอง (Minor Loss) ของข้อต่อลดขนาดมุม 30 องศา

ขนาด ท่อลด (D1/D2) (นิ้ว)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์ฟุต/ นาทีก)	จำนวน ข้อต่อ (ชิ้น)	ความเร็ว (ฟุต/นาทีก)	ความสูญเสียความ เสียดทานรองของ ข้อต่อลดขนาดต่อ 100 ฟุต (นิ้วของน้ำ)	ความดัน สูญเสีย (นิ้วของน้ำ)
24/20	5,500	1	3,200	0.04	0.025
24/18	4,500	1	3,200	0.02	0.016
20/18	5,000	1	2,600	0.04	0.018
20/8	500	1	2,600	0.02	0.008
18/8	500	1	2,900	0.04	0.021
18/8	500	2	2,600	0.04	0.038

ตาราง 13 (ต่อ)

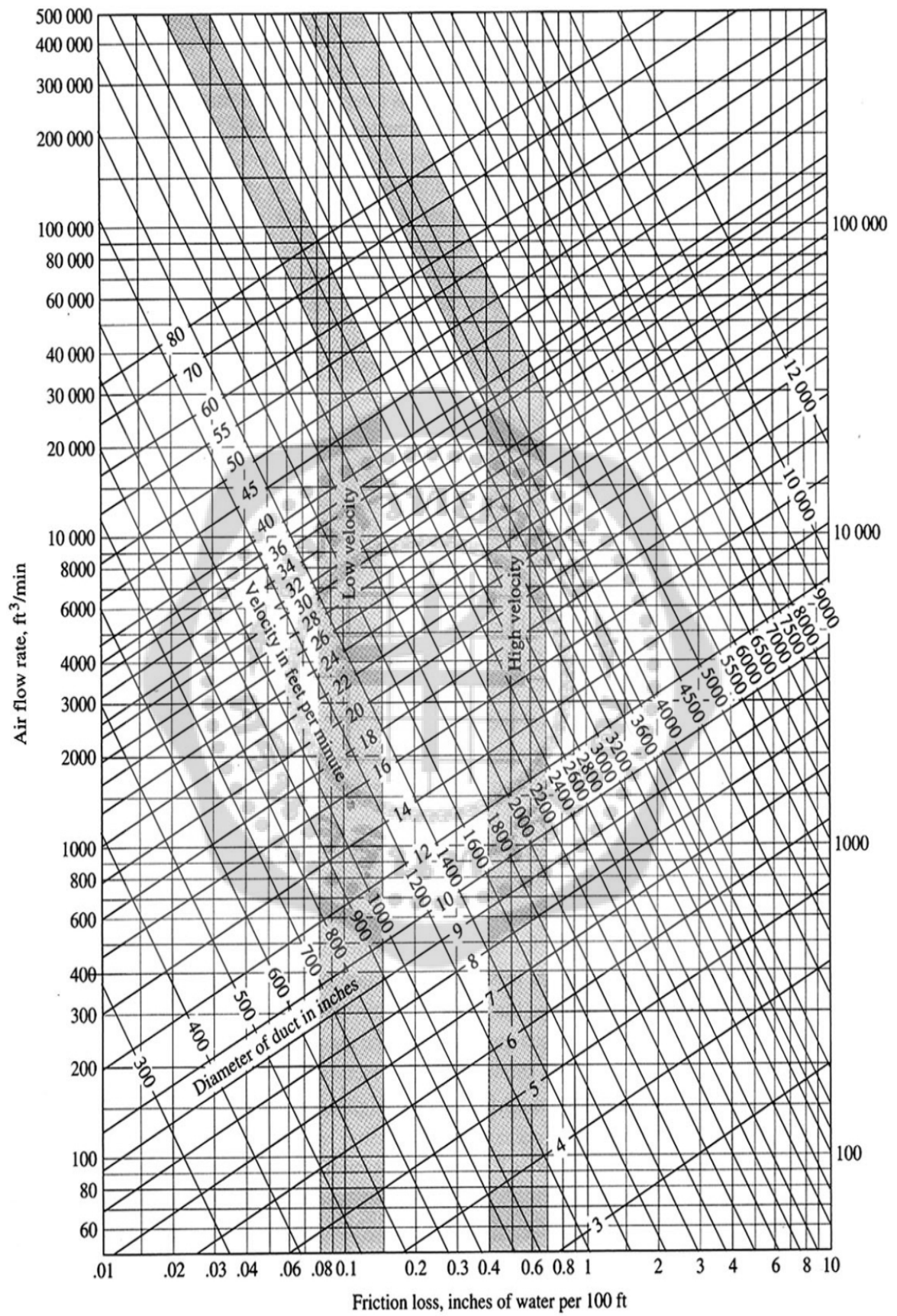
ขนาด ท่อลด (D1/D2) (นิ้ว)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์ฟุต/ นาทีก)	จำนวน ข้อต่อ (ชิ้น)	ความเร็ว (ฟุต/นาทีก)	ความสูญเสียความ เสียดทานรองของ ข้อต่อลดขนาดต่อ 100 ฟุต (นิ้วของน้ำ)	ความดัน สูญเสีย (นิ้วของน้ำ)
18/8	500	2	2,300	0.04	0.026
18/16	3,500	2	2,300	0.02	0.013
16/8	500	2	2,600	0.04	0.033
16/8	500	2	2,150	0.04	0.023
16/14	2,500	2	2,150	0.02	0.011
14/8	500	2	2,400	0.04	0.030
14/8	500	2	2,000	0.04	0.021
14/12	1,500	2	2,000	0.02	0.010
12/8	500	2	2,000	0.04	0.022
12/10	1,000	2	2,000	0.02	0.012
10/8	500	2	2,000	0.03	0.015
10/8	500	2	1,500	0.03	0.008
ความดันสูญเสียรองของข้อต่อลดขนาด 30 องศา					0.354

ผลการวิเคราะห์ความดันสูญเสียจากตาราง 10, 11, 12 และ 13 จะได้ความดันสูญเสียเท่ากับ 3.6895 นิ้วของน้ำ เมื่อนำมาคิดรวมกับค่าความปลอดภัยที่ 25 เปอร์เซ็นต์จะได้ความดันสูญเสียรวมเท่ากับ 4.6118 นิ้วของน้ำ ซึ่งสามารถนำมาแสดงในรูปแผนภูมิดังภาพประกอบ 23

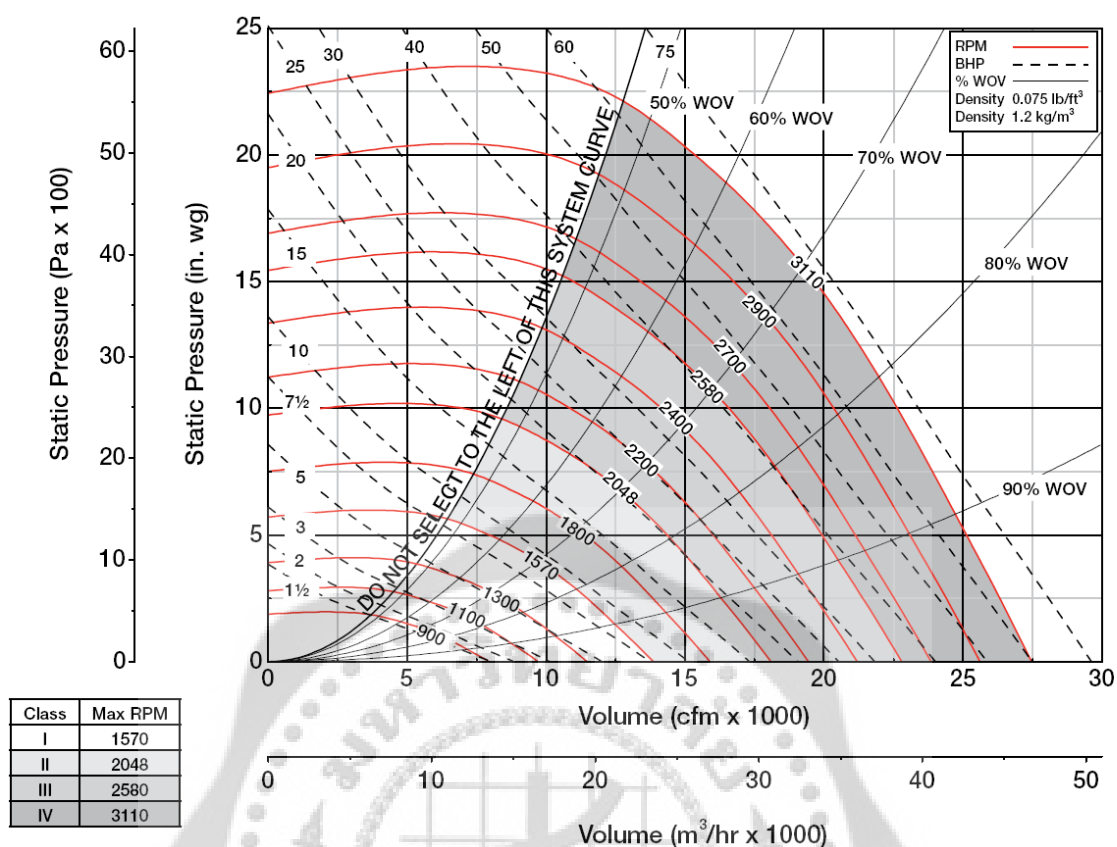


ภาพประกอบ 23 แผนภูมิแสดงขนาดท่อที่ใช้ในโครงการ

ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการเลือกขนาดของพัดลมที่จะนำมาใช้ในระบบได้ โดยขนาดของพัดลมที่สามารถใช้ได้ต้องมีความดันไม่น้อยกว่าความดันสูญเสียที่กำหนดคือ 4.612 นิ้วของน้ำ ในการวิจัยนี้ได้เลือกพัดลมแบบหมุนเหวี่ยงชนิดใบพัดโค้งไปข้างหลัง เนื่องจากพัดลมชนิดนี้จะไม่มีลักษณะที่มอเตอร์จะทำงานเกินกำลัง ไม่มีช่วงการทำงานของพัดลมที่ไม่มีเสถียรภาพ และมีประสิทธิภาพการทำงานสูง



ภาพประกอบ 24 แผนภูมิแสดงการสูญเสียในท่อลมเนื่องจากความเสียดทาน (29)



ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงสมรรถนะของพัดลมแบบหมุนเหวี่ยงชนิดใบพัดโค้งไปข้างหลัง⁽³²⁾

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากตาราง 10, 11, 12 และ 13 มาพิจารณาร่วมกับข้อมูลจากภาพประกอบ 25 เพื่อใช้ในการเลือกขนาดของพัดลม จะได้รายละเอียดดังตาราง 14

ตาราง 14 ขนาดพัดลมที่ใช้ในโครงการ

ลำดับที่	รายละเอียด	ปริมาณ	หน่วย
1	ขนาดท่อใช้งาน	24	นิ้ว
2	อัตราการไหลของอากาศร้อน	10,000	ลูกบาศก์ฟุต/นาที
3	แรงม้าเบรคป้อนเข้า	13.50	แรงม้า
4	ประสิทธิภาพทางกล	65.0	เปอร์เซ็นต์
5	ความเร็วรอบ	1800	รอบ/นาที
6	ความดันสถิต	7.0	นิ้วของน้ำ

จากตาราง 14 พบว่าพัดลมที่นำมาพิจารณานั้น มีขนาดและคุณสมบัติตรงตามข้อกำหนดในการพิจารณาใช้งานของโครงการนี้

