

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การเตรียมตัวดูดซับจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว  
สำหรับกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้ง

**Preparation of Adsorbent from Post-Consumer Poly(ethylene terephthalate)  
Bottles for Removing Dyes in Wastewater**



T117290

นางสาวรัฐญา พยุหนาวิน

นางสาววิลาวัลย์ รัชนะงาม

นางสาวศุภิญญา พุทธิเกิด

เลขที่ 117290  
เลขทะเบียน  
วันเดือนปี 20 ก.ค. 2554

b. 12332012  
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PREPARATION OF ADSORBENT FROM POST-CONSUMER  
POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) BOTTLES FOR REMOVING  
DYES IN WASTEWATER**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การเตรียมตัวดูดซับจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว  
สำหรับกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้ง

Preparation of Adsorbent from Post-Consumer Poly(ethylene  
terephthalate) Bottles for Removing Dyes in Wastewater

ชื่อนักศึกษา

นางสาวรัฐญา พุฒนาวิ  
นางสาววิลาวัลย์ รัชนะงาม  
นางสาวศุภิญญา พุทธิ์เกิด

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต


สาขาวิชา

เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารการ	
ดร.มนตรี ทองคำ	
ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมตัวดูดซับจากขวดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ใช้แล้ว สำหรับกำจัดสีข้อมในน้ำทิ้ง
ชื่อนักศึกษา	นางสาวรัฐญา พุขนาวิน นางสาววิลาวัลย์ รัชชนะงาม นางสาวศุภิญญา พุทธิเกิด
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของขวดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ใช้แล้วด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล เพื่อนำมาใช้ดูดซับสีข้อมคองโก้เรดในน้ำทิ้งสังเคราะห์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตจะดำเนินไปโดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล (0.25 0.5 และ 0.75 โมลต่อลิตร) และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (10 20 30 60 และ 90 นาที) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่เหลือจากปฏิกิริยาจะถูกวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรสโคปี ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ปริมาณหมู่กรดและเลขไอโอดีน

ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ประกอบด้วยกรดเทรฟทาลิก เป็นผลิตภัณฑ์หลัก และผลิตภัณฑ์รองคือตัวดูดซับ PET เมื่อนำมาศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมคองโก้เรด โดยแปรเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำทิ้ง และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อมคองโก้เรด จากการทดลองพบว่าสภาวะที่สีข้อมคองโก้เรดถูกดูดซับได้มากที่สุด คือพีเอชของน้ำทิ้งเป็น 2 ความเข้มข้นของสีข้อมคองโก้เรด 75 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ตัวดูดซับ PET ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล 0.25 โมลต่อลิตร และเวลาในการไฮโดรไลซิส 10 นาที โดยกำจัดสีข้อมคองโก้เรดได้ถึงร้อยละ 73.02 ตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำ และใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสน้อย จะมีพื้นที่ผิวโดยรวมและมีหมู่กรดบนพื้นผิวมาก จึงสามารถกำจัดสีข้อมคองโก้เรดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ตัวดูดซับ คองโก้เรด ไฮโดรไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Preparation of Adsorbent from Post-Consumer Poly(ethylene terephthalate) Bottles for Removing Dyes in Wastewater
<b>Students</b>	Miss Rattaya Payuhanawin Miss Wilawon Rachanangam Miss Supinya Putkerd
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Program</b>	Industrial Chemistry
<b>Academic Year</b>	2010
<b>Advisor</b>	Dr.Amnat Permsubscul

### ABSTRACT

In this work, the hydrolysis of post-consumer polyethylene terephthalate (PET) bottles by the solution of sodium hydroxide in ethylene glycol was used to produce an adsorbent for adsorb congo red dyes from synthetic wastewater. The parameters effect in this reaction are the concentration of sodium hydroxide in ethylene glycol (0.25 0.5 and 0.75 mol/dm<sup>3</sup>) and reaction time (10 20 30 60 and 90 minutes) at temperature of 180 °C. The unreacted Poly(ethylene terephthalate) was investigated the characterization by Fourier-Transform Infrared Spectroscopy, morphology and surface characteristic by Scanning Electron Microscope (SEM), acid sites and iodine number analysis.

