

การศึกษาสาเหตุของการเกิดตะกรันในหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ของกระบวนการ  
ผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์



T119173

ศรัณญา จีรวงษ์โรจน์  
ศศิธร ธาวงศ์  
เอี่ยมลิริ จันท์เพ็ญ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **119173**  
วัน,เดือน,ปี..... - 6 S.A. 2554

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY OF FOULING IN PRODUCT DISTILLATION  
COLUMNS OF PHTHALIC ANHYDRIDE PRODUCTION**



**SARANYA      JIRAWONGROJ  
SASITORN      TARWONG  
AIEMSIREE      CHANPHEN**

**A THESIS 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**

**2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2010**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                      |  |              |
|----------------------|--|--------------|
| ปริญญานิพนธ์เรื่อง   | การศึกษาสาเหตุของการเกิดตะกรันในหอกถันผลิตภัณฑ์ของกระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์   |              |
| โดย                  | นางสาวศรัญญา   | จิรวงษ์โรจน์ |
|                      | นางสาวศศิธร  | ธาวงศ์       |
|                      | นางสาวเอี่ยมสิริ   | จันทร์เพ็ญ   |
| ปริญญา               | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  |              |
| สาขาวิชา             | วิศวกรรมเคมี   |              |
| ปีการศึกษา           | 2553   |              |
| อาจารย์ที่ปรึกษา     | รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ   |              |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ดร. ศิริพล คุณาธิปพงศ์<br>General Manager (Technical & Production) and QMR<br>บริษัท คอนทิเนนทอลปิโตรเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด |              |

### บทคัดย่อ

กระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษาประกอบด้วยหอกถันแยกส่วนถันเบาประเภทกรดคาร์บอกซิลิก 1 หอ และหอกถันผลิตภัณฑ์แยกพาทาลิกแอนไฮไดรด์บริสุทธิ์จากส่วนถันหนักประเภทสารประกอบพาทาลิไดด์ 2 หอ (หอกถันที่ 1 และ 2 มีกำลังการผลิต 4,500 และ 5,600 กิโลกรัม/ชั่วโมง) บริษัทต้องหยุดหอกถันผลิตภัณฑ์ที่ 2 ประมาณเดือนละ 2 ครั้งๆ ละ 4-5 วัน เพื่อทำความสะอาดตะกรันที่เกิดมากได้ Sieve tray ทำให้สูญเสียเวลาการผลิตและเกิดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นและถ้าจะถันให้ได้ตามค่าการออกแบบจะต้องเพิ่มความดันและใช้พลังงานในการถันสูงขึ้น โครงการนี้ศึกษาสาเหตุของการเกิดตะกรันเพื่อหาแนวทางปฏิบัติการแก้ไข จากสมมติฐานตะกรันอาจเกิดได้จากการกัดกร่อนของกรดพาทาลิกที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างพาทาลิกแอนไฮไดรด์กับน้ำซึ่งอาจร่วมมาจากเครื่องควบแน่นและนอซเซิลของหอกถัน หรือเกิดจากปฏิกิริยาเคมีของสารก้นหอกถัน จึงได้วิเคราะห์องค์ประกอบของตะกรันและสารก้นหอกถันผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 ด้วยเครื่อง GC/MS และพบว่าสมมติฐานดังกล่าวไม่ใช่สาเหตุของการเกิดตะกรัน ดังนั้นจะต้องศึกษาหาสาเหตุต่อไปอย่างไรก็ตามเมื่อทดลองติดตั้ง Side-to-Side trays จำนวน 2 ชั้น ที่ส่วนล่างสุดของหอกถันผลิตภัณฑ์ที่ 2 และใช้งานอย่างต่อเนื่องมาแล้ว 55 วัน ยังไม่พบตะกรัน แสดงว่าสามารถยืดเวลาการหยุดหอกถันเพื่อทำความสะอาดได้ ซึ่งจะต้องติดตามผลต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Report Title** A Study of Fouling in Product Distillation Columns of Phthalic Anhydride Production

**By** Miss Saranya Jirawongroj  
Miss Sasitorn Tarwong  
Miss Aiemsiree Chanphen

**Degree** Bachelor of Engineering

**Program** Chemical Engineering

**Year** 2010

**Advisor** Assoc. Prof. Dr. Anchaleeporn Waritswat Lothongkum

**Co – advisor** Dr. Siripoln Kunatippapong  
General Manager (Technical & Production) and QMR  
Continental Petrochemicals (Thailand) Co. Ltd.

### ABSTRACT

Phthalic anhydride process in this study has two distillation parts for light and heavy components. The first distillation column separates carboxylic acid and the other two product columns with capacities of 4,500 and 5,600 kg/h separate pure phthalic anhydride from a phthalide heavy components. The company must shut down the 5,600-kg/h product column twice a month (totally about 8-10 days) to clean up a large amount of fouling found at the bottom of the sieve tray. This non-productive time led to lower productivity and unnecessary production cost. As a result, to meet the design specification of the distillation columns, high pressure and energy must be added up. Therefore, in this work causes of fouling at product distillation columns were investigated to figure out appropriate corrective actions. According to process analysis two hypotheses of fouling were considered: corrosive phthalic acid from the reaction of phthalic anhydride and water (leaked from the condenser or nozzle), or chemical reactions of the bottom components. However, the characterizations of fouling and bottom components by GC/MS disclosed that these hypotheses were not the root causes of fouling. Further investigations will be carried out. Nevertheless, by setting two plates of side-to-side trays at the bottom of the 5,600-kg/h product column, for a continuous 55-day operation, the fouling has not been found yet. The undesired shut down can be extended significantly. However, a follow - up operation must be kept record.

# กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้บริหารของบริษัทคอนทิเนนทอลปิโตรเคมีคอด (ประเทศไทย) จำกัด รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ศิริพล คุณาธิปพงศ์ General Manager (Technical & Production) อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ และคุณสมภพ อภิญาวิสิทธิ์ ที่ให้คำปรึกษาในการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อภินันท์ นัมภนิสรณ์ อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิช และ รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา ที่ให้คำปรึกษาในการทำโครงการ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ทุกท่านที่สนับสนุน เป็นกำลังใจ และให้คำแนะนำตลอดมา หากมีสิ่งผิดพลาดประการใด คณะผู้ดำเนินงานขออนุมัติและขออภัยมา ณ ที่นี้

ศรัณญา จิรวงษ์โรจน์  
ศศิธร ชาวงค์  
เอี่ยมสิริ จันทรเพ็ญ

# สารบัญ

หน้า

|   |     |
|---|-----|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....                       | I   |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                     | II  |
| กิตติกรรมประกาศ.....                        | III |
| สารบัญ .....                                | IV  |
| สารบัญตาราง .....                           | VI  |
| สารบัญรูป.....                              | VII |
| บทที่ 1 บทนำ.....                           | 1   |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของ โครงการงาน .....   | 1   |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....             | 2   |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการ .....                  | 2   |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ .....                 | 2   |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... | 3   |
| 2.1 พาหาลิกแอนไฮไดรด์.....                  | 3   |
| 2.2 กระบวนการผลิตพาหาลิกแอนไฮไดรด์.....     | 4   |
| 2.3 การกลั่น .....                          | 13  |
| 2.4 ถาดของหอกถั่น .....                     | 20  |
| 2.5 การเกิดตะกรัน .....                     | 24  |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|  |    |
|--|----|
| บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....  | 27 |
| 3.1 ศึกษากระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์และทฤษฎีของการเกิดตะกรัน .....                        | 27 |
| 3.2 วิเคราะห์สาเหตุที่คาดว่าทำให้เกิดตะกรันในหอกลับผลิตภัณฑ์ที่ 2 .....                      | 27 |
| 3.3 วิเคราะห์องค์ประกอบของ Crude PA สารก้นหอกลับผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 และตะกรัน .....         | 27 |
| 3.4 การหาแนวทางแก้ปัญหาการเกิดตะกรัน .....   | 27 |
| บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ผล .....  | 29 |
| 4.1 ลักษณะของตะกรันและตำแหน่งที่พบ .....   | 29 |
| 4.2 การวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดตะกรัน .....   | 29 |
| 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของ Crude PA สารก้นหอกลับผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2<br>และตะกรัน ..... | 30 |
| 4.4 ผลการตรวจสอบสมมติฐานและการทดลองลดปัญหาการเกิดตะกรัน .....                                | 35 |
| บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ .....  | 39 |
| 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน .....   | 39 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ .....   | 39 |
| เอกสารอ้างอิง .....  | 40 |
| ภาคผนวก .....  | 42 |
| ภาคผนวก ก ภาวะปฏิบัติการของหอกลับ .....  | 42 |
| ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบ .....  | 44 |
| ภาคผนวก ค แก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี .....   | 48 |
| ภาคผนวก ง Hydrazine hydrate and Monoethanolamine .....                                       | 52 |

# สารบัญตาราง

หน้า

|  |    |
|--|----|
| 2.1 สมบัติของพาทาลิกแอนไฮไดรด์.....  | 3  |
| 2.2 เปรียบเทียบกรดแต่ละชนิด.....   | 22 |
| 3.1 ภาวะปฏิบัติการของ GC/MS.....   | 28 |
| 4.1 องค์ประกอบของ Crude PA.....  | 32 |
| 4.2 องค์ประกอบของสารก้นหอกล้นผลิตภัณฑ์ที่ 1.....   | 33 |
| 4.3 องค์ประกอบของสารก้นหอกล้นผลิตภัณฑ์ที่ 2.....   | 34 |
| 4.4 องค์ประกอบของตะกรัน.....   | 35 |
| 4.5 ค่าความดันลดและน้ำมันร้อนที่ใช้ใน Reboiler ก่อนและหลังติดตั้ง Side-to-side trays จำนวน 3 ชั้น..... | 38 |
| ก.1 ภาวะปฏิบัติการของหอกล้นเบา และหอกล้นผลิตภัณฑ์ที่ 1.....  | 42 |
| ก.2 ภาวะปฏิบัติการของหอกล้นเบา และหอกล้นผลิตภัณฑ์ที่ 2.....  | 42 |
| ก.3 ภาวะปฏิบัติการของหอกล้นเบา (หอกล้นที่ 1 และหอกล้นผลิตภัณฑ์ที่ 1) และหอกล้นผลิตภัณฑ์ที่ 2.....      | 43 |
| ข.1 ความดันลดภายในหอกล้นก่อนติด Side-to-side trays.....  | 44 |
| ข.2 ความดันลดภายในหอกล้นหลังติด Side-to-side trays จำนวน 1 ชั้น.....                                   | 45 |
| ข.3 ความดันลดภายในหอกล้นหลังติด Side-to-side trays จำนวน 2 ชั้น.....                                   | 46 |
| ข.4 ความดันลดภายในหอกล้นหลังติด Side-to-side trays จำนวน 3 ชั้น.....                                   | 47 |

# สารบัญรูป

หน้า

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | แผนผังแสดงกระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ .....        | 6  |
| 2.2  | การทำงานของหน่วยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน .....         | 8  |
| 2.3  | การทำงานของหน่วยควบแน่น .....                         | 9  |
| 2.4  | การทำงานของหน่วยบำบัดเบื้องต้นและการกลั่น .....       | 12 |
| 2.5  | การไหลของของเหลวและไอ .....                           | 15 |
| 2.6  | ชนิดหม้อต้มซ้ำ .....                                  | 19 |
| 2.7  | ทิศทางการไหลของของเหลวบนถาด .....                     | 20 |
| 2.8  | Sieve trays .....                                     | 21 |
| 2.9  | Valve trays .....                                     | 22 |
| 2.10 | Bubble-cap trays .....                                | 22 |
| 2.11 | Shed decks .....                                      | 23 |
| 2.12 | Disk and donut trays .....                            | 23 |
| 2.13 | Side-to-side trays .....                              | 24 |
| 4.1  | ตะกรันที่ถาดชั้นล่างสุดของหอกลั่นผลิตภัณฑ์ที่ 2 ..... | 29 |
| 4.2  | แผนภาพแสดงสาเหตุและผลของการเกิดตะกรัน .....           | 30 |
| 4.3  | องค์ประกอบของ Crude PA .....                          | 31 |
| 4.4  | องค์ประกอบของสารก้นหอกลั่นผลิตภัณฑ์ที่ 1 .....        | 31 |

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

|   |    |
|---|----|
| 4.5 องค์ประกอบของสารก้นหอกถันผลิตภัณฑ์ที่ 2.....                                      | 33 |
| 4.6 องค์ประกอบของตะกรัน.....  | 34 |
| 4.7 เปรียบเทียบองค์ประกอบของ Crude PA สารก้นหอกถันผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 และตะกรัน..... | 36 |
| 4.8 Side-to-side trays ที่ติดในหอกถัน.....  | 37 |
| 4.9 เปรียบเทียบความดันลดในหอกถันก่อนและหลังติด Side-to-side trays.....                | 37 |
| 4.10 ถาดถัน และ Side-to-side trays ในหอกถัน.....                                      | 38 |
| ค.1 แก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี.....   | 48 |
| ค.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....                                  | 50 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

บริษัทคอนทิเนนทอลปิโตรเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด เป็นบริษัทผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์แห่งเดียวในประเทศไทย มีกำลังการผลิตจาก 2 โรงงาน 50,000 ตัน/ปี และใช้พาทาลิกแอนไฮไดรด์บางส่วนในการผลิตไดออกทิลพาทาเลตด้วยกำลังการผลิต 36,000 ตัน/ปี พาทาลิกแอนไฮไดรด์ผลิตได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) ของออร์โทไซลีน (o-Xylene) กับออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเบดนิ่งหลายท่อโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแวนาเดียมเพนตะออกไซด์ ( $V_2O_5$ )

กระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ของบริษัทประกอบด้วยหอกลิ้นแยกส่วนกลั่นเบาประเภทกรดคาร์บอกซิลิก 1 หอ และหอกลิ้นผลิตภัณฑ์แยกพาทาลิกแอนไฮไดรด์บริสุทธิ์จากส่วนกลั่นหนักประเภทสารประกอบพาทาไลด์ 2 หอ (หอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 มีกำลังการผลิต 4,500 และ 5,600 กิโลกรัม/ชั่วโมง ตามลำดับ) ได้พาทาลิกแอนไฮไดรด์บริสุทธิ์ตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ บริษัทใช้หอกลิ้นแบบถาด (Tray distillation column) ชนิด Valve trays ยกเว้นถาดล่างสุดของหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 2 ใช้ Sieve tray

บริษัทพบปัญหาการเกิดตะกอนในหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 2 ตั้งแต่ปี 2550 การเกิดตะกอนประมาณปีละ 2 ครั้ง จากนั้นความถี่ของการเกิดตะกอนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนปัจจุบันเกิดประมาณเดือนละ 2 ครั้ง ตะกอนมักเกิดมากบริเวณด้านล่างของ Sieve tray มีลักษณะสีดำ ทำให้ประสิทธิภาพของการกลั่นลดลง และไม่สามารถผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ได้ตามปริมาณที่ลูกค้าต้องการเพราะต้องถอดถาดที่มีตะกอนออกทำความสะอาด แต่ถ้าจะกลั่นให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามค่าการออกแบบจะต้องเพิ่มความดันและใช้พลังงานในการกลั่นสูงขึ้น และเมื่อเกิดตะกอนมากขึ้นจนไม่สามารถกลั่นได้บริษัทจะต้องหยุดกลั่นด้วยหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 2 แล้วสลับใช้หอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 1 ซึ่งมีกำลังการผลิตต่ำกว่าประมาณ 20% การถอดถาดที่มีตะกอนออกเพื่อทำความสะอาดต้องรอให้อุณหภูมิของหอกลิ้นลดลง ซึ่งใช้เวลาประมาณ 4-5 วัน ดังนั้นบริษัทต้องสูญเสียเวลาการผลิต เสียโอกาสทางธุรกิจ และเกิดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาสาเหตุการเกิดตะกรันในหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ของกระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์

1.2.2 เพื่อหาแนวทางลดหรือชะลอการเกิดตะกรัน

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.2 ศึกษากระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์

1.3.3 เก็บข้อมูลการปฏิบัติการของหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ เช่น อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น

1.3.4 ตรวจสอบวิเคราะห์องค์ประกอบของของ Crude PA สารกึ่งหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 และตะกรันด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี

1.3.5 วิเคราะห์สาเหตุของการเกิดตะกรันและหาแนวทางแก้ไข

1.3.6 สรุปผลและจัดทำรายงาน

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ทราบสาเหตุของการเกิดตะกรันบางประเด็นได้ ทำให้ง่ายต่อการศึกษาหาสาเหตุอื่นๆ ต่อไป

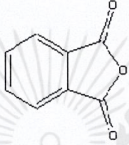
1.4.2 ได้แนวทางในการยืดระยะเวลาของการเกิดตะกรันและการหยุดหอกลิ้นเพื่อทำความสะอาด จึงสามารถลดการสูญเสียเวลาการผลิตและค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็น

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พาทาลิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic anhydride: PA) [1-4]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพาทาลิกแอนไฮไดรด์ [1]

|                              |  |
|------------------------------|--|
| ชื่อเคมี                     | 1,2-Benzenedicarboxylic acid anhydride, Phthalic acid anhydride<br>1,3 Phthalandione, Phthalic anhydride   |
| สูตรโมเลกุล และสูตรโครงสร้าง | $C_8H_4O_3$<br>   |
| สมบัติทางเคมีและกายภาพ       | ลักษณะเป็นเกล็ดของแข็ง สีขาว มีกลิ่นเฉพาะตัว<br>น้ำหนักโมเลกุล 148.12 จุดเดือด $295^{\circ}C$ จุดหลอมเหลว $132^{\circ}C$<br>ความถ่วงจำเพาะ 1.53 ความหนาแน่นไอ 6.6<br>ความดันไอ ที่ $20^{\circ}C$ 0.0002 มิลลิเมตรปรอท  |
| ข้อมูลทางพิษวิทยา            | <b>สัมผัสทางการหายใจ:</b> การหายใจเอาไอระเหยหรือฝุ่นของสารนี้เข้าไปก่อให้เกิดการระคายเคือง ไอ หายใจติดขัด เวียนศีรษะ และอาจก่อให้เกิดโรคมะเร็ง<br><b>สัมผัสทางผิวหนัง:</b> สารนี้เมื่อสัมผัสกับน้ำจะกลายเป็นกรดพาทาลิกซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้ผิวหนังเป็นผื่นแดง ปวดแสบปวดร้อน<br><b>สัมผัสทางดวงตา:</b> ทำให้เยื่อแก้วตาบวม น้ำ และทำลายกระจกตา ปวดแสบ ปวดร้อน<br><b>การกินหรือกลืน:</b> สารนี้เมื่อสัมผัสกับน้ำจะกลายเป็นกรดพาทาลิกซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนปาก ลำคอ กระเพาะอาหาร เกิดแผลไหม้รุนแรง |

#### การใช้ประโยชน์

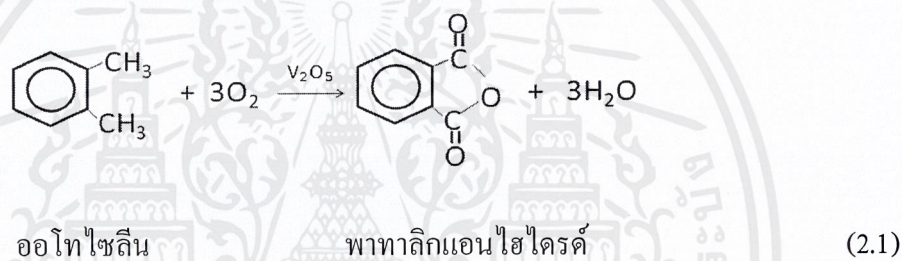
- ผลิตไดออกทิลพทาเลต (Diocetyl phthalate: DOP) ซึ่งเป็นสารพลาสติกไซเซอร์สำหรับการขึ้นรูปพลาสติกเพราะช่วยเพิ่มความนุ่มและยืดหยุ่นของพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

