

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
สำหรับเครื่องสกัดแรงดันสูง

DESIGN AND CONSTRUCTION A HEAT EXCHANGER
FOR HIGH PRESSURE EXTRACTOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
สำหรับเครื่องสกัดแรงดันสูง

DESIGN AND CONSTRUCTION A HEAT EXCHANGER
FOR HIGH PRESSURE EXTRACTOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION A HEAT EXCHANGER
FOR HIGH PRESSURE EXTRACTOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
Year 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเครื่องสกัดแรงดันสูง

DESIGN AND CONSTRUCTION A HEAT EXCHANGER FOR HIGH PRESSURE
EXTRACTOR

ผู้จัดทำ

- | | | |
|-----------------|----------|-----------------------|
| 1. นายรัชชานนท์ | ค่านาคี | รหัสประจำตัว 58011052 |
| 2. นายวุฒิภัทร | วุฒิโอสถ | รหัสประจำตัว 58011184 |
| 3. นายสิทธิกร | แซ่จิ่ง | รหัสประจำตัว 58011300 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.สยาม สงวนรัมย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเครื่องสกัดแรงดันสูง

นายรัชชานนท์	คำนาดี	58011052
นายวุฒิกัทร	วุฒิโอสถ	58011184
นายสิทธิกร	แซ่จิ่ง	58011300
อ.สยาม	สงวนรัมย์	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2561		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงอุปกรณ์ในการควบคุมอุณหภูมิสำหรับการสกัดด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความดันสูง โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความเสถียรในการสกัด เพิ่มประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนและลดความเสียหายที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ โดยแบ่งชุดอุปกรณ์ออกเป็น 3 ส่วน

ในส่วนแรกอุปกรณ์ระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ โดยใช้ระบบอัตโนมัติควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนและน้ำเย็น เพื่อให้ควบคุมอุณหภูมิบริเวณ ถังสกัดให้คงที่ โดยสามารถปรับเปลี่ยนอุณหภูมิระบบสกัดได้ตั้งแต่ 15 องศาเซลเซียสจนถึง 65 องศาเซลเซียส ตามความเหมาะสมของวัตถุดิบนำมาใช้สกัด

ในส่วนที่สองครีบของถังสกัด ทำจากอะลูมิเนียมที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของถังสกัดเพิ่มขึ้นจากเดิม 12.1 เปอร์เซ็นต์

ในส่วนสุดท้ายอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว ทำจากท่อเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.125 นิ้ว ต่อกับเครื่องอัดความดันสูงสำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีอุณหภูมิสูงจากเครื่องอัดความดันสูงมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำหล่อเย็น จากผลทดลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีอัตราการถ่ายเทความร้อน 413.7 วัตต์

คำสำคัญ: อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว, ครีบ, ระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

DESIGN AND CONSTRUCTION A HEAT EXCHANGER FOR HIGH PRESSURE EXTRACTOR

Ratchanon	Kamnadee	58011052
Wuttipat	Wuttiosod	58011184
Sithikorn	Sae-jung	58011300
Sayam	Saguanrum	Advisor

Year 2018

ABSTRACT

This research is conducted on the topic of designing and constructing heat exchanger device including the equipment to control the temperature for high-pressure carbon dioxide extraction. The purpose is to increase the convenience of extraction, increase the efficiency of the heat exchanger and reduce damage to the device by dividing the units of equipment into 3 parts.

In the first part, the automatic temperature-controlling device uses the automatic system to calculate the time to order and hot and cold water flow to control the temperature around the extractor. The extractor can have fixed temperature controlled from 15 ° C to 65 ° C. according to the suitability of the extract extracted.

In the second part, the fins of the extractor are made from aluminum with high heat transfer rates. This causes the heat transfer efficiency of the extraction tank to increase for 12.1 percent.

In the final part, the helical coil heat exchanger is made of 0.125 inched stainless steel pipe, The helical coil is threaded to a high-pressure extruded to reduce the temperature of carbon dioxide from compressor. In the trial by water, heat is transferred out for 413.7 watt

Keyword: helical coil heat exchanger, fins, the automatic temperature-controlling device

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก อ.สยาม สงวนรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้
สละเวลาในการให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำปริญญานิพนธ์ รวมถึงติดตามความก้าวหน้าของ
การจัดทำปริญญานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่จนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณาจารย์สอบปริญญานิพนธ์ ผศ.ดร.เอกพจน์ ต้นตราภิวัดน์ ดร.บำรุง พ่วงเกิด
ดร.ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล และ อ.ภูติท ชัยดิolkพัฒนกุล ในการสอบปริญญานิพนธ์ครั้งนี้ รวมถึงให้
คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และช่วยแก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเรียบร้อย ถูกต้อง
และสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ชุมชุมอโตะโมทีฟ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ

น้อมรำลึกถึงครูบาอาจารย์ทุกท่าน ทั้งครูเจ้าของวิชา ครูผู้สืบทอดวิชา ครูผู้สอน ทั้งในโลก
ตะวันออกและตะวันตก

สุดท้ายขอขอบคุณบิดามารดาญาติพี่น้องที่ให้กำลังใจในการเรียนตลอดระยะเวลาการศึกษาและ
การจัดทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้

คุณค่าอันเป็นประโยชน์ทั้งมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอถวายเป็นพระราชกุศลแด่
พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช พระบาทสมเด็จพระ
เจ้าอยู่หัววชิราลงกรณ์ ตลอดจนบุรพคุณพระศรีแห่งราชวงศ์จักรีทุกพระองค์ ขออุทิศแด่เจ้าพระยาสุ
รวงษ์ไวยวัฒน์ (วร บุนนาค) ศาสตราจารย์หลวงพรตพิทยพยัต ท่านเลี่ยม พรตพิทยพยัต ตลอดจนทุกท่าน
ที่สร้างคุณประโยชน์ให้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนึ่งหากมีข้อผิดพลาด
ประการใด คณะผู้จัดทำขอภัยในโอกาสนี้ด้วย

นายรัชชานนท์ คำนาดี

นายวุฒิกัทร วุฒิโอสถ

นายสิทธิกร แซ่จั้ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.7 แผนการทำงาน.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 สมดุลพลังงาน.....	5
2.2.1 การวิเคราะห์พลังงานสำหรับระบบปิด.....	6
2.2.2 การวิเคราะห์พลังงานสำหรับระบบเปิด.....	7
2.3 กระบวนการไอเซนโทรปิกของสารบริสุทธิ์.....	8
2.4 ระบบควบคุมเบื้องต้น.....	9
2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	10
2.6 อุปกรณ์ในการเครื่องควบคุมความร้อน.....	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.1 ดิจิตอล เทอร์โมมิเตอร์.....	11
2.6.2 มอเตอร์น้ำเย็นในการทดลอง	12
2.6.3 มอเตอร์น้ำร้อนในการทดลอง	12
2.6.4 มอเตอร์สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวในการทดลอง	12
2.7 ทฤษฎีการออกแบบครีบบของเครื่องสกัด.....	14
2.7.1 การนำความร้อน.....	14
2.7.1.1 การนำความร้อนในทรงกระบอก.....	14
2.7.2 การพาความร้อนโดยธรรมชาติบนพื้นผิว	16
2.7.3 การถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวครีบบ	18
2.7.4 ประสิทธิภาพของครีบบ	18
2.8 อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดเมื่อสวมครีบบ	19
2.9 ระยะห่างที่เหมาะสมสำหรับครีบบ	21
2.10 ทฤษฎีการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวของ เครื่องอัดความดัน	21
2.10.1 การนำความร้อนผ่านผิวท่อ.....	21
2.10.2 การพาความร้อน.....	22
2.10.2.1 เลขเรย์โนลด์ส์	22
2.10.2.2 เลขนัสเซิลต์.....	23
2.10.2.3 การพาความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แบบขดเกลียว.....	24
2.10.2.4 การพาความร้อนภายนอกท่อ.....	24
2.10.3 ความต้านทานทางความร้อนสุทธิ.....	25
2.10.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม	26
2.11 อุปกรณ์ในการวัด.....	26
2.11.1 เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท	26
2.11.2 เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด ยี่ห้อ Testo รุ่น Testo 882.....	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11.3 ปีกเกอร์.....	27
บทที่ 3 ขั้นตอนการออกแบบ	28
3.1 การออกแบบเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติของระบบสกัด.....	28
3.1.1 ภาพรวมของเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติของระบบสกัด.....	28
3.1.2 ฝั่งงาน.....	29
3.2 การออกแบบครีบบองดังสกัด.....	32
3.2.1 อัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อไม่สวมครีบบ.....	33
3.2.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อสวมครีบบ.....	37
3.3 การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว.....	42
3.3.1 คำนวณห้ออัตราการถ่ายเทความร้อนเพื่อใช้ในการลดอุณหภูมิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	43
3.3.2 คำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว.....	45
3.3.3 คำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว.....	46
3.3.4 คำนวณความยาวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว.....	48
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	50
4.1 การทดลองความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	50
4.2 ทดลองการควบคุมอุณหภูมิในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ณ เวลาต่าง ๆ.....	52
4.3 ทดลองอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนของถังสกัดแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อสวมครีบบและไม่สวมครีบบ เมื่อเติมน้ำภายใน 0.8 kg.....	54
4.4 ทดลองอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวที่น้ำไหลผ่าน.....	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง วิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ.....	57
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	57
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	57
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	58
บรรณานุกรม.....	59
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก.....	62



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ตารางแสดงแผนการดำเนินงาน	3
2.1 สมการสหสัมพันธ์สำหรับเลขนัสเซลต์เฉลี่ยของการพาความร้อนตามธรรมชาติบนพื้นผิว	17
2.2 Modified Bessel functions of the first and second kinds	20
2.3 Variation of optimum fin spacing (S_{opt} in mm) with fin diameter, D for different Ra	21
3.1 ขนาดท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน	42
4.1 อุณหภูมิของน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ	50
4.2 ทดลองการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ย	52
4.3 ทดลองอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนของถังสกัดเมื่อไม่สวมครีป	54
4.4 ทดลองอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนของถังสกัดเมื่อสวมครีป	55
4.5 ทดลองอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	56

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟแสดงสถานะคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน และอุณหภูมิต่าง ๆ	4
2.2 แผนภาพแสดงแบบจำลองโลจิสติกส์ ระหว่างปริมาณน้ำมันหอมระเหย และเวลา	5
2.3 แผนภาพแสดงกระบวนการไอเซนโทรปิก	8
2.4 แผนภาพบล็อกกระบวนควบคุมเบื้องต้น.....	9
2.5 อาคยโน ยูโนรุ่น UNO R3 MEGA328P CH340 CH340G.....	10
2.6 ไมโครลขั้วสัญญาณ PWM 5-36VDC 15A	10
2.7 อุปกรณ์จ่ายไฟ (Power supply) รุ่น 12V/30A.....	11
2.8 ดิจิตอล เทอโมมิเตอร์รุ่น DS18B20.....	11
2.9 วงจรต่ออุณหภูมิดิจิตอล เทอโมมิเตอร์	12
2.10 12V R385 DC Diaphragm Pumps.....	12
2.11 pumps seaftlo รุ่น SFDP1-014-080-22.....	13
2.12 Goodpumps 12 V รุ่น FL-3308.....	13
2.13 แสดงการนำความร้อนในทรงกระบอก.....	14
2.14 ประสิทธิภาพของครีรูปทรงต่าง ๆ	19
2.15 เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท.....	26
2.15 เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด ยี่ห้อ Testo รุ่น Testo 882	27
2.16 ปีกเกอร์.....	27
3.1 ภาพรวมของเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติของระบบสกัด	28
3.2 (ก) แผนภาพผังงานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติของระบบสกัด	30
3.2 (ข) แผนภาพผังงานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติของระบบสกัด	30
3.3 กราฟระหว่างความดันและเอนทัลปีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	32
3.4 ภาพแบบจำลองของถังแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อสวมครีบ.....	41
3.5 กราฟระหว่างความดันและเอนทัลปีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 ภาพ ก แบบจำลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว ภาพ ข ภาพตัดขวางอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว.....	49
4.1 กราฟทดลองการควบคุมอุณหภูมิ.....	53
ก.1 แผนผังแสดงอุปกรณ์ในการทดลอง.....	53



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญปัญหา

จากการศึกษาปริญญาโท งานวิจัย และหนังสือที่เกี่ยวข้องกับการสกัดด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความดันสูง กระบวนการสกัดน้ำมันหอมระเหยหรือสารอาหารจากวัตถุดิบทางธรรมชาติมีอุปกรณ์หลักดังนี้ คือ ถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เครื่องอัดความดัน ถังสกัด ถังแยกสารสกัดและวาล์ว เนื่องจากวัตถุดิบในการสกัด มีอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมในการสกัดต่างกัน จากการทดลองสกัดมะกรูด ค่าที่เหมาะสมคือความดัน 105 บาร์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส [1] ซึ่งได้น้ำมันหอมระเหยปริมาณมากที่สุด และจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิของน้ำบริเวณถังสกัดเพื่อให้อุณหภูมิคงที่ จึงได้ออกแบบระบบในการควบคุมอุณหภูมิจากถังสกัด [2] อีกทั้งยังออกแบบครีบบริเวณถังสกัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน และสำหรับทางด้านขาออกของเครื่องอัดความดันที่มีอุณหภูมิสูง [3] ส่งผลให้อุปกรณ์เกิดความเสียหาย ดังนั้น จึงได้ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว [4] เพื่อลดอุณหภูมิให้เหมาะสมกับอุปกรณ์