4.6 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายของระบบการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ในการอบผลิตภัณฑ์

4.6.1 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโครงการซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ค่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอีโคโนไมเซอร์ 1 เครื่องพร้อมการติดตั้ง
- ค่าฉนวนเคลือบซีเมนต์ซีลิกเกต พร้อมการติดตั้ง
- ค่าท่อความร้อนและพัดลมเป่าอากาศ พร้อมการติดตั้ง
- ค่าดำเนินการด้านเอกสารการก่อสร้างและค่าอบรมพนักงานดูแลเครื่อง

โดยรายละเอียดค่าใช้จ่ายของระบบประกอบด้วยตามตาราง 15

ตาราง 15 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโครงการ

ประเภท	รายละเอียด	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท)	รวม (บาท)
1. ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง	ค่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอีโคโนไมเซอร์แบบอากาศต่ออากาศ พร้อมการติดตั้ง	1 เครื่อง	700,000	700,000
	ค่าฉนวนเคลือบซีเมนต์ซีลิกเกต พร้อมการติดตั้ง	1 ชุด	627,500	625,000
	ค่าท่อความร้อน ซัพพอร์ทท่อน็อต และปะเก็น พร้อมการติดตั้ง	1 ชุด	900,000	900,000
	ค่าพัดลมเป่าอากาศขนาด พร้อมการติดตั้ง	1 ชุด	150,000	150,000
	ค่าที่ปรึกษาออกแบบและเดินระบบ	1 ชุด	300,000	300,000
	ค่าจัดเตรียมเอกสารการออกแบบระบบ	1 ชุด	100,000	100,000
	ค่าอบรมพนักงานดูแลเครื่อง	4 คน	25,000	100,000
รวม				2,875,000

4.6.2 ค่าใช้จ่ายรายปีของโครงการซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ค่าไฟฟ้าสำหรับพัดลมเป่าอากาศ จำนวน 1 เครื่อง
- ค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์กำหนด 1 ครั้งต่อปี

โดยรายละเอียดค่าใช้จ่ายของระบบประกอบด้วยตามตาราง 16

ตาราง 16 ค่าใช้จ่ายรายปีของโครงการ

ประเภท	รายละเอียด	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท)	รวม (บาท)
2. ค่าใช้จ่ายรายปี	ค่าไฟฟ้าสำหรับพัดลมเป่าอากาศ ต่อปี	1 ชุด	330,000	330,000
	ค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่อปี	1 ชุด	50,000	50,000
รวม				380,000

จากตาราง 15 และ 16 สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายของโครงการดังนี้

1. ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโครงการเท่ากับ 2,875,000 บาท
 2. ค่าใช้จ่ายรายปีของโครงการเท่ากับ 380,000 บาท
- ดังนั้น ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของโครงการเท่ากับ 3,255,000 บาท

4.7 การวิเคราะห์ด้านการเงิน

4.7.1 ค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value, NPV)

คำนวณได้จากสมการ

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - I \quad (3-3)$$

โดย

CF_t = กระแสเงินสดรับสุทธิรายปี (Annual net cash flow) เท่ากับ 2,436,377 บาทตลอดอายุโครงการ 10 ปี

t = 10 ปี

I = เงินสดจ่ายลงทุนเริ่มแรกเท่ากับ 3,255,000 บาท

k = อัตราผลตอบแทนที่ต้องการจากการลงทุนเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์

โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์จะได้เท่ากับ

$$NPV = 5,444,092 \text{ บาท}$$

จากผลการคำนวณพบว่าค่า $NPV > 0$ ซึ่งหมายความว่าผลตอบแทนที่ได้รับนั้นคุ้มค่าต่อการลงทุน

4.7.2 อัตราผลตอบแทนจากโครงการลงทุน (Internal Rate of Return, IRR)

คำนวณได้จากสมการ

$$\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} = I \quad (3-4)$$

โดย

CF_t = กระแสเงินสดรับสุทธิรายปี (Annual net cash flow) เท่ากับ 2,436,377

บาทตลอดอายุโครงการ 10 ปี

$t = 10$ ปี

I = เงินสดจ่ายลงทุนเริ่มแรกเท่ากับ 3,255,000 บาท

การคำนวณค่า r ทำได้โดยการทดลองแบบลองผิดลองถูก (Trial and Error) โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ได้เท่ากับ

$IRR = 74.57$ เปอร์เซ็นต์

กำหนดอัตราผลตอบแทนจากโครงการลงทุน r เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสมควรพิจารณาโครงการนี้เนื่องจากค่า เปอร์เซ็นต์ $IRR > r$ ซึ่งหมายความว่าผลตอบแทนที่ได้รับนั้นคุ้มค่าต่อการลงทุน

4.7.3 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

คำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาคืนทุน} &= \frac{\text{เงินลงทุนของโครงการ}}{(\text{รายได้ของโครงการ} - \text{รายจ่ายของโครงการ})} \\ &= \frac{3,000,000 \text{ บาท}}{(2,816,377 - 380,000) \text{ บาท}} \\ &= 487 \text{ วัน หรือ } 1 \text{ ปี } 4 \text{ เดือน } 2 \text{ วัน} \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณระยะเวลาคืนทุนพบว่าใช้เวลาค่อนข้างน้อย ดังนั้นจึงเป็นโครงการที่มีความเสี่ยงน้อย และเหมาะสมต่อการพิจารณาลงทุน

4.8 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ

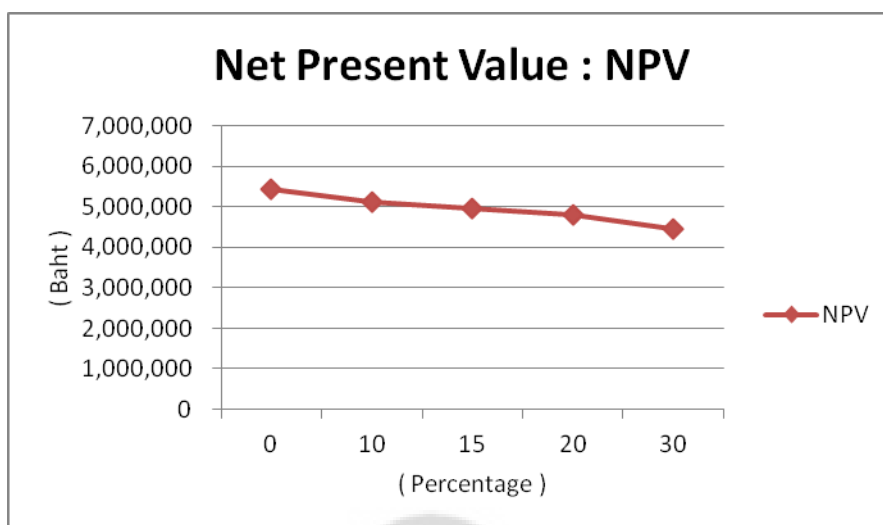
การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการก็เป็นอีกหนึ่งข้อมูลในการสนับสนุนการตัดสินใจว่าจะลงทุนหรือไม่ลงทุนโครงการในกรณีที่ตัวแปรของโครงการเกิดการเปลี่ยนแปลง และนำตัวแปรดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์ว่ามีผลกระทบต่อโครงการในด้านใด โดยการศึกษาครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ ซึ่งกำหนดให้ตัวแปรมีการเปลี่ยนแปลง 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 เมื่อตัวแปรทางต้นทุนเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้ต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ในขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่ และกรณีที่ 2 เมื่อตัวแปรทางผลกำไรเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้ผลกำไรของโครงการลดลงร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ในขณะที่ต้นทุนของโครงการคงที่

กรณีที่ 1 เมื่อตัวแปรทางต้นทุนเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้ต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ในขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่ มีผลการวิเคราะห์ดังนี้

ตาราง 17 ผลการศึกษาความอ่อนไหวของโครงการ กรณีที่ 1 ต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่

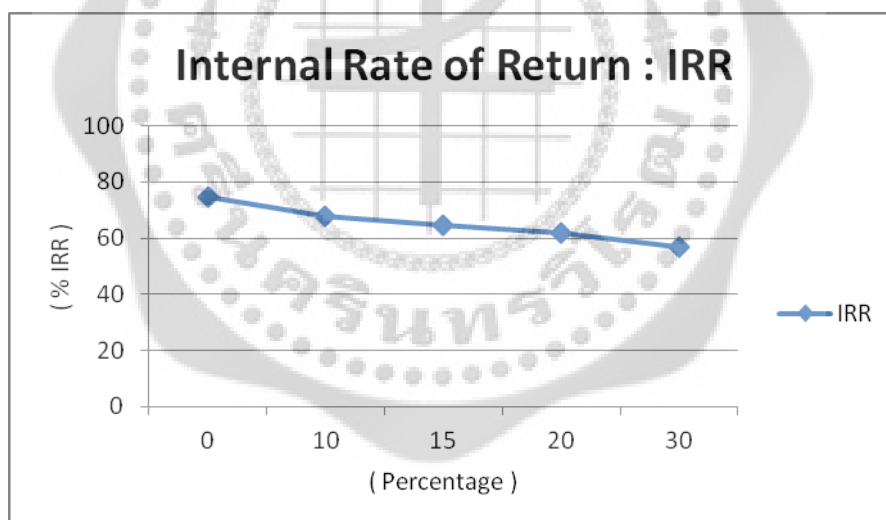
อัตราต้นทุนที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ)	ค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) (บาท)	อัตราผลตอบแทนจาก โครงการลงทุน (IRR) (เปอร์เซ็นต์)	ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) (วัน)
อัตราต้นทุนเดิม	5,444,092	74.57	487
10	5,118,592	67.66	536
15	4,955,842	64.46	560
20	4,793,092	61.87	585
30	4,467,592	56.94	633

จากผลการทดลองตามตาราง 17 พบว่าเมื่อต้นทุนของโครงการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าปัจจุบันสุทธิลดลงต่ำสุดที่ร้อยละ 30 เท่ากับ 4,467,592 บาท อัตราผลตอบแทนของโครงการลดลงต่ำสุดที่ร้อยละ 30 เท่ากับ 56.94 เปอร์เซ็นต์ รวมถึงระยะเวลาคืนทุนก็เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ร้อยละ 30 เท่ากับ 1 ปี 8 เดือน 28 วัน จากการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวพบว่าเมื่อต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ผลตอบแทนโดยรวมลดลงตามไปด้วย แต่ก็ยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการลงทุน เนื่องจากค่าปัจจุบันสุทธิ ยังมีค่ามากกว่า 0 อยู่มาก อัตราผลตอบแทนของโครงการก็ยังมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ที่ 25 เปอร์เซ็นต์ และระยะเวลาคืนทุนของโครงการก็ยังอยู่ในเกณฑ์น้อย ดังนั้นในกรณีที่ 1 โครงการนี้ยังมีความเหมาะสมต่อการพิจารณาลงทุน