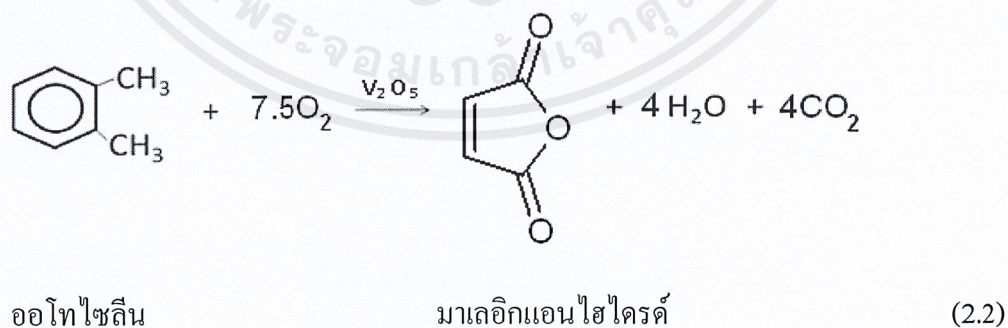
- ผลิตพาทาเลทเอสเทอร์
- เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตพอลิเอสเทอร์เรซิน ซึ่งเป็นสารเสริมแรงในการผลิตไฟเบอร์กลาส
- ผลิตสารเคลือบผิว (Solvent-based coating) สำหรับอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ เครื่องจักรกล หรือ งานสถาปัตยกรรม
- ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสี สารเคลือบเงา สีย้อมผ้า และสารฆ่าแมลง

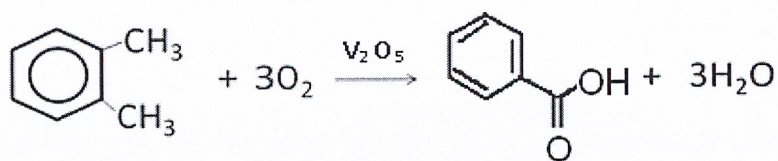
## 2.2 กระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ [5]

พาทาลิกแอนไฮไดรด์ สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) ของ อโทไซลีน (o-Xylene) กับออกซิเจน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแวนเดียมเพนตะออกไซด์ ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 370 - 410 °C ดังสมการที่ 2.1



ปฏิกิริยาข้างเคียง (Side reactions) เกิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) กรดเบนโซอิก (Benzoic acid) กรดโทลูอิก (Toluic acid) พาทาไลด์ (Phthalide) ไซทราโคนิกแอนไฮไดรด์ (Citraconic anhydride) คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.2-2.8

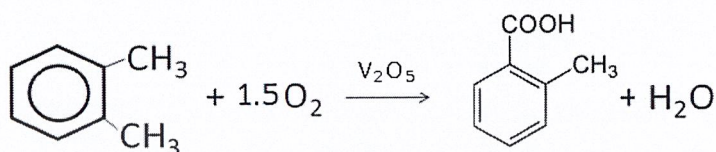




อโทโซลีน

กรดเบนโซอิก

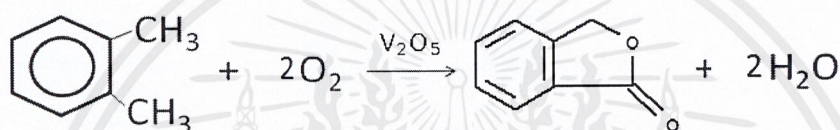
(2.3)



อโทโซลีน

กรดโทลูอิก

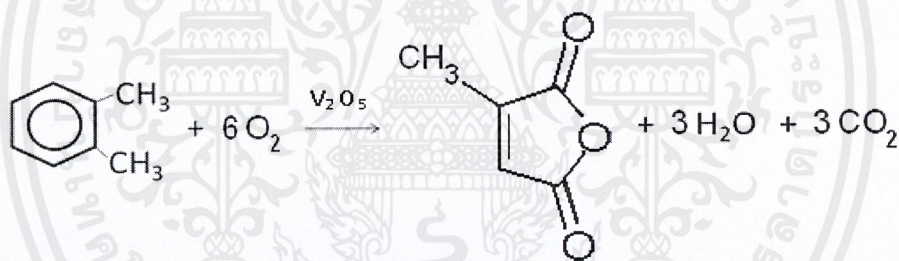
(2.4)



อโทโซลีน

พาทาไลด์

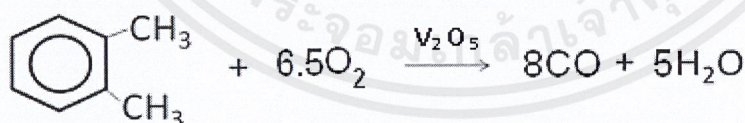
(2.5)



อโทโซลีน

ไซทราโคนิกแอนไฮไดรด์

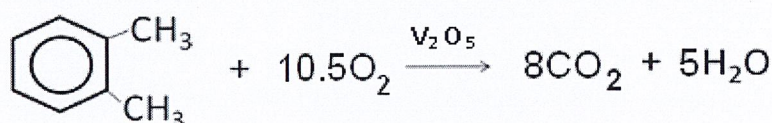
(2.6)



อโทโซลีน

คาร์บอนมอนอกไซด์

(2.7)



อโทโซลีน

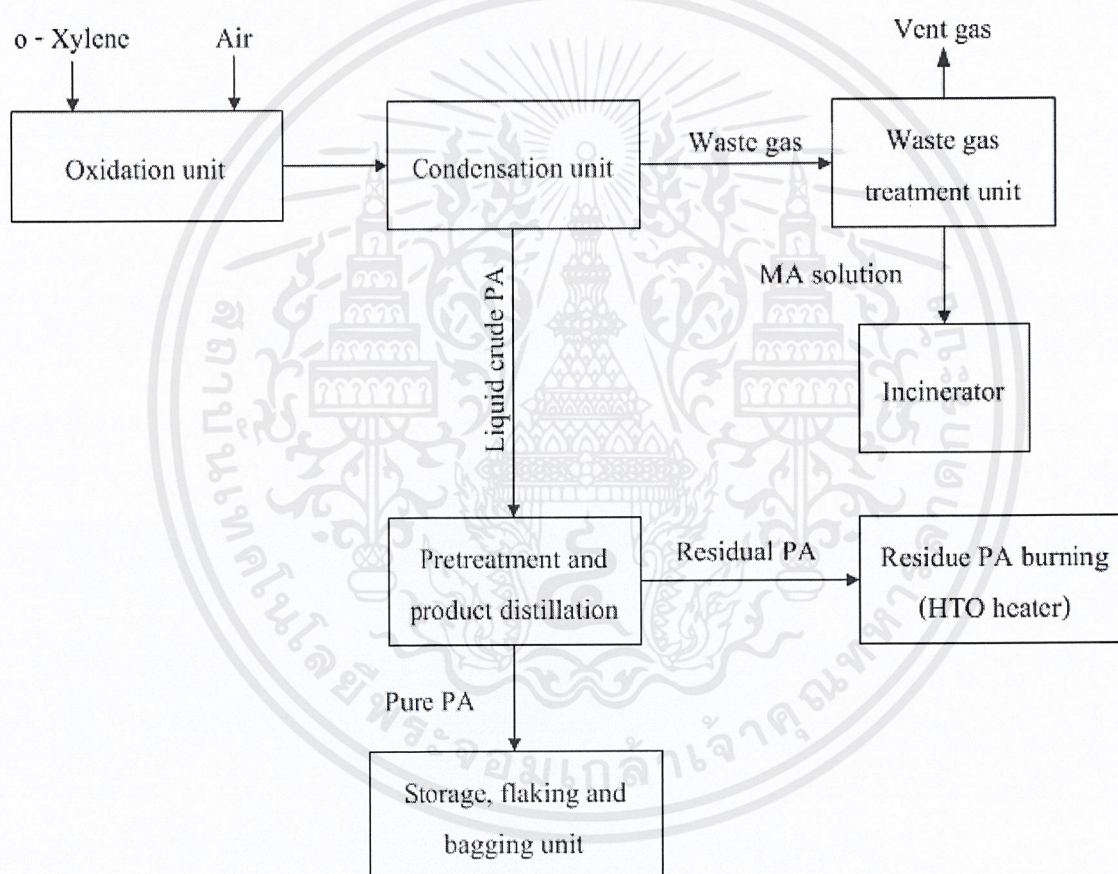
คาร์บอนไดออกไซด์

(2.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ แบ่งได้ 5 หน่วยผลิต ดังรูปที่ 2.1 คือ

1. หน่วยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation unit)
2. หน่วยควบแน่น (Condensation unit)
3. หน่วยบำบัดเบื้องต้นและการกลั่นผลิตภัณฑ์ (Pretreatment and product distillation)
4. หน่วยกักเก็บ ทำให้เป็นเกล็ด และการบรรจุพาทาลิกแอนไฮไดรด์ (Storage, flaking and bagging unit)
5. หน่วยบำบัดของเสียจากกระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ (Waste gas treatment unit)



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงกระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ [5]

กระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ของบริษัท มี 2 สายการผลิต คือ PA1 และ PA2 ซึ่งมีกำลังการผลิต 28,000 และ 22,000 ตันปี รายละเอียดของแต่ละหน่วยอธิบายได้ดังนี้

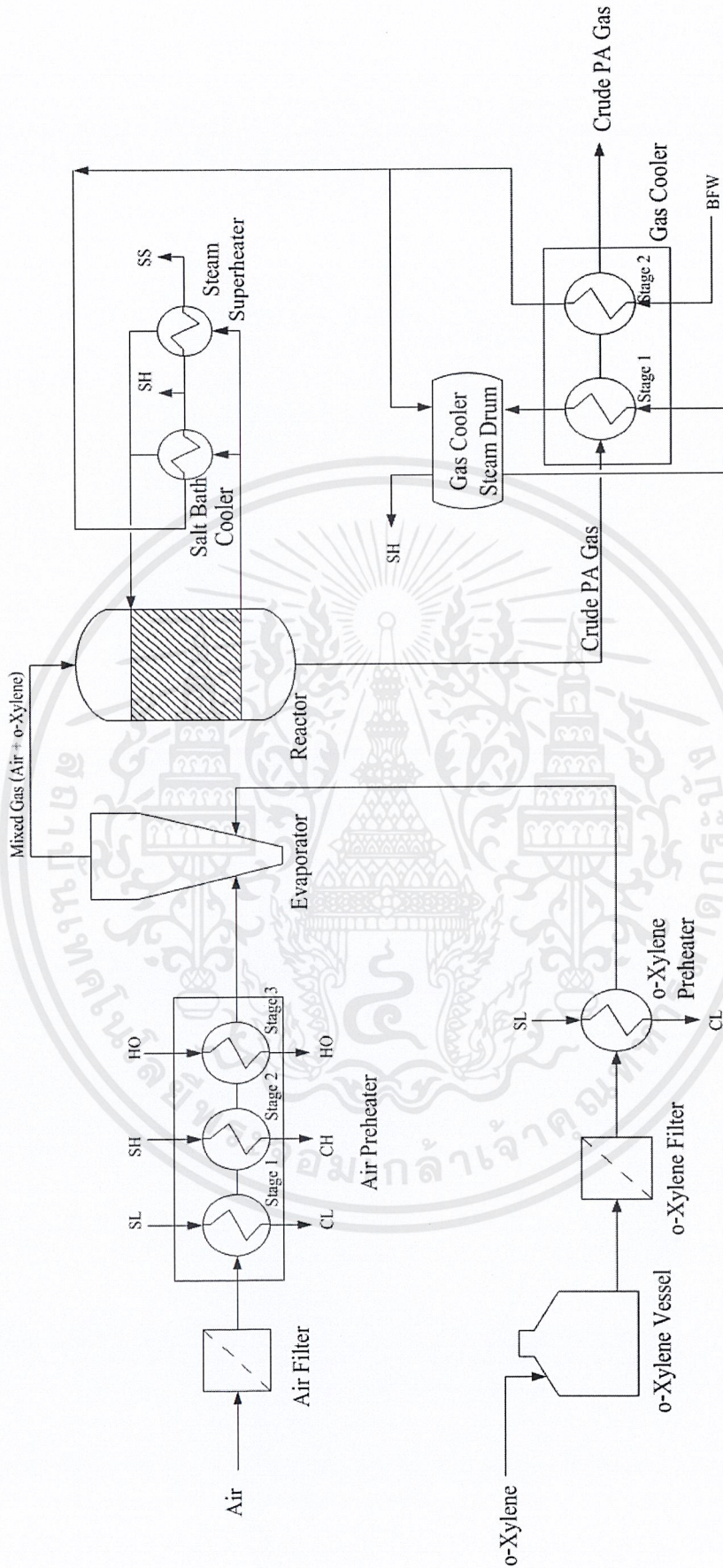
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. หน่วยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation unit) ดังรูปที่ 2.2

อากาศถูกส่งผ่านเครื่องกรองและเครื่องอุ่นอากาศเพื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 °C เป็น 150 °C ก่อนเข้าเครื่องระเหยอโทไซลีน (o-Xylene evaporator) ในขณะที่อโทไซลีนจะถูกส่งจากถังเก็บเข้าเครื่องกรองและเครื่องอุ่นอโทไซลีน (o-Xylene preheater) จนมีอุณหภูมิประมาณ 150-170°C แล้วจึงผ่านเข้าเครื่องระเหยอโทไซลีนเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในสถานะไอและผสมกับอากาศ แก๊สผสมจะถูกส่งเข้าไปยังเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาเวเนเดียมเพนตะออกไซด์ และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ คือ พาทาลิกแอนไฮไดรด์ในสถานะของแก๊ส เรียกว่า แก๊สพาทาลิกแอนไฮไดรด์ดิบ (Crude PA gas) จะผ่านเข้าแก๊สคูลเลอร์ (Gas cooler) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประเภทหนึ่งเพื่อลดอุณหภูมิของแก๊สพาทาลิกแอนไฮไดรด์ดิบก่อนส่งไปยังส่วนควบแน่น และเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของอโทไซลีนเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจึงต้องใช้เกลือหลอมเหลวของโพแทสเซียมไนเตรตและโซเดียมไนไตรต์ (Molten salt of potassium nitrate ( $\text{KNO}_3$ ) and sodium nitrite ( $\text{NaNO}_2$ )) มารับความร้อนออกจากเครื่องปฏิกรณ์แล้วนำไปถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำป้อนหม้อไอน้ำที่อุปกรณ์ซอลท์บัทคูลเลอร์ (Salt bath cooler) และสตีมซูเปอร์ฮีเตอร์ (Steam superheater) เพื่อทำไอน้ำอัมตวความดันสูงและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

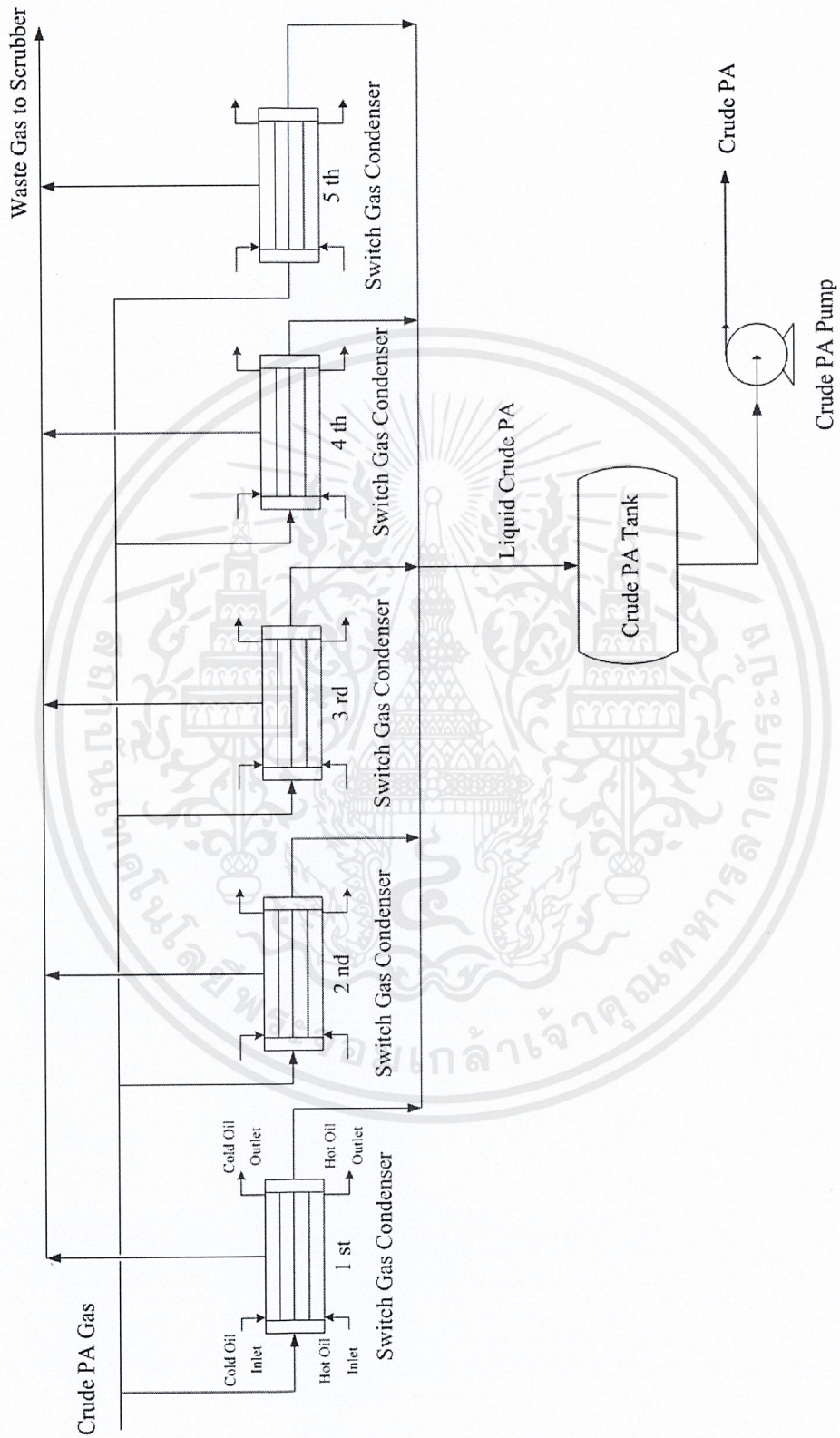
## 2. หน่วยควบแน่น (Condensation unit) ดังรูปที่ 2.3

แก๊สพาทาลิกแอนไฮไดรด์ดิบที่ออกจากแก๊สคูลเลอร์จะมีอุณหภูมิลดลงเหลือประมาณ 160 °C แก๊สพาทาลิกแอนไฮไดรด์ดิบจากเครื่องปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 จะถูกรวมเข้าด้วยกันและส่งเข้าสวิตช์แก๊สคอนเดนเซอร์ 5 ตัว ที่ประกอบด้วยกลุ่มของท่อแบบครีป สวิตช์แก๊สคอนเดนเซอร์แต่ละตัวจะทำงานสลับกันระหว่างการรับผลิตภัณฑ์และการหลอมผลิตภัณฑ์โดยมีน้ำมันถ่ายเทความร้อนอุณหภูมิต่ำ (Therminol VP-1) อุณหภูมิ 50-55°C เข้าแลกเปลี่ยนความร้อนกับแก๊สพาทาลิกแอนไฮไดรด์ดิบ ทำให้พาทาลิกแอนไฮไดรด์ดิบมีอุณหภูมิลดลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง และจะเกิดพาทาลิกแอนไฮไดรด์ที่มีลักษณะค่อนข้างหนืดเกาะติดบริเวณครีปของสวิตช์แก๊สคอนเดนเซอร์ พาทาลิกแอนไฮไดรด์ดิบที่ถูกลดอุณหภูมิจนเป็นของเหลวหนืดจะถูกเพิ่มอุณหภูมิด้วยน้ำมันถ่ายเทความร้อนอุณหภูมิสูง 180-190°C จนความหนืดลดลงแล้วถูกส่งไปรวมกันในถังเก็บของเหลวพาทาลิกแอนไฮไดรด์ แก๊สที่เกิดจากปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่ถูกควบแน่น เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกส่งไปบำบัดที่หอดูดซับแก๊สเสีย



รูปที่ 2.2 การทำงานของหน่วยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การทำงานของหน่วยความแน่น [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. หน่วยบำบัดเบื้องต้นและการกลั่นผลิตภัณฑ์ (Pretreatment and product distillation) ดังรูปที่ 2.4

