บทที่ 3

ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการทดลอง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งแผนงานไว้ดังนี้

3.1) การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของระบบสารละลายลิเทียมคลอไรด์-น้ำ

3.2) การหาข้อมูลบางอย่าง และเทคนิควิธีการจากการทดลองด้วยเครื่องทำความเย็นระบบดูดกลืนอย่างง่าย (ICY BALL)

3.3) การออกแบบ และสร้างเครื่องทำความเย็นแบบต่อเนื่อง

3.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของระบบสารละลายลิเทียมคลอไรด์-น้ำ

ข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบเครื่องทำความเย็นระบบนี้ [3),(5)] ได้แก่ ข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ ความดันไอและความเข้มข้นของสารละลาย ความหนืด ความถ่วงจำเพาะ ความจุความร้อน ฯลฯ ได้แสดงไว้แล้วในภาคผนวก ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของสารละลายลิเทียมคลอไรด์ ส่วนข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำจะไม่แสดงไว้ เพราะสามารถหาอ่านได้จากเอกสารอ้างอิงโดยทั่วไป สำหรับข้อมูลบางอย่างที่ไม่อาจหาได้จากเอกสาร ก็จะหาได้จากการทดลองด้วยเครื่องมือขนาดเล็ก ดังจะกล่าวละเอียดในหัวข้อที่ 3.2

3.2 การศึกษาการทำงานของเครื่องทำความเย็นระบบดูดกลืนอย่างง่าย (ICY BALL)

งานวิจัยในขั้นนี้เป็นการศึกษาการทำงานของเครื่องทำความเย็นอย่างง่ายในระบบนี้ เพื่อทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ ความดัน และความเข้มข้นของสารละลายลิเทียมคลอไรด์ แล้วนำผลที่ได้ไปใช้ในการคำนวณออกแบบสร้างเครื่องทำความเย็นแบบต่อเนื่องขึ้นมา

ภายหลัง ข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลที่ไม่อาจจะหาจากเอกสารอ้างอิงได้ หรือในบางกรณีที่หาได้ก็เป็นข้อมูลที่วัดในสภาพสมดุลย์ (EQUILIBRIUM) ซึ่งไม่ตรงกับผลที่ได้จากการทดลองปฏิบัติจริง ๆ นอกจากนี้การทดลองยังช่วยให้เข้าใจถึงกลไกของการทำความเย็นในระบบนี้ ตลอดจนเทคนิควิธีการต่าง ๆ อันจะเป็นประโยชน์ต่อการสร้างเครื่องทำความเย็นแบบต่อเนื่องขึ้นมาภายหลัง

การทดลองแบ่งเป็น

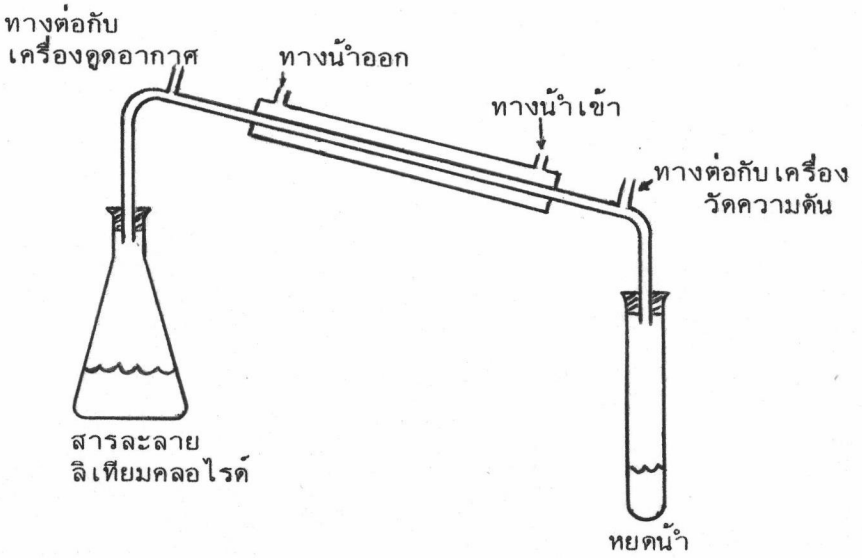
3.2.1) การทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสม

3.2.2) การหาอัตราการถ่ายเทมวลสารของการดูดกลืน

3.2.3) การศึกษาการทำงานของเครื่องเย็นอย่างง่ายแบบกึ่งต่อเนื่อง

<u>เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง</u>

เครื่องทำความเย็นอย่างง่ายนี้ประกอบด้วยกระเปาะ 2 ใบ มีท่อนำก๊าซต่อถึงกันดังรูปที่ 5 อากาศซึ่งเป็นตัวเฉื่อยอยู่ภายในจะถูกดูดออกไปให้หมด กระเปาะใหญ่ทำด้วยขวด



รูปที่ 5 แสดงเครื่องทำความเย็นอย่างง่าย "ICY BALL"

แก้วรูปชมพู่ขนาด 1 ลิตร ภายในบรรจุด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์ ส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็นทั้งเครื่องผลิตเมื่อให้ความร้อนใน ช่วงการผลิต (GENERATION) และเป็นเครื่องดูดกลืนเมื่อคายความร้อนออกใน ช่วงการระเหย (EVAPORATION) อีกกระเปาะหนึ่งมีขนาดเล็กทำด้วยหลอดแก้วทดสอบขนาด 50 ลบ.ซม. มีขีดบอกปริมาตร กระเปาะนี้ทำหน้าที่เป็นทั้งที่เก็บหยดน้ำระหว่างการผลิต และเป็นเครื่องระเหยในช่วงการระเหย ทั้ง 2 กระเปาะต่อเข้าด้วยท่อนำก๊าซทำด้วยท่อทองแดงขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว ซึ่งงอดังรูปเพื่อให้หยดน้ำที่ควบแน่นไหลมายังกระเปาะเล็กได้ ภายนอกท่อทองแดงมีส่วนระบายความร้อนด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง ทำด้วยท่อพลาสติกหุ้มอยู่ภายนอก มีทางน้ำเข้า - ออก (ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นเครื่องควบแน่น)

เพื่อที่จะวัดความดันและอุณหภูมิ กระเปาะทั้ง 2 ข้างจะมีเทอร์โมมิเตอร์ใส่ไว้ ส่วนท่อทองแดงจะมีทางสำหรับต่อเครื่องวัดความดันด้วย แมโนมิเตอร์ปลายปิด (CLOSED - END MANOMETER) และอีกทางหนึ่งสำหรับดูดอากาศออกจากระบบโดยผ่านวาวซึ่งมีลิ้นปิด - เปิด เองโดยสปริง

การบรรจุสารละลาย

การบรรจุสารละลายในเครื่องมือมี 2 วิธี

วิธีที่ 1 ดูดอากาศออกจากระบบโดยใช้ ปั๊มสูญญากาศ (VACUUM PUMP) แล้วผ่านสารละลายทางสายยาง ผ่านวาวลงสู่กระเปาะใหญ่ วิธีนี้ต้องระวังไม่ให้อากาศผ่านเข้าไปเป็นอันขาด ต้องไล่อากาศตามสายยางออกให้หมดโดยการแทนที่ด้วยสารละลายที่จะบรรจุ วิธีการนี้เป็นวิธีการโดยทั่วไปในการบรรจุสารลงในเครื่องเย็นระบบอื่น แต่ในกรณีนี้มีข้อเสีย กล่าวคือวาวจะเกิดสนิมภายหลังการบรรจุ ไม่สามารถใช้ได้อีก

วิธีที่ 2 บรรจุสารละลายลงในกระเปาะใหญ่ก่อน แล้วจึงดูดอากาศออก โดยที่ก่อนทำการดูดอากาศ ควรใส่หยดน้ำ 2 - 3 หยดลงในกระเปาะเล็ก เพื่อให้ระเหยกลายเป็นไอช่วยไล่อากาศออกจนหมด