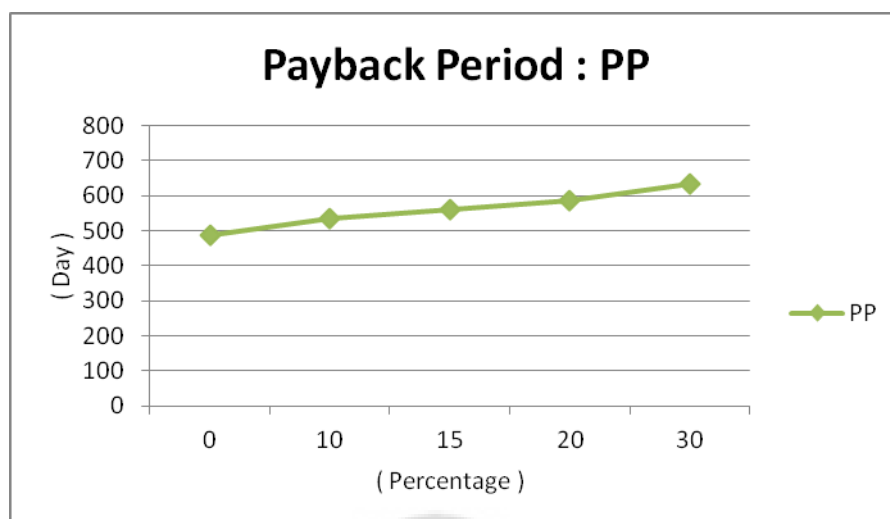
ภาพประกอบ 26 ค่าปัจจุบันสุทธิโครงการ กรณีที่ 1 ต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่

ผลการวิเคราะห์จากภาพประกอบ 26 พบว่าเมื่อต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าปัจจุบันสุทธิโครงการ (NPV) ก็จะลดลงตามไปด้วย



ภาพประกอบ 27 อัตราผลตอบแทนโครงการ กรณีที่ 1 ต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่

ผลการวิเคราะห์จากภาพประกอบ 27 พบว่าเมื่อต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราผลตอบแทนโครงการ (IRR) ก็จะลดลงตามไปด้วย



ภาพประกอบ 28 ระยะเวลาคืนทุนโครงการ กรณีที่ 1 ต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่

ผลการวิเคราะห์จากภาพประกอบ 28 พบว่าเมื่อต้นทุนของโครงการเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาคืนทุนโครงการ (Payback Period) ก็เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

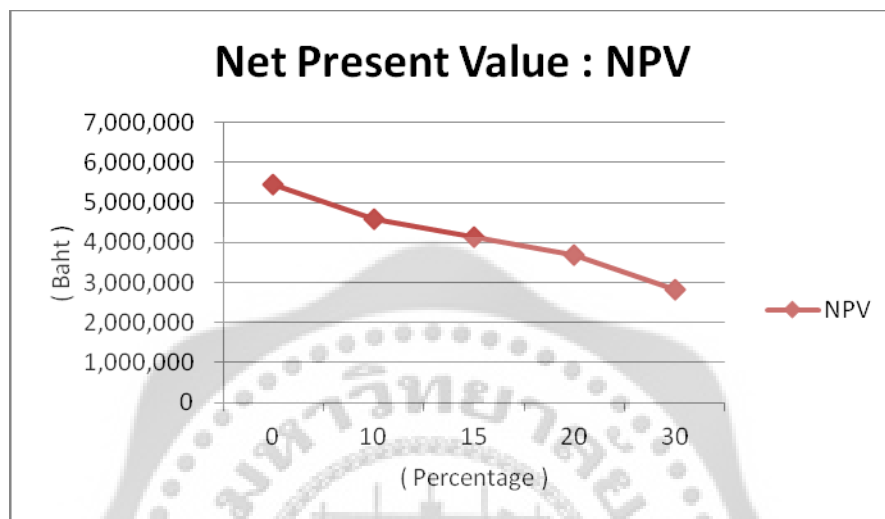
กรณีที่ 2 เมื่อตัวแปรทางผลกำไรเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้กำไรของโครงการลดลงร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ในขณะที่ต้นทุนของโครงการคงที่ มีผลวิเคราะห์ดังนี้

ตาราง 18 ผลการศึกษาความอ่อนไหวของโครงการ กรณีที่ 2 ผลกำไรของโครงการลดลงร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่

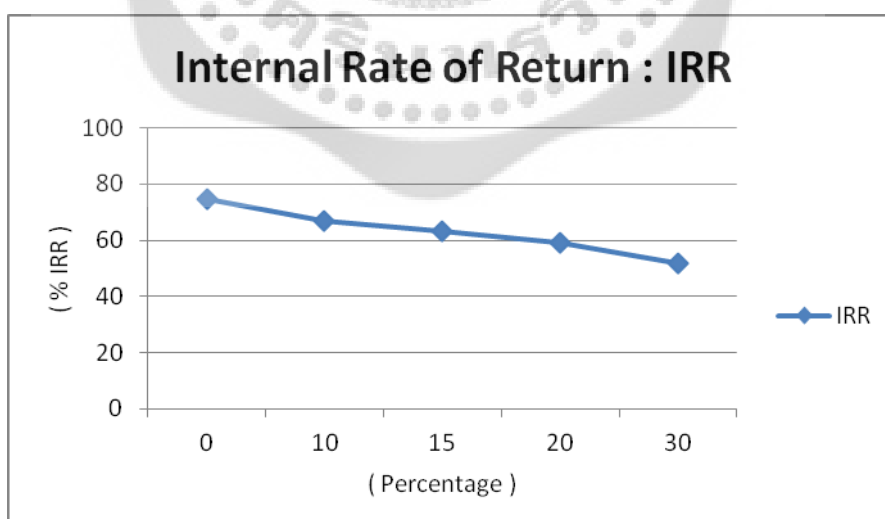
อัตรากำไรที่ลดลง (ร้อยละ)	ค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) (บาท)	อัตราผลตอบแทนจาก โครงการลงทุน (IRR) (เปอร์เซ็นต์)	ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) (วัน)
อัตราต้นทุนเดิม	5,444,092	74.57	487
10	4,574,183	66.97	551
15	4,139,228	63.15	589
20	3,704,274	59.31	634
30	2,834,364	51.58	746

จากผลการทดลองตามตาราง 18 พบว่าเมื่อผลกำไรของโครงการมีแนวโน้มลดลง จะส่งผลให้ค่าปัจจุบันสุทธิ ลดลงต่ำสุดที่ร้อยละ 30 เท่ากับ 2,834,364 บาท อัตราผลตอบแทนของโครงการ ลดลงต่ำสุดที่ร้อยละ 30 เท่ากับ 51.58 เปอร์เซ็นต์ รวมถึงระยะเวลาคืนทุน ก็เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ร้อยละ 30 เท่ากับ 2 ปี 16 วัน จากการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวพบว่าเมื่อผลกำไรของโครงการลดลงจะส่งผล

ให้ผลตอบแทนโดยรวมลดลงตามไปด้วย แต่ก็ยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการลงทุน เนื่องจากค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการยังมีค่ามากกว่า 0 อยู่มาก อัตราผลตอบแทนของโครงการก็ยังมีมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ที่ 25 เปอร์เซ็นต์ และระยะเวลาคืนทุนของโครงการก็ยังอยู่ในเกณฑ์น้อย ดังนั้นในกรณีที่ 2 โครงการนี้ก็ยังคงมีความเหมาะสมต่อการพิจารณาลงทุน

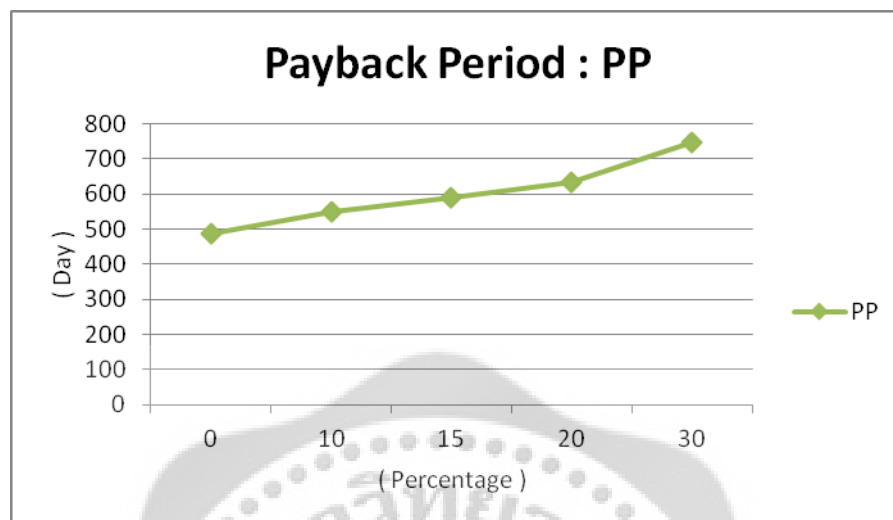


ภาพประกอบ 29 ค่าปัจจุบันสุทธิโครงการ กรณีที่ 2 ผลกำไรของโครงการลดลงร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่
จากภาพประกอบ 29 พบว่าเมื่อผลกำไรของโครงการลดลงจะส่งผลให้ค่าปัจจุบันสุทธิโครงการ (NPV) ก็จะลดลงตามไปด้วย



ภาพประกอบ 30 อัตราผลตอบแทนโครงการ กรณีที่ 2 ผลกำไรของโครงการลดลงร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่

จากภาพประกอบ 30 พบว่าเมื่อผลกำไรของโครงการลดลงจะส่งผลให้อัตราผลตอบแทนโครงการ (IRR) ก็จะลดลงตามไปด้วย



ภาพประกอบ 31 ระยะเวลาคืนทุนโครงการ กรณีที่ 2 ผลกำไรของโครงการลดลงร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ขณะที่ผลกำไรของโครงการคงที่

จากภาพประกอบ 31 พบว่าเมื่อผลกำไรของโครงการลดลงจะส่งผลให้ระยะเวลาคืนทุนโครงการ (Payback Period) ก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

4.9 การวิเคราะห์มูลค่าการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากผลที่ได้จากการคำนวณปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ลดลง สามารถนำมาคำนวณหาการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดังนี้

ปริมาณเทียบเท่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ตันต่อปี)

$$= \text{ปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ลดลง (เมกกะวัตต์ชั่วโมง)} \times 0.561$$

$$= (804.68 - 65.36) \times 0.561$$

$$= 739.32 \times 0.561$$

$$= 414 \text{ ตันต่อปี}$$

เมื่อมูลค่าการขายคาร์บอนเครดิตเท่ากับปริมาณเทียบเท่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ตันต่อปี) $\times$ มูลค่าของ CERs (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก. ราคาตลาดคาร์บอนรายสัปดาห์ระหว่างวันที่ 18 ถึง 22 กุมภาพันธ์ 2556 คิดราคาในกรณีที่มีการซื้อขายกันทันที) จะได้เท่ากับมูลค่าการขายคาร์บอนเครดิต

$$= \text{ปริมาณเทียบเท่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ตันต่อปี)} \times \text{มูลค่าของ CERs}$$

$$= 414 \times 0.12 \text{ ยูโรต่อปี}$$

$$= 49.68 \text{ ยูโรต่อปี}$$

เมื่อ 1 ยูโรเท่ากับ 37.9 บาท (ธนาคารกรุงไทย, อัตราแลกเปลี่ยนเงินตราต่างประเทศ ณ วันที่ 15 มีนาคม 2556) ดังนั้นจะได้เท่ากับ

