



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาต้นแบบหอกลั่นเอทานอลขนาดเล็ก

The development of a small ethanol distillation column

ธนภรณ์ สีลาวัฒนานนท์

ภาจปัญญา สุวรรณสุโข

รศ.  
ศ 1๙๘ ก  
๒๕๕๖

สาขา.....  
เลขทะเบียน..... 137343  
รับเดือนปี 22 ส.ย. 2558

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก เงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

b. 126199 42  
i. ....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย	2
<b>บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี</b>	3
2.1 แนวคิดและทฤษฎี	3
2.1.1 เอทานอล	3
2.1.2 การกลั่นเอทานอล	4
2.1.3. การถ่ายเทมวลสาร	5
2.1.4 การควบแน่น	5
2.2 ชนิดของการกลั่น	5
2.2.1 การกลั่นแบบธรรมดา	5
2.2.2 การสกัดโดยการกลั่นด้วยไอน้ำ	5
2.2.3 การกลั่นลำดับส่วน	5
2.3 สมดุลของก๊าซและของเหลว	6
2.3.1 สมดุลของก๊าซและของเหลวภายใต้ความดันคงที่ ในระบบที่มีสารองค์ประกอบ 2 ชนิด	6
2.3.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ของสมดุลของก๊าซและของเหลว	6
2.4 เคมีเชิงฟิสิกส์และเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการแยกสาร	8
2.4.1 สมดุลพลังงาน สมดุลเอนโทรปี และสมดุลอื่นๆที่สำคัญ	8
2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกลั่นตัวของเอทานอล	9
2.5.1 ความดัน	9
2.5.2 อุณหภูมิ	9
2.6 กระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารบริสุทธิ์	9
2.7 ความเข้มข้นของสารละลาย	12
2.7.1 ร้อยละของตัวถูกละลาย	12
2.7.2 การเตรียมสารละลายจากสารละลายเข้มข้น หรือ การเจือจางสารละลาย	13

2.8	วัสดุหอกลับ	13
2.3.1	ทองแดง	13
2.9	ความสัมพันธ์ของดัชนีหักเหและความเข้มข้นของสารละลาย	14
<b>บทที่ 3</b>	<b>การออกแบบและวิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>8</b>
3.1	การออกแบบหอกลับเอทานอล	7
3.1.1	Bubbler Section	10
3.1.2	Reflex Section	12
3.1.3	Separator Section	14
3.1.4	Condenser Section	15
3.2	วัดค่าความเข้มข้นของเอทานอลโดยการสอบเทียบกับ Calibration Curve	25
3.2.1	การทำ Calibration Curve ของเอทานอล	25
3.2.2	เงื่อนไขการทดลอง	26
<b>บทที่ 4</b>	<b>การอภิปรายผลการทดลอง</b>	<b>27</b>
4.1	Calibration Curve ของเอทานอล	27
4.2	ผลของความดันที่มีต่อการควบแน่นของเอทานอล	28
4.2.1	ความดัน 0.2 บาร์ และ 0.4 บาร์	28
4.2.2	ความดัน 0.6 บาร์ 0.8 บาร์ และ 1.0 บาร์	30
4.3	ความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการกลั่น	32
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>33</b>
5.1	สรุปผลการวิจัย	33
5.2	ข้อเสนอแนะ	33
	เอกสารอ้างอิง	34

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นปัญหาสำคัญของประเทศไทยมาช้านาน เนื่องจากแหล่งผลิตในประเทศไทยมีไม่เพียงพอกับความต้องการที่สูงขึ้นตามความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ พร้อมทั้งแนวโน้มราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งยังมีการประมาณการว่าเมื่อรวมปริมาณน้ำมันจากแหล่งผลิตใหญ่ๆของโลกแล้วจะมีน้ำมันสำรองใช้ได้อีกประมาณ 40 -50 ปี

การคิดค้นแหล่งพลังงานทดแทนใหม่ๆ จึงเป็นสิ่งสำคัญ และที่มีความตื่นตัวกันมากในขณะนี้คือ เอทานอล ซึ่งเป็นพลังงานทดแทนอย่างหนึ่งที่สำคัญ มีค่าออกเทนและความบริสุทธิ์สูง สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเบนซินได้โดยตรง หรือใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันให้กับเครื่องยนต์ ทำให้การเผาไหม้สะอาด ไม่สร้างมลพิษที่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก ประเทศไทยมีแหล่งวัตถุดิบทางการเกษตรที่ใช้ในการผลิตเอทานอลเพาะปลูกในเกือบทุกภูมิภาค เช่น มันสำปะหลัง อ้อย กากน้ำตาล ธัญพืชต่างๆ เป็นต้น ทำให้สามารถผลิตเอทานอลได้ตลอดทั้งปี แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตเอทานอลยังผูกขาดอยู่กับกลุ่มอุตสาหกรรม ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่ใช้เงินลงทุนสูงและเป็นผู้กำหนดกลไกราคาตลาด ทั้งที่แหล่งวัตถุดิบมาจากภาคการเกษตร ดังนั้นเพื่อให้เกษตรกรและประชาชนทั่วไปสามารถผลิตเอทานอลคุณภาพดีสำหรับการใช้งานในครัวเรือนได้เอง จึงได้เกิดโครงการวิจัยนี้ขึ้นมา โดยเป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาต้นแบบหอกลิ้นเอทานอลขนาดเล็กใช้หลักการควบแน่นและได้เอทานอลคุณภาพดี

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 พัฒนาต้นแบบหอกลิ้นควบแน่นประสิทธิภาพสูง
- 1.2.2 ต้นแบบนี้ สามารถที่จะผลิตเอทานอลได้ความบริสุทธิ์มากกว่า 90%
- 1.2.3. สามารถพึ่งตนเองด้านพลังงานได้

#### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ จะเน้นพัฒนาหอกลิ้นเอทานอลขนาดเล็ก ความสูงหอกลิ้นไม่เกิน 180 เซนติเมตร ให้หลักการชะลอแรงดันไอที่เข้ามาในหอกลิ้น และควบแน่นที่คอยล์เย็น เพื่อให้มีน้ำซึ่งมีน้ำหนักมากกว่าควบแน่นที่ด้านล่างหอกลิ้นก่อน หลังจากนั้นไอเอทานอลจึงควบแน่นที่ด้านบนของหอกลิ้น เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของเอทานอลมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจในหลักการการกลั่นเอทานอลและทฤษฎีการควบแน่นของสาร
- 1.4.2 มีความรู้ความเข้าใจระบบโครงสร้างของหอกลิ้นเอทานอล
- 1.4.3 สามารถพัฒนาต้นแบบหอกลิ้นเอทานอลขนาดเล็กที่สามารถใช้งานได้จริง
- 1.4.4 สามารถสร้างอุปกรณ์การเรียนการสอนสำหรับนักศึกษาฟิสิกส์-พลังงานทางเลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 1.1 แสดงวิธีการดำเนินงานวิจัย

หัวข้องานวิจัย	ปี 2555									ปี 2556	
	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. ศึกษากระบวนการผลิต เอทานอลในปัจจุบัน											
2. เขียนแบบหอกลิ้นเอ ทานอลด้วยโปรแกรม Solid Works											
3. สร้างชิ้นส่วนหอกลิ้น เอทานอล พร้อมประกอบ เข้าด้วยกัน											
4. ทดสอบระบบการกลั่น เอทานอล											
5. สรุปผล											

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

#### 2.1.1 เอทานอล

เอทานอล หรือ เอทิลแอลกอฮอล์ คือ แอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่มีสูตรเคมี  $C_2H_5OH$  มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ติดไฟง่าย มีความไวไฟและค่าออกเทนสูง (เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 จะมีค่าออกเทนสูงถึง 113) ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นอนุพันธ์ไฮดรอกซิลของไฮโดรคาร์บอน เกิดจากการแทนที่ไฮโดรเจนอะตอมด้วย hydroxyl group (OH) มีน้ำหนักโมเลกุล 46.07 ความหนาแน่น 0.789 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว  $-114.1$  องศาเซลเซียส จุดเดือด  $78.5$  องศาเซลเซียส สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย อาทิ ใช้ผลิตอาหาร และเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ ใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรม ใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ใน 3 รูปแบบ คือ

แบบที่ 1 เป็นเอทานอล 95% ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงทดแทนน้ำมันเบนซิน และน้ำมันดีเซลใช้ได้กับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนการอัดสูง บราซิลเป็นประเทศแรกที่มีการศึกษาวิจัยและเริ่มใช้เอทานอลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงตั้งแต่ปี 2516 โดยผลิตเอทานอลจากอ้อย และกากน้ำตาล ยานพาหนะที่ใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงมีมากถึงประมาณร้อยละ 41 สำหรับในเครื่องยนต์ดีเซลสามารถใช้เอทานอลบริสุทธิ์ 95% ผสมในน้ำมันดีเซลเรียกว่า ดีโซฮอล (Diesohol) ในอัตราส่วนร้อยละ 15 และเพิ่มสารปรับปรุงคุณสมบัติบางตัวในปริมาณร้อยละ 1-2

แบบที่ 2 เอทานอลบริสุทธิ์ 99.5% โดยปริมาตร ผสมในน้ำมันเบนซินซึ่งจะเรียกว่า แก๊สโซฮอล (Gasohol) โดยทั่วไปใช้ผสมกับน้ำมันเบนซินอัตราส่วนร้อยละ 10 ในลักษณะของสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงค่าออกเทนของน้ำมันเบนซิน ซึ่งสามารถนำมาใช้งานกับเครื่องยนต์โดยทั่วไป ไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์แต่อย่างใด ซึ่งบราซิลก็ใช้เอทานอลผสมในน้ำมันเบนซินที่อัตราส่วนร้อยละ 22

แบบที่ 3 เป็นสารเคมีเพิ่มค่าออกเทน (Octane) แก่เครื่องยนต์ โดยการเปลี่ยนรูปเอทานอลมาเป็นสาร ETBE (Ethyl Tertiary Butyl Ether) สามารถใช้ทดแทนสาร MTBE (Methyl Tertiary Butyl Ether) ซึ่ง MTBE เป็นสารเติมแต่งในน้ำมันเบนซินที่หลายประเทศประกาศห้ามใช้เนื่องจากก่อให้เกิดมลภาวะในอากาศที่สูงกว่าสารเติมแต่งอื่นๆ เอทานอล ผลิตได้ทั้งจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี โดยใช้เอทิลีนเป็นวัตถุดิบ และกระบวนการทางชีวเคมี โดยใช้พืชผลหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลสูงเป็นวัตถุดิบ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมและมีวัตถุดิบที่สามารถเลือกใช้ได้หลากหลาย ชนิดตามความเหมาะสมของแต่ละประเทศ เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง มันสำปะหลัง อ้อย กากน้ำตาล สาหร่าย ฯลฯ นอกจากนั้นยังมีความพยายามพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบที่มีเซลลูโลสสูง เช่น ฟางข้าว ชี้อ้อย หญ้า เป็นต้น

## 2.1.2 การกลั่นเอทานอล

กระบวนการกลั่น คือ กระบวนการแยกสารผสมโดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่จุดเดือดที่แตกต่างกันของสารต่างชนิดกันเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่จุดเดือด สามารถใช้ในการแยกสารผสมเพื่อให้สารที่กลั่นได้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นนี้ จึงมีการประยุกต์ใช้คุณสมบัตินี้และพัฒนาจนมาเป็นหอกลั่นในปัจจุบัน กล่าวคือ เมื่อเราให้ความร้อนแก่สารผสมจนสารที่เบากว่าซึ่งมีความหนาแน่นจำเพาะต่ำกว่า จุดเดือดต่ำกว่าสารอื่นในสารผสม สารเบานี้จะกลายเป็นไอร้อน ไอร้อนจะลอยขึ้นสู่ชั้นที่อยู่สูงขึ้นไปและถ่ายเทความร้อนให้แก่สารในชั้นบนต่อไป นอกจากนี้ของเหลวที่เป็นสารผสมในชั้นบนๆขึ้นไป ถ้าอุณหภูมิไม่สูงพอที่จะระเหยได้ ก็จะไหลสวนทางกับไอร้อนเป็นการป้อนกลับภายใน (Internal Reflux) ลงสู่ชั้นล่างๆอีกด้วย ทำให้สารผสมชั้นบนๆจะมีความบริสุทธิ์ของสารเบาสูงขึ้น และสารที่หนักหอก็จะมีสารหนักซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงเช่นกัน โดยขนาดของหอ จำนวนชั้นของหอ อุณหภูมิของหอและอื่นๆที่ต้องการควบคุม จะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการกลั่น พิจารณาภายในหม้อต้มซ้ำ การที่มีจุดเดือดสูงกว่าจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หากต้องการให้เกิดการกลั่นแบบต่อเนื่องจำเป็นต้องมีการเพิ่มสารผสมเข้ามาในหอกลั่น โดยปกติการป้อนสารเข้าและความเข้มข้นของสารที่ป้อนเข้ามาจะมีค่าคงที่ ถ้าหากเกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารและการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารที่ป้อนเข้ามาในหอนี้ จะส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งโดยทั่วไปหากเกิดการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 10% อาจถือว่าเป็นการรบกวนระบบ ตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพควรสามารถควบคุมความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ให้อยู่ที่ค่าที่กำหนดได้แม้ว่าจะเกิดการรบกวนระบบขึ้น กระบวนการกลั่นยังต้องอาศัยกระบวนการอื่นๆซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการควบคุมหอกลั่นอีก ได้แก่ หม้อต้มซ้ำ (Reboiler) เครื่องควบแน่น (Condenser) วาล์วป้อนกลับ (Reflux Valve) ปั๊ม (Pump) และ อุปกรณ์การวัดและควบคุม เป็นต้น ดังนั้นหลักการพื้นฐานสำหรับการออกแบบหอกลั่น ควรศึกษาทฤษฎีที่สำคัญที่ค่าเกี่ยวข้องกับการระเหยของสาร

