

การจำลองระบบทำน้ำเย็นแบบดูดซึมโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท

MODELING OF ABSORPTION COOLER BY POTASSIUM ACETATE
SOLUTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-220-046

การจำลองระบบทำน้ำเย็นแบบดูดซึมโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท

MODELING OF ABSORPTION COOLER BY POTASSIUM ACETATE
SOLUTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-220-046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODELING OF ABSORPTION COOLER BY POTASSIUM ACETATE
SOLUTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

KMITL-2018-EN-M-220-046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

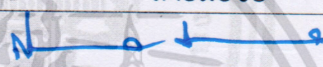
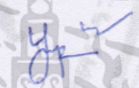

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองระบบทำน้ำเย็นแบบดูดซึมโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท
 Thesis Title Modeling of Absorption Cooler by Potassium Acetate Solution
 นักศึกษา นายธีรพันธ์ ตั้งกิตติมงคล
 รหัสประจำตัว 58601114
 ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา
 หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-220-046

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สมหมาย	ผิวสอาด	
ผศ.ดร.ญาณิพร	พัชรพรโชติ	
ผศ.ดร.วัลย์รัตน์	จันทร์อัมพร	วลัยรัตน์ จันทร์อัมพร
ผศ.ดร.พรสวรรค์	อัสวแสงรัตน์	ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์
รศ.ดร.ประกอบ	กิจไชยา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 10.00-12.00 น.
 สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-303 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองระบบทำน้ำเย็นแบบดูดซึมโดยใช้สารละลาย โพแทสเซียมอะซิเตท
นักศึกษา	นายธีรพันธ์ ตั้งกิตติศักดิ์
รหัสประจำตัว	58601114
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันปัญหาทางด้านพลังงานยังคงเป็นปัญหาหลัก ที่ยังไม่มีวิธีที่จะจัดการได้อย่างสมบูรณ์แบบ ในงานวิจัยนี้จึงนำระบบทำความเย็นแบบดูดซึม ซึ่งเป็นทางออกหนึ่งสำหรับการแก้ไขปัญหาดังกล่าวมาศึกษา เพราะระบบนี้สามารถลดการใช้พลังงานเมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอื่น และสามารถนำพลังงานเหลือทิ้งมาเป็นแหล่งพลังงานแก่ระบบได้ รวมถึงการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์เข้ามาทำงานควบคู่กับระบบทำความเย็นนี้ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้เกลือโพแทสเซียมอะซิเตทเป็นสารดูดซึม ซึ่งใช้แหล่งพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิในช่วง 70 – 75 องศาเซลเซียส ก็สามารถคืนสภาพสารละลายให้กลับมาเข้มข้นได้ งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองระบบทำความเย็น ที่ใช้เกลือโพแทสเซียมอะซิเตทเป็นสารดูดซึม เพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องต้นแบบ โดยแบบจำลองนี้จะจำลองตุลมวลและพลังงานของระบบควบคู่กันกับการจำลองการไหลแบบฟิล์มตกในแต่ละห้องภายในของเหลวภายใน (ห้องระเหย ห้องดูดซึม ห้องให้ความร้อน และห้องควบแน่น) ซึ่งจะทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ผลจากการจำลองนั้นจะขึ้นกับภาวะดำเนินงานที่ระบบใช้ ได้แก่ ความดันภายในระบบ อัตราการไหล อุณหภูมิที่ทางเข้าของของเหลวภายในและภายนอก (น้ำเย็น น้ำหล่อเย็น และน้ำร้อน) และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท โดยได้จำลองระบบทำความเย็นที่มีค่าความจุความร้อนประมาณ 1 กิโลวัตต์ และใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส จากการจำลองผลระบบสามารถผลิตน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิลดลงได้ 4.35 องศาเซลเซียสจากทางเข้า และใช้พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลวภายในและภายนอกในห้องระเหย ห้องดูดซึม ห้องให้ความร้อน และห้องควบแน่น เป็น 0.054 0.162 0.162 และ 0.054 ตารางเมตร ตามลำดับ และได้นำพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนนี้มาออกแบบเครื่องต้นแบบ

Thesis	Modeling of Absorption Cooler by Potassium Acetate Solution
Student	Mr.Teerapun Tangkittimasak
Student ID.	58601114
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Prakob Kitchaiya

ABSTRACT

At present, energy crisis is still the main global problem. One of the solutions is absorption chiller that reduces energy in operation more than other types of refrigerator and can use waste energy to operate. It can couple with solar engine in order to save energy. In this study, we choose potassium acetate salt as absorbent and the heat source at temperature range of 70 – 75 °C to regenerate the salt solution. The simulation code has been developed to design a prototype of absorption cooler with potassium acetate. Simulation model includes mass and heat balances and falling film flow of liquids on the main 4 components, namely evaporator, absorber, generator, and condenser. Results of simulation depend on conditions of operation such as pressure, mass flow rate, temperature at inlet of internal and external cycles (hot water, cooling water, and chilled water), and mass fraction of potassium acetate solution. Absorption cooler with a 1 kW nominal cooling capacity and heat source at temperature 75 °C has been simulated. It can produce cooler water at temperature 4.35 °C below the inlet one. Heat exchanger area between internal and external cycle of evaporator, absorber, generator, and condenser were determined 0.054, 0.162, 0.162, and 0.054 m², respectively. The calculation results are used to design the prototype.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านวิชาการ ให้คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาต่างๆตลอดจนการดูแลเอาใจใส่และให้การสนับสนุนในทุกด้าน จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณสมศักดิ์ วีระพันธุ์ ประธานกรรมการบริหารบริษัท เรโน เทคโนโลยี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสร้างเครื่องทำน้ำเย็นชนิดดูดซึม และอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสะอาด ผศ.ดร.อภิรักษ์ นิ่มคนิสรณ์ ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ ผศ.ดร.วัลย์รัตน์ จันทระอมพร ผศ.ดร. ญาณิพร พัชรโรชิตี คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะและการปรับปรุงการทำงาน ทำให้ปริญญาฉบับนี้มีความสมบูรณ์ถูกต้องมากขึ้น

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำด้านอุปกรณ์และช่วยเหลือกิจกรรมด้านเอกสารเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอพระขอบคุณทุกท่าน ที่มีได้กล่าวนามในที่นี้ซึ่งมีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งขอพระขอบคุณครอบครัวที่ให้โอกาสทางการศึกษาและสนับสนุนในทุกด้านตลอดจนเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ จนประสบความสำเร็จทางการศึกษา และข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ผู้ที่สนใจที่จะศึกษาเป็นอย่างดี

ธีรพันธ์ ตั้งกิตติมศักดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
สัญลักษณ์.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ระบบทำความเย็นชนิดดูดซึม.....	4
2.2 การไหลแบบฟิล์มตกในแนวตั้ง.....	5
2.2.1 การไหลแบบราบเรียบ.....	6
2.2.2 การไหลแบบราบเรียบที่มีคลื่น.....	7
2.2.3 การไหลแบบปั่นป่วน.....	7
2.3 สารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท.....	8
2.4 สมการที่ใช้ในการจำลอง.....	11
2.4.1 แบบจำลองดุลมวลและดุลพลังงานของระบบทำน้ำเย็น.....	11
2.4.2 แบบจำลองการไหลแบบฟิล์มตก.....	12
2.5 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบปริยาย.....	16
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การจำลองระบบทำความเย็นชนิดดูดซึม	21
3.1 การหาขนาดของกริดที่ใช้ในการจำลองของการไหลแบบฟิล์มตกที่เหมาะสม.....	21
3.2 การเปรียบเทียบการจำลองกับผลการทดลอง.....	21
3.3 การศึกษาอิทธิพลของความดันไอของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทในห้องดูดซึม และห้องต้ม.....	22
บทที่ 4 ผลการจำลองระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมและวิเคราะห์ผลการจำลอง	24
4.1 ผลของขนาดของกริดที่เหมาะสม.....	24
4.2 การเปรียบเทียบการจำลองกับผลการทดลอง.....	25
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของความดันไอของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทในห้องดูด ซึมและห้องต้ม.....	25
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	30
5.1 สรุปผลการจำลองระบบทำความเย็นชนิดดูดซึม.....	30
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	31
เอกสารอ้างอิง.....	33
ภาคผนวก.....	35
ภาคผนวก ก.....	36
ภาคผนวก ข.....	37
ประวัติผู้เขียน.....	39

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ภาวะดำเนินงานที่ใช้ในการแบบจำลองกับผลการทดลอง.....	22
3.2 ภาวะดำเนินงานที่ใช้ในการจำลองระบบทำความเย็นแบบดูดซึม.....	23
4.1 ขนาดของกริดที่ส่งผลต่อปริมาณฟลักซ์ของไอน้ำและเวลาที่ใช้ในการจำลอง.....	24
4.2 ผลจากการจำลองระบบทำความเย็นแบบดูดซึม.....	26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VI อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบทำความเย็นแบบดูดซึมแบบชั้นเดียว.....	4
2.2 อุณหพลศาสตร์ของวัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึมแบบชั้นเดียว.....	5
2.3 ทิศทางการไหลของฟิล์มตกในแนวตั้ง.....	6
2.4 ลักษณะของคลื่นบนการไหลแบบฟิล์มตกที่ตัวเลขเรย์โนลด์ 1,600.....	8
2.5 ความดันไอของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ.....	9
2.6 ความหนาแน่นของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ.....	9
2.7 ความหนืดของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ.....	10
2.8 ความจุความร้อนจำเพาะของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ.....	10
2.9 แผนภาพแบบบล็อกของขั้นตอนการจำลองระบบทำความเย็น.....	12
2.10 รูปแบบการไหลของสารทำความเย็นและของไหลต่างๆ ในแต่ละห้อง.....	14
2.11 กริดของแบบจำลองการไหลแบบฟิล์มตก.....	15
2.12 แผนภาพการคำนวณโดยระเบียบวิธีแบบปริยาย.....	16
2.13 กริดของแบบจำลองการไหลแบบฟิล์มตกบางส่วน.....	18
2.14 แผนผังขั้นตอนการคำนวณและสมการที่ใช้ในการคำนวณ.....	19
2.15 ก. ภาพสามมิติของอุปกรณ์ภายในเครื่องทำความเย็น ข. เครื่องทำความเย็นชนิดดูดซึมตันแบบระดับไมโคร.....	19
3.1 ลักษณะของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างชั้นฟิล์มและของเหลวภายนอกระบบ.....	23
4.1 การเปรียบเทียบการจำลองกับผลการทดลอง.....	25
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในห้องระเหยและอุณหภูมิน้ำเย็นที่ผลิตได้และอัตราส่วนพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในห้องดูดซึมต่อห้องระเหย.....	26
4.4 อุณหภูมิของน้ำและน้ำเย็นในห้องระเหยตลอดความสูงของท่อ.....	27
4.5 อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นในห้องดูดซึมตลอดความสูงของท่อ.....	28
4.6 อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิของน้ำร้อนในห้องต้มตลอดความสูงของท่อ.....	29
5.1 ภาพร่างสามมิติของห้องระเหยและห้องดูดซึม.....	31
5.2 เครื่องทำความเย็นชนิดดูดซึม.....	31

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำจำกัดความ (หน่วย)
A	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
D	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร (m^2/s)
d_{pipe}	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่า $9.81 (m/s^2)$
h_{fg}	ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (J/kg)
k	ค่าสภาพการนำความร้อน ($W/(m \cdot K)$)
L	ความยาวของท่อ (m)
M_{refrig}	อัตราการการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น (kg/s)
m^*_{refrig}	ฟลักซ์ของสารทำความเย็น ($kg/(m^2 \cdot s)$)
\dot{m}_{refrig}	อัตราการการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น (kg/s)
\dot{m}_s	อัตราการการไหลเชิงมวลของสารละลายเข้มข้น (kg/s)
\dot{m}_w	อัตราการการไหลเชิงมวลของสารละลายเจือจาง (kg/s)
P	ความดันในห้อง (Pa)
\dot{Q}	อัตราการถ่ายเทพลังงาน (J/s)
\dot{Q}_w	อัตราการถ่ายเทพลังงานผ่านผนังท่อ (J/s)
\dot{q}	ฟลักซ์ของการถ่ายเทพลังงาน ($J/(m^2 \cdot s)$)
R	รัศมีของท่อ (m)
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์
T	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	คำจำกัดความ (หน่วย)
T_{surf}	อุณหภูมิที่ผิวของชั้นฟิล์ม ($^{\circ}\text{C}$)
u	ความเร็วในแนวแกน x
u_{av}	ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน x
u_{max}	ความเร็วสูงสุดในแนวแกน x
v	ความเร็วในแนวแกน y
X_S	อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมอะซิเตทในสารละลายเกลือเข้มข้น
X_W	อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมอะซิเตทในสารละลายเกลือเจือจาง
Γ	อัตราการไหลเชิงมวลของฟิล์มต่อความกว้าง ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)
r	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (m^2/s)
u	ความหนาชั้นฟิล์มตก (m)
u_0	ความหนาชั้นฟิล์มตกเฉลี่ย (m)
u_w	ความหนาของผนังท่อ (m)
w	ส่วนเบี่ยงเบนของชั้นฟิล์ม เนื่องมาจากการเกิดคลื่น (m)
\sim	ความหนืด ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)
ϵ	ความหนืดไคเนมาติก (m^2/s)
\dots	ความหนาแน่น (kg/m^3)
S	อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมอะซิเตทในสารละลาย
\dot{S}_{surf}	อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมอะซิเตทในสารละลายที่ผิวของชั้นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IX อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันปัญหาจากความต้องการใช้พลังงานและการปล่อยแก๊สเรือนกระจกเป็นปัญหาที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยและพัฒนานวัตกรรมใหม่ๆ ขึ้นมาเพื่อใช้แก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานและการลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก [1] โดยมุ่งเน้นให้สามารถนำมาปรับใช้ได้ทั้งในส่วนของภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือน สำหรับภาคอุตสาหกรรมนั้นจะมีความต้องการใช้พลังงานในหลากหลายด้าน ทั้งในส่วนของกระบวนการปรับอุณหภูมิ การลำเลียง และในด้านอื่นๆ อีกมากมาย แต่การใช้พลังงานในภาคครัวเรือนนั้น โดยส่วนมากจะใช้พลังงานในการปรับอากาศภายในอาคารบ้านเรือน และในช่วงฤดูร้อนจะยังมีการใช้พลังงานสูงขึ้นเป็นอย่างมากเนื่องจากการใช้เครื่องปรับอากาศเกือบตลอดทั้งวัน

อุปกรณ์ภายในเครื่องปรับอากาศที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดคือคอมเพรสเซอร์ ทำหน้าที่ในการเพิ่มความดันให้แก่สารทำความเย็นในระบบ ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบทำความเย็นที่ไม่มีใช้คอมเพรสเซอร์ นั่นคือระบบทำความเย็นแบบดูดซึม (Absorption chiller) โดยแทนที่การใช้คอมเพรสเซอร์ด้วยการใช้ระบบดูดซึมสารทำความเย็นด้วยสารละลายเกลือ ทำให้ลดอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานเหลือเพียงแค่ปั๊มที่ใช้ในการส่งสารละลายภายในระบบ ดังนั้นระบบนี้จะใช้พลังงานน้อยกว่าระบบที่ใช้คอมเพรสเซอร์เป็นอย่างมาก แต่ระบบนี้เหมาะสมสำหรับภาคอุตสาหกรรมที่มีแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง (Waste heat) เพราะระบบนี้จำเป็นต้องใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งนำมาใช้ในการคืนสภาพสารละลายเกลือในระบบ อุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ใช้นั้นจะขึ้นกับชนิดของสารละลายเกลือในระบบ สารละลายเกลือที่นิยมนำมาใช้เป็นสารดูดซึม คือ สารละลายลิเทียมโบรไมด์ [2] สามารถทำน้ำเย็นได้อุณหภูมิต่ำประมาณ 5 -7 องศาเซลเซียส แต่ต้องใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิมากกว่า 120 องศาเซลเซียส ในการใช้คืนสภาพสารละลายเกลือให้กลับมามีความเข้มข้นเท่าเดิม

ระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมที่มีการศึกษาจะมีค่าความจุความเย็นตั้งแต่ 15 ถึง 20 กิโลวัตต์จนถึง 10 เมกะวัตต์ ซึ่งขนาดในช่วง 3 ถึง 10 กิโลวัตต์ มีผู้ศึกษาเพียงเล็กน้อย Giuseppe Franchini และคณะ [2] ได้พัฒนาแบบจำลองระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมระดับไมโครที่มีค่าความจุความเย็นประมาณ 5 กิโลวัตต์ โดยใช้ลิเทียมโบรไมด์เป็นสารดูดซึม และนำผลที่ได้จากการจำลองมาออกแบบระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมต้นแบบ โดยออกแบบให้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อหมุนวนซ้อนกัน

สำหรับในภาคครัวเรือนที่ไม่ต้องการน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำมาก และแหล่งความร้อนที่ใช้ในการคืนสภาพสารละลายต้องมาจากแหล่งที่สามารถหาได้ไม่ยากในภาคครัวเรือน จากงานวิจัยของ Apelblat และคณะ [3] ที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าของสารละลายอิมิตัวของโซเดียมอะซิเตท (CH_3COONa) โพแทสเซียมอะซิเตท (CH_3COOK) โซเดียมเปอร์คลอเรท (NaClO_4) และโพแทสเซียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิสาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้เนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์คลอเรต ($KClO_4$) ในช่วงอุณหภูมิ 278 – 318 เคลวิน และ Greenspan [4] ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวกับความดันไอของสารละลายเกลือที่สามารถดูดความชื้นและรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ของสารทั้งหมด 28 ชนิด เช่น สารละลายลิเทียมโบรไมด์ สารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น ผู้วิจัยพบว่า สารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท มีค่าความดันไอและการกักตร้อนต่ำในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานเป็นสารดูดซึม ซึ่งน่าจะเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นสารดูดซึมในระบบที่ใช้ในภาคครัวเรือน เพื่อทำน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 18 – 20 องศาเซลเซียส และใช้น้ำร้อนอุณหภูมิเพียงประมาณ 70 - 80 องศาเซลเซียสในการคืนสภาพสารละลาย ที่ช่วงแหล่งความร้อนนี้สามารถประยุกต์การใช้งานร่วมกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ได้ [5]

ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงมีความสนใจที่จะพัฒนาแบบจำลองระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมที่ใช้สารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทเป็นสารดูดซึม และนำผลที่ได้จากการจำลองมาออกแบบและสร้างระบบทำความเย็นต้นแบบ เพื่อนำมาทดสอบและพัฒนาแบบจำลองให้มีความแม่นยำและประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยชิ้นนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมที่ใช้สารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทเป็นสารดูดซึม ให้มีความเที่ยงตรงและแม่นยำ และนำผลที่ได้จากการจำลองมาออกแบบเครื่องต้นแบบ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทสามารถใช้เป็นสารดูดซึมในระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมได้ และผลิตน้ำเย็นได้ที่อุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียส โดยใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิไม่สูงมากในการคืนสภาพสารละลายภายในระบบ

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1.4.1) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำเย็นชนิดดูดซึม โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลอง
- 1.4.2) ตรวจสอบผลการจำลองการดูดซึมกับผลการทดลองของงานวิจัยที่อ้างอิง
- 1.4.3) ศึกษาอิทธิพลของความดันไอของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทในห้องดูดซึมและห้องต้ม
- 1.4.4) ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายในชั้นฟิล์มภายในห้องต่างๆ ที่ได้จากการจำลองผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.5) ออกแบบระบบทำน้ำเย็นชนิดดูดซึม โดยใช้ผลที่ได้จากการจำลองผลมาออกแบบระบบ

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1) ศึกษาแบบจำลองระบบทำน้ำเย็นจากงานวิจัย และศึกษาแบบจำลองการไหลแบบฟิล์มตกจากงานวิจัย นำมาสร้างแบบจำลองและทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดลอง

1.5.2) ใช้แบบจำลองศึกษาอิทธิพลของความดันไอของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท

1.5.3) นำผลที่ได้จากการจำลองมาออกแบบระบบทำความเย็นชนิดดูดซึม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

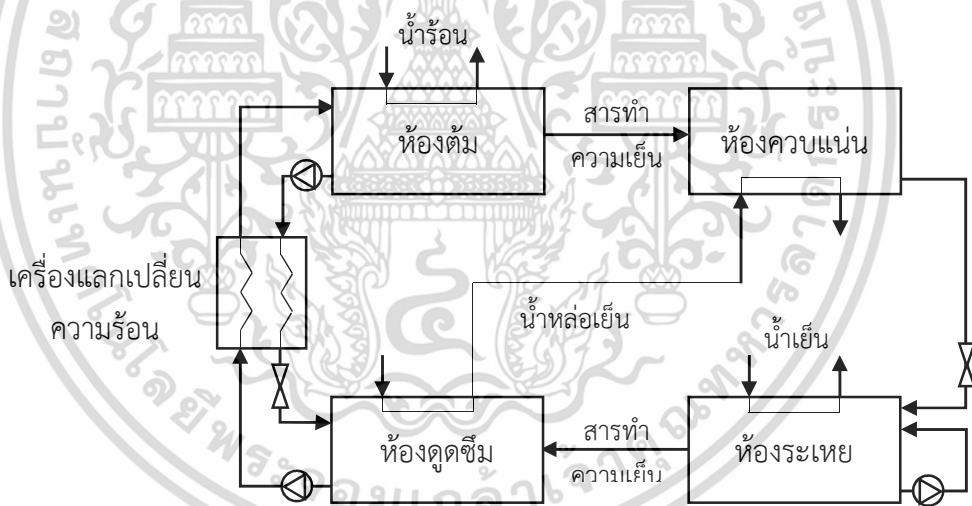
2.1 ระบบทำความเย็นชนิดดูดซึม

ระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมเป็นเทคโนโลยีที่เป็นที่รู้จักมานานและมีการพัฒนากันมาอย่างต่อเนื่อง เพราะเป็นระบบที่ประหยัดพลังงานมากกว่าระบบทำความเย็นชนิดอื่น โดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนวัฏภาคและการดูดและคายสารทำความเย็นภายในห้องต่างๆ ภายในระบบ

ระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

- 1) ระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมแบบชั้นเดียว (Single effect)
- 2) ระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมแบบ 2 ชั้น (Double effect)
- 3) ระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมแบบ 3 ชั้น (Triple effect)

ในงานวิจัยชิ้นนี้จะศึกษาเฉพาะระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมแบบชั้นเดียวเท่านั้น



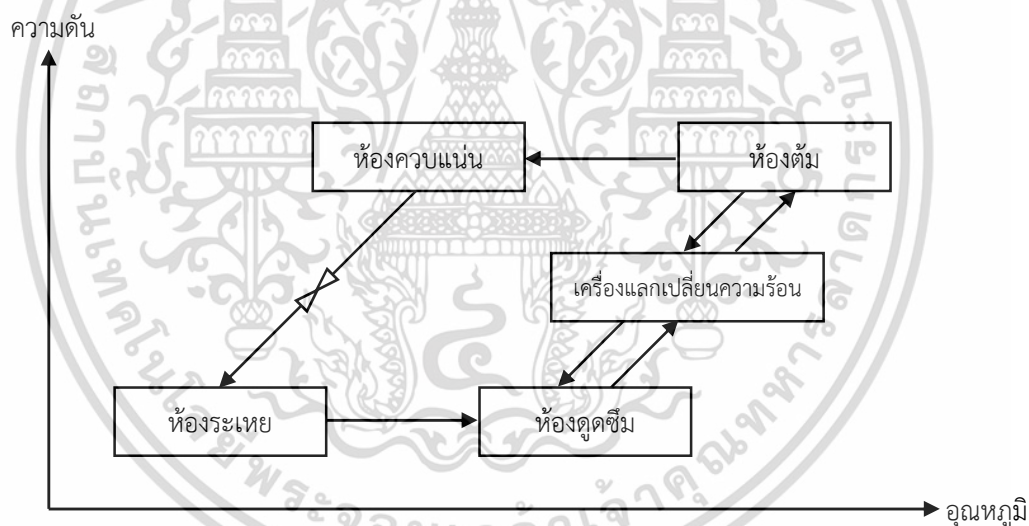
รูปที่ 2.1 ระบบทำความเย็นแบบดูดซึมแบบชั้นเดียว

ระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมแบบชั้นเดียว ประกอบด้วย 4 ห้องหลัก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และของเหลวภายนอกระบบ (น้ำร้อน น้ำหล่อเย็น และน้ำเย็น) แสดงดังรูปที่ 2.1 ภายในห้องหลักทั้ง 4 ห้อง จะมีอุณหภูมิและความดันของสารภายในห้องที่แตกต่างกัน เพื่อให้เกิดการระเหย การควบแน่น การดูดซึม และการคายซึมในระบบ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 โดยกลไกการทำงานของแต่ละห้องมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ห้องระเหย เป็นห้องที่ผลิตน้ำเย็น โดยอาศัยหลักการการระเหยของสารทำความเย็นที่ความดันสุญญากาศภายในห้อง สารทำความเย็นที่เปลี่ยนวัฏภาคจากของเหลวกลายเป็นไอจำเป็นต้องใช้พลังงานในการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งพลังงานนี้จะถูกดึงมาจากน้ำเย็นที่ไหลอยู่ภายในท่อภายในห้อง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (ลักษณะเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและน้ำเย็น) ดังนั้นน้ำเย็นที่ออกจากห้องจะมีอุณหภูมิที่ลดลง
- 2) ห้องดูดซึม ทำหน้าที่ดูดซึมสารทำความเย็นในวัฏภาคแก๊สที่ออกมาจากห้องระเหยด้วยสารละลายเกลือเข้มข้น สารละลายเกลือที่ดูดซึมสารทำความเย็นแล้วจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากเกิดพลังงานความร้อนจากการละลายและพลังงานความร้อนจากการควบแน่นสารทำความเย็น ดังนั้นในห้องจำเป็นต้องมีน้ำหล่อเย็นให้แก่สารละลายเกลือ เพื่อลดอุณหภูมิของสารละลายในขณะที่ทำการดูดซึม เพราะอุณหภูมิของสารละลายที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ดูดซึมสารทำความเย็นได้น้อยลง
 - 3) ห้องต้ม สารละลายเกลือที่ดูดซึมสารทำความเย็นแล้วจะถูกส่งมาคืนสภาพสารละลายให้มีความเข้มข้นสูงขึ้นภายในห้องนี้ ด้วยการให้ความร้อนแก่สารละลายเกลือ สารละลายเกลือที่มีอุณหภูมิสูงและอยู่ภายใต้ความดันสุญญากาศ (ความดันสูงกว่าภายในห้องระเหยและห้องดูดซึม) จะคายสารทำความเย็นที่ดูดซึมมาจากห้องดูดซึมออกมา และสารละลายเกลือเข้มข้นนี้จะถูกส่งกลับไปยังห้องดูดซึมเพื่อทำการดูดซึมสารทำความเย็นอีกครั้ง
 - 4) ห้องควบแน่น ทำหน้าที่ควบแน่นสารทำความเย็นในวัฏภาคแก๊สที่ออกมาจากห้องต้ม ด้วยน้ำหล่อเย็นที่ไหลอยู่ภายในท่อ สารทำความเย็นที่ถูกควบแน่นแล้วจะถูกส่งกลับไปยังห้องระเหยอีกครั้ง กลายเป็นวัฏจักรอย่างต่อเนื่อง



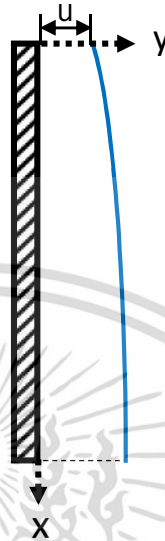
รูปที่ 2.2 อุณหพลศาสตร์ของวัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึมแบบขั้นเดียว

2.2 การไหลแบบฟิล์มตกในแนวตั้ง [6]

การไหลแบบฟิล์มตกในแนวตั้ง มีลักษณะการไหลของของเหลวบนผิวท่อด้านในหรือด้านนอก โดยของเหลวจะไหลเริ่มไหลจากด้านบนลงมาตามแนวท่อด้วยแรงดึงดูดของโลก ในการพิจารณาจะตั้งสมมติฐานว่าในแนวสัมผัส (Tangential) ของเหลวมีการไหลเท่ากันทุกด้านของท่อ เนื่องจากความยาวท่อและเส้นรอบวงกลมมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความหนาของชั้นฟิล์ม เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ดังนั้นจะคำนวณบนระบบพิกัดคาร์ทีเซียน 2 มิติ โดยกำหนดให้แนวความยาวของท่อเป็นแกน x แนวความหนาของชั้นฟิล์มเป็นแกน y และพิจารณาให้คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามในชื่อหรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ความหนาแน่น ความหนืด ค่าการนำไฟฟ้า และอื่นๆ) คงที่ สำหรับอัตราการไหลต่ำจะพิจารณาได้ว่าแรงหนืด (Viscous force) จะต้านการเร่งของของเหลวที่ไหลลงมาตามผนังท่อและไม่มีการไหลของของเหลวที่ผนังท่อ



รูปที่ 2.3 ทิศทางการไหลของฟิล์มตกในแนวตั้ง

คุณสมบัติของชั้นฟิล์มของของเหลวจะขึ้นกับตัวเลขเรย์โนลด์ ตัวเลขเวบบอร์ ตัวเลขฟอร์ด ทิศทางของแรงหนืด และลักษณะทางเรขาคณิตของการไหล

$$Re = \frac{4\Gamma}{\nu} \quad (2.1)$$

พฤติกรรมของการไหลจะขึ้นกับตัวเลขเรย์โนลด์ แสดงในสมการที่ 2.1 โดยสามารถจำแนกพฤติกรรมของการไหลออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ การไหลแบบราบเรียบที่มีคลื่น และการไหลแบบปั่นป่วน

2.2.1 การไหลแบบราบเรียบ

Nusselt [7] ได้อธิบายการไหลของฟิล์มตกแบบราบเรียบบนผนังกำแพง โดยรูปแบบความเร็ว ความเร็วเฉลี่ย อัตราส่วนความเร็วที่ผิวฟิล์มต่อความเร็วเฉลี่ย และความหนาของชั้นฟิล์ม แสดงด้วยสมการต่อไปนี้

$$u(y) = \frac{\dots g u^2}{2 \dots} \left[2 \left(\frac{y}{u} \right) - \left(\frac{y}{u} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

$$u_{av} = \frac{\dots g u^2}{3 \dots} = 0.08667 Re^{2/3} \quad (2.3)$$

$$\frac{u_{max}}{u_{av}} = 1.5 \quad (2.4)$$

$$u = 0.91 (\epsilon^2 / g)^{1/3} Re^{1/3} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสำหรับการไหลแบบราบเรียบบนด้านนอกผนังท่อ Jackson [8] ได้พิสูจน์สมการรูปแบบการไหลและอัตราส่วนความเร็วที่ผิวฟิล์มต่อความเร็วเฉลี่ย ดังนี้

$$u(r) = \frac{g}{4\epsilon}(R^2 - r^2) + \frac{g}{2\epsilon}(R + u)^2 \ln\left(\frac{r}{R}\right) \quad (2.6)$$

$$\frac{u_{\max}}{u_{\text{av}}} = 2 \left[\frac{R^2 - (R-u)^2 + 2(R-u)^2 \ln\left(\frac{R-u}{R}\right)}{R^2 - 3(R-u)^2 - \frac{4(R-u)^4}{R^2 - (R-u)^2} \ln\left(\frac{R-u}{R}\right)} \right] \quad (2.7)$$

Feind [9] ได้อธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของความโค้งของท่อ (Curvature effect) ต่อความหนาของชั้นฟิล์มด้วยสมการ

$$u_{\text{av}} = \frac{g}{3} \left[1 + \frac{u}{R} + \frac{3}{20} \left(\frac{u}{R}\right)^2 - \frac{1}{40} \left(\frac{u}{R}\right)^3 + \frac{1}{140} \left(\frac{u}{R}\right)^4 \dots \right] \quad (2.8)$$