The product from hydrolysis reaction consist of terephthalic acid as major product and the minor is the PET adsorbent. The investigation of the influencing parameters, namely pH of wastewater and initial concentration of congo red dye, on the adsorption efficiency were investigated. The maximum adsorption of congo red was found to be 73.02% at pH 2 and concentration of congo red dye 75 mg/L by using the PET adsorbent prepared from the hydrolysis of PET bottle in 0.25 mol/L of NaOH in ethylene glycol solution and hydrolysis time of 10 minutes. The PET adsorbent was prepared from the the low concentration of NaOH in ethylene glycol solution and short reaction time has high total surface area and acidic functional group, then the high efficiency for congo red dye removing was enhanced.

**Keyword :** Poly(ethylene terephthalate), Absorbent, Congo red , Hydrolysis

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา วิศวกรรมพิเศษ ในหัวข้อเรื่องการศึกษาการผลิตตัวควบคุมจากขดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ใช้แล้ว วิศวกรรมพิเศษนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากไม่ได้รับการช่วยเหลือจากบุคคลดังต่อไปนี้

ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ที่ให้ความรู้ คำแนะนำต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการทดลอง ตอบข้อซักถาม และปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในการทำการทดลองจนกระทั่ง วิศวกรรมพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญารากร และ ดร.มนตรี ทองคำ ที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการทดลอง และข้อเสนอแนะ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเบิกเครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการต่างๆ

ขอขอบพระคุณแม่บ้าน และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่คอยอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับเรื่อง การเปิด และปิดห้องปฏิบัติการในวันที่มีการทำการทดลอง

ขอขอบใจเพื่อน ๆ ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และช่วยกันคิดแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดลอง ทำให้การทำ วิศวกรรมพิเศษนี้เป็นไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาของผู้จัดทำที่เป็นกำลังใจ และสนับสนุนกำลังใจในการทำ วิศวกรรมพิเศษครั้งนี้

ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานฉบับนี้คงจะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่มีความสนใจในงานที่เกี่ยวข้องทางด้านนี้ หรือผู้ที่ต้องการศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับ วิศวกรรมพิเศษนี้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำต้องขอภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