ปริมาณของสารละลายที่บรรจุ ควรให้มากเกินพอที่จะไม่เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไปมากนัก เพื่อให้ตัวทำความเย็นกลั่นตัวได้จำนวนมากพอที่จะทำการทดลองได้ ทั้งนี้เพื่อให้ค่าต่าง ๆ ที่วัดได้เป็นค่าเฉพาะที่ความเข้มข้นของสารละลายค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งในการทดลองจะใช้สารละลายหนัก 1.1 ปอนด์ (500 กรัม) และให้ตัวทำความเย็นกลั่นตัวประมาณ 0.033 ปอนด์ (15 กรัม)

3.2.1 การทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสม

วิธีการทดลอง เมื่อบรรจุสารละลายลิเทียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นใดความเข้มข้นหนึ่งและดูดอากาศออกไปจากระบบแล้ว เริ่มทำการทดลองในช่วงของการผลิต โดยให้ความร้อนแก่สารละลายในเครื่องผลิต แล้วเปิดให้น้ำหล่อเย็นไหลผ่านเครื่องควบแน่นตลอดเวลา เพื่อให้ไอน้ำกลั่นตัว จนได้ประมาณ 0.033 ปอนด์ บันทึกอุณหภูมิในเครื่องผลิตและเครื่องควบแน่นในขณะที่ไอน้ำกำลังกลั่นตัว

ในช่วงการระเหย ใช้น้ำหล่อเย็นสารละลายในกระเปาะใหญ่ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นเครื่องดูดกลืน ส่วนกระเปาะเล็กจะทำหน้าที่เป็นเครื่องระเหย บันทึกอุณหภูมิทั้งในเครื่องดูดกลืนและเครื่องระเหยในขณะที่น้ำกำลังระเหย

ผลการทดลองแสดงไว้ในหัวข้อ 4.1 ของบทที่ 4

3.2.2 การทดลองเพื่อหาอัตราการถ่ายเทมวลสารของการดูดกลืน

การออกแบบเครื่องดูดกลืนเพื่อใช้ในเครื่องเย็นระบบต่อเนื่อง จำเป็นต้องทราบอัตราการถ่ายเทมวลสารของการดูดกลืน ในการทดลองนี้ได้เพิ่มเติมชิ้นส่วนบางอย่างเข้ากับเครื่องมือที่ใช้ทดลอง เพื่อควบคุมให้ได้สภาวะตามต้องการดังนี้

1. เพิ่ม แท่งกวนแบบแม่เหล็ก (MAGNETIC BAR) ลงในกระเปาะเล็กเพื่อกวนน้ำซึ่งเป็นตัวทำความเย็นตลอดเวลา เป็นการป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของตัวทำความเย็นมีความ

แตกต่างกันมากนัก อุณหภูมิที่อ่านได้จึงถือว่าเป็นอุณหภูมิที่ผิวน้ำ ซึ่งกำลังระเหยกลายเป็นไอ นอกจากนี้การกวนจะช่วยลดการระเหยอย่างรุนแรงเนื่องจากการเดือดที่เกิดขึ้น ซึ่งทำให้การอ่านปริมาตรในส่วนนี้ผิดพลาดไป

2. เพิ่ม อ่างน้ำ (WATER BATH) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ไว้รอบ ๆ กระเปาะเล็ก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องระเหยให้ได้ตามต้องการ

อัตราการดูดกลืนไอน้ำของสารละลายลิเทียมคลอไรด์ วัดได้จากอัตราการระเหยกลายเป็นไอของน้ำในเครื่องระเหย สาเหตุที่ต้องสังเกตจากการระเหย เพราะว่าในเครื่องระเหยซึ่งเป็นกระเปาะเล็ก มีพื้นที่ผิวหน้าน้อย การสังเกตการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำกระทำได้ง่ายกว่าการสังเกตการเปลี่ยนแปลงระดับในเครื่องดูดกลืนโดยตรง เนื่องจากพื้นที่ผิวหน้าของเครื่องดูดกลืนมีขนาดใหญ่ และอาจมีปัญหาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของสารละลายในเครื่องดูดกลืน อันเป็นผลมาจากการดูดกลืนด้วย

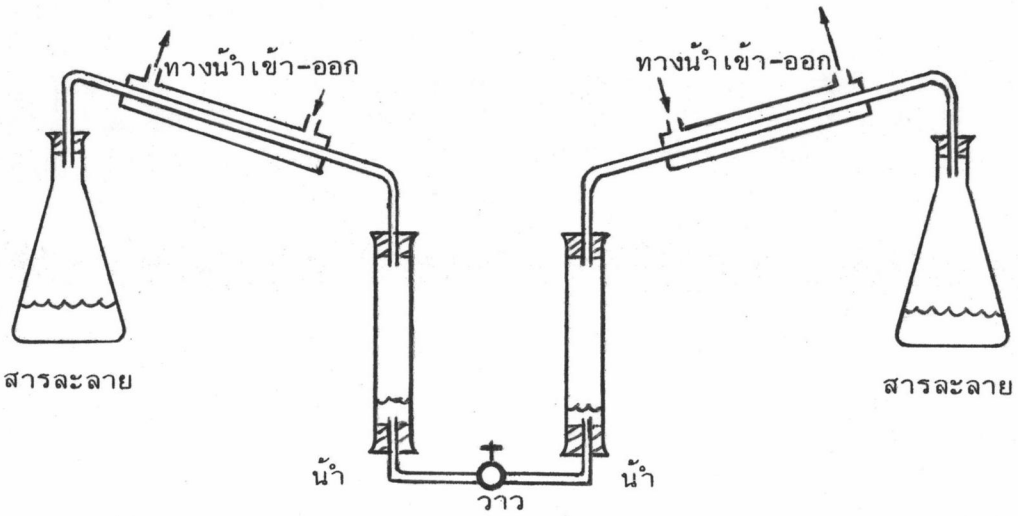
<u>วิธีการทดลอง</u> บรรจุสารละลายซึ่งมีความเข้มข้นตามที่ได้จากผลการทดลอง 3.2.1 ลงในเครื่องมือ แล้วดูดอากาศออก ทำการผลิตจนกระทั่งได้หยดน้ำประมาณ 15 ลบ.ซม. แล้วจึงทดลองในช่วงการระเหย โดยบันทึกการเปลี่ยนแปลงระดับของน้ำในเครื่องระเหยกับเวลา และอุณหภูมิในเครื่องระเหย อ่างน้ำ เครื่องดูดกลืน ความดันของระบบ เพื่อนำมาคำนวณอัตราการดูดกลืนและผลที่เกี่ยวข้อง

ผลการทดลองได้แสดงไว้ในหัวข้อ 4.2 ของบทที่ 4

3.2.3 <u>การศึกษาการทำงานของเครื่องเย็นแบบกึ่งต่อเนื่อง</u>

จุดประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อดูการทำงานของวาว ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างด้านความดันสูงในช่วงการผลิต กับด้านความดันต่ำในช่วงการระเหย และศึกษาการทำงานของระบบเพื่อประโยชน์ในการสร้างเครื่องเย็นแบบต่อเนื่อง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง มีลักษณะเป็นเครื่องทำความเย็นอย่างง่าย ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว 2 ชุด เชื่อมต่อกันด้วยวาว ดังรูปที่ 6



005612

รูปที่ 6 แสดงเครื่องเย็นแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยการนำเครื่องทำความเย็นอย่างง่าย ๆ 2 ชุดมารวมกัน