## 2.1.3 การถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer)

ในที่นี้หมายถึง การเคลื่อนย้าย (Migration) ขององค์ประกอบหนึ่งในของไหลชนิดหนึ่ง หรือการเคลื่อนย้ายขององค์ประกอบหนึ่งของของผสมหนึ่ง จากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ “ระบบที่ไม่อยู่ในสภาวะสมดุลมีแนวโน้มจะเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป”

การถ่ายเทมวลสารจะเกี่ยวข้องกับการบวนการในการแยกสารที่มีองค์ประกอบมากกว่าหนึ่งชนิด ออกจากกันวิธีการแยกโดยอาศัยการสัมผัสหรือการอยู่ร่วมกันของวัฏภาค (Phase) ต่างๆ เรียกว่า equilibrium separation processes ทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับสถานะของ phase นั้นการถ่ายเทมวลสารจะเกี่ยวข้องกับการกระบวนการในการแยกสารที่มีองค์ประกอบมากกว่าหนึ่งชนิดออกจากกันวิธีการแยกโดยอาศัยการสัมผัสหรือการ

อยู่ร่วมกันของวัฏภาค (phase) ต่างๆ เรียกว่า equilibrium separation processes ทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับสถานะของวัฏภาคนั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะเป็นวัฏภาค ของเหลว – ก๊าซ (Gas – Liquid phase) ประกอบด้วย

2.1.3.1 การกลั่น (Distillation) การให้ความร้อนกับของเหลวเพื่อให้สารที่ระเหยง่ายเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นสถานะก๊าซ

2.1.3.2 การดูดซึมของก๊าซ (Gas absorption) การใช้ของเหลวแยกก๊าซผสมออกจากกัน เช่น การใช้น้ำละลาย  $\text{NH}_3$  ออกจากอากาศ

2.1.3.3 การคายของก๊าซ (Gas desorption หรือ stripping) ใช้ก๊าซเพื่อแยกเอาก๊าซในของเหลวออก

#### 2.1.4 การควบแน่น (Condensation)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของไอเป็นของเหลว เมื่ออุณหภูมิของไอลดลง ในขณะที่อุณหภูมิก๊าซรอบๆ นั้นสูงกว่า (การควบแน่นเกิดจากผิวหน้าของอากาศเย็นลง) จะได้เป็นไอน้ำบริสุทธิ์ ในทางตรงกันข้ามอาจจะเป็นสารผสมของไอน้ำกับสารอื่นก็เป็นได้ การควบแน่นแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.1.4.1 การควบแน่นแบบแผ่น (Film-type condensation) คือ การควบแน่นที่ของเหลวที่ได้จากการควบแน่นมีลักษณะเป็นแผ่นบางอยู่บนผิวของผนัง การควบแน่นแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางปฏิบัติ

2.1.4.2 การควบแน่นแบบหยด (Drop wise condensation) คือ การควบแน่นที่ของเหลวที่ได้จากการควบแน่นมีลักษณะเป็นหยดอยู่บนผิวของผนัง อัตราการถ่ายเทความร้อนของการควบแน่นแบบนี้มีค่าสูงมาก แต่การควบแน่นแบบนี้จะเกิดในระยะแรกของการควบแน่น

### 2.2 ชนิดของการกลั่น

การกลั่นเป็นการแยกของเหลวที่สามารถระเหยได้ ซึ่งมีองค์ประกอบตั้งแต่ 2 ขึ้นไป แบ่งเป็น 3 ชนิด ดังนี้

#### 2.2.1 การกลั่นแบบธรรมดา (normal distillation)

การกลั่นแบบธรรมดาเหมาะสำหรับใช้กลั่นของผสมในของเหลวที่มี จุดเดือด (Boiling point) แตกต่างกันตั้งแต่ 80 องศาเซลเซียส ขึ้นไป

#### 2.2.2 การสกัดโดยการกลั่นด้วยไอน้ำ (steam distillation)

นิยมใช้สกัดน้ำมันหอมระเหยออกจากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น จากกาบใบตะไคร้หอม ดอกกุหลาบ ฝิวมะกรูด ใบยูคาลิปตัส สารที่ต้องการแยกต้องไม่ละลายน้ำ ระเหยได้ง่าย ถ้ามีจุดเดือดต่ำจะแยกได้ดีกว่าสารที่มีจุดเดือดสูง หลักการในการสกัดคือไอน้ำช่วยทำให้น้ำมันหอมระเหย กลายเป็นไอน้ำออกมากับไอน้ำ และควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำมันหอมระเหย ของเหลวที่กลั่นได้เป็นของเหลวที่แยกเป็น 2 ชั้น โดยมีน้ำอยู่ชั้นล่างและน้ำมันหอมระเหยอยู่ชั้นบน

#### 2.2.3. การกลั่นลำดับส่วน (fractional distillation)

การกลั่นลำดับส่วนเป็นวิธีการแยกของเหลวที่สามารถระเหยได้ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มีหลักการเช่นเดียวกับการกลั่นแบบธรรมดา คือเพื่อต้องการแยกองค์ประกอบในสารละลายให้ออกจากกัน แต่ก็มีส่วนที่แตกต่างจากการกลั่นแบบธรรมดา คือ การกลั่นแบบกลั่นลำดับส่วนเหมาะสำหรับใช้กลั่นของเหลวที่เป็น

องค์ประกอบของสารละลายที่จุดเดือดต่างกันน้อยๆ ในขั้นตอนของกระบวนการกลั่นลำดับส่วน จะเป็นการนำไอของแต่ละส่วนไปควบแน่น แล้วนำไปกลั่นซ้ำและควบแน่นไอรื้อย ๆ ซึ่งเทียบได้กับเป็นการการกลั่นแบบธรรมดาหลาย ๆ ครั้งนั่นเอง ความแตกต่างของการกลั่นลำดับส่วนกับการกลั่นแบบธรรมดา จะอยู่ที่คอลัมน์ โดยคอลัมน์ของการกลั่นลำดับส่วนจะมีลักษณะเป็นชั้นซับซ้อน เป็นชั้นๆ ในขณะที่คอลัมน์แบบธรรมดาจะเป็นคอลัมน์ธรรมดา ไม่มีความซับซ้อนของคอลัมน์ ในการกลั่นแบบลำดับส่วน จะต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า ๆ ดังนั้น จำเป็นที่จะต้องมีอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) และสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ เพราะของผสมที่กลั่นแบบลำดับส่วน มักจะมีจุดเดือดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งตรงกันข้ามกับการกลั่นแบบธรรมดา ความร้อนที่ให้ไม่จำเป็นต้องควบคุมเหมือนการกลั่นลำดับส่วน แต่ก็ไม่ควรให้ความร้อนที่สูงเกินไป เพราะความร้อนที่สูงเกินไป อาจจะไปทำลายสารที่เราต้องการกลั่นเพราะฉะนั้น ประสิทธิภาพในการกลั่นลำดับส่วนจึงดีกว่าการกลั่นแบบธรรมดา

## 2.3 สมดุลของก๊าซและของเหลว

เมื่อให้ความร้อนแก่ของเหลวผสมโดยรักษาความดันให้คงที่ค่าหนึ่ง ส่วนผสมของไอระเหยที่เกิดขึ้น อนุภาคนึง ๆ จะเกิดสมดุลกับส่วนผสมของของเหลวในขณะนั้น ซึ่งจะสามารถหาความสัมพันธ์ทางกายภาพได้ เรียกว่า สมดุลของก๊าซและของเหลวที่ความดันคงที่ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญที่สุดในการกลั่น

### 2.3.1 สมดุลของก๊าซและของเหลวภายใต้ความดันคงที่ในระบบที่มีสารองค์ประกอบ 2 ชนิด

สมดุลของก๊าซและของเหลวในระบบที่มีองค์ประกอบ 2 ชนิดภายใต้ความดันคงที่โดยทั่วไปจะแสดงด้วยเส้นกราฟจุดเดือด-เส้นกราฟควบแน่นโดยให้แกนนอนแสดงอัตราส่วนโดยโมลของสารองค์ประกอบที่มีจุดเดือดต่ำกว่าและให้แกนตั้งแสดงอุณหภูมิและสามารถปรับเป็นกราฟ x-y (x-y diagram) ได้ ในที่นี้  $x$  = สัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบที่มีจุดเดือดต่ำกว่าในสถานะของเหลว และ  $y$  = สัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบที่มีจุดเดือดต่ำกว่าในสถานะก๊าซ รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบที่สำคัญของสมดุลของก๊าซและของเหลวในระบบที่มีสารองค์ประกอบ 2 ชนิด โดยแบบ (a) เป็นสมดุลของก๊าซและของเหลวของระบบทั่วไป แบบ (b) และ (c) เป็นระบบที่ทำให้เกิด minimum azeotrope และ maximum azeotrope ตามลำดับ และแบบ (d) เป็นระบบที่ทำให้เกิด phase separation โดยในช่วงที่เส้นกราฟ  $x - y$  มีลักษณะเป็นเส้นระดับ จะเกิดสถานะก๊าซกับสถานะของเหลว 2 สถานะ

### 2.3.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ของสมดุลของก๊าซและของเหลว

สมดุลของก๊าซและของเหลวสามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ 2 รูปแบบดังนี้

ก. ผลบวกของความดันไอ  $p_i$  ของแต่ละสารทุกสารจะเท่ากับความดันรวม  $\pi$  (กฎของ Dalton)

$$\pi = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_i \quad (2.1)$$

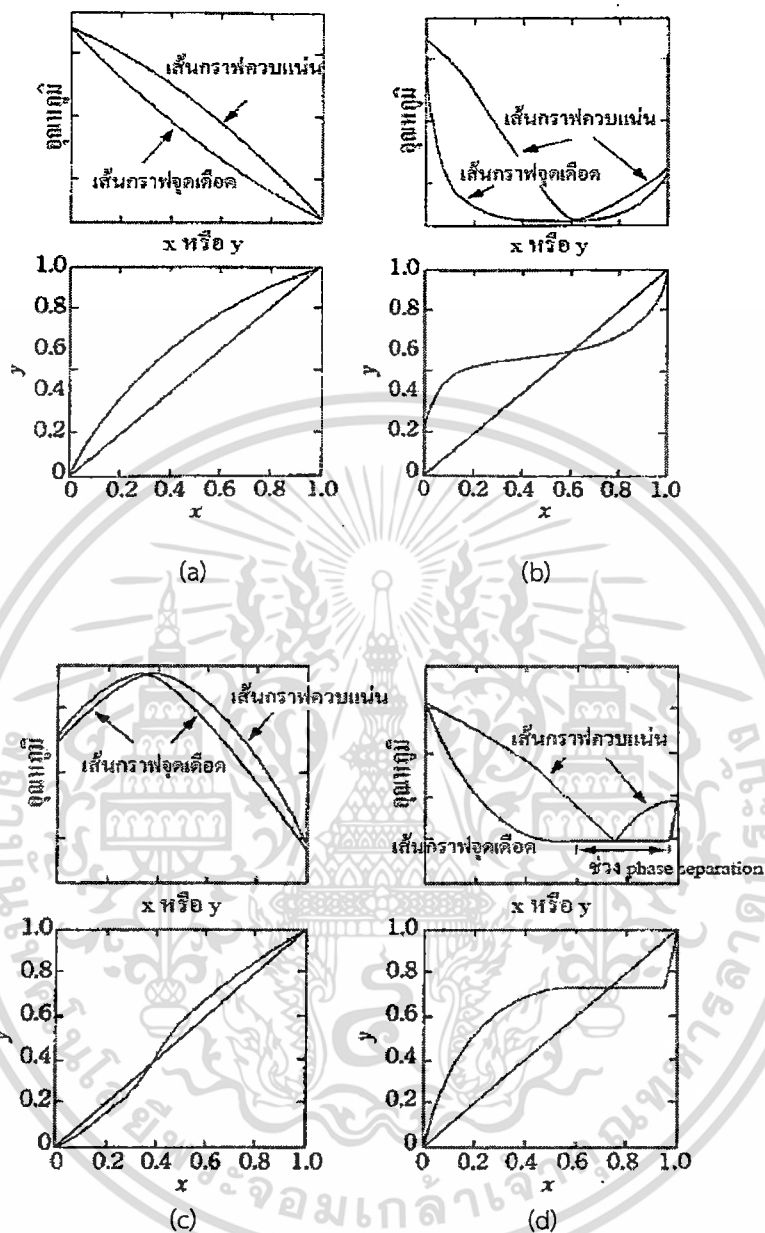
ข. ความดัน  $p_i$  ของไอระเหยสารองค์ประกอบ  $i$  จะเท่ากับผลคูณระหว่างความดันไอขององค์ประกอบบริสุทธิ์  $P_i^o$  กับสัดส่วนโดยโมลของเหลว  $X_i$  (กฎของ Raoult)

สารละลายที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้เป็นจริง เรียกว่า สารละลายอุดมคติ

$$p_1 = x_1 P_1^o, \quad p_2 = x_2 P_2^o, \quad p_3 = x_3 P_3^o, \quad \dots, p_i = x_i P_i^o \quad (2.2)$$