ถ้าอัตราส่วนความหนาของฟิล์มตกรังสีท่อ (u/R) เป็น 0.1 ความหนาของฟิล์มตกรังสีท่อจะน้อยกว่าบนกำแพงประมาณร้อยละ 4 และที่อัตราส่วนความหนาของฟิล์มตกรังสีท่อเป็น 1 ความหนาของฟิล์มตกรังสีท่อจะน้อยกว่าบนกำแพงประมาณร้อยละ 22 ดังนั้นที่อัตราส่วนความหนาของฟิล์มตกรังสีมีค่าน้อยกว่า 0.1 ก็สามารถละอิทธิพลของความโค้งของท่อได้

2.2.2 การไหลแบบราบเรียบที่มีคลื่น

เมื่อความเร็วของฟิล์มตกรังสีเพิ่มขึ้นถึงจุดๆหนึ่ง จะส่งผลทำให้เกิดคลื่นขึ้นบนผิวของชั้นฟิล์ม โดยที่โครงสร้างของคลื่นบนผิวฟิล์มนี้จะเคลื่อนที่แบบอิสระ จำนวนของคลื่นที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของชั้นฟิล์มมากขึ้น โดยที่ตำแหน่งของการเกิดคลื่นจะเกิดอย่างสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

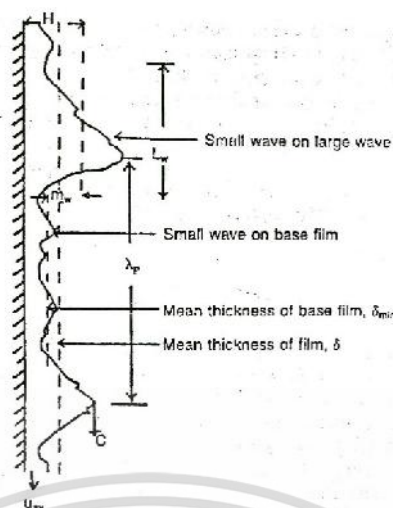
Kapitza [10] ได้ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นที่เกิดขึ้นบนฟิล์มบาง โดยที่ยังใช้สมการของการไหลแบบราบเรียบและมีสมมติฐานความหนาเฉลี่ยของชั้นฟิล์มเพิ่มเติมด้วยสมการที่ 2.9

$$u = u_0(1+w) \quad (2.9)$$

โดยที่ u_0 คือ ความหนาฟิล์มเฉลี่ย และ w คือ ส่วนเบี่ยงเบน คลื่นจะเริ่มปรากฏให้เห็นเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์ประมาณ 100 ขึ้นไป

2.2.3 การไหลแบบปั่นป่วน

เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์มตกรังสีมากกว่า 1,600 การไหลของฟิล์มตกรังสีจะพัฒนาจากการไหลแบบราบเรียบที่มีคลื่นมาเป็นการไหลแบบปั่นป่วน Chu และ Dukler [11, 12] ได้อธิบายลักษณะการไหลของฟิล์มตกรังสีแบบปั่นป่วนว่า โครงสร้างของคลื่นบนผิวฟิล์มจะเคลื่อนที่แบบอิสระและไม่มีรูปแบบที่แน่นอนเช่นเดียวกันกับการไหลแบบราบเรียบที่มีคลื่น และความหนาของคลื่นที่เกิดขึ้นจะมีขนาดไม่คงที่ มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ โดยพบคลื่นขนาดเล็กจะไหลซ้อนบนคลื่นขนาดใหญ่และบนฐานฟิล์มตกรังสี แสดงดังรูปที่ 2.4

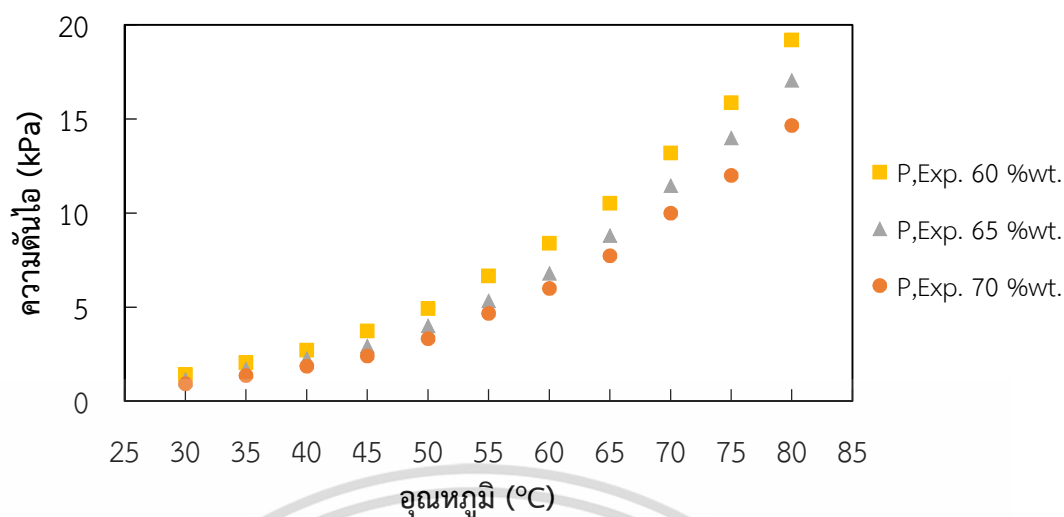


รูปที่ 2.4 ลักษณะของคลื่นบนการไหลแบบฟิล์มตกที่ตัวเลขเรย์โนลด์ 1,600 [11]

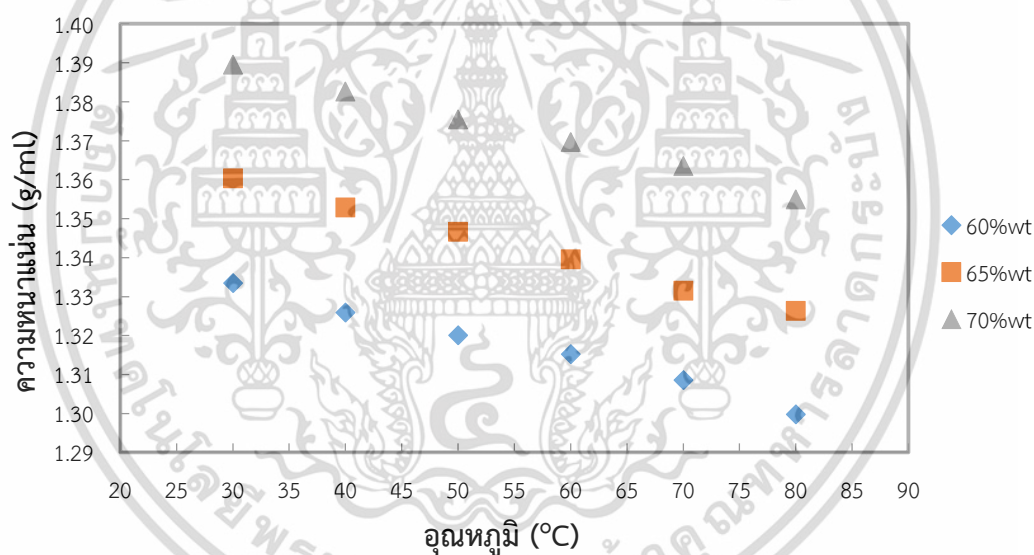
2.3 สารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท

โพแทสเซียมอะซิเตท (CH_3COOK) เป็นสารที่มีความสามารถในการดูดความชื้นได้ เช่นเดียวกับ ลิเทียมโบรไมด์ (LiBr) ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) หรือแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) โดยอาศัยกระบวนการดูดซึม คือ ใอน้ำที่อยู่ในวัฏภาคแก๊สจะละลายเข้าไปในสารละลายได้ โดยมีแรงขับเคลื่อน (Driving force) เป็นผลต่างของความดันไอของน้ำในวัฏภาคแก๊สกับสารละลาย ความดันไอของสารละลายเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความเข้มข้น ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นสูงและอุณหภูมิต่ำ จะส่งผลให้ความดันไอน้ำของสารละลายต่ำ ดังนั้นสารละลายสามารถดูดซึมน้ำจากวัฏภาคแก๊สได้มากขึ้น

นอกจากความดันไอของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทแล้ว สมบัติทางกายภาพอื่นๆ เช่น ความหนาแน่น ความหนืด หรือความจุความร้อนจำเพาะ เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความเข้มข้น เช่นเดียวกัน โดยสมบัติทางกายภาพ (ความดันไอ ความหนาแน่น ความหนืด และความจุความร้อนจำเพาะ) ของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทได้มีผู้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ของสมบัติทางกายภาพที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท แสดงในรูปที่ 2.5 ถึง 2.8 ตามลำดับ [13-15]

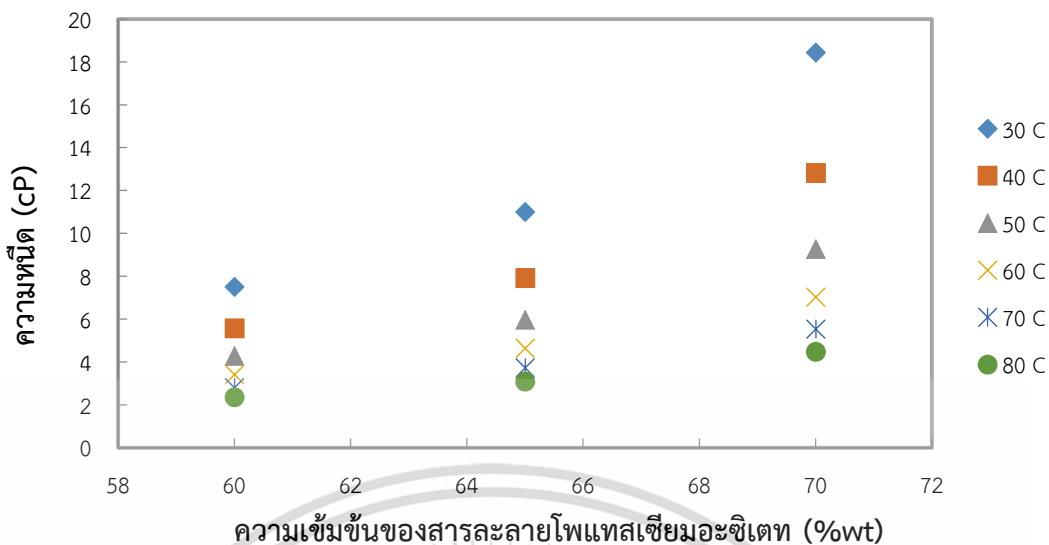


รูปที่ 2.5 ความดันไอของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ [13]

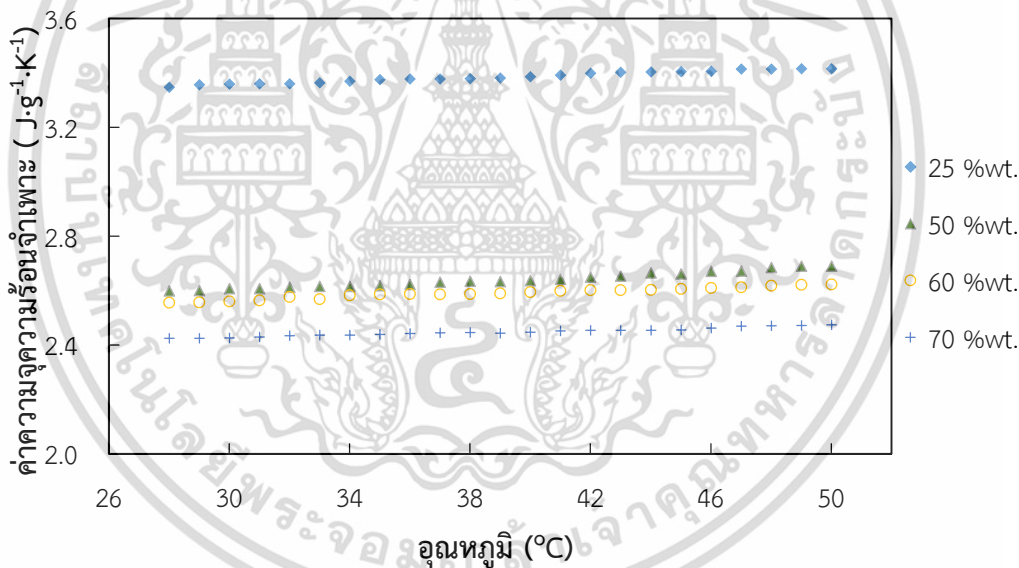


รูปที่ 2.6 ความหนาแน่นของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ความหนืดของสารละลายโพลีเอทิลีนไกลคอลที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ [14]



รูปที่ 2.8 ความจุความร้อนจำเพาะของสารละลายโพลีเอทิลีนไกลคอลที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สมการที่ใช้ในการจำลอง [2, 16-20]

สำหรับโปรแกรมจำลองผลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ควบคู่กัน

- 1) การจำลองคุณสมบัติและคุณลักษณะของระบบทำความเย็น ระหว่างห้องต่างๆ ภายในระบบ ได้แก่ ห้องต้ม ห้องดูดซึม ห้องระเหย ห้องควบแน่น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารละลายเข้มข้นและสารละลายเจือจาง
- 2) การจำลองการไหลแบบฟิล์มตกแนวตั้ง ภายในห้องต้ม ห้องดูดซึม และห้องระเหย

2.4.1 แบบจำลองคุณสมบัติและคุณลักษณะของระบบทำน้ำเย็น

การจำลองคุณสมบัติและคุณลักษณะของระบบทำน้ำเย็น แสดงด้วยแผนภาพแบบบล็อกในรูปที่ 2.9 โดยลำดับในการจำลองจะเริ่มจากการที่กำหนดขนาดความจุความเย็นเป็นค่าเป้าหมายที่ห้องระเหยต้องทำให้ได้ใกล้เคียงกับที่กำหนดไว้ ซึ่งปริมาณของไอน้ำที่ระเหยออกจากห้องระเหยจะต้องเท่ากับปริมาณไอน้ำที่ห้องดูดซึมทำการดูดซึมเข้าสู่สารละลาย และเท่ากับปริมาณไอน้ำที่ห้องต้มระเหยไอน้ำออกจากสารละลาย และเท่ากับปริมาณไอน้ำที่ควบแน่นภายในห้องควบแน่น ณ สภาวะคงตัวหนึ่ง

$$\dot{m}_{\text{refrig,EVA}} = \dot{m}_{\text{refrig,ABS}} = \dot{m}_{\text{refrig,GEN}} = \dot{m}_{\text{refrig,CON}} \quad (2.10)$$

ปริมาณความร้อนที่ใช้เข้าสู่ห้องระเหย ห้องต้มและเครื่องให้ความร้อนเบื้องต้น (Pre-heater) จากของเหลวภายนอก ระบบ จะต้องเท่ากับปริมาณความร้อนที่ออกมาจากห้องควบแน่นและห้องดูดซึมเข้าสู่ของเหลวภายนอก ระบบ

$$\dot{Q}_{\text{EVA}} + \dot{Q}_{\text{GEN}} = \dot{Q}_{\text{ABS}} + \dot{Q}_{\text{CON}} \quad (2.11)$$