เครื่องทำความเย็นอย่างง่ายแต่ละชุดจะทำหน้าที่สลับกัน ทั้งช่วงการผลิตและช่วงการระเหย นั่นคือ ถ้าให้กระเปาะใหญ่ใบแรกทำหน้าที่เป็นเครื่องผลิตแล้วกระเปาะใหญ่ที่เหลือจะทำหน้าที่เป็นเครื่องดูดกลืน เมื่อทดลองไปภายในเครื่องผลิตจะมีความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้น และปริมาณของสารละลายจะลดลงเนื่องจากน้ำระเหยไป กลั่นตัวในเครื่องควบแน่น และจะถูกดันผ่านวาวด้วยความดันของด้านความดันสูง สู่กระเปาะเล็กของเครื่องทำความเย็นอย่างง่ายชุดหลัง ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นเครื่องระเหย และมีความดันต่ำกว่า น้ำจะดูดความร้อนจาก

สิ่งแวดล้อมข้างเคียง และระเหยไปยังเครื่องดูดกลืน ซึ่งจะดูดกลืนไอน้ำไปเรื่อย ๆ จนปริมาณของสารละลายเพิ่มขึ้น สารละลายก็จะเจือจางลง ดังนั้นในการทดลองครั้งต่อไป ก็จะสลับให้กระเปาะใหญ่ที่เคยทำหน้าที่เป็นเครื่องดูดกลืน ไปทำหน้าที่เป็นเครื่องผลิตเสีย ส่วนกระเปาะใหญ่ที่เคยทำหน้าที่เป็นเครื่องผลิต ก็จะทำหน้าที่เป็นเครื่องดูดกลืน สลับกันไปมา

<u>วิธีการทดลอง</u> บรรจุสารละลายลิเทียมคลอไรด์ความเข้มข้นที่ได้จากผลการทดลอง 3.2.1 ลงในกระเปาะใหญ่ทั้ง 2 ใบ ๆ ละประมาณ 1 ปอนด์ แล้วดูดอากาศออกเสร็จแล้วปิดวาวให้สนิท เริ่มให้ความร้อนแก่กระเปาะใหญ่ที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องผลิต แล้วเปิดให้น้ำหล่อเย็นเครื่องควบแน่น และเครื่องดูดกลืนตลอดเวลา เมื่อได้ปริมาณน้ำที่กลั่นตัวมากพอควร ค่อย ๆ เปิดวาวให้น้ำไหลผ่านเข้าสู่เครื่องระเหย ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าขณะที่น้ำผ่านวาวจะมีฝ้าไอน้ำเกาะที่ตัววาวภายนอก แสดงว่าอุณหภูมิภายในลดลง การเปิดวาวต้องพยายามให้ปริมาณน้ำที่ผ่านวาวเท่ากับอัตราการดูดกลืน ซึ่งสังเกตได้จากระดับน้ำภายในเครื่องระเหยจะคงที่ตลอด น้ำที่ระเหยจากเครื่องระเหยจะถูกดูดกลืนเข้าสู่เครื่องดูดกลืน

ผลการศึกษาการทำงานของเครื่องเย็นแบบกึ่งต่อเนื่องแสดงไว้ในหัวข้อ 4.3 ของบทที่ 4

3.3 <u>การออกแบบอุปกรณ์ทำความเย็นแบบต่อเนื่อง</u>

อุปกรณ์ต่าง ๆ ในเครื่องทำความเย็นแบบดูดกลืน เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแทบทั้งหมด ดังนั้นก่อนการออกแบบจะต้องรู้ปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องในชิ้นส่วนต่าง ๆ แล้วจึงนำมาเลือกแบบ คำนวณขนาดของเครื่องมือให้เหมาะสม รวมทั้งพิจารณาโลหะที่ใช้ในการสร้างด้วย

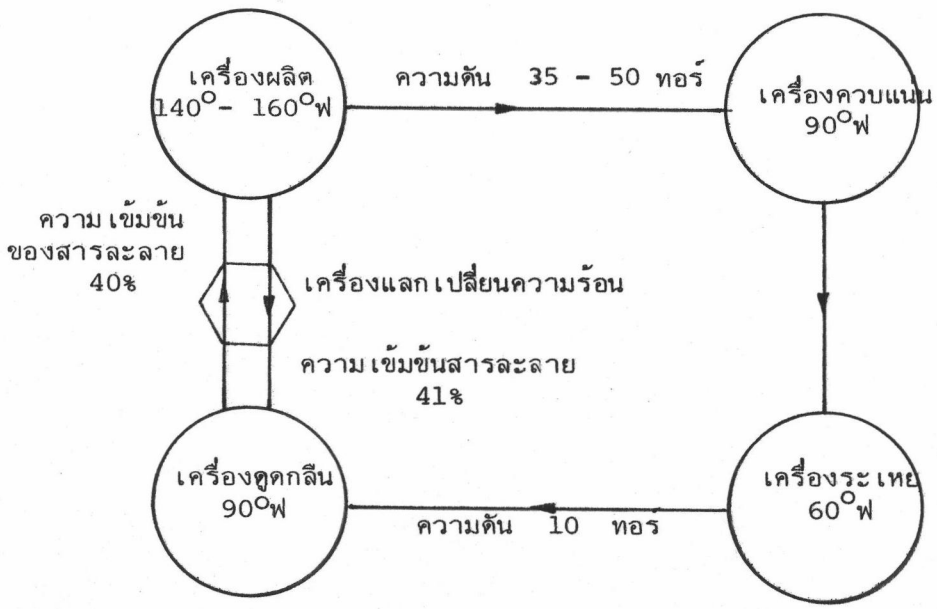
ในการออกแบบจะใช้ผลที่ได้จากการทดลองตามหัวข้อที่ 2 เป็นข้อกำหนดเบื้องต้น กล่าวคือ จะใช้สารละลายลิเทียมคลอไรด์ 40 % ในเครื่องผลิต และใช้น้ำที่อุณหภูมิห้อง (83° - 86° ฟ) เป็นตัวระบายความร้อน ทำให้ตัวทำความเย็นซึ่งเป็นน้ำกลั่นตัวที่อุณหภูมิ

ประมาณ 86° - 90° ฟ ซึ่งจะไปกำหนดค่าความดันในด้านความดันสูงให้มีค่าประมาณ 35 - 50 ทอร์ (TORR) ดังนั้นจุดเดือดของสารละลายในเครื่องผลิตจะอยู่ในช่วง 140°-150^{0}ฟ

ทางด้านเครื่องดูดกลืน จะมีน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นตัวระบายความร้อน ทำให้อุณหภูมิของสารละลายภายในเครื่องดูดกลืนมีค่าประมาณ 90° ฟ ความเข้มข้นของสารละลายกำหนดให้มีค่า 41 % ทั้งความเข้มข้นและอุณหภูมิในเครื่องดูดกลืน จะเป็นตัวกำหนดความดันในด้านความดันต่ำให้มีค่าประมาณ 10 ทอร์ ดังนั้นอุณหภูมิในเครื่องระเหยจะมีค่าประมาณ 60° ฟ

การระบายความร้อนทิ้งจากระบบจะใช้น้ำที่อุณหภูมิห้อง ด้วยอัตราการไหลมากพอทำให้อุณหภูมิของน้ำที่เข้าและออกจากขบวนการภายในระบบไม่ต่างกันนัก ดังนั้นในการคำนวณจึงถือว่าอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนมีค่าคงที่

เมื่อสรุปค่าต่าง ๆ ลงในแผนผัง (DIAGRAM) จะได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงแผนผังพร้อมค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นในการคำนวณ

เมื่อกำหนดให้ความสามารถในการทำความเย็นของเครื่องมือ เป็น $\frac{1}{5}$ ตันความเย็น ปริมาณของสารที่หมุนเวียน อัตราการถ่ายเทความร้อน และขนาดของเครื่องมือ สามารถคำนวณได้จากภาวะต่าง ๆ ที่กำหนดขึ้นจากแผนผังข้างต้น ดังรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ซึ่งสรุปได้ดังนี้