โดยในที่นี้

$$\sum x_i = 1 \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบที่สำคัญของสมดุลของก๊าซและของเหลวในระบบที่มีสารองค์ประกอบ

นอกจากนี้จะสามารถคำนวณสัดส่วนโดยโมลของไอระเหย,  $y_i$  ได้ดังนี้

$$y_i = \frac{p_i}{\pi} \quad (2.4)$$

กฎของเฮนรี่ (Henry's Law)

กฎของเฮนรี่ กล่าวว่า ความดันย่อยของไอของสารที่ระเหยง่ายเหนือสารละลายของมัน ณ อุณหภูมิหนึ่งจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้นในสารละลาย

$$p_i = Hx_i \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

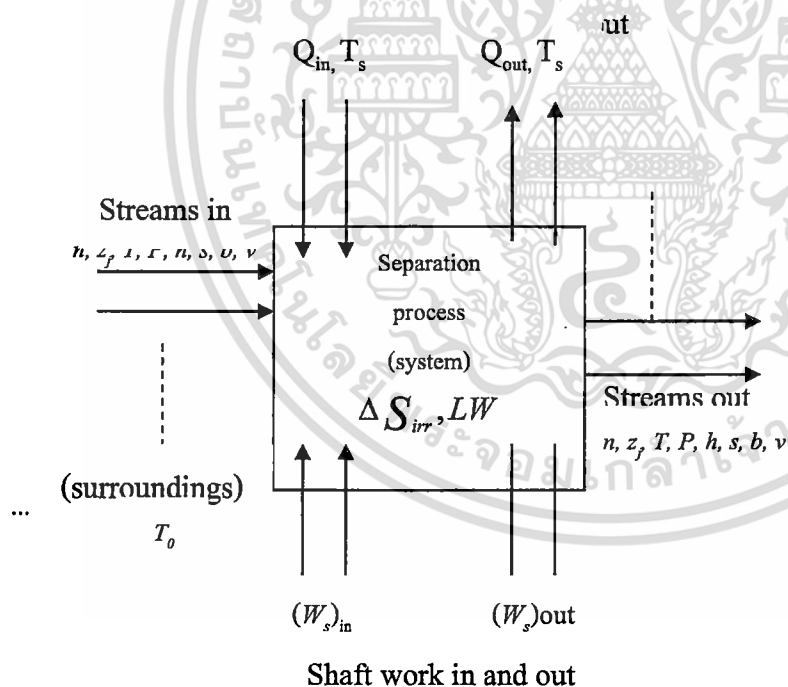
โดยที่  $p_i$  = ความดันย่อยของไอขององค์ประกอบ  $i$  เหนือสารละลายนั้น  
 $H$  = ค่าคงที่ของเฮนรี ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, ชนิดของตัวทำละลายและความดัน  
 $x_i$  = เศษส่วนโมลของส่วนประกอบ  $i$  ในสารละลาย

## 2.4 เคมีเชิงฟิสิกส์และเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการแยกสาร

การออกแบบอุปกรณ์การแยกสาร ต้องอาศัยการคำนวณด้วยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบด้วย คุณสมบัติขององค์ประกอบในระบบทั้งทางด้านกายภาพและสมบัติทางเคมีเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการศึกษาดังนี้

### 2.4.1 สมดุลพลังงาน สมดุลเอนโทรปี และสมดุลอื่นๆที่สำคัญ

กระบวนการแยกสารในอุตสาหกรรมเคมี ส่วนใหญ่จะมีการทำสมดุลมวลสารสมดุลพลังงาน สมดุลเอนโทรปี และสมดุลอื่นๆ ที่จำเป็นเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แยกสารไว้เสมอ ซึ่งในกระบวนการแยกสารทั่วไป มักจะอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady-state flow system) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 แสดงสายการป้อนที่ไหลเข้าสู่หน่วยแยกและจะถูกแยกออกเป็นผลิตภัณฑ์ออกมามากมาย ซึ่งจะพบว่าสายที่ป้อนเข้าและสายผลิตภัณฑ์ที่ไหลออกจากการแยกในหลายๆสายนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นมากมาย เช่น ด้านพลังงานความร้อน ( $Q$ ), เอนโทรปี, งาน ( $W$ ), และอื่นๆ มากมาย



รูปที่ 2.2 แสดงสายการป้อนที่ไหลเข้าสู่หน่วยแยก และจะถูกแยกออกเป็นผลิตภัณฑ์

เราสามารถทำสมดุลพลังงานและความร้อนตามกฎการอนุรักษ์พลังงานและกฎข้อที่ 1 เทอร์โมไดนามิกส์ได้ในเทอมสมดุลพลังงานและสมดุลเอนโทรปี ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\text{Stream enthalpy flows} + \text{heat transfer} + \text{shaft work})_{\text{leaving system}} - (\text{stream enthalpy flows} + \text{heat transfer} + \text{shaft work})_{\text{entering system}} = 0 \quad (2.6)$$

$$(\text{Stream entropy flows} + \text{entropy flows by heat transfer})_{\text{leaving system}} - (\text{stream entropy flows} + \text{entropy flows by heat transfer})_{\text{entering system}} = \text{production of entropy by the process} \quad (2.7)$$

## 2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกลั่นตัวของเอทานอล

### 2.5.1 ความดัน

โดยนิยามแล้ว ความดันคือแรงที่ของไหลกระทำต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยซึ่งตั้งฉากกับแนวแรงนั้น ความดันมีความหมายเฉพาะในของเหลวและก๊าซ ส่วนในของแข็ง แรงต่อพื้นที่เราเรียกว่า ความเค้น (stress) สำหรับของไหลที่อยู่กับที่ ความดันที่จุดจะมีค่าเท่ากันทุกทิศทาง โดยความดันจะแปรผันในแนวตั้งเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วง ส่วนในแนวระดับนั้นความดันมีค่าคงที่ ความดันของก๊าซที่บรรจุในถังสามารถคิดได้ว่ามีค่าเท่ากันตลอดถึง ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซมีน้ำหนักน้อยมากจนกระทั่งไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความดัน

### 2.5.2 อุณหภูมิ

ถึงแม้จะคุ้นเคยว่าอุณหภูมิเป็นตัววัดความรู้สึกร้อน/เย็น แต่การให้นิยามของอุณหภูมิอย่างแน่นอนนั้นเป็นเรื่องที่ยาก นอกจากนั้นแล้วการกำหนดตัวเลขแสดงอุณหภูมิจะใช้เพียงแต่ความรู้สึกเท่านั้นไม่ได้ เพราะผลที่ได้อาจให้ความหมายที่ผิดไป ตัวอย่างเวลาที่สัมผัสกับโลหะจะรู้สึกเย็นกว่าสัมผัสสอลโลหะ เช่น ไม้ แม้ว่าวัสดุทั้งสองมีค่าอุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากคุณสมบัติหลายชนิดของสารต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในลักษณะที่สามารถคาดหมายได้ เราจึงใช้ช่วยในการวัดอุณหภูมิ เช่นเราใช้การขยายตัวของปรอทตามอุณหภูมิมาสร้างเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเรียกว่าเทอร์โมมิเตอร์ เป็นต้น จากประสบการณ์เรารู้ว่าหากนำน้ำร้อนใส่แก้วมาวางไว้ในห้องที่มีอุณหภูมิตามปกติ น้ำร้อนจะค่อย ๆ เย็นลง อันเป็นผลเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนสู่อากาศภายในห้อง หรือหากเป็นการนำน้ำเย็นมาวางไว้ในห้องมันก็จะอุ่นขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการถ่ายเทความร้อนจากอากาศมาสู่น้ำเย็น ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่าหากนำวัตถุสองชิ้นซึ่งอุณหภูมิต่างกันสัมผัสกัน จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากวัตถุที่อุณหภูมิสูงกว่าไปยังวัตถุที่อุณหภูมิต่ำกว่า จนกระทั่งวัตถุทั้งสองมีอุณหภูมิเดียวกันซึ่ง ณ จุดดังกล่าวจะไม่มีการถ่ายเทความร้อน และกล่าวได้ว่าการสมดุลทางความร้อนเกิดขึ้น

กฎข้อที่ศูนย์ของเทอร์โมไดนามิกส์ (zeroth law of thermodynamics) กล่าวว่าวัตถุสองชิ้นต่างก็เกิดการสมดุลทางความร้อนกับวัตถุที่สาม โดยวัตถุทั้งสองนั้นจะต้องมีการสมดุลทางความร้อนต่อกันและกัน แม้ว่ากฎนี้จะไม่มีความชัดเจนที่ไม่อาจจะเป็นกฎ แต่มันก็เป็นพื้นฐานสำคัญในการวัดอุณหภูมิ ซึ่งวัตถุที่สามดังกล่าวก็คือเทอร์โมมิเตอร์นั่นเอง และกฎข้อที่ศูนย์นำมาใช้ได้ว่าวัตถุสองชิ้นอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนซึ่งกันและกัน (มีอุณหภูมิเดียวกัน) เมื่อมันสัมผัสกับเทอร์โมมิเตอร์และอ่านค่าได้เท่ากัน

## 2.6 กระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารบริสุทธิ์

สารบริสุทธิ์อยู่ในสภาวะสมดุลได้ทั้งสองสถานะ อาทิ น้ำที่อยู่ในสถานะของผสมระหว่างของเหลวและไอน้ำภายในหม้อน้ำและเครื่องควบแน่นของโรงจักรไอน้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำภายในช่องแข็งของตู้เย็น

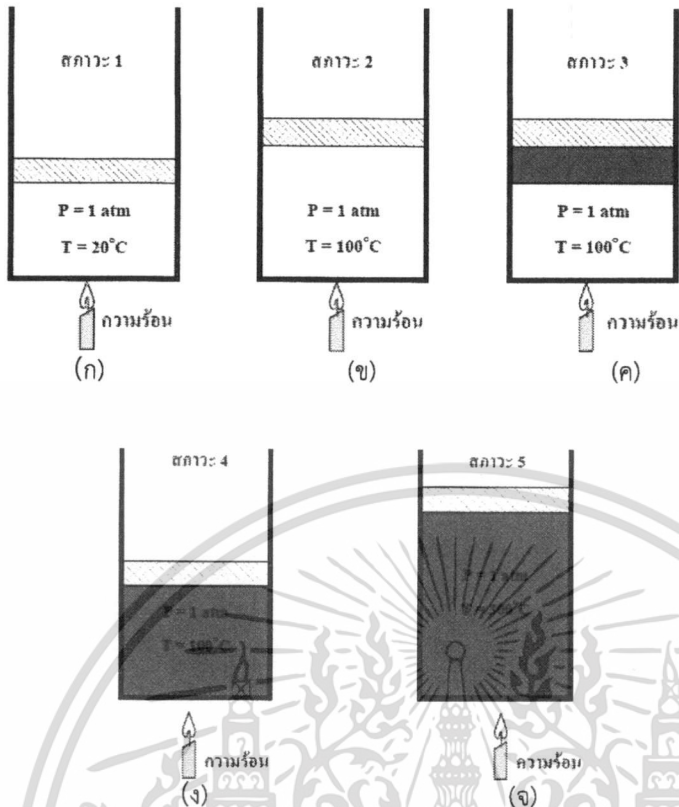
เป็นต้น แม้ว่า การเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของแข็งและของเหลว นั้นเป็นเรื่องสำคัญ แต่ในที่นี้เราจะเน้นไปที่ การเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของเหลวเป็นไอ

พิจารณากระบอกสูบในรูปที่ 2.3 (ก) บรรจุน้ำที่  $20^{\circ}\text{C}$  และความดัน  $1\text{ atm}$  ในสถานะที่ 1 ภายใต้สภาวะ ดังกล่าว น้ำอยู่ในสถานะของเหลว ซึ่งในเทอร์โมไดนามิกส์เรียกว่าเป็น ของเหลวอัด (compressed liquid) หมายความว่า ยังห่างจากการกลายเป็นไอน้ำมาก ต่อมา มีการถ่ายเทความร้อนจน

กระทั่งอุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นนี้ น้ำจะขยายตัวเล็กน้อย ส่งผลให้ปริมาตรจำเพาะของน้ำ เพิ่มขึ้น โดยลูกสูบจะขยับตัวขึ้นเล็กน้อย ในระหว่างกระบวนการดังกล่าวนี้ ความดันในกระบอกสูบมีค่าคงที่ที่  $1\text{ atm}$  เพราะค่าของน้ำขึ้นกับความดันบรรยากาศเฉพาะตำแหน่ง และน้ำหนักของลูกสูบ (ซึ่งมีค่าคงที่) เท่านั้น น้ำ ยังคงอยู่ในสถานะของเหลวและยังคงสภาพเป็นของเหลวอัด เมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนอุณหภูมิของน้ำเพิ่มเป็น  $100^{\circ}\text{C}$  ในสถานะที่ 2 ดังรูปที่ 2.3 (ข) ที่สภาวะนี้ น้ำยังอยู่ในสถานะของเหลว แต่การเพิ่มปริมาณความร้อนอีกไม่ว่าจะมีค่าน้อยเท่าใดจะส่งผลให้ของเหลวบางส่วนระเหยกลายเป็นไอ จุดนี้คือจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนสถานะจาก ของเหลวเป็นไอ และของเหลวในสถานะนี้เรียกว่า ของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid) ซึ่งก็คือของเหลวที่พร้อม จะระเหยเป็นไอ