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติของระบบสกัดด้วยอัตราการไหลของน้ำ
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างครีบบริเวณถังสกัดในการเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของถังสกัด
- 1.2.3 เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวสำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางด้านขาออกของเครื่องอัดความดันสูง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 ควบคุมอุณหภูมิของน้ำบริเวณถังสกัดได้
- 1.3.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนของถังสกัดเพิ่มขึ้น
- 1.3.3 ลดอุณหภูมิก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางด้านขาออกของเครื่องอัดความดันสูง

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.4.1 การออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมอุณหภูมิของน้ำบริเวณถังสกัด
- 1.4.2 การออกแบบและสร้างครีบบริเวณถังสกัดทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของถังสกัดเพิ่มขึ้น
- 1.4.3 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวสำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางด้านขาออกของเครื่องอัดความดันสูงเพื่อให้มีอุณหภูมิเหมาะสม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เครื่องควบคุมอุณหภูมิของระบบสกัด ทำงานและควบคุมอุณหภูมิได้
- 1.5.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนของถังสกัดเพิ่มขึ้น
- 1.5.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางด้านขาออกของเครื่องอัดความดันสูงมีอุณหภูมิเหมาะสม ทำให้อุปกรณ์ไม่เกิดความเสียหาย

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.6.1 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต
- 1.6.2 ทำการทบทวนตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต
- 1.6.3 ศึกษาแบบควบคุมความร้อนแบบอัตโนมัติ
- 1.6.4 ศึกษาทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อนของครีบบ
- 1.6.5 ศึกษาทฤษฎีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว

1.7 แผนการทำงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการทำงานปี 2561 และ 2562

กิจกรรม	ปี 2561				ปี 2562					
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
1. ศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยในอดีต										
2. ศึกษาและค้นคว้าอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย										
3. ออกแบบและคำนวณอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากเครื่องอัดความดันสูง										
4. ออกแบบและคำนวณการเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของถังสกัด										
5. สร้างครีบบของถังสกัด อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว และระบบควบคุมอุณหภูมิของน้ำรอบ ๆ ถังสกัด										
6. ทดลองและเก็บผลการทดลอง										
7. สรุปผลการทดลอง										

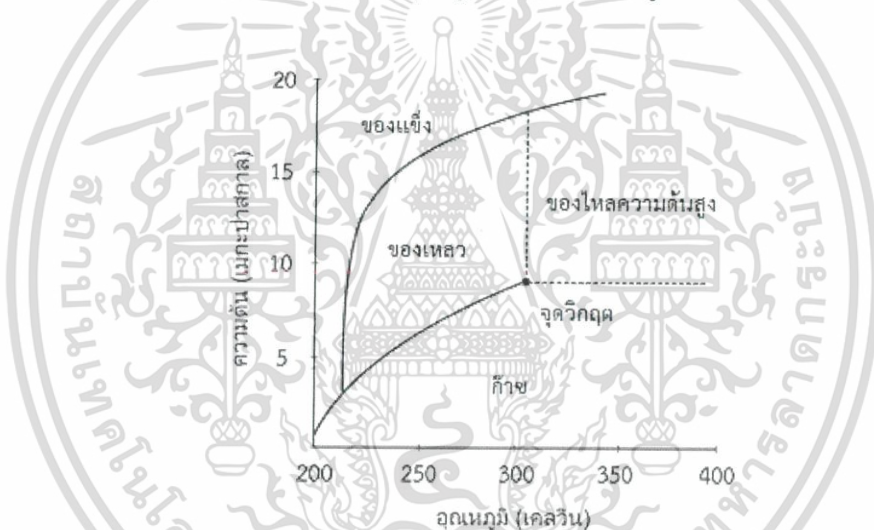
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

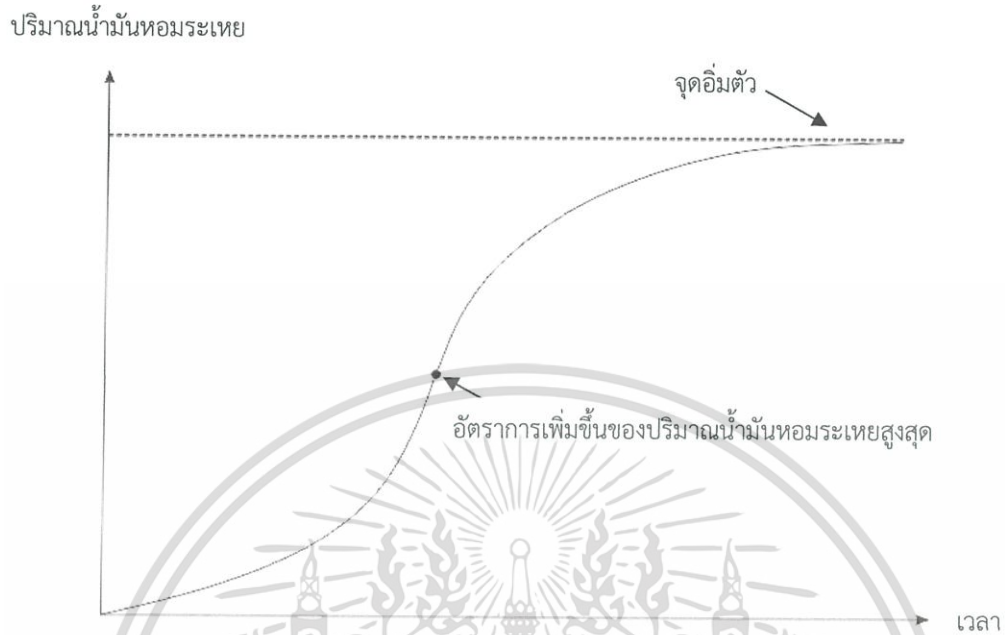
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาการสกัดสารหอมระเหยหรือสารอาหารจากวัตถุดิบทางธรรมชาติด้วยวิธีการควบคุมอุณหภูมิ และความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ให้เกินจุดวิกฤต คือ 7.29 เมกะปาสกาล และ 31.3 องศาเซลเซียส [5] ตามลำดับ ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีคุณสมบัติเสมือนของเหลว แต่เป็นของเหลวที่หนืดและสามารถแพร่สู่วัตถุดิบเพื่อดึงสารขณะสกัดได้ดีเหมือนก๊าซ จากนั้นเมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับสู่สภาวะความดันปกติ ทำให้เกิดการแยกตัว ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะออกไปสู่บรรยากาศเหลือเพียงสารหอมระเหยที่มีความบริสุทธิ์สูง [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงสถานะคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน และอุณหภูมิต่าง ๆ

ปริมาณน้ำมันหอมระเหย ในช่วงการสกัดตอนต้นอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันหอมระเหย จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา จนถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำหอมระเหยสูงสุด แต่เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ว อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันหอมระเหยค่อย ๆ ลดลง จนถึงจุดที่ไม่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณ เรียกว่า จุดอิ่มตัว [7] ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงแบบจำลองโลจิสติกส์ ระหว่างปริมาณน้ำมันหอมระเหยและเวลา

2.2 สมดุลพลังงาน

มาจากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์หรือกฎทรงพลังงาน (Law of conservation of energy) กล่าวว่า “พลังงานของระบบใด ๆ คงที่ ” ฉะนั้น สมดุลพลังงานจึงทำให้สามารถทราบถึงการถ่ายเทพลังงานที่เกี่ยวข้องในระบบนั้น ๆ [8]

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{system}}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ \dot{E}_{in} คือ พลังงานเข้า (kW)

\dot{E}_{out} คือ พลังงานออก (kW)

$\frac{dE_{system}}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในระบบ (kW)

2.2.1 การวิเคราะห์พลังงานสำหรับระบบปิด

สำหรับระบบปิดที่ทำงานเป็นวัฏจักร (สถานะเริ่มต้นเหมือนกับสถานะสุดท้าย) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบจึงเป็นศูนย์ ($\frac{dE_{system}}{dt} = 0$) จะได้

$$E_{in} = E_{out} \quad (2.2)$$

เนื่องจากพลังงานที่ถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบปิดมีเฉพาะความร้อน (Q) และงาน (W) เท่านั้น ทำให้สมดุลพลังงานในรูปทั่วไปเป็นดังนี้

$$Q - W = \Delta E \quad (2.3)$$

เนื่องจาก $\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (2.4)$$

ถ้าระบบไม่มีการเคลื่อนที่

$$Q - W = \Delta U \quad (2.5)$$

หรือ

$$Q - W = m(u_2 - u_1) \quad (2.6)$$

เมื่อ Q คือ ความร้อนสุทธิที่ถ่ายโอนผ่านระบบ (kJ)

W คือ งานสุทธิที่ถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบ (kW)

ΔU คือ ผลต่างพลังงานภายในของสารที่เปลี่ยนแปลงไป (kJ)

ΔKE คือ ผลต่างพลังงานจลน์ที่เปลี่ยนแปลงไป (kJ)

ΔPE คือ ผลต่างพลังงานจลน์ที่เปลี่ยนแปลงไป (kJ)

u คือ พลังงานภายในต่อมวล (kJ/kg)

2.2.2 การวิเคราะห์พลังงานสำหรับระบบเปิด

เนื่องจากในกระบวนการมีการไหลแบบคงตัว พลังงานในระบบมีค่าคงที่ (E_{system}) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบจึงเป็นศูนย์ ($\frac{dE_{system}}{dt} = 0$) จะได้

$$\dot{E}_m = \dot{E}_{out} \quad (2.7)$$

เมื่อแจกแจงรูปแบบของพลังงานที่เกิดจากการถ่ายโอนในสมการ 2.2 จะได้

$$\dot{Q}_m + \dot{W}_m + \sum_m \dot{m}\theta = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m}\theta \quad (2.8)$$

สำหรับระบบที่มีกระแสเดียว สมการสมดุลพลังงาน

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[h_{out} - h_m + \frac{v_{out}^2 - v_m^2}{2} + g(z_{out} - z_m) \right] \quad (2.9)$$

เมื่อ	\dot{Q}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านขอบเขตของระบบ (kW)
	\dot{W}	คือ ปริมาณงานต่อหน่วยเวลา หรือกำลัง (kW)
	h_m	คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของสารที่เข้าสู่ระบบ (kJ/kg)
	h_{out}	คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของสารที่ออกจากระบบ (kJ/kg)
	\dot{m}	คือ อัตราการไหล (kg/s)
	v_{out}	คือ ความเร็วของสารที่ออกจากระบบ (m/s)
	v_m	คือ ความเร็วของสารที่เข้าสู่ระบบ (m/s)

2.3 กระบวนการไอเซนโทรปิกของสารบริสุทธิ์

การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบ นั้นจะมี 2 ปัจจัย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง คือ การถ่ายโอนความร้อนและกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ (Irreversibilities) แต่เอนโทรปีจะไม่เปลี่ยนแปลงในกระบวนการย้อนกลับได้แบบภายใน (Internally reversible) และแอดิยาแบติก (Adiabatic) เรียกว่า กระบวนการไอเซนโทรปิก ดังแสดงในรูปที่ 2.3

ระบบทางวิศวกรรมและอุปกรณ์จำนวนมาก เช่น บีบ หัวฉีด หรือ กังหัน ทำงานโดยไม่มีการสูญเสียความร้อน (Adiabatic) และมีประสิทธิภาพสูงสุดถ้าไม่มีกระบวนการผันกลับไม่ได้ (Irreversibilities) ดังนั้น เราถือได้ว่ากระบวนการไอเซนโทรปิกเป็นกระบวนการแบบจำลองที่เหมาะสมของกระบวนการจริง และใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกระบวนการจริงได้ [8]

กระบวนการไอเซนโทรปิก

$$\Delta s = 0$$

(2.10)

หรือ

$$s_1 = s_2$$

(2.11)