$$= 49.68 \times 37.9 \text{ บาทต่อปี}$$

$$= 1,872 \text{ บาทต่อปี}$$

สรุปผลดำเนินการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกำเนิดความร้อนแก่เครื่องอบฝากระป๋อง พบว่ามีปริมาณเท่ากับ 366,477 บีทียู/ชั่วโมง ในขณะที่ค่าความร้อนเหลือทิ้งที่ได้จากเครื่องเคลือบผิวกระป๋องมีค่าเท่ากับ 5,587,626 บีทียู/ชั่วโมง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องเคลือบกระป๋องที่ได้มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้ทดแทนความร้อนที่จ่ายให้เครื่องอบฝากระป๋อง แทนการใช้ไฟฟ้าแบบเดิมได้ โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมกับโครงการนี้คือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอีโคโนไมเซอร์ ที่มีประสิทธิภาพอยู่ในระดับดีที่ 65 เปอร์เซ็นต์ มีอุณหภูมิการทำงานอยู่ในช่วงที่กำหนดคือ 752 องศาฟาเรนไฮต์ มีน้ำหนักอยู่ในระดับปานกลางและติดตั้งในพื้นที่จำกัดได้ ในขณะที่การบำรุงรักษาสามารถทำได้โดยใช้ลมอัดหรือน้ำฉีดและใช้แปรงขัดทำความสะอาดได้ ใช้งานร่วมกับฉนวนชนิดแคลเซียมซิลิเกต เนื่องจากมีคุณสมบัติทนทานต่อความร้อนสูงและความเปียกชื้น ไม่เผาไหม้ ไม่มีสารพิษ ไม่ผสมเส้นแร่ใยหินและเส้นใยสังเคราะห์อื่นๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย และใช้ร่วมกับท่อความร้อนเบอร์ 40 ซึ่งเป็นเบอร์มาตรฐานที่ใช้งานในอุตสาหกรรมทั่วไป และเมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางการเงินพบว่าค่าปัจจุบันสุทธิ ที่อัตราผลตอบแทน 25 เปอร์เซ็นต์มีค่าเท่ากับ 5.4 ล้านบาท ซึ่งมีค่ามากกว่าศูนย์ หมายความว่าผลตอบแทนที่ได้รับนั้นคุ้มค่าต่อการลงทุน อัตราผลตอบแทนจากโครงการลงทุนเท่ากับ 74.57 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราที่กำหนดไว้ที่ 25 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่าผลตอบแทนที่ได้รับนั้นคุ้มค่าต่อการลงทุน และระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 1 ปี 4 เดือน 2 วัน ซึ่งถือว่าน้อยและเหมาะสมต่อการลงทุน และเมื่อวิเคราะห์ถึงความอ่อนไหวของโครงการอันเกิดจากการเพิ่มขึ้นของต้นทุน หรือการลดลงของกำไรของโครงการผลที่ได้พบว่าอัตราผลตอบแทนของโครงการทั้งค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนจากโครงการลงทุน และระยะเวลาคืนทุน ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ชี้ให้เห็นว่าโครงการนี้เป็นโครงการที่ผู้ประกอบการสมควรพิจารณาลงทุนโครงการ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ศักยภาพโดยรวมของความเป็นไปได้ในการนำความร้อนทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องของบริษัท รอยแอลแคน อินดัสทรี จำกัด ที่พบว่ามี การปล่อยความร้อนเหลือทิ้งอุณหภูมิสูงออกสู่อากาศโดยไม่ได้มีการนำกลับมาใช้ใหม่ ในขณะที่ กระบวนการอบฝากระป๋องของโรงงานมีการใช้ความร้อนอุณหภูมิต่ำจากเครื่องกำเนิดความร้อน ด้วยไฟฟ้าในการอบฝากระป๋องซึ่งมีค่าใช้จ่ายต่อปีของกระบวนการค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อเป็นการลด การใช้พลังงานโดยรวมของโรงงาน ผู้วิจัยเล็งเห็นว่าค่าความร้อนทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิว กระป๋องมีอุณหภูมิสูงและน่าจะมีศักยภาพเพียงพอต่อการนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยในการศึกษาครั้งนี้ ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความร้อนทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องมาใช้ใน กระบวนการอบฝากระป๋องด้วยเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเป็นการศึกษาทั้งทางด้าน ศักยภาพทางด้านปริมาณและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

จากการวิจัยดังกล่าวพบว่าในด้านศักยภาพ ค่าความร้อนที่ได้จากกระบวนการเคลือบผิว กระป๋องมีศักยภาพเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการอบฝากระป๋องได้ และด้าน เศรษฐศาสตร์ โรงงานสามารถลดต้นทุนการผลิตของโรงงานได้มากเมื่อเทียบกับต้นทุนการก่อสร้าง ดังนั้นโครงการนี้จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับผู้ประกอบการโรงงานอื่นๆ ที่จะใช้เป็นข้อมูลตั้งต้น ในการศึกษาการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ภายในองค์กรให้เกิดประโยชน์สูงสุดและถือเป็นการลดการใช้ พลังงานโดยรวมของโรงงานและประเทศลงได้อีกหนึ่งแนวทาง

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยระดับต่อไป

เนื่องจากภายในโรงงานมีความร้อนเหลือทิ้งจากโรงเคลือบผิวกระป๋องอยู่อีกกว่า 4 เครื่องที่ยังไม่ได้มีการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และความร้อนที่ทำการศึกษาค้างนี้มาจาก 1 โรงเคลือบซึ่งในกรณีที่โรงเคลือบมีการซ่อมบำรุงหรือเกิดเหตุฉุกเฉินที่ทำให้ต้องหยุดเดินเครื่อง ระบบก็จะไม่สามารถจ่ายความร้อนไปยังโรงอบผิวกระป๋องได้ ดังนั้นสิ่งที่ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมคือการศึกษาความเป็นไปในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากโรงเคลือบ 2 โรงมารวมกันเพื่อสลับการทำงานในกรณีที่เครื่องต้องทำการซ่อมบำรุงหรือเครื่องเกิดปัญหา ซึ่งจะเป็นการสร้างเชื่อมั่นและเสถียรภาพในการทำงานของระบบได้ดียิ่งขึ้น





บรรณานุกรม

1. บริษัทจิตตอล กราเวียร์ แพคเกจจิ้ง จำกัด. *วิธีการผลิตกระป๋อง*. สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2556, จาก <http://www.packingsiam.com>. 2556.
2. บริษัท รอยแอลแคน อินดัสทรี จำกัด. *ฝากระป๋องแบบธรรมดาและแบบเปิดง่าย*. สืบค้นเมื่อ 22 มีนาคม 2556, จาก <http://www.rcithailand.com>. 2556.
3. Taibong Industries INC. *Plate Heat Exchanger*. Retrieved March 28, 2013, from <http://taibong.com/eng/product.htm>. 2013.
4. Usman Ur Remen. *Heat Transfer Optimization of Shell and Tube Heat Exchanger through CFD Studies*. Sweden. Department of Chemical and Biological Engineering Division of Chemical Engineering. 2011.
5. กองฝึกอบรม. *เอกสารกรณีศึกษา 019 การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลว (Economizer)*. กรุงเทพมหานคร. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2547.
6. เอกชัย รัตนบรรลือ และ อนุรักษ์ ตริเพชร. *การอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม*. กรุงเทพมหานคร. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ม.ป.ป.
7. สุพจน์ มุนินทรานุกูล. *เกณฑ์การเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ในงานอุตสาหกรรม*. กรุงเทพมหานคร. ภาควิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2544.
8. Peter Gent. *Industrial Waste Heat Energy Recovery Systems - Technology Overview and Approaches for Selection of System*. England. Department of Mechanical Engineering, Master of Science in Renewable Energy System and the Environment. 2010.
9. ขวัญชัย ไกรทอง และ อติพงศ์ นันทพันธ์. *การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางดัดแปลงจากคอนเดนเซอร์ระบบปรับอากาศรถยนต์ กรณีศึกษา การดึงความร้อนทิ้งจากน้ำร้อนมาอุ่นอากาศ*. พิษณุโลก. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2548.
10. สถานจัดการและอนุรักษ์พลังงาน. *วารสารพลังงาน มหาวิทยาลัยขอนแก่น*. ขอนแก่น. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2553.
11. บริษัทยูเนียน คอนแมท จำกัด. *ฉนวนกันความร้อนครบวงจร*. สืบค้นเมื่อ 13 ตุลาคม 2555, จาก http://unionconmat.co.th/thai/products.php?tb_product_id=149. 2012.

12. บริษัทเบย์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด. *Calcium Silicate Insulation*. สืบค้นเมื่อ 17 มกราคม 2556, จาก <http://www.bay-corporation.com>. 2556
13. บริษัทบ้านสีเขียว จำกัด. *ฉนวนแคลเซียมซิลิเกต*. สืบค้นเมื่อ 10 ตุลาคม 2555, จาก <http://www.banseekeaw.co.th/Insulations-ฉนวนกันความร้อน-และ-ฉนวนกันความเย็น/Calcium-Silicate-ฉนวนแคลเซียมซิลิเกต.html>. 2012.
14. Pipat Phonphet. *ความรู้เรื่องท่อ*. สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2556, จาก <http://replicainspection.blogspot.com/2011/06/blog-post.html>. 2556.
15. โสภส จิวนวงศ์. *การเขียนแบบระบบท่อ*. ชลบุรี. ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. ม.ป.ป.
16. ทศพร ปรีดาพันธ์. *การประหยัดพลังงานในอุตสาหกรรมปลาป่น*. กรุงเทพมหานคร. สาขาวิชา การจัดการพลังงานและวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี. 2546.
17. เจนจิรา เปี่ยมดี. *การออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอบแห้งขนม*. เชียงใหม่. สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2545.
18. อิศเรศ รุชกัลยา. *การเรียงตัวของกลุ่มท่อที่เหมาะสมสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ ไหลขวางกันทางเทอร์โมไดนามิกส์*. กรุงเทพมหานคร. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2547.
19. กัลยลักษณ์ เอาเอกสิทธิ์. *การพัฒนาระเบียบวิธีของออฟติไมเซชันแบบพลวัตของการทำความ สะอาดขำงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้วิธีการสร้างปัญหาเวลาต่อเนื่อง*. กรุงเทพมหานคร. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2551.
20. David J. Kukulka; et al. *Development and Evalation of Enhanced Heat Transfer Tubes*. United State of America. State University of New York College at Buffalo. 2011.
21. A. Mehta Kushal K. and B. Lakdawala A. M. *Comparision of Heat Transfer Enhancement in Tube in Tube Heat Exchanger using Different Turbulent Generator*. India. Dapartment of of Machanical Engineering Nirma University. 2011.
22. เอกอาทิตย์ ปรามมะณี และคณะ. *การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของ Economizer เพื่อการ ประหยัดพลังงานของหม้อไอน้ำ*. กรุงเทพมหานคร. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
23. ธิติญาณ์ เปลี่ยนมณี. *การพัฒนาต้นแบบการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าฮีโคโนไมเซอร์เพื่อ ป้องกันการดกลั่นตัว*. กรุงเทพมหานคร. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2555.

