



การศึกษาการแยก Fusel Oils จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักโดยการกลั่น



นายวันชัย พรมาลัยรุ่งเรือง

นายสรสิทธิ์ สุขวัฒน์

นายสุรัตน์ มหาวิโร

นายอิทธิชัย โอวจริยาพิทักษ์

วัน เดือน ปี.....	4. ต.ค. 2541
เลขทะเบียน.....	038630
เลขเรียกหนังสือ.....	T-455/2541

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

038630

The Study of Fusel Oils Separation from Fermented Product by Distillation.



Mr. Wanchai Pornmalairunguang

Mr. Soratee Sukhawat

Mr. Surat Mahaveero

Mr. Ittichai O-jariyapitak

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Bachelor in Chemical Engineering

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1997

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาการแยก Fusel Oils จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักโดยการกลั่น
โดย นายวันชัย พรมาลัยรุ่งเรือง
นายสรที สุวัฒน์
นายสุรัตน์ มหาวิโร
นายอิทธิชัย โอจกริยาพิทักษ์
อาจารย์ที่ปรึกษา อ. สุชาลินี แก้วพวงงาม
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์)

..... กรรมการ
(ดร. ประกอบ กิจไชยา)

..... กรรมการ
(อ. สุชาลินี แก้วพวงงาม)

..... กรรมการ
(อ. รินฤดี คำรงค์สุวัฒน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง การศึกษาการแยก Fusel Oils จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักโดยการกลั่น

โดย นายวันชัย พรมาลัยรุ่งเรือง

นายสรสิทธิ์ สุขวัฒน์

นายสุรัตน์ มหาวิโร

นายอิทธิชัย โอวจรียาพิทักษ์

อาจารย์ที่ปรึกษา อ. สุธาสิณี แก้วพวงงาม

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์

ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการแยก Fusel Oils จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักโดยการกลั่น โดยการศึกษาผลของอัตราส่วนการกลั่นไหลกลับ (Reflux Ratio) ที่มีผลต่อการกระจายตัว และความเข้มข้นของ Fusel Oils ในหอกกลั่น อัตราส่วนการกลั่นไหลกลับที่ใช้คือ 0.1, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0, 12.0 และ 15.0 โดยใช้อุณหภูมิของ Feed เป็น 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของ Reboiler เป็น 100 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของ Feed เป็น 0.052 ลิตรต่อ นาที ในการศึกษาพบว่าอัตราส่วนการกลั่นไหลกลับที่ 3.0 ให้การกระจายตัวและความเข้มข้นของ Fusel Oils ที่ดีที่สุด

Report Title The Study of Fusel Oils Separation from Fermented Product by
Distillation

By Mr. Wanchai Pornmalairungruang

Mr. Soratee Sukhawat

Mr. Surat Mahaveero

Mr. Ittichai O-jariyapitak

Advisor Miss Sutasinee Kaewpou-ngam

Co-Advisor Dr. Paisal Nakpipat

Report for Bachelor Degree in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This report is the study of fusel oils separation from fermented product by distillation. The studies involve the variation in the reflux ratio that would affect the fusel oils distribution and concentration of fusel oils in the distillation column. The reflux ratio of 0.1, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0, 12.0 and 15.0 were used at 80 °C feed temperature, 100 °C reboiler temperature and feed flow rate 0.052 liters per minute. The experiments showed the result of reflux ratio equal 3.0 is best of fusel oils distribution and fusel oils concentration.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาการแยก Fusel Oils จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักโดยการกลั่น เพื่อเสนอต่อภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่ายจึงทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ขึ้นได้ ผู้เสนอจึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำดังนี้คือ

- | | |
|---|--|
| - อ. สุรลินี แก้วพวงงาม | อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ |
| - ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์ | อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมปริญญาานิพนธ์ |
| - ดร. ประกอบ กิจไชยา | กรุณาให้คำปรึกษาปริญญาานิพนธ์ |
| - คุณ อะเครีอ บุญศิริ | เจ้าหน้าที่โครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดา
ให้ความเอื้อเฟื้อวัตถุดิบที่ใช้ในปริญญาานิพนธ์
และคำปรึกษา |
| - ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์ | กรุณาให้คำปรึกษาปริญญาานิพนธ์ |
| - เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง | ให้ความเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสารเคมีใช้ใน
ปริญญาานิพนธ์ |

อนึ่ง ยังมีบุคคลที่มีพระคุณอีกหลายท่านนอกเหนือจากที่กล่าวมา ผู้เสนอปริญญาานิพนธ์ขอขอบคุณ ณ โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญรูป	ฌ
สัญลักษณ์พิเศษ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปริญญานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 สาร Fusel Oils และการกลั่น	3
2.1 ความหมายของ Fusel Oils	3
2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการกลั่น	3
2.3 สมดุลระหว่างไอและของเหลว	4
2.4 การกลั่นของผสม	8
2.5 หอกกลั่น	15
2.6 หอกกลั่นทำงานผิดปกติ	21
บทที่ 3 การทดลอง	27
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	27
3.2 สารเคมี	27
3.3 การศึกษาผลของค่าอัตราการกลั่นไหลกลับต่อการกระจายตัวของ Fusel Oils ในหอกกลั่น	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	29
4.1 ผลของค่าอัตราการกลั่นไหลกลับต่อการกระจายตัวของ Fusel Oils ในหอกกลั่น	29

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	32
5.1 สรุปผลการทดลอง	32
5.2 ข้อเสนอแนะ	32
เอกสารอ้างอิง	34
ภาคผนวก	35
ภาคผนวก ก. ภาพเครื่องกลั่นที่ใช้ในปริญญานิพนธ์	36
ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์ปริมาณสารด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี	37
ภาคผนวก ค. ข้อมูลการทดลอง	39



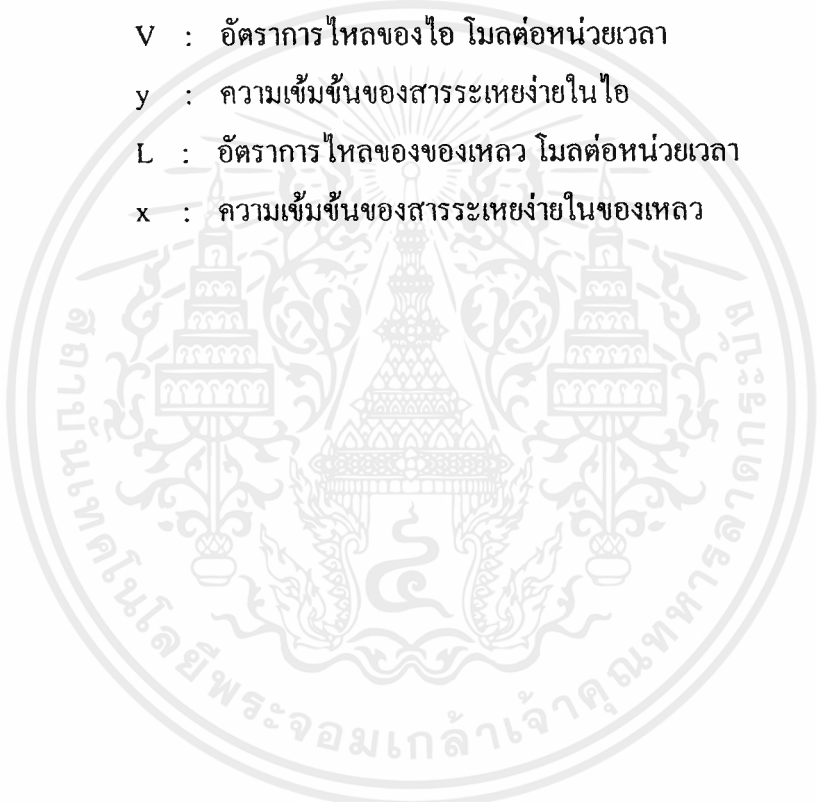
สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุไอ-ของเหลวแบบความดันคงที่	5
(ก). เบนซีน - โทลูอิน	
(ข). อะซีโตน - คาร์บอน ไดซัลไฟด์	
(ค). อะซีโตน - ครอลโรฟอร์ม	
รูปที่ 2.2 แผนภูมิสมดุไอ-ของเหลวแบบความดันคงที่	6
รูปที่ 2.3 แผนภาพการแจกแจง	7
รูปที่ 2.4 การกลั่นแบบคิฟเฟอร์เนเชี่ยล	8
รูปที่ 2.5 การกลั่นแบบแฟลช	9
รูปที่ 2.6 หอกกลั่นลำดับส่วน	11
รูปที่ 2.7 หอกกลั่นลำดับส่วนกับ Bubble-Cap Tray	12
รูปที่ 2.8 หอกกลั่นแบบกลั่นเป็นครั้ง	14
รูปที่ 2.9 Bubble-Cap Tray	16
รูปที่ 2.10 ลักษณะของ Bubble - Cap	16
(ก). Bubble-Cap ที่มี Teeth	
(ข). Bubble-Cap ที่มี Slot	
รูปที่ 2.11 การไหลของของเหลวไหลผ่านถาด	17
(ก). ถาดที่ไม่มี Distributor Weir	
(ข). ถาดที่มี Distributor Weir	
รูปที่ 2.12 Trapout Pan	18
รูปที่ 2.13 Sieve Deck	18
รูปที่ 2.14 ถาดรูปตัวเอส	19
รูปที่ 2.15 Ballast Tray	19
รูปที่ 2.16 Side to Side Pan	20
รูปที่ 2.17 ชนิดของ Packing	20
(ก). Rasching Ring	
(ข). Berl Saddle	

รูปที่ 2.18	แบบของการบรรจุ Packing ใน Packed Tower	21
	(ก). บรรจุแบบ Random Packing	
	(ข). บรรจุแบบ Layer Packing	
รูปที่ 2.19	ภาพตัดขวางของถาด	22
รูปที่ 2.20	ถาดท่วม	24
รูปที่ 4.1	กราฟระหว่างความเข้มข้นของ Fusel Oils (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในถาดแต่ละชั้นกับชั้นของถาด โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการกลั่นไหลกลับ	30
รูปที่ 4.2	กราฟระหว่างความเข้มข้นของเอธานอล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในถาดแต่ละชั้นกับชั้นของถาด โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการกลั่นไหลกลับ	31
รูปที่ 4.3	กราฟระหว่างอุณหภูมิของของเหลว (องศาเซลเซียส) ในถาดแต่ละชั้นกับชั้นของถาด โดยเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนการกลั่นไหลกลับ	31

สัญลักษณ์พิเศษ

- x_A : เศษส่วนโมลของสาร A ในของเหลว
- y_A : เศษส่วนโมลของสาร A ในไอ
- x_G : เศษส่วนโมลของสารในของเหลว A ณ จุดอะซีไอโทรปี
- F : อัตราการไหลของ Feed โมลต่อหน่วยเวลา
- x_A : เศษส่วนโมลของสารระเหยง่ายใน Feed
- V : อัตราการไหลของไอ โมลต่อหน่วยเวลา
- y : ความเข้มข้นของสารระเหยง่ายในไอ
- L : อัตราการไหลของของเหลว โมลต่อหน่วยเวลา
- x : ความเข้มข้นของสารระเหยง่ายในของเหลว



บทที่ 1

บทนำ

Fusel Oils เป็นสารที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักเอธานอล โดยเป็นกลุ่มของแอลกอฮอล์หลาย ๆ ชนิด คือ นอร์มัลโพรพานอล 2-เมทิล-1-โพรพานอล และ 3-เมทิล-1-บิวทานอล ถ้า Fusel Oils มีปะปนอยู่ในเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่ได้จากกระบวนการหมักจะเป็นสารที่เป็นพิษทำให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค เช่น จะทำให้กระเพาะอาหารอักเสบ อาเจียร ปวดศีรษะ และเมื่อสัมผัสหรือสูดดมไอของ Fusel Oils เข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อจมูก คอ ตา และระบบทางเดินหายใจ แต่ Fusel Oils สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมน้ำหอม อุตสาหกรรมการทำหมึกพิมพ์ได้

1.1 ความเป็นมาของปริญญานิพนธ์

เนื่องจาก Fusel Oils เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ได้จากการหมักเอธานอล เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักที่มี Fusel Oils ไปกลั่นมักจะมี Fusel Oils ติดมากับผลิตภัณฑ์หลักด้วย หากนำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไปผลิตเป็นเครื่องดื่ม จะมีผลกระทบต่อผู้บริโภคดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น นอกจากนี้ Fusel Oils ยังมีกลิ่นฉุน เมื่อนำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็ง เมื่อจุดไฟจะเกิดควันและกลิ่นฉุน การแก้ปัญหาก็คือหาวิธีการแยก Fusel Oils ออกจากเอธานอลเพื่อเป็นการลดอันตรายที่เกิดจาก Fusel Oils นอกจากนี้ Fusel Oils ที่แยกได้ยังเป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมน้ำหอม หรือใช้เป็นสารแต่งกลิ่นได้อีกด้วย

อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้เกิดปริญญานิพนธ์นี้ เนื่องจากในโลกปัจจุบันพลังงานและวัตถุดิบของสารต่าง ๆ ส่วนใหญ่ได้มาจากปิโตรเลียม ซึ่งเป็นสิ่งที่ใช้แล้วหมด ดังนั้นการให้ความสนใจในเรื่องพลังงานทดแทนและแหล่งวัตถุดิบของสารทดแทนจึงเป็นเรื่องสำคัญ เนื่องจากมีสารหลายชนิดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมัก ดังนั้นถ้าสามารถหาแนวทางในการแยกสารต่าง ๆ ออกมาได้จะมีประสิทธิภาพ ก็จะสามารถนำสารที่แยกได้เหล่านี้มาใช้ประโยชน์ เช่น แอลกอฮอล์ใช้เป็นพลังงานทดแทนและเป็นสารที่ให้การเผาไหม้สมบูรณ์ (Gasohol, ethanol + fuel oil) จึงเป็นแหล่งพลังงานและวัตถุดิบสำรองในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของหอกลั่นเชิงทฤษฎีและนำผลมาปรับปรุงการปฏิบัติงานหอกลั่นเพื่อให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น
2. เพื่อศึกษากระบวนการกลั่นและแนวทางในการแยก Fusel Oils ออกจากการกลั่นแยกเอธานอล โดยแนวทางการกลั่นที่ต้องการคือให้ได้เอธานอลที่มีความบริสุทธิ์สูงสุดและให้ได้ Fusel Oils เป็นผลิตภัณฑ์ที่ออกข้างหอ (Sidedrawn) ที่มีความบริสุทธิ์ที่ดีที่สุด

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาความรู้เบื้องต้นและหลักการของการกลั่นแยก
2. ทดลองกลั่นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมัก เพื่อวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการกลั่น
3. หาปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ในสารละลายที่ได้จากการหมักและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas-chromatograph)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ใช้เป็นแนวทางในการหาภาวะที่ดีที่สุดในการกลั่นแยก Fusel Oils จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมัก
2. ผลการศึกษาที่ได้จากปริญญานิพนธ์จะนำไปใช้เป็นข้อมูลส่วนหนึ่งในการพัฒนากระบวนการกลั่นแยก Fusel Oils จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักให้ไปสู่ระดับโรงงานขนาดเล็กได้
3. เพิ่มพูนทักษะการวางแผนและดำเนินงานเพื่อให้ปริญญานิพนธ์บรรลุผลตามเป้าหมายภายในเวลาที่กำหนดให้