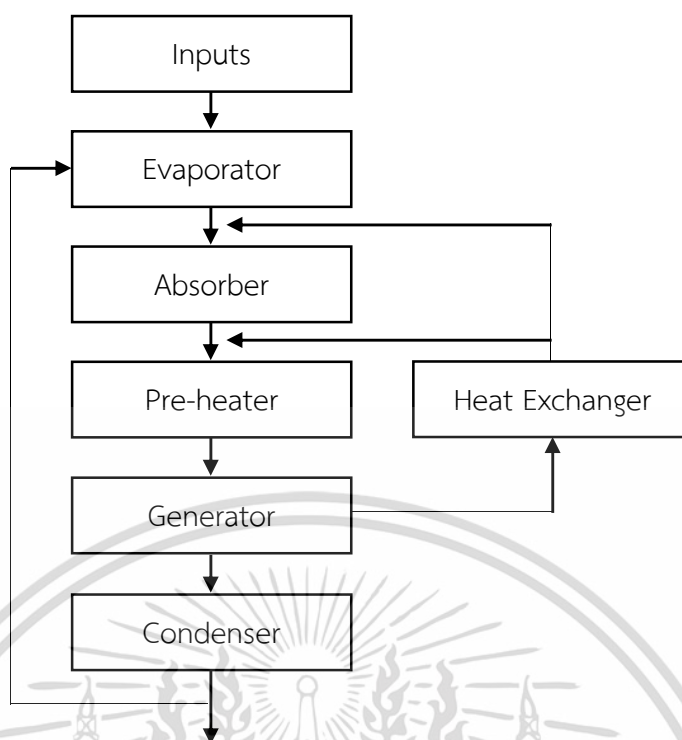
โดยที่อัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายเจือจางที่ออกจากห้องดูดซึม จะต้องเท่ากับอัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายเข้มข้นที่ออกจากห้องต้ม รวมกับปริมาณของไอน้ำที่ดูดซึมได้

$$\dot{m}_w = \dot{m}_s + \dot{m}_{\text{refrig}} \quad (2.12)$$

และอัตราการไหลเชิงมวลของโพแทสเซียมอะซิเตทในสารละลายมีปริมาณคงที่

$$X_w \dot{m}_w = X_s \dot{m}_s \quad (2.13)$$

โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง จะขึ้นกับความดันและอุณหภูมิของสารละลายภายในห้องดูดซึม และความเข้มข้นของสารละลายเข้มข้น จะขึ้นกับความดันและอุณหภูมิของสารละลายภายในห้องต้ม



รูปที่ 2.9 แผนภาพแบบบล็อกของขั้นตอนการจำลองระบบทำความเย็น

2.4.2 แบบจำลองการไหลแบบฟิล์มตก

สมมติฐานที่ใช้ในการจำลองผล

1. ความดันไอที่ผิวระหว่างวัฏภาคของเหลวและวัฏภาคไออยู่ในสมดุล
2. ไม่คำนวณการถ่ายเทความร้อนในวัฏภาคไอ เพราะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับในวัฏภาคของเหลว
3. การไหลของฟิล์มตกเป็นการไหลแบบราบเรียบและไม่เกิดคลื่น
4. ไม่มีแรงเฉือนที่ผิวเนื่องจากวัฏภาคไอกระทำต่อวัฏภาคของเหลว
5. ผลจากการแพร่ในทิศทางเดียวกันกับการไหลมีค่าน้อยมาก
6. คุณสมบัติทางกายภาพของสารเป็นค่าคงที่ตลอดการไหล โดยขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มข้นที่ทางเข้าในแต่ละห้อง
7. ไม่คำนวณผลกระทบเนื่องจากความโค้งของผิวท่อ เพราะรัศมีของท่อมีขนาดมากกว่าความหนาของฟิล์มตกมาก

การจำลองการไหลของฟิล์มตกในระบบ ภายใต้สมมติฐานตามที่กล่าวมา จะมีสมการต่างๆ ดังนี้

สมการโมเมนตัม (Momentum equation) และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) สำหรับฟิล์มตกเป็นดังนี้

$$\sim \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\dots g \quad (2.14)$$

$$y=0 : u=0 \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y=u \quad : \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (2.16)$$

สมการโมเมนตัมสามารถแก้สมการมาเป็นความเร็วในแนวแกน x

$$u = \frac{g\beta u^2}{2\nu} \left[2\left(\frac{y}{u}\right) - \left(\frac{y}{u}\right)^2 \right] \quad (2.17)$$

ความเร็วในแนวแกน y หาได้จากสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$v = -\frac{gy^2}{2\nu} \frac{du}{dx} \quad (2.18)$$

ความหนาของฟิล์มตกหาได้ดังนี้

$$u = \left(\frac{3\Gamma}{g\beta} \right)^{1/3} \quad (2.19)$$

จากสมมติฐานในข้างต้น สมการการถ่ายเทความร้อนและมวลสามารถละเทอมได้เป็นดังนี้

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.20)$$

$$u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} = D \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \quad (2.21)$$

โดยที่เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นของสมการถ่ายเทความร้อนและมวล แสดงได้ดังนี้

$$x = x_{in} \text{ and } y = 0 : T = T_{in} \text{ and } S = S_{in} \quad (2.22)$$

$$x \geq x_{in} \text{ and } y = 0 : T_w \text{ and } \frac{\partial S}{\partial y} = 0 \quad (2.23)$$

การถ่ายเทความร้อนระหว่างชั้นฟิล์มตกและของเหลวภายนอกระบบผ่านผนังท่อ ดังนั้นอุณหภูมิที่ผนังในชั้นฟิล์มตกจะหาได้จากสมการการนำความร้อน

$$\dot{Q}_w = -kA \frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_{y=0} \quad (2.24)$$

โดยที่ค่าสภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity, k) และความหนาของผนังท่อ (δ_w) จะใช้ข้อมูลของเหล็กสแตนเลส 304 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3/8 นิ้ว schedule 40

$$x \geq x_{in} \text{ and } y = u : T = T_{surf} \text{ , } S = S_{surf} \text{ , } P \text{ and } \frac{\partial S}{\partial y} = 0 \quad (2.25)$$

อุณหภูมิที่ผิวที่สัมผัสกับไอของชั้นฟิล์มหาจากเงื่อนไขของสมดุลของสารละลาย โดยที่อุณหภูมิที่ผิวที่สัมผัสกับไอจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายและความดันภายในระบบ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวของฟิล์มจากการดูดซึมหรือระเหยสารทำความเย็น สำหรับในท้องดูดซึมแสดงด้วยสมการที่ (2.26ก) ในห้องระเหยและห้องต้มแสดงด้วยสมการที่ (2.26ข)

$$x \geq x_{in} \text{ and } y = u : \dot{m}_{refrig}^* h_g = -k \frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_{y=u} \quad (2.26ก)$$

$$x \geq x_{in} \text{ and } y = u : \dot{m}_{refrig}^* h_g = k \frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_{y=u} \quad (2.26ข)$$

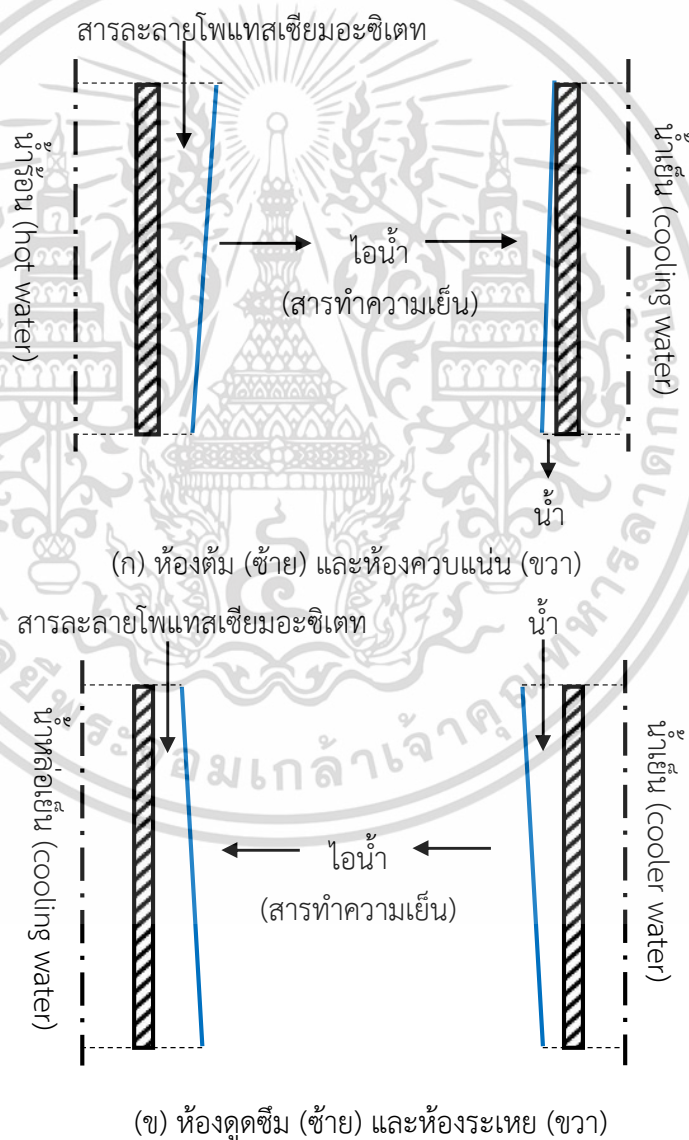
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลักซ์ของสารทำความเย็นที่เข้าหรือออกจากสารละลายที่ผิวของฟิล์มในแต่ละห้องนั้นแสดงในรูปที่ 2.10 สำหรับในห้องดูดซึมแสดงด้วยสมการที่ (2.27ก) ในห้องต้มแสดงด้วยสมการที่ (2.27ข) และสามารถหาอัตราการไหลของสารทำความเย็นทั้งหมดด้วยสมการที่ (2.28)

$$x \geq x_{in} \text{ and } y = u : m_{\text{refrig}}^* = -\frac{...D}{\check{S}_{\text{surf}}} \frac{\partial \check{S}}{\partial y} \Big|_{y=u} \quad (2.27\text{ก})$$

$$x \geq x_{in} \text{ and } y = u : m_{\text{refrig}}^* = \frac{...D}{\check{S}_{\text{surf}}} \frac{\partial \check{S}}{\partial y} \Big|_{y=u} \quad (2.27\text{ข})$$

$$M_{\text{refrig}} = (f d_{\text{pipe}}) \int_0^L m_{\text{refrig}}^* (x) dx \quad (2.28)$$



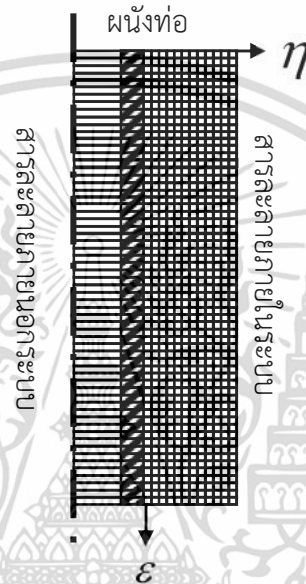
รูปที่ 2.10 รูปแบบการไหลของสารทำความเย็นและของไหลต่างๆ ในแต่ละห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการที่ชั้นฟิล์มมีการดูดซึมและระเหยของสารทำความเย็นเข้าสู่สารละลาย ส่งผลให้ความหนาของฟิล์มตกมีค่าไม่คงที่ และขนาดของกริดไม่คงที่ตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ โดยการทำให้กริดมีขนาดคงที่ ด้วยวิธีการเปลี่ยนตัวแปรสำหรับแกนเป็นตัวแปรไร้หน่วย แสดงในสมการที่ (2.29) – (2.30)

$$y = \frac{y}{u} \quad (2.29)$$

$$v = \frac{x}{L} \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.11 กริดของแบบจำลองการไหลแบบฟิล์มตก

ความเร็วในแนวแกน x และในแนวแกน y จัดอยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วยได้ดังนี้

$$u = \frac{...gu^2}{\sim} \left[y - \frac{1}{2}y^2 \right] \quad (2.31)$$

$$v = - \left(\frac{...g^2}{74 \sim 2\Gamma^2} \right)^{1/3} \left(\frac{u^2 y^2}{L} \right) \frac{d\Gamma}{dv} \quad (2.32)$$

สมการถ่ายเทความร้อนและมวล จัดอยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วยได้ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial v} = - \frac{vL}{uu} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{rL}{uu^2} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial \tilde{S}}{\partial v} = - \frac{vL}{uu} \frac{\partial \tilde{S}}{\partial y} + \frac{DL}{uu^2} \frac{\partial^2 \tilde{S}}{\partial y^2} \quad (2.34)$$

ขอบเขตเงื่อนไขของสมการถ่ายเทความร้อนและมวล ที่อยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วย

$$v = v_{in} \text{ and } 0 < y < 1 : T = T_{in} \text{ and } \tilde{S} = \tilde{S}_{in} \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v \geq v_{in} \text{ and } y = 0 : T = T_w \text{ and } \frac{\partial \tilde{S}}{\partial y} = 0 \quad (2.36)$$

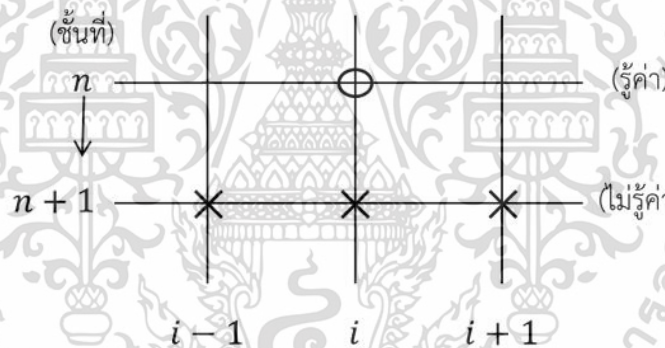
$$v \geq v_{in} \text{ and } y = 1 : T = T_{surf} (\tilde{S}_{surf}, P) \text{ and } \tilde{S} = \tilde{S}_{surf} \quad (2.37)$$

$$v \geq v_{in} \text{ and } y = 1 : \dot{q} = m_{refrig}^* h_{fg} = -\frac{k}{u} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.38)$$

$$\geq_{in} \text{ and } =1 : m_{refrig}^* = \left. \frac{D}{surf} \frac{\partial}{\partial} \right|_{=1} \quad (2.39)$$

2.5 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบปริยาย (Implicit method) [21-22]

ในการแก้ปัญหาสมการ (2.33) และ (2.34) ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์อันดับที่สองโดยระเบียบวิธีแบบปริยายมีความเหมาะสม เนื่องจากระเบียบวิธีแบบปริยายนั้นจะทำการประมาณค่าในตำแหน่งชั้นที่ $n+1$ ที่ยังไม่ทราบค่าจากตำแหน่งชั้นที่ทราบค่าแล้ว n หากเปรียบเทียบกับ การคำนวณของฟิล์มแล้วชั้นที่ $n=1$ จะเป็นชั้นที่ป้อนสารเข้ามาซึ่งเป็นชั้นที่เราทราบทั้งอุณหภูมิและความเข้มข้นของฟิล์มชั้นที่ $n+1$ คือชั้นถัดไปตามความยาวของท่อที่จุด x ต่างๆ ทำให้เราประมาณค่าในชั้นถัดๆไปได้



รูปที่ 2.12 แผนภาพการคำนวณโดยระเบียบวิธีแบบปริยาย

จากสมการ (2.33) อนุพันธ์อันดับหนึ่งในแนว \mathcal{E} จะใช้การประมาณผลต่างไปข้างหน้า (forward finite-divided-difference) และสำหรับอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งและสองในแนว η ใช้การประมาณผลต่างแบบตรงกลาง (central finite-divided-difference) แสดงไว้ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial v} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta v} \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{2\Delta y} \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{(\Delta y)^2} \quad (2.42)$$

ดังนั้นเมื่อนำสมการ (2.40) ถึง (2.42) แทนลงใน (2.33) จะได้

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta v} = -\frac{vL}{uu} \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{2\Delta y} + \frac{rL}{uu^2} \frac{T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{(\Delta y)^2} \quad (2.43)$$

กำหนดให้

$$a = \frac{vL}{2uu} \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad (2.44)$$

$$b = \frac{rL}{uu^2} \frac{\Delta v}{(\Delta y)^2} \quad (2.45)$$

สมการ (2.43) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$T_i^n = (-a-b)T_{i+1}^{n+1} + (1+2b)T_i^{n+1} + (a-b)T_{i-1}^{n+1} \quad (2.46)$$