#### (ก) ขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้น

ขั้นตอนนี้เป็นการไล่น้ำ (Dehydration) ออกจากสารประกอบของกรดพทาสิก (Phthalic acid) และกรดมาเลอิก (Maleic acid) เหลือเป็นพทาสิกแอนไฮไดรด์และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นด้วย โดยสารประกอบประเภทแอนไฮไดรด์จะรวมตัวกันเป็นสารโมเลกุลใหญ่ขึ้น (ซึ่งทำให้ง่ายต่อการกลั่นแยกที่อุณหภูมิสูงประมาณ  $280^{\circ}\text{C}$ ) ภายในถังเตรียมก่อนการกลั่น (Pretreater vessel) จำนวน 3 ใบ จากนั้นพทาสิกแอนไฮไดรด์ดิบเหลวที่ปราศจากน้ำจะถูกส่งต่อไปยังขั้นตอนการกลั่นผลิตภัณฑ์ต่อไป

#### (ข) ขั้นตอนการกลั่นผลิตภัณฑ์

การกลั่นเป็นการแยกสารที่ไม่ต้องการออกจากผลิตภัณฑ์พทาสิกแอนไฮไดรด์ ในพทาสิกแอนไฮไดรด์ดิบเหลวที่ส่งมากลั่นมีองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

| องค์ประกอบ              | จุดเดือด ( $^{\circ}\text{C}$ ) | จุดหลอมเหลว ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| มาเลอิกแอนไฮไดรด์       | 202                             | 52.8                               |
| กรดเบนโซอิก             | 249                             | 122                                |
| กรดออกโทโทลูอิก         | 259                             | 108                                |
| <b>พทาสิกแอนไฮไดรด์</b> | <b>284.5</b>                    | <b>131.1</b>                       |
| พทาไลด์                 | 290                             | 73                                 |
| กรดฟูมาลิก              | ระเหิดที่ 200                   | 287                                |

พทาสิกแอนไฮไดรด์ดิบเหลวจากถังพักจะถูกส่งมายังถังเพิ่มอุณหภูมิ (Pretreater No. 1, 3) ภายในถังดังกล่าวจะหมุนเวียนพทาสิกแอนไฮไดรด์ดิบเหลวเพื่อป้องกันไม่ให้พทาสิกแอนไฮไดรด์ดิบเหลวเย็นตัวลงเพราะจะทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น จากนั้นจะผสมพทาสิกแอนไฮไดรด์ดิบเหลวจากถังเพิ่มอุณหภูมิ 1 และ 3 (ซึ่งบริษัทเรียก Liquid crude นี้ว่า Treated liquid crude PA) และส่งไปยังถังเพิ่มอุณหภูมิ 2 (Pretreater No. 2) เพื่อรอส่งไปหอกลั่นต่อไป

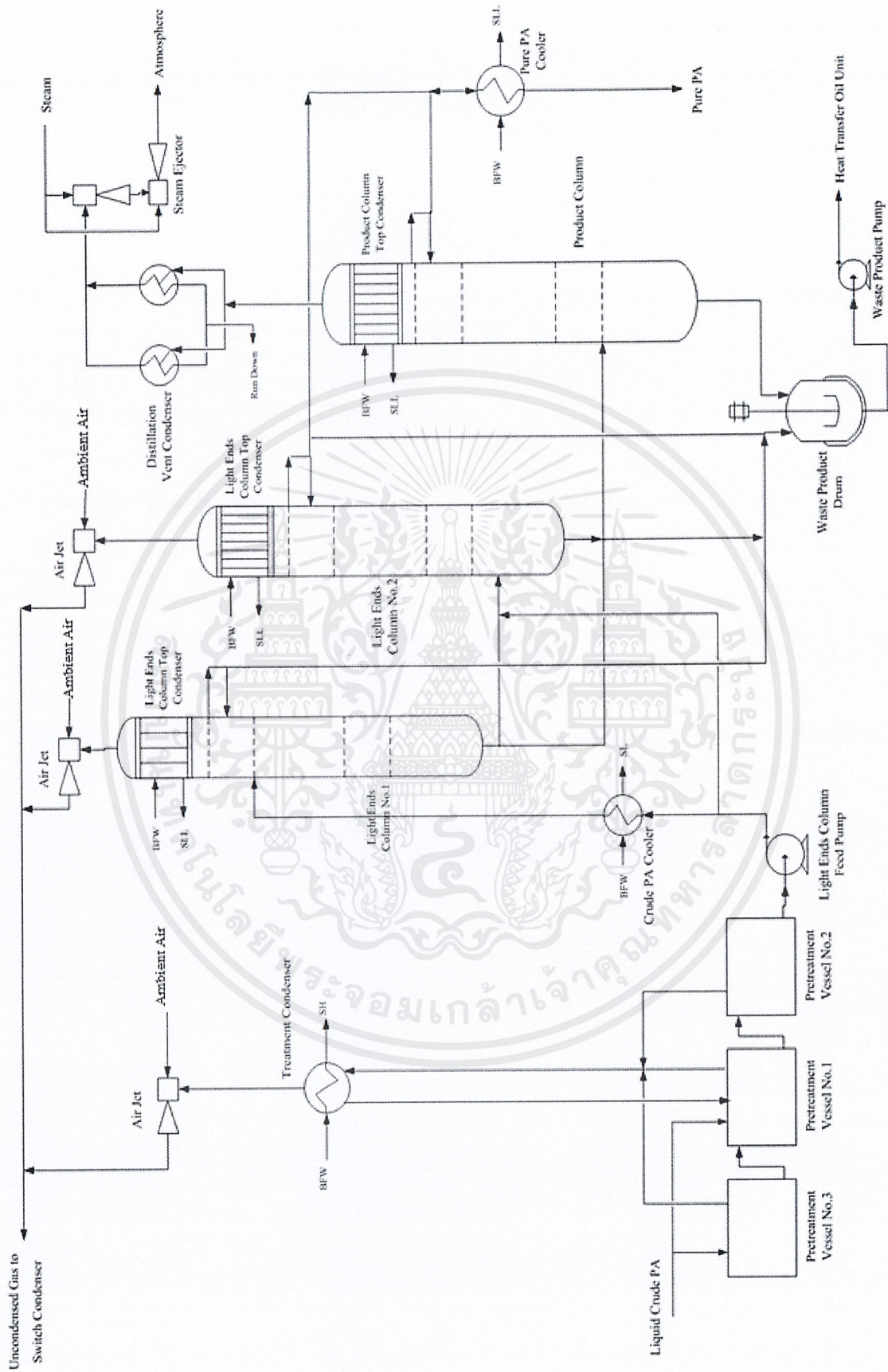
กระบวนการกลั่นผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยหอกลั่น 3 หอ (หอกลั่นที่ 1, 2 และ 3) แบ่งเป็นหอกลั่นเบา (Light ends column) และหอกลั่นหนักหรือหอกลั่นผลิตภัณฑ์ (Heavy ends column หรือ Product column) โดยหอกลั่นที่ 1 เป็นหอกลั่นเบา หอกลั่นที่ 2 เป็นได้ทั้งหอกลั่นเบาหรือหอกลั่นผลิตภัณฑ์ (ตามที่บริษัทต้องการ) และหอกลั่นที่ 3 เป็นหอกลั่นผลิตภัณฑ์

Treated liquid crude PA จะถูกป้อนเข้าหอกลับเบา เพื่อกลั่นสารที่มีจุดเดือดต่ำกว่าพาทาลิกแอนไฮไดรด์ (Light ends component) เช่น กรดโมโนคาร์บอกซิลิก มาเลือกแอนไฮไดรด์ และกรดเบนโซอิกออกทางยอดหอ ไอที่ระเหยขึ้นด้านบนของหอกลับเบาจะผ่านเครื่องควบแน่นเป็นของเหลวแล้วส่งไปเผาที่หน่วยถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำมัน (Heat transfer oil unit) ได้น้ำมันถ่ายเทความร้อนอุณหภูมิสูงสำหรับใช้เป็นแหล่งให้พลังงานแก่หอกลับ สำหรับแก๊สเสียที่เกิดจากปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่กลั่นตัวในถังเตรียมก่อนการกลั่นจะถูกดูดออกจากหอกลับด้วยเครื่องดูดอากาศ (Air jet) เพื่อปรับภาวะภายในหอกลับให้เป็นสูญญากาศซึ่งช่วยให้การกลั่นดีขึ้น แก๊สที่ถูกดึงออกนี้จะถูกส่งเข้าสวิตช์แก๊สคอนเดนเซอร์เพื่อส่งไปบำบัดที่หอดูดซับแก๊สเสียของหน่วยกำจัดแก๊สเสีย (Waste gas scrubber) ก่อนระบายออกต่อไป พาทาลิกแอนไฮไดรด์และสารที่มีจุดเดือดสูงกว่า (Heavy ends component) จะออกทางด้านล่างของหอกลับ และถูกส่งต่อไปกลั่นแยกในหอกลับหนักหรือหอกลับผลิตภัณฑ์ได้พาทาลิกแอนไฮไดรด์บริสุทธิ์ (Liquid pure PA) เป็นผลิตภัณฑ์ทางยอดหอ แล้วผ่านเครื่องหล่อเย็นพาทาลิกแอนไฮไดรด์เพื่อลดอุณหภูมิลงก่อนส่งไปเก็บยังถังเก็บรันดาวน์ (Run down vessel) ส่วนสารที่มีจุดเดือดสูงกว่าพาทาลิกแอนไฮไดรด์จะไหลออกทางก้นหอ เรียกว่า กากพาทาลิกแอนไฮไดรด์ (Residue PA) แล้วส่งไปถังเก็บของเสียและเผาที่หน่วยถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำมันเช่นกัน

การกลั่นของบริษัท มี 3 แบบ คือ

- 1) ใช้หอกลับที่ 1 (เป็นหอกลับเบา) และหอกลับผลิตภัณฑ์ที่ 1 เมื่อต้องการกำลังการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ไม่เกิน 4,500 กิโลกรัม/ชั่วโมง
- 2) ใช้หอกลับที่ 1 (เป็นหอกลับเบา) และหอกลับผลิตภัณฑ์ที่ 2 เมื่อต้องการกำลังการผลิตไม่เกิน 5,600 กิโลกรัม/ชั่วโมง
- 3) ใช้หอกลับที่ 1 และหอกลับผลิตภัณฑ์ที่ 1 เป็นหอกลับเบาโดยกลั่นแบบอนุกรม และหอกลับผลิตภัณฑ์ที่ 2 เป็นหอกลับผลิตภัณฑ์ เมื่อต้องการกำลังการผลิตและความบริสุทธิ์ของพาทาลิกแอนไฮไดรด์สูง

การกลั่นด้วยทุกหอกลับเป็นแบบสูญญากาศ และใช้ถาดชนิด Valve trays ยกเว้นถาดล่างสุดของหอกลับผลิตภัณฑ์ที่ 2 ใช้ชนิด Sieve tray ส่วนหม้อต้มซ้ำใช้ชนิด Thermosiphon



รูปที่ 2.4 การทำงานของหน่วยบำบัดเบื้องต้นและการกลั่น [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หน่วยกักเก็บ ทำให้เป็นเกล็ด และการบรรจุ (Storage, flaking and bagging unit) พาทาลิกแอนไฮไดรด์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตามวัตถุประสงค์ ดังนี้

4.1 เพื่อการจำหน่ายพาทาลิกแอนไฮไดรด์แบบของเหลวหรือแบบเกล็ด

4.2 เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไดออกทิลพาทาเลตของบริษัท

4.3 เพื่อเก็บพาทาลิกแอนไฮไดรด์สำรองไว้จำหน่ายเมื่อหยุดการผลิตชั่วคราว

5. หน่วยบำบัดของเสียจากระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ (Waste gas treatment unit)

(ก) การบำบัดแก๊สเสีย (Waste gas treatment)

แก๊สเสียจากสวิตช์คอนเดนเซอร์และหอกลั่นเบามีแก๊สมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งเมื่อถูกน้ำจะเปลี่ยนสถานะเป็นกรด จึงต้องกำจัดแก๊สมาเลอิกแอนไฮไดรด์ออกโดยใช้ Waste gas scrubber แบบ Packed bed scrubber

(ข) การบำบัดของเหลวจากการกลั่น (PA residual)

สารจากการกลั่นพาทาลิกแอนไฮไดรด์เป็นของเหลวหนืดที่มีจุดเดือดสูงกว่าพาทาลิกแอนไฮไดรด์ (Heavy ends) (เป็นกากของแข็งที่อุณหภูมิห้อง) สารจากการกลั่นใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเตรียมน้ำมันถ้ายความร้อนอุณหภูมิสูง จึงเป็นการกำจัดของเสียและช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแก่ธรรมชาติของโรงงาน

(ค) การกำจัดฝุ่นพาทาลิกแอนไฮไดรด์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนทำให้เป็นเกล็ดและการบรรจุ

ในการทำผลิตภัณฑ์พาทาลิกแอนไฮไดรด์เหลวให้กลายเป็นเกล็ดที่หน่วยทำให้เป็นเกล็ดและบรรจุ ฝุ่นพาทาลิกแอนไฮไดรด์จากการบรรจุเกล็ดตกลงด้วยเครื่องบรรจุจะฟุ้งกระจายและถูกดูดรวบรวมด้วยเครื่องเป่าลมและส่งไปเครื่องกรองฝุ่น ฝุ่นพาทาลิกแอนไฮไดรด์ที่สะสมในเครื่องกรองฝุ่นจะถูกส่งกลับเข้ากระบวนการผลิต (Recovery) และทำให้เป็นผลิตภัณฑ์

## 2.3 การกลั่น (Distillation) [6-13]

การกลั่นเป็นวิธีการแยกสารผสมที่มีจุดเดือดต่างกัน ของผสมที่ได้รับความร้อนจะระเหยเป็นไอ และควบแน่นที่คอนเดนเซอร์ การกลั่นภายใต้สุญญากาศ (Vacuum distillation) ใช้แยกของเหลวผสมที่มีจุดเดือดสูงและสลายตัวก่อนที่จะถึงจุดเดือด เนื่องจากความดันไอของของเหลวจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดัน ดังนั้นต้องออกแบบอุปกรณ์ให้เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงถ้าสายป้อนต้องการ

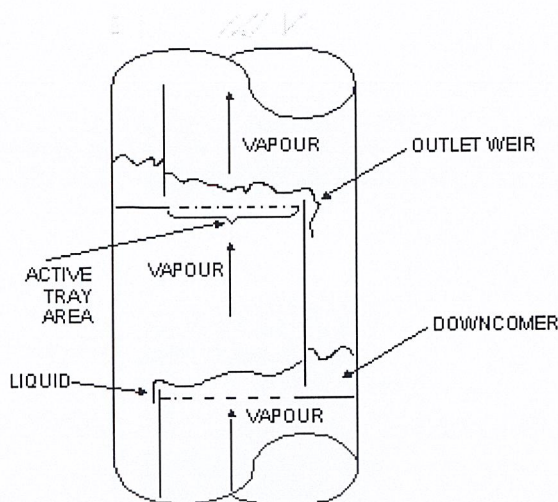
อุณหภูมิและพลังงานสูงในการทำให้สารกลายเป็นไอ โดยทั่วไปการกลั่นภายใต้สุญญากาศพิจารณาใช้ในกรณีต่อไปนี้

1. เมื่อต้องการค่าการระเหยสัมพัทธ์ (Relative volatility) สูง เพราะช่วยให้การแยกง่ายขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้จำนวนชั้นในการแยกมาก เมื่ออุณหภูมิในการเดือดลดลง ค่าการระเหยสัมพัทธ์ขององค์ประกอบต่างๆ จะเพิ่มขึ้น ถ้าจำนวนชั้นและอัตราการป้อนกลับ (Reflux ratio) เท่ากัน ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเพิ่มขึ้น
2. เมื่อต้องการอุณหภูมิการกลั่นต่ำ เพราะผลิตภัณฑ์บางชนิดอาจเสียหายได้ง่ายถ้าอุณหภูมิสูง (Thermally sensitive products) เมื่ออุณหภูมิก้นหอต่ำจะสามารถหน่วงปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการได้ เช่น การสลายตัวของผลิตภัณฑ์ ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน หรือการเปลี่ยนสี
3. เมื่อต้องการแยกสารที่มีความดันไอต่ำมาก หรือสารที่สลายตัวที่อุณหภูมิก่อตัวกับจุดเดือดปกติที่บรรยากาศของสารนั้น
4. เมื่อต้องการประหยัดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการ กรณีอุณหภูมิก้นหอต่ำสามารถให้แหล่งพลังงานที่มีราคาต่ำกว่าได้ เช่น ใช้ไอน้ำความดันต่ำหรือน้ำร้อน

โดยทั่วไปหอกลั่นเป็นคอลัมน์ทำด้วยโลหะมีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นวงกลม แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ หอประเภทชั้นหรือหอแบบถาด และหอบรรจุ

1. **หอประเภทชั้นหรือหอแบบถาด** ภายในมีถาด (Plates หรือ Trays) เพื่อให้ของเหลวและไอสัมผัสกัน ของเหลวจะไหลลงมาจากหอคด้วยแรงโน้มถ่วง ขณะที่ไอจะไหลขึ้นบนด้วยแรงของความดันลดจากถาดหนึ่งไปยังอีกถาดหนึ่งผ่านทางช่องเปิดของถาดและสัมผัสกับของเหลวที่อยู่บนถาด เมื่อมีการไหลขึ้นของไอผ่านช่องเปิดจะทำให้ของเหลวไม่สามารถไหลลงได้ ของเหลวจะไหลข้ามจากถาดหนึ่งไปยังอีกถาดด้านล่างโดยไหลข้ามเวียร์ (Weir) ซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นเขื่อนกักของเหลวให้ไหลลงไปในดาวน์คัมเมอร์ (Downcomer) การผสมกันระหว่างของเหลวบนถาดกับไอเกิดขึ้นค่อนข้างรุนแรง เป็นผลให้ไอส่วนหนึ่งปนลงมากับของเหลว และเมื่อไหลลงผ่านดาวน์คัมเมอร์ไอที่ปนอยู่จะค่อยๆ แยกตัวลอยขึ้นข้างบน เหลือแต่ของเหลวไหลลงถาดด้านล่าง ปลายด้านล่างของดาวน์คัมเมอร์จะจมอยู่ใต้ผิวของเหลวที่อยู่บนถาดชั้นล่างเพื่อป้องกันการไหลสวนทางขึ้นของไอ โดยที่ไอจะไหลขึ้นผ่านไรเซอร์ (Riser) ที่อยู่ในแคป (Caps) หรือผ่านช่องเปิดบนถาด ช่องว่างที่อยู่เหนือถาดใช้สำหรับให้ของเหลวที่ผสมกับไอมมีโอกาสแยกออกจากกันเพื่อไม่ให้เกิดการพาของเหลวขึ้นด้านบน โดยทั่วไประยะห่างระหว่างถาดอยู่ระหว่าง 2 ถึง 48 นิ้ว และอาจมากกว่าถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของหอกลั่นใหญ่ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การไหลของของเหลวและไอ [10]

ในทางปฏิบัติการพบกันระหว่างไอและของเหลวในแต่ละถาดแบ่งเป็นลักษณะต่างๆ ดังนี้

1. Bubble regime เป็นลักษณะที่ของเหลวค่อนข้างหยุดนิ่ง ในขณะที่ไอเป็นฟองลอยผ่านขึ้นไป การผสมกันจะไม่รุนแรง ทำให้มีประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นลักษณะนี้จึงไม่เป็นที่ต้องการในทางปฏิบัติ

2. Foam regime เป็นลักษณะของการเกิดฟองคล้ายกับฟองเบียร์ด้านบนของเหลว ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างไอและของเหลวสูง และเกิดการถ่ายโอนมวลได้มากขึ้นจนกินบริเวณเต็มระหว่างชั้น ทำให้ของเหลวถูกพาขึ้นไปมาก ดังนั้นประสิทธิภาพจะลดลงและอาจเกิดการท่วมได้ กรณีนี้มักเกิดขึ้นเมื่ออัตราการไหลของไอต่ำและอาจต้องใช้สารลดการเกิดฟอง (Antifoam agent)