3.3.1 ปริมาณของสารที่ไหลหมุนเวียนในระบบ

ปริมาณของน้ำที่ไหลหมุนเวียน	2.33	ปอนด์/ชม.
ปริมาณของสารละลายเจือจางที่ไหลหมุนเวียน	95.52	"
ปริมาณของสารละลายเข้มข้นที่ไหลหมุนเวียน	93.19	"

3.3.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนในส่วนต่าง ๆ ของระบบ

อัตราการถ่ายเทความร้อนในเครื่องผลิต	3897.6	บีทียู/ชม.
อัตราการถ่ายเทความร้อนในเครื่องควบแน่น	2490.7	"
อัตราการถ่ายเทความร้อนในเครื่องระเหย	2400.0	"
อัตราการถ่ายเทความร้อนในเครื่องดูดกลืน	2614.3	"

3.3.3 ประสิทธิภาพของเครื่องมือ (C.O.P)

$$\text{ประสิทธิภาพ} \quad C.O.P = \frac{2400}{3897.6}$$

$$= 0.64$$

เมื่อทราบอัตราการถ่ายเทความร้อนในแต่ละชิ้นส่วนแล้ว ก็นำไปคำนวณออกแบบและสร้างเครื่องมือส่วนต่าง ๆ ซึ่งได้ถือหลักในการพิจารณาเลือกแบบดังนี้

1) เครื่องมือปฏิบัติงานอยู่ภายใต้ความดันที่ต่ำมาก เกือบเป็นสูญญากาศ และต้องระมัดระวังมิให้อากาศซึ่งเป็นตัวเฉื่อยรั่วเข้าไป ดังนั้นการหลีกเลี่ยงการเชื่อมหรือการต่อ จึงเป็นสิ่งจำเป็น ขณะเดียวกันเครื่องมือ

ต้องทนต่อแรงกดดันได้

2) วัสดุที่ใช้สร้างต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายลิเทียมคลอไรด์-น้ำ

3) สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 170° ฟ

4) ถ่ายเทความร้อนได้ดี

จากเหตุผลดังกล่าวเหล่านี้จึงเลือกใช้ เหล็กไร้สนิม (STAINLESS STEEL) ซึ่งสามารถหาซื้อได้ และชิ้นส่วนต่าง ๆ พยายามให้มีลักษณะของทรงกระบอก เพราะสามารถใช้ท่อเหล็กไร้สนิมที่มีขนาดต่าง ๆ แทนได้ ซึ่งเป็นการลดการเชื่อม ต่อ ขณะที่สร้างได้ สำหรับการออกแบบเครื่องมือที่มีการถ่ายเทความร้อน ได้ใช้วิธีการคำนวณและอาศัยข้อมูลบางอย่างจาก KERN,[6] D.Q.

3.3.4 <u>การออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ</u>

<u>การออกแบบเครื่องผลิต</u>

จากการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนในเครื่องผลิต พอแบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วนคือ

- อัตราการถ่ายเทความร้อนในการอุ่นให้ร้อน (PRE HEATING) จากอุณหภูมิ 130° ฟ เป็น 140° ฟ
- อัตราการถ่ายเทความร้อนในขณะที่เดือด

ดังนั้นเครื่องผลิตจะมี 2 ส่วน โดยที่ส่วนแรกเรียกว่า ส่วนอุ่นให้ร้อน (PRE-HEATER) และส่วนหลังจะเป็น ส่วนต้มระเหย (EVAPORATOR)

การออกแบบส่วนอุ่นให้ร้อนนั้นไม่ยุ่งยาก เพราะไม่มีการระเหยของน้ำจึงไม่มีการเปลี่ยนสถานะ ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้เป็นท่อเหล็กไร้สนิมขนาด $\frac{3}{8}$ นิ้วยาว 5 ฟุต

(ดูการคำนวณในภาคผนวก) จุ่มอยู่ในน้ำร้อนซึ่งมีอุณหภูมิ 170° - 175° ฟ

ในส่วนต้มระเหยจะมีสารทั้ง 2 สถานะปนกัน คือไอกับของเหลว ซึ่งส่วนที่เป็นของเหลวจะเป็นส่วนที่รับความร้อน ต้องให้มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนมาก ขณะเดียวกันก็ต้องใช้สารละลายมากตามไปด้วย นอกจากนี้ระดับของสารละลายก็มีผลต่อการเดือด กล่าวคือถ้ามีระดับแตกต่างกันมาก สารละลายที่อยู่ข้างใต้จะมีจุดเดือดสูงกว่าสารละลายตอนบน ถ้าความดันต่ำ ๆ แล้วจุดเดือดจะต่างกันมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงออกแบบให้สารละลายไหลเป็นแผ่นบาง ๆ (FILM) เพราะนอกจากจะแก้ปัญหาดังกล่าวแล้ว ยังช่วยลดปริมาณการใช้สารละลายลงด้วย จึงได้เลือกส่วนนี้เป็นแบบ เครื่องต้มระเหยของเหลวแผ่นบาง (FALLING FILM EVAPORATOR) ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบถังและท่อ (1-1 SHELL & TUBE HEAT EXCHANGER) แต่สารละลายในท่อจะไหลเป็นแผ่นบาง ๆ ตามผนังด้านใน เนื่องจากน้ำหนักของตัวมันเองโดยลักษณะของการไหลล้น (OVER FLOW) สำหรับด้านตัวถังจะมีน้ำร้อนซึ่งมีอุณหภูมิ 170° - 175°ฟ จากขดลวดความร้อน ทำหน้าที่แทนแผ่นรับแสงแบบราบ คอยถ่ายเทความร้อนให้กับสารละลาย ขนาดของส่วนต้มระเหยได้กำหนด ดังนี้ (ดูการคำนวณในภาคผนวก)

<u>ด้านตัวถัง</u> (SHELL SIDE)	<u>ด้านท่อ</u> (TUBE SIDE)
เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 นิ้ว	เส้นผ่าศูนย์กลาง แผ่นรวมท่อ (TUBE SHEET) 4 นิ้ว
	ความยาวท่อ 2 ฟุต
	จำนวนท่อ (22 BWG) 13 ท่อ
	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ $\frac{3}{8}$ นิ้ว
	การวางท่อเป็นแบบ Δ ห่างกัน 1 นิ้ว

จะเห็นว่าระยะห่างระหว่างท่อค่อนข้างกว้าง ทั้งนี้เนื่องจากทางด้านตัวถัง การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการพาความร้อนตามธรรมชาติ (NATURAL CONVECTION) และตัวถังก็ได้ออกแบบให้มีขนาดใหญ่ เพื่อให้เป็นที่เก็บพลังงานความร้อนในรูปของน้ำร้อน เพื่อต่อเข้ากับแผ่นรับแสงแบบราบ ดังนั้นรอบตัวถังจึงหุ้มฉนวนความร้อน สำหรับขดลวดความร้อนที่ใช้มีขนาด 1 กิโลวัตต์ 2 ชุด

รายละเอียดลักษณะของเครื่องผลิต แสดงไว้ในรูป 9 ท้ายบท

<u>การออกแบบเครื่องควบแน่น</u>

เครื่องควบแน่นที่สร้างขึ้น มีน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นตัวระบายความร้อน ทำให้อุณหภูมิของหยดน้ำ (ตัวทำความเย็น) ที่ควบแน่น มีค่าไม่เกิน 95° ฟ เพราะถ้าอุณหภูมิสูงไปค่าเอนธาลปีของตัวทำความเย็นจะสูงตามไปด้วย ทำให้ความสามารถในการทำความเย็นลดลง เนื่องจากตัวทำความเย็นคือน้ำ จึงสามารถใช้ท่อทองแดงม้วนเป็นขด (COIL) เช่นเดียวกับเครื่องควบแน่นที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นโดยทั่วไป เพื่อให้การระบายความร้อนดีขึ้น จะใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องหล่อระบายความร้อนอยู่ด้านนอก ในลักษณะของ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน (DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER) โดยไหลสวนทางกับไอน้ำที่กลั่นตัว ซึ่งจะทำให้ สัมประสิทธิของการถ่ายเทความร้อน (HEAT TRANSFER COEFFICIENT) มีค่ามากกว่าการที่จะให้ขดทองแดงจุ่มอยู่ในน้ำนิ่ง ทำให้สามารถลดความยาวของท่อทองแดงที่ใช้