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงกระบวนการไอเซนโทรปิก

2.4 ระบบควบคุมเบื้องต้น

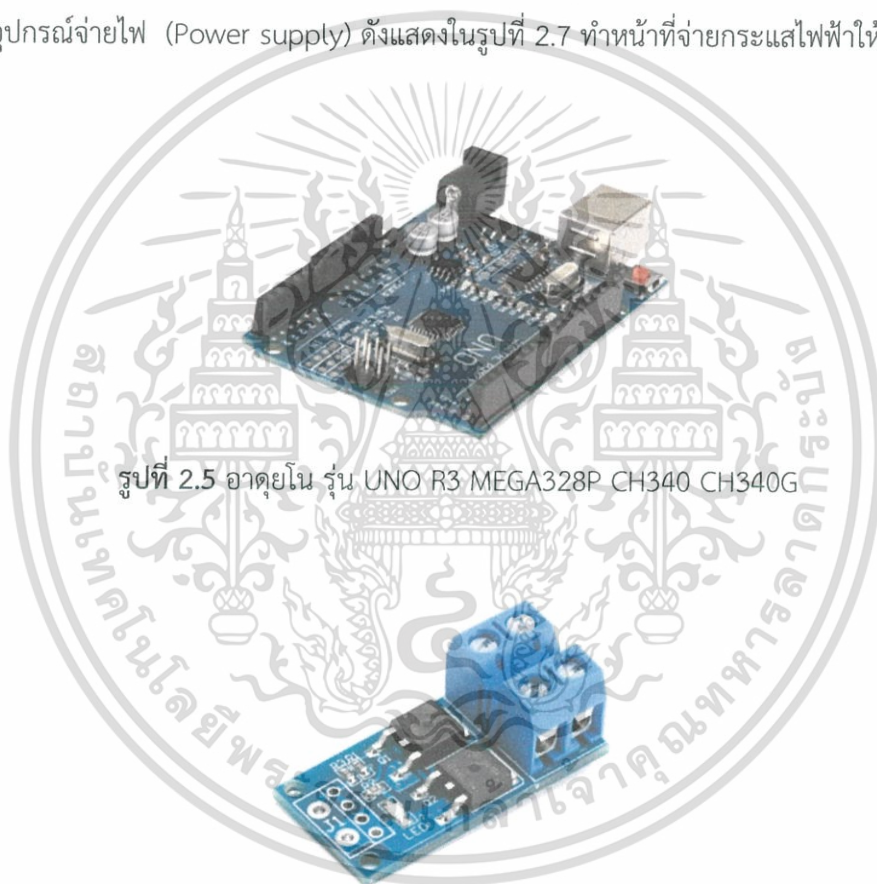
ระบบควบคุมอัตโนมัติ หมายถึง ระบบควบคุมที่ทำงานอย่างต่อเนื่องได้ด้วยตนเองเมื่อมีการป้อนสัญญาณเริ่มต้นการทำงานให้กับระบบ ไม่ว่าจะระบบควบคุมนั้นจะได้มีการกำหนดรูปแบบในการทำงานให้สามารถทำงานได้เป็นผลสำเร็จตลอดทั้งระบบ หรือการบังคับให้ระบบควบคุมการทำงานในลักษณะที่จะนำมาซึ่งผลงาน (Output) ที่มีคุณสมบัติสอดคล้องหรือเป็นไปตามเป้าหมายที่ถูกกำหนดไว้ (Set point) ได้ด้วยตัวมันเอง สำหรับปริมาณทางฟิสิกส์หรือตัวแปร (Parameter) ที่มักจะถูกควบคุมในอุตสาหกรรมให้มีค่าเป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนดเอาไว้ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหล และความดัน เป็นต้น โครงสร้างโดยทั่วไปของระบบควบคุมการทำงาน เป้าหมายของระบบหรือเงื่อนไขข้อกำหนดที่ทำการป้อนเข้าสู่ระบบควบคุมจะถูกเรียกว่า “ข้อมูลเข้า” (Input) ส่วนผลของการทำงานหรือสัญญาณที่ถูกจ่ายออกจากระบบควบคุมการทำงานจะถูกเรียกว่า “ข้อมูลออก” (Output) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.4 แผนภาพบล็อกกระบบควบคุมเบื้องต้น

2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการทดลอง

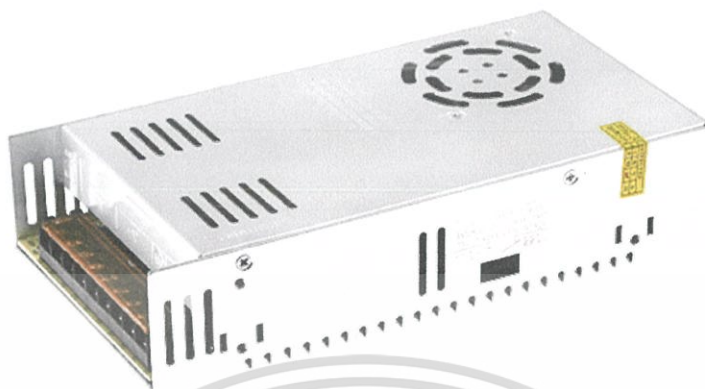
ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก มีความสามารถที่คล้ายคลึงกับคอมพิวเตอร์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ตเชื่อมต่อ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน งานทดลองนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูยโน (Arduino) รุ่น UNO R3 MEGA328P CH340 CH340G ในการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โมดูลขับรุ่น PWM 5-36VDC 15A ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ทำหน้าที่ควบคุมมอเตอร์เพื่อให้ของไหลไหลได้ตามที่เราต้องการ อุปกรณ์จ่ายไฟ (Power supply) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอาดูยโน



รูปที่ 2.5 อาดูยโน รุ่น UNO R3 MEGA328P CH340 CH340G

รูปที่ 2.6 โมดูลขับสัญญาณ PWM 5-36VDC 15A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์จ่ายไฟ (Power supply) รุ่น 12V/30A

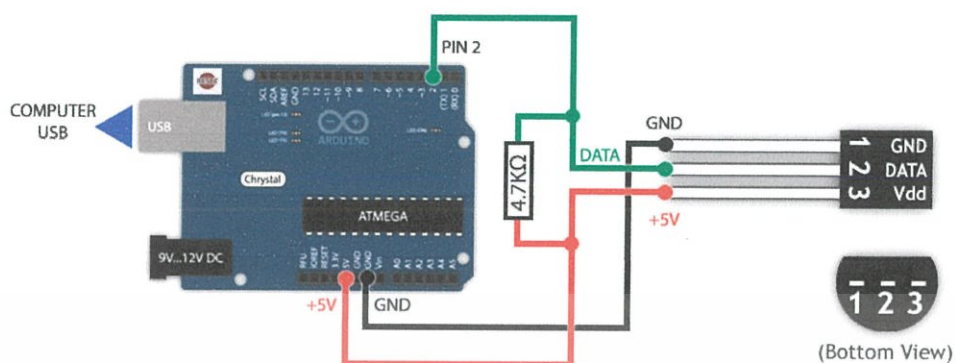
2.6 อุปกรณ์ในการเครื่องควบคุมความร้อน

2.6.1 ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ คือ อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดอุณหภูมิ ในการทดลองนี้ ได้เลือกใช้ดิจิตอล เทอร์โมมิเตอร์รุ่น DS18B20 ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และการต่อวงจรอาดยโนกับดิจิตอล เทอร์โมมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์รุ่น DS18B20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 วงจรต่ออาคยโนกับคิตจิตตอลเทอร์โมมิเตอร์

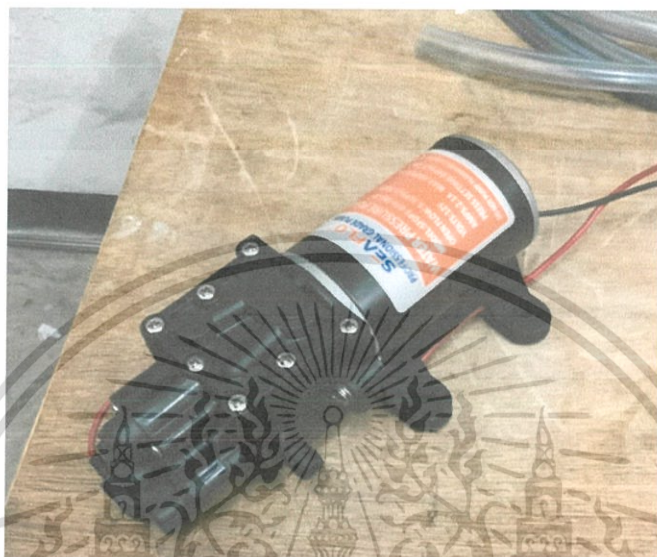
2.6.2 มอเตอร์น้ำเย็นในการทดลอง เลือกใช้ 12V R385 DC Diaphragm Pumps ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 12V R385 DC Diaphragm Pumps

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 มอเตอร์น้ำร้อนในการทดลอง เลือกใช้ pumps seaflo รุ่น SFDP1-014-080-22 ดังแสดง
ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 pumps seaflo รุ่น SFDP1-014-080-22

2.6.4 มอเตอร์สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวในการทดลอง เลือกใช้ Goodpumps
12 V รุ่น FL-3308 ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 Goodpumps 12 V รุ่น FL-3308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ทฤษฎีการออกแบบครีบของถังสกัด

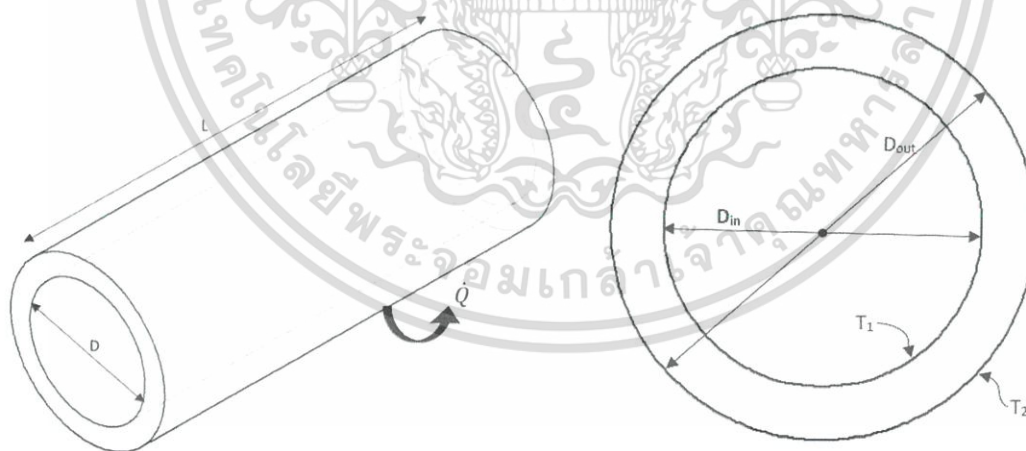
พิจารณาการถ่ายเทความร้อนจากกฎของนิวตันสำหรับการทำความเย็น เมื่อค่าอุณหภูมิผิวและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม กำหนดให้มีค่าคงที่ ดังนั้น สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จาก การเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน เรียกว่า การสวมครีบ

2.7.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อน หมายถึง การส่งผ่านพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลาง อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปยังด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยการส่งถ่ายความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งสู่อีกอีกโมเลกุลหนึ่ง [9]

2.7.1.1 การนำความร้อนในทรงกระบอก (Heat conduction in cylinders)

การนำความร้อนในทรงกระบอกหาได้โดยอาศัยกฎของฟูริเยร์ (Fourier's law) ซึ่งกล่าวไว้ว่า สำหรับการนำความร้อนผ่านทรงกระบอก สามารถคำนวณได้จากความร้อนโดยการนำความร้อน (Q_x) ผ่านตัวกลางในทิศทางนั้นเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลของความร้อน (A) และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางในทิศทางดังกล่าว สำหรับการนำความร้อนในทิศทาง D ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการนำความร้อนในทรงกระบอก

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.12)$$

ได้ปริพันธ์ตั้งแต่ D_{in}, T_1 ถึง D_{out}, T_2

$$\int_{D_{in}}^{D_{out}} \frac{\dot{Q}_{cond,cyl}}{A} dD = k \int_{T_1}^{T_2} dT \quad (2.13)$$

แทนค่า $A = 2\pi rL$

$$\dot{Q}_{cond,cyl} = 2\pi LK \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_{in}}\right)} \quad (2.14)$$

และตัวต้านทานทางความร้อนทรงกระบอกสามารถคำนวณได้จาก

$$R_{cyl} = \frac{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_{in}}\right)}{2\pi LK} \quad (2.15)$$

เมื่อ	Q_x	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำผ่านพื้นที่หน้าตัด (W)
	q_x	คือ ค่าฟลักซ์ความร้อน (W/m ²)
	k	คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (W/m.K)
	$\frac{dT}{dx}$	คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงระยะทาง (°C)
	D_{in}	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทรงกระบอก (m)
	D_{out}	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของทรงกระบอก (m)
	T_1	คือ อุณหภูมิพื้นผิวภายในทรงกระบอก (°C)
	T_2	คือ อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกทรงกระบอก (°C)
	L	คือ ความสูงทรงกระบอก (m)

2.7.2 การพาความร้อนโดยธรรมชาติบนพื้นผิว

การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนธรรมชาติบนพื้นผิวขึ้นอยู่กับรูปร่างของพื้นผิว การจัดวาง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนพื้นผิว และคุณสมบัติของของไหล ค่าเลขนัสเซลล์ต์สำหรับการพาความร้อนตามธรรมชาติขึ้นอยู่กับค่ากราสโฮฟและค่าเลขพรันด์เทิล [9] ดังแสดงในตารางที่ 2.1

$$Nu = CRa_L^n \quad (2.16)$$

เลขเรย์ลีหาจาก

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (2.17)$$

หรือ

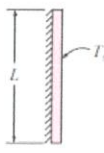
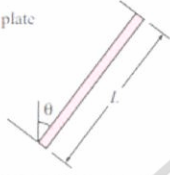





$$Ra = Gr_L Pr \quad (2.18)$$

ค่า C และ n ขึ้นอยู่กับรูปร่างของพื้นผิวและลักษณะการไหล

เมื่อ Gr_L คือ เลขกราสโฮฟ

β คือ ส่วนกลับของอุณหภูมิเฉลี่ยในหน่วยเคลวิน ($1/K$)

ตารางที่ 2.1 สมการสหสัมพันธ์สำหรับเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยของการพาความร้อนตามธรรมชาติบนพื้นผิว [9]

Geometry	Characteristic length L_c	Range of Ra	Nu
Vertical plate 	L	10^4-10^9 10^9-10^{13} Entire range	$Nu = 0.59Ra^{1/4}$ (9-19) $Nu = 0.1Ra^{1/3}$ (9-20) $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/3}} \right\}^2$ (9-21) (complex but more accurate)
Inclined plate 	L	.	Use vertical plate equations for the upper surface of a cold plate and the lower surface of a hot plate Replace g by $g \cos\theta$ for $Ra < 10^9$
Horizontal plate (Surface area A and perimeter p) (a) Upper surface of a hot plate (or lower surface of a cold plate) 	$L_c = \frac{A}{p}$	10^4-10^9 10^7-10^{11}	$Nu = 0.54Ra^{1/4}$ (9-22) $Nu = 0.15Ra^{1/3}$ (9-23)
(b) Lower surface of a hot plate (or upper surface of a cold plate) 		10^4-10^9	$Nu = 0.27Ra^{1/4}$ (9-24)
Vertical cylinder 	L		A vertical cylinder can be treated as a vertical plate when $\frac{35L}{D} > \frac{Gr^{1/4}}{Ra^{1/4}}$
Horizontal cylinder 	D	$Ra_D < 10^{12}$	$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{4/3}} \right\}^2$ (9-25)
Sphere 	D	$Ra_D < 10^{11}g$ (Pr > 0.7)	$Nu = 2 + \frac{0.589Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.469/Pr)^{9/16}]^{4/3}}$ (9-26)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 การถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวครีป

สมการสำหรับครีป

$$\dot{Q}_{cond,x} = \dot{Q}_{cond,x+\Delta x} + \dot{Q}_{conv} \quad (2.19)$$

สำหรับกรณีที่พื้นที่ตัดขวางและสัมประสิทธิ์การนำความร้อนคงที่

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hP}{kA_c}(T - T_\infty) \quad (2.20)$$

หรือ

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \quad (2.21)$$

เมื่อให้

$$m^2 = \frac{hP}{kA_c} \quad (2.22)$$

เมื่อ

T คือ อุณหภูมิผิวภายใน ($^{\circ}\text{C}$)

T_∞ คือ อุณหภูมิภายนอก ($^{\circ}\text{C}$)

P คือ ความยาวเส้นรอบวงของพื้นที่หน้าตัดครีป (m)

2.7.4 ประสิทธิภาพของครีป

อัตราการถ่ายเทความร้อน เมื่อไม่ได้สวมครีป

$$\dot{Q}_{unfin} = hA_{unfin}(T_b - T_\infty) \quad (2.23)$$

ประสิทธิภาพของครีป คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อมีการสวมครีปหาได้จาก

$$\eta_{fin} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{\dot{Q}_{fin,max}} \quad (2.24)$$

หรือ

$$\eta_{fin} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{hA_{total,fin}(T_b - T_\infty)} \quad (2.25)$$

เมื่อ

η_{fin} คือ ประสิทธิภาพของครีป

\dot{Q}_{fin} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อสวมครีป (W)

T_b คือ อุณหภูมิพื้นผิว ($^{\circ}\text{C}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_∞ คือ อุณหภูมิภายนอก (°C)

$A_{total,fin}$ คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของครีบ (m²)

ประสิทธิภาพของครีบรูปทรงต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และค่า Modified Bessel functions of the first and second kinds ดังแสดงในตารางที่ 2.2

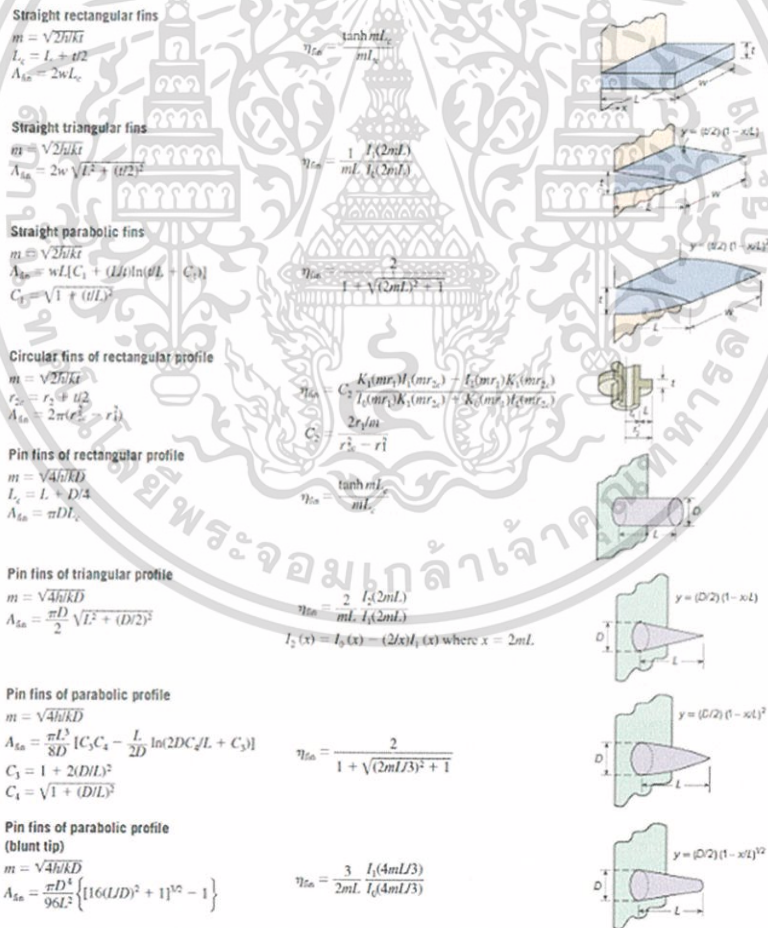
2.8 อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดเมื่อสวมครีบ

อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดเมื่อสวมครีบหาจากสมการ

$$\dot{Q}_{convect(total, fin)} = \dot{Q}_{unfin} + \dot{Q}_{fin} \tag{2.26}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดเมื่อสวมครีบหาจากสมการ

$$\dot{Q}_{total, fin} - \dot{Q}_{total, unfin} = \Delta \dot{Q}_{total} \tag{2.27}$$



รูปที่ 2.14 ประสิทธิภาพของครีบรูปทรงต่าง ๆ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 Modified Bessel functions of the first and second kinds [9]

x	$e^{-x}I_0(x)$	$e^{-x}I_1(x)$	$e^xK_0(x)$	$e^xK_1(x)$	x	$e^{-x}I_0(x)$	$e^{-x}I_1(x)$	$e^xK_0(x)$	$e^xK_1(x)$
0.0	1.0000	0.0000	∞	∞	4.2	0.2016	0.1755	0.5953	0.6627
0.2	0.8269	0.0823	2.1408	5.8334	4.4	0.1966	0.1725	0.5823	0.6454
0.4	0.6974	0.1368	1.6627	3.2587	4.6	0.1919	0.1695	0.5701	0.6292
0.6	0.5993	0.1722	1.4167	2.3739	4.8	0.1876	0.1667	0.5586	0.6143
0.8	0.5241	0.1945	1.2582	1.9179	5.0	0.1835	0.1640	0.5478	0.6003
1.0	0.4658	0.2079	1.1445	1.6362	5.2	0.1797	0.1614	0.5376	0.5872
1.2	0.4198	0.2153	1.0575	1.4429	5.4	0.1762	0.1589	0.5280	0.5749
1.4	0.3831	0.2185	0.9881	1.3011	5.6	0.1728	0.1565	0.5188	0.5634
1.6	0.3533	0.2190	0.9309	1.1919	5.8	0.1697	0.1542	0.5101	0.5525
1.8	0.3289	0.2177	0.8828	1.1048	6.0	0.1667	0.1521	0.5019	0.5422
2.0	0.3085	0.2153	0.8416	1.0335	6.5	0.1598	0.1469	0.4828	0.5187
2.2	0.2913	0.2121	0.8057	0.9738	7.0	0.1537	0.1423	0.4658	0.4981
2.4	0.2766	0.2085	0.7740	0.9229	7.5	0.1483	0.1380	0.4505	0.4797
2.6	0.2639	0.2047	0.7459	0.8790	8.0	0.1434	0.1341	0.4366	0.4631
2.8	0.2528	0.2007	0.7206	0.8405	8.5	0.1390	0.1305	0.4239	0.4482
3.0	0.2430	0.1968	0.6978	0.8066	9.0	0.1350	0.1272	0.4123	0.4346
3.2	0.2343	0.1930	0.6770	0.7763	9.5	0.1313	0.1241	0.4016	0.4222
3.4	0.2264	0.1892	0.6580	0.7491	10.0	0.1278	0.1213	0.3916	0.4108
3.6	0.2193	0.1856	0.6405	0.7245					
3.8	0.2129	0.1821	0.6243	0.7021					
4.0	0.2070	0.1788	0.6093	0.6816					

*Evaluated from EES using the mathematical functions Bessel I(x) and Bessel K(x)

การพาความร้อนธรรมชาติสำหรับครีบบางแหวนที่ติดอยู่ที่ผิวภายนอกของทรงกระบอก
การหาเลขนัสเซิลต์ [10]

$$Nu = c_0 + c_1 Ra^{a_0} \left(\frac{s/d}{\zeta}\right)^{a_1} + c_2 Ra^{a_2} \left(\frac{s/d}{\zeta}\right)^{a_3} + c_3 \zeta^{a_4} \tag{2.28}$$

- เมื่อ
- c_0 คือ 1062.851
 - c_1 คือ 18.289
 - c_2 คือ -17.511
 - c_3 คือ -1058.885
 - a_0 คือ 0.212
 - a_1 คือ 0.881
 - a_2 คือ 0.211
 - a_3 คือ 0.906
 - a_4 คือ 0.003
 - ζ คือ $\frac{D_{fin}}{D_{out}}$
 - D_{fin} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเมื่อสวมครีบบ (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ระยะห่างที่เหมาะสมสำหรับครีป (S_{opt})

ตารางที่ 2.3 Variation of optimum fin spacing (S_{opt} in mm) wit fin diameter, D for different Ra [10]

Ra	$D = 125$	$D = 100$	$D = 75$	$D = 50$
1.135×10^{11}	7.688	7.345	7.286	7.237
1.617×10^{11}	7.571	7.239	7.175	7.122
1.773×10^{11}	7.46	7.139	7.08	7.02

2.10 ทฤษฎีการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวของเครื่องอัด

2.10.1 การนำความร้อนผ่านผิวท่อ

การนำความร้อน หมายถึง การส่งผ่านพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลาง อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปยังด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยการส่งถ่ายความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งสู่อีกโมเลกุลหนึ่ง [9]

การนำความร้อนในทรงกระบอกหาได้โดยอาศัยกฎฟูเรียร์ (Fourier's law) สามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{cond,cyl} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cyl}} \quad (2.29)$$

เมื่อค่าความต้านทานของการถ่ายเทความร้อนในทรงกลมสามารถคำนวณได้จาก

$$R_{cyl} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi LK} \quad (2.30)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{cond,cyl}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำผ่านพื้นที่หน้าตัด (W)

T_1 คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยผนังร้อน (°C)

T_2 คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ (°C)

R_{cyl} คือ ความต้านทานทางความร้อน (°C/W)

r_1 คือ รัศมีภายในทรงกระบอก (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

r_2 คือ รัศมีภายนอกทรงกระบอก (m)

2.10.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

การพาความร้อน คือ รูปแบบของการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของแข็งที่มีตัวกลางที่เกิดการเคลื่อนที่

การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน สามารถทำได้โดยใช้กฎของนิวตันสำหรับการทำความเย็น (Newton's law of cooling) [9]

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.31)$$

โดย $T_s > T_\infty$

เมื่อ \dot{Q}_{conv} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (W)

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

T_s คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยผนังร้อน ($^\circ C$)

T_∞ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล ($^\circ C$)

A คือ พื้นที่ผิว (m^2)

2.10.2.1 เลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number, Re)

เลขเรย์โนลด์ส์ คือ อัตราส่วนของแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อแรงความหนืด (Viscous force) สามารถคำนวณได้จาก

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$V = \frac{4\dot{m}}{\rho \pi D^2} \quad (2.33)$$

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\mu \pi D} \quad (2.34)$$

โดย Re คือ เลขเรย์โนลด์ส์

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- V คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
 μ คือ ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล (kg/m.s)

2.10.2.2 เลขนัสเซิลต์ (Nusselt number)

ตัวแปรไร้มิติที่แสดงถึงอัตราการถ่ายเทความร้อน สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และค่าความยาวจำเพาะของพื้นผิวหรือรูปทรง

$$Nu = \frac{hL}{K} \quad (2.35)$$

หรือ

$$Nu = \frac{hD}{K} \quad (2.36)$$

และสำหรับครีป

$$Nu = \frac{hs}{K} \quad (2.37)$$

- เมื่อ Nu คือ เลขนัสเซิลต์
 h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m²°C)
 K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m °C)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
 s คือ ระยะห่างระหว่างครีป (m)

2.10.2.3 การพาความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว (Helical coil)

สมการเลขดีน (Dean number, De) [4]

$$De = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{\pi\rho V}} \quad (2.38)$$

เมื่อ De คือ เลขไร้มิติสำหรับการไหลในท่อโค้ง

สมการเลขนัสเซลล์ต์ภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว [11]

$$Nu_m = 0.00619 Re^{0.92} Pr^{0.4} \left(1 + 3.455 \frac{D_{in}}{D_c}\right) \quad (2.39)$$

เมื่อ Pr คือ เลขพริ้นด์เทิล

โดยมีช่วงของเงื่อนไขดังนี้ $\left| \begin{array}{l} 5 \times 10^3 < Re < 10^5 \\ 0.7 < Pr < 5 \end{array} \right|$

2.10.2.4 การพาความร้อนภายนอกท่อ

สมการเลขนัสเซลล์ต์ภายนอก [11]

$$Nu_{out} = 0.5186 Re^{0.595} \left[\frac{p}{d_{out}}\right]^{0.857} \quad (2.40)$$

โดยมีช่วงเงื่อนไขดังนี้ $\left| \begin{array}{l} 7000 < Re < 55000 \\ 1.1275 < \frac{p}{d_{out}} < 1.8575 \end{array} \right|$

เมื่อ p คือ ระยะพิตช์ (m)

d_{out} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ (m)

2.10.3 ความต้านทานทางความร้อนสุทธิ

$$R_{total} = R_{in} + R_{wall} + R_{out} \quad (2.41)$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_{in}A_{in}} + \frac{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_{in}}\right)}{2\pi LK} + \frac{1}{h_{out}A_{out}} \quad (2.42)$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_m A_m} + \frac{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_{in}}\right)}{2\pi LK} + \frac{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_m}\right)}{2\pi LK} + \frac{1}{h_{out} A_{out}} \quad (2.43)$$