ในกรณีที่มีการเดือด อุณหภูมิจะคงที่เมื่อความดันคงที่ จนกระทั่งของเหลวกลายเป็นไอหมด กล่าวคือ ในระหว่างการเปลี่ยนสถานะของสาร หากความดันของสารนั้นคงที่ อุณหภูมิของมันก็คงที่ด้วย (กรณีน้ำ ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิจะเท่ากับ  $100^{\circ}\text{C}$  ตลอดการเปลี่ยนสถานะ) และในระหว่างนี้ ปริมาตรจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยระดับของเหลวจะลดลงเนื่องจากเปลี่ยนสถานะไปเป็นไอ รูปที่ 2.3 (ค) แสดงสภาวะที่น้ำอยู่ในสถานะทั้ง ของเหลวและไอน้ำปนกันอยู่ ซึ่งถ้าเรายังคงให้ความร้อนต่อไป ปริมาตรของเหลวจะลดลงส่วนปริมาตรไอจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งหยดสุดท้ายของของเหลวกลายเป็นไอ ดังสภาวะที่ 4 รูปที่ 2.3 (ง) ที่สภาวะนี้ภายในกระบอกสูบจะ บรรจุด้วยไอซึ่งเป็นจุดแยกออกจากสถานะของเหลว ณ จุดนี้หากมีการสูญเสียความร้อนออกจากไอน้ำไม่ว่าจะเป็น ปริมาณมากหรือน้อยเพียงใด ไอก็จะควบแน่นเป็นของเหลวหรือเปลี่ยนสถานะจากไอเป็นของเหลว นั่นเอง ไอ ณ สภาวะนี้ เรียกว่า ไออิ่มตัว (saturated vapour) ซึ่งก็คือไอที่พร้อมจะควบแน่นเป็นของเหลว นั่นเอง สารที่อยู่ใน สภาวะระหว่างสภาวะที่ 2 และ 4 ดังเช่นสภาวะที่ 3 ในรูปที่ 2.3 (ค) เรียกว่า ของผสมอิ่มตัว (saturated liquid-vapour mixture) เนื่องจากทั้งของเหลวและไออยู่ในสภาวะสมดุลร่วมกัน

เมื่อกระบวนการแลกเปลี่ยนสถานะเป็นไปโดยสมบูรณ์ก็จะเป็นการกลับมาอยู่ในสถานะเดียวกันอีกครั้ง ในกรณีนี้คือสถานะไอ และถ้าเราให้ความร้อนต่อ ไอนี้ก็จะส่งผลให้ทั้งอุณหภูมิและปริมาตรจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นดัง รูปที่ 2.3 (จ) ที่สภาวะนี้ถ้าเราถ่ายเทความร้อนออกจากไอก็จะส่งผลให้อุณหภูมิลดลงแต่ไอนี้จะไม่ควบแน่นเป็น ของเหลวจนกว่าอุณหภูมิจะลดลงเป็น  $100^{\circ}\text{C}$  (สำหรับ  $P = 1\text{ atm}$ ) ไอที่ยังห่างจากการควบแน่นนี้เรียกว่า ไอ ร้อนยิ่งยวด (superheated vapour)



รูปที่ 2.3 กระบวนการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากสถานะของเหลวมาเป็นไอ ก)ของเหลวอืดตัว ข) ของเหลวอิมตัว ค) ของผสมอิมตัว ง) ไออิมตัว จ) ไอร้อนยิ่งยวด



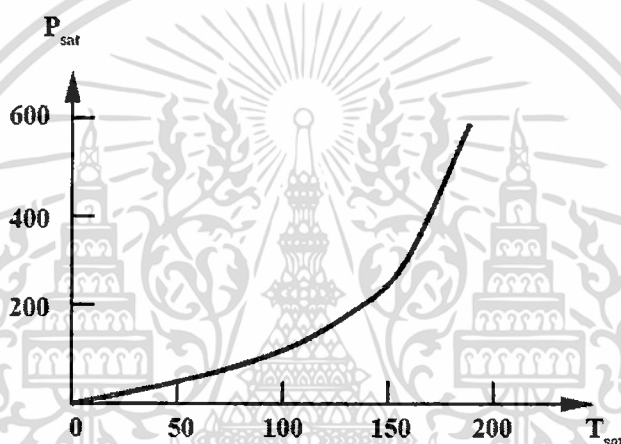
รูปที่ 2.4 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะในกระบวนการให้ความร้อนแก่น้ำที่ความดันคงที่

รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการเปลี่ยนสถานะในกรณีความดันคงที่บนแผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะ (T-v diagram) ซึ่งถ้าเราทำย้อนกลับทางคือคายความร้อนจากสภาวะที่ 5 ตามกระบวนการความดันคงที่ เส้นทางของกระบวนการก็จะย้อนทางกลับมายังสภาวะที่ 1 และปริมาณความร้อนที่คายออกก็จะมีค่าเท่ากับปริมาณความร้อนที่ใส่ให้ตามกระบวนการข้างต้น

ในทางปฏิบัติรู้ว่าน้ำเดือดที่  $100^{\circ}\text{C}$  แต่ในทางเทอร์โมไดนามิกส์การกล่าวว่าน้ำเดือดที่  $100^{\circ}\text{C}$  นั้นไม่ถูกต้อง คำกล่าวที่ถูกคือน้ำเดือดที่  $100^{\circ}\text{C}$  ณ ความดัน  $1\text{ atm}$  ซึ่งถ้าเปลี่ยนความดันไปอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเปลี่ยนไปด้วย เช่นถ้าเราเปลี่ยนความดันในกระบอกสูบในระบบข้างบนเป็น 500 kPa (โดยการใส่น้ำหนักเพิ่มไปบนลูกสูบ) น้ำก็จะเดือดที่ 151.9 °C กล่าวคืออุณหภูมิจุดเดือดของน้ำขึ้นอยู่กับความดัน ณ ความดันที่กำหนด อุณหภูมิที่สารบริสุทธิ์เริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นไอ เรียกว่า อุณหภูมิอิ่มตัว (saturation temperature;  $T_{sat}$ ) ในทางกลับกันถ้าเรากำหนดอุณหภูมิ ความดันที่สารบริสุทธิ์เปลี่ยนสถานะเป็นไอ เรียกว่าความดันอิ่มตัว (saturation pressure,  $P_{sat}$ ) ตัวอย่าง ที่ความดัน 101.35 kPa ค่าอุณหภูมิอิ่มตัว ( $T_{sat}$ ) คือ 100 °C และในทางกลับกันที่อุณหภูมิ 100 °C ค่าความดันอิ่มตัว ( $P_{sat}$ ) คือ 101.35 kPa ในระหว่างการเปลี่ยนสถานะนั้นความดันและอุณหภูมิเป็นคุณสมบัติที่แปรผันตรงต่อกัน ซึ่งในรูปคณิตศาสตร์สามารถเขียนได้เป็น  $T_{sat} = f(P_{sat})$  รูปที่ 2.10 แสดงการเขียนค่า  $T_{sat}$  เทียบกับ  $P_{sat}$  ซึ่งมีชื่อเรียกว่า เส้นโค้งของผสมไอกับของเหลวอิ่มตัว (liquid-vapour saturation curve) และสารบริสุทธิ์ทุกชนิดสามารถเขียนได้ในทำนองเดียวกันนี้



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันอิ่มตัวกับอุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำ

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่า  $T_{sat}$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ  $P_{sat}$  มีค่าเพิ่ม ดังนั้นที่ความดันสูงสารจะเดือดที่อุณหภูมิสูงขึ้น และในการทำอาหาร การเดือดที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้อาหารสุกเร็วขึ้น ดังเช่นกรณีของหม้อต้มเปื่อย (pressure cooker) นั่นก็อาศัยหลักการนี้ ซึ่งเป็นการประหยัดทั้งเวลาและพลังงานในการทำอาหาร

## 2.7 ความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration of solution)

ความเข้มข้นของสารละลาย คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนของตัวถูกละลายและตัวทำละลายในสารละลาย หน่วยความเข้มข้นของสารละลายมีหลายประเภท โดยสามารถคำนวณเปลี่ยนจากหน่วยความเข้มข้นจากหน่วยหนึ่งไปเป็นอีกหน่วยหนึ่งได้โดยการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ หน่วยความเข้มข้นของสารละลายที่สำคัญมีดังนี้

**2.7.1 ร้อยละของตัวถูกละลาย** เป็นหน่วยที่แสดงปริมาณของตัวถูกละลายในสารละลาย 100 ส่วน มี 3 แบบ ได้แก่

1) ร้อยละโดยมวล (%wt) หมายถึง มวลของตัวถูกละลายในสารละลาย 100 หน่วยมวลเดียวกัน สามารถคำนวณได้จาก

$$\%mass = \frac{\text{solvent mass}(g)}{\text{solute mass}(g)} \times 100 \quad (2.8)$$

2) ร้อยละโดยปริมาตร (%v) หมายถึง ปริมาตรของตัวถูกละลายในสารละลาย 100 หน่วยปริมาตรเดียวกัน นิยมใช้กับสารละลายที่มีตัวถูกละลายและตัวทำละลายเป็นของเหลวทั้งคู่ คำนวณได้จาก

$$\%Volumn = \frac{\text{solvent volumn}(cm^3)}{\text{solute volumn}(cm^3)} \times 100 \quad (2.9)$$

3) ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร (%wt/v) หมายถึง มวลของตัวถูกละลายเป็นกรัมในสารละลาย 100  $cm^3$  นิยมใช้กับสารละลายที่มีตัวถูกละลายเป็นของแข็งและตัวทำละลายเป็นของเหลว

$$\%(Mass / Volumn) = \frac{\text{solvent mass}(g)}{\text{solute volumn}(cm^3)} \times 100 \quad (2.10)$$

## 2.7.2 การเตรียมสารละลายจากสารละลายเข้มข้น หรือ การเจือจางสารละลาย

สารละลายเข้มข้น (Stock solution) คือ สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ใช้เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าโดย การเจือจางสารละลาย (Dilution) การเตรียมสารละลายในลักษณะนี้ค่อนข้างสะดวกเนื่องจากไม่จำเป็นต้องชั่งสารเพื่อมาละลายตั้งแต่ต้น ในการเจือจางสารละลายต้องเป็นการเติมตัวทำละลายลงไปเพิ่มแต่จำนวนโมลของตัวถูกละลายเท่าเดิม ดังนั้นในการคำนวณจึงยึดหลักที่ว่า จำนวนโมลของตัวถูกละลายก่อนเจือจาง = จำนวนโมลของตัวถูกละลายหลังเจือจาง จากหลักดังกล่าว ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$c_1 v_1 = c_2 v_2 \quad (2.11)$$

เมื่อ

$c_1$  และ  $c_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายก่อนเจือจางและหลังเจือจางตามลำดับ  
(หน่วย ความเข้มข้นเดียวกัน)

$v_1$  และ  $v_2$  = ปริมาตรของสารละลายก่อนเจือจางและหลังเจือจางตามลำดับ  
(หน่วยปริมาตรเดียวกัน)

## 2.8 วัสดุหอกลับ

### 2.3.1 ทองแดง (Copper: Cu)

ในธรรมชาติทองแดงส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแร่ซัลไฟด์และออกไซด์ และแร่ทองแดงส่วนใหญ่จะมีทองแดงเป็นส่วนประกอบไม่มากนัก แร่ที่สำคัญของทองแดงคือแร่คาลโคไพไรต์หรือคอปเปอร์ไพไรต์ นอกจากนี้มีแร่อื่นๆ เช่น คาลโคไซต์, คิวไพรต์, มาลาไคต์ การสกัดโลหะ Cu ออกจากแร่โดยทั่วๆ ไปมักจะนำแร่มาเผาในอากาศให้เป็นออกไซด์และซัลไฟด์แล้วเผาต่อจนได้โลหะ Cu หรือนำมาเผากับคาร์บอน

### 2.3.1.1 สมบัติทั่วไปของทองแดง

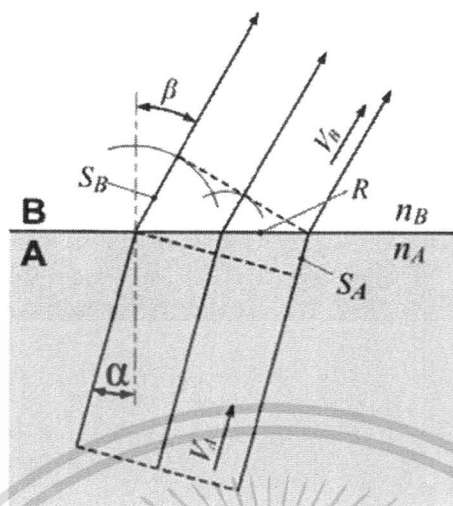
- 1) ทองแดงเป็นโลหะค่อนข้างอ่อน มีสีน้ำตาลแดง สามารถตีแผ่เป็นแผ่น และดึงเป็นเส้นได้ หรือทำให้เป็นรูปต่างๆได้ง่ายเป็นธาตุที่นำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดีมากรองจาก Ag
- 2) มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดค่อนข้างสูง
- 3) เลขออกซิเดชันที่สำคัญคือ +1 และ +2 โดย ไม่เสถียรเมื่ออยู่ในน้ำ แต่สารประกอบเชิงซ้อนของเสถียรและละลายอยู่ในน้ำได้
- 4) Cu สามารถทำปฏิกิริยากับธาตุโลหะบางชนิดเกิดเป็นสารประกอบได้