3. Froth regime เกิดขึ้นเมื่ออัตราการไหลของไอสูงขึ้น ที่ภาวะนี้บริเวณผิวด้านบนของเหลวจะมีลักษณะเหมือนเกิดการกระเด็นอย่างรุนแรง การผสมกันภายในของเหลวเป็นไปอย่างทั่วถึง แต่การผสมกันของไอยังไม่ทั่วถึง สำหรับระบบการกลั่นทั่วไปที่การถ่ายโอนมวลในของเหลวเป็นตัวกำหนด Mass transfer limitation ภาวะนี้จะมีประสิทธิภาพสูงมาก ดังนั้นจึงเป็นลักษณะที่ต้องการให้เกิดในหอกลั่น ทั้งนี้การเพิ่มความเร็วในการไหลของไอขึ้นเพียงเล็กน้อยมีผลทำให้ Froth regime เปลี่ยนเป็น Spray regime ซึ่งประสิทธิภาพจะลดลงมาก

4. Spray regime เกิดขึ้นเมื่ออัตราการไหลของไอสูงมากและเป็นไปอย่างต่อเนื่องมีการผสมกันอย่างทั่วถึง ส่วนของเหลวจะมีลักษณะเป็นหยด มีการผสมกันไม่ดี ดังนั้นที่ภาวะนี้จึงมีอัตราการถ่ายโอนมวลต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพต่ำไปด้วย

2. หอบรรจุ ของเหลวและไอจะสัมผัสกันอย่างต่อเนื่อง และใช้วัสดุบรรจุ (Packings) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและไอ

เงื่อนไขทั่วไปในการเลือกหอบรรจุให้เหมาะสมต่อการใช้งาน

1) เมื่อต้องการใช้งานกับกรดและสารที่กัดกร่อนชนิดอื่นๆ เพราะสามารถเลือกใช้วัสดุบรรจุเป็นเซรามิกหรือวัสดุที่ต้านทานการกัดกร่อนได้

2) เหมาะกับการใช้งานกับวัตถุดิบที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เพราะจะมีของเหลวตกค้างอยู่ในหอน้อย จัดได้ว่าเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับหอประเภทชั้น

3) ของเหลวภายในหอบรรจุจะเปลี่ยนเป็นฟองและสัมผัสกับไอมากยิ่งขึ้น

4) วัสดุบรรจุจะให้ค่าประสิทธิภาพ และค่าความดันตกที่เหมาะสม

เงื่อนไขที่หอบรรจุไม่เหมาะสมต่อการใช้งานเมื่อเทียบกับหอประเภทชั้น

1) หอประเภทชั้นสามารถลดทำความสะอาดได้ง่ายกว่าหอประเภทบรรจุ

2) หอประเภทชั้นมีความสามารถในการจัดการกับวัตถุดิบปริมาณมากได้ดีกว่าหอประเภทบรรจุ และสามารถสร้างให้มีขนาดใหญ่หลายๆ ได้

3) วัสดุบรรจุจำนวนหนึ่งอาจสูญหายหรือแตกหักได้ง่ายในระหว่างที่ทำการบรรจุเข้าไปภายในหอ หรืออาจได้รับความเสียหายจากการขยายตัวและหดตัวของอุณหภูมิ

4) หอประเภทบรรจุไม่เหมาะสมกับการใช้งานที่อัตราการป้อนของของเหลวต่ำๆ เพราะประสิทธิภาพในการสัมผัสกันระหว่างไอกับส่วนที่เป็นของเหลวจะลดลง

**หม้อต้มซ้ำ (Reboiler)** ของหอกลั่น แบ่งเป็น 5 ชนิด ดังรูปที่ 2.6 ได้แก่

1. Vertical thermosiphon reboilers เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง แนวโน้มการเกิดตะกรันต่ำ และ Residence time ต่ำ หม้อต้มซ้ำชนิดนี้มีขนาดกะทัดรัด ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย ใช้เงินลงทุนค่อนข้างต่ำ และไม่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (เช่น จากปั๊ม) หม้อต้มซ้ำชนิดนี้ไม่เหมาะกับการใช้งานในกรณีต่อไปนี้

- เมื่อตัวกลางให้ความร้อนที่อยู่ในท่อสามารถเกิดตะกรันได้ง่าย
- เมื่อเสดของของเหลวไม่เพียงพอหรือการเพิ่มเสดต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง
- เมื่อต้องการพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง
- เมื่อต้องการอัตราการหมุนเวียนของสารสูง (กรณีเช่นนี้ Forced-circulation reboilers จะเหมาะสมกว่า)

- การกลั่นแบบสุญญากาศ (กรณีเช่นนี้ Forced-circulation reboilers และ Kettle reboilers จะเหมาะสมกว่า)

- สำหรับระบบการกลั่นที่ต้องการความเชื่อถือได้ (Reliability) สูง (กรณีเช่นนี้ควรเลือกใช้ Forced-circulation reboilers และ Kettle reboilers)

2. Horizontal thermosiphon reboilers เมื่อเปรียบเทียบกับ Vertical thermosiphon reboilers หม้อต้มซ้ำชนิดนี้ต้องใช้ระบบท่อและพื้นที่มากกว่า มีแนวโน้มการเกิดตะก้นสูงกว่า (สารที่เดือดจะอยู่ภายในเปลือก) ความน่าเชื่อถือในการใช้น้อย และมีราคาสูงกว่า อย่างไรก็ตามข้อดีของ Horizontal thermosiphon reboilers มีมากกว่าข้อจำกัด ดังนี้

- ใช้เมื่อสารที่ให้ความร้อนสามารถเกิดตะก้นได้ แต่ควรให้สารอยู่ในท่อ
- เหมาะสมในกรณีเมื่อไม่สามารถสร้างเขตของของเหลวทั้งจาก Vertical thermosiphon reboilers หรือจากการใช้ปั๊มใน Forced circulation reboiler หรือทำได้แต่มีค่าใช้จ่ายสูง
- เมื่อต้องการพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง ซึ่ง Vertical thermosiphon reboiler ไม่สามารถให้ได้
- เมื่อต้องการอัตราการหมุนเวียนของสารสูงหรือต้องการลดระดับจุดเดือดในกรณีการกลั่นภายใต้สุญญากาศสำหรับสารบางชนิดที่จะสูญเสียสมบัติได้ถ้าอุณหภูมิสูง

3. Forced-circulation reboilers มักหลีกเลี่ยงการใช้หม้อต้มซ้ำชนิดนี้เนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายในการปั๊มสารและมีโอกาสที่ปั๊มจะรั่วได้ หม้อต้มซ้ำชนิดนี้เหมาะกับการใช้งานกรณีต่อไปนี้

- ระบบที่มีการเกิดตะก้นสูงหรือมีของแข็งมาก เพราะ Forced-circulation reboilers สามารถทำให้ความเร็วของสารสูงกว่าวิธีอื่น และสามารถใช้งานได้ที่อัตราการกลายเป็นไอต่อทางผ่านต่ำกว่าวิธีอื่น
- เตาให้ความร้อนที่ต้องการการหมุนเวียนสารต่อเนื่อง อัตราการหมุนเวียนเพียงพอเพื่อหลีกเลี่ยงสภาพการให้ความร้อนแก่ท่อที่สูงเกินไป (Tube overheating)
- ของเหลวที่มีความหนืดสูงมากกว่า 25 cP และต้องการให้ของเหลวไหลเวียนทั่วหม้อต้มซ้ำ
- กรณีที่หม้อต้มซ้ำต้องตั้งอยู่ค่อนข้างห่างจากหอกลั่น
- ระบบสุญญากาศที่ความดันต่ำกว่า 4 psia แต่ไม่ควรเลือก Thermosiphon reboilers
- เมื่อต้องการอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงและการควบคุมที่ดี

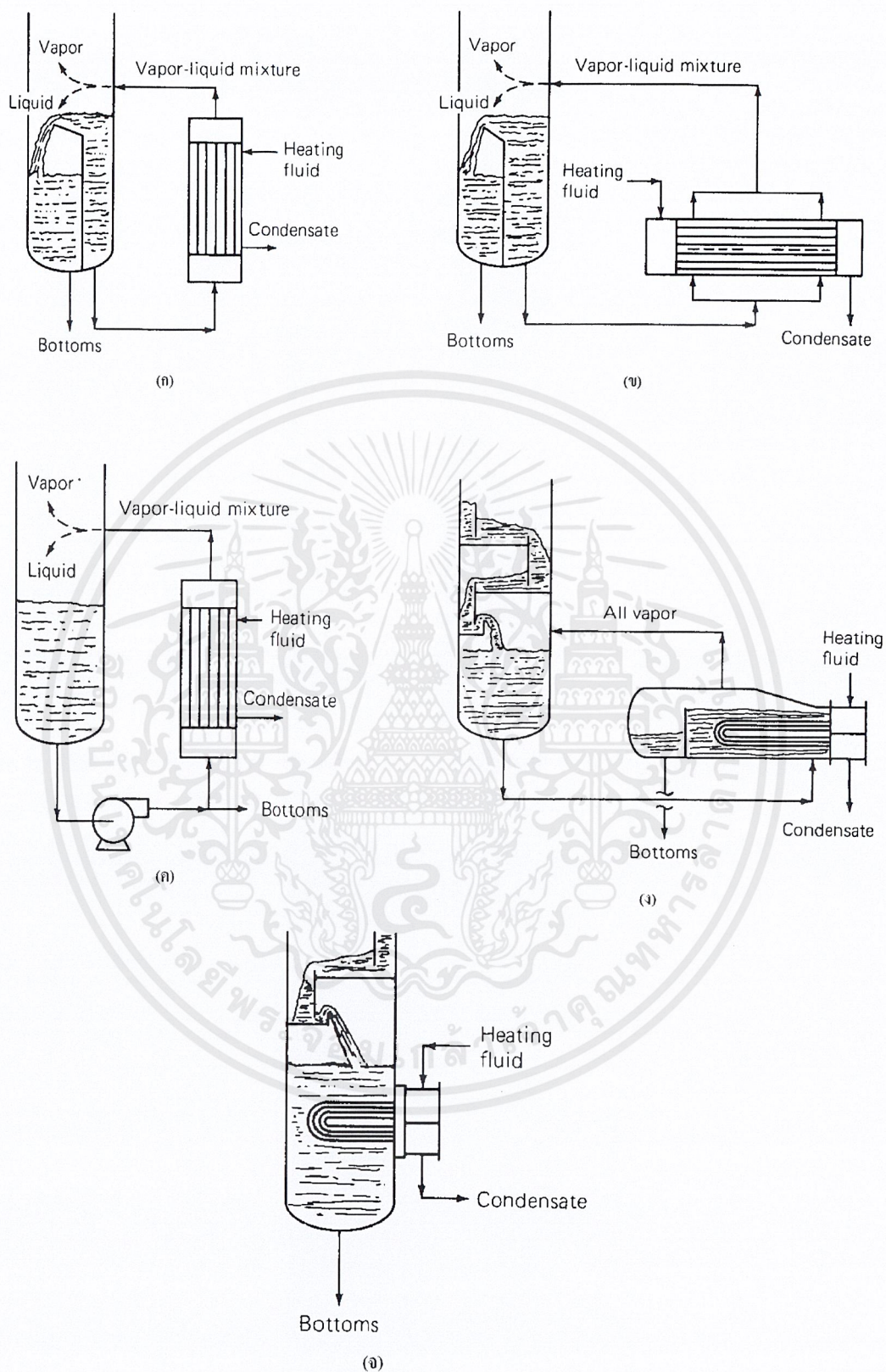
119173

4. Kettle reboilers หม้อต้มซ้ำชนิดนี้ราคาแพง มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ มีโอกาสของการเกิดตะกรันสูง ใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก ไม่นิยมใช้กับการกลั่น อาจเหมาะกับการใช้งานลักษณะ

- เสดตามแนวตั้งในคอลัมน์นี้ไม่เพียงพอ
- งานที่ต้องการพื้นที่การถ่ายเทความร้อนมาก
- ระบบที่ค่อนข้างไม่มีเสถียรภาพ
- ระบบที่คาดว่าต้องทำความสะอาดบ่อย เช่น หอกลิ้นสุญญากาศ
- ต้องการลดปริมาณของเหลวที่ออกจากหม้อต้มซ้ำ
- การปฏิบัติการใกล้จุดความดันวิกฤตที่ต้องการความเชื่อถือได้สูง

5. Internal reboilers เป็นหม้อต้มซ้ำที่ติดตั้งภายในหอกลิ้น หลีกเลี่ยงการใช้เมื่อนำขนาดของหม้อต้มซ้ำใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหอกลิ้น ไม่เช่นนั้นจะต้องเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความสูงของหอกลิ้นเพื่อการติดตั้ง นอกจากนี้เมื่อของเหลวที่กำลังเดือดเป็นฟองในหอกลิ้นที่มีการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นจะควบคุมระดับสารก้นหอยยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดฟองในระบบสุญญากาศ หม้อต้มซ้ำชนิดนี้ควรใช้สำหรับ

- การกลั่นแบบกะ เพราะสามารถติดตั้งและทำความสะอาดกลุ่มท่อ (Tube bundle) ตามระยะเวลาได้ง่าย
- กรณีใช้พลังงานความร้อนในการทำความสะดวกต่ำ หรือเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อต้มขนาดใหญ่ และกลุ่มท่อ มีขนาดเล็ก



รูปที่ 2.6 ชนิดหม้อต้มซ้ำ (ก) Vertical thermosiphon reboiler (ข) Horizontal thermosiphon reboiler

(ค) Forced-circulation reboiler (ง) Kettle reboiler (จ) Internal reboiler [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ถาดของหอกลับ [14-20]

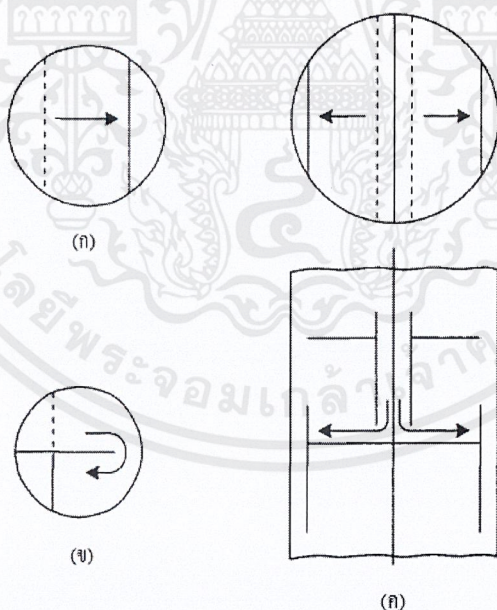
หน้าที่หลักของถาด คือ ช่วยการผสมระหว่างของเหลวและไอไม่ให้เกิดการท่วมหรือสั้นของสาร ถาดต้องทนต่อสารกัดกร่อนและสะดวกในการบำรุงรักษา สำหรับการถาดแบบสุญญากาศถาดที่ใช้ต้องเกิดความดันลดต่ำ

ทิศทางการไหลของของเหลวบนถาดขึ้นกับอัตราส่วนของของเหลวต่อไอ โดยทั่วไปแบ่งได้ 3 ลักษณะ ดังรูปที่ 2.7 การไหลแบบตามขวาง (Cross flow) เป็นแบบที่นิยมที่สุด

1. การไหลแบบตามขวาง (Cross flow) โดยปกติถ้าทางเดินของของเหลวมีความยาวพอเหมาะจะให้ค่าการถ่ายเทมวลที่ดี

2. การไหลแบบสวนทางกัน (Reverse) เหมาะกับกรณีที่มีอัตราส่วนของของเหลวต่อไอน้อย แต่ทางเดินของของเหลวจะต้องยาวมาก ส่วนพื้นที่ของคาน้ำกัมเมอร์ลดลงเมื่อเทียบกับการไหลแบบตามขวาง

3. การไหลแบบทางคู่ (Double pass) ของเหลวแยกไหลออกเป็นสองทิศทาง เหมาะกับการใช้งานที่มีอัตราส่วนของของเหลวต่อไอสูง



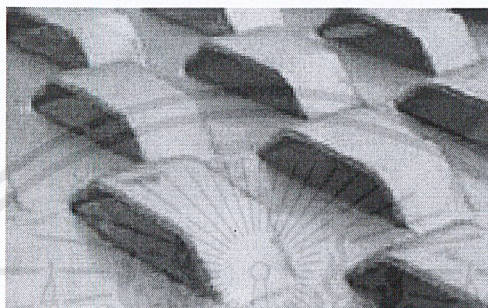
รูปที่ 2.7 ทิศทางการไหลของของเหลวบนถาด (ก) แบบตามขวาง (ข) แบบสวนทางกัน

(ค) แบบทางคู่ [16]

ถาดแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Cross-flow trays และ Non-cross-flow trays

1. Cross-flow trays เป็นถาดชนิดทั่วไปที่ใช้ในหอกลั่นและหอดูดซึม แบ่งตามวิธีที่สัมผัสกับไอและของเหลวได้ 3 ประเภท คือ

1.1 Sieve trays (Perforated plate) นิยมใช้มาก เนื่องจากสร้างได้ง่ายและราคาถูก ลักษณะเป็นแผ่นโลหะเจาะรู ไอจะผ่านทางรูของถาดขึ้นไปสัมผัสกับของเหลวที่ถูกรักษาระดับไว้บนถาด โดยทั่วไปจะเจาะรูเป็นขนาดเล็กๆ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 Sieve trays [18]

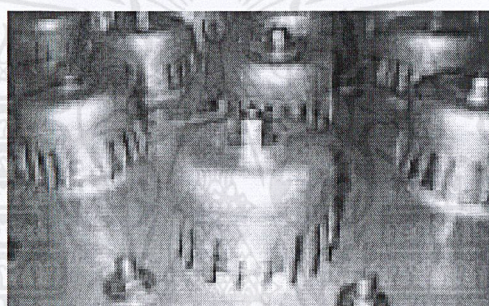
1.2 Valve trays (รูปที่ 2.9) เป็นแบบที่อยู่ระหว่าง Sieve trays และ Bubble-cap trays แต่มีข้อดีมากกว่า ประกอบด้วยช่องที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ครอบด้วยหมวก (Flap) ที่เคลื่อนขึ้น-ลงได้ โดยจะเคลื่อนที่ขึ้นตามการไหลของไอที่เพิ่มขึ้น ทำให้ Valve trays มีประสิทธิภาพสูงกว่า Sieve trays ที่อัตราการไหลต่ำ ตัววาล์วทำด้วยแผ่นโลหะกลม มีหลายขา ซึ่งจะจำกัดการเคลื่อนไหวยเฉพาะในแนวตั้ง วาล์วบางแบบมีระบบป้องกันการไหลของของเหลวลงสู่ด้านล่างเมื่ออัตราการไหลของไอไม่เพียงพอที่จะยกวาล์ว ข้อดีของ Valve trays คือ

- สามารถปฏิบัติการด้วยกำลังการผลิตและประสิทธิภาพเท่ากับ Sieve trays
- ความดันลดต่ำและคงที่ตลอดช่วงการปฏิบัติการ
- สร้างง่าย มีราคาสูงกว่า Sieve trays ประมาณ 20%



รูปที่ 2.9 Valve trays [19]

1.3 Bubble-cap trays เป็นถาดชนิดที่ใช้มานานที่สุด ไจจะไหลผ่านขึ้นไปทางท่อสั้น เรียกว่า Risers ซึ่งจะถูกรอบด้วยฝาครอบ (Cap) กับขอบที่คล้ายฟันเลื่อยหรือช่องที่แคบและยาว ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 Bubble-cap trays [18]

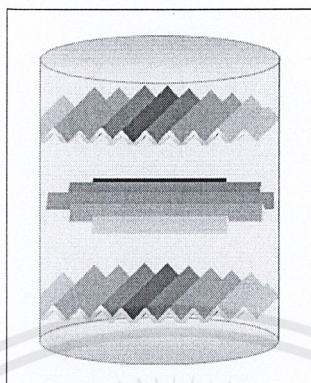
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบถาดแต่ละชนิด [17]

|                        | Sieve trays | Valve trays | Bubble-cap trays |
|------------------------|-------------|-------------|------------------|
| Relative cost          | 1.0         | 1.2         | 2.0              |
| Pressure drop          | ต่ำที่สุด   | ปานกลาง     | สูงที่สุด        |
| Efficiency             | ต่ำที่สุด   | สูงที่สุด   | สูงที่สุด        |
| Vapor capacity         | สูงที่สุด   | สูงที่สุด   | ต่ำที่สุด        |
| Typical turndown ratio | 2           | 4           | 5                |