บทที่ 2

สาร Fusel Oils และการกลั่น

2.1 ความหมายของ Fusel Oils

Fusel Oils เป็นสารผสมของสารที่ระเหยได้หลายชนิด ไม่มีองค์ประกอบเป็นสัดส่วนที่แน่นอน แต่โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 2-เมทิล-1-โพรพานอล 80% บิวทานอล 15 % และอื่น ๆ 5 % องค์ประกอบที่สำคัญของสารอื่น ๆ แบ่งได้เป็น [1]

3-เมทิล-1-บิวทานอล หรือ ไอโซเอมิตแอลกอฮอล์ $((\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{CH}_2\text{OH})$

2-เมทิล-1-โพรพานอล หรือ ไอโซบิวทิลแอลกอฮอล์ $((\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{OH})$

1-โพรพานอล หรือ โพรพิลแอลกอฮอล์ $(\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})$

Fusel Oils เกิดขึ้นโดยยีสต์ในระหว่างกระบวนการหมัก ปริมาณของ Fusel Oils ที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น ความแข็งแรงของเชื้อยีสต์ที่ใช้ อุณหภูมิในระหว่างการหมัก แต่โดยประมาณแล้วปริมาณการเกิดคือ 0.2 - 0.4 % เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้น หมายถึงถ้าในกระบวนการหมักเกิดเอทานอล 996-998 ลิตร จะมี Fusel Oils เกิดขึ้น 2 - 4 ลิตร [2]

องค์ประกอบของ Fusel Oils 3-เมทิล-1-บิวทานอลจะเป็นสารที่มีค่าทางการค้ามากที่สุด โดยจะใช้ได้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับเรซิน ใช้ในอุตสาหกรรมหมึกพิมพ์ ใช้เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizers) ใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตน้ำหอม ฯลฯ

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการกลั่น [3]

การกลั่นคือวิธีการแยกของผสมในสภาพที่เป็นสารละลายออกจากกัน เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และอุตสาหกรรมเคมีทั่วไป หอกลั่นที่ใช้ในปัจจุบันเป็นเครื่องมือที่มีกำลังการผลิตสูง และถูกสร้างขึ้นให้มีขนาดใหญ่กว่าเครื่องมือประเภทอื่น ๆ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.3 เมตร ถึง 10 เมตร และมีความสูงตั้งแต่ 3 เมตร ถึง 75 เมตร

การกลั่นโดยทั่วไปจะใช้ความร้อนจากไอน้ำมาทำให้สารละลายในสภาพของของเหลวระเหยกลายเป็นไอบางส่วน สารที่ต้องการจะแยกออกจากกันโดยวิธีการกลั่นนี้จะต้องมีอัตราการระเหยไม่เท่ากันพิจารณาจากค่าของจุดเดือดหรือความดันไอของสาร สารที่ระเหยได้ง่ายจะอยู่ในไอได้มากกว่าสารที่ระเหยยาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นจะประกอบด้วยไอและของเหลว

ที่ไอจะมีปริมาณสารระเหยง่ายอยู่เป็นจำนวนมาก ส่วนในของเหลวจะมีปริมาณสารระเหยง่ายอยู่เป็นจำนวนน้อย ในการกลั่นจะมีไอและของเหลวอยู่รวมกันเสมอ ดังนั้นความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสมดุลระหว่างไอและของเหลวจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 2.3

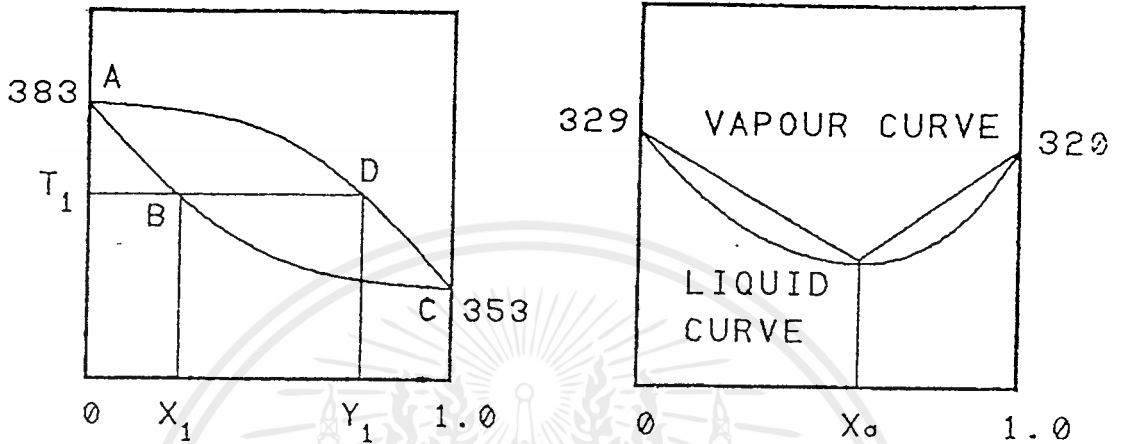
2.3 สมดุลระหว่างไอและของเหลว [3]

เมื่อทำให้ของผสมในสถานะของของเหลวกลายเป็นไอบางส่วน โดยอาศัยความร้อนจนไอที่เกิดขึ้นและของเหลวที่เหลืออยู่ในภาวะสมดุลกัน ความเข้มข้นของสารระเหยง่ายในไอและของเหลวที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน แสดงในแผนภูมิสมดุลไอ - ของเหลว ดังรูปที่ 2.1 เป็นของผสมระหว่าง เบนซีน - โทลูอิน อะซีโทน - คาร์บอนไดออกไซด์ ไฟด์ และ อะซีโทน - คลอโรฟอร์ม

ในรูปที่ 2.1 ก. ส่วนโค้ง ABC แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายที่ระเหยง่าย (เบนซีน) ในของเหลวและอุณหภูมิ ส่วนโค้ง ADC แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารระเหยง่ายในไอและอุณหภูมิ ของเหลวที่มีความเข้มข้น x_1 จะเดือดที่อุณหภูมิ T_1 ส่วนไอที่เกิดขึ้นอยู่ในสมดุลของไอกับของเหลวมีความเข้มข้นเท่ากับ y_1 ความเข้มข้นของสารระเหยง่ายในของเหลวจะมีค่าเท่าไร ความเข้มข้นของสารระเหยง่ายในไอจะมีค่ามากกว่าเสมอ

ในรูปที่ 2.1 ข. และ ค. ค่าความเข้มข้นวิกฤตค่า x_c มีความเข้มข้นของสารระเหยง่ายในของเหลวและในไอมีค่าเท่ากัน ของผสมดังกล่าวเรียกว่า อะซีโอโทรป (Azeotrope)

ถ้าของผสมมีความเข้มข้นของสารระเหยง่าย x_2 และอุณหภูมิ T_3 ตามรูปที่ 2.2 ของผสมอยู่ที่จุด G มีสถานะเป็นของเหลว ถ้าให้ความร้อนแก่ของผสมนี้จนมีอุณหภูมิ T_2 ที่จุดนี้ของผสมจะเริ่มเดือด ไอที่เกิดขึ้นในตอนแรกนี้จะมีค่าเข้มข้นเป็น y_2 แต่ขณะเดียวกันของผสมยังคงมีความเข้มข้นเป็น x_2 เท่าเดิม ถ้าให้ความร้อนต่อไปจนมีอุณหภูมิเป็น T' ของเหลวจะมีความเข้มข้นเปลี่ยนไปคือความเข้มข้นของสารระเหยง่ายในของเหลวจะลดลงไปอยู่ที่จุด L ความเข้มข้นของไอที่เกิดขึ้นจะอยู่ที่จุด N ถ้าให้ความร้อนแก่ของผสมต่อไปอีกจนถึงอุณหภูมิ T_1 ของเหลวจะกลายเป็นไอทั้งหมดมีความเข้มข้น y_1 เท่ากับความเข้มข้นตอนเริ่มต้น x_2

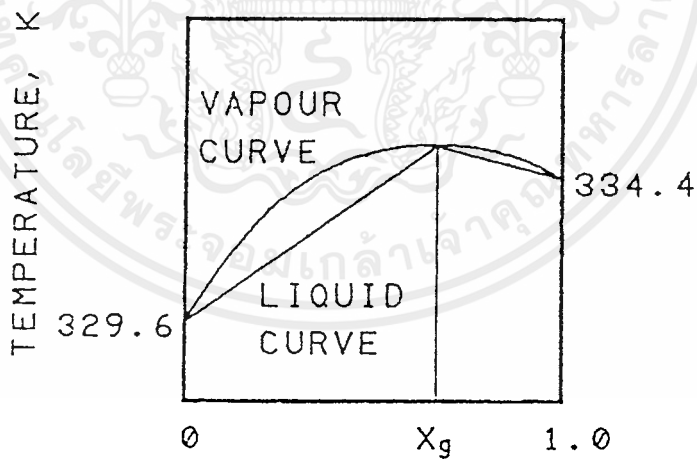


เศษส่วน โมลในของเหลว (x) หรือ ไอ (y)

(ก).

เศษส่วน โมลในของเหลว (x) หรือ ไอ (y)

(ข).



เศษส่วน โมลในของเหลว (x) หรือ ไอ (y)

(ค).

รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมมูลไอ - ของเหลวแบบความดันคงที่ [3]

(ก). เบนซีน - โทลูอีน

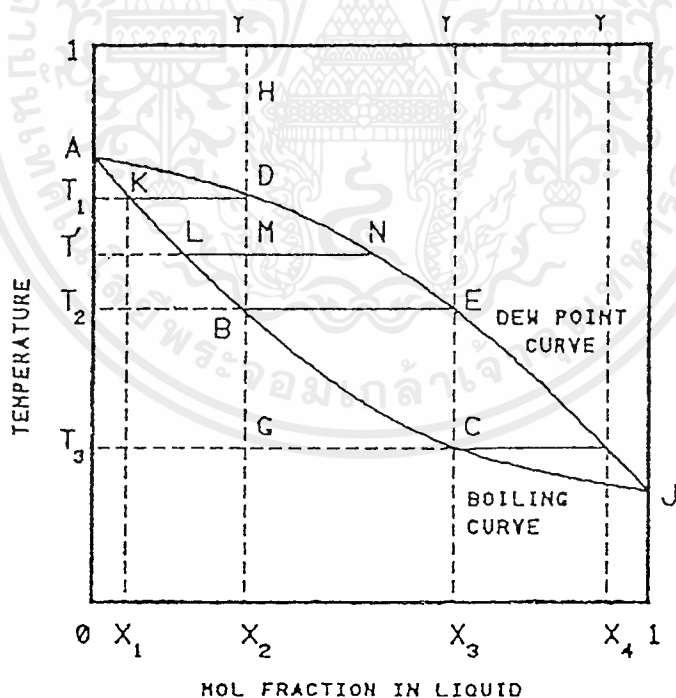
(ข). อะซีโตน - คาร์บอนไดซัลไฟด์

(ค). อะซีโตน - ครอลฟอร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การให้ความร้อนแก่ของผสมในสถานะเริ่มต้นเป็นของเหลวจนทำให้ของเหลวบางส่วนกลายเป็นไอ ไอที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าความเข้มข้นของสารระเหยง่ายมากกว่าในของเหลวที่เหลือ ถ้าไอน้ำที่เกิดขึ้นครั้งแรก (จุด E) มาควบแน่นจนกลายเป็นของเหลวทั้งหมด ของเหลวที่ได้จะมีความเข้มข้นของสารระเหยง่ายเป็น x_3 ซึ่งสูงกว่าความเข้มข้นของของเหลวตอนเริ่มต้น

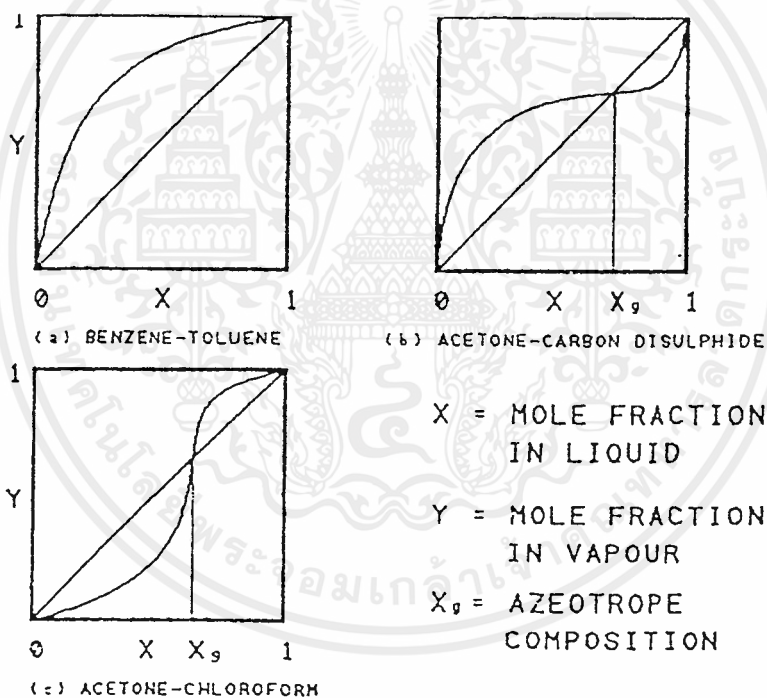
ถ้าเริ่มต้นจากไอร้อนยิ่งยวด (Superheated Vapor) ซึ่งอยู่ที่จุด H ถ้าทำให้เย็นลงเมื่อถึงจุด D ไอบางส่วนจะเริ่มกลั่นตัวเป็นของเหลว ของเหลวหยดแรกที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มข้นของสารระเหยง่ายเป็น x_1 ถ้าทำให้เย็นลงต่อไปจนอุณหภูมิลดลงเป็น T จะได้ของเหลวที่จุด L และไอที่จุด N ดังนั้นในการทำให้ไอกลั่นตัวบางส่วนนี้ จะทำให้ไอที่เหลือมีความเข้มข้นของสารระเหยง่ายสูงขึ้น ในเครื่องกลั่นที่ใช้ทั่วๆ ไปในอุตสาหกรรม ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้คือการกลายเป็นไอบางส่วนของของเหลว และการควบแน่นหรือการกลั่นตัวบางส่วนของไอจะเกิดขึ้นพร้อมกันเสมอ



รูปที่ 2.2 แผนภูมิสมดุลไอ - ของเหลวแบบความดันคงที่ [3]

จากแผนภูมิสมมูลไอ - ของเหลวแบบความดันคงที่ที่กล่าวมา มีวิธีการแสดงสมมูลระหว่างของเหลวและไออีกรูปแบบซึ่งเรียกว่า แผนภาพการแจกแจงหรือแผนภาพ X-Y (Distribution diagram or X - Y diagram) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารระเหยง่ายในของเหลว และความเข้มข้นของสารระเหยง่ายในไอ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

แผนภาพการแจกแจงสร้างจาก แผนภูมิแสดงสมมูลไอ - ของเหลว และเป็นที่นิยมใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัญหาการคำนวณเกี่ยวกับการกลั่น



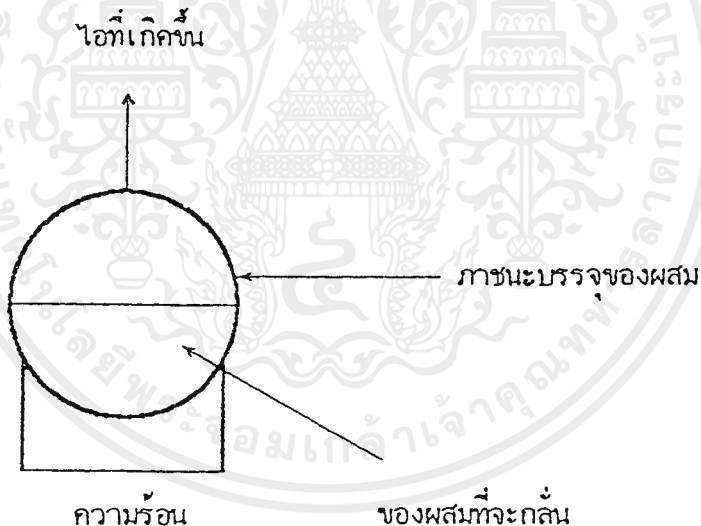
รูปที่ 2.3 แผนภาพการแจกแจง [3]