เมื่อ	R_{total}	คือ ตัวต้านทานทางความร้อนสุทธิ (°C/W)
	R_{in}	คือ ตัวต้านทานทางความร้อนของการพาภายในท่อ (°C/W)
	R_{wall}	คือ ตัวต้านทานทางความร้อนของการนำผ่านผนังท่อ (°C/W)
	R_{out}	คือ ตัวต้านทานทางความร้อนของการพาภายนอกท่อ (°C/W)
	h_{in}	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อ (W/m ² °C)
	A_{in}	คือ พื้นที่ผิวภายในท่อ (m ²)
	h_{out}	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อ (W/m ² °C)
	A_{out}	คือ พื้นที่ผิวภายนอกท่อ (m ²)
	D_{in}	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)
	D_{out}	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ (m)
	L	คือ ความยาวท่อ (m)
	K	คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (W/m.°C)

2.10.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T_m}{R_{total}} \quad (2.44)$$

เมื่อ ΔT_m คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล 2 ชนิด (°C)

ความยาวท่อ (L)

$$L = n\sqrt{(\pi D_c)^2 + p^2} \quad (2.45)$$

n คือ จำนวนรอบของขดท่อ

D_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเกลียว (m)

p คือ ระยะพิตช์ (m)

2.11 อุปกรณ์ในการวัด

2.11.1 เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท

เทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิ ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.15

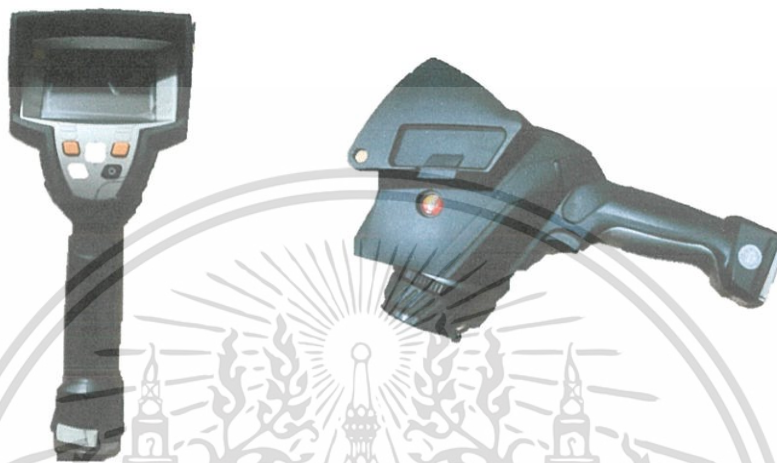


รูปที่ 2.15 เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2 เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด ยี่ห้อ Testo รุ่น Testo 882

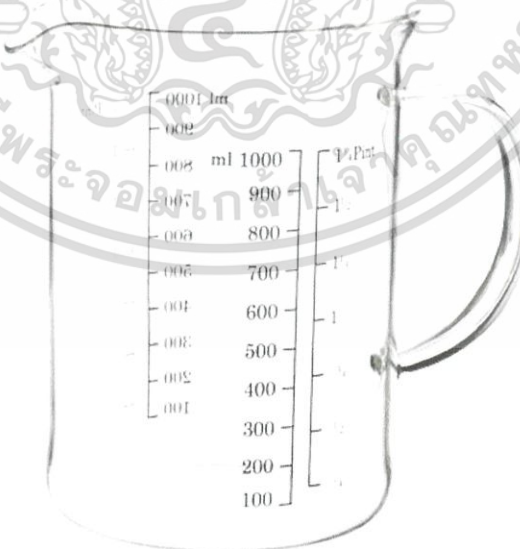
เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรดที่ใช้วัดอุณหภูมิในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด ยี่ห้อ Testo รุ่น Testo 882

2.11.3 ปีกเกอร์

ปีกเกอร์ คือ ที่ใช้วัดปริมาตรน้ำในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ปีกเกอร์

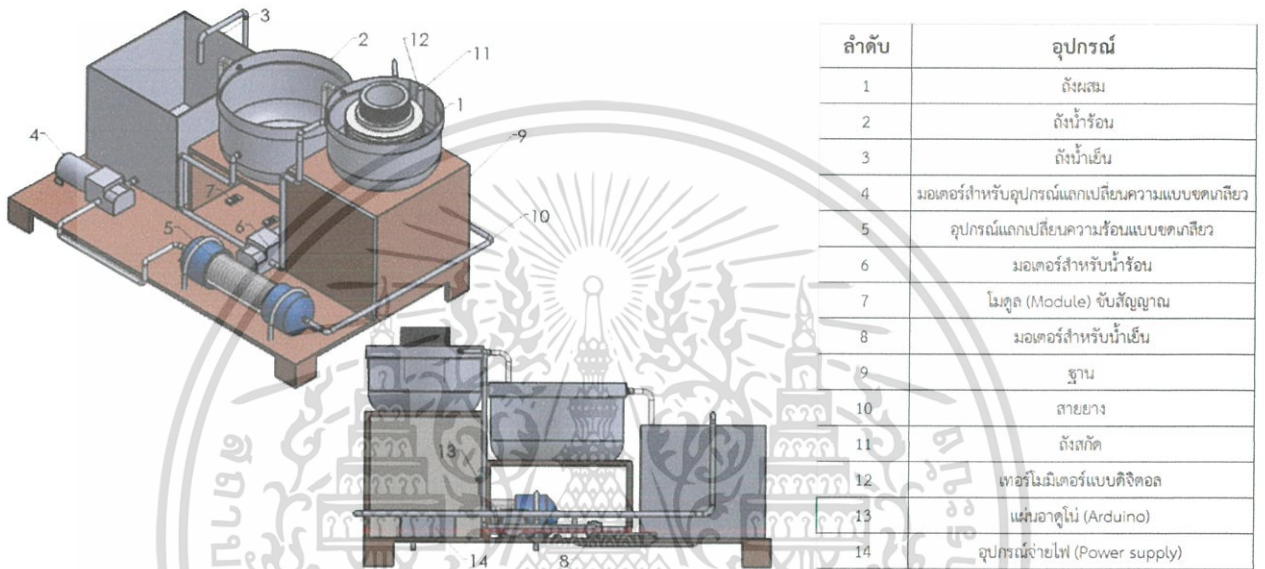
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการออกแบบ

3.1 การออกแบบเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติของระบบสกัด

3.1.1 ภาพรวมของเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติของระบบสกัด



รูป 3.1 ภาพรวมของเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติของระบบสกัด

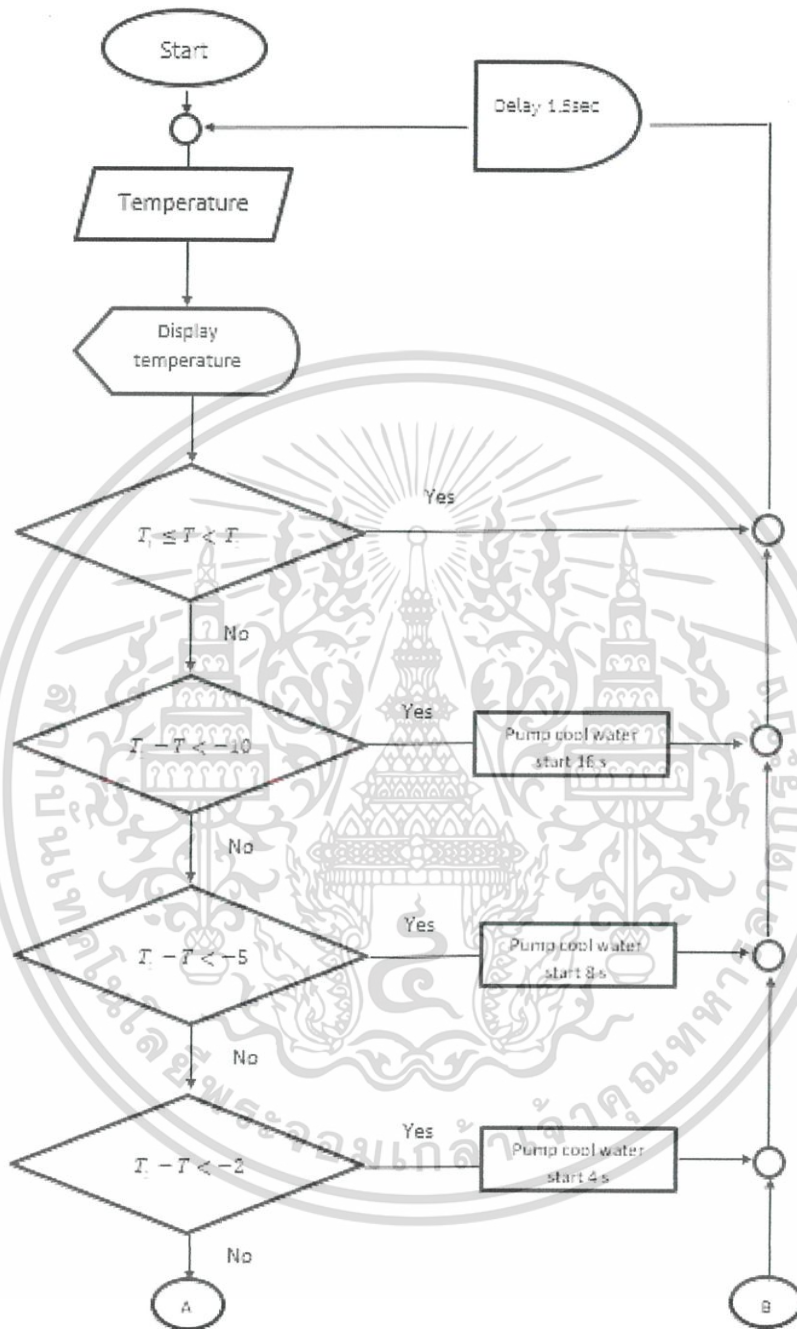
หลักการทำงานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติของระบบสกัด ทำงานโดยมีอาดูโน่ ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ (Motor) น้ำร้อนและน้ำเย็นโดยมีดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ เป็นตัววัดอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่ากำหนดจะสั่งการให้มอเตอร์น้ำร้อนทำงาน และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่ากำหนดจะสั่งให้มอเตอร์น้ำเย็นทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.1.2 ผังงาน (Flowchart)

ผังกระบวนการแสดงการทำงานของอุณหภูมิต่อที่ใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3

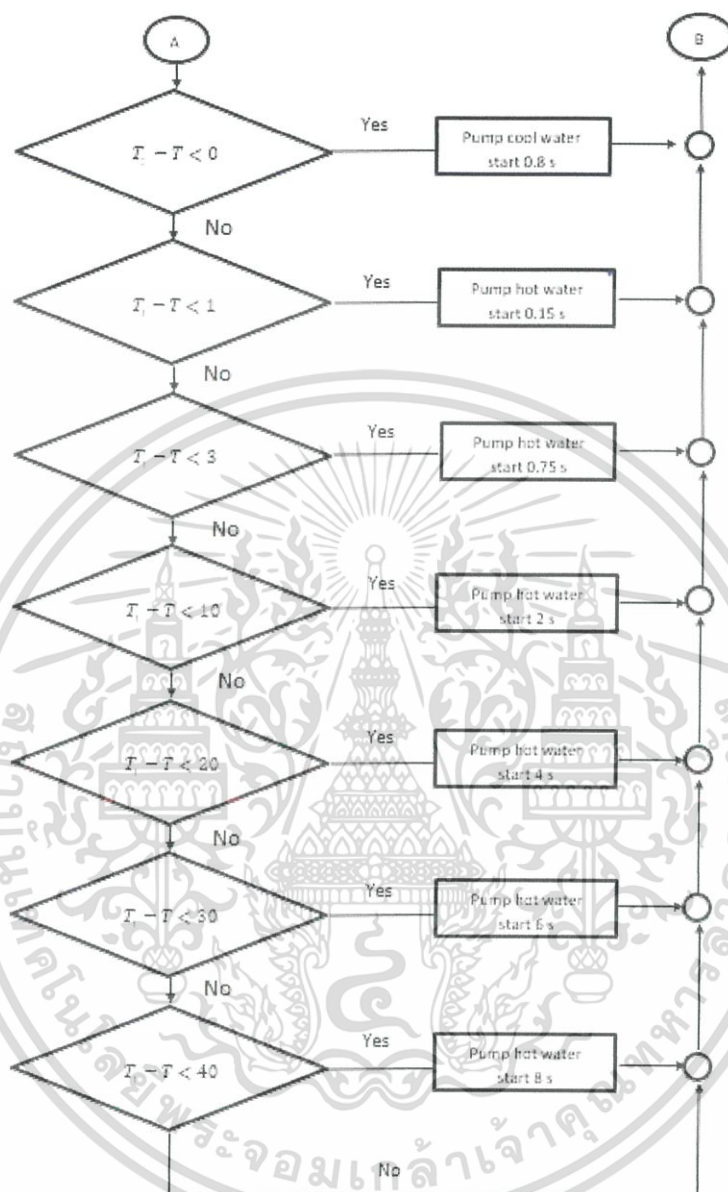
- เมื่อ T คือ อุณหภูมิของน้ำบริเวณถังสกัด (°C)
 T_1 คือ อุณหภูมิของน้ำที่ต้องการควบคุมน้อยสุดที่ยอมรับได้ (°C)
 T_2 คือ อุณหภูมิของน้ำที่ต้องการควบคุมมากที่สุดที่ยอมรับได้ (°C)





รูป 3.2 (ก) แผนภาพผังงานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติของระบบสกัด ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