24. ประสิทธิ์ เกี้ยวสุนทร. การศึกษาและออกแบบฮีโคโนไมเซอร์โดยใช้ความร้อนปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำ. กรุงเทพมหานคร. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2555.
25. ยงยุทธ เครือวงษา. การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดกะทัดรัดเพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอ็อกไซด์ของแข็ง. กรุงเทพมหานคร. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2551.
26. Yvo de Boer. *Kyoto Protocol Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amount*. BoerUnited Nations Framework Convention on Climate Change. Germany. 2008.
27. ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม. โครงการส่งเสริมการใช้ฉลากคาร์บอนสำหรับผลิตภัณฑ์ชุมชน. ปทุมธานี. กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2554.
28. สิริวรรณ โฉมจัญญ. การเงินธุรกิจ. กรุงเทพมหานคร. ห้างหุ้นส่วน จำกัด ที พี เอ็น เพรส. 2542.
29. สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน. คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในอุปกรณ์ประเภทมอเตอร์ปั๊มน้ำและพัดลม. ปทุมธานี. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2554.
30. สุรพลพิทยพานิช. หลักการและระบบการปรับอากาศ. กรุงเทพมหานคร. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2529.
31. ยศธนา คุณาทร. *Energy Losses Due to Friction*. เชียงใหม่. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ม.ป.ป.
32. Greenheck Fan Corporation Company Limited. *Single - Width Centrifugal Fan Performance Supplement*. 2009.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ตารางข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ตารางการสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อที่ไม่ได้หุ้มฉนวน (kW/m)

ขนาด ท่อ	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ท่อ	อุณหภูมิผิวท่อหรือผนังร้อน °C															
		Inches	Do (mm.)	Di (mm.)	70	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
1/8"		10.29	6.83	0.03	0.03	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.15	0.17	0.20	0.24	0.27	0.31	0.35
1/4"		13.72	9.25	0.03	0.03	0.05	0.08	0.10	0.13	0.16	0.19	0.22	0.26	0.30	0.35	0.40	0.45
3/8"		17.75	12.52	0.04	0.04	0.07	0.09	0.12	0.16	0.20	0.24	0.28	0.33	0.38	0.44	0.50	0.56
1/2"		21.34	15.80	0.05	0.05	0.08	0.11	0.15	0.19	0.23	0.28	0.33	0.39	0.45	0.51	0.59	0.66
3/4"		26.67	20.93	0.06	0.06	0.09	0.13	0.18	0.23	0.28	0.34	0.40	0.47	0.55	0.63	0.72	0.81
1"		33.40	26.64	0.07	0.07	0.12	0.16	0.22	0.28	0.34	0.41	0.49	0.57	0.67	0.77	0.88	0.99
1.1/4"		42.16	35.05	0.09	0.09	0.14	0.20	0.27	0.34	0.42	0.51	0.60	0.71	0.82	0.95	1.08	1.23
1.1/2"		48.26	40.89	0.10	0.10	0.16	0.23	0.30	0.38	0.47	0.57	0.68	0.80	0.93	1.07	1.22	1.39
2"		60.33	52.50	0.12	0.12	0.19	0.27	0.36	0.46	0.57	0.70	0.83	0.97	1.13	1.31	1.50	1.70

ตารางการสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อที่ไม่ได้หุ้มฉนวน (kW/m) (ต่อ)

ขนาด ท่อ	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ท่อ	อุณหภูมิผิวท่อหรือผนังร้อน °C															
		Inches	Do (mm.)	Di (mm.)	70	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
12"	323.85	73.03	62.71	0.14	0.14	0.23	0.32	0.43	0.55	0.68	0.83	0.98	1.16	1.35	1.55	1.78	2.02
		88.90	77.93	0.17	0.17	0.27	0.39	0.51	0.65	0.81	0.98	1.17	1.38	1.61	1.86	2.13	2.42
		101.60	90.12	0.19	0.19	0.31	0.43	0.58	0.74	0.91	1.11	1.32	1.56	1.82	2.10	2.41	2.74
		114.30	102.26	0.21	0.21	0.34	0.48	0.64	0.82	1.02	1.23	1.47	1.74	2.02	2.34	2.68	3.06
		141.30	128.19	0.26	0.26	0.41	0.58	0.78	0.99	1.23	1.50	1.79	2.11	2.46	2.84	3.26	3.72
		168.27	154.05	0.30	0.30	0.48	0.68	0.91	1.16	1.44	1.75	2.09	2.47	2.88	3.34	3.83	4.37
		219.08	202.72	0.38	0.38	0.61	0.86	1.15	1.47	1.83	2.23	2.66	3.15	3.68	4.26	4.89	5.58
		273.05	254.51	0.47	0.47	0.74	1.05	1.41	1.80	2.24	2.72	3.26	3.85	4.50	5.22	6.00	6.85
		323.85	304.80	0.55	0.55	0.87	1.23	1.64	2.10	2.61	3.18	3.81	4.51	5.27	6.11	7.03	8.04

ตารางการสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อหลังหุ้มฉนวนใยแก้ว (W/m)

	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	Do	Di	อุณหภูมิห้อง หุ้มฉนวน °C	อุณหภูมิหลัง หุ้มฉนวน °C	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)					
						mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
42.16	1.1/4"	33.40	26.67	3/4"	1"	17.75	13.72	10.29	1/8"	1/4"	3/8"
35.05	1"	26.64	20.93	3/4"	1"	12.52	9.25	6.83	1/8"	1/4"	3/8"
8.80	7.64	7.64	6.72	3/4"	1"	5.44	4.83	4.27	1/8"	1/4"	3/8"
11.65	10.10	10.10	8.88	3/4"	1"	7.17	6.35	5.60	1/8"	1/4"	3/8"
14.60	12.64	12.64	11.09	3/4"	1"	8.94	7.91	6.96	1/8"	1/4"	3/8"
15.11	13.20	13.20	11.67	3/4"	1"	9.51	8.46	8.35	1/8"	1/4"	3/8"
20.21	17.63	17.63	15.56	3/4"	1"	12.67	11.25	11.16	1/8"	1/4"	3/8"
24.35	21.28	21.28	18.84	3/4"	1"	15.41	13.73	12.20	1/8"	1/4"	3/8"
29.32	25.61	25.61	22.65	3/4"	1"	18.51	16.48	14.63	1/8"	1/4"	3/8"
34.32	29.96	29.96	26.49	3/4"	1"	21.62	19.25	17.07	1/8"	1/4"	3/8"
39.34	34.32	34.32	30.33	3/4"	1"	24.74	22.02	19.52	1/8"	1/4"	3/8"
44.38	38.70	38.70	34.19	3/4"	1"	27.87	24.80	21.98	1/8"	1/4"	3/8"
42.65	37.54	37.54	33.45	3/4"	1"	27.66	24.81	22.17	1/8"	1/4"	3/8"
46.96	41.32	41.32	36.81	3/4"	1"	30.43	27.29	24.39	1/8"	1/4"	3/8"
51.27	45.11	45.11	40.18	3/4"	1"	33.21	29.77	26.60	1/8"	1/4"	3/8"
55.59	48.90	48.90	43.55	3/4"	1"	35.98	32.26	28.82	1/8"	1/4"	3/8"
59.90	52.69	52.69	46.92	3/4"	1"	38.76	34.74	31.04	1/8"	1/4"	3/8"

ตารางการสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อหลังหุ้มฉนวนใยแก้ว (W/m) (ต่อ)

เส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อ	Do	Di	อุณหภูมิหลัง หุ้มเฉลี่ย °C	อุณหภูมิก่อน หุ้มเฉลี่ย °C	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)								
					mm.	mm.	ขนาด ท่อ	3"	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	
141.30	114.30	101.60	88.90	73.03	60.33	48.26	ขนาด ท่อ	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)	mm.	Di	อุณหภูมิหลัง หุ้มเฉลี่ย °C	อุณหภูมิก่อน หุ้มเฉลี่ย °C	เส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อ
128.2	102.3	90.12	77.93	62.71	52.5	40.89							
16.98	14.46	13.26	12.06	10.54	11.13	9.59							
22.38	19.04	17.45	15.86	13.84	14.78	12.72							
27.90	23.72	21.73	19.74	17.22	18.55	15.94							
24.18	24.06	22.17	20.25	17.81	15.81	13.85	ขนาด ท่อ	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)	mm.	Di	อุณหภูมิหลัง หุ้มเฉลี่ย °C	อุณหภูมิก่อน หุ้มเฉลี่ย °C	เส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อ
32.09	32.05	29.52	26.95	23.68	21.00	18.38							
47.14	40.29	37.04	33.76	29.61	30.50	26.44							
48.57	48.46	44.54	40.59	35.59	36.76	31.85							
56.71	56.68	52.08	47.45	41.59	43.06	37.29							
64.88	64.93	59.65	54.34	47.61	49.40	42.76	ขนาด ท่อ	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)	mm.	Di	อุณหภูมิหลัง หุ้มเฉลี่ย °C	อุณหภูมิก่อน หุ้มเฉลี่ย °C	เส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อ
73.07	73.20	67.25	61.24	53.65	55.76	48.25							
72.20	69.86	64.43	58.95	52.00	52.81	46.11							
79.45	76.90	70.93	64.89	57.23	58.16	50.78							
86.70	83.96	77.43	70.83	62.46	63.52	55.45							
93.96	91.02	83.93	76.78	67.70	68.88	60.12	ขนาด ท่อ	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)	mm.	Di	อุณหภูมิหลัง หุ้มเฉลี่ย °C	อุณหภูมิก่อน หุ้มเฉลี่ย °C	เส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อ
101.22	98.09	90.44	82.73	72.94	74.25	64.79							

ตารางการสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อหลังหุ้มฉนวนใยแก้ว (W/m) (ต่อ)

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ		อุณหภูมิภายนอก หุ้มเฉลี่ย °C		อุณหภูมิหลัง หุ้มเฉลี่ย °C		การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)	
mm.	mm.	หน่วย ท่อ	หน่วย ท่อ	หน่วย ท่อ	หน่วย ท่อ	หน่วย ท่อ	หน่วย ท่อ
323.85	273.05	12"	10"	8"	6"	168.27	114.79
304.80	254.5					219.08	124.51
						202.7	106.68
						194.9	98.30
33.81	29.15					24.18	106.54
44.66	38.49					31.91	115.59
55.81	48.07					39.84	124.51
45.32	39.57					33.37	106.68
60.30	52.63					44.35	98.30
77.64	67.38					56.42	83.19
81.62	71.06					59.79	81.84
95.27	82.94					69.76	90.07
108.96	94.84					79.76	98.30
122.68	106.77					89.78	106.54
120.46	105.20					88.87	114.79
132.54	115.74					97.77	
144.64	126.30					106.68	
156.74	136.86					115.59	
168.85	147.42					124.51	

ตารางการสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อหลังหุ้มฉนวนใยหิน (W/m)

	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	Do	Di	อุณหภูมิหลังหุ้มเฉลี่ย °C	อุณหภูมิภายในหุ้มเฉลี่ย °C	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)							
						mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
						10.29	13.72	17.75	21.34	26.67	33.40	42.16	
						6.83	9.25	12.52	15.80	20.93	26.64	35.05	
						1"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1.1/4"	
70	40.38					4.43	5.01	5.65	6.19	6.96	7.90	9.10	
80	41.58					5.82	6.59	7.44	8.17	9.20	10.47	12.07	
90	42.72					7.24	8.22	9.29	10.20	11.51	13.11	15.13	
100	42.81					8.69	8.78	9.86	10.78	12.08	13.65	15.62	
120	44.65					11.62	11.68	13.14	14.37	16.13	18.25	20.91	
140	43.91					12.74	14.34	16.08	17.56	19.66	22.20	25.40	
160	44.62					15.29	17.22	19.33	21.11	23.65	26.72	30.60	
180	45.80					17.84	20.11	22.58	24.68	27.66	31.28	35.83	
200	46.94					20.41	23.01	25.85	28.26	31.69	35.85	41.08	
220	48.04					22.98	25.92	29.13	31.85	35.73	40.43	46.35	
240	46.16					23.20	25.95	28.93	31.44	34.98	39.25	44.59	
260	46.99					25.52	28.55	31.83	34.60	38.50	43.21	49.10	
280	47.80					27.84	31.15	34.74	37.76	42.03	47.18	53.62	
300	48.60					30.16	33.75	37.65	40.92	45.56	51.15	58.14	
320	49.38					32.48	36.36	40.56	44.09	49.09	55.12	62.66	

ตารางการสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อหลังหุ้มฉนวนใยหิน (W/m) (ต่อ)

เส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อ	Do	Di	อุณหภูมิหลัง หุ้มเฉลี่ย °C	อุณหภูมิก่อน หุ้มเฉลี่ย °C	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)				
mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
48.26	60.33	73.03	88.90	101.60	114.30	141.30	176.1	23.23	28.98
40.89	52.5	62.71	77.93	90.12	102.3	128.2	15.00	19.76	24.64
1.1/2"	2"	2 1/2"	3"	3 1/2"	4"	5"	13.76	18.12	22.59
9.91	11.50	10.94	12.51	13.76	15.00	17.61	17.61	23.23	28.98
13.16	15.30	14.38	16.47	18.12	19.76	23.23	23.23	28.98	35.73
16.52	19.22	17.90	20.52	22.59	24.64	28.98	28.98	35.73	42.48
14.37	16.39	18.46	20.98	22.96	24.91	25.08	25.08	30.30	35.73
19.09	21.79	24.56	27.94	30.59	33.21	33.30	33.30	39.05	44.30
27.57	31.79	30.91	35.23	38.64	42.03	49.17	42.03	49.17	55.92
33.23	38.34	37.16	42.37	46.49	50.58	50.73	50.58	57.25	62.99
38.92	44.94	43.44	49.55	54.38	59.18	59.25	59.18	65.50	70.24
44.64	51.56	49.74	56.76	62.31	67.82	67.81	67.82	73.27	77.51
50.38	58.22	56.06	63.99	70.26	76.48	76.38	76.48	82.01	86.25
48.21	55.20	54.38	61.64	67.37	73.04	75.51	73.04	78.79	83.03
53.09	60.81	59.86	67.86	74.17	80.42	83.10	80.42	86.14	90.38
57.98	66.42	65.34	74.08	80.98	87.81	90.70	87.81	93.55	97.79
62.88	72.03	70.82	80.31	87.80	95.21	98.30	95.21	100.96	105.20
67.77	77.66	76.31	86.54	94.61	102.61	105.91	102.61	108.26	112.50

ตารางการสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อหลังหุ้มฉนวนใยหิน (W/m) (ต่อ)

เส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อ	อุณหภูมิก่อน หุ้มฉนวน °C	Do	mm.	mm.	ขนาด ท่อ	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)	168.27	219.08	273.05	323.85
		Di								
อุณหภูมิ หุ้มฉนวน °C	70	40.19	6"	20.20	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)	168.27	219.08	273.05	323.85
	80	41.34	8"	25.06						
	90	42.43	10"	30.19						
	100	42.51	12"	35.01						
	120	44.28	14"	40.99						
	140	43.55	16"	46.31						
	160	44.23	18"	51.63						
	180	45.36	20"	56.95						
	200	46.45	22"	62.27						
	220	47.51	24"	67.59						
240	45.69	26"	72.91	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)	168.27	219.08	273.05	323.85	
260	46.49	28"	78.23							
280	47.26	30"	83.55							
300	48.02	32"	88.87							
320	48.77	34"	94.19							

ตารางการสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อหลังหุ้มฉนวนแคลเซียมซิลิเกต (W/m)

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	Do	Di	อุณหภูมิหลังหุ้มเฉลี่ย °C	mm.	mm.	ขนาดท่อ	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)						
							42.16	33.40	26.67	21.34	17.75	13.72	10.29
อุณหภูมิอากาศ							35.05	26.64	20.93	15.80	12.52	9.25	6.83
อุณหภูมิของพื้นผิวท่อ							1.1/4"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	1/8"
70	40.38						9.82	8.55	7.54	6.71	6.13	5.45	4.83
80	41.58						13.07	11.35	9.99	8.88	8.10	7.19	6.35
90	42.72						16.42	14.24	12.52	11.11	10.13	8.97	7.92
100	42.81						16.84	14.74	13.07	11.68	10.70	9.54	9.51
120	44.65						22.59	19.75	17.48	15.60	14.27	12.71	12.76
140	43.91						27.97	24.46	21.67	19.37	17.75	15.84	14.08
160	44.62						33.73	29.48	26.10	23.31	21.35	19.03	16.91
180	45.80						39.54	34.53	30.56	27.28	24.97	22.25	19.75
200	46.94						45.37	39.61	35.03	31.26	28.61	25.47	22.60
220	48.04						51.23	44.71	39.52	35.25	32.25	28.71	25.46
240	46.16						49.41	43.51	38.79	34.87	32.09	28.80	25.75
260	46.99						54.43	46.63	42.71	38.38	35.32	31.69	28.33
280	47.80						59.45	52.33	46.63	41.90	38.56	34.58	30.91
300	48.60						64.48	56.75	50.56	45.42	41.79	37.48	33.49
320	49.38						69.52	61.17	54.49	48.95	45.03	40.38	36.08

ตารางการสูญเสียความร้อนของพื้นผิวที่อหลังหุ้มฉนวนแคลเซียมซิลิเกต (W/m) (ต่อ)

เส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อ	Do	Di	อุณหภูมิที่ อหลังหุ้ม หุ้มเฉลี่ย °C	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)				
				mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
อุณหภูมิที่ อหลังหุ้ม หุ้มเฉลี่ย °C	Do	Di	อุณหภูมิที่ อหลังหุ้ม หุ้มเฉลี่ย °C	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
70	40.38	41.58	40.38	48.26	60.33	73.03	88.90	101.60
80	41.58	42.72	41.58	40.89	52.5	62.71	77.93	90.12
90	42.72	43.91	42.72	1.1/2"	2"	2 1/2"	3"	3 1/2"
100	43.91	44.65	43.91	10.69	12.39	11.91	13.61	14.96
120	44.65	45.80	44.65	14.24	16.52	15.69	17.95	19.74
140	45.80	46.94	45.80	17.91	20.81	19.57	22.41	24.66
160	46.94	48.04	46.94	15.62	17.80	20.02	22.73	24.85
180	48.04	49.29	48.04	20.79	23.71	26.69	30.32	33.18
200	49.29	50.49	49.29	30.35	34.97	34.10	38.85	42.60
220	50.49	51.69	50.49	36.62	42.23	41.04	46.78	51.31
240	51.69	52.89	51.69	42.94	49.55	48.01	54.75	60.08
260	52.89	54.09	52.89	49.29	56.91	55.02	62.76	68.88
280	54.09	55.29	54.09	55.67	64.30	62.05	70.80	77.72
300	55.29	56.49	55.29	53.41	61.14	60.30	68.34	74.67
320	56.49	57.69	56.49	58.84	67.37	66.39	75.25	82.24
	57.69	58.89	57.69	64.28	73.61	72.49	82.18	89.82
	58.89	60.09	58.89	69.73	79.86	78.59	89.11	97.40
	60.09	61.29	60.09	75.18	86.12	84.70	96.04	104.99
	61.29	62.49	61.29					
	62.49	63.69	62.49					
	63.69	64.89	63.69					
	64.89	66.09	64.89					
	66.09	67.29	66.09					
	67.29	68.49	67.29					
	68.49	69.69	68.49					
	69.69	70.89	69.69					
	70.89	72.09	70.89					
	72.09	73.29	72.09					
	73.29	74.49	73.29					
	74.49	75.69	74.49					
	75.69	76.89	75.69					
	76.89	78.09	76.89					
	78.09	79.29	78.09					
	79.29	80.49	79.29					
	80.49	81.69	80.49					
	81.69	82.89	81.69					
	82.89	84.09	82.89					
	84.09	85.29	84.09					
	85.29	86.49	85.29					
	86.49	87.69	86.49					
	87.69	88.89	87.69					
	88.89	90.09	88.89					
	90.09	91.29	90.09					
	91.29	92.49	91.29					
	92.49	93.69	92.49					
	93.69	94.89	93.69					
	94.89	96.09	94.89					
	96.09	97.29	96.09					
	97.29	98.49	97.29					
	98.49	99.69	98.49					
	99.69	100.89	99.69					
	100.89	102.09	100.89					
	102.09	103.29	102.09					
	103.29	104.49	103.29					
	104.49	105.69	104.49					
	105.69	106.89	105.69					
	106.89	108.09	106.89					
	108.09	109.29	108.09					
	109.29	110.49	109.29					
	110.49	111.69	110.49					
	111.69	112.89	111.69					
	112.89	114.09	112.89					
	114.09	115.29	114.09					
	115.29	116.49	115.29					
	116.49	117.69	116.49					
	117.69	118.89	117.69					
	118.89	120.09	118.89					
	120.09	121.29	120.09					
	121.29	122.49	121.29					
	122.49	123.69	122.49					
	123.69	124.89	123.69					
	124.89	126.09	124.89					
	126.09	127.29	126.09					
	127.29	128.49	127.29					
	128.49	129.69	128.49					
	129.69	130.89	129.69					
	130.89	132.09	130.89					
	132.09	133.29	132.09					
	133.29	134.49	133.29					
	134.49	135.69	134.49					
	135.69	136.89	135.69					
	136.89	138.09	136.89					
	138.09	139.29	138.09					
	139.29	140.49	139.29					
	140.49	141.69	140.49					
	141.69	142.89	141.69					
	142.89	144.09	142.89					
	144.09	145.29	144.09					
	145.29	146.49	145.29					
	146.49	147.69	146.49					
	147.69	148.89	147.69					
	148.89	150.09	148.89					
	150.09	151.29	150.09					
	151.29	152.49	151.29					
	152.49	153.69	152.49					
	153.69	154.89	153.69					
	154.89	156.09	154.89					
	156.09	157.29	156.09					
	157.29	158.49	157.29					
	158.49	159.69	158.49					
	159.69	160.89	159.69					
	160.89	162.09	160.89					
	162.09	163.29	162.09					
	163.29	164.49	163.29					
	164.49	165.69	164.49					
	165.69	166.89	165.69					
	166.89	168.09	166.89					
	168.09	169.29	168.09					
	169.29	170.49	169.29					
	170.49	171.69	170.49					
	171.69	172.89	171.69					
	172.89	174.09	172.89					
	174.09	175.29	174.09					
	175.29	176.49	175.29					
	176.49	177.69	176.49					
	177.69	178.89	177.69					
	178.89	180.09	178.89					
	180.09	181.29	180.09					
	181.29	182.49	181.29					
	182.49	183.69	182.49					
	183.69	184.89	183.69					
	184.89	186.09	184.89					
	186.09	187.29	186.09					
	187.29	188.49	187.29					
	188.49	189.69	188.49					
	189.69	190.89	189.69					
	190.89	192.09	190.89					
	192.09	193.29	192.09					
	193.29	194.49	193.29					
	194.49	195.69	194.49					
	195.69	196.89	195.69					
	196.89	198.09	196.89					
	198.09	199.29	198.09					
	199.29	200.49	199.29					
	200.49	201.69	200.49					
	201.69	202.89	201.69					
	202.89	204.09	202.89					
	204.09	205.29	204.09					
	205.29	206.49	205.29					
	206.49	207.69	206.49					
	207.69	208.89	207.69					
	208.89	210.09	208.89					
	210.09	211.29	210.09					
	211.29	212.49	211.29					
	212.49	213.69	212.49					
	213.69	214.89	213.69					
	214.89	216.09	214.89					
	216.09	217.29	216.09					
	217.29	218.49	217.29					
	218.49	219.69	218.49					
	219.69	220.89	219.69					
	220.89	222.09	220.89					
	222.09	223.29	222.09					
	223.29	224.49	223.29					
	224.49	225.69	224.49					
	225.69	226.89	225.69					
	226.89	228.09	226.89					
	228.09	229.29	228.09					
	229.29	230.49	229.29					
	230.49	231.69	230.49					
	231.69	232.89	231.69					
	232.89	234.09	232.89					
	234.09	235.29	234.09					
	235.29	236.49	235.29					
	236.49	237.69	236.49					
	237.69	238.89	237.69					
	238.89	240.09	238.89					
	240.09	241.29	240.09					
	241.29	242.49	241.29					
	242.49	243.69	242.49					
	243.69	244.89	243.69					
	244.89	246.09	244.89					
	246.09	247.29	246.09					
	247.29	248.49	247.29					
	248.49	249.69	248.49					
	249.69	250.89	249.69					
	250.89	252.09	250.89					
	252.09	253.29	252.09					
	253.29	254.49	253.29					
	254.49	255.69	254.49					
	255.69	256.89	255.69					
	256.89	258.09	256.89					
	258.09	259.29	258.09					