รัฐญา พยุหนาวิน

วิลาวัลย์ รัชนะงาม

ศุภิญญา พุทธิเกิด

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง-ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ-ฅ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของ โครงการงานพิเศษ.....	1-2
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....</b>	<b>5</b>
2.1. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	5
2.1.1 สารตั้งต้นในการผลิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	5-6
2.1.2 พอลิเมอร์โซลชัน.....	7-9
2.1.3. สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์.....	9-11
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของการแตกสลายพันธะเอสเทอร์ด้วยตัวทำละลาย (Solvolysis).....	12
2.2.1 เมทาโนไลซิส.....	13-14
2.2.2 ไกลโคไลซิส.....	14-15
2.2.3 ไฮโดรไลซิส.....	15-16
2.2.4 อะมิโนไลซิส.....	16
2.3 กระบวนการดูดซับ.....	16
2.3.1 ลักษณะการดูดซับ.....	17-18
2.3.2 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	18-19
2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 สีย้อม.....	21
2.4.1 ลักษณะทางกายภาพของสีย้อม.....	21
2.4.2 การแบ่งประเภทสีย้อม.....	21
2.4.3 อันตรายที่อาจเกิดจากสีย้อม.....	28
2.4.4 การกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แม่น้ำ.....	29
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
<b>บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>34</b>
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	34
3.2 สารเคมี.....	35
3.3 การทดลอง.....	35
3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับจากขวด PET ที่ใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสารละลายเบส.....	36
3.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ผ่านการไฮโดรไลซิส.....	38
3.3.3 การทดสอบสมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา.....	39
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....</b>	<b>44</b>
4.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล.....	44
4.1.1 ผลของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	45
4.1.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา.....	47
4.2 การวิเคราะห์กรดเทเรฟทาลิกและพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่เหลือจากปฏิกิริยา.....	50
4.2.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology).....	50
4.2.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ PET และกรดเทเรฟทาลิก ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FI-IR).....	52
4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ PET.....	57
4.3.1 การหาเลขไอโอดีน (Iodine Number).....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การหาหมู่กรด ( Acid Site) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ PET.....	58
4.4 การศึกษาการดูดซับสี่ข้อมสังเคราะห์คอง โก่อเรด โดยใช้พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ได้จากการไฮโดรไลซิสเป็นตัวดูดซับ.....	60
4.4.1 ผลของ pH ของสารละลายสี่ข้อมคอง โก่อเรด.....	60
4.4.2 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และความเข้มข้นของสี่ข้อมคอง โก่อเรด.....	62
.....	62
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>64</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	65
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>66-69</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>70</b>
ภาคผนวก ก.....	70
ภาคผนวก ข.....	71-72
ภาคผนวก ค.....	73-75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางความร้อนของ PET.....	10
ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของ PET.....	10
ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการซึมผ่านฟิล์ม PET (หนา 1 มิลลิเมตร) ของน้ำและอากาศ.....	11
ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลาย NaOH และเวลาของปฏิกิริยาที่มีต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส PET.....	37
ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาผลของ pH ของสารละลายสีย้อมชนิด congo red ที่มีต่อการดูดซับด้วยตัวดูดซับ PET.....	38
ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาผลของความเข้มข้นสีย้อมชนิด congo red ที่มีต่อการดูดซับด้วยตัวดูดซับ PET.....	39
ตารางที่ 3.4 การทดสอบสมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา.....	39
ตารางที่ 4.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ PET และผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่สภาวะการไฮโดรไลซิสต่างๆ...45	
ตาราง ข-1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นของสีย้อมคองโกเรดต่างๆ.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	แผนภาพกระบวนการผลิต PET ในอุตสาหกรรม.....	9
รูปที่ 2.2	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับมายังตัวดูดซับ.....	19
รูปที่ 2.3	แสดงโครงสร้างของสปีโดเร็กซ์ที่แตกต่างกัน.....	22
รูปที่ 2.4	แสดงโครงสร้างของสปีแอซิด.....	23
รูปที่ 2.5	แสดงโครงสร้างของสปีรีแอกทีฟ.....	24
รูปที่ 2.6	แสดงโครงสร้างของสปีเบสิคชนิดต่างๆ.....	25
รูปที่ 2.7	แสดงโครงสร้างของสปีดิสเพอร์ส.....	25
รูปที่ 2.8	แสดงโครงสร้างของสปีอะโซอิก.....	26
รูปที่ 2.9	แสดงโครงสร้างของสปีวัต.....	27
รูปที่ 2.10	แสดงโครงสร้างของสปีแอลเซียนบลู.....	27
รูปที่ 3.1	แผนผังการเตรียมตัวดูดซับจาก PET โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล.....	42
รูปที่ 3.2	แผนผังการทดลองการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมจาก PET ที่ผ่านการไฮโดรไลซิส.....	43
รูปที่ 4.1	ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ PET ที่เวลาของปฏิกิริยาต่างๆ.....	46
รูปที่ 4.2	ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อร้อยละของ PET ที่เหลืออยู่ ที่เวลาของปฏิกิริยาต่างๆ.....	46
รูปที่ 4.3	ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อร้อยละของกรดเทรฟทาลิกที่เวลาของปฏิกิริยาต่างๆ.....	47
รูปที่ 4.5	ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของ PET ที่ถูกทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นต่างๆของโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	48
รูปที่ 4.6	ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของกรดเทรฟทาลิก ที่ความเข้มข้นต่างๆของโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	48
รูปที่ 4.7	ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของ PET ที่เหลืออยู่ ที่ความเข้มข้นต่างๆของโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	49
รูปที่ 4.8	สัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนเทรฟทาลิกที่ผ่านการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (ก) ก่อนทำปฏิกิริยาที่ก่้างขยาย 5,000 เท่า (ข) โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.25 โมลาร์ เวลา 30 นาที ที่ก่้างขยาย	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