สำหรับการคำนวณความยาวของท่อทองแดง ได้แบ่งการคำนวณออกเป็น 3 ระยะตามสภาวะที่เกิดขึ้นดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก ทั้งนี้เพราะคุณสมบัติในด้านการถ่ายเทความร้อนไม่เหมือนกัน ขนาดของท่อทองแดงที่ใช้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{1}{2}$ นิ้ว มีความยาวซึ่งได้จากการคำนวณ 16 ฟุต ใช้สายยางพลาสติกเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้วสวมทับภายนอก แล้วม้วนเป็นขดวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ฟุต ดังแสดงไว้ในรูปที่ 10ก. ท้ายบท

การออกแบบเครื่องระเหย

ในเครื่องทำความเย็นโดยทั่วไป เครื่องระเหยมี 2 แบบ[7],[8] คือ แบบแห้ง (DRY TYPE) และ แบบจุ่ม (FLOODED TYPE) เนื่องจากในระบบดูดกลืนที่วิจัยนี้ใช้น้ำเป็นตัวทำความเย็น ซึ่งอุณหภูมิต่ำสุดเพียง 46° ฟ และความดันต่ำมาก ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนในสภาวะที่เป็นไอน้ำที่มีความดันต่ำ จึงเป็นไปได้น้อย ไม่เหมาะสมกับการใช้เครื่องระเหยแบบแห้ง และจากการศึกษาจากเครื่องทำความเย็นระบบดูดกลืนอย่างง่าย พบว่าความเย็นที่เกิดขึ้นจะอยู่บริเวณผิวหน้าของน้ำที่สัมผัสกับไอ การระเหยไม่ได้เกิดทั่วไปทุกจุดของของเหลว เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวทำความเย็นในเครื่องระเหยกับอุณหภูมิภายนอกยังมีค่าน้อย การระเหยส่วนใหญ่จึงเป็นแบบการพาความร้อนตามธรรมชาติ น้ำที่อยู่ในระดับต่ำจากผิวหน้าลงมา จะเดือดได้ก็ต่อเมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่าเดิมเท่านั้น ซึ่งหมายความว่าเครื่องระเหยจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น

จากเหตุผลดังกล่าวจึงเลือกเครื่องระเหยเป็นแบบ ขดท่อจุ่มในตัวถัง (SHELL & COIL FLOODED TYPE) โดยมีน้ำซึ่งเป็นตัวทำความเย็นบรรจุอยู่ในตัวถัง ใต้ระดับน้ำลงมา เล็กน้อยมีขดท่อทองแดงสำหรับนำความเย็นที่ได้ไปใช้ภายนอก ท่อทองแดงที่ใช้เลือกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{3}{8}$ นิ้ว คำนวณความยาวได้ 31 ฟุต ขดเป็นม้วนอยู่ในตัวถังซึ่งทำด้วยท่อพลาสติกเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.5 นิ้ว

ลักษณะของเครื่องระเหย แสดงไว้ในรูปที่ 11 ข. ท้ายบท

การออกแบบเครื่องดูดกลืน

ในเครื่องดูดกลืนมีการดูดกลืนมวลสาร และความร้อนจากการดูดกลืน ซึ่งต้องระบายออกเพื่อให้อุณหภูมิของเครื่องดูดกลืนคงที่ การเลือกเครื่องดูดกลืนอาศัยหลักดังนี้

1) พื้นที่ในการดูดกลืนมวลสารและการถ่ายเทความร้อนต้องมาก เมื่อเทียบกับขนาดของเครื่องดูดกลืน

2) สามารถระบายความร้อนที่เกิดขึ้นได้รวดเร็ว

3) ความแตกต่างของความดันภายในเครื่องดูดกลืนต้องมีค่าน้อย เพราะความดันของเครื่องระเหยแปรผันโดยตรงกับความดันของเครื่องดูดกลืน ดังนั้นเครื่องดูดกลืนจะต้องคงค่าความดันไม่ให้สูงเกินไป ถ้าความแตกต่างของความดันมีค่ามาก ความดันของเครื่องดูดกลืนจะมีค่าสูงขึ้น เป็นผลให้อุณหภูมิในเครื่องระเหยสูงขึ้น

จากเหตุผลดังกล่าวจึงควรใช้เครื่องดูดกลืนแบบ คอลัมน์ท่อเปียก (WETTED - WALL COLUMN) ซึ่งเครื่องมือจะประกอบด้วยท่อจำนวนมาก เพื่อให้มีพื้นที่ในการดูดกลืนมากพอ วางเรียงตัวอยู่ในตัวถัง (SHELL) ที่มีน้ำระบายความร้อนไหลผ่าน แต่เนื่องจากมีปัญหาในด้านประกอบเครื่องมือ ดังจะอธิบายในบทสรุปและเสนอแนะ ในงานวิจัยนี้จึงใช้เครื่องดูดกลืนแบบ คอลัมน์สารบรรจุ (PACKED BED COLUMN) ตัวเครื่องดูดกลืนทำด้วยท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.5 นิ้ว ภายในบรรจุด้วยกระเบื้องเผาซึ่งมีลักษณะเป็น วงแหวน (RASCHIG RING) ขนาด 0.4 นิ้ว วางตัวซ้อนกันอย่างมีระเบียบหนา 2 ฟุต ถ้าหากหนากว่านี้แล้วจะมีปัญหาเรื่องน้ำหนักและความแตกต่างความดันภายในดังที่กล่าวมา

ลักษณะของเครื่องดูดกลืนแสดงไว้ในรูปที่ 11 ก. ท้ายบท

<u>การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน</u>

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีที่ใช้อยู่ 2 แห่งด้วยกันคือ

1) สำหรับระบายความร้อนออกจากเครื่องดูดกลืนแบบสารบรรจุ
2) สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารละลายเข้มข้นอุณหภูมิสูงจากเครื่องผลิตกับสารละลายเจือจางอุณหภูมิต่ำจากเครื่องดูดกลืน

สำหรับกรณีที่ 1 ได้เลือกใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน เพราะสร้างได้ง่ายและลดปัญหาการรั่วซึมจากภายนอก โดยมีท่อใน (INNER PIPE) ทำด้วยท่อเหล็กไร้สนิม เส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{3}{8}$ นิ้วยาว 12 ฟุต และท่อนอก (OUTER PIPE) ทำด้วยท่อพลาสติกเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว โดยมีน้ำอุณหภูมิห้องเป็นตัวระบายความร้อนไหลในท่อนอก

กรณีที่ 2 ได้เลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบถังและท่อ เพราะให้ค่าความดันลดต่ำ และมีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนได้มากเมื่อเทียบกับขนาด ทำด้วยท่อเหล็กไร้สนิม โดยเลือกขนาดดังนี้

ด้านตัวถัง		ด้านท่อ	
เส้นผ่าศูนย์กลาง	3.068 นิ้ว	เส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นรวมท่อ	3 นิ้ว
ความยาว	2 ฟุต 4 นิ้ว	ความยาวท่อ	2 ฟุต
จำนวนแผ่นกั้น (BAFFLE)	7 แผ่น	จำนวนท่อ (22 BWG)	19 ท่อ
ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น	3 นิ้ว	เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ	$\frac{3}{8}$ นิ้ว
		วางท่อแบบ Δ ห่างกัน	$\frac{5}{8}$ นิ้ว

จำนวนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบถังและท่อ ได้ใช้ขนาดดังที่กล่าวมา 2 ตัว ต่ออนุกรมกัน ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของสารละลายเข้มข้นลดลงจาก 150° ฟ เป็น 110° ฟ และอุณหภูมิของสารละลายเจือจางเพิ่มจาก 90° ฟ เป็น 130° ฟ

ลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 แบบได้แสดงไว้ในรูปที่ 10 ข., 12

นอกจากเครื่องมือที่ต้องออกแบบสร้างดังกล่าวแล้ว ยังมีอุปกรณ์บางชิ้นที่ควรกล่าวถึง คือ

<u>ปั๊ม</u> สำหรับส่งสารละลายลิเทียมคลอไรด์เจือจางจากเครื่องดูดกลืนไปยังเครื่องผลิต และส่งสารละลายเจือจางบางส่วนไประบายความร้อน แล้วกลับไปยังเครื่องดูดกลืนใหม่อีกครั้งหนึ่ง ปั๊มที่ใช้เป็นแบบ เฮอร์มาติคซีล (HERMATICALLY SEALED MAGNETIC-DRIVE CENTRIFUGAL PUMP) ขนาด $\frac{1}{8}$ แรงม้า มีอัตราการสูบ 620 แกลลอน / ชม. ที่ความดันเมื่อคิดเป็นความสูงของน้ำได้ 18 ฟุต ปั๊มแบบนี้จะไม่มีรอยรั่วให้อากาศซึมเข้าไปตามแกนเพลาดังปั๊มแบบอื่น ๆ และไม่ถูกสารละลายกัดกร่อน เพราะตัวปั๊มทำด้วยพลาสติกสังเคราะห์

<u>วาวลดความดัน</u> เป็นตัวลดความดันและควบคุมการไหลของตัวทำความเย็น วาวโดยทั่วไปมักมีรอยรั่วตามแกน จึงไม่อาจจะนำมาใช้ได้ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สายยางหนา ต่อ

ระหว่างเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย โดยมีตัวหนีบแบบสกรู (SCREW CLAMP) บีบให้สายยางติดกัน เพื่อเพิ่มความต้านทานในการไหล โดยไม่มีรอยรั่วตามที่กล่าวมา

3.3.5 การทดสอบการปฏิบัติงานของเครื่องมือ

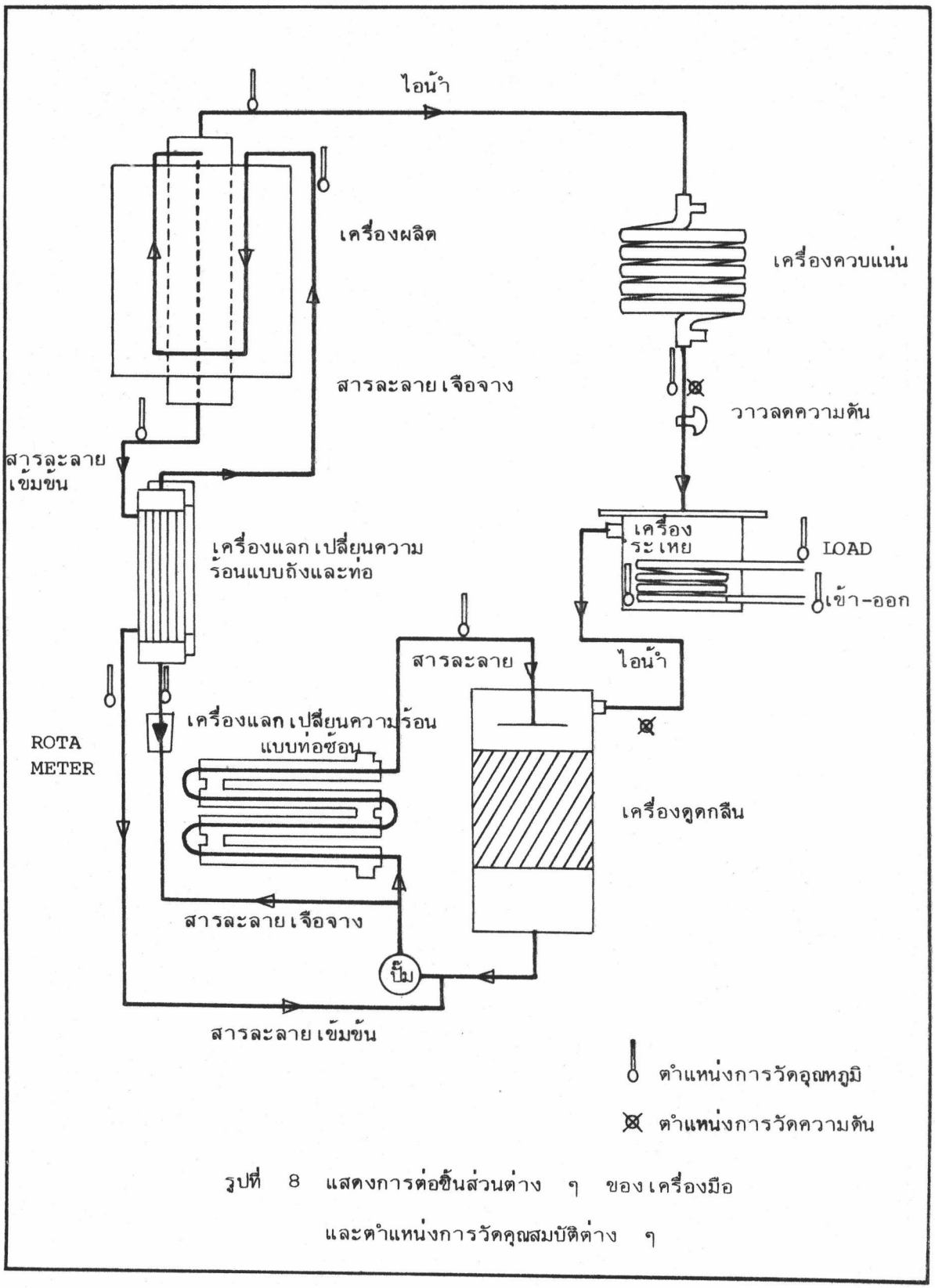
จุดมุ่งหมายสำคัญในการทดสอบนี้ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือ และความสามารถในการทำความเย็น รวมทั้งวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงภายในระบบ เช่น อัตราการไหลของสารละลาย อุณหภูมิ ความดัน ตามจุดต่าง ๆ ของเครื่องมือที่ต่อเข้าด้วยกันดังรูปที่ 8 สำหรับการคิดประสิทธิภาพของเครื่องมือ ได้คิดเป็น 2 แบบตามลักษณะของการปฏิบัติการของเครื่องมือดังนี้

แบบที่ 1 เป็นการทดสอบแบบต่อเนื่อง โดยให้เครื่องมือทำงานต่อเนื่องตลอดเวลาจนเข้าสู่สภาวะคงที่ (STEADY STATE) ได้ทำการวัดอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เข้าไปในเครื่องผลิตโดยวัดกำลังงานไฟฟ้า กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เข้าไปในเครื่องระเหยในรูปของความร้อนสัมผัส (SENSIBLE HEAT) แล้วคำนวณเปรียบเทียบกัน