### 2.3.1.2 ประโยชน์โดยทั่วไปของทองแดง

- 1) เนื่องจากเป็นโลหะอ่อน จึงจัดเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย นำไฟฟ้าได้ดี ประโยชน์ส่วนใหญ่จึงใช้ในแง่ของงานด้านไฟฟ้า เช่น ทำสายไฟฟ้า อุปกรณ์และเครื่องมือไฟฟ้าต่างๆ หม้อนำรถยนต์
- 2) โลหะผสมของ Cu มีส่วนสำคัญต่องานต่างๆ มากมาย เช่น โลหะผสม Cu-Zn เรียกว่าทองเหลือง ใช้ประโยชน์สำหรับทำกลอนประตู ปลอกกระสุนปืน กุญแจ กระจดุม และใบพัดเรือ เป็นต้น โลหะผสม Cu-Sn เรียกว่า ทองสัมฤทธิ์ ใช้ทำลานนาฬิกา ปืนใหญ่ ทำระฆังโลหะผสม Cu-Al ก็จัดว่าเป็นทองสัมฤทธิ์อีกประเภทหนึ่ง ถ้ามี Al 25% จะมีสีคล้ายทองจึงใช้ทำทองเทียมได้ โลหะผสม Co75%Ni 25% ใช้ทำเหรียญกษาปณ์
- 3) สารประกอบของทองแดง ถ้ามีปริมาณมากๆ จะเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นจึงใช้สารประกอบของทองแดงบางชนิด เช่น คอปเปอร์(II)ออกไซด์ ทำยาฆ่าแมลง และฆ่าเชื้อรา
- 4) ร่างกายของคนก็ต้องการทองแดงเพื่อใช้ในกระบวนการทางชีวเคมีเฉพาะอย่าง ซึ่งถ้าขาดธาตุทองแดง อาจทำให้เกิดความบกพร่องในการสังเคราะห์ไขมันบางชนิด รวมทั้งทำให้เกิดโรคโลหิตจาง เพราะร่างกายดูดซึมเหล็กไม่ได้

## 2.9 ความสัมพันธ์ของดัชนีหักเหและความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อหน้าคลื่นของแสงตกกระทบกับผิวรอยต่อของสารที่มีความหนาแน่นสูง (A) และสารที่มีความหนาแน่นน้อย (B) เป็นมุม  $\alpha$  ดังรูปที่ 3.1 และเนื่องจากสาร A มีความเข้มข้นมากกว่าสาร B ด้วยเหตุนี้ ความเร็วของแสงจึงน้อยกว่าสาร B และหน้าคลื่นด้านซ้าย ( $S_B$ ) จึงยาวกว่าด้านขวา ( $S_A$ ) ความแตกต่างของหน้าคลื่นนี้เป็นผลให้เกิดการหักเหของแสง



รูปที่ 3.1 การหักเหของแสงที่รอยต่อ

เพราะฉะนั้น ระยะทาง  $S_A$  และ  $S_B$  จึงเป็นส่วนสัดส่วนกับความเร็วดังนี้

$$\frac{S_B}{S_A} = \frac{V_B}{V_A} = n, \quad V_B > V_A \quad (2.12)$$

อัตราส่วนนี้คือ ดัชนีหักเหระหว่างสองตัวกลาง ในสารละลายส่วนใหญ่ ความเข้มข้นของตัวละลายในตัวทำละลายสามารถพิจารณาได้ด้วยการวัดดัชนีหักเห โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับดัชนีหักเหขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและตัวละลาย อุณหภูมิ และความยาวคลื่น

### บทที่ 3

#### การออกแบบและวิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 การออกแบบหอกลิ้นเอทานอล

ตัวหอกลิ้นจะใช้ทองแดงเป็นวัสดุหลัก เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะที่นำความร้อนและทนต่อสภาพการกัดกร่อนได้ดีที่สุด จึงถูกนำมาใช้ในงานกลั่นเอทานอลทั่วไป ดังนั้นสิ่งสำคัญในการออกแบบหอกลิ้นเอทานอลที่จะต้องคำนึงถึง ณ ที่นี้ คือการเลือกใช้ทองแดงให้เหมาะสมกับประเภทของงาน เพราะทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน ก็จะมีควมหนาของผนังท่อต่างกันด้วย ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ท่อทองแดงขนาดมาตรฐานประเภท M ดังตารางที่ 3.1

TYPE 'M'							
Nominal Size (inch)	ACTUAL (inch)		ACTUAL (mm)		Mass** kg / 5.8m	Safe Working Pressure*(kPa)	Lengths per Bundle
	o.d.	w.t.	o.d.	w.t.			
1/4	3/8	0.025	9.52	0.64	0.93	5,233	100
3/8	1/2	0.025	12.70	0.64	1.26	3,859	100
1/2	5/8	0.028	15.88	0.71	1.76	3,409	100
5/8	3/4	0.030	19.05	0.76	2.27	3,026	100
3/4	7/8	0.032	22.22	0.81	2.82	2,763	100
1	1 1/8	0.035	28.58	0.89	4.02	2,351	100
1-1/4	1 3/8	0.042	34.92	1.07	5.90	2,312	50
1-1/2	1 5/8	0.049	41.28	1.24	8.10	2,266	30
2	2 1/8	0.058	53.98	1.47	12.59	2,050	30
2-1/2	2 5/8	0.065	66.68	1.65	17.49	1,859	30
3	3 1/8	0.072	79.38	1.83	23.14	1,730	20
3-1/2	3 5/8	0.083	92.08	2.11	30.95	1,719	20
4	4 1/8	0.095	104.78	2.41	40.22	1,726	10
5	4 1/8	0.109	130.18	2.77	57.54	1,595	8
6	6 1/8	0.122	155.58	3.10	77.06	1,492	5

\* Safe Working Pressures are based on annealed temper for temperatures up to 50°C

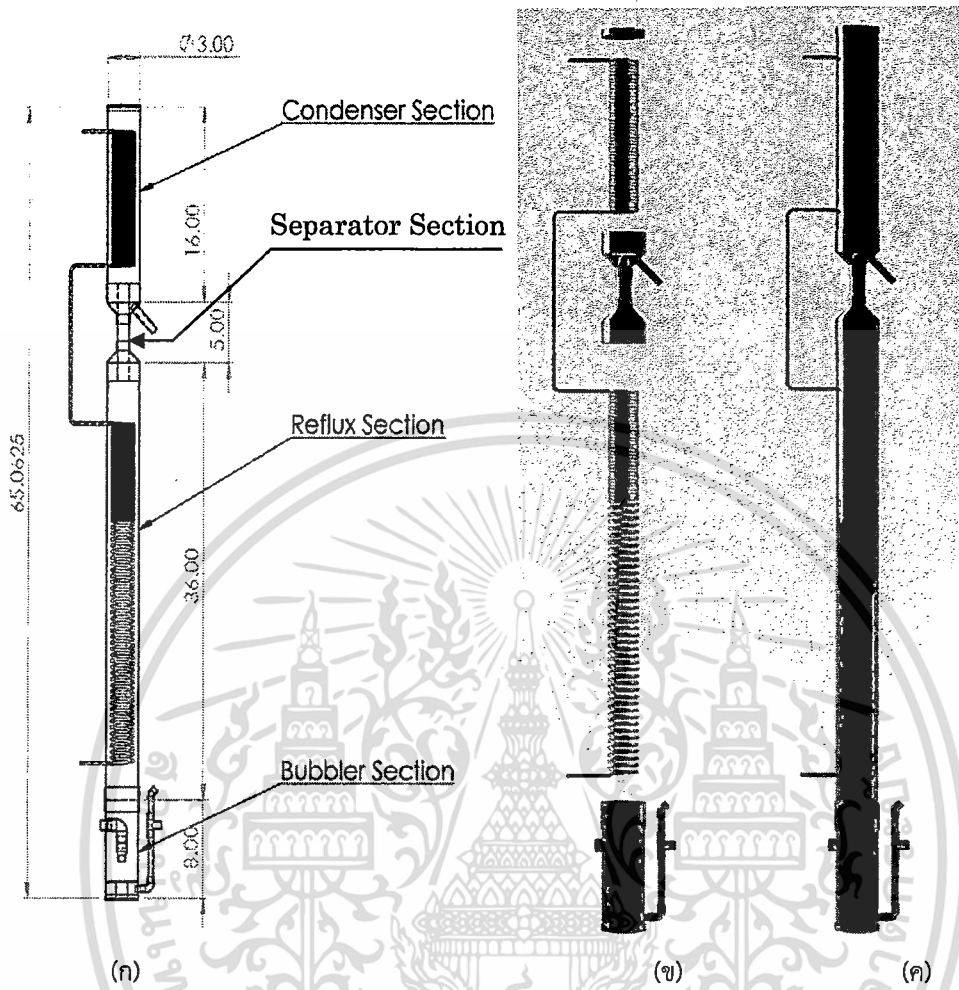
\*\* Mass are based on maximum tolerance wall thickness

ตารางที่ 3.1 ตารางขนาดมาตรฐานท่อทองแดงประเภท M

##### หมายเหตุ

1. Nominal Size (นิ้ว) คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน
2. O.D. (Outside Diameter: นิ้ว) คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก
3. การเรียกขนาดท่อทองแดงจะเรียกตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

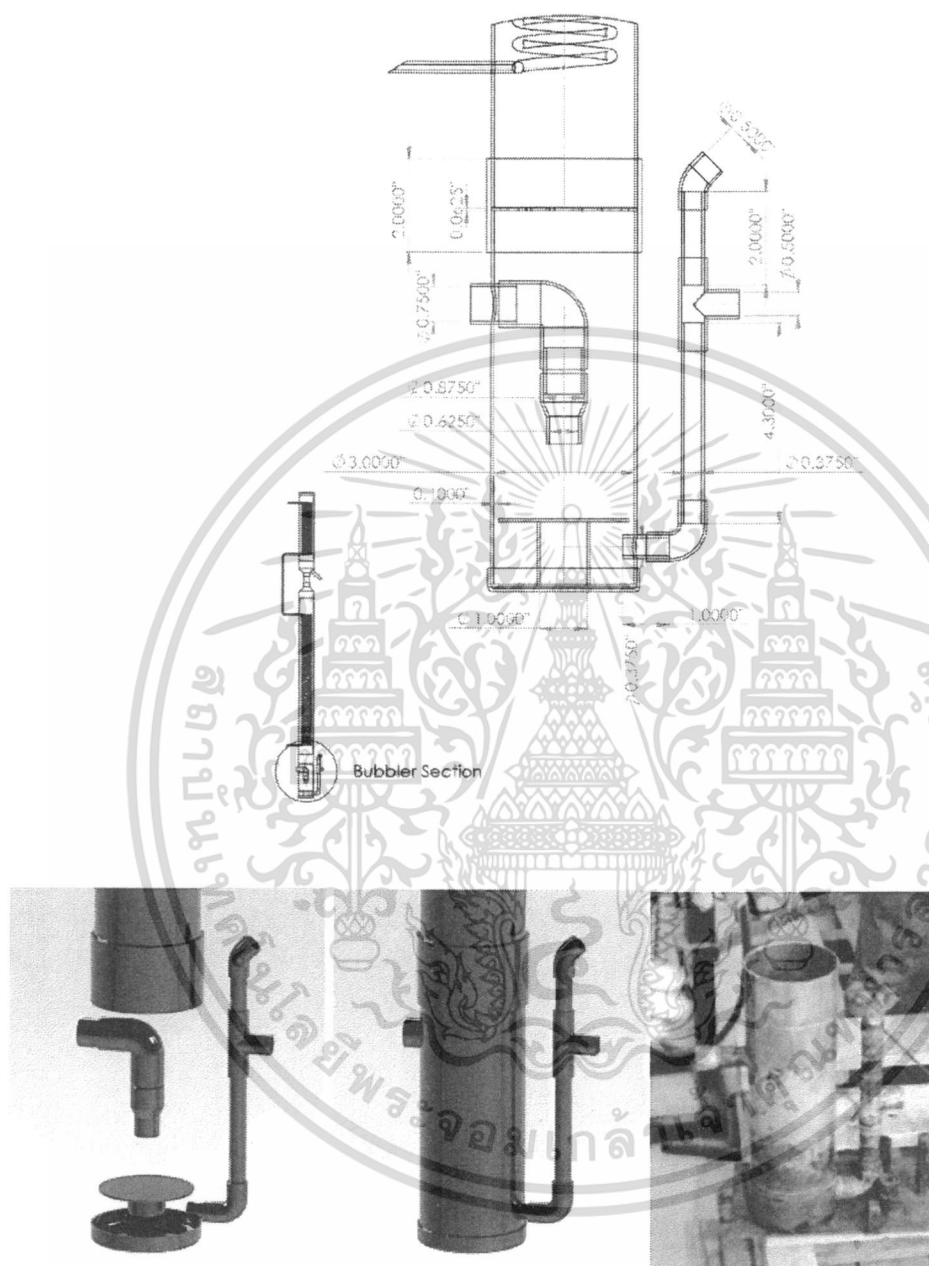
การออกแบบหอกลิ้นเอทานอลโดยใช้โปรแกรม Solid Work จะแบ่งส่วนประกอบหลักออกเป็น 4 ส่วน คือ Bubbler Section, Reflex Section, Separator Section และ Condenser Section ดังรูปที่ 3.1 โดยที่แต่ละส่วนจะมีรายละเอียดและหลักการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.2 – 3.10



รูปที่ 3.1 โครงสร้างหลักของหอกลั่น ก) ภาพร่างสองมิติ ข) ภาพสามมิติภายใน ค) ภาพสามมิติภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