การแปลงหน่วยปริมาณพลังงานของเชื้อเพลิง

ประเภท (หน่วย)	กิโลแคลอรี/ หน่วย kcal/UNIT	ตันเทียบเท่า น้ำมันดิบ/ ล้านหน่วย toe/10 ⁶ UNIT	เมกะจูล/ หน่วย MJ/UNIT	พันบีทียู/ หน่วย 10 ³ Btu/UNIT	TYPE (UNIT)
พลังงานเชิงพาณิชย์					COMMERCIAL ENERGY
1.น้ำมันดิบ (ลิตร)	8680	860.00	36.33	34.44	1.CRUDE OIL (litre)
2.คอนเดนเสท (ลิตร)	7900	782.72	33.07	31.35	2.CONDENSAT E (litre)
3.ก๊าซธรรมชาติ					3.NATURAL GAS
3.1ชื้น (ลูกบาศก์ฟุต)	248	24.57	1.04	0.98	3.1WET (scf.)
3.2แห้ง (ลูกบาศก์ ฟุต)	244	24.18	1.02	0.97	3.2DRY (scf.)
4.ผลิตภัณฑ์ ปิโตรเลียม					4.PETROLEUM PRODUCTS
4.1ก๊าซปิโตรเลียม เหลว (ลิตร)	6360	630.14	26.62	25.24	4.1 LPG (litre)
4.2น้ำมันเบนซิน (ลิตร)	7520	745.07	31.48	29.84	4.2 GASOLINE (litre)
4.3น้ำมันเครื่องบิน (ลิตร)	8250	817.40	34.53	32.74	4.3 JET FUEL (litre)
4.4น้ำมันก๊าด (ลิตร)	8250	817.40	34.53	32.74	4.4 KEROSENE (litre)
4.5น้ำมันดีเซล (ลิตร)	8700	861.98	36.42	34.52	4.5DIESEL (litre)
4.6น้ำมันเตา (ลิตร)	9500	941.24	39.77	37.70	4.6FUEL OIL (litre)
4.7ยางมะตอย (ลิตร)	9840	974.93	41.19	39.05	4.7BITUMEN (litre)

การแปลงหน่วยปริมาณพลังงานของเชื้อเพลิง (ต่อ)

ประเภท (หน่วย)	กิโลแคลอรี/ หน่วย kcal/UNIT	ตันเทียบเท่า น้ำมันดิบ/ ล้านหน่วย toe/10 ⁶ UNIT	เมกะจูล/ หน่วย MJ/UNIT	พันบีทียู/ หน่วย 10 ³ Btu/UNIT	TYPE (UNIT)
พลังงานเชิงพาณิชย์					COMMERCIAL ENERGY
4.8ปิโตรเลียมโค้ก (กก.)	8400	832.26	35.16	33.33	4.8 PETROLEUM COKE (litre)
5.ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ ชั่วโมง)	860	85.21	3.60	3.41	5.ELECTRICITY (kWh)
6.ไฟฟ้าพลังน้ำ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	2236	221.54	9.36	8.87	6.HYDROELEC TRIC (kWh)
7.พลังงานความร้อน ใต้พิภพ(กิโลวัตต์ ชั่วโมง)	9500	941.24	39.77	37.70	7.GEOTHERMA L (kWh)
8.ถ่านหินนำเข้า (กิโลกรัม)	6300	624.19	26.37	25.00	8.COAL IMPORT (kg.)
9.ถ่านโค้ก (กิโลกรัม)	6600	653.92	27.63	26.19	9.COKE (kg.)
10.แอนทราไซต์ (กิโลกรัม)	7500	743.09	31.40	29.76	10.ANTHRACIT E (kg.)
11.อีเทน (กิโลกรัม)	11203	1110.05	46.89	44.45	11.ETHANE (kg.)
12.โพรเพน (กิโลกรัม)	11256	1115.34	47.11	44.67	12.PROPANE (kg.)
13.ลิกไนต์					13.LIGNITE
13.1ลี้ (กิโลกรัม)	4400	435.94	18.42	17.46	13.1LI (kg.)
13.2กระบี่ (กิโลกรัม)	2600	257.60	10.88	10.32	13.2KRABI (kg.)
13.3แม่เมาะ (กิโลกรัม)	2500	247.70	10.47	9.92	13.3MAE MOH (kg.)
13.4แจ้ห่ม (กิโลกรัม)	3610	357.67	15.11	14.32	13.4CHAE KHON (kg.)

การแปลงหน่วยปริมาณพลังงานของเชื้อเพลิง (ต่อ)

ประเภท (หน่วย)	กิโลแคลอรี/ หน่วย kcal/UNIT	ตันเทียบเท่า น้ำมันดิบ/ ล้านหน่วย toe/10 ⁶ UNIT	เมกะจูล/ หน่วย MJ/UNIT	พันบีทียู/ หน่วย 10 ³ Btu/UNIT	TYPE (UNIT)
พลังงานหมุนเวียน					NEW & RENEWABLE ENERGY
1.ฟืน (กิโลกรัม)	3820	378.48	15.99	15.16	1.FUEL WOOD (kg.)
2.ถ่าน (กิโลกรัม)	6900	683.64	28.88	27.38	2.CHARCOAL (kg.)
3.แกลบ (กิโลกรัม)	3440	340.83	14.40	13.65	3.PADDY HUSK (kg.)
4.กากอ้อย (กิโลกรัม)	1800	178.34	7.53	7.14	4.BAGASSE (kg.)
5.ขยะ (กิโลกรัม)	1160	114.93	4.86	4.60	5.GARBAGE (kg.)
6.ขี้เลื่อย (กิโลกรัม)	2600	257.60	10.88	10.32	6.SAW DUST (kg.)
7.วัสดุเหลือใช้ ทาง การเกษตร (กิโลกรัม)	3030	300.21	12.68	12.02	7.AGRICULTUR AL WASTE (kg.)
8.ก๊าซชีวภาพ (ลูกบาศก์เมตร)	5000	495.39	20.93	19.84	8.BIOGAS (m ³)

การแปลงหน่วยทั่วไป

หน่วยทั่วไป (GENERAL)		
1 กิโลแคลอรี (kcal)	= 4186	จูล (joules)
	= 3.968	บีทียู (Btu)
1 ตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (toe)	= 10.093	จิกะแคลอรี (Gcal)
	= 42.244	จิกะจูล (GJ)
	= 40.047×10^6	บีทียู (Btu)
1 บาร์เรล (barrel)	= 158.99	ลิตร (litres)
1 ลูกบาศก์เมตรของไม้ (cu.m. of solid wood)	= 600	กิโลกรัม (kg.)
1 ลูกบาศก์เมตรของถ่าน (kg. of charcoal)	= 250	กิโลกรัม (kg.)
5 กิโลกรัมของฟืน (kg. of fuel wood)	= 1 กิโลกรัมของถ่าน (kg. of charcoal product)	
1 ลิตรของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (litre of LPG)	= 0.54	กิโลกรัม (kg.)

การแปลงหน่วยปริมาณและมวล

การแปลงหน่วยปริมาณและมวล

หน่วยเริ่มต้น	หน่วยที่เปลี่ยน
ลิตรต่อวินาที x 2.11887	ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที
ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที x 0.47195	ลิตรต่อวินาที
ลูกบาศก์เมตรต่อชม. x 0.58857	ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที
ปอนด์ต่อตารางนิ้ว x 6.895	กิโลปาสคาล
กิโลปาสคาล x 0.145	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
บาร์ x 100	กิโลปาสคาล



ภาคผนวก ค

ราคาคาร์บอนเครดิตรายสัปดาห์ (18 - 22 กุมภาพันธ์ 2556)

ราคาคาร์บอนเครดิตรายสัปดาห์ (18 - 22 กุมภาพันธ์ 2556)

สินค้า	ราคาปิด ณ วันที่ 21 ก.พ. 2556	ราคาปิด ณ วันที่ 22 ม.ค. 2556	ราคาปิด ณ วันที่ 22 ก.พ. 2556	ราคาปิด ณ วันที่ 22 ม.ค. 2556
	Phase III EUA Spot	Phase III EUA Spot	ECX Dec '13	ECX Dec '13
EUA	5.20 (ปริมาณ: 3,472)	5.77 (ปริมาณ: 3,545)	5.19 (ปริมาณ: 18,068,000)	6.07 (ปริมาณ: 14,595,000)
CER	0.12 (ปริมาณ: 0)	0.12 (ปริมาณ: 0)	0.32 (ปริมาณ: 390,000)	0.40 (ปริมาณ: 2,164,000)

ตลาดคาร์บอน ภาคสมัครใจ (VER) CCFE, ICE	22 ก.พ. 2556 RGGI Dec '13 \$2.65	22 ก.พ. 2556 CCA Dec '13 \$14
---	--	---

ที่มา: BlueNext, European Climate Exchange, Chicago Climate Exchange

* ปริมาณคาร์บอนขึ้นทะเบียนวัดเป็นเมตริกตันคาร์บอนไดออกไซด์

** BlueNext Spot อ้างถึง ราคา spot ซึ่งสัญญา spot หมายถึงการซื้อขาย EUA ที่เกิดขึ้นโดยมีการ
ส่งมอบเงินทันที

*** ECX Dec '13 อ้างถึง ราคาสัญญาซื้อขายล่วงหน้าสำหรับการส่งมอบในเดือนธันวาคม 2013



ภาคผนวก ง
อัตราแลกเปลี่ยนเงินตราต่างประเทศ

อัตราแลกเปลี่ยนเงินตราต่างประเทศ ณ วันที่ 15 มีนาคม 2556, ธนาคารกรุงไทย
จำกัด (มหาชน)