2.4 การกลั่นของผสม

2.4.1 การกลั่นแบบคิฟเฟอเรนเชียล (Differential Distillation)

เป็นการกลั่นแบบเป็นครั้งที้ง่ายที่สุด นำของผสมที่จะกลั่นใส่ในภาชนะ แล้วให้ความร้อนแก่ของผสมนี้ด้วยอัตราคงที่จนของผสมเดือด ไอที่เกิดขึ้นถูกนำออกจากเครื่องกลั่นทันที ซึ่งอาจจะถูกส่งไปยังเครื่องควบแน่น เพื่อให้ไอควบแน่นกลายเป็นของเหลว ไอที่เกิดขึ้นนี้มีปริมาณสารระเหยง่ายมากกว่าในของเหลวที่เหลือ ความเข้มข้นของสารระเหยง่ายในของเหลว และปริมาณของเหลวก็จะค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ

การกลั่นแบบคิฟเฟอเรนเชียลเป็นการกลั่นที่มีประสิทธิภาพไม่สูง เพราะไม่สามารถแยกสารให้มีความบริสุทธิ์สูงได้ แต่กรณีที่ไม่ต้องการความบริสุทธิ์สูงมาก การกลั่นโดยวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด และอุปกรณ์ต่าง ๆ ก็ไม่ซับซ้อน

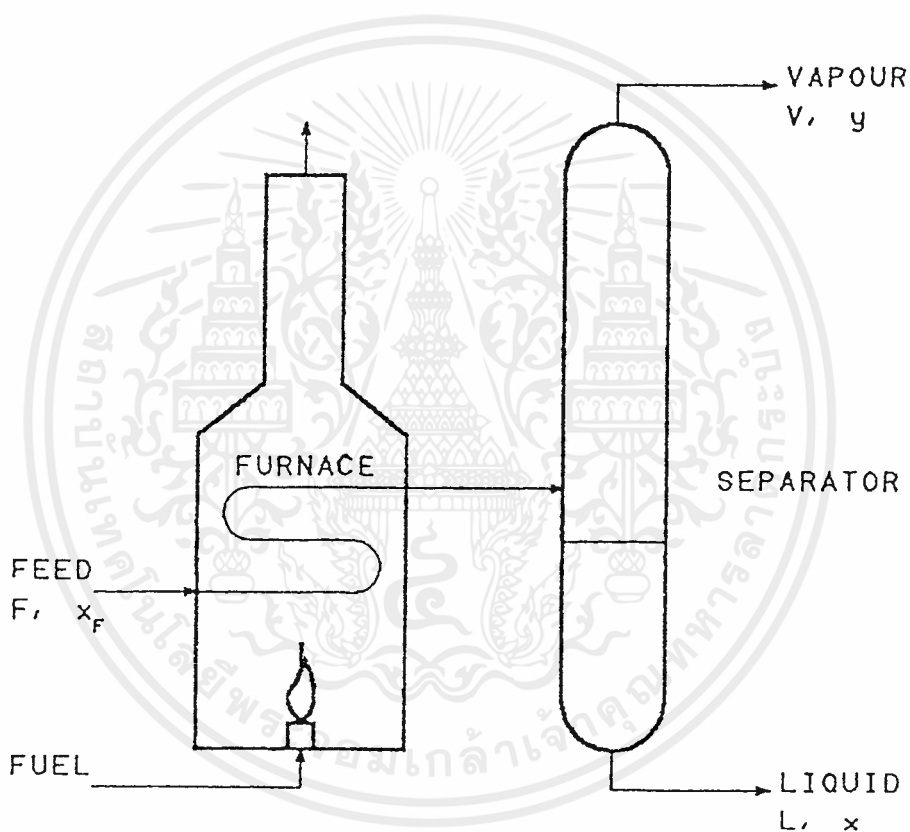


รูปที่ 2.4 การกลั่นแบบคิฟเฟอเรนเชียล [3]

2.4.2 การกลั่นแบบแฟลช (Flash Distillation)

การกลั่นโดยวิธีนี้เป็นการกลั่นแบบต่อเนื่อง ของผสมที่จะกลั่นจะถูกป้อนเข้าเครื่องกลั่นตลอดเวลา เมื่อของผสมได้รับความร้อนของเหลวบางส่วนจะกลายเป็นไอ ของผสมของของเหลวและไอที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปยังเครื่องแยก ซึ่งจะทำหน้าที่แยกไอและของเหลวออกจากกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.5 ของผสมถูกป้อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอัตรา F โมลต่อหน่วยเวลา และมีความเข้มข้นของสารระเหยง่ายเท่ากับ x_F ของผสมระหว่างของเหลวและไอที่เกิดขึ้นจะผ่านไปยังเครื่องแยก ไอจะถูกแยกออกทางตอนบนในอัตรา V โมลต่อหน่วยเวลา และมีความเข้มข้นของสารระเหยง่ายเท่ากับ y ส่วนของเหลวถูกแยกออกทางตอนล่างด้วยอัตรา L โมลต่อหน่วยเวลา มีความเข้มข้นของสารระเหยง่ายเท่ากับ x



รูปที่ 2.5 การกลั่นแบบแฟลช [3]

2.4.3 การกลั่นแยกลำดับส่วน (Fractionation)

วิธีการกลั่นทั้ง 2 แบบ จะเห็นว่าไอที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกลั่น จะอยู่ในสมดุลกับของเหลวที่เหลือนตลอดเวลา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นจะมีความบริสุทธิ์ไม่สูงมากนัก ถ้าต้องการความบริสุทธิ์สูงทำได้โดยการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นครั้งแรก ไปกลั่นซ้ำอีกหลายๆ ครั้ง ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองเงินไม่คุ้มทุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

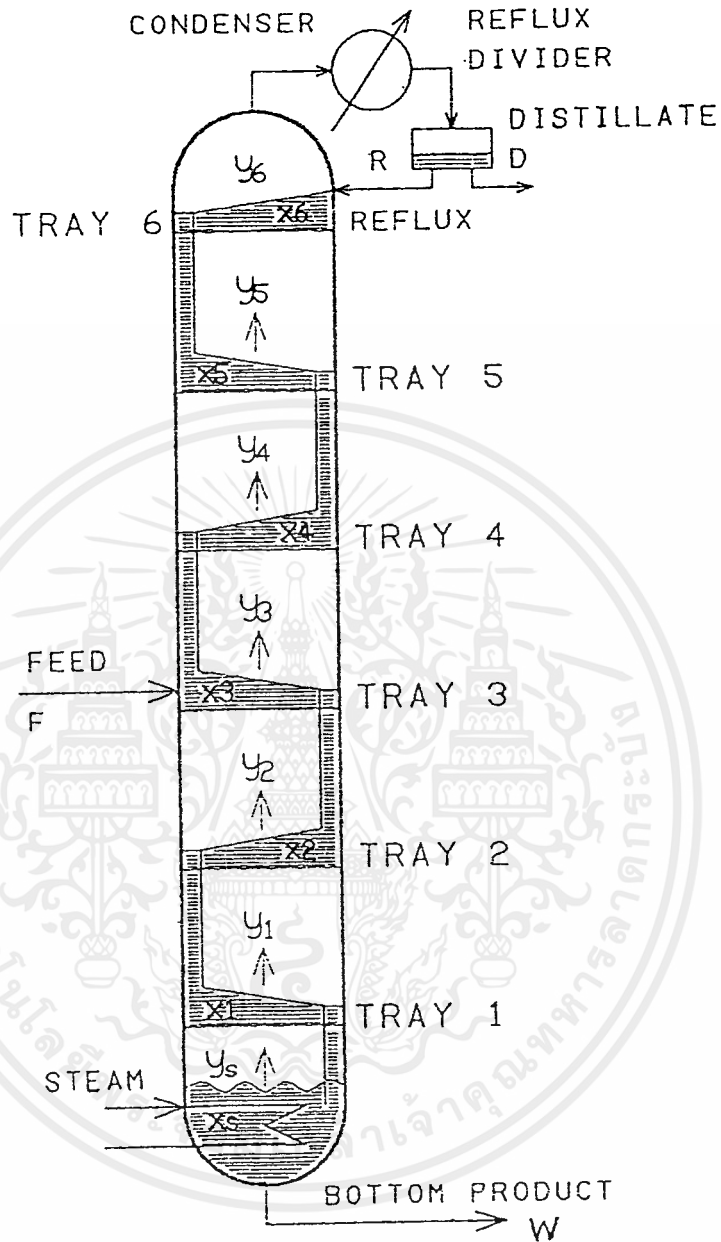
กรณีที่ต้องการความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์สูง การกลั่นแบบแยกลำดับส่วนเป็นการกลั่นแบบต่อเนื่องที่มีประสิทธิภาพสูงโดยใช้หอกลั่นลำดับส่วน ในรูปที่ 2.6 มีลักษณะเป็นคอลัมน์ซึ่งแบ่งเป็นส่วน ๆ โดย Bubble - Cap Tray จะยอมให้ไอลอยขึ้นข้างบนได้ ของผสมถูกป้อนเข้าคอลัมน์ที่บริเวณตอนกลางของคอลัมน์ ไอลอยขึ้นข้างบนในส่วนเหนือขึ้นไปจากจุดที่ของผสมเข้าสู่คอลัมน์ จะพบกับของเหลวที่ไหลลงมาในแต่ละถาด ของเหลวที่ไหลลงมานี้จะดึงเอาสารระเหยยากออกจากไอ ส่วนนี้ของคอลัมน์เรียกว่า Rectifying Section

ไอที่ออกจากตอนบนของคอลัมน์ จะผ่านเข้าไปในเครื่องควบแน่นทำให้ไอทั้งหมดหรือบางส่วนกลายเป็นของเหลว แล้วไหลออกเป็น 2 ทาง ทางหนึ่งไหลกลับเข้าถาดบนสุดของหอกลั่นเรียกว่า การกลั่นไหลกลับ (Reflux) อีกทางหนึ่งไหลออกไปเป็นผลิตภัณฑ์ เรียกว่า ดิสทิลเลต (Distillate) อัตราส่วนการกลั่นไหลกลับต่อดิสทิลเลตเรียกว่า อัตราส่วนการกลั่นไหลกลับ (Reflux Ratio) ซึ่งมีอุปกรณ์ที่สามารถปรับค่าได้ การมีอัตราส่วนการกลั่นไหลกลับสูง จะทำให้ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น

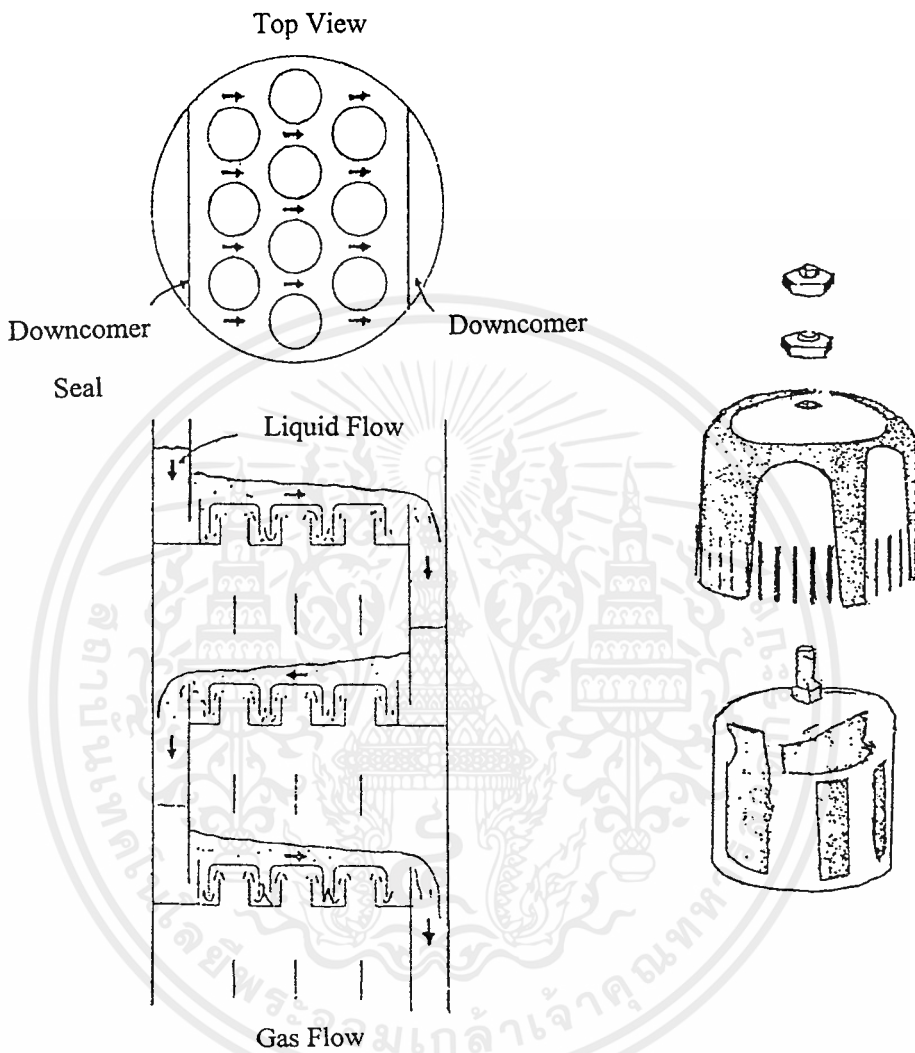
ในส่วนล่างของคอลัมน์ที่อยู่ต่ำกว่าจุดป้อนของผสม ไอลอยขึ้นมาเมื่อสัมผัสกับของเหลวที่ไหลลงมา จะแยกเอาส่วนที่ระเหยง่ายออกจากของเหลวไปกับไอดีว เรียกว่าส่วนนี้ว่า Stripping Section

ของเหลวเมื่อไหลลงไปถึงตอนล่างสุดของคอลัมน์ จะได้รับความร้อนจากไอน้ำ ทำให้ของเหลวบางส่วนกลายเป็นไอลอยขึ้นข้างบน ส่วนที่เหลือจะไหลออกทางด้านล่างของคอลัมน์ ส่วนที่ให้ความร้อนนี้เรียกว่า Reboiler

ดังนั้นภายในหอกลั่นจะเห็นสภาพของเหลวในแต่ละถาดอยู่ที่จุดเดือด และไอของสารจะอยู่ที่จุดน้ำค้าง (Dew Point) โดยตอนล่างของคอลัมน์จะมีอุณหภูมิสูง ส่วนตอนบนจะมีอุณหภูมิต่ำ และในแต่ละถาดจะมีการแลกเปลี่ยนมวลสารที่ระเหยง่ายและระเหยยากซึ่งกันและกันระหว่างไอและของเหลว ส่วนระเหยง่ายจึงขึ้นไปกับไอและเข้มข้นมากยิ่งขึ้นเมื่อเลื่อนขึ้นไปยังถาดบน ส่วนของเหลวก็จะมีสารระเหยยากมากขึ้นเมื่อไหลลงถาดล่าง ยังมีจำนวนถาดมากก็จะแยกสารได้จากกันบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น ลักษณะดังกล่าวแสดงอยู่ในรูปที่ 2.7 ถ้าหากในแต่ละถาดไอและของเหลวมีความเข้มข้นของสารระเหยง่ายอยู่ในสภาพสมดุลจะเป็นถาดในอุดมคติ (Ideal Tray) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพ 100 % แต่ในสภาพเป็นจริงจะไม่เป็นตามอุดมคติ