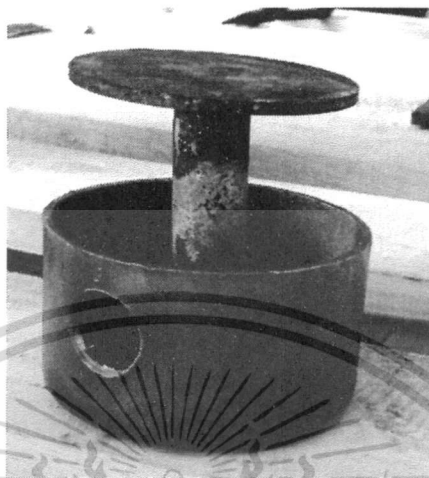
### 3.1.1 Bubbler Section



รูปที่ 3.2 Bubbler Section

Bubbler Section จะเป็นส่วนรับไอของสารละลายเอทานอลกับน้ำ ที่เข้ามาจากหมอต้ม ส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ไอผสมของน้ำและเอทานอลเข้ามาในหอกกลั่น โดยจะทำหน้าที่ลดแรงดันไอที่มาจากถังต้ม และทำหน้าที่ reflux เอทานอลที่อาจจะควบแน่นไปก่อนถึงส่วนควบแน่นให้กลายเป็นไอ รายละเอียดของส่วน Bubbler Section แสดงดังรูปที่ 3.3 และ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงส่วนล่าง Bubbler ซึ่งมีจานทองแดงสำหรับทำหน้าที่ลดแรงดันไอของน้ำและแอลกอฮอล์ที่เข้ามาในหอกกลั่น

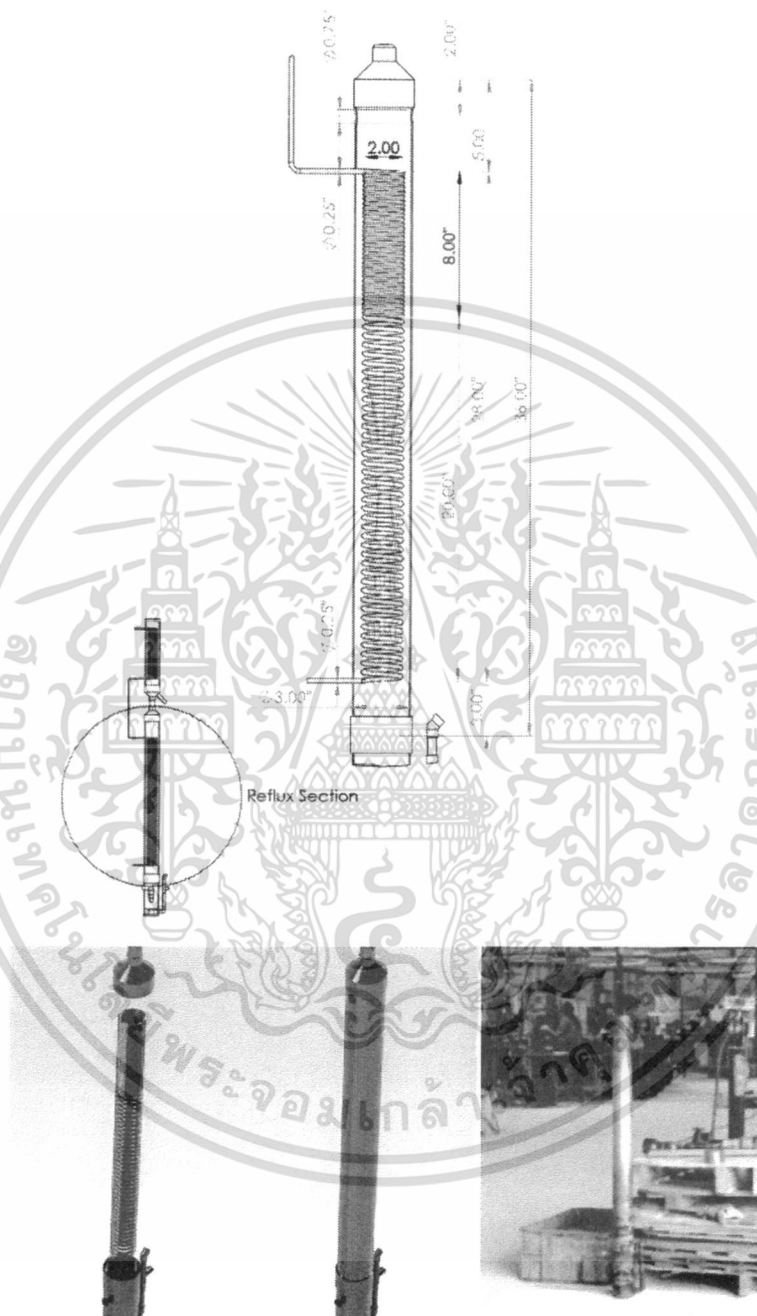


ท่อสำหรับไอผสมของน้ำและแอลกอฮอล์ที่เข้ามาในหอกกลั่น

รูปที่ 3.4 แสดงส่วน Bubbler ซึ่งคว่ำอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

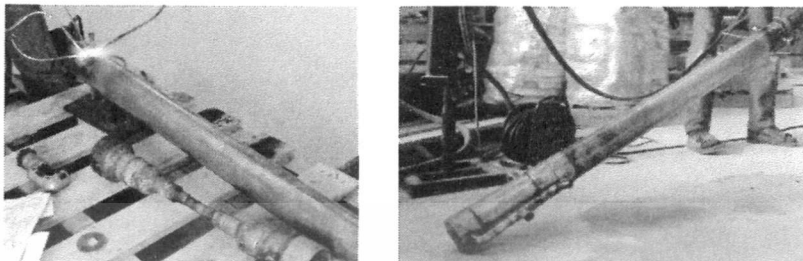
## 3.1.2 Reflex Section



รูปที่ 3.5 Reflex Section

Reflex Section เป็นส่วนที่สะสมและชะลอการควบแน่นของเอทานอลไม่ให้เกิดขึ้นเร็วเกินไป เพราะหากเราสามารถชะลอการควบแน่นได้นานก็จะทำให้ไอมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เอทานอลหลังผ่านกระบวนการกลั่นมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น และความสูงของส่วนนี้จะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของเอทานอลหลังผ่านกระบวนการกลั่น รายละเอียดของส่วน Reflex Section แสดงดังรูปที่ 3.6 และ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



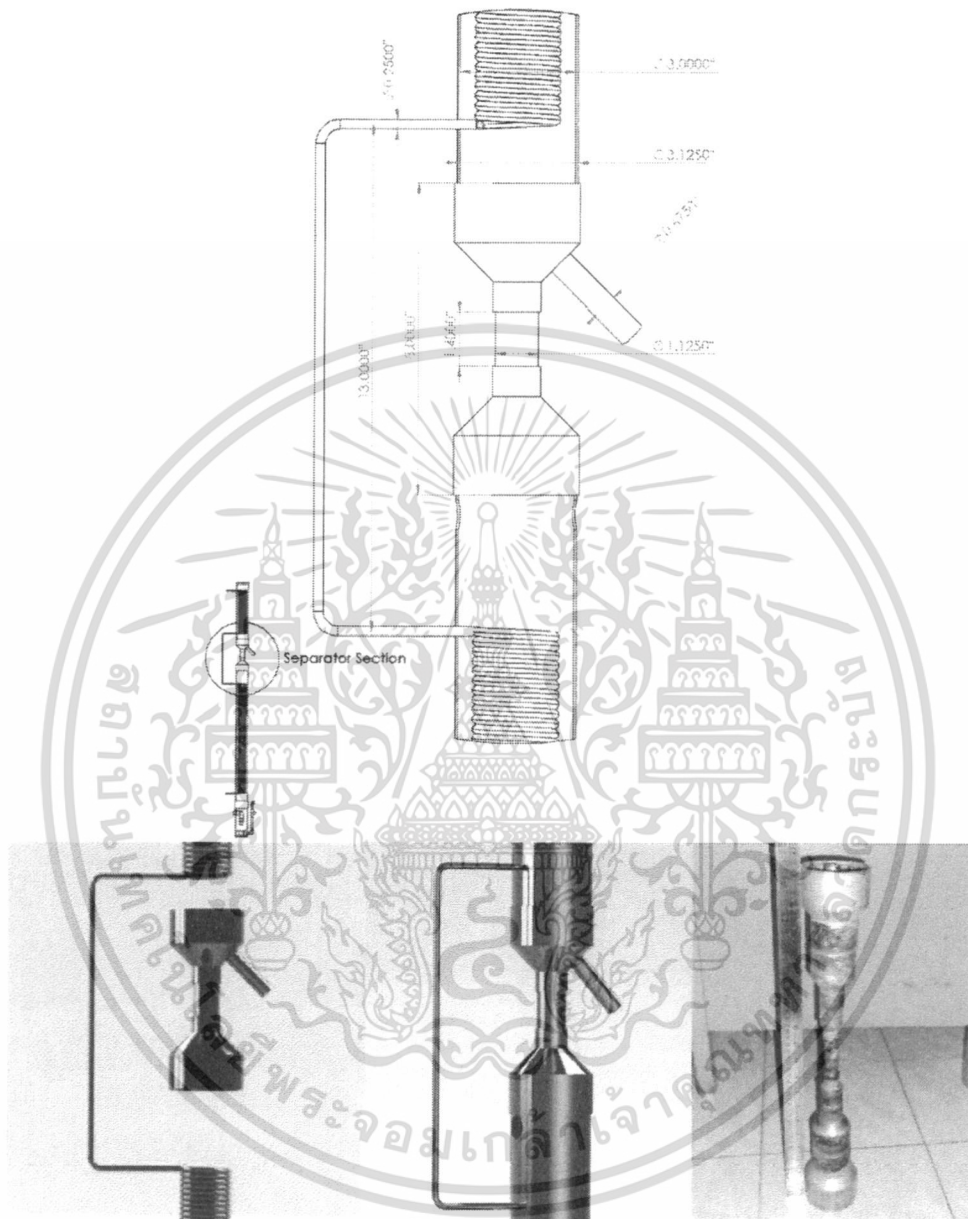
รูปที่ 3. 6 แสดงส่วน Reflux ซึ่งทำหน้าที่ควบแน่นน้ำและรักษาสภาพการเป็นไอของแอทานอล



รูปที่ 3.7 ภายในท่อ Reflux จะมีขดลวดความร้อน และลูกแก้วอยู่ภายใน ซึ่งขดลวดความร้อนจะรักษาอุณหภูมิอยู่ประมาณ 70 – 80 องศาเซลเซียส เพื่อให้ น้ำควบแน่นและแอทานอลยังคงเป็นไอ ส่วนลูกแก้วช่วยทำหน้าที่เสริมในการรักษาอุณหภูมิ และลดแรงดันไอเพื่อไม่ให้ไอน้ำความดันสูงจากถังต้มพุ่งทะลุไปยังหม้อกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 Separator Section

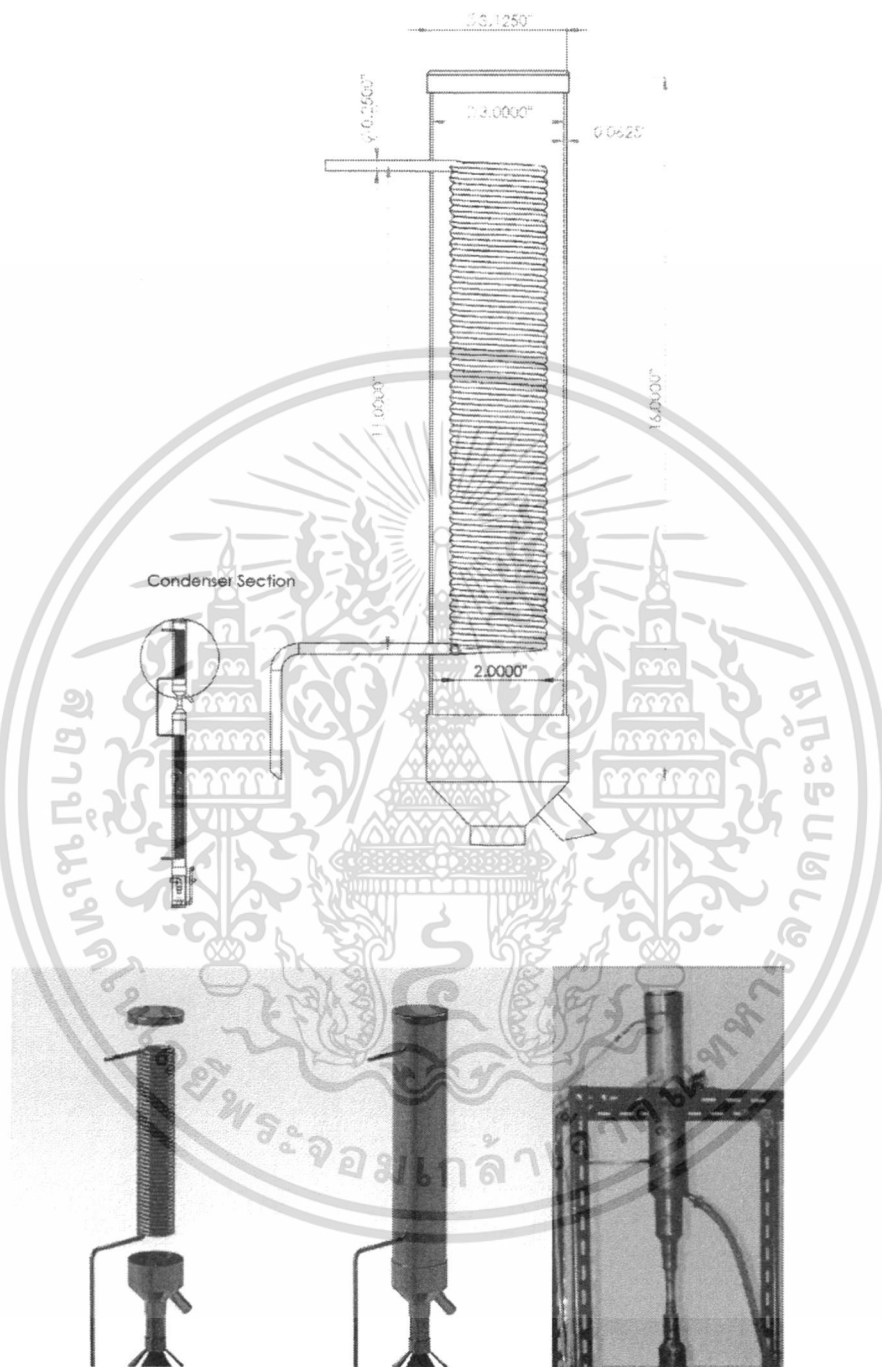


รูปที่ 3.8 Separator Section

Separator Section เป็นส่วนที่แบ่งระหว่าง Reflux Section และ Condenser Section โดยไอของสารละลายที่มีความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าจะลอยผ่านจุดนี้ ขึ้นไปยังส่วน Condenser Section ส่วนไอที่มีความเข้มข้นของเอทานอลต่ำกว่าจะ ถูกควบแน่นที่ส่วน Reflux Section