2. Non-cross-flow trays หรือ Baffle trays หรือ Shower trays เป็นถาดที่ถูกใช้ในลักษณะงาน เฉพาะ เช่น งานที่ต้องการความดันลดในหอกลับต่ำ หรือ โอกาสในการเกิดตะกรันเกือบจะเป็นศูนย์ เป็นต้น Baffle trays แบ่งได้ 3 ประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 Shed decks มีลักษณะเป็นคานเหล็กทำมุมในแนวขวางกับหอกถัน ดังรูปที่ 2.11 ถาดชนิดนี้ การเกิดตะกรันเกือบจะเป็นศูนย์ เพราะไม่มีตำแหน่งของ Stagnate zones ที่ทำให้ Residence time ต่ำลง แต่ถาดชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำ



รูปที่ 2.11 Shed decks [20]

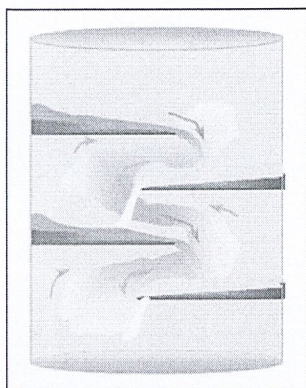
2.2 Disk and donut trays มีลักษณะเป็นคานเหล็กลาดเอียงเล็กน้อย โดยของไหลจะไหลจาก วงกลมด้านใน และแผ่ออกสู่วงกลมด้านนอก ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 Disk and donut trays [20]

2.3 Side-to-side trays มีลักษณะเป็นคานเหล็กผิวเรียบที่ติดตั้งลาดเอียงเข้ากับผนังของหอกถัน โดยของไหลจะไหลจากด้านหนึ่งของคานเหล็กผิวเรียบ ไปสู่อีกด้านหนึ่ง ดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 Side-to-side trays [20]

## 2.5 การเกิดตะกรัน (Fouling) [20-21]

โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้หอกลิ้นมักพบปัญหาการเกิดตะกรันอุดตันบริเวณต่างๆ ภายในหอกลิ้น เช่น บริเวณทางลำเลียงสารภายในหอกลิ้น หรือรูของถาดในหอกลิ้น ซึ่งส่วนใหญ่แล้วตะกรันจะอุดตันรูของถาดชั้นล่างสุดของหอกลิ้น ตะกรันที่เกิดขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการกลั่นของหอกลิ้นลดลง และต้องใช้พลังงานในการกลั่นมากขึ้น ทำให้ต้องล้างทำความสะอาดหอกลิ้นบ่อย สิ้นเปลืองสารเคมีและเสียเวลา เมื่อหอกลิ้นเกิดตะกรันจะแสดงผลัพท์คือ

1. การใช้พลังงานเพิ่มเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนลดลง
2. ประสิทธิภาพการกลั่นของหอกลิ้นลดลง ต้องใช้พลังงานในการกลั่นมากขึ้น
3. กำลังการผลิตลดลง สูญเสียปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ควรผลิตได้
4. เสียเวลาทำความสะอาดหอกลิ้นบ่อย
5. ต้องใช้สารเคมีช่วยลดการเกิดตะกรัน

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดตะกรัน ได้แก่

1. ตำแหน่งในหอกลิ้น
  - Stagnate zones คือ บริเวณที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของมวลสารหรือมีการเคลื่อนที่น้อย
  - Sharp transitions เป็นบริเวณที่เป็นเหลี่ยมมุมภายในหอกลิ้น การเกาะตัวของของแข็งบริเวณนี้สูง
2. เวลา (Residence time) ถ้าสารอยู่ในหอกลิ้นนานขึ้น โอกาสที่สารจะสะสมและเกิดเป็นตะกรันก็จะมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปัจจัยอื่นๆ เช่น Emulsion issues สารประเภทไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำปนอยู่ต้องกำจัดน้ำออก เพื่อป้องกันไอออนที่มากับน้ำจะทำให้เกิดตะกรัน และถ้ามีค่าความเป็นกรดสูง ยังมีโอกาสเกิดตะกรันได้ง่าย

### กลไกการเกิดตะกรัน ได้แก่

1. Vaporization of volatile components การเกิดตะกรันลักษณะนี้เพราะมีการระเหยของสารที่ระเหยได้ ออกไปเรื่อยๆ จากยอดหอ ถ้าไม่มีการป้อนสารใหม่ สิ่งที่เหลืออยู่ที่ก้นหอจะเป็นส่วนหนัก และเมื่อปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลานาน อาจทำให้สารนั้นจับตัวกันเป็นก้อนตะกรันได้
2. Condensation คือ การรวมกันของสารสองชนิดขึ้นไปเป็น โมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นเกิดเป็นของแข็ง
3. Polymerization คล้ายกับการเกิด Condensation แต่ต่างกันที่สารที่ทำปฏิกิริยาจะเกิดที่ตำแหน่งพันธะคู่
4. Sedimentation and Crystallization คือ การตกตะกอนและการตกผลึก จะเกิดขึ้นบริเวณที่มีความเร็วของของไหลต่ำๆ ซึ่งหากสิ่งอุดตันไม่ได้ติดกันแน่นมากนัก อาจกำจัดสิ่งอุดตันออกโดยใช้การไหลของของไหล
5. Chemical reaction ในบางปฏิกิริยาอาจมีทั้งปฏิกิริยาที่ต้องการและปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ ซึ่งปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการนั้นอาจเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดตะกรันได้
6. Corrosion หรือ การกัดกร่อน สำหรับบางปฏิกิริยาสารที่ป้อนเข้าหอกถันอาจมีฤทธิ์กัดกร่อน และเมื่อสารเหล่านี้ไปกัดกร่อนอุปกรณ์ภายในหอกถันจะทำให้เกิด Stagnate zone ทำให้เกิดการสะสมของสารกลายเป็นตะกรันได้

### มาตรการลดการเกิดตะกรัน

1. Process review เป็นการทบทวนกระบวนการก่อนหน้าว่ามีเหตุการณ์ใดบ้างที่อาจทำให้เกิดตะกรันได้
2. Packing หรือ การบรรจุ ควรออกแบบให้การบรรจุในหอกถันมีความดันลดต่ำ เช่น ใช้ Grid packing, Intalox saddle เป็นต้น และมีพื้นผิวเรียบ เพราะจะทำให้ Residence time ต่ำลง สารจะไหลออกจากหอกถันเร็วขึ้น ไม่สะสมเป็นตะกรัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Material of construction / Surface finishing การเลือกวัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์ภายในหอกถันที่เหมาะสมคือทนต่อสารกัดกร่อนได้ดี เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม โลหะผสมระหว่าง Cupro-Nickel เป็นต้น นอกจากนี้การปรับผิววัสดุให้เรียบ สามารถลดการเกิดตะกรันลงได้

4. ควรเลือกใช้ถาดให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน การติดตั้ง Baffle tray แบบ Side-to-side trays ช่วยลดการเกิดตะกรันภายในหอกถันได้ เพราะ Side-to-side trays มีลักษณะเป็นคานเหล็กผิวเรียบที่ติดตั้งลาดเอียงเข้ากับผนังของหอกถัน ดังรูปที่ 2.13 ของไหลจะไหลจากด้านหนึ่งของคานเหล็กผิวเรียบไปสู่อีกด้านหนึ่งจากด้านบนลงสู่ด้านล่างตลอดเวลา จึงลด Stagnate zone และ Residence time ลงได้ ไม่มีการสะสมของสาร การเกิดตะกรันเกือบเป็นศูนย์

สำหรับหอกถันแบบถาดชนิด Shed decks และ Bubble cap สามารถลดตะกรันได้เกือบทั้งหมด แต่มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับ Sieve trays และ Valve trays ส่วนหอกถันแบบบรรจุใช้ Grid packing และ Structured packing ในการลดการเกิดตะกรัน แต่มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับ Random packing ซึ่งมีโอกาสเกิดตะกรันมากกว่า

#### กรณีศึกษา Ethylene unit caustic towers

การเกิดตะกรันใน Caustic towers ของกระบวนการผลิตเอทิลีนเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น จาก Polymerization, Sedimentation, Precipitation, Crystallization, Chemical reactions และ Corrosion ซึ่งมักเกิดได้มากกว่า 2 ลักษณะในเวลาเดียวกัน

การตกตะกอนใน Caustic towers เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เป็นเกลือสะสมอยู่ด้านล่างของถาด ทำให้ความดันลดสูงขึ้น ทำให้อัตราการผลิตลดลง และเมื่อเวลาผ่านไปนานผลิตภัณฑ์ข้างเคียงนี้จะกลายเป็นตะกรันได้ อาจใช้พลังงานจากเครื่องอัดแก๊สให้แตกตัว (Cracked gas compressor) หรือ Pyrolysis gasoline ในปริมาณน้อยล้างส่วนที่ตกตะกอนอย่างต่อเนื่อง แล้วตามด้วยการล้างในปริมาณมากขึ้นเมื่อมีความดันลดเพิ่มขึ้น

ทางเลือกในการออกแบบ Caustic towers

- ใช้ Sieve deck trays หรือ Shed trays เพราะข้อดีของ Sieve deck trays คือสามารถรักษาประสิทธิภาพเคมีของกระบวนการได้นาน ข้อจำกัดคือเกิดความดันลดสูงเมื่อเทียบกับหอบแบบบรรจุ อย่างไรก็ตาม Caustic towers ที่ใช้ Sieve deck trays สามารถใช้งานได้นานต่อเนื่องได้มากถึง 5 ปี

- หอบแบบบรรจุใช้ได้ดีกับ Caustic towers แต่มีข้อจำกัด คือ ส่วนที่เป็นช่องว่างระหว่าง Random packing เป็นส่วนที่ตะกรันสามารถเกิดขึ้นและสะสมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

จากการศึกษาทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ของบริษัท และสำรวจการเกิดตะกรันภายในหม้อต้มผลิตภัณฑ์ที่ 2 ในหม้อต้มซ้ำของหม้อต้มผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 และจากการปรึกษากับวิศวกรของบริษัท จึงได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

#### 3.1 ศึกษากระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ และทฤษฎีของการเกิดตะกรัน

ศึกษากระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ หม้อต้มผลิตภัณฑ์แบบถาด การทำงานของ ส่วนประกอบต่างๆ ของหม้อต้ม ได้แก่ ถาด หม้อต้มซ้ำ เครื่องควบแน่น ตำแหน่งทางเข้าของสารป้อน ศึกษาภาวะปฏิบัติการของหม้อต้ม และปัญหาที่มักเกิดในหม้อต้ม ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกรัน ลักษณะของตะกรัน สาเหตุและตำแหน่งที่เกิด

#### 3.2 วิเคราะห์สาเหตุที่คาดว่าทำให้เกิดตะกรันในหม้อต้มผลิตภัณฑ์ที่ 2

3.2.1 จากทฤษฎีและกระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์ ระดมสมองและเขียนแผนภาพแสดง สาเหตุและผล เพื่อวิเคราะห์สาเหตุที่คาดว่าทำให้เกิดตะกรันในหม้อต้มผลิตภัณฑ์ที่ 2

3.2.2 ทีมงานเลือกสาเหตุที่มีความเป็นไปได้ และหาแนวทางแก้ปัญหา

#### 3.3 วิเคราะห์องค์ประกอบของ Crude PA สารก้นหม้อต้มผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 และตะกรัน

การวิเคราะห์องค์ประกอบของ Crude PA สารก้นหม้อต้มผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 และตะกรันใช้ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography/Mass Spectrometry : GC/MS) ยี่ห้อ Agilent รุ่น GC G1530N MS G2573A ของบริษัท Agilent Technologies Co. Ltd. ภาวะ ปฏิบัติการของ GC/MS ดังตารางที่ 3.1

การวิเคราะห์ตะกรันของแข็งต้องใช้ Fiber Solid-Phase Microextraction (SPME) ชนิด 100 Polydimethylsiloxane (PDMS)

#### 3.4 การหาแนวทางแก้ปัญหการเกิดตะกรัน

ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหการเกิดตะกรันจากกรณีศึกษาต่างๆ และนำมา ประยุกต์แก้ปัญหากับกระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์

ตารางที่ 3.1 ภาวะปฏิบัติการของ GC/MS

|                                   | Conditions                         |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| <b>Column</b>                     |                                    |
| Type                              | Capillary                          |
| Mobile phase                      | HP-1                               |
| Flame thickness                   | 0.25 $\mu\text{m}$                 |
| Length                            | 30 m                               |
| Column ID                         | 0.32 mm                            |
| <b>Injection temperature</b>      | 230 $^{\circ}\text{C}$             |
| <b>Detector temperature</b>       | 300 $^{\circ}\text{C}$             |
| <b>Flow gas</b>                   |                                    |
| Carrier gas ( $\text{N}_2$ ) flow | 1 ml/min                           |
| Split ratio                       | 1 : 30                             |
| Purge flow                        | $\sim 3 - 5$ ml / min              |
| Total flow                        | 34 – 38 ml / min                   |
| <b>Temperature program</b>        |                                    |
| Oven temp.                        | 80 $^{\circ}\text{C}$              |
| Initial time                      | 1 min                              |
| Rate                              | 15 $^{\circ}\text{C} / \text{min}$ |
| Final temp.                       | 220 $^{\circ}\text{C}$             |
| Final time                        | 18 min                             |
| Rate A                            | 10 $^{\circ}\text{C} / \text{min}$ |
| Final temp. A                     | 170 $^{\circ}\text{C}$             |
| Final time A                      | 6 min                              |
| <b>Volume inject</b>              | 2 $\mu\text{l}$                    |

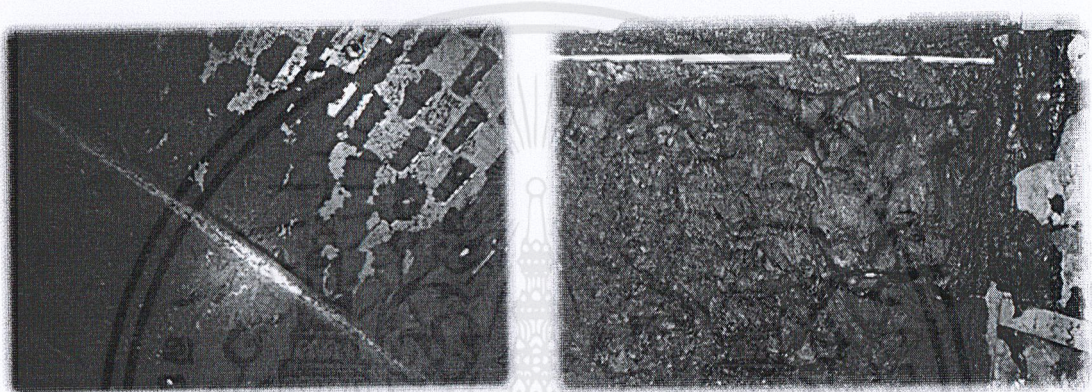
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ผล

### 4.1 ลักษณะของตะกรันและตำแหน่งที่พบ

ที่หอกลับผลิตภัณฑ์ที่ 2 พบตะกรันลักษณะสีดำปริมาณมากบริเวณด้านล่างของถาดชั้นล่างสุด แบบ Sieve tray ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตะกรันที่ถาดชั้นล่างสุดของหอกลับผลิตภัณฑ์ที่ 2

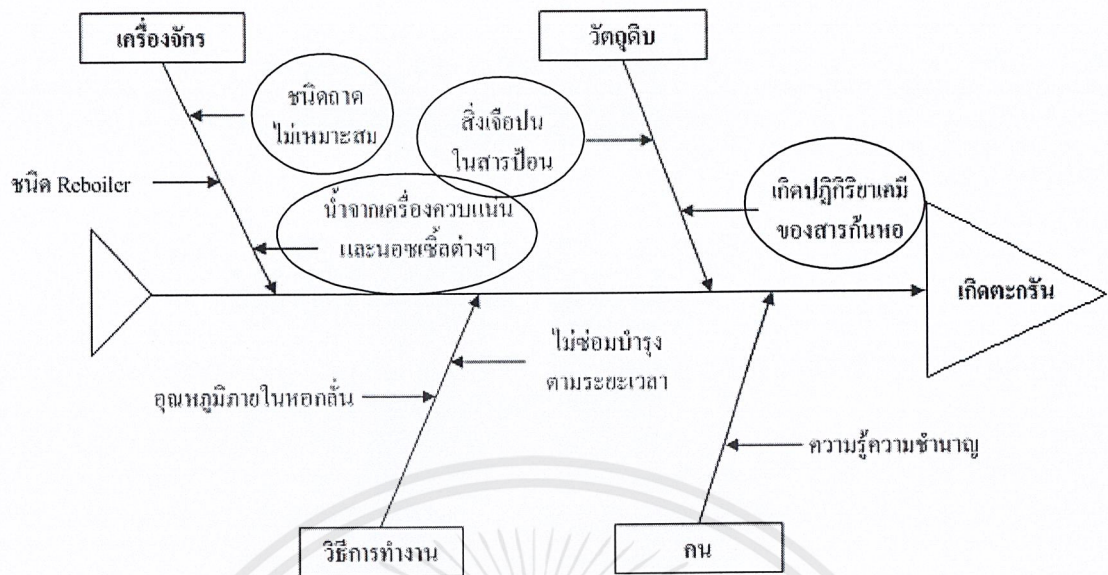
### 4.2 การวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดตะกรัน

กระบวนการกลั่นพาทาลิกแอนไฮไครด์ของบริษัทใช้หอกลับแบบถาด 1 หอ เป็นหอกลับแยกส่วนกลั่นเบา และมีหอกลับผลิตภัณฑ์ 2 หอ (หอกลับผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 มีกำลังการผลิต 4,500 และ 5,600 กิโลกรัม/ชั่วโมง ตามลำดับ) ยังไม่สามารถทราบได้ว่าทำไมตะกรันเกิดที่หอกลับผลิตภัณฑ์ที่ 2 แต่ไม่เกิดที่หอกลับผลิตภัณฑ์ที่ 1 แม้ว่าภาวะการกลั่นและดำเนินการจะเหมือนกัน (ดังแสดงในภาคผนวก ก)

รูปที่ 4.2 แสดงการวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดตะกรันด้วยแผนภาพแสดงสาเหตุและผล และการระดมสมองร่วมกับทีมงานของบริษัท จากรูปตั้งสมมติฐานสำคัญ 2 ประการที่คาดว่าจะจะเป็นสาเหตุของการเกิดตะกรัน คือ

1. ตะกรันอาจเกิดจากปฏิกิริยาเคมีของสารก้นหอกลับ ถ้าองค์ประกอบของสารก้นหอกลับผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 ต่างจาก Crude PA แสดงว่าอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารก้นหอกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

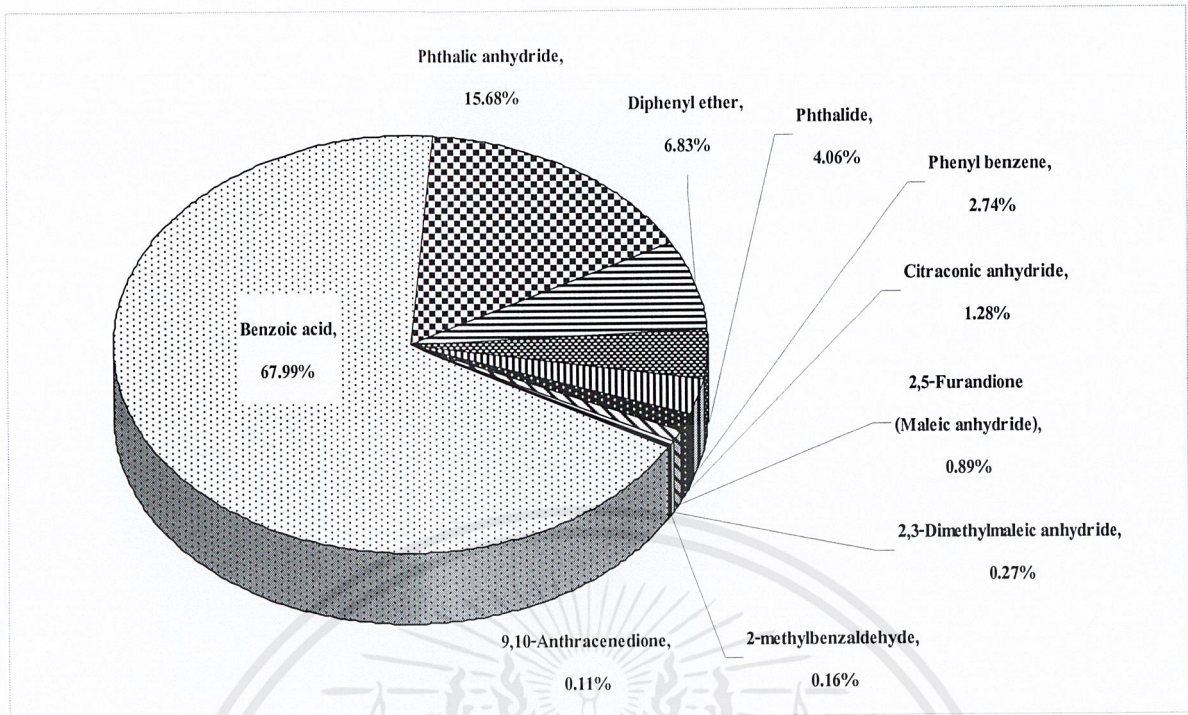


รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงสาเหตุและผลของการเกิดตะกรัน