300 เท่า (ค) โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.25 โมลาร์ เวลา 30 นาที ที่กำลังขยาย 30 เท่า (ง) โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.25 โมลาร์ เวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย 300 เท่า (จ) โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ เวลา 10 นาที ที่กำลังขยาย 300 เท่า (ฉ) โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ เวลา 30 นาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	51
รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของกรดเทรฟทาลิกบริสุทธิ์.....	52
รูปที่ 4.10 FT-IR สเปกตรัมของกรดเทรฟทาลิกที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ PET.....	53
รูปที่ 4.11 FT-IR สเปกตรัมของ PET จากขวดน้ำดื่ม ที่ยังไม่ผ่านการไฮโดรไลซิส.....	54
รูปที่ 4.12 FT-IR สเปกตรัมของตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากการไฮโดรไลซิสด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นเวลา 10 นาที.....	55
รูปที่ 4.13 เลขไอโอดีนของตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เวลาของปฏิกิริยาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.25 และ 0.5 โมลาร์.....	57
รูปที่ 4.14 ปริมาณหมู่กรดของตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ และเวลาไฮโดรไลซิส 10 นาที.....	59
รูปที่ 4.15 ปริมาณหมู่กรดของตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้เวลาของปฏิกิริยาต่างๆ และใช้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 โมลาร์.....	59
รูปที่ 4.16 ร้อยละการกำจัดสีของกรองไ้เรดในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสถานะค่า pH ต่างๆ โดยใช้ตัวดูดซับ PET จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ที่เวลา 10 นาที.....	61
รูปที่ 4.17 ร้อยละการกำจัดสีของกรองไ้เรดในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตัวดูดซับPET จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ที่เวลา 10 และ 90 นาที.....	62
รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานของสีของกรองไ้เรด.....	72

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ในปัจจุบันนี้ ปริมาณขยะที่มาจากแหล่งชุมชนได้เพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยประกอบด้วยขยะที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 50% เศษอาหาร เศษผัก ใบไม้ 20% และขยะที่ต้องฝังกลบที่ต้องกำจัด 30% และตลาดในเอเชียมีความต้องการวัตถุดิบจากขยะที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกมาก โดยในประเทศมีวัตถุดิบจากขยะที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ที่ใช้ในการผลิตไม่ถึง 30% และอีก 70% ยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งต้องสูญเสียเงินตราเพื่อซื้อหามาจากต่างประเทศปีละเป็นแสนล้านบาท ทั้งนี้ในประเทศเองมีวัตถุดิบอีกมาก แต่กลับถูกเอาไปทิ้ง ฝังกลบปะปนอยู่กับกองขยะ โดยขยะที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้แบ่งเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ กระดาษ โลหะ พลาสติกและขวดแก้ว แต่พลาสติกเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยากและพลาสติกส่วนใหญ่กำเนิดมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป ดังนั้น กระบวนการรีไซเคิลพลาสติกจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาขยะพลาสติก การลดปริมาณการใช้ น้ำมันปิโตรเลียมและการหมุนเวียนนำทรัพยากรทางปิโตรเลียมกลับมาใช้ให้คุ้มค่า พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) ซึ่งเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่น่ามาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เพราะเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติที่ดี ได้แก่ มีความแข็งแรงสูง มีความเหนียวและใส รวมทั้งมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจนและไอน้ำ ด้วยคุณสมบัติที่กล่าวมานี้ทำให้PETถูกนำมาใช้เป็นเส้นใย พิล์ม ขวดน้ำดื่มและภาชนะบรรจุอาหาร