รูปที่ 2.6 หอกลั่นลำดับส่วน [3]



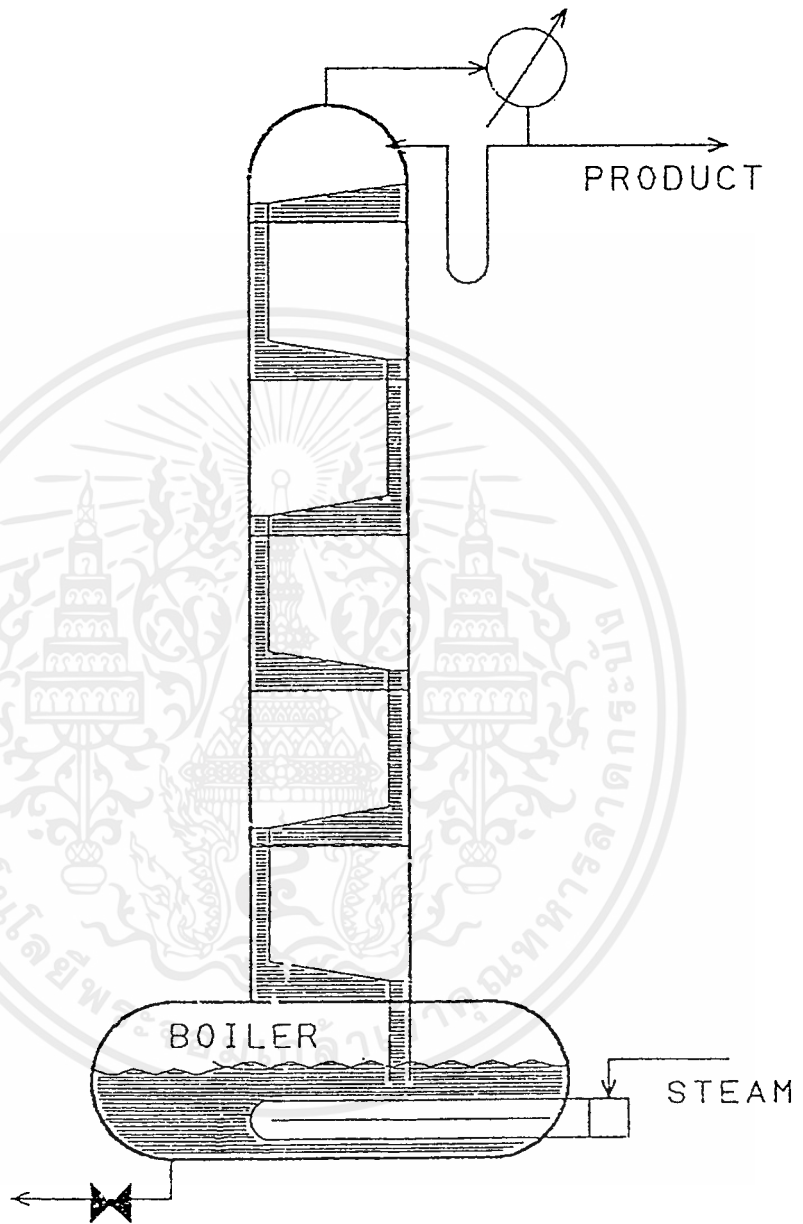
รูปที่ 2.7 หอกลับลำดับส่วนกับ Bubble - Cap tray [3]

รูปที่ 2.7 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในหอกลิ้น มีการแลกเปลี่ยนระหว่างไอและของเหลวในแต่ละถาด ลักษณะของถาดที่แสดงไว้ในรูปเป็นแบบ Bubble Cap เป็นแบบที่นิยมใช้กันเป็นเวลานานแล้ว นอกจากนี้มีแบบ Sieve Trays และ Valve Trays ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ หน้าที่สำคัญของแต่ละถาดคือทำให้ไอและของเหลวมีการผสมกันอย่างทั่วถึง เพื่อให้ไอและของเหลวที่ออกจากถาดอยู่ในสมดุลกัน โดยทั่วไปประสิทธิภาพของถาดจะไม่ถึง 100 % ซึ่งจะขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอกลิ้น และการปฏิบัติการของหอกลิ้นอีกด้วย

2.4.4 การกลั่นเป็นครั้ง (Batch Distillation)

ใช้ในกรณีของผสมที่จะกลั่นมีปริมาณไม่มากนัก ของผสมที่จะถูกป้อนเข้าไปใน Reboiler หลังจากนั้นก็ให้ความร้อนแก่ของผสมนี้ ไอที่เกิดขึ้นจะลอยขึ้นไปในคอลัมน์หรือหอกลิ้นที่อยู่ตอนบน ผลึกภัณฑ์ที่ได้ตอนบนของคอลัมน์นี้จะมีปริมาณสารระเหยง่ายสูง ส่วนความเข้มข้นของสารระเหยง่ายในของเหลวภายใน Reboiler จะค่อย ๆ ลดลง ซึ่งเป็นผลทำให้ความเข้มข้นของสารระเหยง่ายในผลึกภัณฑ์ที่ออกจากตอนบนของคอลัมน์ค่อย ๆ ลดลงด้วย ดังนั้นเมื่อกลั่น ไปจนถึงจุด ๆ หนึ่งอาจต้องเลิกทำการกลั่น เพราะผลึกภัณฑ์ที่ได้จะมีความบริสุทธิ์ต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ แต่ถ้าต้องการให้ผลึกภัณฑ์ที่ได้มีความเข้มข้นคงที่ตลอดเวลา ทำได้โดยการปรับอัตราส่วนการกลั่น ให้กลับ

ข้อดีของการกลั่นแบบเป็นครั้งคือ สามารถให้ผลึกภัณฑ์จากการกลั่นมากกว่าหนึ่งผลึกภัณฑ์ เช่น ในการกลั่นเอธานอลและน้ำ ผลึกภัณฑ์ที่ได้ตอนแรกจะมีปริมาณเอธานอลสูง หลังจากนั้นจะได้ผลึกภัณฑ์ที่สองซึ่งมีความเข้มข้นของเอธานอลต่ำกว่าผลึกภัณฑ์แรก วิธีการนี้สามารถนำไปใช้ในการกลั่นของผสมที่มีสารหลาย ๆ ชนิด โดยจะได้ผลึกภัณฑ์หลายผลึกภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์ของสารต่าง ๆ ตามความต้องการได้



รูปที่ 2.8 หอกลิ้นแบบกลั่นเป็นครั้ง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 หอกลิ้น

2.5.1 ความสูงของหอกลิ้น

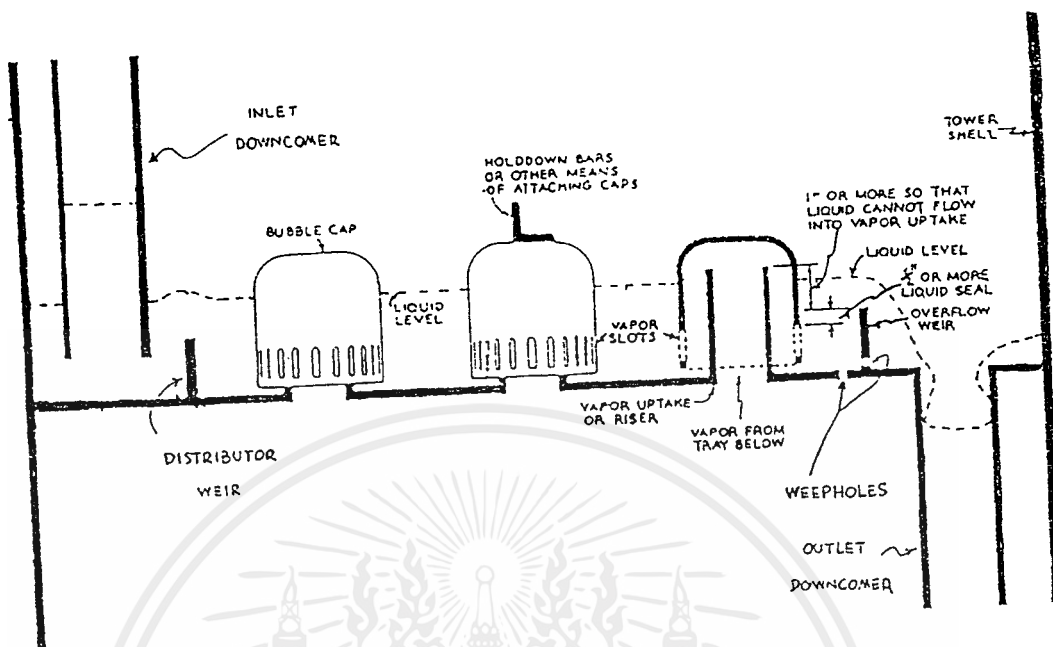
ความสูงของหอกลิ้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนถาดในหอกลิ้น จำนวนถาดที่ใช้ขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการแยกตัวของของผสมที่ต้องการกลั่นแยกออกเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ถ้าแยกออกยากก็ต้องการจำนวนถาดมากนั่นคือหอกลิ้นจะต้องสูง ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ก็เป็นตัวกำหนดจำนวนถาดด้วย ถ้าต้องการความบริสุทธิ์สูงก็ต้องใช้จำนวนถาดมากหอกลิ้นก็จะสูง ความสูงของหอกลิ้นยังขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างถาด โดยหอกลิ้นจะต้องมีระยะห่างระหว่างถาดที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเกิด Entrainment ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ของเหลวหยดเล็ก ๆ ที่แขวนลอยอยู่ในไอถูกพาขึ้นไปยังถาดต่อไปข้างบน ถ้ามีระยะห่างระหว่างถาดพอเหมาะจะทำให้หยดของเหลวแยกตัวตกลงมาก่อนที่จะขึ้นไปยังถาดข้างบน นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างถาดจะต้องมากพอเพื่อให้สามารถเข้าไปซ่อมแซม หรือตรวจสอบในหอกลิ้นได้

2.5.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของหอกลิ้น

เส้นผ่านศูนย์กลางของหอกลิ้นขึ้นอยู่กับปริมาณของของเหลวที่จะส่งเข้ากลั่น ถ้าต้องการอัตราการกลั่นที่สูง หอกลิ้นต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางมาก นอกจากนี้ยังขึ้นกับอัตราส่วนการกลั่นไหลกลับคือถ้าใช้อัตราส่วนการกลั่นไหลกลับมาก เส้นผ่านศูนย์กลางของหอกลิ้นจะมาก

2.5.3 Bubble - Cap tray

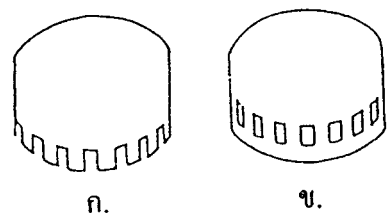
การกลั่นลำดับส่วนจะมีกระบวนการทางกายภาพที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กระบวนการคือ กระบวนการถ่ายเทความร้อนและกระบวนการถ่ายเทมวลสาร การถ่ายเทจะเกิดขึ้นระหว่างไอกับของเหลว ไอที่ร้อนกว่าจะพุ่งขึ้นสวนทางกับของเหลวที่เย็นกว่าซึ่งตกลงมาในหอกลิ้น เกิดการถ่ายเทความร้อนจากไอไปสู่ของเหลว เมื่อไอเย็นลงเล็กน้อยส่วนหนักในไอบางส่วนจะควบแน่นเป็นของเหลวเกิดการถ่ายเทมวลสารจากไอไปสู่ของเหลว ในขณะที่เดียวกันเมื่อของเหลวได้รับความร้อนสูงขึ้น จะมีส่วนเบาบางส่วนในของเหลวระเหยกลายเป็นไอพุ่งขึ้นข้างบน เกิดการถ่ายเทมวลสารจากของเหลวไปสู่ไอกับด้วยเช่นกัน การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารนั้นจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อไอกับของเหลวสัมผัสกันอย่างดี เพื่อให้การแยกลำดับส่วนมีประสิทธิภาพสูงสุด หน้าที่สำคัญของ Bubble - Cap Tray คือทำให้ไอกับของเหลวสัมผัสกันอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้การแยกลำดับส่วนมีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 2.9 Bubble - Cap Tray

Bubble - Cap Tray ประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญ ดังนี้

1. Riser หรือ Chimney เป็นช่องทางให้ไอน้ำจากข้างล่างพุ่งผ่านถาดขึ้นไปข้างบน และยังเป็นตัวรองรับ Bubble Cap
2. Bubble Cap อยู่เหนือ Riser ขอบล่างของ Bubble Cap จะมี Teeth หรือ Slot ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดฟองไอน้ำในของเหลว ไอน้ำที่พุ่งขึ้นมาทาง Riser จะถูกบังคับให้พุ่งผ่าน Teeth หรือ Slot ที่ขอบล่างของ Cap เกิดเป็นฟองไอน้ำผุดขึ้นผ่านของเหลวบนถาด ซึ่งจะทำให้ไอน้ำสัมผัสกับของเหลวอย่างมีประสิทธิภาพ การออกแบบจะต้องให้ Teeth หรือ Slot อยู่ต่ำกว่าระดับของเหลวบนถาด



รูปที่ 2.10 ลักษณะของ Bubble Cap

(ก). Bubble Cap ที่มี Teeth

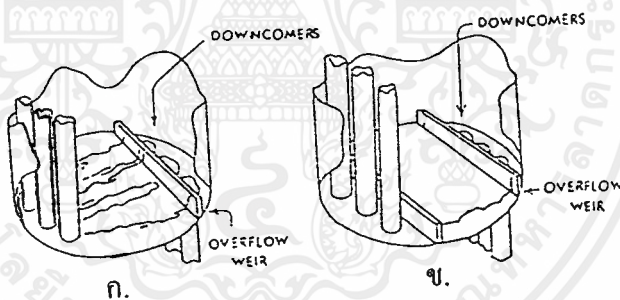
(ข). Bubble Cap ที่มี Slot

3. Downcomer เป็นช่องทางให้ของเหลวไหลออกจากถาดหนึ่งลงไปยังถาดที่ต่ำกว่า Downcomer แบ่งได้เป็น 2 อย่างคือ Inlet Downcomer และ Outlet Downcomer ถ้าพิจารณาที่ ถาดใดถาดหนึ่ง Inlet Downcomer ก็คือ Downcomer ที่นำของเหลวจากถาดที่อยู่ถัดไปข้างบนไหล ลงมายังถาดนั้น และ Outlet Downcomer ก็คือ Downcomer ที่เป็นช่องทางให้ของเหลวจากถาด นั้นไหลลงไปสู่ถาดถัดไปข้างล่าง ปลายข้างล่างของ Downcomer จะต้องอยู่ต่ำกว่าระดับของเหลว บนถาดเพื่อไม่ให้ไอไหลขึ้นไปทาง Downcomer

4. Weir เป็นแผ่นกั้นอยู่บนถาดแบ่งเป็น Inlet Weir และ Outlet Weir เช่นเดียวกับ Downcomer

Outlet Weir หรือ Overflow Weir อยู่ทางด้านออกของถาดใกล้ ๆ กับ Outlet Downcomer ของเหลวที่ไหลออกจากถาดจะต้องไหลลงข้าม Overflow Weir ออกไป Overflow Weir มีหน้าที่ให้มีระดับของเหลวบนถาดอย่างพอเหมาะ เพื่อที่จะให้ Teeth หรือ Slot ของ Cap อยู่ได้ระดับของเหลวบนถาด