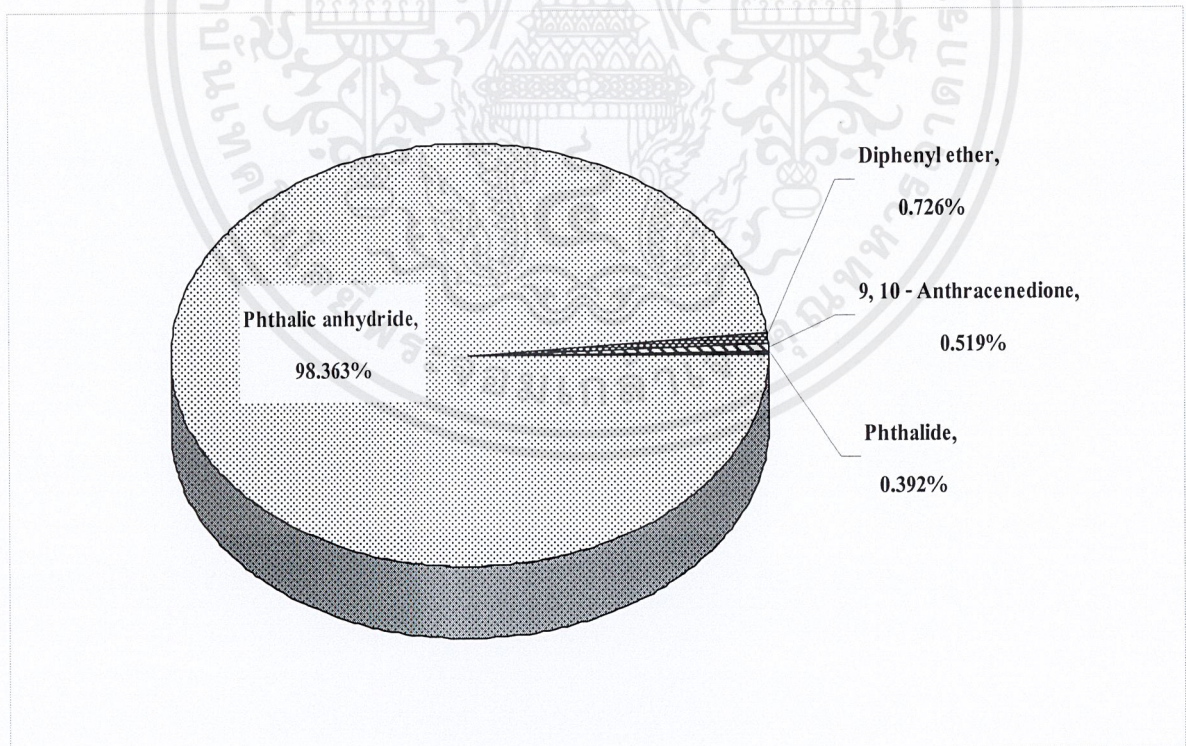
2. ตะกรันอาจเกิดจากการกักคร่อน Sieve tray ของกรดพาทาลิกที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างพาทาลิกแอนไฮไดรด์กับน้ำที่รั่วจากเครื่องควบแน่นและนอชเซลล์ของหม้อกลั่นผลิตภัณฑ์ที่ 2 ปกติ น้ำที่เข้าเครื่องควบแน่นและนอชเซลล์จะผ่านการกำจัดออกซิเจนออกด้วยไฮดราซีนไฮเดรต (Hydrazine hydrate) เพื่อป้องกันการกักคร่อนท่อและหน่วยปฏิบัติการ และปรับสภาพน้ำให้มีค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 6-8 ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine) หากมีน้ำรั่วจากเครื่องควบแน่นหรือนอชเซลล์ การวิเคราะห์ห้องค้ประกอบของสารก้นหม้อกลั่นผลิตภัณฑ์ที่ 2 และตะกรันควรจะพบสารที่มีองค์ประกอบของไฮดราซีนไฮเดรต และ/หรือ โมโนเอทานอลามีนที่อยู่ในกากก้นหม้อ

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบของ Crude PA สารก้นหม้อกลั่นผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 และตะกรัน

การวิเคราะห์ Crude PA สารก้นหม้อกลั่นผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 และตะกรัน ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์ ได้ผลดังรูปที่ 4.3-4.6 และตารางที่ 4.1-4.4 ดังนี้



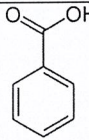
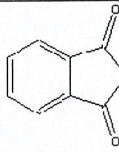
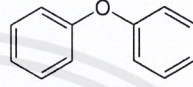
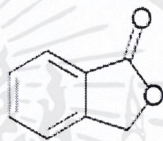
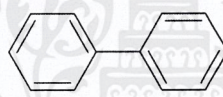
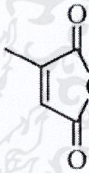

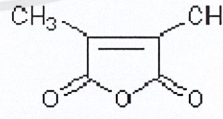
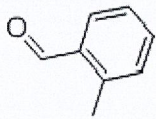
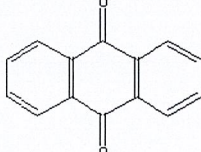
รูปที่ 4.3 องค์ประกอบของ Crude PA



รูปที่ 4.4 องค์ประกอบของสารก้นหอกต้นผลิตภัณฑ์ที่ 1

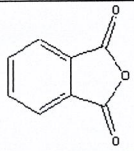
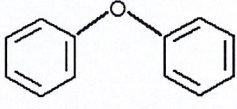
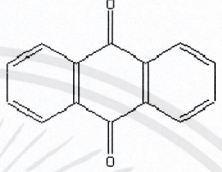
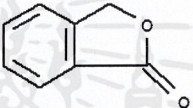
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

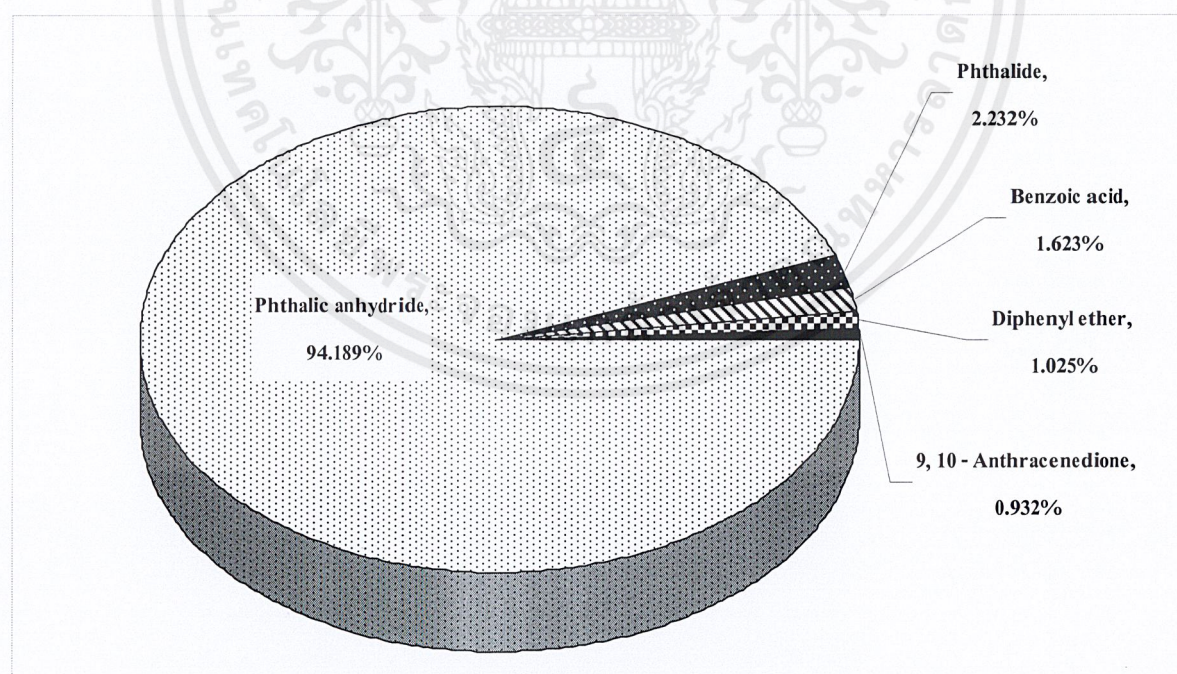
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของ Crude PA

| สาร  | % โดยน้ำหนัก | สูตรโครงสร้าง  | จุดเดือด (°C) |
|--|--------------|--|---------------|
| Benzoic acid   | 67.987%      |     | 249           |
| Phthalic anhydride<br>(C <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub> )                | 15.682%      |     | 284.5         |
| Diphenyl ether (C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> O)                                   | 6.833%       |    | 258.1         |
| Phthalide (C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> )                            | 4.061%       |     | 290           |
| Phenyl benzene (C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> )                                    | 2.739%       |   | 256           |
| Citraconic anhydride<br>(C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub> )              | 1.277%       |   | 213           |
| 2,5-Furandione (C <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )<br>(Maleic anhydride) | 0.886%       |  | 202           |
| 2,3-Dimethylmaleic<br>anhydride (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub> )      | 0.265%       |  | 223           |
| 2-Methylbenzaldehyde<br>(C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O)                            | 0.161%       |   | 199-200       |
| 9,10-Anthracenedione<br>(C <sub>14</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> )             | 0.108%       |  | 379-381       |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของสารก้นหอกกลิ่นผลิตภัณฑ์ที่ 1

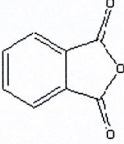
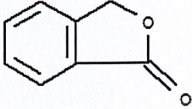
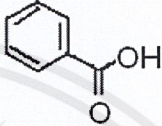
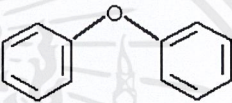
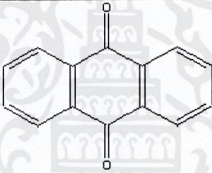
| สาร   | % โดยน้ำหนัก | สูตรโครงสร้าง  | จุดเดือด (°C) |
|---|--------------|--|---------------|
| Phthalic anhydride<br>(C <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub> )       | 98.363%      |   | 284.5         |
| Diphenyl ether<br>(C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> O)                       | 0.726%       |  | 258.1         |
| 9, 10 – Anthracenedione<br>(C <sub>14</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> ) | 0.519%       |  | 379-381       |
| Phthalide<br>(C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> )                | 0.392%       |  | 290           |

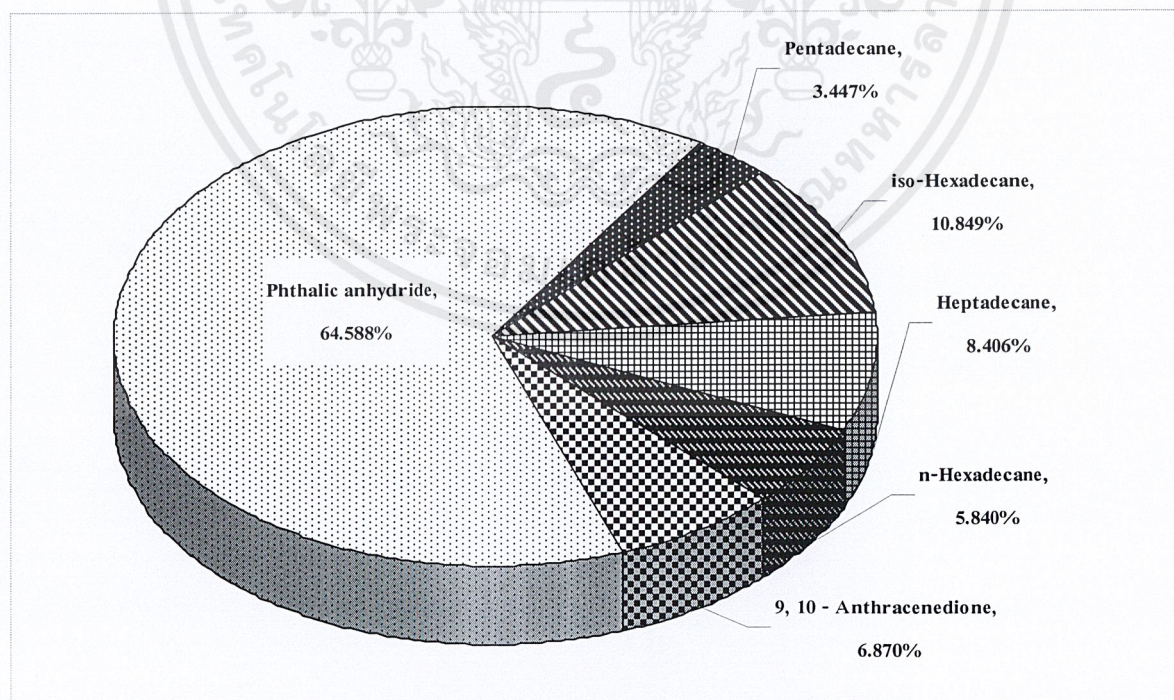


รูปที่ 4.5 องค์ประกอบของสารก้นหอกกลิ่นผลิตภัณฑ์ที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของสารก้นหอกล้านผลิตภัณฑ์ที่ 2

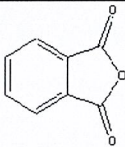
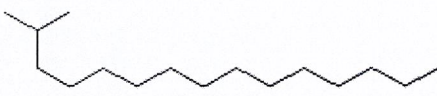

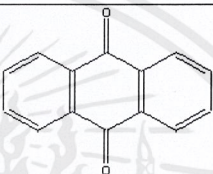


| สาร   | % โดยน้ำหนัก | สูตรโครงสร้าง   | จุดเดือด (°C) |
|---|--------------|---|---------------|
| Phthalic anhydride<br>(C <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub> )       | 94.189%      |   | 284.5         |
| Phthalide<br>(C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> )                | 2.232%       |   | 290           |
| Benzoic acid<br>(C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> )             | 1.623%       |   | 249           |
| Diphenyl ether<br>(C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> O)                       | 1.025%       |   | 258.1         |
| 9, 10 – Anthracenedione<br>(C <sub>14</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> ) | 0.932%       |  | 379-381       |



รูปที่ 4.6 องค์ประกอบของตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของตะกั่ว

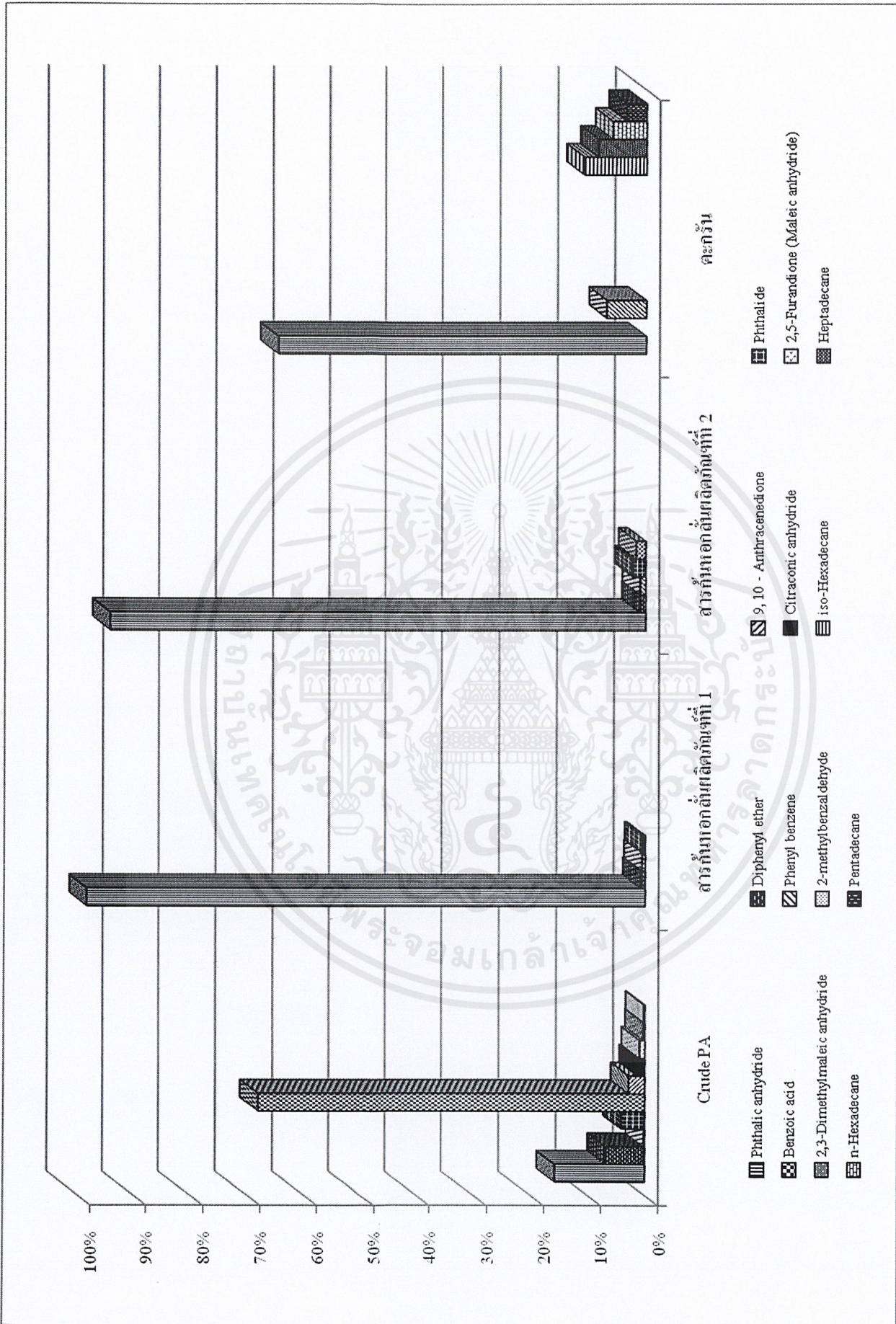
| สาร   | % โดยน้ำหนัก | สูตรโครงสร้าง  | จุดเดือด (°C) |
|---|--------------|--|---------------|
| Phthalic anhydride<br>(C <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub> )       | 64.588%      |     | 284.5         |
| iso-Hexadecane<br>(C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> )                        | 10.849%      |    | 210-250       |
| Heptadecane<br>(C <sub>17</sub> H <sub>36</sub> )                           | 8.406%       |    | 302           |
| 9, 10 – Anthracenedione<br>(C <sub>14</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> ) | 6.870%       |    | 379-381       |
| n-Hexadecane<br>(C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> )                          | 5.840%       |    | 287           |
| Pentadecane<br>(C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> )                           | 3.447%       |  | 268-270       |

#### 4.4 ผลการตรวจสอบสมมติฐานและการทดลองลดปัญหาการเกิดตะกั่ว

จากรูปที่ 4.3-4.6 เขียนกราฟเปรียบเทียบองค์ประกอบของ Crude PA สารก้นหอกถันผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 และตะกั่ว ดังรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าองค์ประกอบหลักของ Crude PA คือ กรดเบนโซอิก แต่สารก้นหอกถันผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 และตะกั่ว คือ พาทาลิกแอนไฮไดรด์ เพราะกรดเบนโซอิกส่วนใหญ่ และองค์ประกอบเบาชนิดอื่นถูกแยกออกที่หอกถันเบา โดยสรุปวิเคราะห์ได้ว่า