		Buying				Bank Note	
Currency	Denom	Sight Bill	T/T	Selling		Buying	Selling
U.S. Dollar	\$1-2	29.38	29.48	29.73		28.44	29.75
	\$5-20	Unq	Unq	Unq	USD	28.83	29.78
	\$50-100	Unq	Unq	Unq		29.23	29.82
Pound Sterling		44.19875	44.34875	44.91375	GBP	43.9	45.3
Hong Kong Dollar		3.7825	3.795	3.8375	HKD	3.72	3.87
Malaysian Ringgit		Unq	Unq	Unq	MYR	8.94	9.74
		Unq	Unq	Unq		8.94	9.74
Singapore Dollar		23.415	23.495	23.905	SGD	23.31	24.02
		Unq	Unq	Unq		23.31	24.02
Japanese Yen		0.3041	0.3051375	0.310475	JPY	0.3023	0.3138
Indian Rupee		0.49	0.51	0.6	INR	0.48	0.6
Renminbi Yuan		4.69778	4.73384	4.7971	CNY	4.44	4.89
Australian Dollar	\$1-2	30.32	30.42	30.93	AUD	30.13	31.09
	\$5-100	Unq	Unq	Unq		30.13	31.09
New Zealand Dollar		23.98	24.06	24.44	NZD	23.86	24.92
Canadian Dollar		28.6	28.7	29.1	CAD	28.29	29.15
Swiss Franc		30.92	31.02	31.51	CHF	30.69	31.52
Jordanian Dinar		Unq	Unq	Unq	JOD	15.35	37.79
Omani Rial		Unq	Unq	Unq	OMR	56.78	80.54

อัตราแลกเปลี่ยนเงินตราต่างประเทศ ณ วันที่ 15 มีนาคม 2556, ธนาคารกรุงไทย
จำกัด (มหาชน) (ต่อ)

		Buying				Bank Note	
Currency	Denom	Sight Bill	T/T	Selling		Buying	Selling
Danish Kroner		5.105	5.123	5.199	DKK	4.93	5.23
Swedish Krona		4.545	4.56	4.636	SEK	4.43	4.67
Norwegian Kroner		5.048	5.065	5.154	NOK	4.91	5.17
Saudi Arabian Riyal		Unq	Unq	Unq	SAR	7.06	8.47
Pakistan Rupee		Unq	Unq	Unq	PKR	0.18	0.37
Qater Riyal		Unq	Unq	Unq	QAR	6.76	8.23
U.A.E.Dirham		Unq	Unq	Unq	AED	7	8.27
South Africa Rand		Unq	Unq	Unq	ZAR	2.08	3.64
Euro		38.00375	38.13375	38.7075	EUR	37.9	38.89
Korean Won		Unq	Unq	Unq	KRW	0.023	0.031
Indonesian Rupiah		Unq	Unq	Unq	IDR	0.0019	0.0041
Brunei Dollar		Unq	Unq	Unq	BND	22.84	23.96
Taiwan Dollar		Unq	Unq	Unq	TWD	0.84	1.12
Philippine Peso		Unq	Unq	Unq	PHP	0.53	0.78
Lao Kip		Unq	Unq	Unq	LAK	0.00345	0.00397
Vietnam Dong		Unq	Unq	Unq	VND	0.00117	0.00144

อัตราแลกเปลี่ยนเงินตราต่างประเทศ ณ วันที่ 15 มีนาคม 2556, ธนาคารกรุงไทย
จำกัด (มหาชน) (ต่อ)

Currency	Denom	Buying		Selling		Bank Note	
		Sight Bill	T/T			Buying	Selling
Cambodian Riel		Unq	Unq	Unq	KHR	0.006797	0.00764
Kuwait Dinar		Unq	Unq	Unq	KWD	58.76	103.82
Bahrain Dinar		Unq	Unq	Unq	BHD	58.54	81.26
Russian Rouble		Unq	Unq	Unq	RUB	0.84	1.07
Israeili New Shekel		Unq	Unq	Unq	ILS	6.18	7.66
Macau Pataca		Unq	Unq	Unq	MOP	3.59	3.84

Note : 1. All Rates are subject to change without notice.

2. All denominations are for banknotes only.

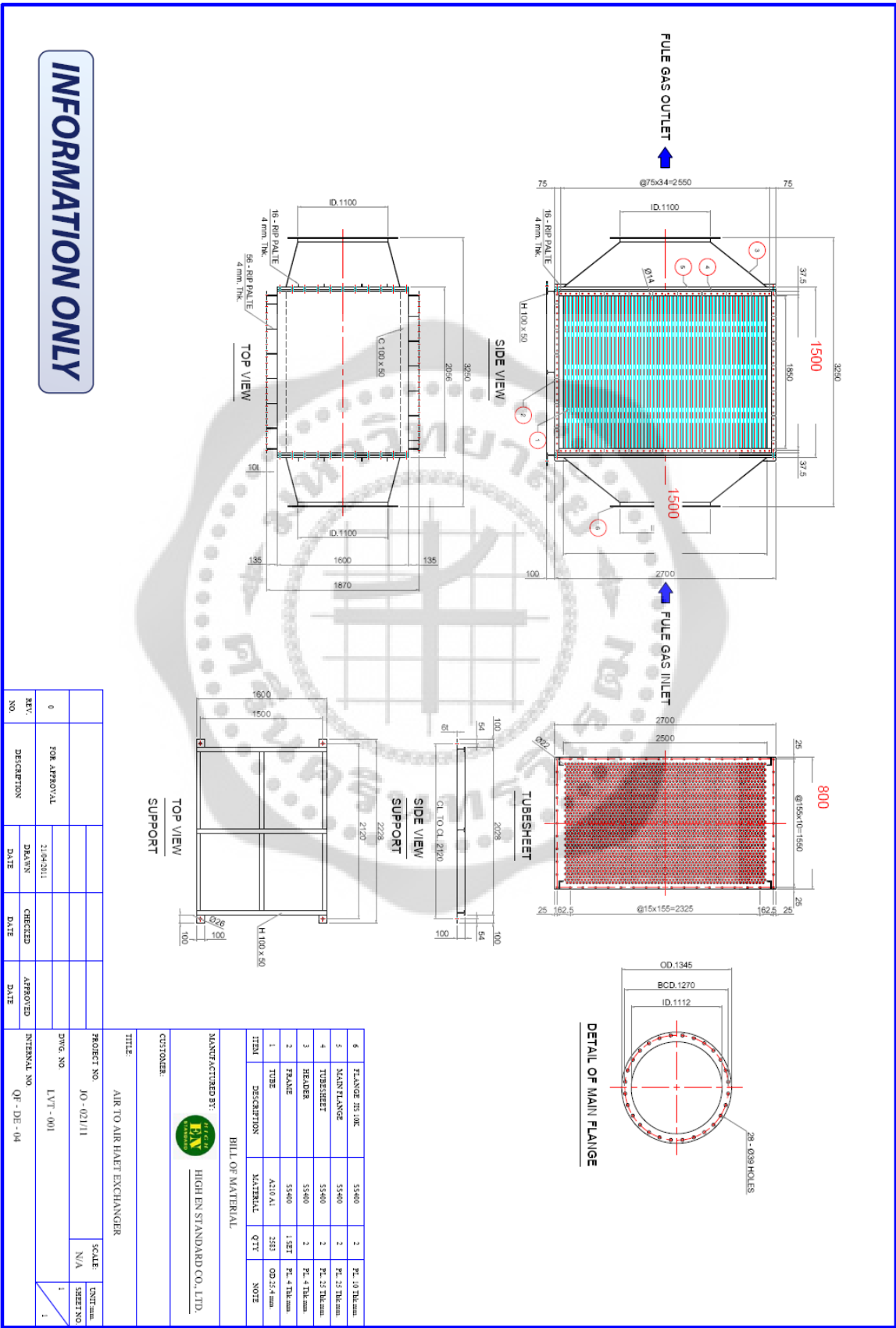
ภาคผนวก จ

ตัวอย่างการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอีโคโนไมเซอร์

ตัวอย่างการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอีโคโนไมเซอร์

Output Summary					Page 1
Released to the following HTRI Member Company:					
Microsoft					
Microsoft					
Xace Ver. 6.00 5/6/2013 15:01 SN: 1500213570					d Units
Rev1 Change Inlet 500mm					
Rating-Horizontal economizer countercurrent to crossflow					
No Data Check Messages.					
See Runtime Message Report for Warning Messages.					
Process Conditions		Outside		Tubeside	
Fluid name	Air			Hot Gas	
Fluid condition		Sens. Gas		Sens. Gas	
Total flow rate	(1000-kg/hr)	11.058		17.000	
Weight fraction vapor, In/Out		1.000		1.000	
Temperature, In/Out	(Deg C)	40.00		200.00	
Skin temperature, Min/Max	(Deg C)	158.21		297.14	
Pressure, Inlet/Outlet	(inH2O)	406.791		406.791	
Pressure drop, Total/Allow	(inH2O)	0.711		10.000	
Midpoint velocity	(m/s)	6.77		28.46	
- In/Out	(m/s)			30.42	
Heat transfer safety factor	(--)	1		1	
Fouling	(m2-hr-C/kcal)	0.000100		0.000100	
Exchanger Performance					
Outside film coef	(kcal/m2-hr-C)	62.02		Actual U	(kcal/m2-hr-C)
Tubeside film coef	(kcal/m2-hr-C)	64.32		Required U	(kcal/m2-hr-C)
Clean coef	(kcal/m2-hr-C)	28.714		Area	(m2)
Hot regime	Sens. Gas			Overdesign	(%)
Cold regime	Sens. Gas				
EMTD	(Deg C)	219.4		Tube Geometry	
Duty	(MM J/hr)	1802.439		Tube type	Plain
Unit Geometry				Tube OD	(mm)
Bays in parallel per unit		1		Tube ID	(mm)
Bundles parallel per bay		1		Length	(mm)
Extended area	(m2)			Area ratio(out/in)	(--)
Bare area	(m2)			Layout	
Bundle width	(mm)			Trans pitch	(mm)
Nozzle		Inlet	Outlet	Long pitch	(mm)
Number	(--)	1	1	Number of passes	(--)
Diameter	(mm)	500.000	500.000	Number of rows	(--)
Velocity	(m/s)	45.86	39.74	Tubecount	(--)
R-V-SQ	(kg/m-s2)	1103.02	955.76	Tubecount Odd/Even	(--)
Pressure drop	(inH2O)	2.436	1.343	Tube material	Carbon steel
Fan Geometry				Fin Geometry	
No/bay	(--)			Type	None
Fan ring type				Fins/length	fin/meter
Diameter	(mm)			Fin root	mm
Ratio, Fan/bundle face area	(--)			Height	mm
Driver power	(kW)			Base thickness	mm
Tip clearance	(mm)			Over fin	mm
Efficiency	(%)			Efficiency	(%)
Airside Velocities		Actual	Standard	Area ratio (fin/bare)	(--)
Face	(m/s)	1.21		Material	
Maximum	(m/s)	5.29		Thermal Resistance, %	
Flow	(100 m3/min)	1.635		Air	46.01
Velocity pressure	(mmH2O)	0.519		Tube	53.19
Bundle pressure drop	(mmH2O)	17.595		Fouling	0.63
Bundle flow fraction	(--)	1.000		Metal	0.17
Bundle	97.42			Bond	0.00
Airside Pressure Drop, %					
Bundle	97.42			Louvers	0.00
Ground clearance	0.00			Hail screen	0.00
Fan guard	0.00				
Standard	0.00				
Cladding	0.00				

ตัวอย่างการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอีโคโนไมเซอร์ (ต่อ)





ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ	มนตรี มีคำนิล
วันเดือนปีเกิด	30 กรกฎาคม 2527
สถานที่เกิด	อุบลราชธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	242/17 ม.10 พิชญะอพาร์ทเมนต์ ซ.กุศลสงสามัคคี ต.สำโรง อ.พระประแดง จ.สมุทรปราการ 10130
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท สยามราชธานี คอร์ปอเรชั่น จำกัด
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2551	วศ.บ. (ระบบควบคุมและเครื่องมือวัด) จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2556	วศ.ม. (การจัดการทางวิศวกรรม) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