Inlet Weir หรือ Distributor Weir อยู่ทางด้านเข้าของถาดใกล้กับ Inlet Downcomer มีหน้าที่แพร่กระจายของเหลวให้ไหลผ่านถาดทั่วทั้งถาด



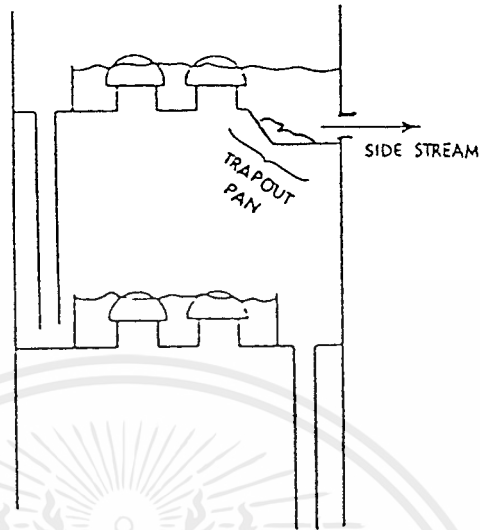
รูปที่ 2.11 การไหลของของเหลวไหลผ่านถาด

(ก). ถาดที่ไม่มี Distributor Weir

(ข). ถาดที่มี Distributor Weir

Trapout Pan ถาดที่มีการคั่งผลิตภัณฑ์ข้างหออออก จะมีบ่อคักอยู่ที่ด้านริมหรือกลางถาด เรียกว่า Trapout Pan มีหน้าที่รวบรวมของเหลวบนถาด เพื่อคั่งออกเป็นผลิตภัณฑ์ข้างหอ

Weephole บนถาดจะมีรูเล็ก ๆ ขนาด $1/4 - 1/2$ นิ้วเจาะไว้หลายรู เพื่อใช้ระบาย ของเหลวออกจากถาดให้หมด เมื่อหยุดเดินเครื่องหอกถัน

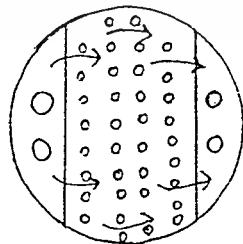


รูปที่ 2.12 Trapout Pan

2.5.4 ถาดแบบอื่นๆ

นอกจากถาดแบบ Bubble - Cap Tray ยังมีแบบอื่นอีกหลายแบบ แต่ละแบบมีวิธีการในการที่จะทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างไอกับของเหลวแตกต่างกันไป

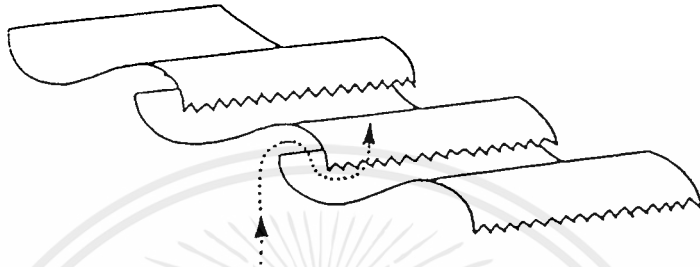
1. Sieve Deck หรือ Sieve Tray เป็นแผ่นโลหะถูกเจาะรูทั่วทั้งถาด ไอที่พุ่งขึ้นตามรูเล็ก ๆ เหล่านี้ จะดันของเหลวไม่ให้ตกลงมาตามรู และผุดเป็นฟองผ่านของเหลวบนถาด ถาดแบบนี้จะมี Downcomer และ Wier เช่นเดียวกัน Sieve Deck มีราคาถูก และทำความสะอาดง่าย



รูปที่ 2.13 Sieve Deck

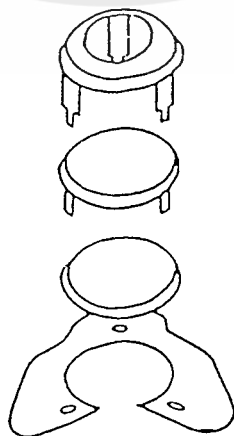


2. S - Section Type Tray มีราคาที่ถูก มีลักษณะแผ่นรูปตัวเอสหลาย ๆ แผ่นวางเหลื่อมกัน ซึ่งจะทำให้เกิด Bubble และวางแต่ละอันก็จะมี Teeth ที่ขอบด้านล่างเช่นเดียวกับ Bubble Cap ใต้อาจจะมุดผ่าน Teeth เข้าไปในช่องของเหลวบนราง



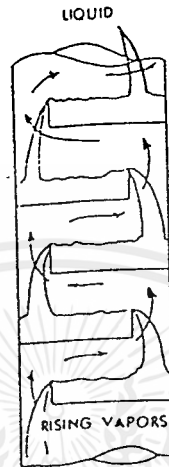
รูปที่ 2.14 ถาดรูปตัวเอส

3. Glitsch Tray หรือ Ballast Tray บนถาดจะมีรูใหญ่เช่นเดียวกับ Bubble - Cap Tray ภูเหล่านี้ไม่มี Riser แต่จะมีฝาปิด อาจจะมี 2 หรือ 3 ฝาวางซ้อนกัน ถูกยึดอยู่กับถาดโดย Guide ซึ่งสอดผ่านรูและเกี่ยวอยู่ข้างใต้ถาด ถาดแบบนี้สามารถเปลี่ยนขนาดของช่องเปิดได้เมื่ออัตราไหลของไอเปลี่ยนไป เมื่อไม่มีไอฝาลังล่างสุดจะตกลงมาปิดรูภายใต้อัตราการไหลของไอต่ำ ฝาลังล่างสุดจะถูกยกขึ้นไปแตะกับฝาลังกลางซึ่งวางอยู่บนฝาลังล่างด้วยขาสั้น ๆ เมื่ออัตราการไหลของไอเพิ่มขึ้นทั้งฝาลังและฝาลังกลางก็จะถูกยกขึ้นไปจนหยุดอยู่ที่ฝาลังบนสุด ดังนั้นรูจะเปิดกว้างขึ้นเป็นขั้น ๆ ตามอัตราการไหลของไอ ทำให้สามารถปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการกลั่นได้ Ballast Tray ถูกออกแบบให้ทำงานได้ดีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการกลั่น



รูปที่ 2.15 Ballast Tray

4. Side to Side Pan ของเหลวจะตกลงมาเป็นมันให้ไอพุ่งผ่านประสิทธิภาพในการสัมผัสกันระหว่างไอกับของเหลวจะไม่มาก แต่สามารถใช้ได้ดีเมื่อมีสิ่งสกปรก หรือสิ่งแปลกปลอมอื่น

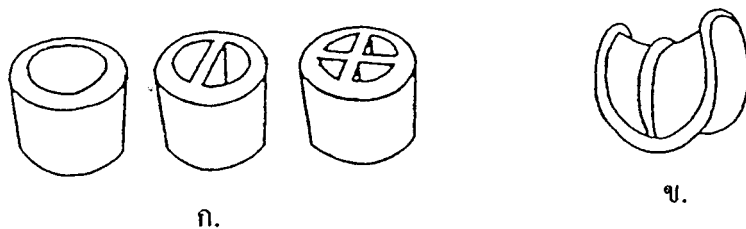


รูปที่ 2.16 Side to Side Pan

2.5.5 Packed Tower

ในโรงกลั่นน้ำมันส่วนใหญ่จะใช้หอกลั่นแบบ Tray Tower การใช้ Packing แทนถาดในการทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างไอกับของเหลว Packing ที่ใช้ในหอกลั่นอาจจะทำจากเซรามิก (Ceramic) โลหะผสมที่ทนต่อการกัดกร่อน (Non Corrosive Metal Alloy) หรือสารอื่นๆ ที่จะไม่ถูกกัดกร่อนโดยสิ่งเจือปนในของเหลวที่ส่งเข้ากลั่น Packing ทั่วๆ ไปจะเป็นแบบ Raschig Ring และ Berl Saddle

Raschig Ring มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับความสูง และ Berl Saddle มีลักษณะคล้ายอานม้า

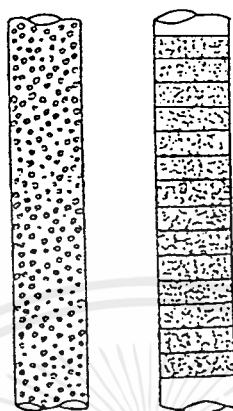


รูปที่ 2.17 ชนิดของ Packing

(ก). Raschig ring

(ข). Berl saddle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.

ข.

รูปที่ 2.18 แบบของการ Packing ใน Packed Tower

(ก). บรรจุแบบ Random Packing

(ข). บรรจุแบบ Layer Packing

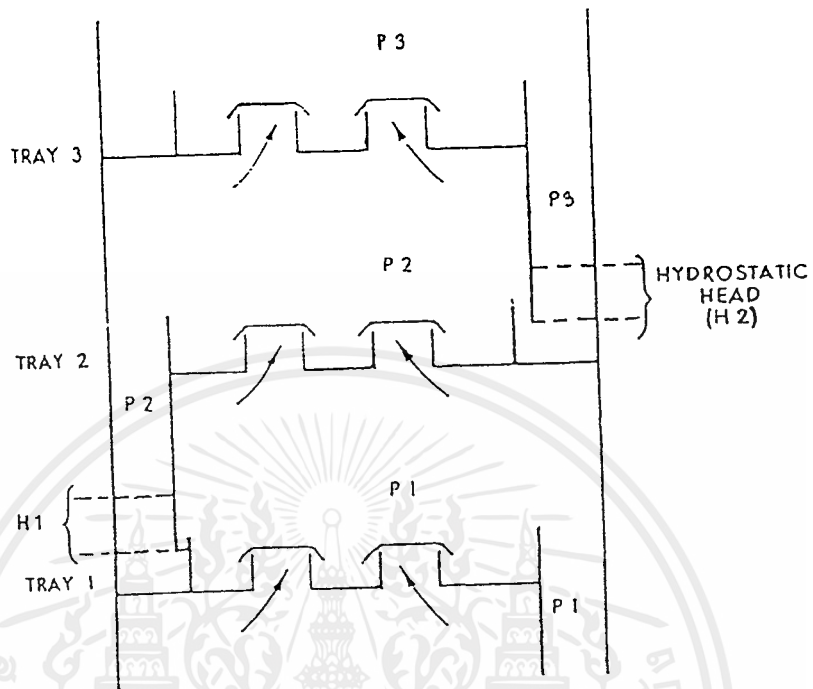
2.6 หอกล้มทำงานผิดปกติ (Abnormal Operation)

หอกล้มที่ได้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้ตามที่ต้องการ แต่ยังคงเครื่องอยู่ในสภาพปกติ นั้นยังสามารถควบคุมได้ง่ายซึ่งโดยปกติจะควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยการปรับอุณหภูมิ แต่ถ้าหอกล้มอยู่ในสภาพผิดปกติ นั้นจะต้องการความชำนาญของผู้ปฏิบัติการมากในการวิเคราะห์และการแก้ไข ซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างมาเกี่ยวข้องและมีแนวทางแก้ไขที่อาจจะเป็นไปได้หลายทางที่ต้องนำมาพิจารณา นอกเหนือจากการปรับอุณหภูมิ การผิดปกติของหอกล้มไม่เพียงแต่จะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่ำลงเท่านั้น แต่สถานการณ์อาจจะมีรุนแรงเป็นอันตรายต่อบุคคลและอุปกรณ์การก่ล้มได้

2.6.1 ถาดท่วม (Flooded Tray)

ถาดท่วมคือถาดที่ไม่สามารถจะรองรับของเหลวหรือไอได้อีก เกิดขึ้นได้เมื่อปริมาณไอหรือของเหลวเข้าสู่ถาดมากเกินไป การที่ไอหรือของเหลวจะไหลได้นั้นจะต้องมีแรงผลักดัน (Driving Force) ที่จะสามารถเอาชนะแรงต้านทานการไหล (Resisting Force) ทั้งหมดได้ แรงผลักดันสำหรับไอคือความดัน แรงผลักดันของของเหลวก็คือน้ำหนักของของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ภาพตัดขวางของถาด

ไอจะเคลื่อนที่จากถาดที่ 1 ขึ้นไปยังถาดที่ 2 ได้ ก็ต่อเมื่อความดันที่ 1 (P_1) มากกว่าความดันที่ 2 (P_2) จากรูปที่ 2.19 ความดันจะลดลงจากกันห่อไปถึงยอดหอ ความดันที่แตกต่างกันนี้เรียกว่าความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ซึ่งเป็นแรงผลักดันเคลื่อนสำหรับไอให้ขึ้นไปสู่ยอดหอ ขณะที่ไอไหลผ่าน Riser และ Bubble Cap จะมีความเสียดทาน (Friction) ซึ่งเป็นแรงต้านทานการไหลของไอ และเมื่อไอมุดผ่านของเหลวบนถาดจะมีแรงต้านทานอีกค่าหนึ่งคือน้ำหนักของของเหลวเหนือช่องเปิดของ Cap น้ำหนักของของเหลวนี้เรียกว่า Hydrostatic Head บนถาด ดังนั้นการที่ไอไหลผ่านขึ้นไปได้จะต้องเอาชนะความเสียดทานขณะไหลผ่าน Riser และ Bubble Cap และต้องเอาชนะ Hydrostatic Head บนถาด

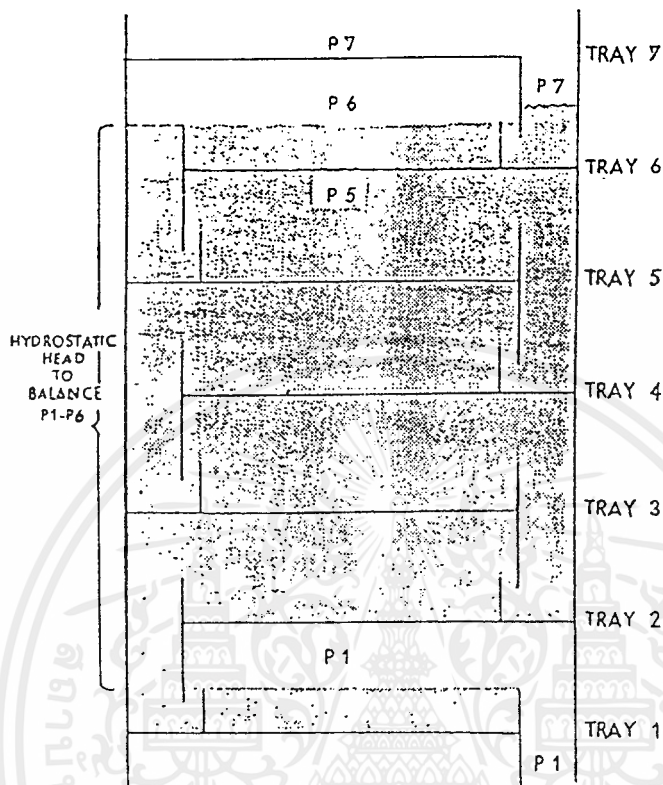
สำหรับของเหลวแรงผลักดันคือน้ำหนักของของเหลว (ขึ้นอยู่กับความเสียดทาน) หรือความลึกของของเหลวคือ Hydrostatic Head การเคลื่อนที่ลงมาในหอกล่างของเหลวจะต้องเอาชนะกับความดันตกคร่อมของไอและความเสียดทานใน Downcomer