1. องค์ประกอบที่พบในสารก้นหอกถันผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 และตะกั่ว เหมือนกับองค์ประกอบใน Crude PA แสดงว่าไม่มีปฏิกิริยาเคมีอื่นที่เป็นสาเหตุของการเกิดตะกั่วเกิดขึ้น
2. ไม่พบสารที่มีองค์ประกอบของไฮดรอกซิลไฮดรอก และ/หรือโมโนเอทานอลามีนที่อยู่ในสารก้นหอกถันผลิตภัณฑ์ที่ 2 และตะกั่ว แสดงว่าไม่มีน้ำรั่วจากเครื่องควบแน่นและนอชเชิล ที่จะทำปฏิกิริยากับพาทาลิกแอนไฮไดรด์เป็นกรดพาทาลิกทำให้เกิดการก่อก้อน Sieve tray และเกิดตะกั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

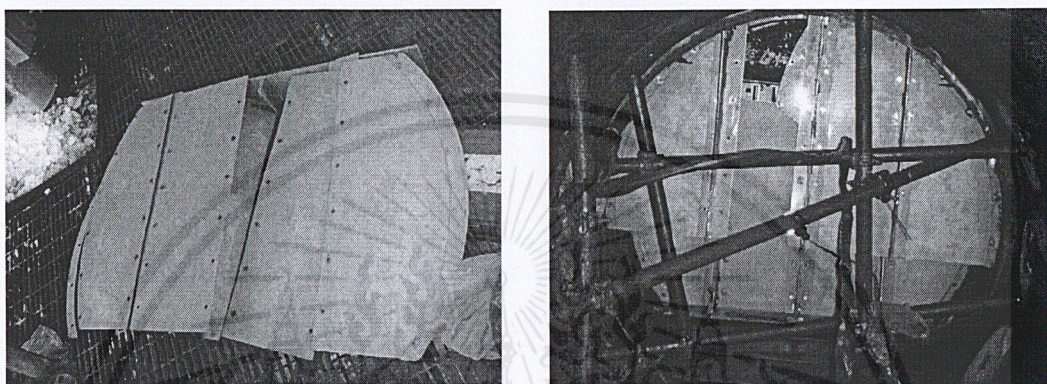


รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบองค์ประกอบของ Crude PA สารที่สกัดผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 และตะกอน

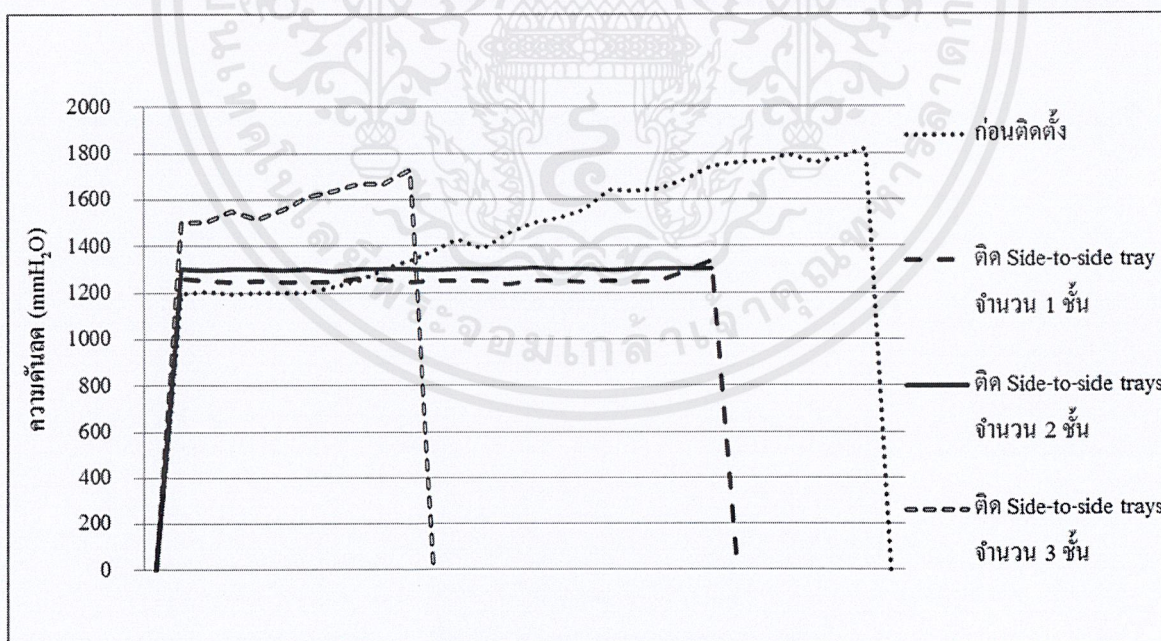
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองลดปัญหาการเกิดตะกรัน

จากการศึกษางานวิจัยของ Karl Kolmetz และคณะ [20] พบว่าการใช้ Shed decks, Disk and donut trays และ Side-to-side trays สามารถลดการเกิดตะกรัน ที่โรงงานจึงทดลองติด Side-to-side trays จำนวน 1-3 ชั้น ที่ส่วนล่างใต้ถาดชั้นล่างสุดของหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 2 (ดังรูปที่ 4.8) เพราะสามารถนำมาใช้งานจริงได้ง่ายกว่า Shed decks และ Disk and donut trays พบว่าเมื่อติด Side-to-side trays ที่ส่วนล่างใต้ถาดชั้นล่างสุดของหอกลิ้น ความดันลดจะมีค่าสูงกว่าก่อนติด ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 Side-to-side trays ที่ติดในหอกลิ้น

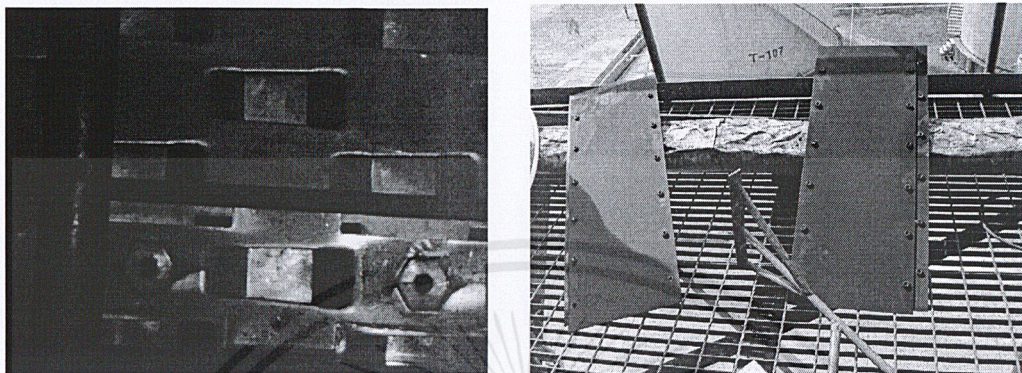


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบความดันลดในหอกลิ้นก่อนและหลังติด Side-to-side trays

**หมายเหตุ** แกนนอนของรูปที่ 4.10 คือ ช่วงเวลาที่มีการกลั่นด้วยหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 2 อย่างต่อเนื่อง กราฟแต่ละเส้นดำเนินการกลั่นไม่พร้อมกัน (ดูข้อมูลดิบได้จากภาคผนวก ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทดลองติด Side-to-side trays จำนวน 3 ชั้น เมื่อกลั่นต่อเนื่องเป็นเวลา 10 วัน ไม่เกิดตะกรันที่ได้คาด ดังรูปที่ 4.10 แต่ตั้งแต่วันที่ 5 พบว่าความดันลดสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และคำนวณพลังงานที่ต้องใช้สูงขึ้น ดังตารางที่ 4.5 จึงถอด Side-to-side trays ออกเหลือ 1 ชั้น



รูปที่ 4.10 ถาดกลั่น และ Side-to-side trays ในหอกลั่น

ตารางที่ 4.5 ค่าความดันลดและน้ำมันร้อนที่ใช้ใน Reboiler ก่อนและหลังติด Side-to-side trays จำนวน 3 ชั้น

|             | ความดันลด (มิลลิเมตรน้ำ) | น้ำมันร้อน (กิโลกรัม/ชั่วโมง) |
|-------------|--------------------------|-------------------------------|
| ก่อนติดตั้ง | 1,220                    | 70,000 – 100,000              |
| หลังติดตั้ง | 1,500                    | 100,000 – 130,000             |

การใช้ Side-to-side trays ที่ติดตั้ง 1 ชั้น ในช่วง 20 วันแรก ไม่เกิดตะกรันที่ได้คาด ความดันลดมีแนวโน้มคงที่ จากนั้นความดันลดค่อยๆ เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.9 จึงติด Side-to-side trays เพิ่มเข้าไปอีก 1 ชั้น เมื่อกลั่นอย่างต่อเนื่องด้วย Side-to-side trays มาแล้วเป็นเวลา 55 วัน ยังไม่เกิดตะกรัน และความดันลดคงที่ประมาณ 1,300 มิลลิเมตรน้ำ ในเบื้องต้นการใช้ Side-to-side trays 2 ชั้น ค่อนข้างเป็นที่น่าพอใจในระดับหนึ่ง เพราะสามารถยืดเวลาการหยุดหอกลั่นเพื่อทำความสะอาดได้ แต่จะต้องติดตามผลและหาวิธีการอื่นๆ อีกต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

5.1.1 จากการเปรียบเทียบผลการตรวจองค์ประกอบของ Crude PA สารก้นหอกก้นผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 และตะกอน พบว่าสารก้นหอกก้นผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 และตะกอน มีองค์ประกอบชนิดเดียวกับที่มีอยู่ใน Crude PA ไม่พบสารที่มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนไฮโดรคาร์บอนไฮโดรคาร์บอน และโมโนเอทานอลามีนในสารก้นหอกก้นผลิตภัณฑ์ที่ 2 และตะกอน แสดงว่าไม่มีน้ำรั่วออกจากเครื่องควบแน่นและนอชเช็ล จึงไม่เกิดครดพาทาลิกจากปฏิกิริยาระหว่างพาทาลิกแอนไฮไดรด์กับน้ำที่จะกักคร่อน Sieve tray และไม่มีปฏิกิริยาเคมีอื่นที่เป็นสาเหตุของการเกิดตะกอนเกิดขึ้นในหอกก้นผลิตภัณฑ์ที่ 2

5.1.2 การติดตั้ง Side-to-side trays ที่ส่วนล่างใต้ถาดชั้นล่างสุดของหอกก้นผลิตภัณฑ์ที่ 2 จำนวน 2 ชั้น ในเบื้องต้นได้ผลค่อนข้างเป็นที่น่าพอใจของบริษัท เพราะสามารถยืดเวลาการเกิดตะกอนและการหยุดหอกก้นเพื่อทำความสะอาดได้ แต่จะต้องติดตามผล และหาวิธีการอื่นๆ อีกต่อไป

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การวิเคราะห์ตะกอน ควรใช้เทคนิคการตรวจวิเคราะห์อื่นควบคู่กับ GC/MS เช่น เทคนิค AAS ซึ่งสามารถวิเคราะห์ธาตุเหล็กได้ เพราะ GC/MS วิเคราะห์ได้เฉพาะสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

5.2.2 สารประเภทไฮโดรคาร์บอนอาจมีน้ำปนอยู่ ต้องกำจัดน้ำออกเพื่อป้องกันไอน้ำที่มากับน้ำจะทำให้เกิดตะกอน และถ้ามีค่าความเป็นกรดสูง ยังมีโอกาสเกิดตะกอนได้ง่าย [20] ถึงแม้ว่าบริษัทมีหน่วยกำจัดน้ำออกจาก Crude PA แต่ก็อาจกำจัดไม่หมด จึงควรตรวจวิเคราะห์น้ำใน Crude PA และในกระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์มีสารข้างเคียงที่เป็นกรด เช่น กรดเบนโซอิก กรดมาเลอิก เป็นต้น

5.2.3 ระบบการกลั่นแบบสุญญากาศ ควรใช้ Forced-circulation reboilers และ Kettle reboilers จะเหมาะสมกว่า Vertical thermosiphon reboilers และสำหรับระบบสุญญากาศที่ความดันต่ำกว่า 4 psia ไม่ควรเลือกใช้ Thermosiphon reboilers [12]

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ข้อมูลพาทาลิกแอนไฮไดรด์ Available: <http://msds.pcd.go.th/> (30/9/2010)
- [2] ประโยชน์ของพาทาลิกแอนไฮไดรด์  
Available: <http://www.icis.com/v2/chemicals/9076142/phthalic-anhydride/uses.html>  
(13/3/2011)
- [3] ประโยชน์ของพาทาลิกแอนไฮไดรด์  
Available: <http://www.dow.com/propyleneglycol/app/upr.htm> (13/3/2011)
- [4] ประโยชน์ของพาทาลิกแอนไฮไดรด์  
Available: <http://www.eppo.go.th/petro/PT-Petrochemical.pdf> (13/3/2011)
- [5] บริษัท คอนทีเนนทอลปิโตรเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด. **PA Process Description, Piping and Instrument Diagram, and Process Flow Diagram.**
- [6] Michael Speegle. 2007. **Process Technology Systems.** USA: Thomson Delmar Learning.
- [7] การกลั่น Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/> (30/9/2010)
- [8] Ralph F. Strigle, Jr. 1994. **Packed Tower Design and Applications: Random and Structured Packings.** 2<sup>nd</sup> ed. NORTON.
- [9] C. Judson King. 1980. **Separation Processes.** 2<sup>nd</sup> ed. USA.: McGraw-Hill, Inc.
- [10] รศ.ดร. เลอสรวง เหมสุด. 2551. การกลั่น การดูดซึม และการแยกสกัด. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [11] การไหลของของเหลวและไอ  
Available: <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/distil/distilint.htm> (16/3/2011)
- [12] Henry Z. Kister. **Distillation Operation.** USA.: McGraw-Hill, Inc.
- [13] Charles E. Thomas. 2010. **Process Technology Equipment and System.** 3<sup>rd</sup> ed. USA.: DELMAR CENGAGE Learning.
- [14] Gavin Towler, Ray Sinnott. 2008. **Chemical Engineering, Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design.** USA.: Elsevier.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] ปิยะสาร ประเสริฐธรรม. 2536. หลักการออกแบบเครื่องมือแยกสาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [16] John Metcalfe Coulson, John Francis Richardson, J. R. Backhurst, John Hadlett Harker. 2002. **Chemical Engineering: Particle Technology & Separation Processes**. 5<sup>th</sup> ed. England: Butterworth-Heinemann.
- [17] ถาดในหอกถัน Available:  
[http://irpct.com/index.php?option=com\\_idoblog&task=viewpost&id=312&Itemid=65](http://irpct.com/index.php?option=com_idoblog&task=viewpost&id=312&Itemid=65)  
 (17/1/2011)
- [18] Sieve and Bubble-cap trays Available:  
[http://www.hatltd.com/hosted/55000702/home.nsf/396e036940cdfb7a802571280074ad47/18187fda23c0907a80257384004abdd3/\\$FILE/DS-DT-02%20Standard%20Trays.pdf](http://www.hatltd.com/hosted/55000702/home.nsf/396e036940cdfb7a802571280074ad47/18187fda23c0907a80257384004abdd3/$FILE/DS-DT-02%20Standard%20Trays.pdf)  
 (17/1/2011)
- [19] Valve trays Available: <http://www.euroslotkdss.com/mtri/tower-internals/distillation-trays.aspx>  
 (17/1/2011)
- [20] Karl Kolmetz, Andrew W. Sloley, Timothy M. Zygula, **Design Guidelines for Distillation Columns in Fouling Service**, American Institute of Chemical Engineers, April 26, 2004, New Orleans, Louisiana, USA.
- [21] Karl Kolmetz, Dr. Wai Kiong Ng, Siang Hua Lee, Tau Yee Lim, **Optimize Distillation Column Design for Improved Reliability in Operation and Maintenance**, Phoenix Training & Development Centre, March 14-15, 2005, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [22] รศ. แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. 2553. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท ชวนพิมพ์ 50 จำกัด.
- [23] เครื่องวิเคราะห์สาร GC/MS  
 Available : <http://www.kmitl.ac.th/sisc/GC-MS/main.html> (13/3/2011)
- [24] **Agilent J&W GC Column Selection Guide**, 2010, Agilent Technologies, USA.

## ภาคผนวก ก

### ภาวะปฏิบัติการของหอกลิ้น

ภาวะปฏิบัติการของหอกลิ้น 3 แบบ

1. ใช้หอกลิ้นที่ 1 (เป็นหอกลิ้นเบา) และหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 1

ตารางที่ ก.1 ภาวะปฏิบัติการของหอกลิ้นเบา และหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 1

|                          | หอกลิ้นเบา   | หอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 1  |
|--------------------------|--|--|
| ชั้นที่สารเข้าหอกลิ้น    | 19 (หรือ 15 หรือ 21)   | 3  |
| อุณหภูมิที่ยอดหอกลิ้น    | 160 °C (หรืออยู่ในช่วง 155 - 165 °C)                           | 147 °C (หรืออยู่ในช่วง 150 - 165 °C)                           |
| อุณหภูมิที่ Chimney tray | 210 °C (หรืออยู่ในช่วง 190 - 220 °C)                           | 225 °C (หรืออยู่ในช่วง 210 - 230 °C)                           |
| อุณหภูมิที่กลางหอกลิ้น   | 237 °C (หรืออยู่ในช่วง 230 - 247 °C)                           | 237 °C (หรืออยู่ในช่วง 220 - 230 °C)                           |
| อุณหภูมิที่ก้นหอกลิ้น    | 250 °C (หรืออยู่ในช่วง 240 - 265 °C)                           | 242 °C (หรืออยู่ในช่วง 235 - 260 °C)                           |
| ความดันที่ยอดหอกลิ้น     | 0.33 bar   | 0.20 bar   |
| ความดันที่ก้นหอกลิ้น     | 0.46 bar   | 0.33 bar   |
| ความดันลด                | 1,500 mmH <sub>2</sub> O (สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามภาวะการกลั่น) | 1,300 mmH <sub>2</sub> O (สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามภาวะการกลั่น) |

2. ใช้หอกลิ้นที่ 1 (เป็นหอกลิ้นเบา) และหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 2

ตารางที่ ก.2 ภาวะปฏิบัติการของหอกลิ้นเบา และหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 2

|                          | หอกลิ้นเบา   | หอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 2  |
|--------------------------|--|--|
| ชั้นที่สารเข้าหอกลิ้น    | 19 (หรือ 15 หรือ 21)   | 3  |
| อุณหภูมิที่ยอดหอกลิ้น    | 160 °C (หรืออยู่ในช่วง 155 - 165 °C)                           | 147 °C (หรืออยู่ในช่วง 140 - 155 °C)                           |
| อุณหภูมิที่ Chimney tray | 210 °C (หรืออยู่ในช่วง 190 - 220 °C)                           | 225 °C (หรืออยู่ในช่วง 215 - 235 °C)                           |
| อุณหภูมิที่กลางหอกลิ้น   | 237 °C (หรืออยู่ในช่วง 230 - 247 °C)                           | 237 °C (หรืออยู่ในช่วง 230 - 250 °C)                           |
| อุณหภูมิที่ก้นหอกลิ้น    | 250 °C (หรืออยู่ในช่วง 240 - 265 °C)                           | 242 °C (หรืออยู่ในช่วง 235 - 245 °C)                           |
| ความดันที่ยอดหอกลิ้น     | 0.33 bar   | 0.20 bar   |
| ความดันที่ก้นหอกลิ้น     | 0.46 bar   | 0.33 bar   |
| ความดันลด                | 1,500 mmH <sub>2</sub> O (สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามภาวะการกลั่น) | 1,300 mmH <sub>2</sub> O (สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามภาวะการกลั่น) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้หอกลิ้นที่ 1 และหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 1 เป็นหอกลิ้นเบาโดยกลั่นแบบอนุกรม และหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 2 เป็นหอกลิ้นผลิตภัณฑ์