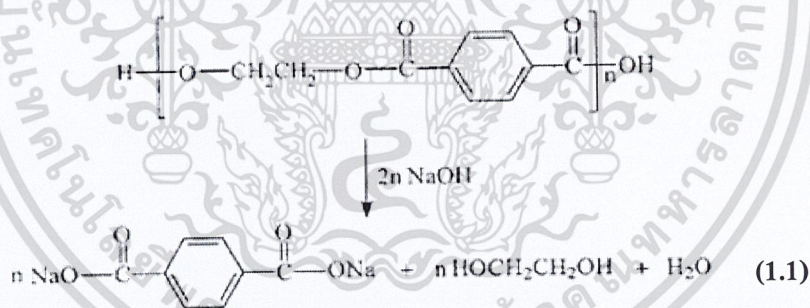
ปริมาณการใช้ขวด PET เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาขยะจาก PET ซึ่งเป็นปัญหาที่แก้ไขได้ยาก กระบวนการทางเคมีในการนำขวดPETกลับมาใช้ใหม่ ได้แก่ เมทาโนไลซิส (methanolysis) ไกลโคไลซิส (glycolysis) ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และ อะมิโนไลซิส (aminolysis) ในกระบวนการเมทาโนไลซิสและไกลโคไลซิส PETจะถูกเปลี่ยนเป็นไดเมทิลเทเรฟทาเลต (Dimethyl terephthalate, DMT) กรดเทเรฟทาลิก (Terephthalic acid, TPA) และเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) โดย DMT และ TPA เป็นสารตั้งต้นในการนำมาผลิตเป็นPETได้ [1-3] นอกจากนี้ขวด PET ยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยผลิตเป็นสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถนำไปใช้กำจัดโลหะหนักและสารอินทรีย์ เช่น สีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานทอผ้าได้ การนำPETที่ใช้แล้วมาผลิตเป็นสารดูดซับนี้เป็นการช่วยลดปัญหามลพิษทางน้ำ ช่วยประหยัดทรัพยากรและช่วยเหลือในทางเศรษฐกิจ

สารดูดซับที่นิยมใช้โดยทั่วไป คือ ถ่านกัมมันต์ซึ่งผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ เช่น ขี้เถ้าลอย แกลบ และขวดพลาสติก กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ทั่วไปมักจะนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ไปผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) ที่อุณหภูมิประมาณ 800 เคลวิน และตามด้วยการกระตุ้นให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นและเกิดหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดูดซับได้ด้วยกระบวนการทางเคมีหรือกายภาพ แต่อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันนี้คือ ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ได้น้อย และเกิดไอของสารที่เป็นพิษต่อร่างกาย เช่น ไอของTPA และกรดเบนโซอิก (Benzoic acid) ซึ่งเกิดขึ้นจากการคาร์บอนไนเซชันของขวดPET ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำกระบวนการอื่นมาทดแทนกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน เพื่อให้ลดปัญหามลพิษที่เกิดจากไอสารเคมีและร้อยละผลผลิตที่น้อย กระบวนการนั้นคือการแตกสลายพอลิเมอร์ (depolymerization) ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสารละลายต่าง พอลิเมอร์ที่ผ่านการไฮโดรไลซิสแล้วจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กลง และมีพื้นที่ผิวมากขึ้น อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวซึ่งเกิดบนพื้นผิว ทำให้มีรูพรุนหรือรอยแตกเกิดขึ้น รวมทั้งบนพื้นผิวจะเกิดหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดูดซับโลหะหนักและสารอินทรีย์ได้ [4-6]