ในการกลั่นปกติไอจะพุ่งขึ้นจากถาดที่ 1 ไปถาดที่ 2 และของเหลวบนถาดที่ 2 จะไหลผ่าน Downcomer มายังถาดที่ 1 ความดันที่ 1 (P1) มากกว่าความดันที่ 2 (P2) เนื่องจากความดันเกิดขึ้นทุกทิศทุกทาง ดังนั้นความดันที่ 1 (P1) ที่ผลักดันให้พุ่งขึ้นไปนี้จะผลักดันของเหลวบนถาดที่ 1 และจะผลักดันของเหลวให้ขึ้นไปตาม Downcomer ใน Downcomer ก็จะมีระดับของเหลวอยู่ระดับหนึ่งซึ่งต่างจากระดับของเหลวบนถาดระดับ หรือความลึกของของเหลวใน Downcomer ก็เป็น Hydrostatic Head Hydrostatic Head ใน Downcomer จะขึ้นอยู่กับความดันตกคร่อมระหว่างถาดและอัตราการไหลของของเหลว Hydrostatic Head ใน Downcomer จะต้องสูงพอเพื่อให้ของเหลวเอาชนะความดันตกคร่อมของไอและความเสียดทานใน Downcomer หอกลับในสภาพปกตินั้น Hydrostatic Head ใน Downcomer จะคงที่อยู่เสมอ ถ้าอัตราการไหลของของเหลวและความดันตกคร่อมคงที่

แรงต้านทานเนื่องจากความเสียดทานจะเพิ่มขึ้นขณะที่อัตราการไหลสูงขึ้น ถ้าอัตราการไหลของของเหลวในหอเพิ่มขึ้น แรงต้านทานจะเพิ่มขึ้น Hydrostatic Head ใน Downcomer ก็จะต้องสูงขึ้นเพื่อเอาชนะแรงต้านทานที่เพิ่มขึ้น และเมื่อความลึกของของเหลวใน Downcomer เพิ่มขึ้นจนเท่ากับระยะห่างระหว่างถาด 2 ถาด ถาดก็จะท่วม

เมื่อไอเคลื่อนที่ผ่าน Riser และ Bubble Cap Riser และ Bubble Cap จะสร้างความเสียดทานขึ้นมา แรงต้านทานเนื่องจากความเสียดทานจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น เมื่ออัตราการไหลของไอเพิ่มสูงขึ้น แรงต้านทานเนื่องจากความเสียดทานจะเพิ่มขึ้น ความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น Hydrostatic Head ใน Downcomer จะสูงขึ้นเพื่อเอาชนะความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นและเมื่อ Hydrostatic Head เพิ่มขึ้นจนเท่ากับหรือมากกว่าระยะห่างระหว่าง 2 ถาด ถาดในส่วนนั้นก็เกิดการท่วม

โดยปกติแล้วส่วนประกอบของของเหลวบนแต่ละถาดจะแตกต่างกัน อุณหภูมิของถาดแต่ละถาดก็จะแตกต่างกัน เมื่อถาดหลาย ๆ ถาดเกิดการท่วม ส่วนประกอบของของเหลวในทุก ๆ ถาดที่ท่วมจะเหมือนกันทั้งหมดและอุณหภูมิบนถาดเหล่านี้ก็จะเท่ากันหรือกระจายต่างกันเล็กน้อย ถาดทั้งหมดที่ท่วมจะมีลักษณะเหมือนถาดเดียว ประสิทธิภาพของหอกลับก็จะต่ำลง เนื่องจากเหมือนกับเป็นการลดจำนวนถาดที่ทำงานได้ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ก็จะต่ำลง ในส่วนของหอกลับที่เกิดการท่วมนั้น ไอที่พุ่งขึ้นจะดันดันกับ Hydrostatic Head ของของเหลวที่สูงขึ้น ความดันตกคร่อมของหอกลับจึงจะสูงกว่าเมื่อหอกลับเดินเครื่องในสภาพปกติ นอกจากนี้ความดันในหอก็จะขึ้นลงตลอดเวลา



รูปที่ 2.20 ถาดท่วม

หอท่เกิดการท่วมสามารถสังเกตได้จากลักษณะต่อไปนี้

- ผลลัทธิจะมีคุณภาพต่ำ
- อุณหภูมิจะต่างกันเล็กน้อยในส่วนของหอท่ท่วม
- ความดันตกคร่อมสูงกว่าปกติ
- ความดันในหอกลับขึ้นลง

ผู้ปฏิบัติงานจะสามารถแก้ไขให้กลับสู่สภาพปกติได้โดย

- ลดอัตราการไหลของของเหลว
- ลดอัตราการไหลของไอ

2.6.2 ระดับของเหลวสูง (High Level)

ในขณะที่หอกลับทำงานปกติระดับของเหลวที่ก้นหอยจะต้องรักษาไว้ให้คงที่ ซึ่งสามารถดูได้จากเครื่องวัดระดับ การควบคุมระดับของของเหลวที่ก้นหอย (Bottom) สามารถทำได้โดยการปรับอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ดึงออกจากก้นหอย ถ้าต้องการให้ระดับต่ำลงก็ต้องดึงผลิตภัณฑ์ก้นหอยออกมากขึ้น ถ้าจะให้ระดับสูงขึ้นก็ต้องดึงผลิตภัณฑ์ที่ก้นหอยออกน้อยลง ถ้าปล่อยให้ระดับของของเหลวเพิ่มสูงขึ้นจนถึงภาค ภาคนั้นก็จะมีลักษณะเหมือนกับท่วม เมื่อระดับของของเหลวเพิ่มขึ้นจนท่วมภาคหลาย ๆ ภาค ภาคบริเวณที่ท่วมนั้นจะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำจึงมีผลให้ประสิทธิภาพในการกลั่นแยกลำดับส่วนลดลง ความดันตกคร่อมของหอกลับที่มีระดับของเหลวสูงเกินไป จะมีค่ามากกว่าความดันตกคร่อมในหอกลับที่มีระดับของของเหลวปกติ ลักษณะที่เกิดจากการมีระดับของเหลวที่สูงเกินไปจะมีลักษณะเช่นเดียวกับภาคท่วม โดยภาคท่วมอาจเกิดขึ้นที่ส่วนใด ๆ ของหอกลับก็ได้ แต่ภาคที่มีระดับของเหลวที่สูงเกินไปจะเกิดที่ก้นหอย

2.6.3 ภาคแห้ง (Dry Tray)

ภาคแห้งคือภาคที่ไม่มีของเหลวหรือมีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นก็จะไม่เกิดการแยกลำดับส่วนบนภาคที่แห้ง เนื่องจากไม่มีการสัมผัสกันระหว่างไอกับของเหลว ทำให้ประสิทธิภาพของหอกลับลดลง ภาคแห้งจะเกิดขึ้นกับภาคที่อยู่ต่ำจากภาคที่ถูกดึงผลิตภัณฑ์ข้างหอยออกมากเกินไปคือเมื่อดึงผลิตภัณฑ์ออกจากภาคมากเกินไปจะไม่มีการกลั่นไหลกลับที่จะไปทำให้ภาคข้างล่างเย็นลง ดังนั้นภาคข้างล่างก็จะร้อนขึ้น ของเหลวบนภาคที่ร้อนขึ้นนี้ก็จะเป็นไอน้ำมากขึ้น ไอที่ขึ้นไปบนหอกลับนี้มีมากขึ้นและของเหลวที่จะลงไปทำให้หอยเย็นมีน้อยลง เนื่องจากส่วนที่เกิดภาคแห้งมีอุณหภูมิสูงเกินไป และผลิตภัณฑ์ที่ถูกดึงออกจากภาคที่อยู่สูงกว่าภาคที่แห้งก็จะหนักเกินไป

การเกิดภาคแห้งอาจมีสาเหตุจากสารที่ป้อนเข้าก้นหอยมีอุณหภูมิสูงเกินไป ไอร้อนยิ่งยวดที่เข้ามาที่สารที่ป้อนนี้สามารถไปประเหยของเหลวที่อยู่สูงกว่าภาคป้อนเข้า (Feed Tray) จนกลายเป็นไอน้ำ ทำให้ภาคที่อยู่สูงกว่าภาคป้อนเข้าเกิดการแห้ง ส่วนของหอกลับที่เกิดภาคแห้งจะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากไม่เกิดการแยกลำดับส่วนและไม่มีของเหลวบนภาคที่แห้งหรือมีเพียงเล็กน้อย ดังนั้นไอที่พุ่งผ่านขึ้นไปจะมีแรงดันที่ต้องเอาชนะน้อย ทำให้ความดันตกคร่อมของหอกลับลดลง

ถ้าภาคที่อยู่ต่ำกว่าภาคที่ถูกดึงผลิตภัณฑ์ออกเกิดการแห้งจะสามารถแก้ไขสถานการณ์ได้โดยดึงผลิตภัณฑ์ออกน้อยลง

การเกิดถาดแห้งที่มีสาเหตุจากการที่มีไอร้อนยิ่งยวดเข้ามากับ Feed อาจเกิดขึ้นกับถาดที่อยู่สูงกว่าถาดป้อนเข้าหรืออาจจะเกิดกับถาดที่อยู่ต่ำกว่าถาดป้อนเข้าก็ได้ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยลดอุณหภูมิของ Feed หรือเพิ่มการกลั่นไหลกลับลงไปในส่วนที่เกิดถาดแห้ง

2.6.4 ถาดเสียหาย (Upset Tray)

ถ้ามีถาดบางถาดทำงานไม่ได้ตามที่กำหนดไว้ หอกลั่นก็จะมีประสิทธิภาพลดลงภายใต้สภาวะการทำงานที่ไม่ถูกต้องของหอกลั่น ถาดอาจจะหลุดหรือเสียหาย และ Bubble Cap ก็สามารถหลุดออกได้ สาเหตุที่ทำให้ถาดเสียหายอาจเกิดจากความเร็วจองไอมี่ค่าสูงขึ้นอย่างฉับพลัน ซึ่งอาจทำให้ถาดหลุดออกจากตำแหน่งเดิมเลื่อนไปอยู่ตำแหน่งใหม่ ถาดต่าง ๆ ที่เสียหายจะไม่ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างไอกับของเหลว ประสิทธิภาพของหอกลั่นก็จะลดลง

น้ำที่ถูกล็อกอยู่ในหออาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ถาดเกิดความเสียหายได้ เพราะถ้า น้ำที่ถูกล็อกอยู่บนถาดถูกทำให้ระเหย โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน จะทำให้เกิดการขยายตัวถึง 1600 เท่า ทำให้ความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งความดันที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถยกถาดขึ้นและทำลาย Bubble Cap ได้ น้ำที่กล่ว่นี้อาจมาจากน้ำที่ตกค้างอยู่หลังจากการซ่อมใหญ่ หรือน้ำที่เข้าไประหว่างจุดเริ่มต้นการใช้งาน (Start Up) สามารถทำให้ถาดเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องระมัดระวัง เพราะถ้าเริ่มต้นการกลั่นไม่ถูกต้องจะทำให้ น้ำที่ถูกล็อกอยู่ระเหยเป็นไออย่างฉับพลันทำให้ถาดเสียหาย

ถาดที่เกิดความเสียหายไม่สามารถปรับให้เข้าที่ได้โดยการปรับอุณหภูมิ ความดัน หรือ อัตราการไหล มีวิธีการแก้ไขเพียงวิธีเดียวคือทำการซ่อมภายในหอกลั่น ซึ่งจะต้องหยุดเดินเครื่องกลั่น ทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมาก

ถาดที่เสียหายจะทำให้ไม่เกิดการแยกลำดับส่วน ในการกลั่นถ้าถาดเสียหายหลาย ๆ ถาด บริเวณส่วนนั้นของหออจะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำ ฉะนั้นไอที่พุ่งผ่านถาดที่เสียหายหรือถาดที่ไม่อยู่ตำแหน่งเดิมจะไม่ไหลผ่าน Bubble Cap และไม่สัมผัสกับของเหลว จึงมีแรงต้านทานต่อการพุ่งขึ้นของไอต่ำ จึงพบว่าหอกที่มีถาดเสียหายจะมีความดันตกคร่อมต่ำเช่นเดียวกับถาดแห้ง

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. หอกกลั่น (Distillation Column)
2. เครื่องสูบ (Pump)
3. กรวยกรองและสำลี
4. เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)

3.2 สารเคมี

1. เอทานอล (C_2H_5OH)
2. บิวทานอล (C_4H_9OH)
3. 3-เมทิล-1-บิวทานอล ($C_5H_{11}OH$)
4. เอทิลอะซิเตต ($CH_3COOC_2H_5$)
5. เมทิลอะซิเตต ($CH_3COOC_2H_5$)
6. เมทานอล (CH_3OH)
7. กรดฟอร์มิก ($HCOOH$)
8. กรดอะซิติก (CH_3COOH)
9. โพรพานอล (C_3H_7OH)
10. อะซีทัลดีไฮด์ (CH_3CHO)
11. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมัก (น้ำส้ม)
12. น้ำกลั่น (Distillated Water)

3.3 การศึกษาผลของค่าอัตราการกลั่นไหลกลับต่อการกระจายตัวของ Fusel Oils ในหอกกลั่น

3.3.1 ขั้นตอนการกลั่นน้ำส้ม

ในการทำการทดลองการกลั่นแต่ละครั้ง ทำการกลั่นโดยการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการกลั่นไหลกลับ โดยกำหนดค่าอัตราการไหลของ Feed อุณหภูมิของ Feed และอุณหภูมิของ Reboiler ให้มีค่าคงที่

ซึ่งขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1. ตรวจสอบสภาพของหอกลับให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน
2. ทำการกรองน้ำสำผ่านลำลี
3. สูบน้ำสำที่ผ่านการกรองด้วยเครื่องสูบล้างเข้าไปใน Reboiler จนระดับน้ำสำพื่นซุดให้ความร้อนของ Reboiler

4. ปรับอัตราการไหลของ Feed เป็น 0.052 ลิตรต่อนาที
5. เปิดซุดให้ความร้อนของ Feed และควบคุมอุณหภูมิของ Feed ให้มีค่าคงที่ที่ 80 องศาเซลเซียส

6. เปิดซุดให้ความร้อนของ Reboiler และควบคุมอุณหภูมิ Reboiler ให้มีค่าคงที่ที่ 100 องศาเซลเซียส

7. ปรับค่าอัตราการกลับไหลกลับ (0.1, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0, 12.0 และ 15.0)

8. บันทึกค่าอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ตลอดหอกลับ อุณหภูมิของ Feed และอุณหภูมิของ Reboiler โดยบันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 10 นาที

9. เมื่อระบบในหอกลับอยู่ในสถานะคงตัว (เมื่ออุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ในหอกลับคงที่) เก็บสารที่ได้จากการกลับจากส่วนผลิตภัณฑ์ยอดหอ ผลิตภัณฑ์ก้นหอ ผลิตภัณฑ์ข้างหอ และ Feed เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลหาปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ

3.3.2 ขั้นตอนการล้างและหยุดเครื่องกลั่น

1. ถ่ายเอาน้ำสำที่เหลืออยู่ใน Reboiler ออก
2. สูบน้ำโดยเครื่องสูบล้างไปทำความสะอาดภายในหอกลับ โดยเปิดซุดให้ความร้อนของ Feed

3. เมื่อภายในหอกลับสะอาด ปิดซุดให้ความร้อนของ Feed และป้อนน้ำเย็นเข้าไปในหอกลับจนระดับน้ำใน Reboiler พื่นซุดให้ความร้อน (เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับซุดให้ความร้อน)

4. ปิดระบบน้ำหล่อเย็น และเครื่องสูบล้าง
5. ตรวจสอบความเรียบร้อยของหอกลับ

3.3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์

ทำการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เก็บจากหอกลับ ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ ซึ่งรายละเอียดของเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟและวิธีการวิเคราะห์จะแสดงดังภาคผนวก ข.