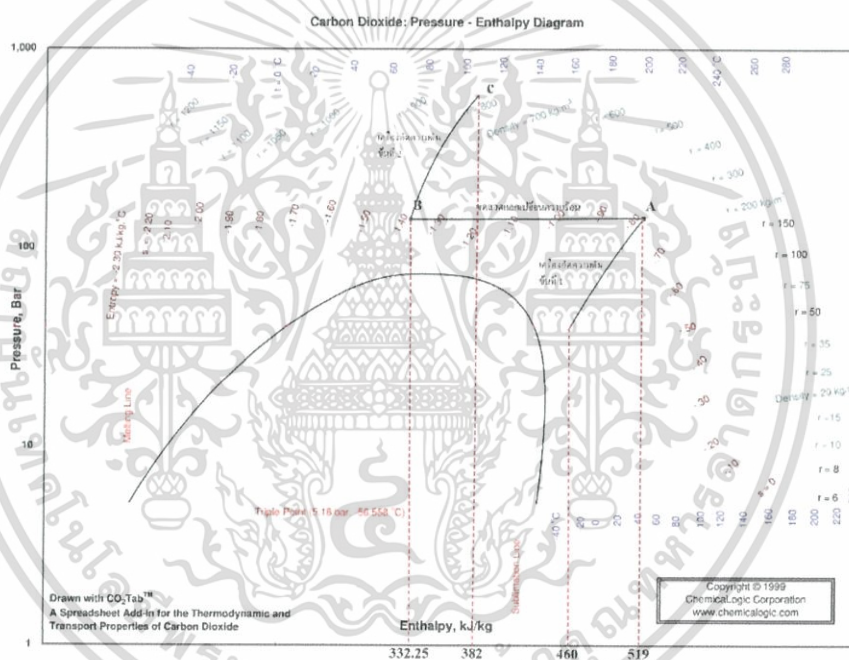


รูป 3.2 (ข) แผนภาพผังงานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติของระบบสกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบครีบบของถังสกัด

การออกแบบครีบบของถังสกัดคำนึงถึงอัตราการถ่ายเทความร้อน เพื่อให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด โดยถังสกัดมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D_m) 80 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D_{out}) 101.6 มิลลิเมตร ความสูงภายใน (L_m) 120 มิลลิเมตร ความสูงภายนอกไว้สำหรับสวมครีบบ (L_{out}) 120 มิลลิเมตร โดยค่าสถานะต่าง ๆ ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ จะใช้ค่า [12] และจะได้ค่าความดันและเอนทัลปีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการคำนวณดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กราฟระหว่างความดันและเอนทัลปีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ที่จุด C

T_C คือ อุณหภูมิที่จุด C 106.5 (°C)

P_C คือ ความดันที่จุด C 500 (bar)

h_C คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของสารที่จุด C 382 (kJ/kg)

ρ_C คือ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุด C 848 (kg/m³)

u_C คือ ค่าอินเทอร์นอลคาเอนทัลปีของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุด C 311 (kJ/kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาพลังงานภายในของคาร์บอนไดออกไซด์ในถังสกัด โดยหาจากมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยปริมาตรภายในถังสกัด คือ 6.48×10^{-4} ตารางเมตร

จะได้มวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังสกัด

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = 0.55 \text{ kg}$$

และจะได้พลังงานภายในของคาร์บอนไดออกไซด์

$$U = m(u)$$

$$U = 0.55(311)$$

$$U = 171 \text{ kJ}$$

ในการทดลองจะใช้น้ำที่มีพลังงานภายในเท่ากับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมวลของน้ำภายในถังสกัดคือ 0.65 kg

$$U = m(u)$$

$$171 = 0.65(u)$$

$$u = 264 \text{ kJ/kg}$$

เมื่อเทียบค่าเอนทัลปีกับตาราง [12] จะได้น้ำที่อุณหภูมิ 63 องศาเซลเซียส

3.2.1 อัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อไม่สวมครีป

ในการคำนวณใช้เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน ค่าสภาพการนำความร้อนของวัตถุ (k) 16 วัตต์ต่อเมตรองศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิเริ่มต้นภายในถังสกัดคือ 63 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิภายนอกไว้ที่ 55 องศาเซลเซียส ตลอดเวลา

ตัวต้านทานทางความร้อนจากการนำความร้อนผ่านทรงกระบอกเหล็กกล้าหาได้จากสมการที่

2.15

$$R_{cyl} = \frac{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_{in}}\right)}{2\pi Lk}$$

$$R_{cyl} = \frac{\ln\left(\frac{101.6 \times 10^3}{80 \times 10^3}\right)}{2\pi(120)(16)}$$

$$R_{cyl} = 19.8 \text{ } ^\circ\text{C/kW}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวต้านทานทางความร้อนจากการนำความร้อนผ่านทรงกระบอกกลมุ้เนี่ยมคำนวณได้จากสมการ
ที่ 2.15

$$R_{cyl} = \frac{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_{in}}\right)}{2\pi Lk}$$

$$R_{cyl} = \frac{\ln\left(\frac{111.6 \times 10^3}{101.6 \times 10^3}\right)}{2\pi(120)(237)}$$

$$R_{cyl} = 0.77 \text{ } ^\circ\text{C/kW}$$

สำหรับการพาความร้อนแบบธรรมชาติภายในถังสักรัด เลขเรย์ลีสามารถทำได้จากสมการที่ 2.32 โดยในการทดลองใช้สถานะของน้ำที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างพื้นผิวภายในและอุณหภูมิของน้ำภายในถังสักรัด (T_{film}) คือ 59 องศาเซลเซียส ความดันเฉลี่ย 1 บาร์ ค่าเลขพรันด์เทิล (Pr) 3.05 ความหนืดไคเนมาติก (ν) 0.48×10^{-6} ตารางเมตรต่อวินาที ส่วนกลับของอุณหภูมิเฉลี่ยในหน่วยเคลวิน 3.012×10^{-3} ต่อเคลวิน ค่าสภาพการนำความร้อนของน้ำ (K) 0.657 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3 \text{Pr}}{\nu^2}$$

$$Ra = \frac{(9.81)(3.012 \times 10^{-3})(59 - 55)(0.12)^3}{(0.48 \times 10^{-6})^2} (3.05)$$

$$Ra = 2.7 \times 10^9$$

เลขนัสเซิลต์บนพื้นผิวภายในทรงกระบอกคำนวณได้จากตารางที่ 2.3

ใช้สมการ

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387(Ra_L)^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{\text{Pr}}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right)^2$$

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387(2.7 \times 10^9)^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{0.43}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right)^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Nu = 155$$

สัมพันธ์การพาความร้อนภายนอกเมื่อไม่สวมครีปในคำนวณได้จากสมการที่ 2.35

$$Nu = \frac{hL}{K}$$

$$155 = \frac{h(120 \times 10^{-3})}{0.657}$$

$$h = 849 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

สำหรับการพาความร้อนแบบธรรมชาติภายนอกถึงสก็ด เลขเรย์ลีหาได้จากสมการที่ 2.30 โดยในการทดลองใช้สถานะของน้ำที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างพื้นผิวภายนอกถึงสก็ดและอุณหภูมิของน้ำภายนอกถึงสก็ด (T_{film}) คือ 59 องศาเซลเซียส ความดันเฉลี่ย 1 บาร์ ค่าเลขพรันด์เทิล (Pr) 3.05 ความหนืดไคเนมาติก (ν) 0.48×10^{-2} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ส่วนกลับของอุณหภูมิเฉลี่ยในหน่วยเคลวิน 3.012×10^{-3} ต่อเคลวิน ค่าสภาพการนำความร้อนของน้ำ (K) 0.649 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr$$

$$Ra = \frac{(9.81)(3.012 \times 10^{-3})(59 - 55)(0.12)^3}{(0.48 \times 10^{-6})^2} (3.05)$$

$$Ra = 2.7 \times 10^9$$

เลขนัสเซลล์บนพื้นผิวภายนอกทรงกระบอกสามารถคำนวณได้จากตารางที่ 2.3 โดยเลือกใช้สมการ

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387(Ra_L)^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right)^2$$

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387(2.7 \times 10^9)^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{0.43}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right)^2$$

$$Nu = 155$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกเมื่อไม่สวมครีบริ้นคำนวณได้จากสมการ 2.33

$$Nu = \frac{hL}{K}$$

$$155 = \frac{h(120 \times 10^{-3})}{0.649}$$

$$h = 838 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

ตัวต้านทานทางความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวทรงกระบอกเมื่อไม่สวมครีบริ้นหาได้จากสมการที่ 2.40

$$R_{total} = \frac{1}{h_m A_m} + \frac{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_m}\right)}{2\pi Lk} + \frac{1}{h_{out} A_{out}}$$

หรือ

$$R_{total,unfin} = \frac{1}{h_m \pi L d_m} + \frac{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_m}\right)}{2\pi Lk} + \frac{1}{h_{out} \pi L d_{out}}$$

$$R_{total,unfin} = \frac{1}{(848.82)\pi(0.12)(80 \times 10^{-3})} + 1.98 \times 10^{-2} + \frac{1}{(838.48)\pi(0.12)(116 \times 10^{-3})}$$

$$R_{total,unfin} = 86^\circ\text{C/kW}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนภายนอกเมื่อไม่สวมครีบริ้นได้จากสมการที่ 2.44

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T_m}{R_{total,unfin}}$$

$$\dot{Q}_{total,unfin} = \frac{8}{8.6 \times 10^{-2}}$$

$$\dot{Q}_{total,unfin} = 93 \text{ W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อสวมครีบ

ระยะห่างครีบ (S_{opt}) คำนวณได้จากตารางที่ 2.3

$$\frac{(9.68 \times 10^9) - (1.135 \times 10^{11})}{(9.68 \times 10^9) - (1.1617 \times 10^{11})} = \frac{X - 7.688}{X - 7.571}$$

$$X = 7.94$$

$$\frac{(9.68 \times 10^9) - (1.135 \times 10^{11})}{(9.68 \times 10^9) - (1.1617 \times 10^{11})} = \frac{Y - 7.346}{Y - 7.239}$$

$$Y = 7.58$$

$$\frac{160 - 125}{160 - 100} = \frac{S_{opt} - 7.94}{S_{opt} - 7.58}$$

$$S_{opt} = 8.44 \text{ mm}$$

ได้ระยะห่างของครีบที่เหมาะสม (S_{opt}) 8 มิลลิเมตร

เลขนัสเซิลต์บนพื้นผิวภายนอกทรงกระบอกสำหรับครีบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.28

$$Nu = c_0 + c_1 Ra^{a_0} \left(\frac{s/d}{\xi}\right)^{a_1} + c_2 Ra^{a_2} \left(\frac{s/d}{\xi}\right)^{a_3} + c_3 \xi^{a_4}$$

$$Nu = 1062.851 + 18.289(2.7 \times 10^9)^{0.212} \left(\frac{8/116.6}{16/10.1}\right)^{0.881} \\ + (-17.511)(2.7 \times 10^9)^{0.211} \left(\frac{8/116.6}{16/10.1}\right)^{0.906} + (-1058.885)(16/10.1)^{0.003}$$

$$Nu = 17.7$$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกเฉพาะครีบคำนวณได้จากสมการที่ 2.37

$$Nu = \frac{hs}{K}$$

$$17.68 = \frac{h(8 \times 10^{-3})}{0.645}$$

$$h = 1.43 \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ประสิทธิภาพของครีปได้จากสมการในรูปที่ 2.14

$$m = \sqrt{\frac{2h}{kt}}$$

$$m = \sqrt{\frac{2 \times 1.43 \times 10^3}{200 \times 3 \times 10^{-3}}}$$

$$m = 69.0$$

$$r_{2c} = r_2 + \frac{t}{2}$$

$$r_{2c} = 80 \times 10^{-3} + \frac{3 \times 10^{-3}}{2}$$

$$r_{2c} = 8.15 \times 10^{-2}$$

$$A_{fin} = 2\pi(r_{2c}^2 - r_1^2)$$

$$A_{fin} = 2\pi((8.15 \times 10^{-2})^2 - (58.3 \times 10^{-3})^2)$$

$$A_{fin} = 2.04 \times 10^{-2}$$

$$c_2 = \frac{2r_1/m}{r_{2c}^2 - r_1^2}$$

$$c_2 = \frac{2(58.3 \times 10^{-3})/69.04}{(8.15 \times 10^{-2})^2 - (58.3 \times 10^{-3})^2}$$

$$c_2 = 0.52$$

$$\eta_{fin} = c_2 \frac{K_1(mr_1)I_1(mr_{2c}) - I_1(mr_1)K_1(mr_{2c})}{I_0(mr_1)K_1(mr_{2c}) + K_0(mr_1)I_1(mr_{2c})}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า $K(mr)$ และ $I(mr)$ สามารถคำนวณได้จาก [13,14]
ประสิทธิภาพสำหรับ 1 ครีบจะได้

$$\eta_{fin} = 0.187$$

จากสมการที่ 2.25 มีจำนวนครีบทั้งหมด 12 ครีบ

$$\eta_{fin} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{hA_{totalfin}(T_b - T_\infty)}$$

$$0.187 = \frac{\dot{Q}_{fin}}{(1.43 \times 10^3)(12 \times 2.04 \times 10^{-2})(63 - 55)}$$

$$\dot{Q}_{fin} = 262 \text{ W}$$

โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนสำหรับการพาความร้อนภายนอกเมื่อไม่สวมครีบได้คำนวณได้จาก
สมการที่ 2.23

$$\dot{Q}_{convect(unfin)} = h_{unfin} A (\Delta T_m)$$

$$\dot{Q}_{convect(unfin)} = 838.48 \pi (0.12) (106 \times 10^{-3}) (8)$$

$$\dot{Q}_{convect(unfin)} = 268 \text{ W}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดเมื่อสวมครีบคำนวณจากสมการที่ 2.26

$$\dot{Q}_{convect(total, fin)} = \dot{Q}_{unfin} + \dot{Q}_{fin}$$

$$\dot{Q}_{convect(total, fin)} = 268 + 262$$

$$\dot{Q}_{convect(total, fin)} = 530 \text{ W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาตัวต้านทานทางความร้อนสำหรับการพาความร้อนภายนอกเมื่อสวมครีบจากสมการที่ 2.44

$$\dot{Q}_{convect(total, fin)} = \frac{\Delta T_m}{R_{convect(total, fin)}}$$

$$529.85 = \frac{8}{R_{convect(total, fin)}}$$

$$R_{convect(total, fin)} = 1.15 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