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 Condenser Section

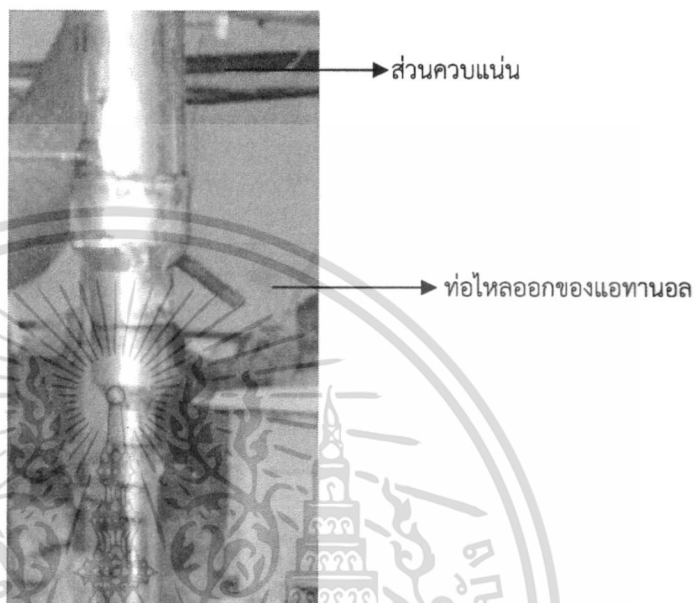


รูปที่ 3.9 Condenser Section

เป็นส่วนที่ไอของสารละลายเอทานอลเข้มข้นจะลอยขึ้นมาจนถึงส่วนนี้ และจะถูกควบแน่นด้วยชุดทำความเย็นที่ผ่านขดลวดทองแดง โดยจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากไอสู่ขดลวดเย็นจนกระทั่งไอของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอทานอลเข้มข้นก้นตัวเป็นของเหลวอีกครั้ง รายละเอียดของส่วน Reflex Section แสดงดังรูปที่ 3.10 และ 3.11



รูปที่ 3.10 แสดงส่วนควบแน่นและท่อไหลออกของเอทานอล

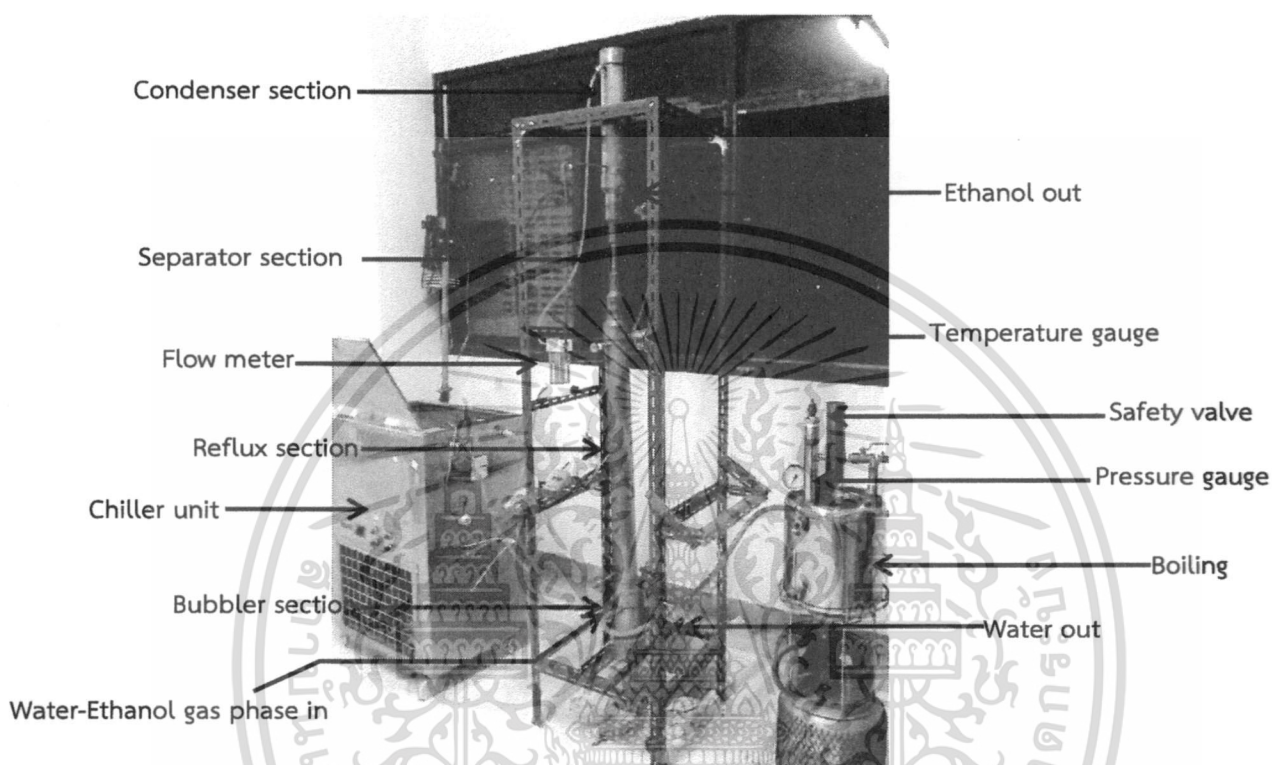


รูปที่ 3.11 แสดงขดลวดความเย็นซึ่งจะบรรจุอยู่ภายในส่วนควบแน่น ทำให้ไอของเอทานอลควบแน่นเป็นของเหลว

รูปที่ 3.12 แสดงรายละเอียดสมบูรณ์ของหอก้นเอทานอล ที่ประกอบเรียบร้อย โดยจะใช้แก๊สเป็นแหล่งพลังงานที่จะให้ความร้อนกับถังต้มซึ่งมีน้ำผสมอยู่กับเอทานอล 7 ลิตร ในอัตราส่วนน้ำต่อเอทานอล 4:3 ซึ่งในเบื้องต้นจะทดสอบการกลั่นโดยการกำหนดความดันในถังต้มให้มีค่าเท่ากับ 0.2 bar, 0.4 bar, 0.6 bar, 0.8 bar, และ 1.0 bar เพื่อพิสูจน์ทราบว่าหอก้นที่ออกแบบไว้ มีศักยภาพที่จะกลั่นเอทานอลให้ได้ความบริสุทธิ์สูงหรือไม่ โดยเอทานอลที่กลั่นได้ที่มีความดันต่างๆ จะถูกนำไปวัดค่าดัชนีหักเห ซึ่งได้ทำสมการสอบเทียบไว้แล้ว โดยการทำการสอบเทียบ (calibration curve) จะทำการเจือจางเอทานอลความเข้มข้น 95% หลังจากนั้นนำเอทานอลที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านการเจือจางให้มีค่าความเข้มข้นต่างๆ ใว้วัดด้วยเครื่องดัชนีหักเหแสดงดังรูปที่ 3.13 หลังจากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้น เราก็จะได้สมการสอบเทียบ



รูปที่ 3.12 หอกั่นแเอทานอลที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

### 3.2 วัดค่าความเข้มข้นของเอทานอลโดยการสอบเทียบกับ Calibration Curve

#### 3.2.1 การทำ Calibration Curve ของเอทานอล

1. เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน ดังนี้ 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90% และ 95% ตามลำดับ โดยเตรียมที่ปริมาตร 10 ml แสดงข้อมูลดังตารางที่ 3-1

2. ทำการ Calibrated เครื่อง Refractometer โดยใช้น้ำกลั่น
3. วัดค่าดัชนีหักเหของทุกๆ ความเข้มข้นทั้งหมด 5 ครั้ง โดยใช้เครื่อง Refractometer
4. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของเอทานอลโดยใช้โปรแกรม MathLab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-1 ความเข้มข้นโดยปริมาตรของเอทานอลสำหรับทำ Calibration Curve

จำนวนตัวอย่าง สารละลาย	ความเข้มข้นของสารละลาย โดยปริมาตร	ปริมาตรของเอทานอล (ml)	ปริมาตรของน้ำกลั่น (ml)
1	5%	0.5	9.5
2	10%	1.0	9.0
3	15%	1.6	8.4
4	20%	2.1	7.9
5	25%	2.6	7.4
6	30%	3.2	6.8
7	35%	3.7	6.3
8	40%	4.2	5.8
9	45%	4.7	5.3
10	50%	5.3	4.7
11	55%	5.8	4.2
12	60%	6.3	3.7
13	65%	6.8	3.2
14	70%	7.4	2.6
15	75%	7.9	2.1
16	80%	8.4	1.6
17	85%	8.9	1.1
18	90%	9.5	0.5
19	95%	10	0

### 3.2.2 เงื่อนไขการทดลอง

1. การเตรียมสารละลายผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำ โดยเตรียมสารละลายปริมาตร 7000 ml โดยผสมเอทานอล 3000 ml กับน้ำกลั่น 4000 ml เพื่อทำการทดลอง
2. ให้ความร้อนกับหม้อต้ม จนหม้อต้มมีความดัน ดังนี้ 0.2 บาร์, 0.4 บาร์, 0.6 บาร์, 0.8 บาร์ และ 1.0 บาร์ ตามลำดับ
3. เปิดวาล์วให้ความดันไอเข้าสู่หอกลิ้น ทำการจับเวลาทุกๆ 10 นาที เพื่อสังเกตดูว่าที่เวลา (นาที) และอุณหภูมิในหอกลิ้นเท่าไรที่เอทานอลจะเกิดการกลั่นตัวออกมา
4. บันทึกอุณหภูมิในหอกลิ้นและเวลา(นาที) ที่เอทานอลเกิดการกลั่นตัวออกมา
5. นำเอทานอลที่ได้ไปวัดค่าความเข้มข้น(%) โดยสอบเทียบจาก Calibration Curve

## บทที่ 4 การอภิปรายผลการทดลอง

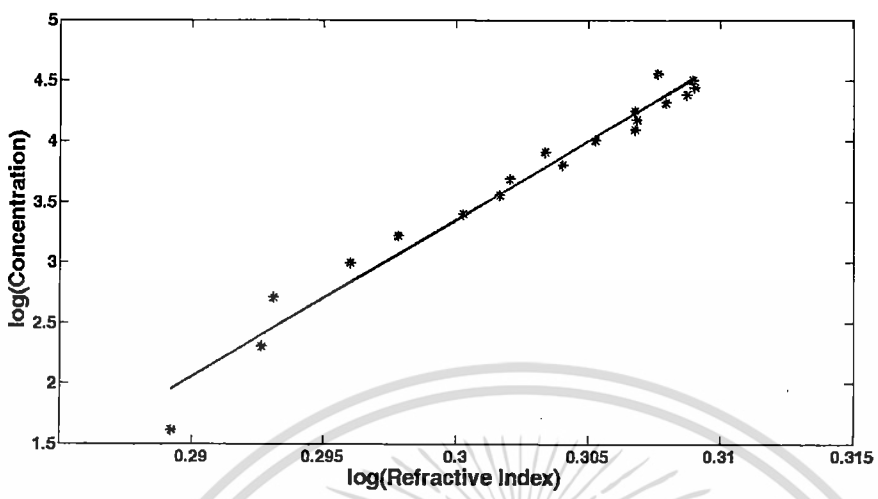
### 4.1 Calibration Curve ของเอทานอล

เตรียมความเข้มข้นของสารละลายผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำในหน่วยร้อยละโดยปริมาตร จากความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้น 95% และทำการวัดค่า Refractive index ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะแสดงผลดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ค่าดัชนีหักเหของเอทานอลและความเข้มข้นที่ได้จากการวัดที่ความเข้มข้นต่างๆ

จำนวนตัวอย่าง สารละลาย	ค่าความเข้มข้นของ สารละลายผสม (%)	ค่าดัชนีหักเห
1	5	1.3354
2	10	1.340
3	15	1.3406
4	20	1.3445
5	25	1.3469
6	30	1.3502
7	35	1.3521
8	40	1.3526
9	45	1.3553
10	50	1.3544
11	55	1.3570
12	60	1.3590
13	65	1.3591
14	70	1.3590
15	75	1.3606
16	80	1.3617
17	85	1.3621
18	90	1.3620
19	95	1.3602

จากตารางที่ 4-1 จะเห็นว่าค่า Refractive index จะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้น เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Refractive index (n) กับค่าความเข้มข้น(%) จะได้กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.1