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

การศึกษาบทบาทของค่าอัตราการกลั่นไหลกลับต่อการกระจายตัวของ Fusel Oils ในหอกลั่น ในการทดลองเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของการกลั่นไหลกลับ โดยมีข้อมูลอยู่ในภาคผนวก ค.

4.1 ผลของค่าอัตราการกลั่นไหลกลับต่อการกระจายตัวของ Fusel Oils ในหอกลั่น

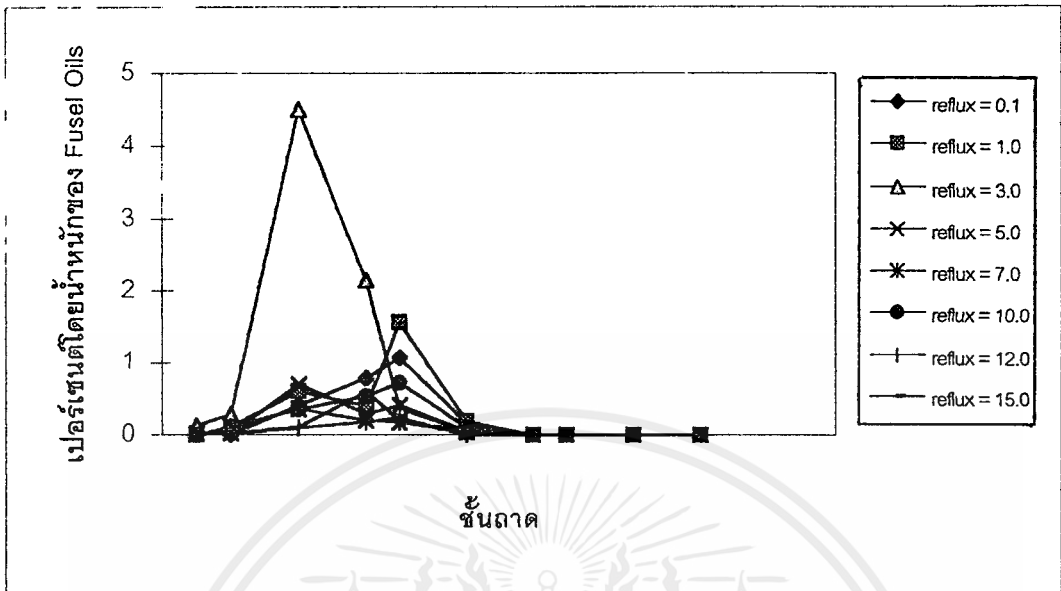
ในการทดลองทำโดยใช้ค่าอัตราการกลั่นไหลกลับต่าง ๆ กัน คือ 0.1, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0, 12.0 และ 15.0 โดยกำหนดค่าคงที่อัตราการไหลของ Feed 0.052 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิของ Feed 80 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของ Reboiler 100 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างความเข้มข้นของ Fusel Oils (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในถาดแต่ละชั้นกับชั้นถาด พบว่าค่าอัตราการกลั่นไหลกลับที่ 3.0 เป็นค่าอัตราการกลั่นไหลกลับที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้การกระจายตัวของ Fusel Oils ในหอกลั่นกระจายตัวในช่วงชั้นถาดที่แคบที่สุด และให้ความเข้มข้นของ Fusel Oils ที่สูงสุด คือ 2.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เมื่อปรับอัตราการกลั่นไหลกลับเป็น 0.1, 1.0 และ 3.0 พบว่าความเข้มข้นของ Fusel Oils มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราการกลั่นไหลกลับจาก 0.1 จนถึง 3.0 จะส่งผลให้ส่วนหนักของสำที่เป็นไอที่ออกมาทางยอดหอควบแน่นกลายเป็นของเหลว และถูกส่งกลับเข้าไปในหอกลั่น ทำให้ประสิทธิภาพการแยกดีขึ้น ส่งผลให้ได้ความเข้มข้นของ Fusel Oils ที่สูงขึ้น

เมื่อเพิ่มอัตราการกลั่นไหลกลับเป็น 5.0, 7.0, 10.0, 12.0 และ 15.0 พบว่าความเข้มข้นของ Fusel Oils มีค่าลดลง และการกระจายตัวของ Fusel Oils กว้างมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอัตราการกลั่นไหลกลับมากเกินไปทำให้อัตราการไหลของของเหลวในหอกลั่นมากขึ้นจนทำให้ถาดที่อยู่ต่ำกว่าระดับถาดที่ Feed เกิดการท่วมขึ้น (ตั้งแต่ถาดที่ 6 ลงไป) ทำให้ประสิทธิภาพการกลั่นแยกตกลง ดังนั้นจึงส่งผลให้ความเข้มข้นของ Fusel Oils มีค่าลดลง และการกระจายตัวของ Fusel Oils มากขึ้น

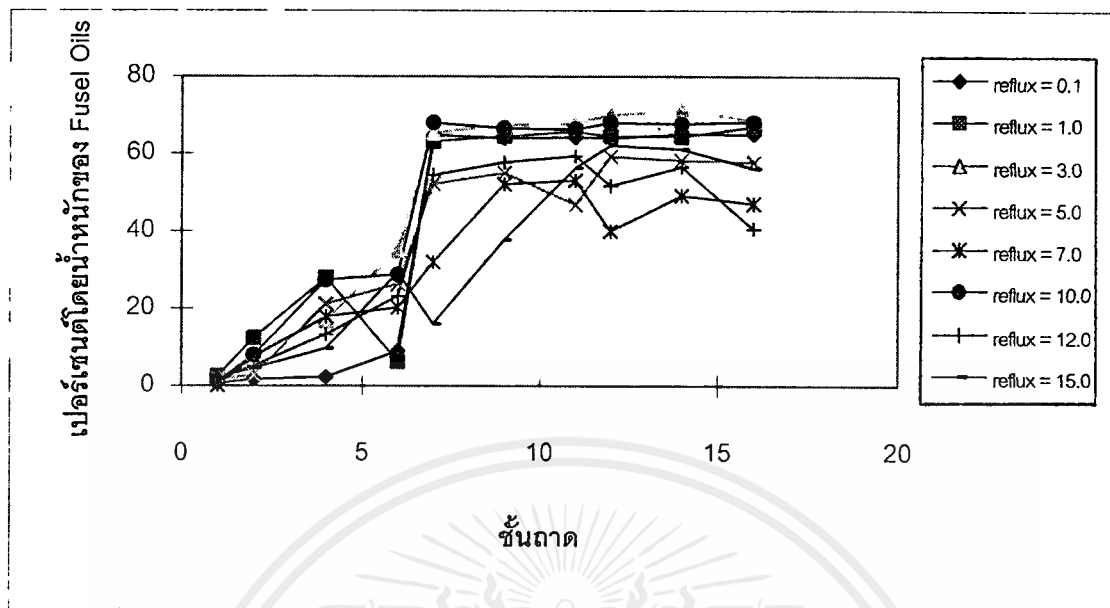
จากผลการทดลองตั้งแต่ถาดที่ 10 ถึง ถาดที่ 16 ไม่มี Fusel Oils เนื่องจาก Fusel Oils เป็นสารหนักในของผสม (น้ำดำ) ดังนั้นตั้งแต่ถาดที่ 10 ถึง ถาดที่ 16 จึงไม่พบ Fusel Oils แต่จะพบเอธานอลมาก ทั้งนี้เพราะเอธานอลเป็นสารเบาในของผสม (น้ำดำ)



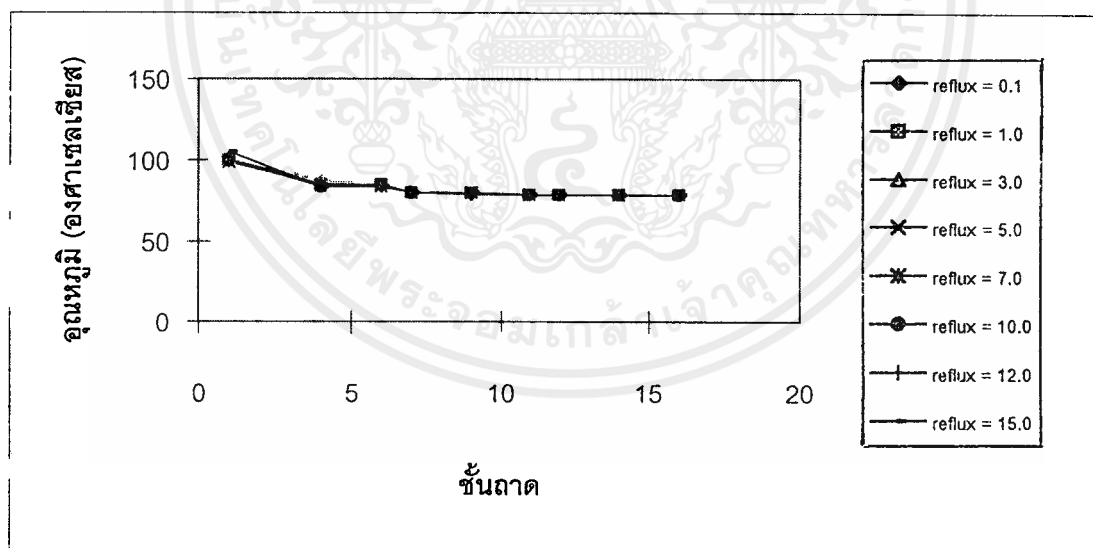
รูปที่ 4.1 กราฟระหว่างความเข้มข้นของ Fusel Oils (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในถาดแต่ละชั้นกับชั้นถาด โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการกลั่นไหลกลับ

รูปที่ 4.2 กราฟระหว่างความเข้มข้นของเอธานอล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในถาดแต่ละชั้นกับชั้นถาด พบว่าความเข้มข้นของเอธานอลในช่วงถาดที่ 7 ถึงถาดที่ 16 มีแนวโน้มคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับกราฟที่ 4.3 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างอุณหภูมิของของเหลวในถาด (องศาเซลเซียส) ในถาดแต่ละชั้นกับชั้นถาด พบว่าอุณหภูมิของของเหลวในถาดที่ 7 ถึงถาดที่ 16 มีแนวโน้มคงที่ แสดงว่าในช่วงถาดที่ 7 ถึงถาดที่ 16 ไม่เกิดการกลั่นแยก เห็นได้จากการที่องค์ประกอบในของเหลวคงที่ ส่งผลให้อุณหภูมิของของเหลวในถาดคงที่ แต่ในช่วงถาดที่ 1 ถึงถาดที่ 7 พบว่าอุณหภูมิของของเหลวในถาดลดลงตามความสูงของชั้นถาด แสดงว่าในช่วงถาดที่ 1 ถึงถาดที่ 7 มีการกลั่นแยกของสารเกิดขึ้น

การที่ช่วงถาดที่ 7 ถึงถาดที่ 16 ไม่เกิดการกลั่นแยก สันนิษฐานว่าเกิดจากการที่อุณหภูมิของ Feed สูงเกินไป ทำให้องค์ประกอบใน Feed เป็นไอน้ำมากกว่าของเหลว เมื่อ Feed ที่มีไอน้ำมากกว่าของเหลวเข้าไปในหอกกลั่นทำให้ไอไหลขึ้นไปในถาดที่เหนือถาด Feed มาก ทำให้ของเหลวที่อยู่ในถาดที่ 7 ถึงถาดที่ 16 ไม่สามารถไหลมายังถาดที่ต่ำลงมาได้ เนื่องจากความดันไอที่มากขึ้นทำให้ของเหลวไม่สามารถไหลผ่านลงมาตาม Downcomer ได้ ดังนั้นการกลั่นแยกในถาดที่ 7 ถึงถาดที่ 16 จึงเกิดขึ้นต่ำ



รูปที่ 4.2 กราฟระหว่างความเข้มข้นของเอธานอล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในถาดแต่ละชั้นกับชั้นถาด โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการกลั่นไหลกลับ



รูปที่ 4.3 กราฟระหว่างอุณหภูมิของของเหลว (องศาเซลเซียส) ในถาดแต่ละชั้นกับชั้นของถาด โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการกลั่นไหลกลับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในปฏิญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการแยก Fusel Oils จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักโดยการกลั่น โดยมีเนื้อหาการทดลอง ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการกลั่น ไทลกลับ 0.1, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0, 12.0 และ 15.0 ใช้สภาวะการทดลองดังนี้

อุณหภูมิของ Feed 80 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของ Reboiler 100 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลของ Feed 0.052 ลิตรต่อนาที

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ คือค่าอัตราส่วนการกลั่น ไทลกลับ 3.0 ทำให้การกระจายตัวของ Fusel Oils ในหอกกลั่นแคบที่สุด และความเข้มข้นของ Fusel Oils เป็น 2.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการกลั่นแยก Fusel Oils จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมัก (น้ำสำ) ช่วงระหว่างการกลั่นจะพบคราบตะกรันเกิดขึ้นที่ Bubble Cap และ Slot แต่ถ้าใช้น้ำสำที่ถูกเก็บที่อุณหภูมิต่ำมาเป็นวัตถุดิบในการกลั่นจะทำให้เกิดคราบตะกรันน้อยลง จากการศึกษาได้ให้ข้อสันนิษฐานว่าคราบตะกรันที่เกิดขึ้นเกิดจากยางอ้อย (Gum) ที่เป็นสารเจือปนในน้ำอ้อยที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการหมัก ซึ่งการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำก่อนการทำการกลั่นจะช่วยลดการเกิดคราบตะกรัน และช่วยให้การอุดตันในถาดลดน้อยลง

จากผลการทดลอง ในช่วงถาดที่ 7 ถึงถาดที่ 16 ที่เกิดการกลั่นผิดปกติ เนื่องจากอัตราการไหลของไอในหอกกลั่นมีมากทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิของ Feed ที่สูงเกินไปทำให้ Feed ที่เข้าไปในหอกกลั่นกลายเป็นส่วนที่เป็นไอน้ำมากและจากการที่อุณหภูมิของ Reboiler ที่สูงเกินไปจึงส่งผลให้ของเหลวที่อยู่ใน Reboiler กลายเป็นไอน้ำมากทำให้มีไอน้ำในหอกกลั่นสูง แนวทางแก้ไขจึงต้องทำการกลั่นภายใต้อุณหภูมิของ Feed และอุณหภูมิของ Reboiler ที่ต่ำกว่าค่าที่ใช้ในปฏิญานิพนธ์นี้คือใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการศึกษาที่ได้จากปริญญาานิพนธ์นี้จะนำไปเป็นข้อมูลส่วนหนึ่งในการใช้เป็นแนวทางในการหาภาวะที่ดีที่สุดในการกลั่นแยก Fusel Oils จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมัก โดยปริญญาานิพนธ์ต่อเนื่องจากปริญญาานิพนธ์นี้จะต้องทำการกลั่นแยก Fusel Oils จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักโดยปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของ Feed อุณหภูมิของ Feed และอุณหภูมิของ Reboiler เพื่อใช้ข้อมูลทั้งหมดในการหาภาวะที่ดีที่สุด และนำไปสู่การพัฒนากระบวนการกลั่นแยก Fusel Oils จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักให้ไปสู่ระดับโรงงานขนาดเล็กได้



เอกสารอ้างอิง

1. ไพบูลย์ ดำเนิงวิรุทัย . หลักการของเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการหมัก. สถานที่พิมพ์ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2520.
2. ลัดดาวัลย์ รัศมีทัต . จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม. สถานที่พิมพ์ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2529.
3. เพียรพรรค ทศธร . หน่วยปฏิบัติการทั่วไป. สถานที่พิมพ์ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534 .
4. ดร. เพรสพิชญ์ คณาธารณา. ทฤษฎีแก๊สโครมาโตกราฟี. 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สถานที่พิมพ์ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2526.
5. รศ. ธวัชชัย ศรีวิบูลย์. เคมีวิเคราะห์ 2 . 1,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สถานที่พิมพ์ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2537.