ตัวต้านทานทางความร้อนจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติบนพื้นผิวทรงกระบอกเมื่อสวมครีบคำนวณได้จากสมการที่ 2.43

หรือ

$$R_{total, fin} = \frac{1}{h_{in} A_{in}} + \frac{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_m}\right)}{2\pi Lk} + \frac{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_{in}}\right)}{2\pi Lk} + \frac{1}{h_{out} A_{out}}$$

$$R_{total, fin} = \frac{1}{h_{in} \pi L D_m} + \frac{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_{in}}\right)}{2\pi Lk} + \frac{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_m}\right)}{2\pi Lk} + R_{convect(total, fin)}$$

$$R_{total, fin} = \frac{1}{(848.82)\pi(0.12)(80 \times 10^{-3})} + 1.98 \times 10^{-2} + 7.7 \times 10^{-4} + 1.15 \times 10^{-2}$$

$$R_{total, fin} = 0.07 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนภายนอกเมื่อสวมครีบได้จากสมการที่ 2.44

$$\dot{Q}_{total, fin} = \frac{\Delta T_m}{R_{total, fin}}$$

$$\dot{Q}_{total, fin} = \frac{8}{0.07}$$

$$\dot{Q}_{total, fin} = 114 \text{ W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการถ่ายเทความร้อนภายนอกเมื่อสวมครีบบจะเพิ่มขึ้นจากสมการที่ 2.27

$$\Delta \dot{Q} = \dot{Q}_{total,fin} - \dot{Q}_{total,unfin}$$

$$\Delta \dot{Q} = 114 - 93$$

$$\Delta \dot{Q} = 21 \text{ W}$$

ภาพแบบจำลองของถังแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อสวมครีบดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพแบบจำลองของถังแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อสวมครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว

การออกแบบรูปร่างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว คำนึงถึงอัตราการถ่ายเทความร้อน เพื่อให้สามารถลดอุณหภูมิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางด้านขาออกของเครื่องอัดความดันสูงจากความดัน 141 บาร์ 128 องศาเซลเซียส ไปที่ ความดัน 141 บาร์ 60 องศาเซลเซียส โดยค่าสถานะต่าง ๆ ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ จะใช้ค่า [12] และขนาดท่อเลือกจากตารางท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขนาดท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน [13]

Tube OD in.	Tube Wall Thickness, in.															Swagelok Fitting Series	
	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020	0.028	0.035	0.049	0.065	0.083	0.095	0.109	0.120	0.134	0.156		0.188
	Working Pressure, psig Note: For gas service, select a tube wall thickness outside of the shaded area. (See Gas Service, page 2.)																
1/16	5600	6800	8100	9400	12 000												100
1/8						8500	10 900										200
3/16						5400	7 000	10 200									300
1/4						4000	5 100	7 500	10 200								400
5/16							4 000	5 800	8 000								500
3/8							3 300	4 800	6 500	7500							600
1/2							2 600	3 700	5 100	6700							810
5/8								2 900	4 000	5200	6000						1010
3/4								2 400	3 300	4200	4900	5800					1210
7/8								2 000	2 800	3600	4200	4800					1410
1									2 400	3100	3600	4200	4700				1610
1 1/4										2400	2800	3300	3800	4100	4900		2000
1 1/2											2300	2700	3000	3400	4000	4900	2400
2												2000	2200	2500	2900	3600	3200

¹ For higher pressures, see the Swagelok Medium-Pressure Fittings catalog, MS-02-335, or the Swagelok High-Pressure Fittings catalog, MS-01-34.

² Rating based on repeated pressure testing of the Swagelok tube fitting with a 4:1 design factor based upon hydraulic fluid leakage.

ใช้ท่อขนาด 0.125 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D_m) 0.070 นิ้ว หรือ 1.77 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D_{out}) 0.125 นิ้ว หรือ 3.18 มิลลิเมตร

ที่จุด B

T_B คือ อุณหภูมิที่จุด B 54 (°C)

P_B คือ ความดันที่จุด B 141 (bar)

h_B คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของสารที่จุด B 332 (kJ/kg)

คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านขอบเขตของระบบสำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่

ที่จุด C

T_C คือ อุณหภูมิที่จุด C 106 (°C)

P_C คือ ความดันที่จุด C 500 (bar)

h_C คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของสารที่จุด C 382 (kJ/kg)

ρ_C คือ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุด C 848 (kg/m³)

สถานะ A ไปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะ B ได้จากสมการที่ 2.9

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_m \left[h_{out} - h_m + \frac{V_{out}^2 - V_{in}^2}{2} + g(z_{out} - z_m) \right]$$

$$\dot{Q} - 0 = 0.00204 \left[519 - 392.25 + \frac{0 - 0}{2} + (9.81)(0 - 0) \right]$$

$$\dot{Q}_{true} = 0.381 \text{ kW หรือ } 381 \text{ W}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนจริงที่ผ่านขอบเขตของระบบ 381 W

โดย ปริมาตรภายในถังสกัด คือ 648 cm³

มีอัตราการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 2.04 g/s หรือ 2.4 x cm³/s

เวลาในการอัดเพื่อให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เต็มถังสกัด คือ 270 s

พลังงานที่ต้องถ่ายเทออกจากระบบทั้งหมดคือ 103 KJ

3.3.2 คำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว

ในการคำนวณใช้คุณสมบัติของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิเฉลี่ยขาเข้าและขาออก 91 องศาเซลเซียส ความดันเฉลี่ยที่ขาเข้าและขาออก 141 บาร์ ความหนาแน่น (ρ) 335 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสภาพการนำความร้อนของวัตถุ (k) 4.21×10^{-2} วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) 2.28 กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน ค่าความหนืดพลวัต (μ) 27.5×10^{-6} ปาสกาลวินาที เลขพริ้นด์เทิล (Pr) 1.42 เส้นผ่านศูนย์กลางเกลียว (D_c) และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (D_m) ขนาด 50 และ 1.77 มิลลิเมตร ตามลำดับ

เลขเรย์โนลด์สภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว คำนวณได้จากสมการที่ 2.34

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\mu\pi D_m}$$

$$Re = \frac{4 \times 0.00204}{(27.5 \times 10^{-6})\pi(1.77 \times 10^{-3})}$$

$$Re = 5.34 \times 10^4$$

เลขนัสเซลต์ภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว คำนวณได้จากสมการที่ 2.39

$$Nu_m = 0.00619 Re^{0.72} Pr^{0.4} \left(1 + 3.455 \frac{D_m}{D_c} \right)$$

$$Nu_m = 0.00619 (5.34 \times 10^4)^{0.72} (1.424)^{0.4} \left(1 + 3.455 \frac{1.77 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-3}} \right)$$

$$Nu_m = 20.1$$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว คำนวณได้จากสมการที่ 2.36

$$Nu = \frac{hD_m}{k}$$

$$20.1 = \frac{h(1.77 \times 10^{-3})}{4.21 \times 10^{-2}}$$

$$h = 472 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

3.3.3 คำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนอกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว

ในการคำนวณใช้คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิเฉลี่ยขาเข้าและขาออก 25 องศาเซลเซียส ความดันเฉลี่ยที่ขาเข้าและขาออก 1 บาร์ ความหนาแน่น (ρ) 1.00×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (k) 0.607 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ค่าความหนืดพลวัต (μ) 1.3×10^{-6} ปาสกาลวินาที เลขพรันด์เทิล (Pr) 6.14 เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกหุ้มขดท่อ (D_s) 68 มิลลิเมตร อัตราการไหลของมวล (\dot{m}) = 0.0632 กิโลกรัมต่อวินาที

ความเร็วการไหลภายนอกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวสามารถ คำนวณได้จากสมการที่ 2.16

$$V = \frac{4\dot{m}}{\rho\pi D_s^2}$$

$$V = \frac{4 \times 0.0632}{(1.00 \times 10^3)\pi(68 \times 10^{-3})^2}$$

$$V = 1.74 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

การหาเลขดีน (Dean number, De) ซึ่งเสนอโดย คำนวณได้จากสมการที่ 2.38

$$De = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{\rho\pi V}}$$

$$De = \sqrt{\frac{4 \times 0.0632}{(10^3)\pi(0.0174)}}$$

$$De = 0.07$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขเรย์โนลด์ส์ภายนอกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว คำนวณได้จากสมการที่

2.32

$$Re = \frac{\rho V D_e}{\mu}$$

$$Re = \frac{(1 \times 10^3)(1.74 \times 10^{-2})(0.07)}{0.891 \times 10^{-3}}$$

$$Re = 1367$$

เลขนัสเซิลต์ภายนอกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว คำนวณได้จากสมการที่ 2.40

$$Nu_{out} = 0.5186 Re^{0.595} \left(\frac{p}{d_{out}} \right)^{0.857}$$

$$Nu_{out} = 0.5186 (1367)^{0.595} \left(\frac{12.5 \times 10^{-3}}{3.18 \times 10^{-3}} \right)^{0.857}$$

$$Nu_{out} = 123$$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว คำนวณได้จากสมการที่ 2.36

$$Nu = \frac{h D_e}{K}$$

$$123 = \frac{h(0.07)}{0.607}$$

$$h = 1056 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 จำนวนความยาวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว

การคำนวณใช้เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน ค่าสภาพการนำความร้อนของวัตถุ (K) 16 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล 2 ชนิด (ΔT_m) 66 องศาเซลเซียส กำหนดให้อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม คำนวณได้จากสมการที่ 2.42

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T_m}{R_{total}}$$

หรือ

$$R_{total} = \frac{\Delta T_m}{\dot{Q}}$$

$$R_{total} = \frac{66}{381}$$

$$R_{total} = 0.17 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

ความต้านทานทางความร้อนสุทธิ คำนวณได้จากสมการที่ 2.42

$$R_{total} = \frac{1}{h_{in} A_{in}} + \frac{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_{in}}\right)}{2\pi Lk} + \frac{1}{h_{out} A_{out}}$$

หรือ

$$R_{total} = \frac{1}{h_{in} \pi L D_{in}} + \frac{\ln\left(\frac{D_{out}}{D_{in}}\right)}{2\pi Lk} + \frac{1}{h_{out} \pi L D_{out}}$$

หาความยาวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวได้จากสมการที่ 2.42

$$0.17 = \frac{1}{(465.54)(\pi)(L)(1.77 \times 10^{-3})} + \frac{\ln\left(\frac{3.18 \times 10^{-3}}{1.77 \times 10^{-3}}\right)}{2\pi(L)(16)} + \frac{1}{(1056.47)(\pi)(L)(3.18 \times 10^{-3})}$$

$$L = 2.82 \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนรอบของขดท่อหาได้จากสมการที่ 2.45

$$L = n\sqrt{(\pi D_c)^2 + p^2}$$

$$2.82 = n\sqrt{(\pi 0.05)^2 + 0.0125^2}$$

$$n = 17.9$$

ได้จำนวนรอบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว 18 รอบ
ภาพอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 (ก) แบบจำลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว ภาพ (ข) ภาพตัดขวางอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลทดลอง

4.1 การทดลองความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

เนื่องจากในการทดลองทั้งหมดมีการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ อุปกรณ์ในการตรวจวัดอุณหภูมิจึงต้องมีความเที่ยงตรง และน่าเชื่อถือ การทดลองความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิตดลองโดยใช้อุปกรณ์เหล่านี้วัดอุณหภูมิของน้ำที่จุดเดียวกันในเวลาต่าง ๆ ค่าที่อุปกรณ์วัดได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิของน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ

การทดลองครั้งที่	อุณหภูมิของน้ำโดยวัดจากเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการแสดงผลในคอมพิวเตอร์ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการแสดงผลเทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด (องศาเซลเซียส)
1	28.2	27.9	28.1
2	33.2	32.7	33.0
3	37.5	36.7	37.3
4	40.2	39.9	39.8
5	43.6	43.9	43.6
6	46.1	45.4	46.0
7	50.3	49.9	50.1
8	28.2	27.9	28.0
9	33.3	32.8	33.1
10	37.2	36.9	37.0
11	40.4	39.5	39.9
12	43.5	43.4	43.5
13	46.2	45.8	46.2
14	50.0	49.5	49.8
15	28.3	27.8	28.2
16	33.4	32.6	33.2
17	37.5	37.0	37.1
18	41.2	40.9	41.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19	45.2	45.0	45.1
20	50.1	49.9	50.0

จากผลการทดลอง อุณหภูมิของเครื่องวัดที่จุดเดียวกัน ณ เวลาเดียวกันมีค่าที่ใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่าอุปกรณ์ในการวัดมีความเที่ยงตรง