แบบที่ 2 เป็นการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง โดยจะวัดปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ต้องใช้ในการผลิตเพื่อให้ได้จำนวนของตัวทำความเย็นจำนวนหนึ่ง แล้วหยุดการผลิต จากนั้นให้ตัวทำความเย็นจำนวนนี้ถ่ายเทความร้อนในเครื่องระเหยจนหมด นำค่าปริมาณความร้อนทั้ง 2 ค่ามาเปรียบเทียบกัน จะเห็นว่าการคิดในแบบที่ 2 นี้ไม่มีเวลามาเกี่ยวข้องเลย เป็นการคิดปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทดังกล่าว ไม่ใช่อัตราการถ่ายเทความร้อนดังแบบแรก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเวลาและสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนในเครื่องระเหย

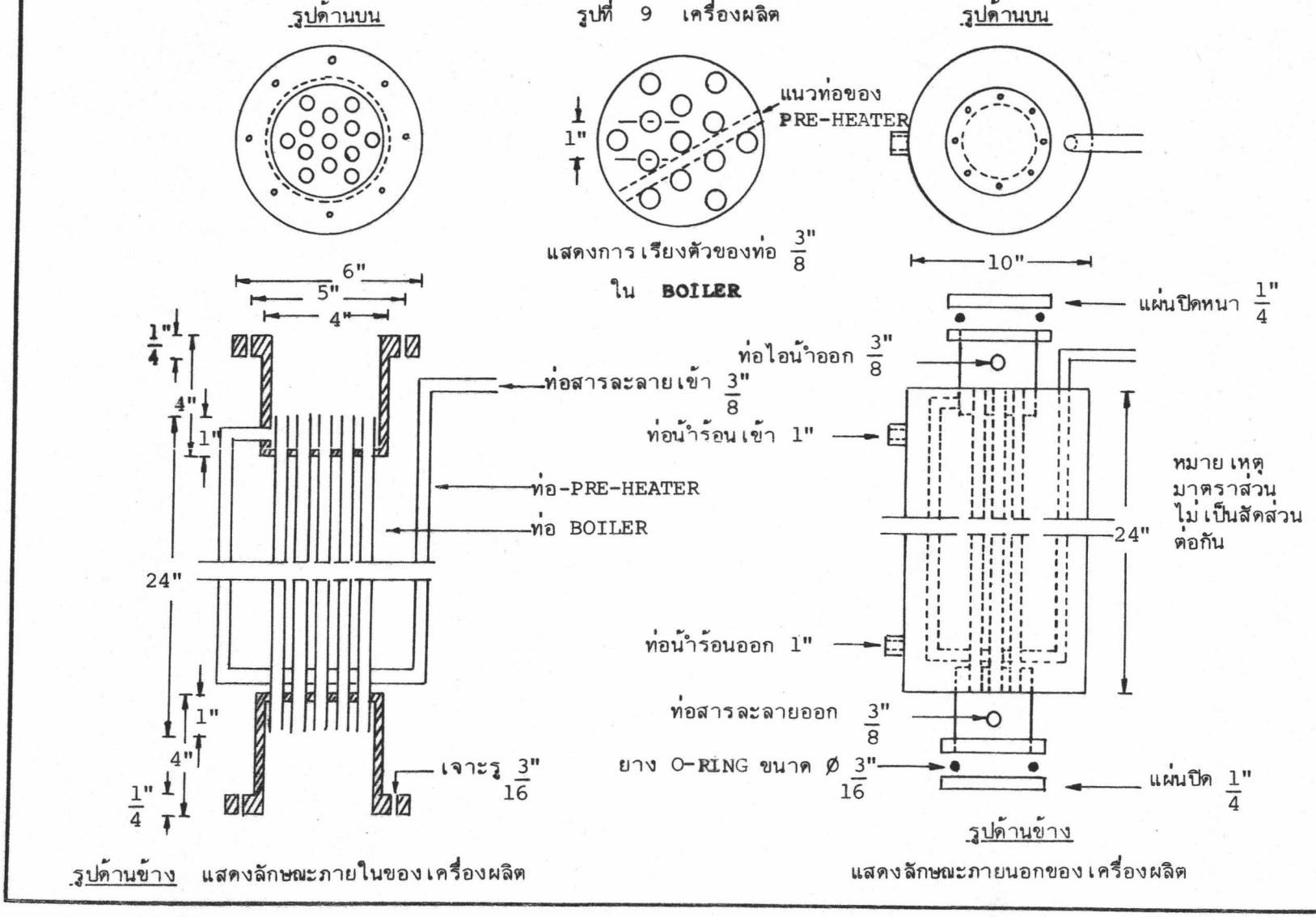
ในการนำความเย็นไปใช้ ได้ใช้น้ำอุณหภูมิห้องไหลผ่านขดลวดทองแดงในเครื่องระเหย ทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลง เมื่อทราบอัตราการไหลของน้ำก็สามารถคำนวณความร้อนสัมผัส ที่ได้ถ่ายเทให้กับเครื่องระเหยได้

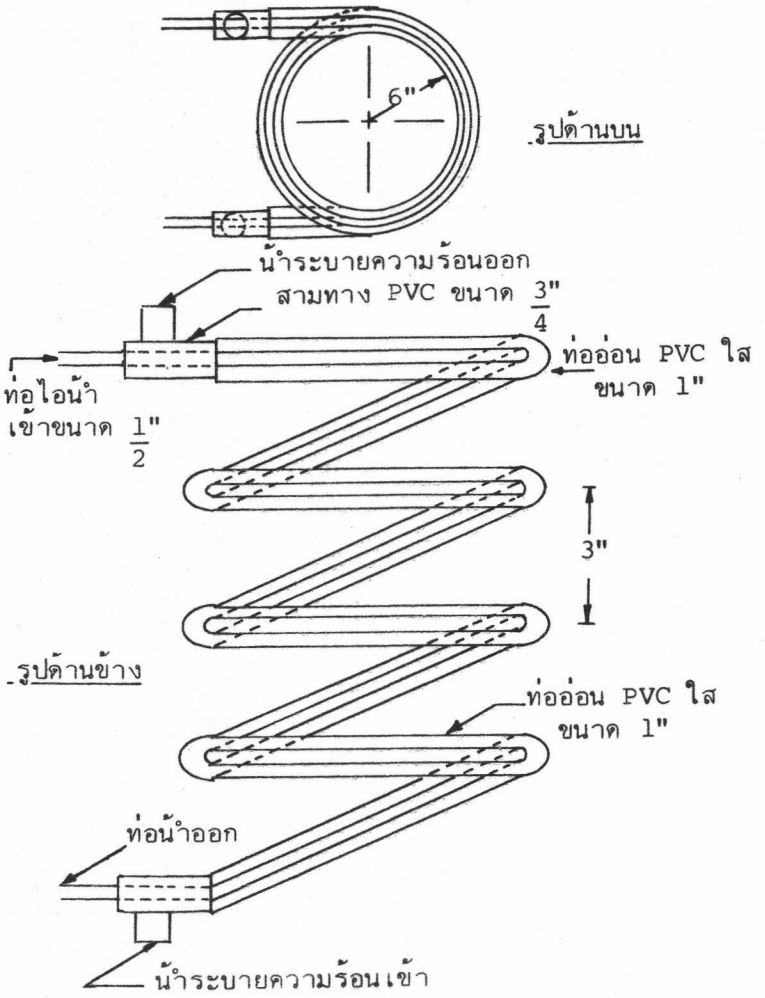
ผลการทดสอบเครื่องมือแสดงไว้ในหัวข้อ 4.4 ของบทที่ 4