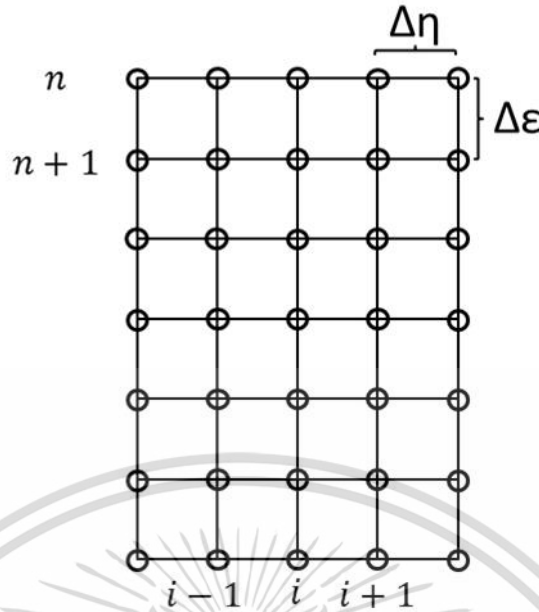
และจัดรูปในทำนองเดียวกันสมการ (2.34) จะจัดใหม่ได้

$$\check{S}_i^n = (-a-c)\check{S}_{i+1}^{n+1} + (1+2c)\check{S}_i^{n+1} + (a-c)\check{S}_{i-1}^{n+1} \quad (2.47)$$

เมื่อกำหนดให้

$$c = \frac{DL}{uu^2} \frac{\Delta v}{(\Delta y)^2} \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กริดของแบบจำลองการไหลแบบฟิล์มตกลบางส่วน

กริดของแบบจำลองการไหลแบบฟิล์มตกลบางจะมีลักษณะเป็นจุดต่อที่ห่างกันขนาด $\Delta\epsilon$ ตามแนวแกน ϵ เป็นจำนวน N ช่อง และตามแนวแกน η จะห่างกันเป็นขนาด $\Delta\eta$ เป็นจำนวน M ช่อง ดังรูปที่ 2.11 แสดงกริดทั้งหมดที่มีขนาด $N \times M$ ช่อง และรูปที่ 2.13 แสดงกริดบางส่วน

เมื่อแทนสมการที่ (2.46) ลงในจุดแต่ละจุดตลอดแนวแกน η จะได้ชุดสมการ (2.46) ตั้งแต่ $l = 1$ (ผนังท่อ) จนถึง $l = M$ (ผิวของชั้นฟิล์ม) หรือเขียนชุดสมการ (2.46) ในรูปแบบของเมตริกแบบสามแนวทแยง (tridiagonal system) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix}
 1+2b_1 & -a_1-b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 a_2-b_2 & 1+2b_2 & -a_2-b_2 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & a_3-b_3 & 1+2b_3 & -a_3-b_3 & 0 & 0 \\
 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\
 0 & 0 & 0 & a_{M-1}-b_{M-1} & 1+2b_{M-1} & -a_{M-1}-b_{M-1} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & a_M-b_M & 1+2b_M
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 T_1 \\
 T_2 \\
 T_3 \\
 \vdots \\
 T_{M-1} \\
 T_M
 \end{bmatrix}^{n+1}
 \quad (2.49)$$

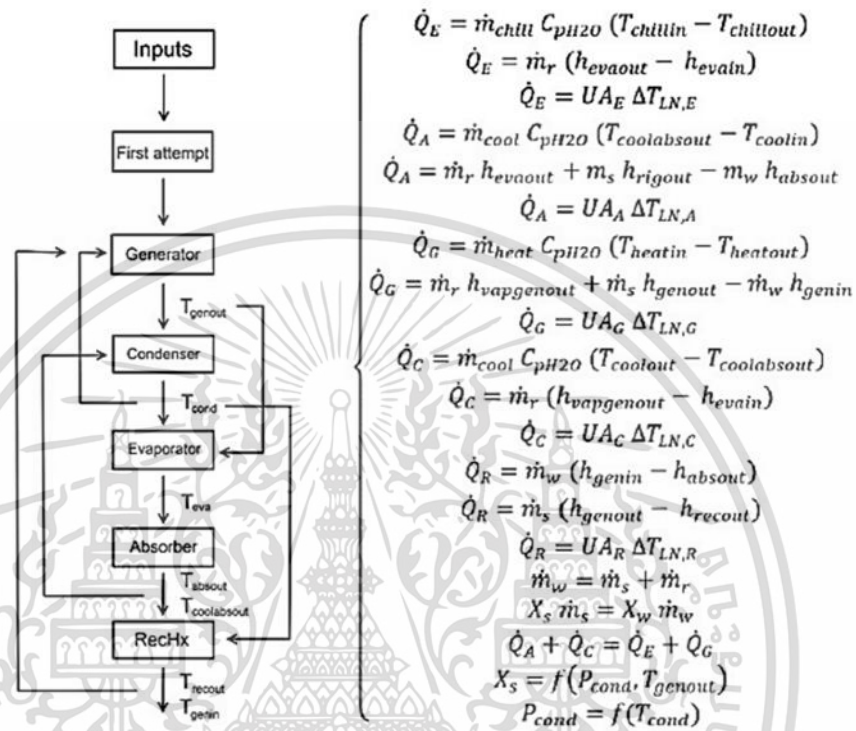
$$=
 \begin{bmatrix}
 T_1 - (a_1 - b_1)T_{\text{wall}} \\
 T_2 \\
 T_3 \\
 \vdots \\
 T_{M-1} \\
 T_M - (-a_M - b_M)T_{\text{surf}}
 \end{bmatrix}^n$$

สมการเมตริกที่ (2.49) เมตริกที่ตำแหน่ง n เป็นเมตริกที่รู้ค่า และเมตริก $n+1$ เป็นเมตริกที่ยังไม่ทราบค่า ดังนั้นสามารถแก้สมการได้ด้วยระเบียบวิธีแอลยู ดีคอมโพสิชัน (LU decomposition method) เพื่อหาค่าในเมตริกที่ $n+1$ นั่นคือค่าของอุณหภูมิตั้งแต่ผนังท่อจนถึงที่ผิวของฟิล์มที่ตำแหน่ง $n+1$

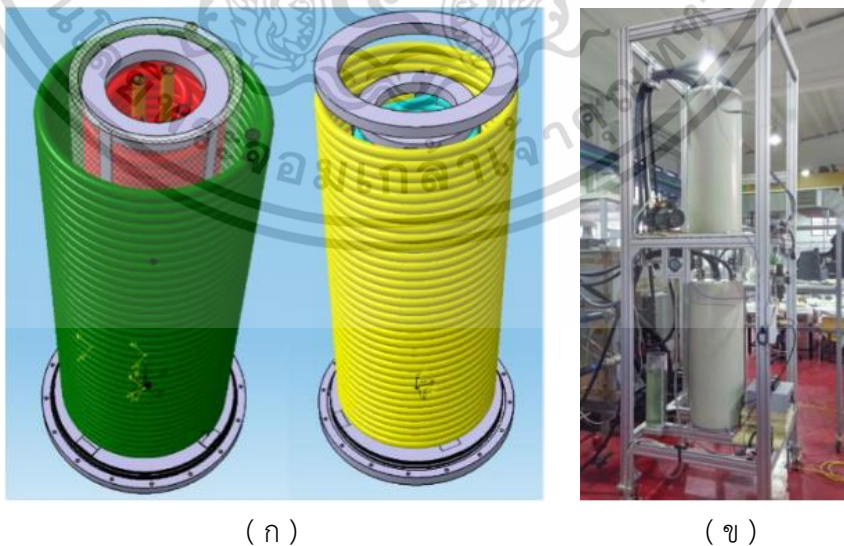
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Giuseppe Franchini และคณะ [2] ได้พัฒนาแบบจำลองระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมระดับไมโคร สมการและขั้นตอนที่ใช้ในการคำนวณแสดงในรูปที่ 2.14 โดยตั้งเป้าขนาดความจุความเย็นไว้ที่ 5 กิโลวัตต์ และนำผลจากการจำลองมาสร้างเครื่องต้นแบบโดยออกแบบเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดหมุนวนซ้อนกันแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 แผนผังขั้นตอนการคำนวณและสมการที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 2.15 ก. ภาพสามมิติของอุปกรณ์ภายในเครื่องทำความเย็น ข. เครื่องทำความเย็นชนิดดูดซึมต้นแบบระดับไมโคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องต้นแบบติดตั้งอยู่ที่ Energy System and Turbomachinery Laboratory ที่มหาวิทยาลัย Bergama จากการทดสอบเครื่องต้นแบบ พบว่าสามารถทำความเย็นได้ 3.25 กิโลวัตต์ และลดอุณหภูมิของน้ำเย็นที่ต้องการได้จาก 19.8 องศาเซลเซียส เหลือ 16.6 องศาเซลเซียส

Medrano และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาคัดขีมน้ำเข้าสู่สารละลายลิเทียมโบรไมด์ ซึ่งทำการไหลแบบฟิล์มตกภายในท่อแนวตั้ง โดยการไหลของฟิล์มตกเป็นแบบมีคลื่นบนผิวฟิล์ม ปัจจัยที่ได้ทำการศึกษา ได้แก่ ความดันในห้องดูดซึม อัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายลิเทียมโบรไมด์ ความเข้มข้นของสารละลายลิเทียมโบรไมด์ และอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น และผลของตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ฟลักซ์ของมวลไอน้ำที่ดูดซึม อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ทางออก และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทพลังงานในชั้นฟิล์ม จากการทดลอง พบว่า ฟลักซ์ของมวลไอน้ำที่ดูดซึมได้ภายใต้ภาวะดำเนินงานที่ทำการทดลองอยู่ในช่วง 0.001 – 0.0015 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที และยังสามารถเพิ่มฟลักซ์ของมวลไอน้ำที่ดูดซึมเพิ่มได้ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเกลือ แต่ไม่ควรเพิ่มจนเกิดการตกผลึกขึ้น

Shabram Karami และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาคัดขีมน้ำเข้าสู่ฟิล์มของสารละลายลิเทียมโบรไมด์ที่ไหลลงตามแนวตั้งของแผ่นโดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข และได้รายงานแบบจำลองของการถ่ายโอนมวลและความร้อนในกระบวนการดูดซึม ได้นำระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องแบบปริยายมาใช้ในการแก้สมการ แบบจำลองสามารถทำนายอุณหภูมิ ความเข้มข้น และคุณสมบัติของสารละลายได้ โดยที่ใช้การกระจายของอุณหภูมิที่ผนังเป็นเส้นตรง

Apelblat และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาค่าความดันไอของสารละลายอิมิตัวของโซเดียมอะซิเตท (CH_3COONa) โพแทสเซียมอะซิเตท (CH_3COOK) โซเดียมเปอร์คลอเรท (NaClO_4) และโพแทสเซียมเปอร์คลอเรท (KClO_4) ในช่วงอุณหภูมิ 278 – 318 เคลวิน และ Greenspan [4] ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวกับความดันไอของสารละลายเกลือที่สามารถดูดความชื้นและรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ของสารทั้งหมด 28 ชนิด เช่น สารละลายลิเทียมโบรไมด์ สารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

ทำให้ผู้วิจัยพบว่า สารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท มีค่าความดันไอและการกักความร้อนต่ำในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานเป็นสารดูดซึม ซึ่งน่าจะสามารถนำมาใช้เป็นสารดูดซึมในระบบ เพื่อทำน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 18 – 20 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสมต่อการใช้ในภาคครัวเรือน และใช้น้ำร้อนอุณหภูมิเพียงประมาณ 75 องศาเซลเซียสในการคืนสภาพสารละลาย

บทที่ 3

การจำลองระบบทำความเย็นชนิดดูดซึม

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการจำลองระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ

1. การหาขนาดของกริดที่ใช้ในการจำลองการไหลแบบฟิล์มตกที่เหมาะสม
2. การจำลองความถูกต้องของแบบจำลองการดูดซึมไอน้ำ โดยการจำลองด้วยแบบจำลองที่สร้างขึ้น และเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นสามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบได้
3. การศึกษาอิทธิพลของความดันไอของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทในห้องดูดซึมและห้องต้ม

การจำลองผลทั้งหมดจะใช้โปรแกรม MATLAB ในการเขียนโค้ดและรันชุดสมการต่างๆ โดยการจำลองอุณหภูมิและอุณหภูมิภายในระบบทำความเย็น ซึ่งสมการที่ใช้เป็นสมการพีชคณิตอยู่แล้ว จึงไม่มีปัญหาการเขียนโค้ดเพื่อทำการจำลองผล แต่ในส่วนของการไหลแบบฟิล์มตกนั้นมีทั้งสมการอนุพันธ์และสมการปริพันธ์รวมอยู่ด้วย ดังนั้นจึงต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) เข้ามาช่วยในการคำนวณ

3.1 การหาขนาดของกริดที่ใช้ในการจำลองของการไหลแบบฟิล์มตกที่เหมาะสม

การจำลองผลการไหลของฟิล์มตก ด้วยชุดสมการการถ่ายเทความร้อนและมวล ที่แสดงในหัวข้อที่ 2.4.2 ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์แบบพาราโบลา (Parabolic equations) และใช้ระเบียบวิธีผลต่างอันตะโดยปริยาย (Implicit finite difference) ในการหาคำตอบของชุดสมการ ด้วยการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในแนวแกน ϵ หรือแนวแกน x ให้มีความแม่นยำของอนุพันธ์อันดับ 1 และในแนวแกน η หรือแนวแกน y ให้มีความแม่นยำของอนุพันธ์อันดับที่ 2 ส่วนเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ จะแปลงสมการให้มีความแม่นยำของอนุพันธ์อันดับที่ 1 โดยมีความแตกต่างที่ยอมรับได้ (Tolerance) อยู่ที่ 10^{-6}

ขนาดของกริดตามแนว ϵ และ η จะส่งผลต่อความแม่นยำของคำตอบที่ได้จากการแก้สมการ และเวลาที่ใช้ในการจำลอง โดยจะแบ่งกริดตามแนวแกน ϵ เป็น N ช่อง และตามแนวแกน η เป็น M ช่อง ขนาดของกริด ($N \times M$) ที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ 200×20 , 400×40 , 600×60 , 800×80 และ $1,000 \times 100$ ช่อง ดูผลของฟลักซ์ของปริมาณไอน้ำที่ดูดซึมและคายซึมในห้องต่างๆ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ เพื่อหาขนาดของกริดที่เหมาะสมในการคำนวณ

3.2 การเปรียบเทียบการจำลองกับผลการทดลอง

การเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลแบบฟิล์มตก จะเทียบกับผลการทดลองของ Medrano และคณะ [23] ซึ่งทำการทดลองการดูดซึมไอน้ำเข้าสู่สารละลายลิเทียมโบรไมด์ด้วยการไหลแบบฟิล์มตก เพราะเนื่องจากยังไม่มีผู้ทำการทดลองการดูดซึมด้วยสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท โดยศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

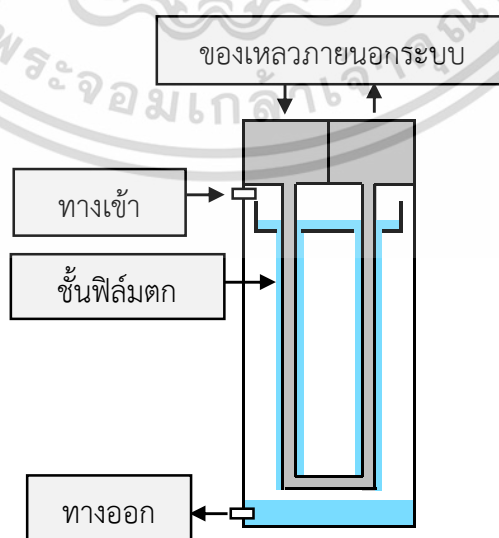
ผลจากการเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์มตก ที่ภาวะดำเนินงานตามตารางที่ 3.1 ให้เหมือนกับที่ทำการทดลอง เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองสามารถใช้จำลองได้อย่างแม่นยำ

ตารางที่ 3.1 ภาวะดำเนินงานที่ใช้ในแบบจำลองกับผลการทดลอง

ชนิดของสารละลายเกลือ	สารละลายลิเทียมโบรไมด์
ความดันในระบบ (Pa)	1,300
ความเข้มข้นสารละลาย (%wt.)	60
อุณหภูมิสารละลาย ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิห้อง
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ($^{\circ}\text{C}$)	35
ความยาวของท่อ (m)	1.2
ตัวเลขเรย์โนลด์	150 - 300

3.3 การศึกษาอิทธิพลของความดันไอของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทในห้องดูดซึมและห้องต้ม

ในการจำลองระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมทั้งระบบ จะออกแบบให้ลักษณะของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างชั้นฟิล์มและของเหลวภายนอกระบบเป็นรูปตัวยู ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยค่าเริ่มต้นที่ต้องใช้ในการคำนวณ ได้แก่ อัตราการไหลและอุณหภูมิทางเข้าของของเหลวภายนอก ระบบ อุณหภูมิทางเข้าของของเหลวภายในระบบ และความดันที่ดำเนินงานทั้ง 2 ห้อง สำหรับค่าที่ต้องสมมติขึ้นมาก่อน ได้แก่ อัตราการไหลและความเข้มข้นเจือจางของของเหลวภายในระบบ ผลที่ได้จากการจำลองเมื่อทั้งระบบถูกรับเข้าจะได้แก่ อุณหภูมิทางออกและอัตราการไหลของของเหลวภายในระบบ อุณหภูมิทางออกของของเหลวภายนอก ระบบ และฟลักซ์ของปริมาณสารทำความเย็น (ไอน้ำ) ที่ในแต่ละห้องจะระเหยหรือดูดซึมผ่านสารละลาย ซึ่งจะนำค่านี้มาคิดเป็นพื้นที่ที่ต้องใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลวภายในระบบและภายนอก ระบบ



รูปที่ 3.1 ลักษณะของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างชั้นฟิล์มและของเหลวภายนอก ระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการไหลของของเหลวภายในระบบ (สารละลายเกลือและน้ำที่ทำหน้าที่เป็นสารทำความเย็น) จะถูกป้อนสารจากด้านบนลงมาตามแนวท่อ และแลกเปลี่ยนความร้อนกับของเหลวภายนอกในระบบ (น้ำร้อน น้ำหล่อเย็น และน้ำเย็น) ที่ไหลอยู่ภายในท่อแบบตัวยู แบบจำลองจะเริ่มจำลองในฝั่งที่มีทิศทางการไหลของของเหลวภายนอกในระบบทิศทางเดียวกับของเหลวภายในระบบก่อน โดยขั้นตอนในการจำลองจะแสดงที่ ภาคผนวก ข. จากนั้นจึงจำลองฝั่งที่มีทิศทางการไหลสวนทางกัน สำหรับการจำลองฝั่งที่มีทิศทางการไหลสวนทางกันนั้น ที่จุดทางเข้าของของเหลวภายใน ($x=0$) จะเป็นจุดทางออกของของเหลวภายนอกในระบบ ซึ่งอุณหภูมิของของเหลวภายนอกในระบบที่ทางออกเป็นตัวแปรตาม ดังนั้นจึงต้องใช้ระเบียบวิธีการยิงเป้า (Shooting method) ในการแก้ปัญหา โดยจะสมมติค่าของอุณหภูมิของของเหลวภายนอกในระบบฝั่งที่มีทิศทางการไหลสวนทางกันที่ทางออก ($x=0$) จากนั้นคำนวณหาอุณหภูมิของของเหลวภายนอกในระบบฝั่งที่มีทิศทางการไหลสวนทางกันที่ทางเข้า ($x=L$) แล้วจึงปรับแก้ไขค่าอุณหภูมิของของเหลวภายนอกในระบบฝั่งที่มีทิศทางการไหลสวนทางกันที่ทางออก ($x=0$) จนอุณหภูมิของของเหลวภายนอกในระบบฝั่งที่มีทิศทางการไหลสวนทางกันที่ทางเข้า ($x=L$) เท่ากับอุณหภูมิของของเหลวภายนอกในระบบฝั่งที่มีทิศทางการไหลตามกันที่ทางออก ($x=L$)

ภาวะดำเนินงานที่ใช้ในการจำลองนี้ จะใช้ภาวะดำเนินงานที่ใช้งานจริง ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และท่อที่ใช้เป็นเหล็กสแตนเลส 304 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3/8 นิ้ว schedule 40 และระยะทางที่เกิดการไหลของฟิล์มตกเป็น 50 เซนติเมตร โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทที่เริ่มในการคำนวณเป็นร้อยละ 65 โดยมวล และอัตราการไหลของฟิล์มน้ำ 1 ท่อ ภายในห้องระเหยและห้องดูดซึมที่เริ่มในการคำนวณเป็น 0.001 และ 0.008 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ เมื่อทำการจำลอง ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทและอัตราการไหลของฟิล์มจะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งขึ้นกับภาวะดำเนินงานที่ทำให้เกิดการดูดซึมเข้าและออกจากจากฟิล์มในแต่ละห้องแตกต่างกัน

ตารางที่ 3.2 ภาวะดำเนินงานที่ใช้ในการจำลองระบบทำความเย็นแบบดูดซึม

	ห้องระเหย	ห้องดูดซึม	ห้องต้ม
อุณหภูมิของของเหลวภายในระบบที่ทางเข้า (°C)	21	34	72
อุณหภูมิของของเหลวภายนอกในระบบที่ทางเข้า (°C)	24	30	75
อัตราการไหลของของเหลวภายนอกในระบบต่อ 1 ท่อ (kg/s)	0.03	0.02	0.02

ทำการจำลองศึกษาผลของการเปลี่ยนความดันภายในห้องระเหย ตั้งแต่ 1,600 ถึง 2,400 ปาสคาล เนื่องจากความดันในห้องระเหยจะส่งผลกับอุณหภูมิของน้ำเย็น (Cooler water) ที่ผลิตได้ และยังส่งผลต่อพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในห้องระเหยและห้องดูดซึม โดยความดันภายในห้องต้มมีค่าคงที่ที่ 10 กิโลปาสคาล

จากนั้นทำการจำลองที่ความดันภายในห้องระเหยและจำนวนท่อรูปตัวยูที่เหมาะสม เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นภายในห้อง

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการจำลองระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมและวิเคราะห์ผลการจำลอง

ในบทนี้จะแสดงผลการจำลองระบบทำความเย็นชนิดดูดซึม โดยเริ่มจากการทดสอบหาขนาดของกริดที่เหมาะสมเพื่อที่จะให้ได้ผลการคำนวณที่มีความแม่นยำ (Accuracy) ในขณะที่มีการใช้ทรัพยากรในการคำนวณไม่มากเกินไป หลังจากนั้นจะทำการทดสอบความเที่ยงตรง (Precision) ของผลการคำนวณเทียบกับผลการทดลองที่ได้มีรายงานไว้ และทำการจำลองอิทธิพลของความดันไอของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทในห้องดูดซึมและห้องต้มต่อพฤติกรรมต่างๆในระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมนี้

4.1 ผลของขนาดของกริดที่เหมาะสม

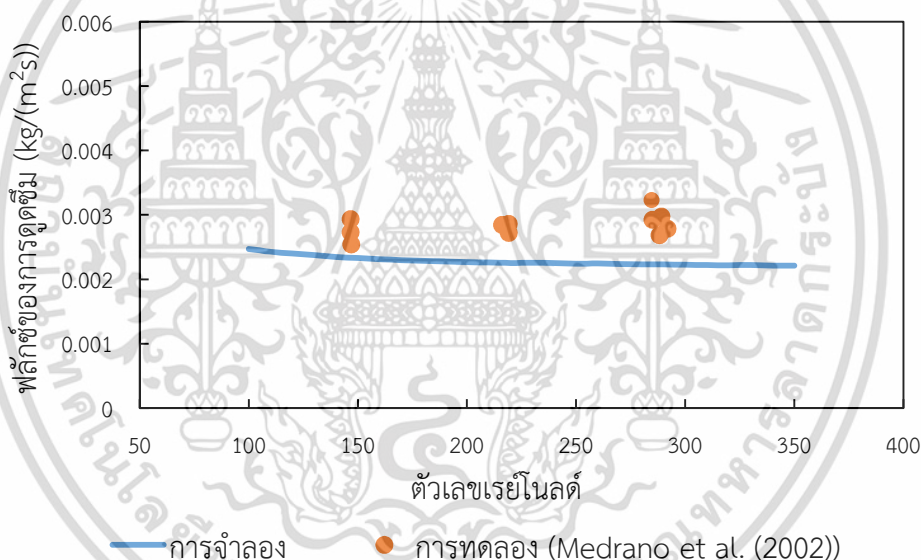
ในการจำลองการไหลของฟิล์มตก ซึ่งเป็นการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ดังนั้นขนาดของกริดจะส่งผลต่อความแม่นยำของคำตอบที่ได้จากการแก้สมการและเวลาที่ใช้ในการจำลอง โดยจะแบ่งเป็นตามแนวแกน ϵ เป็น N ช่อง และตามแนวแกน η เป็น M ช่อง ขนาดของกริด ($N \times M$) ที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ 200x20, 400x40, 600x60, 800x80 และ 1,000x100 ช่อง และใช้ภาวะดำเนินงานเดียวกันในการจำลอง แสดงผลพลั๊กซ์ของปริมาณไอน้ำที่ดูดและคายได้ภายในห้องระเหย ห้องดูดซึม และห้องต้ม และเวลาที่ใช้ในการจำลองผลในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ชัดว่าขนาดของกริดที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้พลั๊กซ์ของปริมาณไอน้ำเปลี่ยนแปลงน้อยมากๆ แต่เพิ่มเวลาที่ใช้ในการจำลองผลเป็นอย่างมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้กริดขนาด 400x40 ในการจำลองผลทั้งหมด เพราะใช้เวลาไม่มากนักในการจำลอง และพลั๊กซ์ของปริมาณไอน้ำแตกต่างจากกริดขนาด 600x60 เฉลี่ยทั้งสามห้องเพียงร้อยละ 0.21 เท่านั้น

ตารางที่ 4.1 ขนาดของกริดที่ส่งผลต่อปริมาณพลั๊กซ์ของไอน้ำและเวลาที่ใช้ในการจำลอง

ขนาดของกริด ($N \times M$)	พลั๊กซ์ของปริมาณไอน้ำ ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)			เวลาที่ใช้ในการ จำลองผล (s)
	ห้องระเหย	ห้องดูดซึม	ห้องต้ม	
200x20	0.003496	0.001023	0.001706	106.25
400x40	0.003507	0.001022	0.001699	665.57
600x60	0.003512	0.001024	0.001704	2,090.99
800x80	0.003515	0.001026	0.001708	5,234.22
1,000x100	0.003517	0.001028	0.001711	50,634.97

4.2 การเปรียบเทียบการจำลองกับผลการทดลอง

การจำลองการไหลแบบฟิล์มตกเทียบกับผลการทดลองของ Medrano และคณะ [23] ซึ่งทำการทดลองการดูดซึมน้ำเข้าสู่สารละลายลิเทียมโบรไมด์ด้วยการไหลแบบฟิล์มตก โดยศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์มตก แสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ชัดว่าค่าจากการจำลองจะมีผลของฟลักซ์ของดูดซึมน้ำต่ำกว่าค่าจากการทดลอง มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10 เนื่องมาจากผลของช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ที่ทำการจำลองจะอยู่ในช่วงการเกิดคลื่น ซึ่งแบบจำลองนี้ไม่ได้คิดถึงผลเนื่องจากการเกิดคลื่น โดย Morioka และคณะ [24] ได้อธิบายว่าการดูดซึมของสารละลายที่ไหลแบบฟิล์มตกในช่วงที่เกิดคลื่นจะมีอัตราการดูดซึมน้ำมากกว่าการไหลแบบฟิล์มตกแบบราบเรียบ ประมาณร้อยละ 70 – 140 เนื่องมาจากการเกิดคลื่นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารในชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น ดังนั้นผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองนี้มีความเที่ยงตรงในระดับที่ดีเมื่อเทียบกับช่วงการกระจายของข้อมูลผลการทดลอง อนุมานได้ว่าผลการคำนวณและแบบจำลองนี้สามารถทำนายผลการทดลองได้อย่างเที่ยงตรงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการออกแบบระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมได้



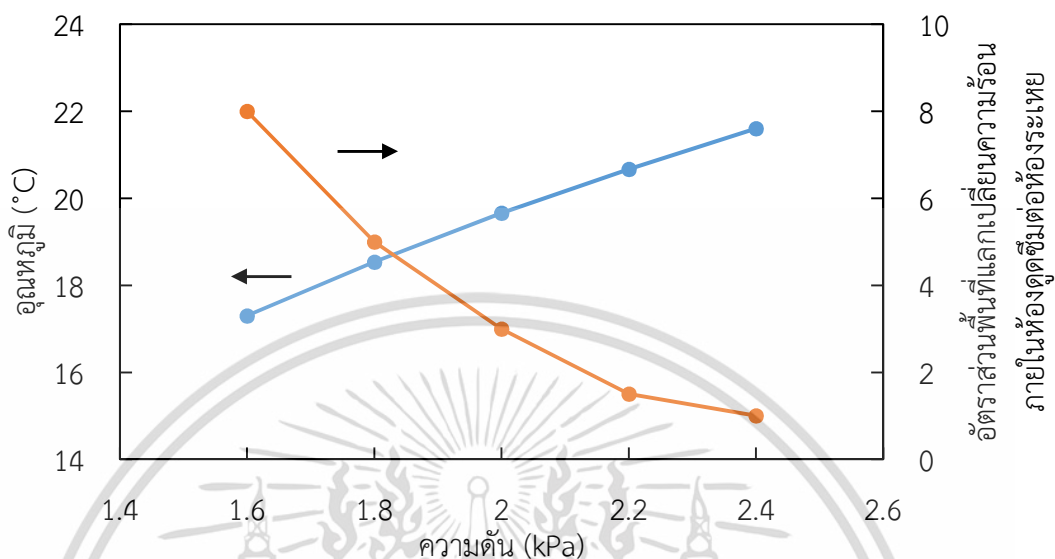
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบการจำลองกับผลการทดลอง

4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของความดันไอของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทในห้องดูดซึมและห้องต้ม

ผลจากการจำลองเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องระเหยแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าความดันต่ำจะสามารถผลิตน้ำเย็นได้เย็นกว่า เพราะน้ำภายในห้องระเหยจะระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า แต่ก็ทำให้ต้องใช้พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในห้องดูดซึมที่สูงขึ้น ถึงแม้ว่าที่ความดันต่ำนั้นสารละลายเกลือจะดูดซึมน้ำได้ที่อุณหภูมิต่ำลง แต่ก็ติดข้อจำกัดของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (Cooling water) ทำให้แรงขับ (Driving force) ในการถ่ายเทพลังงานจากสารละลายสู่น้ำหล่อเย็นนั้นน้อยลง จึงทำให้พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในห้องดูดซึมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการจัดวางท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้ไอน้ำจากห้องระเหยกระจายตัวเข้าสู่ห้องดูดซึมได้ดี และขนาดรวมของเครื่องที่จะต้องมีความใหญ่ขึ้น ดังนั้นจึงเลือกภาวะดำเนินงานที่ความดันภายในห้องระเหยเท่ากับ 2 กิโลปาสกาล



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในห้องระเหยและอุณหภูมิน้ำเย็นที่ผลิตได้และอัตราส่วนพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในห้องดูดซึมต่อห้องระเหย