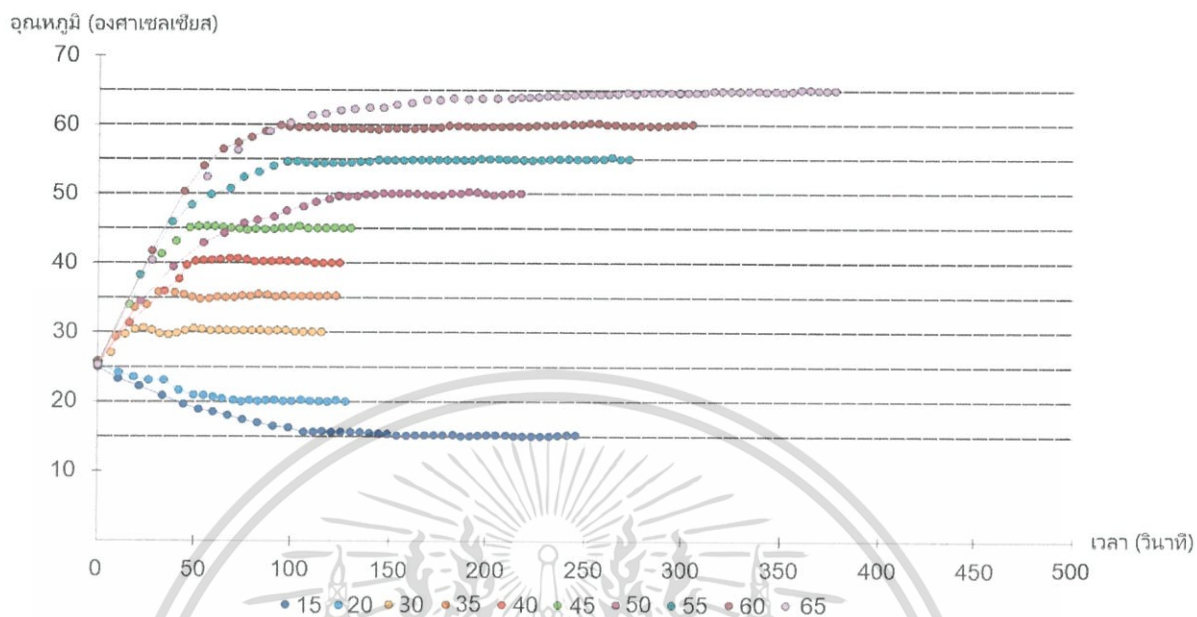
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ทดลองการควบคุมอุณหภูมิในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ณ เวลาต่าง ๆ

การทดลองการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ทดลองโดยกำหนดอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม แล้วเริ่มการทดลองโดยการบันทึกผลของอุณหภูมิ ณ เวลาต่าง ๆ โดยอุณหภูมิที่ทำการควบคุมคือ 15, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 และ 65 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และกราฟเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดโดยเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทและค่าที่แสดงในคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ทดลองการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ย

อุณหภูมิที่ควบคุม (องศาเซลเซียส)	เวลาที่อุณหภูมิเริ่มคงที่(วินาที)	อุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงคงที่ (องศาเซลเซียส)	ความแตกต่างของ อุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิที่ควบคุม (องศาเซลเซียส)
15	188	15.0	0.04
20	74.5	20.0	0.1
30	45.5	30.1	0.12
35	49	35.1	0.09
40	50.8	40.1	0.12
45	60.6	44.9	-0.07
50	146	49.9	-0.09
55	202	54.9	-0.1
60	244	59.9	-0.1
65	373	65.0	-0.05



รูปที่ 4.1 กราฟทดลองการควบคุมอุณหภูมิ

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เครื่องควบคุมอุณหภูมิจึงมีความเที่ยงตรง และสามารถควบคุมอุณหภูมิในช่วง 15 องศาเซลเซียส ถึง 65 องศาเซลเซียส

4.3 ทดลองอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนของถังสกัดแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อสวมครีบบและไม่สวมครีบบ เมื่อเติมน้ำภายใน 0.8 kg.

เนื่องจากต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของถังสกัด จึงได้ทำการสวมครีบบซึ่งทำจากอลูมิเนียมบริเวณถังสกัด อัตราการถ่ายเทความร้อนจึงมีความสำคัญ เพราะเมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่ามาก อุณหภูมิภายในถังสกัดก็จะเปลี่ยนตามอุณหภูมิที่ควบคุมได้ไวขึ้นในการทดลองอัตราการถ่ายเทความร้อนของถังสกัด ทำการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิภายนอกถังสกัดไว้ที่ 55 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของน้ำภายในถังสกัดเมื่อเริ่มการทดลองคือ 63 องศาเซลเซียส น้ำหนัก 0.8 กิโลกรัม ทำการทดลองโดยถังที่ยังไม่ได้สวมครีบบและสวมครีบบแล้ว โดยทำการบันทึกผลของอุณหภูมิน้ำภายในที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 ทดลองอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนของถังสกัดเมื่อไม่สวมครีบบ

ช่วงเวลา (วินาที)	อุณหภูมิน้ำภายใน หม้อสกัด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิน้ำที่เพิ่มขึ้น (องศาเซลเซียส)	อัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์)
0	63	-	-
30	61.1	1.9	212
60	59.5	1.6	178
90	58.1	1.4	156
120	56.9	1.2	134
150	56	0.9	100
180	55.5	0.5	55.7
210	55.3	0.2	22.3
240	55.1	0.2	22.3
270	55	0.1	11.1
เฉลี่ย	-	-	99.1

ตารางที่ 4.4 ทดลองอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนของถังสกัดเมื่อสวมครีบ

ช่วงเวลา (วินาที)	อุณหภูมิภายใน หม้อสกัด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (องศาเซลเซียส)	อัตราการถ่ายเทความร้อน(วัตต์)
0	63	-	-
30	61	2	223
60	59.3	1.7	189
90	57.8	1.5	167
120	56.5	1.3	145
150	55.8	0.7	78
180	55.4	0.4	44
210	55.1	0.3	33
240	55	0.1	11.1
เฉลี่ย	-	-	111

จากผลการทดลองพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของถังสกัดเมื่อสวมครีบจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากเดิม 12.1 เปอร์เซ็นต์

4.4 ทดลองอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวที่น้ำไหลผ่าน

เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกอัดที่ความดัน 500 บาร์ จะมีความร้อนสูงถึง 230 องศาเซลเซียส ทำให้อุปกรณ์ภายในระบบสก๊ตเกิดความเสียหาย จึงต้องสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว เพื่อลดอุณหภูมิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางด้านขาออกของเครื่องอัดความดันสูงในการทดลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวโดยมีน้ำไหลผ่านภายนอกขดเกลียวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วบันทึกผลอุณหภูมิภายในขดเกลียวที่ขาเข้าและขาออก ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ทดลองอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ช่วงเวลา (นาที)	อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าขดเกลียวแลกเปลี่ยนความร้อน (องศาเซลเซียส)	ค่าเอนทัลปีจำเพาะ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)	อุณหภูมิน้ำออกขดเกลียวแลกเปลี่ยนความร้อน (องศาเซลเซียส)	ค่าเอนทัลปีจำเพาะ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)	อัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์)
0	49.1	205.9	27.0	113.6	415.6
1	49.0	205.50	27.0	113.6	413.7
2	49.0	205.50	27.0	113.6	413.7
3	48.9	205.1	26.9	113.1	413.7
4	48.8	204.7	26.9	113.1	411.8
เฉลี่ย	48.96	205.4	26.96	113.40	413.7

จากการทดลอง อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยคือ 413.7 วัตต์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง วิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงอุปกรณ์ในการควบคุมอุณหภูมิสำหรับเครื่องสกัดด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความดันสูง มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความเสถียรสลายในการสกัด และเพิ่มประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อน การออกแบบและสร้าง ผลของการทดลองอุปกรณ์มีรายละเอียดดังนี้

- 5.1.1 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ มีการควบคุมอุณหภูมิบริเวณถึงสกัดให้คงที่ได้ โดยควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 15 องศาเซลเซียส จนถึง 65 องศาเซลเซียส
- 5.1.2 ครีของถึงสกัด ทำจากอะลูมิเนียมที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของถึงสกัดเพิ่มขึ้นจากเดิม 12.1 เปอร์เซ็นต์
- 5.1.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว ทำจากท่อเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.125 นิ้ว มาขดเป็นเกลียวต่อกับเครื่องอัดความดันสูง เพื่อลดอุณหภูมิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในส่วนของการทดลองโดยน้ำ มีการถ่ายเทความร้อนออก 413.7 วัตต์

5.2 วิจัยผลการทดลอง

จากการทดลองต้องใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิทุกครั้ง ความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วัดจึงเป็นสิ่งสำคัญที่สุดเพราะผลการทดลองต้องมีความแม่นยำ เมื่ออุปกรณ์มีความคาดเคลื่อนเล็กน้อย ทำให้การทดลองมีความคลาดเคลื่อนและไม่น่าเชื่อถือ อีกทั้งในการวัดผลการทดลองผู้ทำการวัดผลต้องมีความชำนาญและอ่านค่าจากอุปกรณ์ได้อย่างแม่นยำ

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. อุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิต้องมีความเที่ยงตรงและน่าเชื่อถือ
2. ผู้ทำการทดลองต้องทดลองและบันทึกผลอย่างแม่นยำ
3. ไม่ควรให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นสัมผัสน้ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

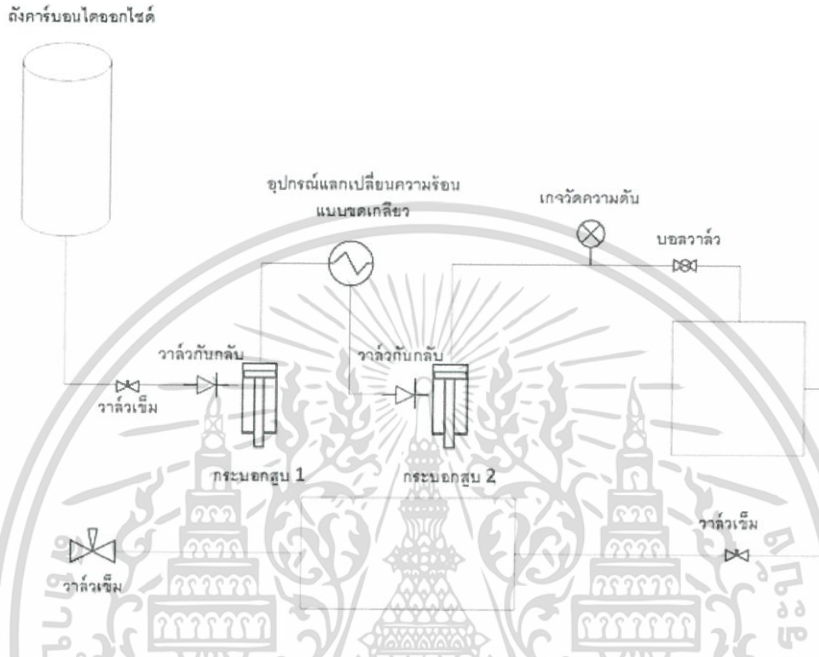
- [1] รังสินันท์ ณ รังสี,ศรัณย์ โครตมะณี และอัครวินท์ บุญเลื่อนส่ง พ.ศ. 2559:การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤติยิ่งยวด,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเครื่องกล.
- [2] Dr. Jovan Mitrovic, “Heat Exchangers - Basics Design Applications”, InTech, 2012
- [3] Zhenying Zhang, Lirui Tong and Xingguo Wang, “ Thermodynamic Analysis of Double-Stage Compression Transcritical CO2 Refrigeration Cycles with an Expander”, Entropy 2015
- [4] Giacomo Bonafoni, Roberto Capata, “ Proposed Design Procedure of a Helical Coil Heat Exchanger for an Orc Energy Recovery System for Vehicular Application” ,Engineering Journal, Magnolithe, 2015
- [5] Qingyong Lang, Chien M. Wai, “ Supercritical fluid extraction in herbal and natural product studies a practical review,” The International Journal of Talanta, Volume 53, Issue 4, 5 January 2001.
- [6] Teledyne Isco, “Supercritical fluid applications in manufacturing and materials production,” Syringe Pump Application Note AN1, 28 September 2012.
- [7] Kenneth Andrew Nielson, “Methods and apparatus for reducing air entrapment in spray application of coatings to a substrate” related Patent Applications This application contains subject matter related to U.S. Patent No. 4,923,720, May 8.
- [8] Yunus A. Cengel, Michael A.Boles,“ Thermodynamics(An Engineering Approach)8th edition”, McGraw Hill Companies, 2015
- [9] Cengel and Ghajar, “ Heat and mass transfer(fundamentals and applications) 5th edition ”,McGraw Hill Companies, 2011

- [10] Jnana RanJan Senapati, Sukanta Kumar Dash, Subhransu Roy, “ Numerical investigation of natural convection heat transfer from vertical cylinder with annular fins,” International Journal of ThermalSciences111 (2017)
- [11] Paisarn Naphon, Somchai Wongwises, “ A review of flow and heat transfer characteristics in curved tubes,” Renewable and Sustainable Energy Reviews 10 (2006) 463–490
- [12] National Institute of Standards and Technology. NIST Chemistry WebBook [Online]. Available:
<https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid>, 2018
- [13] CASIO COMPUTER CO., LTD. Modified Bessel function of the 1st kind (chart) Calculator. [Online]. Available:
<https://keisan.casio.com/exec/system/1180573475>. 2019.
- [14] CASIO COMPUTER CO., LTD. Modified Bessel function of the 2nd kind (chart) Calculator. [Online]. Available:
<https://keisan.casio.com/exec/system/1180573476>. 2019.
- [15] Swagelok & Co. Tubing & Tube Accessories. [Online]. Available:
<https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/EN/MS-01-107.pdf>, 2019.







เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
รูปอุปกรณ์การสกัด



รูปที่ ก.1 แผนผังแสดงอุปกรณ์ในการทดลอง

- หมายเหตุ
-  คือ วาล์วแบบลูกทรงกลม (Ball Valve)
 -  คือ วาล์วแบบเข็ม (Needle Valve)
 -  คือ วาล์วกันกลับ (Check Valve)
 -  คือ เกจวัดความดัน (Pressure gauge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้