ตารางที่ ก.3 ภาวะปฏิบัติการของหอกลิ้นเบา (หอกลิ้นที่ 1 และหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 1) และหอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 2

|                             | หอกลิ้นที่ 1  | หอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 1   | หอกลิ้นผลิตภัณฑ์ที่ 2   |
|-----------------------------|---|---|---|
| ชั้นที่สารเข้าหอกลิ้น       | 19 (หรือ 15 หรือ 21)  | 3   | เข้าที่ Siphon line   |
| อุณหภูมิที่ยอดหอกลิ้น       | 160 °C (หรืออยู่ในช่วง<br>155 - 165 °C)                               | 157 °C (หรืออยู่ในช่วง<br>150 - 165 °C)                               | 147 °C (หรืออยู่ในช่วง<br>140 - 155 °C)                               |
| อุณหภูมิที่<br>Chimney tray | 210 °C (หรืออยู่ในช่วง<br>190 - 220 °C)                               | 220 °C (หรืออยู่ในช่วง<br>210 - 230 °C)                               | 225 °C (หรืออยู่ในช่วง<br>215 - 235 °C)                               |
| อุณหภูมิที่กลางหอกลิ้น      | 237 °C (หรืออยู่ในช่วง<br>230 - 247 °C)                               | 227 °C (หรืออยู่ในช่วง<br>220 - 230 °C)                               | 237 °C (หรืออยู่ในช่วง<br>230 - 250 °C)                               |
| อุณหภูมิที่ก้นหอกลิ้น       | 250 °C (หรืออยู่ในช่วง<br>240 - 265 °C)                               | 247 °C (หรืออยู่ในช่วง<br>235 - 260 °C)                               | 242 °C (หรืออยู่ในช่วง<br>235 - 245 °C)                               |
| ความดันที่ยอดหอกลิ้น        | 0.33 Bar  | 0.33 bar  | 0.20 bar  |
| ความดันที่ก้นหอกลิ้น        | 0.46 Bar  | 0.46 bar  | 0.33 bar  |
| ความดันลด                   | 1,500 mmH <sub>2</sub> O<br>(สามารถปรับเปลี่ยนได้<br>ตามภาวะการกลั่น) | 1,500 mmH <sub>2</sub> O<br>(สามารถปรับเปลี่ยนได้<br>ตามภาวะการกลั่น) | 1,300 mmH <sub>2</sub> O<br>(สามารถปรับเปลี่ยนได้<br>ตามภาวะการกลั่น) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลดิบ

ความดันลดภายในหอกลิ้นก่อนและหลังติด Side-to-side trays จำนวน 1, 2 และ 3 ชั้น

ตารางที่ ข.1 ความดันลดภายในหอกลิ้นก่อนติด Side-to-side trays

| วันที่    | ความดันลดภายใน<br>หอกลิ้น (mmH <sub>2</sub> O) | วันที่    | ความดันลดภายใน<br>หอกลิ้น (mmH <sub>2</sub> O) |
|-----------|--|-----------|--|
| 19/7/2010 | 0  | 3/8/2010  | 1,500  |
| 20/7/2010 | 1,198  | 4/8/2010  | 1,519  |
| 21/7/2010 | 1,208  | 5/8/2010  | 1,556  |
| 22/7/2010 | 1,194  | 6/8/2010  | 1,643  |
| 23/7/2010 | 1,200  | 7/8/2010  | 1,638  |
| 24/7/2010 | 1,203  | 8/8/2010  | 1,650  |
| 25/7/2010 | 1,201  | 9/8/2010  | 1,690  |
| 26/7/2010 | 1,225  | 10/8/2010 | 1,747  |
| 27/7/2010 | 1,250  | 11/8/2010 | 1,758  |
| 28/7/2010 | 1,304  | 12/8/2010 | 1,765  |
| 29/7/2010 | 1,339  | 13/8/2010 | 1,798  |
| 30/7/2010 | 1,380  | 14/8/2010 | 1,760  |
| 31/7/2010 | 1,430  | 15/8/2010 | 1,780  |
| 1/8/2010  | 1,390  | 16/8/2010 | 1,823  |
| 2/8/2010  | 1,454  | 17/8/2010 | 0  |

ตารางที่ ข.2 ความดันตกภายในหอกลับหลังติด Side-to-side tray จำนวน 1 ชั้น

| วันที่     | ความดันตกภายใน<br>หอกลับ (mmH <sub>2</sub> O) | วันที่     | ความดันตกภายใน<br>หอกลับ (mmH <sub>2</sub> O) |
|------------|---|------------|---|
| 17/12/2553 | 0   | 29/12/2553 | 1,253   |
| 18/12/2553 | 1,260   | 30/12/2553 | 1,251   |
| 19/12/2553 | 1,250   | 31/12/2553 | 1,238   |
| 20/12/2553 | 1,249   | 1/1/2554   | 1,252   |
| 21/12/2553 | 1,252   | 2/1/2554   | 1,250   |
| 22/12/2553 | 1,247   | 3/1/2554   | 1,248   |
| 23/12/2553 | 1,249   | 4/1/2554   | 1,251   |
| 24/12/2553 | 1,249   | 5/1/2554   | 1,249   |
| 25/12/2553 | 1,260   | 6/1/2554   | 1,253   |
| 26/12/2553 | 1,255   | 7/1/2554   | 1,292   |
| 27/12/2553 | 1,248   | 8/1/2554   | 1,338   |
| 28/12/2553 | 1,252   | 9/1/2554   | 0   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ความดันลดภายในหอกลิ้นหลังติด Side-to-side trays จำนวน 2 ชั้น

| วันที่    | ความดันลดภายใน<br>หอกลิ้น (mmH <sub>2</sub> O) | วันที่    | ความดันลดภายใน<br>หอกลิ้น (mmH <sub>2</sub> O) |
|-----------|--|-----------|--|
| 28/2/2554 | 0  | 12/3/2554 | 1,301  |
| 1/3/2554  | 1,300  | 13/3/2554 | 1,304  |
| 2/3/2554  | 1,297  | 14/3/2554 | 1,303  |
| 3/3/2554  | 1,302  | 15/3/2554 | 1,307  |
| 4/3/2554  | 1,292  | 16/3/2554 | 1,300  |
| 5/3/2554  | 1,302  | 17/3/2554 | 1,300  |
| 6/3/2554  | 1,300  | 18/3/2554 | 1,297  |
| 7/3/2554  | 1,301  | 19/3/2554 | 1,302  |
| 8/3/2554  | 1,298  | 20/3/2554 | 1,303  |
| 9/3/2554  | 1,301  | 21/3/2554 | 1,301  |
| 10/3/2554 | 1,304  | 22/3/2554 | 1,304  |
| 11/3/2554 | 1,303  | 23/3/2554 | 1,298  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

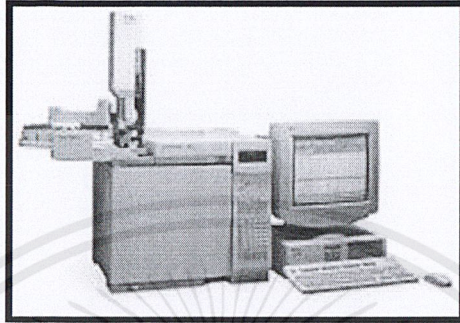
ตารางที่ ข.4 ความดันลดภายในหอกถั่วหลังติด Side-to-side trays จำนวน 3 ชั้น

| วันที่     | ความดันลดภายใน<br>หอกถั่ว (mmH <sub>2</sub> O) |
|------------|--|
| 30/11/2553 | 0  |
| 1/12/2553  | 1,501  |
| 2/12/2553  | 1,504  |
| 3/12/2553  | 1,550  |
| 4/12/2553  | 1,514  |
| 5/12/2553  | 1,556  |
| 6/12/2553  | 1,614  |
| 7/12/2553  | 1,639  |
| 8/12/2553  | 1,669  |
| 9/12/2553  | 1,667  |
| 10/12/2553 | 1,728  |
| 11/12/2553 | 0  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### แก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี [22-24] (Gas Chromatography/Mass Spectrometry)



รูปที่ ก.1 แก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี [23]

แก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography/Mass Spectrometry) หรือเรียกย่อๆ ว่า GC/MS ใช้วิเคราะห์ชนิดและปริมาณสาร เป็นเทคนิคที่รวมข้อดี 2 ประการ ประการแรกคือ มีความสามารถในการแยกสารผสมซึ่งกลายเป็นไอได้ง่ายออกเป็นองค์ประกอบเดี่ยว ๆ ประการที่สอง คือ องค์ประกอบของสารแต่ละชนิดที่ผ่านการแยกแล้วจะถูกตรวจวัดด้วยวิธีแมสสเปกโตรเมตรีที่มีความจำเพาะ (Specificity) ต่อการตรวจวัด มีสภาพไว (Sensitivity) ในการตรวจวัดสูงและให้ข้อมูลแมสสเปกตรัม (Mass spectrum) ของสารที่สามารถใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์สารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การรวมกันของสองเทคนิคในเครื่อง GC/MS มีข้อดี ได้แก่

1. ทำให้สามารถแยกองค์ประกอบของสารผสมที่ซับซ้อน
2. ได้แมสสเปกตรัมของแต่ละองค์ประกอบเพื่อประโยชน์ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสาร
3. สามารถใช้ข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์หาปริมาณสารแต่ละชนิดที่ผสมกันอยู่
4. มีสภาพไวในการตรวจวัดสารสูง สามารถให้ข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ปริมาณสารแต่ละชนิดที่ผสมกัน

ผสมกัน

5. สามารถให้หลักฐานด้านมวลโมเลกุลของสาร และด้านรูปแบบการแตกของโครงสร้างเป็นส่วนย่อยๆ (Fragmenatation pattern) ซึ่งเป็นเอกลักษณ์เฉพาะสาร เปรียบเสมือนลายพิมพ์นิ้วมือที่สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการพิสูจน์หาเอกลักษณ์ของสารได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีและแมสสเปกโตรเมตรีมีการทำงานที่เข้ากันได้ดีในหลายๆ ด้าน ได้แก่ ในเทคนิคทั้งสองตัวอย่างอยู่ในสภาพไอ และทั้งสองเทคนิคใช้ปริมาณตัวอย่างพอๆ กัน กล่าวคือน้อยกว่า 1 นาโนกรัม (ng) แต่เทคนิคทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่างมากในแง่ของสถานะความดันที่ใช้ งาน ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาความเข้ากันได้ของสองเทคนิคในแง่ของความดัน อีกทั้งเครื่องมือมีราคาแพงและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องที่สูง และต้องใช้นุ้คลากรที่มีความชำนาญสูงในการใช้เครื่องมือ

GC/MS ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

### 1. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph: GC)

ทำหน้าที่ในการแยกองค์ประกอบของสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอ (Volatile organic compounds) ได้เมื่อถูกความร้อน กลไกที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบต่างๆ ในสารตัวอย่างอาศัยหลักของความชอบที่แตกต่างกันขององค์ประกอบในตัวอย่างที่มีต่อเฟส 2 เฟส คือ วัฏภาคนิ่ง (Stationary phase) และวัฏภาคเคลื่อนที่ (Mobile phase)

องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง GC แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

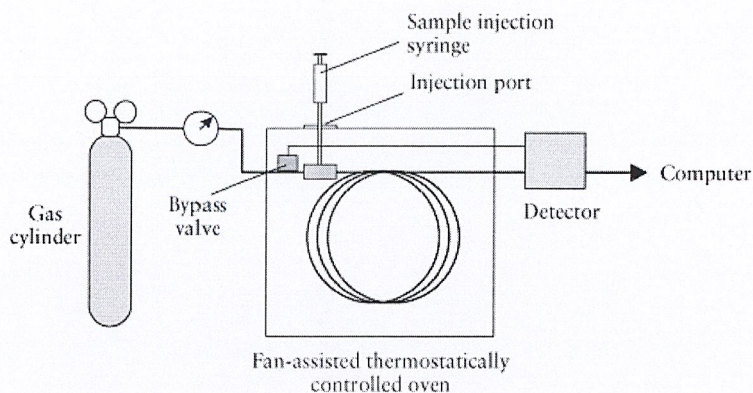
1.1 ตำแหน่งฉีดสาร (Injector) คือ ส่วนที่สารตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าสู่เครื่องและระเหยเป็นไอก่อนที่จะเข้าสู่คอลัมน์ อุณหภูมิที่เหมาะสมของตำแหน่งฉีดสาร ควรเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้สารตัวอย่างสามารถระเหยได้ แต่ต้องไม่ทำให้สารสลายตัว ตัวอย่างของตำแหน่งฉีดสาร ได้แก่ Split, Splitless, On column

1.2 เตา (Oven) คือ ส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุ คอลัมน์และเป็นส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ให้เปลี่ยนไปตามความเหมาะสมกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิของเตา มี 2 แบบ คือ

1.2.1 Isocratic temperature

1.2.2 Gradient temperature ข้อดีของการทำ Gradient temperature คือ สามารถใช้กับสารตัวอย่างที่มีจุดเดือดกว้าง (Wide boiling range) และยังช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์

1.3 ดีเทคเตอร์ (Detector) คือส่วนที่จะใช้สำหรับตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และดูว่าสารตัวอย่างชนิดที่สนใจมีปริมาณอยู่เท่าใด



รูปที่ ค.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี [23]

## 2. เครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Mass spectrometer: MS)

เป็นดีเทคเตอร์ที่ใช้ตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างโดยอาศัยกลไก คือ โมเลกุลขององค์ประกอบที่ถูกแยกออกจากสารตัวอย่างโดยเครื่อง GC จะถูกไอออไนซ์ในสภาวะสุญญากาศ แล้วตรวจวัดออกมาเป็นเลขมวล (Mass number) เทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิง แล้วแปลผลออกมาเป็นชื่อขององค์ประกอบนั้นๆ

องค์ประกอบสำคัญของ MS แบ่งออกเป็น

2.1 Ionization source แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

2.1.1 Electron ionization (EI) เป็นการทำให้สารเกิด Fragment โดยใช้ลำอิเล็กตรอน ซึ่ง Ionization chamber ต้องมีความดันต่ำประมาณ  $10^{-8}$  Torr โดยอิเล็กตรอนจากขดลวดขนาดเล็ก (Filament) ที่ร้อนจะถูกโฟกัสผ่านห้องนี้และถูกดึงเข้าหา Repeller voltage ที่มีความต่างศักย์ 70 โวลต์ ซึ่งจะให้พลังงานกับ อิเล็กตรอนเป็น 70 eV ทำให้ของผสมที่ซับซ้อนของไอออนเกิดการแตกหัก (Fragmentation ion) ที่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับ โครงสร้างและความอุดมสัมพัทธ์ (Relative abundance)

2.1.2 การแตกตัวของโมเลกุลเป็นไอออนโดยวิธีทางเคมี (Chemical ionization: CI) เป็นการทำให้สารเกิดการ Fragment ด้วยวิธีทางเคมีโดยผสมสารตัวอย่าง (ความดัน  $10^{-4}$  Torr) เข้ากับแก๊สที่ทำปฏิกิริยาด้วย (ความดัน 1 Torr) แล้วผ่านสารผสมเข้าไปใน Ionization chamber โดยการทำให้เกิด Fragment ด้วยการชนกับอิเล็กตรอนเช่นเดียวกันแก๊สที่ใช้ ได้แก่ มีเทน ไอโซบิวเทน แอมโมเนีย

2.2 หน่วยวิเคราะห์มวล (Mass analyzer) เป็นเครื่องวิเคราะห์มวล มีหลายแบบ คือ Magnetic-sector analyzer, Electrostatic analyzer, Time-of-flight analyzer, Ion cyclotron resonance analyzer, Quadrupole mass spectrometer ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยสนามแม่เหล็ก คือ เป็น Path-stability mass เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

spectrometer ซึ่งมีแหล่งผลิตไอออน 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะทำให้ตัวอย่างกลายเป็นไอออน และส่วนที่สองทำให้สารมาตรฐานกลายเป็นไอออน ถ้าไอออนทั้งสองจะถูกบังคับให้ผ่านเครื่องแยกไอออนชุดเดียวกัน ดังนั้นไอออนทั้งหมดจะได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กในสถานะเดียวกัน แต่ถูกตรวจและวัดด้วยเครื่องดีเทคเตอร์แยกกันซึ่งมีข้อดีคือทำให้สามารถวัดมวลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

2.3 ดีเทคเตอร์ ที่ใช้โดยทั่วไปมีหลายอย่าง คือ Faraday cup detector, Electron multiplier detector, Scintillation counter detector, Photographic plate detector



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### Hydrazine hydrate and Monoethanolamine [5]

#### ง.1 Hydrazine hydrate

**PRODUCT NAME:** OXYNON H-104

**APPLICATION:**

Corrosion in boiler as well as in feed water and return water lines is related to various environmental conditions. Dissolved oxygen is thought to be most responsible for the corrosion reaction. OXYNON H-104 is oxygen scavenger based on hydrazine.

**FEATURES:**

1. Excellent removal effect against dissolved oxygen from the feed water and boiler water.
2. Volatile type chemicals without any increase in solid content in boiler water.
3. Excellent corrosion prevention effect for the feed water line boiler system.

**HOW TO USE:**

1. Dilute OXYNON H-104 with the feed water at an appropriate concentration and feed into the feed water line proportionally and continuously.
2. To prevent the corrosion of feed water line, It is desirable to inject OXYNON H-104 at a part as far from the boiler as possible.

**PROPERTIES:**

|                         |   |                                  |
|-------------------------|---|----------------------------------|
| Main ingredient         | : | Hydrazine hydrate                |
| Appearance              | : | Colorless to light yellow liquid |
| Specific gravity (20°C) | : | 97 – 1.07                        |
| pH (25°C, as delivered) | : | 12.0 – 13.0                      |

**HANDLING AND STORING:**

1. Keep out of reach of children for industrial use only.
2. Harmful if inhaled. Keep container closed when not in use. Causes eye injury and skin irritation on direct contact. Wear goggles and rubber gloves when handling.
3. In case of skin contact, wash thoroughly with water. If eyes are affected, flush with water and get medical attention.
4. This chemical's shelf life is one year upon receiving data.

**PACKING:** 20 kg polyethylene can.

**๓.2 Monoethanolamine (Alkylamine)**

**Product name:** OXYNON M-204

OXYNON M-204 is a pH control agent and used to prevent corrosion in the boiler steam condensate and feed water line.

**FEATURES:**

1. Prevent all water line; the feed water to the steam condensate line from corrosion.
2. High distribution ratio of migration to the initial condensate zone raises inhibitory effect causing rapid increase of pH in the steam condensate and water line.
3. When copper or copper alloy is used in the initial condensed zone, it functions most effectively and prevents corrosion.

**FUNCTION MECHANISM:**

The principal problem in the condensate line is the generation of corrosion due to low pH caused by the presence of dissolved carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). The carbon dioxide gas is liberated by the thermal decomposition of M-Alkalinity in feed water.

The neutralizing amine formulated in OXYNON M-204 adjusts pH to 8.8 – 9.0 and prevents corrosion of the condensate system.

**PROPERTIES:**

|                         |   |                                  |
|-------------------------|---|----------------------------------|
| Main ingredient         | : | Monoethanolamine                 |
| Appearance              | : | colorless to light yellow liquid |
| Specific gravity (20°C) | : | 0.96 – 1.00                      |
| pH                      | : | 12.0 – 13.0                      |
| Solidifying point (°C)  | : | below – 10 (open condition)      |
| Flash point (°C)        | : | above 100                        |

**HOW TO USE:**

## 1. Feeding

Dilute OXYNON M-204 with the feed water at an appropriate concentration, and feed proportionally and continuously into the feed water tank or condensate return line.

## 2. Dosage

The dosage of OXYNON M-204 is required at a level of 1.0 ppm in order to adjust pH to 9.0 in the condensate water. However, the practical dosage should be adjusted depending on the water quality the operation conditions of the boiler.

**HANDLING AND STORING:**

1. OXYNON M-204 is an inflammable chemical. So precautions should be taken against fire when using or storing the chemical.

2. Protect the face and hands with a gauze mask and rubber gloves to avoid direct contact with the chemical.

3. Wash the exposed skin, eyes or mouth thoroughly with clean water when affected by contacting with OXYNON M-204. Consult the doctor when pains are not relieved even after washing.

4. Do not use empty containers for drinking water supply.

5. This chemical's shelf life is one year upon receiving date.

**PACKING:** 20 kg polyethylene can.