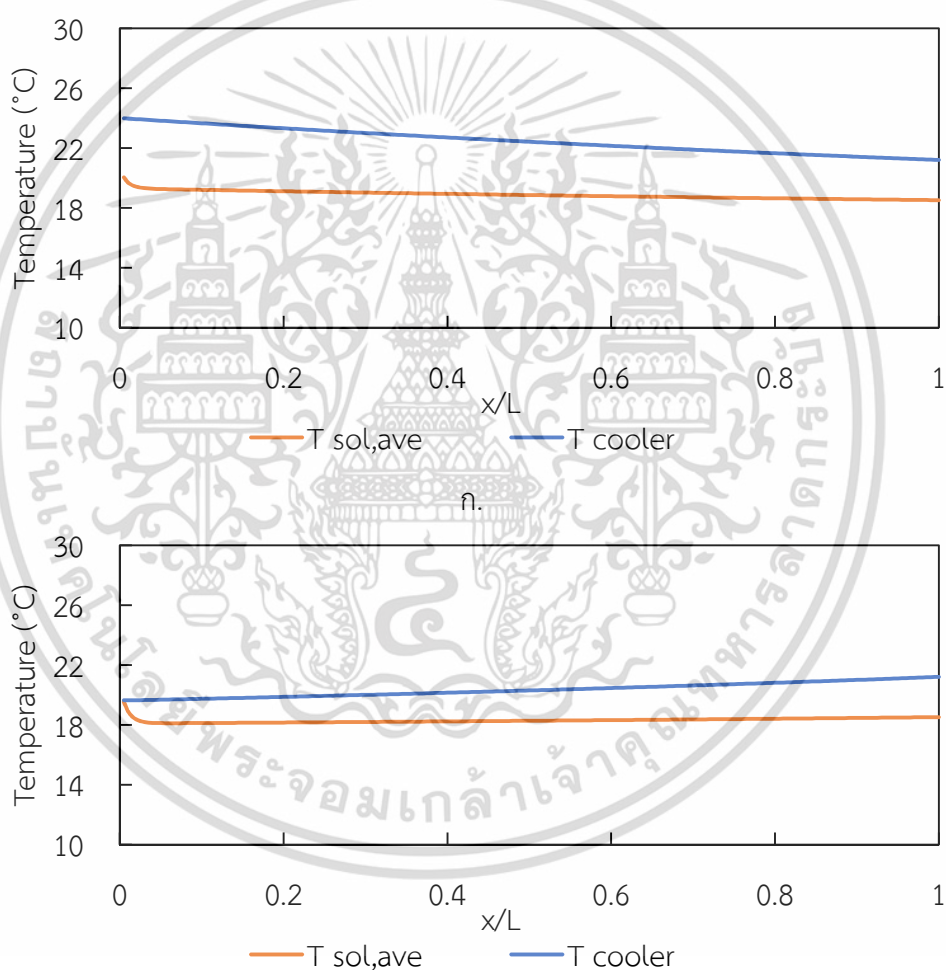
ตารางที่ 4.2 ผลจากการจำลองระบบทำความเย็นแบบดูดซึม

	ห้องระเหย	ห้องดูดซึม	ห้องต้ม	ห้องควบแน่น
อัตราการไหลของของเหลวภายในที่ทางเข้า (kg/s)	0.0020	0.04799	0.04844	-
อุณหภูมิของของเหลวภายในที่ทางออก (°C)	18.52	34.59	70.49	-
ร้อยละความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทโดยมวลที่ทางเข้า	-	64.48	65.05	-
อัตราการไหลของของเหลวภายนอก (kg/s)	0.03	0.06	0.06	0.06
อุณหภูมิของของเหลวภายนอกที่ทางออก (°C)	19.65	31.97	72.45	34.12
พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m²)	0.054	0.162	0.162	0.054

ผลจากการจำลองภาวะดำเนินงานตามตารางที่ 3.2 และความดันภายในห้องระเหยเท่ากับ 2 กิโลปาสกาล แสดงผลจากการจำลองในตารางที่ 4.2 สามารถทำน้ำเย็นได้ที่อุณหภูมิประมาณ 19.65 องศาเซลเซียส ลดลง 4.35 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการไหลเชิงมวล 0.03 กิโลกรัมต่อวินาที หรือไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 108 ลิตรต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าความจุความร้อนประมาณ 0.55 กิโลวัตต์ น้ำร้อนที่ใช้จะมี อุณหภูมิลดลง 2.55 องศาเซลเซียส คิดเป็นพลังงานที่ต้องป้อนเข้าไปในห้องต้มประมาณ 0.43 กิโลวัตต์

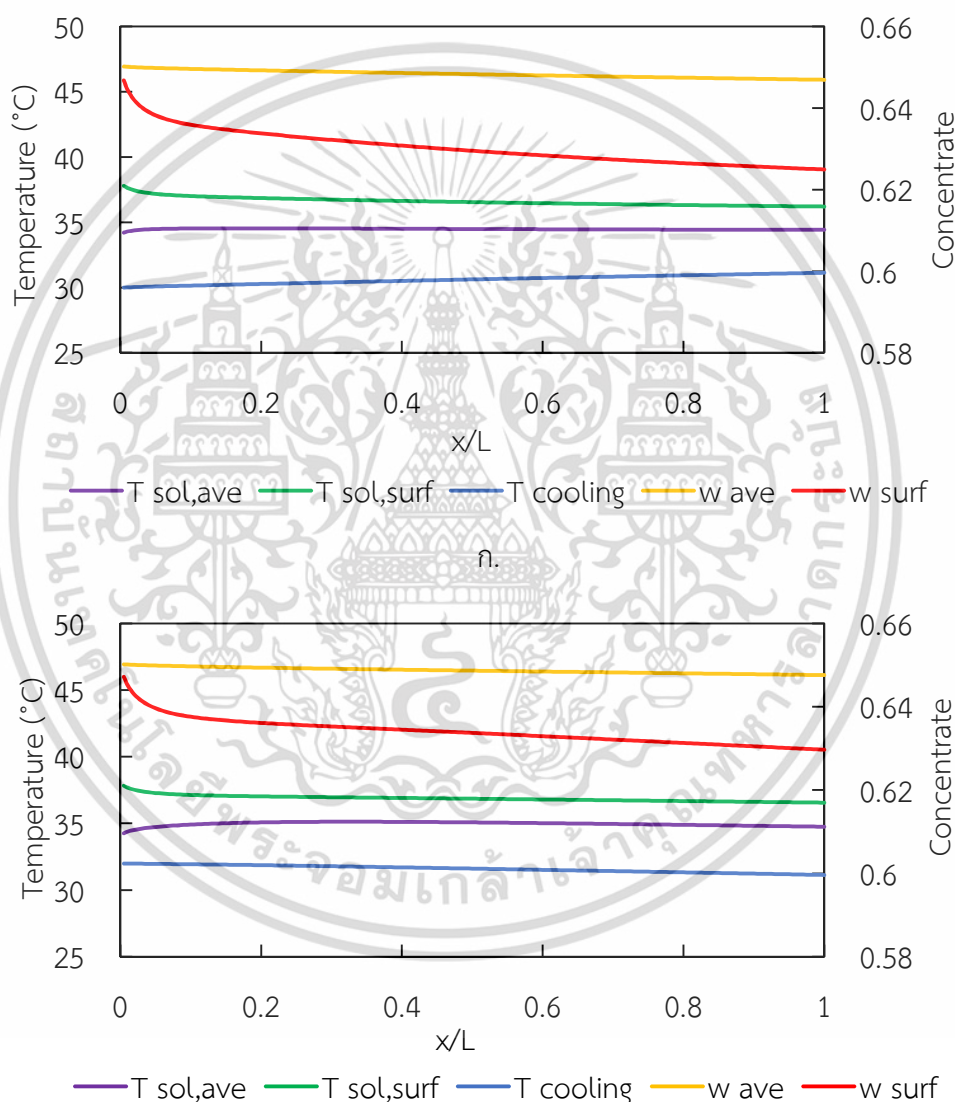
ภายในห้องระเหย อุณหภูมิของน้ำในระบบภายในจะลดลงอย่างมากในช่วงต้นของการไหล ทั้งในส่วนของการไหลแบบตามกันและแบบสวนทางกันแสดงในรูปที่ 4.4 และอุณหภูมิจะค่อนข้าง คงที่ที่ประมาณ 18.52 องศาเซลเซียส สำหรับระบบภายนอกหรือน้ำเย็นจะมีอุณหภูมิลดลงจาก 24 องศาเซลเซียสที่ทางเข้า ($x/L=0$) เหลือ 21.21 องศาเซลเซียสที่ทางออก ($x/L=1$) ของฝั่งการไหลแบบ ตามกัน (รูปที่ 4.4 ก.) และฝั่งการไหลแบบสวนทางกัน (รูปที่ 4.4 ข.) จากทางเข้าของน้ำเย็น ($x/L=1$) อุณหภูมิจะลดลงต่อจนถึง 19.65 องศาเซลเซียสที่ทางออก ($x/L=0$)



ข.

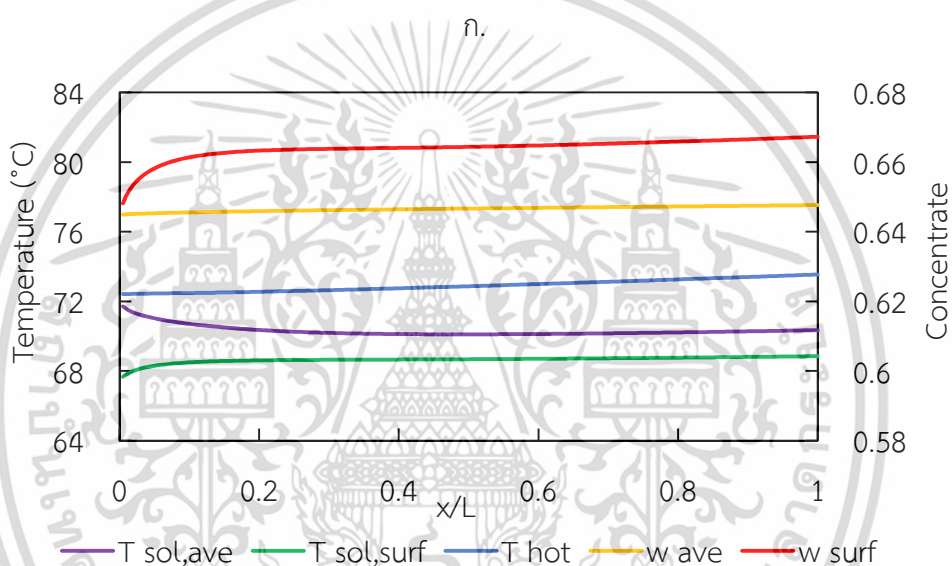
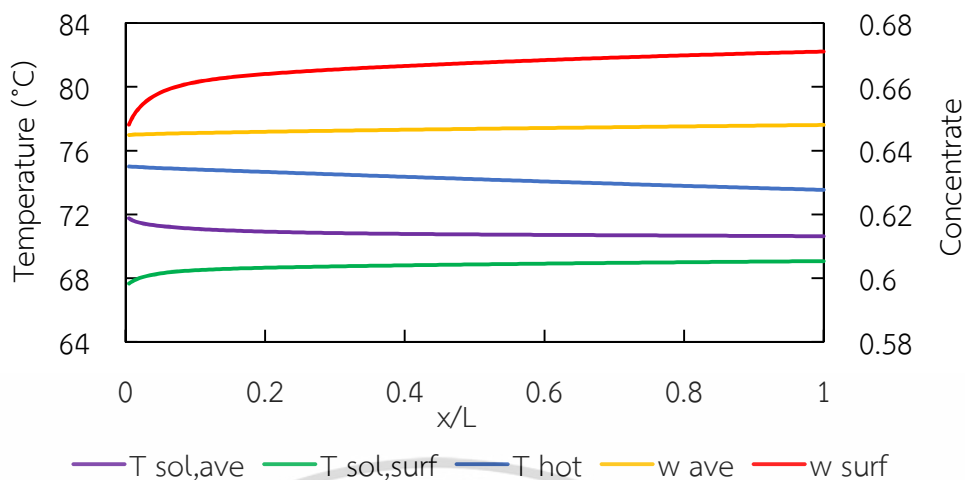
รูปที่ 4.4 อุณหภูมิของน้ำและน้ำเย็นในห้องระเหยตลอดความสูงของท่อ ก.) การไหลแบบตามกัน ข.) การไหลแบบสวนทางกัน

ภายในห้องดูดซึม อุณหภูมิเฉลี่ยของสารละลาย อุณหภูมิที่ผิวฟิล์ม และความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายเกลือโพแทสเซียมอะซิเตท จะมีค่าใกล้เคียงกันทั้งส่วนของการไหลแบบตามกันและแบบสวนทางกัน น้ำหล่อเย็นจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 31.13 ที่ทางออกของการไหลแบบตามกัน ($x/L=1$) และเพิ่มเป็น 31.97 องศาเซลเซียสที่ทางออกของการไหลแบบสวนทางกัน ($x/L=0$) ซึ่งจะส่งผลต่อความเข้มข้นของสารละลายที่ผิวฟิล์ม จะเห็นได้ชัดว่าในช่วงด้านล่าง ฝั่งการไหลแบบตามกันจะมีความเข้มข้นที่ผิวฟิล์มต่ำกว่าหรือสามารถดูดซึมไอน้ำได้มากกว่าฝั่งการไหลแบบสวนทางกัน เพราะอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นฝั่งการไหลแบบตามกันในช่วงต้นมีอุณหภูมิต่ำกว่าจึงสามารถถ่ายเทพลังงานจากสารละลายไปยังน้ำหล่อเย็นได้มากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.5



ข.

รูปที่ 4.5 อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นในห้องดูดซึมตลอดความสูงของท่อ ก.) การไหลแบบตามกัน ข.) การไหลแบบสวนทางกัน



รูปที่ 4.6 อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิของน้ำร้อนในห้องต้มตลอดความสูงของท่อ ก.) การไหลแบบตามกัน ข.) การไหลแบบสวนทางกัน

ภายในห้องต้ม อุณหภูมิเฉลี่ยของสารละลาย อุณหภูมิที่ผิวฟิล์ม และความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายเกลือโพแทสเซียมอะซิเตท จะมีค่าใกล้เคียงกันทั้งส่วนของการไหลแบบตามกันและแบบสวนทางกัน น้ำร้อนจะมีอุณหภูมิลดลงจาก 75 องศาเซลเซียส เป็น 73.54 ที่ทางออกของการไหลแบบตามกัน ($x/L=1$) และลดลงเหลือเป็น 72.45 องศาเซลเซียสที่ทางออกของการไหลแบบสวนทางกัน ($x/L=0$) ดังแสดงในรูปที่ 4.6

บทที่ 5

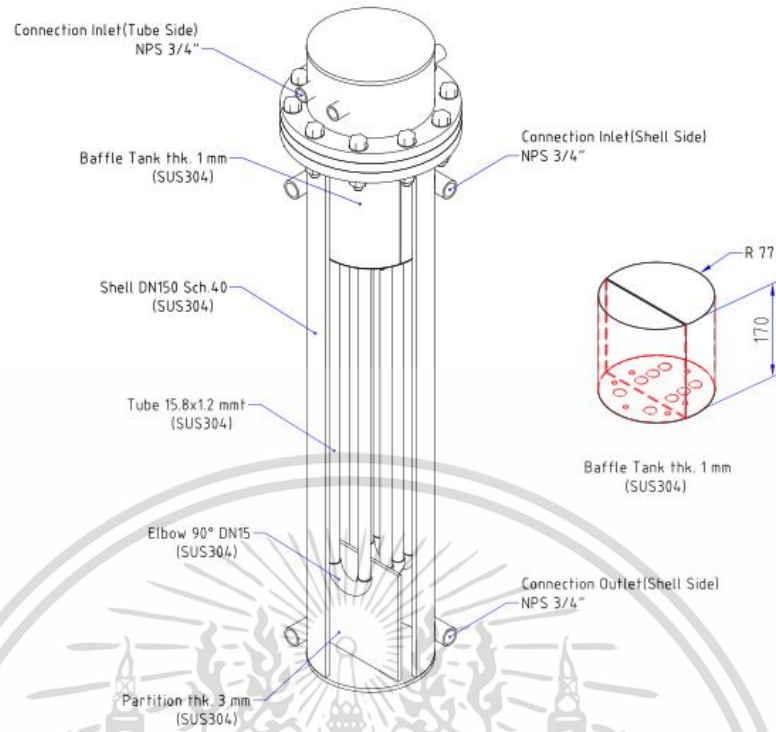
สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการจำลองระบบทำความเย็นชนิดดูดซึม

แบบจำลองระบบทำความเย็นที่ได้พัฒนาขึ้นมาสามารถจำลองการควบคุมและดุลพลังงานควบคู่กับการจำลองลักษณะการไหลแบบฟิล์มตกของสารภายในระบบได้ และจากการจำลองผลระบบทำความเย็นที่ตั้งเป้าไว้ที่ค่าความจุความร้อนประมาณ 1 กิโลวัตต์ โดยใช้สารละลายยาโพแทสเซียมอะซิเตทเป็นสารดูดซึมและภาวะดำเนินงานที่ความดันภายในห้องระเหยและห้องต้มเป็น 2 และ 10 กิโลปาสคาล พบว่าระบบทำความเย็นนี้สามารถทำงานได้ สามารถผลิตน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิ 19.65 องศาเซลเซียส มีค่าความจุความร้อนอยู่ที่ 0.55 กิโลวัตต์ โดยใช้ความร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 75 องศาเซลเซียส และน้ำหล่อเย็นอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในการดำเนินงาน

จากผลที่ได้จากการจำลอง จะนำมาออกแบบระบบทำความเย็น โดยที่ห้องระเหย ห้องดูดซึม ห้องต้ม และห้องควบแน่นใช้ท่อเหล็กสเตนเลส 304 แบบตัวยู ยาวด้านละ 0.5 เมตร จำนวน 1, 3, 3 และ 1 ท่อ ตามลำดับ รูปที่ 5.1 แสดงภาพร่างของห้องระเหยและห้องดูดซึม และสำหรับห้องต้มและห้องควบแน่นก็มีลักษณะคล้ายคลึงแบบนี้เช่นกัน

ในขณะนี้ อยู่ในขั้นตอนการประกอบเครื่อง แสดงในรูปที่ 5.2 พร้อมติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ความดัน และอัตราการไหลในของเหลวภายในระบบและภายนอกระบบ เพื่อวัดค่าแล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการจำลอง และจะทดสอบเพื่อหาจุดบกพร่องและพัฒนาประสิทธิภาพทั้งในส่วนของการจำลองและระบบทำความเย็นต่อไป



รูปที่ 5.1 ภาพร่างสามมิติของห้องระเหยและห้องดูดซึม



รูปที่ 5.2 เครื่องทำความเย็นชนิดดูดซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

แบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นยังต้องมีการปรับปรุงในอีกหลายส่วน เช่น ค่าข้อมูลทางกายภาพบางอย่างของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตตยังเป็นค่าประมาณอยู่ เนื่องจากยังไม่มีาทดลองที่วัดค่าต่างๆเหล่านี้ อิทธิพลของการเกิดคลื่นที่ส่งผลต่อแบบจำลอง เพราะในแบบจำลองได้ตั้งสมมติฐานให้การไหลของฟิล์มเป็นแบบราบเรียบเท่านั้น ดังนั้นจึงควรที่จะทำการทดสอบเครื่องระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมน้ำ แล้วนำผลที่ได้จากการทดลองมาปรับแก้แบบจำลองให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เพื่อที่จะสามารถพัฒนาระบบทำความเย็นชนิดดูดซึมน้ำให้นำไปใช้ได้ในชีวิตจริง และควรพัฒนาให้สามารถนำไปใช้ควบคู่กับระบบทำความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ เพราะจะทำให้ประหยัดพลังงานได้อย่างมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] B.F. Tchanche, G. Lambrinos, A. Frangoudakis, and G. Papadakis., 2011. “Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles—a review of various applications”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 15, pp. 3963–3979.
- [2] F. Giuseppe, N. Ettore, L. E. Padovan, and A. Perdichizzi., 2015. “Modeling, Design and Construction of a Micro-scale Absorption Chiller”, **Energy Procedia**, Vol. 82, pp. 577 – 583.
- [3] A. Apelblat, and E. Manzurola., 2007. “The vapour pressures over saturated aqueous solutions of sodium and potassium acetates, chlorates, and perchlorates”, **J. Chem. Thermodynamics**, Vol. 39, pp. 1176–1181.
- [4] Greenspan L., 1977. “Humidity Fixed Point of Binary Saturated Aqueous Solution”, **Journal of Research of the National Bureau of Standards-A Physks and Chemistry**, Vol. 81A, pp. 89-96.
- [5] M. Helm, K. Hagel, W. Pfeffer, S. Hiebler, and C. Schweigler., 2014. “Solar Heating and Cooling System with Absorption Chiller and Latent Heat Storage – A Research Project Summary”. **Energy Procedia**, Vol. 48, pp. 837–849.
- [6] Slu-Ming Yih., 1986. “Modeling Heat and Mass Transfer in Falling Liquid Film”, **Handbook of Heat and Mass Transfer**, Vol. 2, pp. 111-210.
- [7] Nusselt, W., *VDI-Zeitschrift*, 54:1154 (1910).
- [8] Jackson, M. L., *AIChE J.*, 1:231 (1955).
- [9] Feind, K., *VDI-Forschungsh.*, 481 (196).
- [10] Kapitza, P. L., in *Collected Papers of P. L. Kapitza*, Macmillan, N. Y., 1964 p. 662.
- [11] Chu, K. J., and Dukler, A. E., *AIChE J.*, 20:695 (1974).
- [12] Chu, K. J., and Dukler, A. E., *AIChE J.*, 21:583 (1975).
- [13] อำนาจ สุนทรชัชเวช., “ความดันไอของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทและโพแทสเซียมคาร์บอเนต”, *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, กรุงเทพฯ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.*
- [14] อัครพงศ์ กระแสร์., “ความหนาแน่นและความหนืดของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท และโพแทสเซียมคาร์บอเนต”, *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, กรุงเทพฯ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [15] นิตีรัตน์ สัจฉกร., “ความจุความร้อนจำเพาะของสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตทและโพแทสเซียมคาร์บอเนต”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, กรุงเทพฯ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [16] L. Zhang, Y. Wang, Y. Fu, L. Xing, and L. Jin., 2015. “Numerical Simulation of H₂O/LiBr Falling Film Absorption Process”, *Energy Procedia*, Vol. 75, pp. 3119 – 3126.
- [17] D. S. KIM, and C. A. INFANTE FERREIRA., 2008. “Flow patterns and heat and mass transfer coefficients of low Reynolds number falling film flows on vertical plates: Effect of a wire screen and an additive”, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, pp. 138–149.
- [18] E. Garcia-Rivera, J. Castro, J. Farnos, and A. Oliva., 2016. “Numerical and experimental investigation of a vertical LiBr falling film absorber considering wave regimes and in presence of mist flow”, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 109, pp. 342-361.
- [19] S. Karami, and B. Farhanieh. “A numerical study on the absorption of water vapor into a film of aqueous LiBr falling along a vertical plate”, *Heat Mass Transfer*, Vol. 46, 2009, pp. 197–207.
- [20] ชีรพันธ์ ตั้งกิตติศักดิ์, ประกอบ กิจไชยก และอภิรักษ์ นัมคณิสสรณ์., 2017. “การจำลองระบบทำน้ำเย็นแบบดูดซึมโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท”, *The National Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference 2017*, Conference Proceedings: TICHE2017, pp. 739-744.
- [21] ปราโมทย์ เดชะอำไพ และ นิพนธ์ วรรณโสภากย์, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 9 กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [22] S. C. Chapra and R. P. Canale, *Numerical methods for engineers*. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [23] Medrano M, Bourouis M, Coronas A., 2002. “Absorption of water vapour in the falling film of water–lithium bromide inside a vertical tube at air-cooling thermal conditions”, *Int J Therm Sci*, Vol. 41, pp. 891–898.
- [24] Morioka I, Kiyota M., 1991. “Absorption of water vapor into a wavy film of an aqueous solution of LiBr”. *JSME Int J Ser II*, Vol. 34(2), pp.183–188.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดลองของงานวิจัยที่นำมาใช้เปรียบเทียบ

ผลการทดลองของ Medrano และคณะ [23] ที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับแบบจำลองการไหลแบบฟิล์มตก ทำการทดลองที่ภาวะดำเนินงานตามตารางที่ 3.1 เพื่อศึกษาผลของพลักซ์การดูดซึมไอน้ำเข้าสู่สารละลายลิเทียมโบรไมด์โดยการเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์ม

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการดูดซึมไอน้ำ

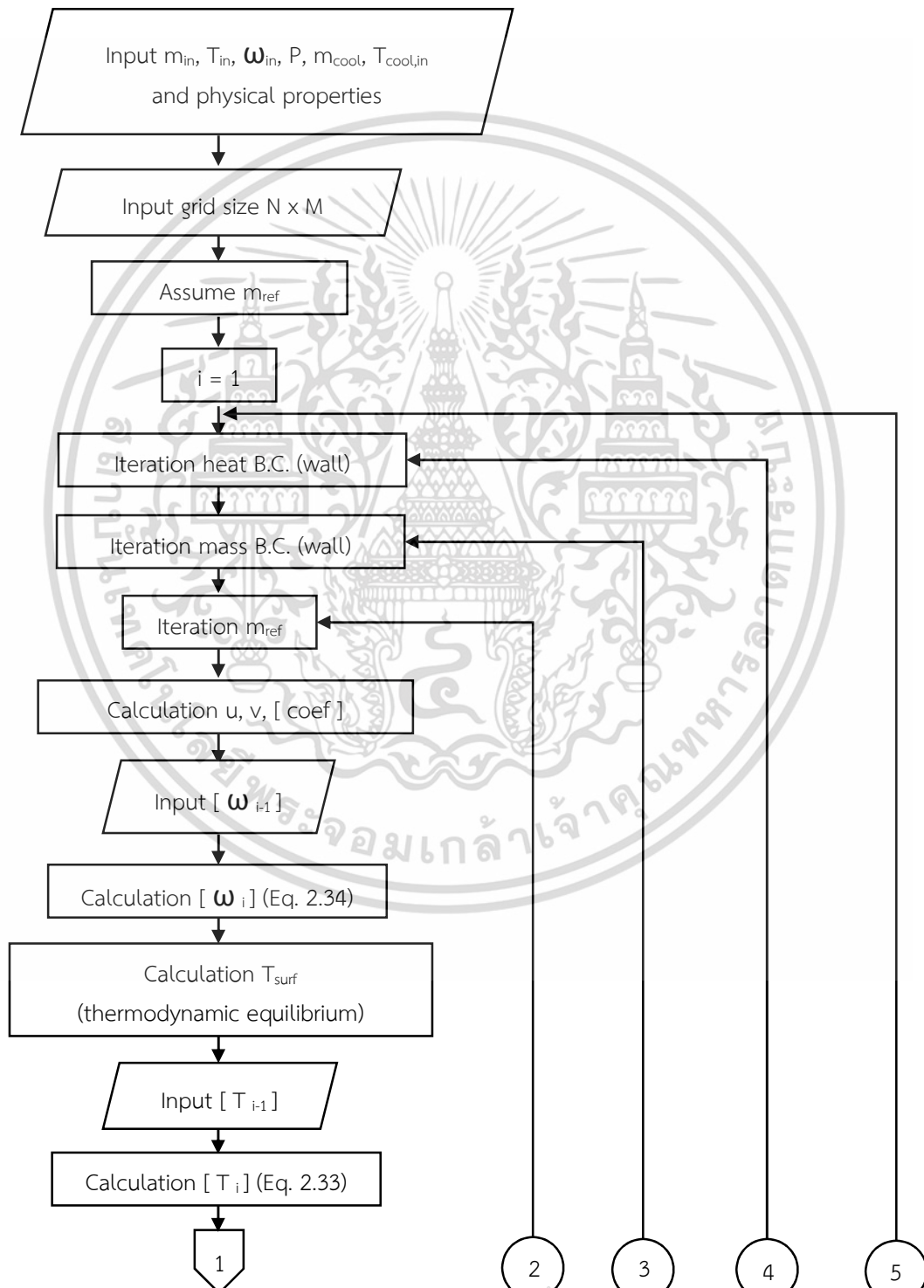
ตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์มตก	พลักซ์ของการดูดซึมไอน้ำ ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$)
146	0.002936
146	0.002735
146	0.002546
216	0.002851
219	0.002725
219	0.002863
285	0.003230
285	0.002979
289	0.002928
289	0.002690
292	0.002790

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

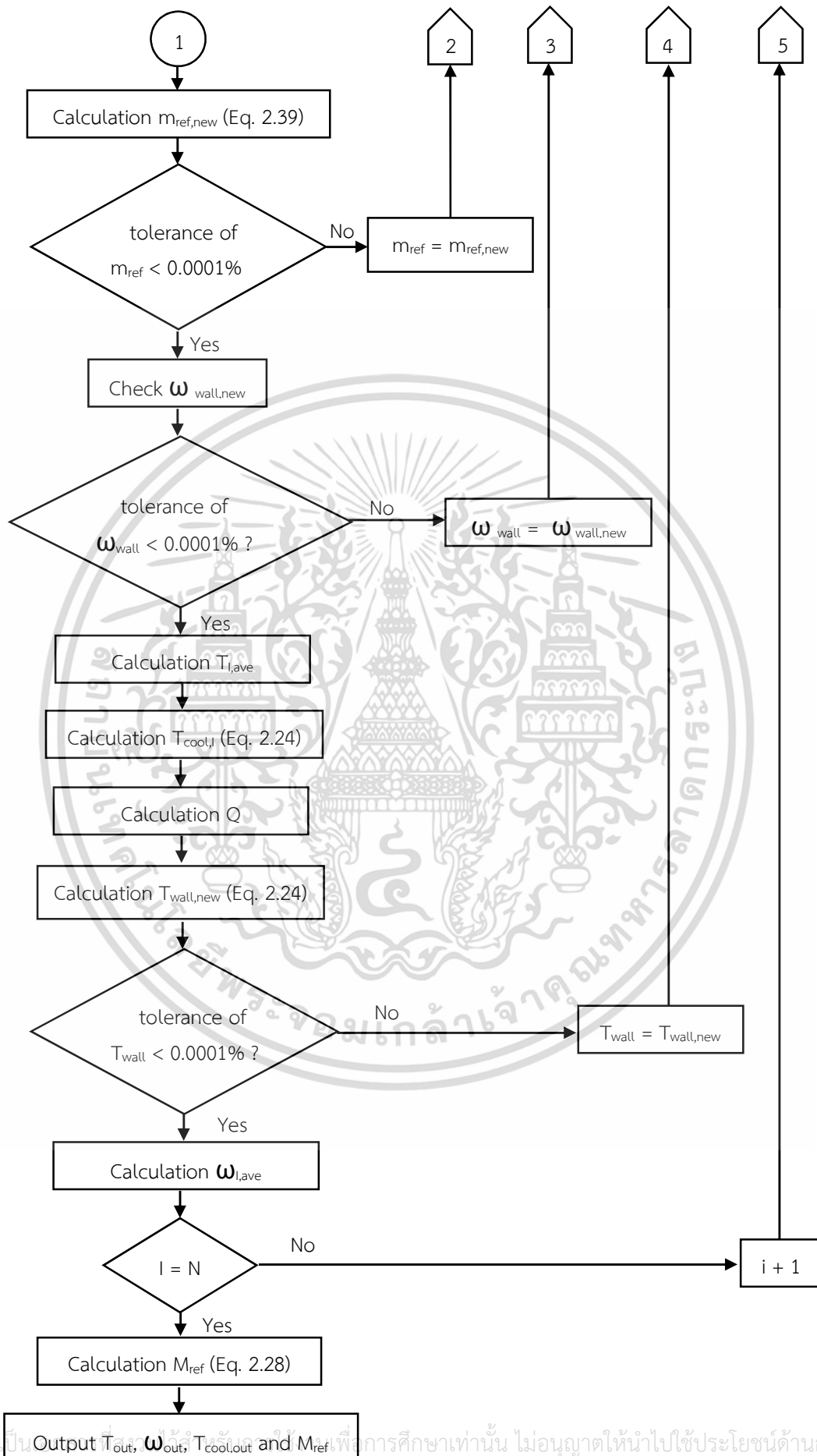
ภาคผนวก ข.

ผังงานของขั้นตอนการคำนวณการไหลแบบฟิล์มตก

ขั้นตอนการคำนวณการไหลแบบฟิล์มตก โดยแสดงตัวอย่างของการไหลแบบฟิล์มตกภายในห้องดูดซึม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็น Output ที่มาจากโปรแกรมที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายธีรพันธ์ ตั้งกิตติมงคล
วัน เดือน ปีเกิด	15 มีนาคม 2536
ที่อยู่	3476/5 ถ.เพชรบุรีตัดใหม่ เขตสวนหลวง แขวงสวนหลวง กทม. โทร. 0870529390
ประวัติการศึกษา	2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2556 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การสร้างแบบจำลองระบบทำความเย็น 2.) เคมีอินทรีย์
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2556	นักศึกษาฝึกงานในตำแหน่ง operator ที่ศูนย์พัฒนาปิโตรเลียมภาคเหนือ กรมการพลังงานทหาร
พ.ศ.2560	งานประชุมวิชาการ The 27 th National Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference 2017 (TICHE2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้