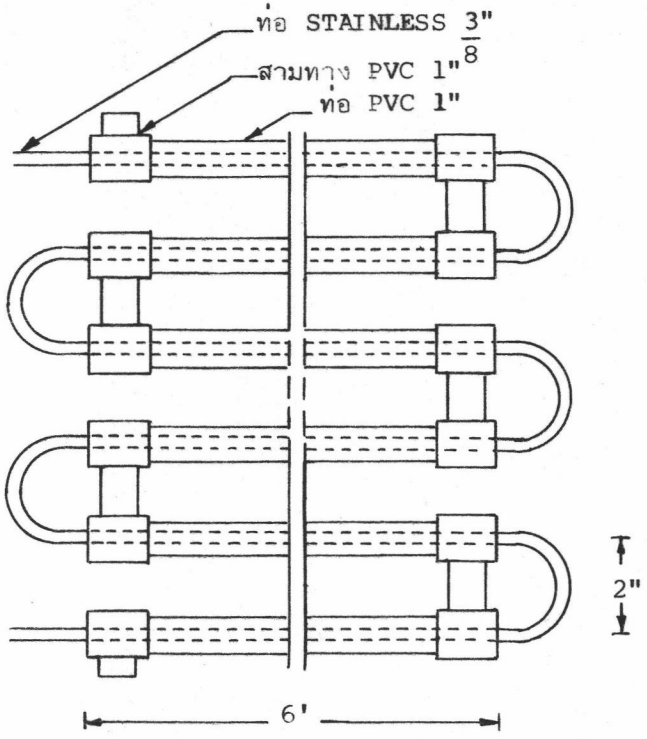
รูปที่ 8 แสดงการต่อชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องมือ
และตำแหน่งการวัดคุณสมบัติต่าง ๆ

รูปที่ 9 เครื่องผลิต



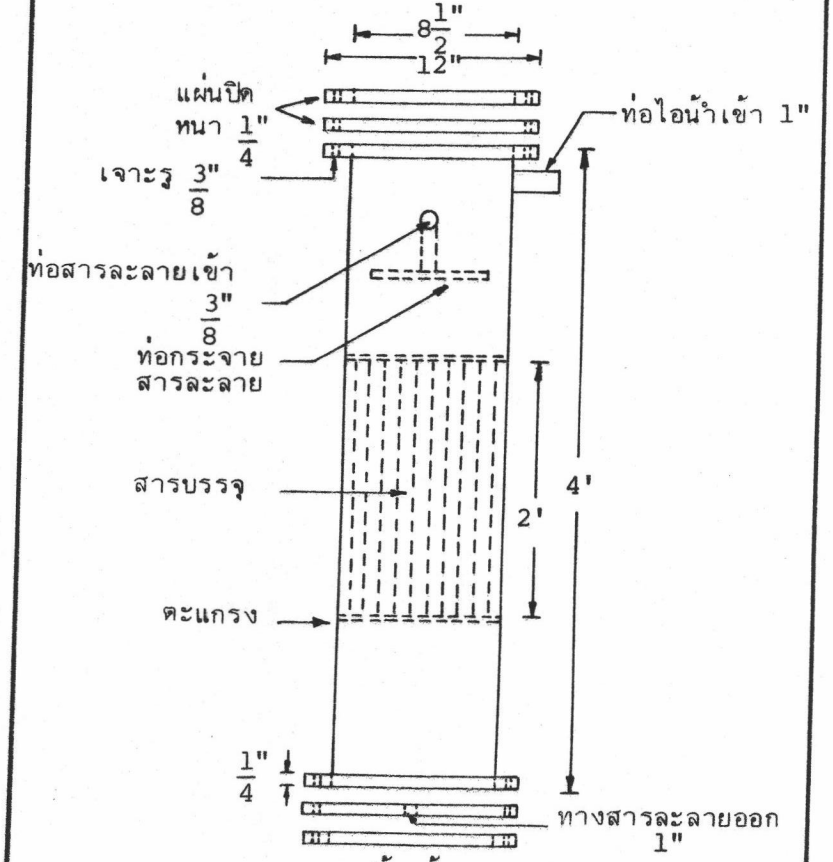


รูปที่ 10 ก. เครื่องควบแน่น



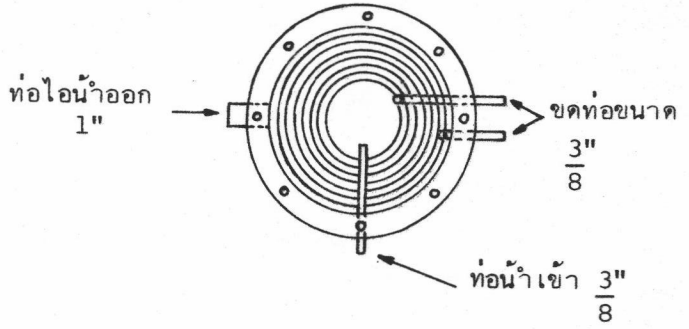
รูปที่ 10 ข. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
แบบท่อซ้อน

รูปที่ 11 ก. เครื่องดูดกลืน

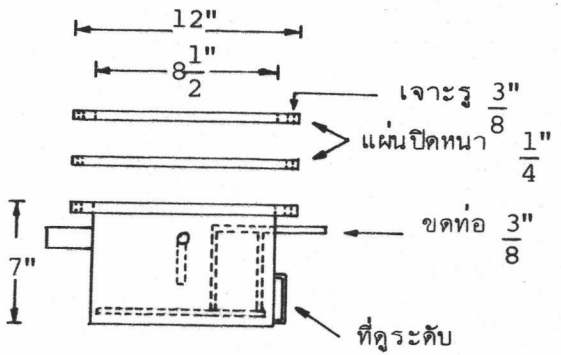


รูปด้านข้าง

รูปที่ 11 ข. เครื่องระเหย

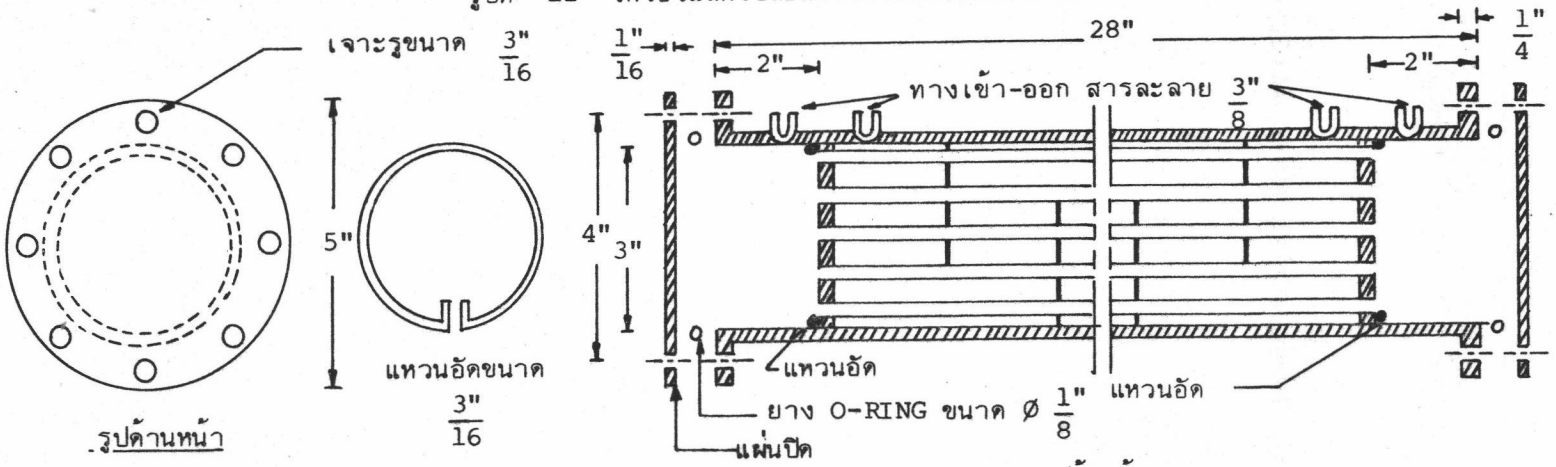


รูปด้านบน



รูปด้านข้าง

รูปที่ 12 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบถังและท่อ



แสดงภาคตัดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบถังและท่อ