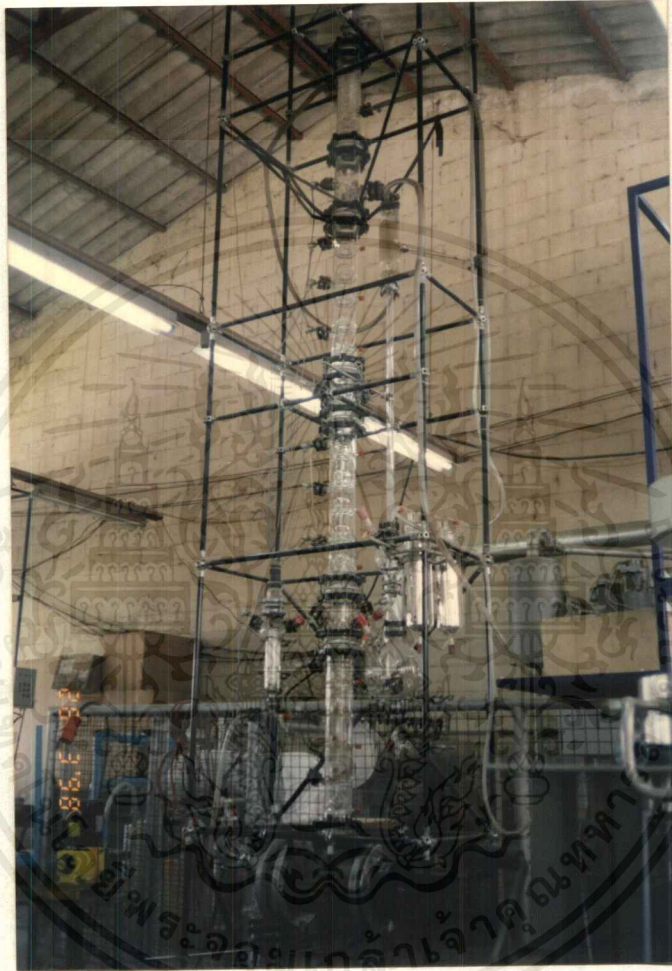


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ภาพเครื่องกลั่นที่ใช้ในปริญญานิพนธ์



รายละเอียดของหอกลั่นที่ใช้ในการทดลอง

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	13.72 เซนติเมตร
จำนวนชั้นทั้งหมด	15 ชั้น (ไม่รวมคอนเดนเซอร์และ Reboiler)
ระยะห่างระหว่างชั้น	-10.5 เซนติเมตร
ความสูงของหอกลั่น	3.5 เมตร
ปริมาตรของ Reboiler	1,700 ลูกบาศก์เซนติเมตร
ปริมาตรคอนเดนเซอร์	3,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์ปริมาณสารด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ [4, 5]



เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ รุ่น Model 9001 ของบริษัท TREMETRIC
คอลัมน์ 10 % Carbowax 20 M 2 % KOH Chromosorb waw on 80/100

วิธีการวิเคราะห์

- เปิดเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ และอุ่นเครื่อง โดยตั้งสภาวะเครื่องดังนี้
 - อุณหภูมิของเครื่องวัด 200 องศาเซลเซียส
 - อุณหภูมิของ Injection Port 200 องศาเซลเซียส
 - อัตราการไหลของไนโตรเจน 26 มิลลิลิตรต่อนาที
 - อัตราการไหลของไฮโดรเจน 35 มิลลิลิตรต่อนาที
 - อัตราการไหลของออกซิเจน 182 มิลลิลิตรต่อนาที
 - การตั้งชุดอุณหภูมิ (Oven Temperature) 60 องศาเซลเซียส, Hold 4, Rate 2,
70 องศาเซลเซียส, Hold 1, Rate 10,
90 องศาเซลเซียส, Hold 1, Rate 3,
170 องศาเซลเซียส, Hold 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เปิดโปรแกรมที่ใช้บันทึกผลและคำนวณผลโครมาโทแกรม
3. สารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ต้องฉีดผ่าน Sep-Pak เพื่อกำจัดสารที่ไม่ระเหยออกจากสารตัวอย่าง
4. ฉีดสารตัวอย่างจากข้อ 3. ปริมาณ 2 ไมโครลิตร แล้วบันทึกโครมาโทแกรม
5. คำนวณหาปริมาณสารต่าง ๆ ในสารตัวอย่างโดยวิธี Normalization

หมายเหตุ วิธี Normalization เป็นการคำนวณหาปริมาณสารตัวอย่างสำหรับเทคนิค

ก๊าซโครมาโทกราฟี โดยสมมติว่าผลรวมของพื้นที่พิคทุกพิคที่ปรากฏบนโครมาโทแกรมรวมเข้าด้วยกันแล้วเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นแต่ละพื้นที่พิคจะเป็นเศษส่วนของพื้นที่พิคทั้งหมด สมมติว่ามีสาร X เป็นองค์ประกอบ ร้อยละของสาร X ได้

$$\% \text{ ของสาร X} = (\text{พื้นที่ของพิค X} \times 100) / \text{พื้นที่พิคทั้งหมด}$$

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดลอง

ข้อมูลแสดงผลของอัตราการกลั่นไหลกลับที่มีต่อการกระจายตัวของ Fusel Oils ในหอกลั่น

ในการทดลองปรับเปลี่ยนค่าอัตราการกลั่นไหลกลับ (0.1, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0, 12.0 และ 15.0) โดยมีอัตราการไหลของ Feed 0.052 ลิตรต่อนาที, อุณหภูมิของ Feed ที่ 80 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของ Reboiler ที่ 100 องศาเซลเซียส ที่คงที่

ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลความเข้มข้นของ Fusel Oils, เอทานอล, น้ำ, สารเจือปน และ อุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ในหอกลั่นที่อัตราการกลั่นไหลกลับเป็น 0.1

ตำแหน่ง	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก				อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
	Fusel Oils	เอทานอล	สารเจือปน	น้ำ	
ถาดที่ 1 (Reboiler)	0.005	0.690	0.058	99.250	101.0
ถาดที่ 2	0.010	1.730	1.350	96.910	***
ถาดที่ 4	0.406	2.240	0.026	97.330	84.6
ถาดที่ 6	0.789	8.950	25.600	64.660	83.6
ถาดที่ 7	1.075	64.730	0.008	34.190	80.0
ถาดที่ 9	0.156	63.950	0	35.890	79.3
ถาดที่ 11	0	64.140	0	35.860	79.2
ถาดที่ 12	0	64.090	0	35.910	78.8
ถาดที่ 14	0	65.010	0	34.990	78.7
ถาดที่ 16	0	65.010	0	34.990	78.5
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ	0	61.480	0	38.520	75.6
Feed	0.019	41.110	0	58.890	82.1

ตารางที่ ค.2 แสดงข้อมูลความเข้มข้นของ Fusel Oils, เอทานอล, น้ำ, สารเจือปน และ อุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ในหอกลั่นที่อัตราการกลั่นไหลกลับเป็น 1.0

ตำแหน่ง	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก				อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
	Fusel Oils	เอทานอล	สารเจือปน	น้ำ	
ถาดที่ 1 (Reboiler)	0.003	2.470	0.301	97.223	99.7
ถาดที่ 2	0.110	12.440	0.155	87.300	***
ถาดที่ 4	0.601	27.950	0.032	71.417	85.3
ถาดที่ 6	0.402	6.250	16.800	76.548	84.8
ถาดที่ 7	1.564	63.070	0.025	35.342	80.3
ถาดที่ 9	0.186	64.510	0.024	35.280	79.5
ถาดที่ 11	0	65.770	0.016	34.214	79.3
ถาดที่ 12	0	64.470	0.003	35.527	78.9
ถาดที่ 14	0	64.240	0.018	35.742	78.9
ถาดที่ 16	0	67.000	0.014	32.986	78.7
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ	0	64.950	0.021	35.029	76.9
Feed	0.016	6.180	0.005	93.799	82.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 แสดงข้อมูลความเข้มข้นของ Fusel Oils, เอทานอล, น้ำ, สารเจือปน และ
 อุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ในหอกลั่นที่อัตราการกลั่นไหลกลับเป็น 3.0

ตำแหน่ง	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก				อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
	Fusel Oils	เอทานอล	สารเจือปน	น้ำ	
ถาดที่ 1 (Reboiler)	0.127	1.280	0.020	98.573	101.0
ถาดที่ 2	0.289	8.250	0.105	91.356	***
ถาดที่ 4	1.506	16.960	0.050	81.484	87.6
ถาดที่ 6	2.150	35.080	0.011	62.759	85.2
ถาดที่ 7	0.368	65.490	0.031	34.111	80.5
ถาดที่ 9	0.044	67.320	0.013	32.623	79.6
ถาดที่ 11	0	67.930	0.019	32.051	79.2
ถาดที่ 12	0	69.910	0.267	29.823	78.9
ถาดที่ 14	0	71.320	0.273	28.407	78.8
ถาดที่ 16	0	68.570	0.019	31.411	78.6
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ	0	69.420	0.277	30.303	77.4
Feed	0.015	7.490	0.040	92.470	84.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 แสดงข้อมูลความเข้มข้นของ Fusel Oils, เอธานอล, น้ำ, สารเจือปน และ
 อุดมภูมิ ณ จุดต่างๆ ในหอกลั่นที่อัตราการกลั่นไหลกลับเป็น 5.0

ตำแหน่ง	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก				อุดมภูมิ (องศาเซลเซียส)
	Fusel Oils	เอธานอล	สารเจือปน	น้ำ	
ถาดที่ 1 (Reboiler)	0.021	1.680	0.016	98.283	99.4
ถาดที่ 2	0.020	2.840	0.020	97.120	***
ถาดที่ 4	0.697	21.200	0.018	78.085	84.0
ถาดที่ 6	0.294	26.390	0.020	73.296	84.5
ถาดที่ 7	0.404	52.030	0	47.566	80.3
ถาดที่ 9	0.049	54.880	0.017	45.054	79.5
ถาดที่ 11	0	46.680	0	53.320	79.2
ถาดที่ 12	0	59.100	0.010	40.890	78.9
ถาดที่ 14	0	58.120	0.018	41.862	78.9
ถาดที่ 16	0	57.670	0	42.330	78.6
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ	0	57.620	0.115	42.265	78.3
Feed	0.022	5.040	0.024	94.914	80.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 แสดงข้อมูลความเข้มข้นของ Fusel Oils, เอธานอล, น้ำ, สารเจือปน และ อุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ในหอกลั่นที่อัตราการกลั่นไหลกลับเป็น 7.0

ตำแหน่ง	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก				อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
	Fusel Oils	เอธานอล	สารเจือปน	น้ำ	
ถาดที่ 1 (Reboiler)	0	0.040	0.012	99.948	98.7
ถาดที่ 2	0.087	7.580	0.009	92.324	***
ถาดที่ 4	0.359	17.750	0.012	81.878	84.5
ถาดที่ 6	0.206	20.220	0.015	79.559	83.9
ถาดที่ 7	0.172	31.880	0	67.948	80.2
ถาดที่ 9	0.037	51.920	0.006	48.037	79.5
ถาดที่ 11	0	52.890	0.014	47.096	79.2
ถาดที่ 12	0	39.950	0.156	59.894	78.9
ถาดที่ 14	0	48.990	0.107	50.904	78.8
ถาดที่ 16	0	46.930	0.015	53.055	78.6
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ	0	36.590	0.145	63.265	77.5
Feed	0.015	3.670	0.048	96.267	82.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 แสดงข้อมูลความเข้มข้นของ Fusel Oils, เอทานอล, น้ำ, สารเจือปน และ อุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ในหอกลั่นที่อัตราการกลั่นไหลกลับเป็น 10.0

ตำแหน่ง	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก				อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
	Fusel Oils	เอทานอล	สารเจือปน	น้ำ	
ถาดที่ 1 (Reboiler)	0	1.190	0.302	98.508	99.4
ถาดที่ 2	0.113	7.930	0.413	91.544	***
ถาดที่ 4	0.357	27.290	0.018	72.335	84.0
ถาดที่ 6	0.535	28.780	0.587	70.098	84.5
ถาดที่ 7	0.720	68.010	0.716	30.554	80.3
ถาดที่ 9	0.106	66.480	0.604	32.810	79.5
ถาดที่ 11	0	66.320	0.595	33.085	79.2
ถาดที่ 12	0	67.970	0.185	31.845	78.9
ถาดที่ 14	0	67.650	0.941	31.409	78.9
ถาดที่ 16	0	68.060	0.522	31.418	78.6
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ	0	67.020	0.421	32.559	78.3
Feed	0.016	5.210	0.015	94.759	80.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7 แสดงข้อมูลความเข้มข้นของ Fusel Oils, เอธานอล, น้ำ, สารเจือปน และ อุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ในหอกลั่นที่อัตราการกลั่นไหลกลับเป็น 12.0

ตำแหน่ง	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก				อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
	Fusel Oils	เอธานอล	สารเจือปน	น้ำ	
ถาดที่ 1 (Reboiler)	0	2.140	0.026	97.834	96.5
ถาดที่ 2	0.014	5.200	0.020	94.766	***
ถาดที่ 4	0.098	13.370	0.023	86.509	83.6
ถาดที่ 6	0.182	23.150	0.021	76.647	84.0
ถาดที่ 7	0.234	54.330	0	45.436	80.2
ถาดที่ 9	0	57.560	0.011	42.429	79.3
ถาดที่ 11	0	59.310	0.005	40.685	79.1
ถาดที่ 12	0	51.610	0.019	48.371	78.9
ถาดที่ 14	0	56.450	0.156	43.394	78.8
ถาดที่ 16	0	40.480	0.024	59.496	78.6
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ	0	46.120	0.016	53.864	78.3
Feed	0.022	4.120	0.035	95.823	83.1

ตารางที่ ค.8 แสดงข้อมูลความเข้มข้นของ Fusel Oils, เอธานอล, น้ำ, สารเจือปน และ อุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ในหอกลั่นที่อัตราการกลั่นไหลกลับเป็น 15.0

ตำแหน่ง	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก				อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
	Fusel Oils	เอธานอล	สารเจือปน	น้ำ	
ถาดที่ 1 (Reboiler)	0.011	2.060	0.400	97.529	99.1
ถาดที่ 2	0.019	4.580	0.077	95.324	***
ถาดที่ 4	0.112	9.600	0.092	90.196	83.8
ถาดที่ 6	0.595	29.220	0.163	70.022	84.0
ถาดที่ 7	0.202	15.980	0	83.818	80.2
ถาดที่ 9	0.047	37.720	0.217	62.016	79.4
ถาดที่ 11	0	56.230	0.017	43.753	79.2
ถาดที่ 12	0	62.050	0.052	37.898	79.0
ถาดที่ 14	0	61.060	0.016	38.924	78.9
ถาดที่ 16	0	56.080	0	43.920	78.7
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ	0	48.730	0	51.270	78.5
Feed	0.018	4.840	0.042	95.100	80.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้