รูปที่ 4. 1 Calibration Curve ของเอทานอลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้น

จากกราฟจะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าความเข้มข้นกับค่าดัชนีหักเห ดังสมการที่ 4.1

$$\log X = 129.8381 \log n - 35.5998 \tag{4.1}$$

เมื่อ  $X$  = ความเข้มข้นของเอทานอล (%)  
 $n$  = ค่าดัชนีหักเห

**4.2 ผลของความดันที่มีต่อการควบแน่นของเอทานอล**

**4.2.1 ความดัน 0.2 บาร์ และ 0.4 บาร์**

ตารางที่ 4.1 เวลา (นาทื) และอุณหภูมิในหอกลั่นที่เอทานอลเกิดการกลั่นตัวที่ความดัน 0.2 บาร์ และ 0.4 บาร์

เวลา (นาทื)	0.2 บาร์		0.4 บาร์	
	อุณหภูมิในหอกลั่น (°C)	การควบแน่นของเอทานอล	อุณหภูมิในหอกลั่น (°C)	การควบแน่นของเอทานอล
0	32	x	32	x
10	32	x	32	x
20	32	x	32	x
30	32	x	32	x
40	32	x	32	x
50	32	x	32	x
60	32	x	32	x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

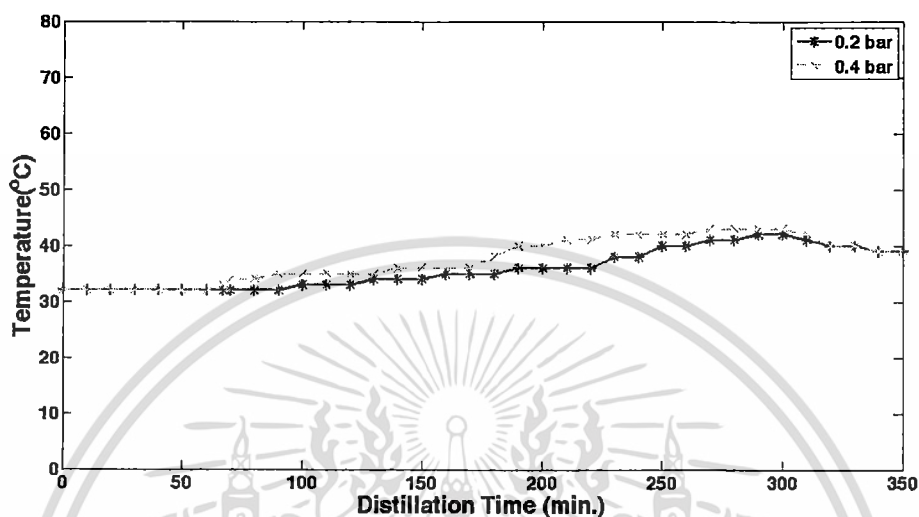
70	32	x	33	x
80	32	x	34	x
90	32	x	35	x
100	33	x	35	x
110	33	x	35	x
120	33	x	35	x
130	34	x	35	x
140	34	x	36	x
150	34	x	36	x
160	35	x	36	x
170	35	x	36	x
180	35	x	38	x
190	36	x	40	x
200	36	x	40	x
210	36	x	41	x
220	36	x	41	x
230	38	x	42	x
240	38	x	42	x
250	40	x	42	x
260	40	x	43	x
270	41	x	43	x
280	41	x	43	x
290	42	x	43	x
300	42	x	43	x
310	41	x	42	x
320	41	x	40	x
330	40	x	40	x
340	39	x	39	x
350	39	x	39	x

หมายเหตุ: x ไม่มีการควบแน่นของเอทานอลเกิดขึ้น

จากตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อป้อนความดันเข้าหอกลั่นที่ค่าความดัน 0.2 บาร์ และ 0.4 บาร์ จะไม่เกิดการควบแน่นของเอทานอล และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น อุณหภูมิภายในหอกลั่นก็เริ่มลดลง ทำให้ไอเอทานอลควบแน่นในส่วนของ Reflux section รูปที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิภายในหอกลั่นซึ่งวัดที่ตำแหน่งบนสุดของส่วน Reflux section

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าอุณหภูมิภายในหอกลั่น จะอยู่ต่ำกว่าจุดเดือดของเอทานอลมาก แสดงให้เห็นว่า เอทานอลควบแน่นใน ส่วน Reflux section ทั้งหมด ถึงแม้ว่าจะให้ความร้อนถึง 350 นาที ก็ไม่มีผลทำให้เอทานอลควบแน่นได้



รูปที่ 4. 2 อุณหภูมิภายในหอกลั่นเมื่อให้ความดันเข้าหอกลั่นเป็น 0.2 บาร์ และ 0.4 บาร์

#### 4.2.2 ความดัน 0.6 บาร์ 0.8 บาร์ และ 1.0 บาร์

ตารางที่ 4.2 เวลา (นาที) และอุณหภูมิในหอกลั่นที่เอทานอลเกิดการกลั่นตัวที่ความดัน 0.6 บาร์ , 0.8 บาร์ และ 1.0 บาร์

เวลา (นาที)	0.6 บาร์		0.8 บาร์		1.0 บาร์	
	อุณหภูมิในหอกลั่น (°C)	การควบแน่นของเอทานอล	อุณหภูมิในหอกลั่น (°C)	การควบแน่นของเอทานอล	อุณหภูมิในหอกลั่น (°C)	การควบแน่นของเอทานอล
0	32	x	32	x	32	x
10	32	x	32	x	32	x
20	32	x	33	x	32	x
30	32	x	35	x	33	x
40	32	x	35	x	33	x
50	32	x	35	x	34	x
60	32	x	36	x	35	x
67	32	x	36	x	76	✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

70	32	x	77	✓	77	✓
80	32	x	79	✓	78	✓
90	33	x	79	✓	78	✓
100	38	x	79	✓	78	✓
110	46	x	79	✓	78	✓
120	76	✓	79	✓	78	✓
130	77	✓	76	✓	79	✓
140	78	✓	78	✓	76	✓
150	78	✓	78	✓	78	✓
160	78	✓	79	✓	79	✓
170	78	✓	77	✓	76	✓
100	38	x	79	✓	78	✓
110	46	x	79	✓	78	✓
120	76	✓	79	✓	78	✓
130	77	✓	76	✓	79	✓
140	78	✓	78	✓	76	✓
150	78	✓	78	✓	78	✓
160	78	✓	79	✓	79	✓
170	78	✓	77	✓	76	✓
180	78	✓	79	✓	77	✓
190	76	✓	79	✓	78	✓
200	77	✓	76	✓	79	✓
210	77	✓	78	✓	79	✓
220	78	✓	78	✓	79	✓
230	79	✓	76	✓	79	✓
240	79	✓	77	✓	79	✓

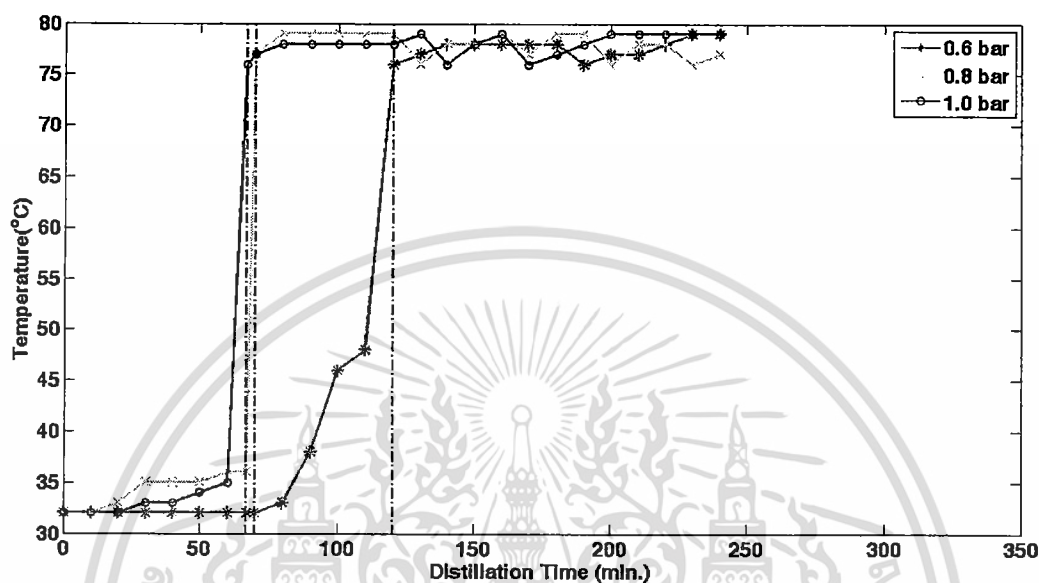
หมายเหตุ : x ไม่มีการควบแน่นของเอทานอลเกิดขึ้น

✓ มีการควบแน่นของเอทานอล

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า เมื่อให้ความดันในถังต้มเพิ่มขึ้นเอทานอลจะเริ่มมีการควบแน่น โดยที่ยังความดันสูงขึ้น เวลาในการกลั่นตัวก็จะยิ่งเร็วขึ้นด้วย โดยความดันที่ 0.6 บาร์ เอทานอลจะเริ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบแน่นที่เวลาประมาณ 120 นาที สำหรับความดัน 0.8 บาร์ และ 1.0 บาร์ จะใช้เวลาประมาณ 70 นาที และ 67 นาที ตามลำดับ โดยอุณหภูมิในหม้อกลั่นตรงจุดที่วัดจะอยู่ในช่วง 76 – 78 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4. 3 อุณหภูมิภายในหม้อกลั่นเมื่อให้ความดันเข้าหม้อกลั่นเป็น 0.6 บาร์ 0.8 บาร์ และ 1.0 บาร์

#### 4.3 ความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการกลั่น

เอทานอลที่ได้จากกลั่นที่ความดัน 0.6 บาร์ 0.8 บาร์ และ 1.0 บาร์ จะถูกนำไปวัดค่าดัชนีหักเหของแสง ค่าดัชนีหักเหที่ได้จะถูกนำไปสอบเทียบ ตามสมการที่ 4.1 ความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากกลั่น และสอบเทียบแล้ว แสดงในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อความดันสูงขึ้น ความเข้มข้นของเอทานอลจะสูงขึ้นด้วย ตารางที่ 4.3 ค่าดัชนีหักเหของเอทานอลและความเข้มข้นที่ได้จากการกลั่นที่ความดันต่างๆ

ความดัน (บาร์)	ค่าดัชนีหักเห	% ความเข้มข้น
0.6	1.3611	83.8
0.8	1.3622	93.0
1.0	1.3623	93.5

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

หอกันเอทานอลที่สร้างขึ้น มีความสูงจากฐานถึงส่วนบนทั้งหมด 195 เซนติเมตร โดยปรับขนาดของส่วน separator section ให้ยาวขึ้นจากแบบที่เขียนไว้ เนื่องจากขนาดตามแบบไม่สามารถจะสร้างได้ เมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์มีน้ำหนักรวม 45 กิโลกรัม เมื่อทดสอบการกลั่น โดยพิจารณาความดันในหม้อต้มที่มีผลต่อการกลั่นตัวของเอทานอล โดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อเอทานอล 4:3 ลิตร ใช้เวลาในการทำ ความดันถึง 0.6 bar, 0.8 bar และ 1.0 bar เท่ากับ 20 นาที, 30 นาที และ 40 นาที ตามลำดับ อุณหภูมิที่เกิดการกลั่นตัวจะอยู่ระหว่าง 76-79 องศาเซลเซียส โดยที่ความดัน 1.0 bar เอทานอลจะเริ่มกลั่นตัวเร็วที่สุด โดยใช้เวลา 67 นาที และจากการใช้สมการสอบเทียบ เราจะได้ความเข้มข้นของเอทานอลตามความดันที่เพิ่มขึ้น คือ 83.8%, 93.0% และ 93.5% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความดันต่ำ คือ 0.2 bar และ 0.4 bar ไม่สามารถทำให้เกิดการควบแน่นของเอทานอลได้

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการควบคุมความดัน อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และอุณหภูมิของหม้อต้ม
2. ควรมีการอนุรักษ์พลังงานด้วยการนำความร้อนกลับมาใช้ในกระบวนการ
3. ควรใช้เตาไฟฟ้าเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน
4. ควรวัดการใช้พลังงานในการกลั่นว่าสอดคล้องกับพลังงานที่ได้ออกมาหรือไม่
5. ควรเลือกใช้อุปกรณ์ประกอบที่มีคุณภาพ เช่น วาล์ว เกจวัดต่าง
6. หุ้มฉนวนกันความร้อนเพื่อลดการสูญเสียความร้อน

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Shigefumi Fujita. 1985. อุปกรณ์การผลิตในอุตสาหกรรมเคมี, ปีโตรเลียมและปิโตรเคมี. แปลจาก Kagaku Sochi Binran (K.S.B.) :โดย ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [2] รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานนท์, รองศาสตราจารย์ ดร.นวดล เหล่าศิริพจน์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ, รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวิณี ชัยประเสริฐ, ประทิน กุลละวณิช และคณะ. 2553. รายงานสถานภาพของการวิจัยและผลิตเอทานอลไบโอดีเซล ไบโอดีเซลและน้ำมันชีวภาพในประเทศไทย (Position Paper on Biofuel Development in Thailand). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี(สบว).
- [3] Smith, J.M. and H.C. VanNess, Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-Hill, New York, 1982.
- [4] A. Jana “Heat integrated distillation operation”, Applied energy 87 (1477-1494), Nov 12, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้