ในงานวิจัยนี้จะทำการผลิตสารดูดซับจากขวดPET โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสภาวะเบสด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล ดังสมการที่1.1 เมื่อPETเกิดการไฮโดรไลซิสบางส่วน (partial hydrolysis) จะได้ขนาดของPETที่เล็กลง และมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ส่วนผลิตภัณฑ์อื่นๆที่ได้จากการไฮโดรไลซิสคือ กรดเทรฟทาลิก (TPA) ซึ่งสามารถนำกลับไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตPETได้ ดังนั้นการไฮโดรไลซิสPETจะให้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับขวดPETที่ไม่ใช้แล้วได้เป็นอย่างมาก



เมื่อได้สารดูดซับจากขวดPETแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ในขั้นสุดท้ายจะนำสารดูดซับที่ผลิตจากPETไปศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยนำไปกำจัดสีย้อมชนิด congo red ในน้ำทิ้งสังเคราะห์ ซึ่งคาดหมายว่าผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าของขยะพลาสติก PET ซึ่งนับวันยังมีปริมาณมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนวัสดุที่เหลือใช้ให้กลับมาเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างคุ้มค่า และนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาการเตรียมสารดูดซับจากขวดPET ที่ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล
- 2) เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อคุณลักษณะของสารดูดซับที่ผลิตจากขวดPETที่ใช้แล้ว ตัวแปรเหล่านั้นได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเวลาของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส
- 3) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับของสารดูดซับที่ผลิตจากขวดPETที่ใช้แล้ว ที่มีต่อการดูดซับสีย้อมชนิด congo red

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของสารดูดซับที่ได้จากขวดPETที่ใช้แล้ว โดยปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล เช่น ปริมาณสารดูดซับที่ผลิตได้ พื้นที่ผิว ปริมาณของหมู่กรดบนพื้นผิว และความสามารถในการดูดซับสีย้อม ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่
  - 1.1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล ศึกษาที่ความเข้มข้น 0.25 0.50 และ 0.75 โมลต่อลิตร
  - 1.2 เวลาในการไฮโดรไลซิส ศึกษาที่เวลา 10, 20, 30, 60 และ 90 นาที
2. ศึกษาประสิทธิภาพของสารดูดซับที่ผลิตได้ต่อการดูดซับสีย้อม โดยสีย้อมที่ทำการศึกษา คือ สี congo red ที่ค่า pH ของน้ำทิ้ง ในช่วง 2-5 และความเข้มข้นสีย้อม 25-100 mg/L
3. วิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของสารดูดซับที่ผลิตได้จากขวดPETที่ใช้แล้ว
  - 3.1 วิเคราะห์ปริมาณของหมู่กรดบนผิวสารดูดซับด้วยการไทเทรตกับสารละลายเบส
  - 3.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนผิวสารดูดซับ โดยใช้เครื่อง Fourier-Transform-Infrared Spectrophotometer (FT-IR)
  - 3.3 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของสารดูดซับโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
  - 3.4 วิเคราะห์พื้นที่ผิวโดยรวมด้วยวิธีการหาค่าเลขไอโอดีน (Iodine Number)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตสารดูดซับที่สามารถใช้ในการกำจัดสีย้อมชนิด congo red ในน้ำทิ้ง จากขวด PET ที่ใช้แล้ว ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่หาได้ง่ายและราคาถูก ทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุที่ใช้แล้วอีกด้วย
2. ทราบถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของสารดูดซับและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารดูดซับจากขวดPET โดยใช้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ในด้านอุตสาหกรรมต่อไป
3. ทราบถึงความสามารถในการกำจัดสีย้อมชนิด congo red โดยการดูดซับด้วยสารดูดซับที่ผลิตจากขวดPET ที่ใช้แล้ว เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

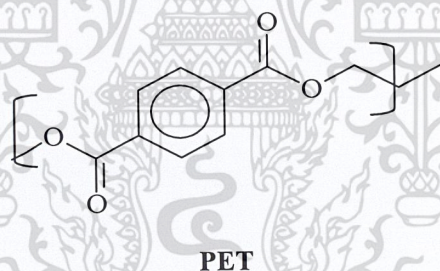
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

บทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีที่เป็นพื้นฐานในการทดลองนี้ โดยจะเป็นข้อมูลเกี่ยวกับPET ทฤษฎีพื้นฐานของการแตกสลายพันธะเอสเทอร์ด้วยตัวทำละลาย การดูดซับและตัวดูดซับ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะแสดงไว้ในหัวข้อ 2.1 ถึง 2.4 ต่อไป

#### 2.1. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [7]

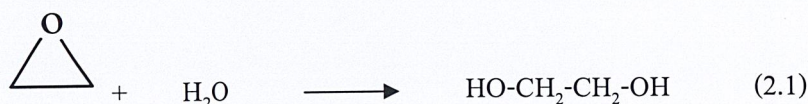
ในปี 1929 Corrothers of E.L. du punt de Nemours and Co (USA) ได้ทำการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งพอลิเอสเทอร์ที่ได้จะเป็นอะลิฟาติกสายโซ่ตรงอิมิตัว ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำและละลายได้ง่ายในตัวทำละลายอินทรีย์ เกิดไฮโดรไลซิสได้ง่าย ไม่มีสมบัติของเส้นใย ต่อมาในปี 1941 Whinfield และ Dicksion แห่งบริษัท The Calico Printers Association Ltd ของประเทศอังกฤษได้ทำการสังเคราะห์อะโรมาติกพอลิเอสเทอร์ซึ่งก็คือ PET ซึ่งมีสมบัติเป็นเส้นใยและฟิล์มที่ดี ดังนั้นต่อมาจึงใช้PETเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเส้นใย สูตรโครงสร้างของPET แสดงดังรูป



##### 2.1.1. สารตั้งต้นในการผลิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

(ก) เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol)

เอทิลีนไกลคอลเตรียมได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของเอทิลีนออกไซด์ (Ethylene oxide) เอทิลีนไกลคอลเป็นของเหลวไม่มีสี จุดเดือด 197 องศาเซลเซียส



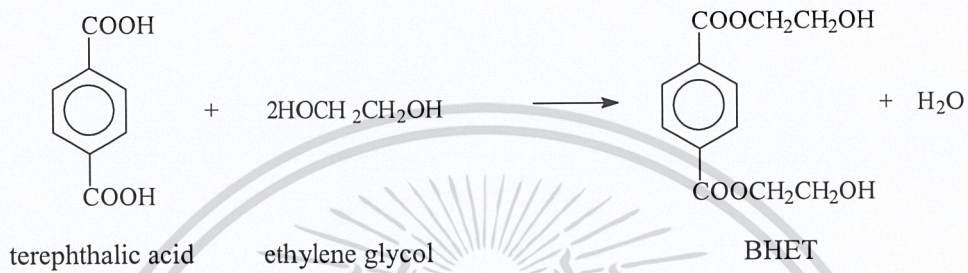
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



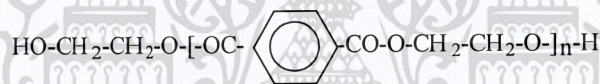
### 2.1.2 พอลิเอไมโรเซชัน

จากที่กล่าวมาข้างต้น PETอาจเตรียมได้จาก TPA หรือ DMT โดยปฏิกิริยาพอลิเอไมโรเซชันแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นที่1 สำหรับกระบวนการที่ใช้TPAเป็นสารตั้งต้น (Acid-based process) จะเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่าง TPA กับ EG ที่มากเกินไปจะได้ bis(2-hydroxyethyl terephthalate) หรือเรียกโดยย่อว่า BHET

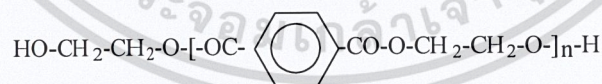


จากนั้น BHET ที่ได้จะเกิดเป็น Hexamer ซึ่งมีสูตรทั่วไปดังนี้



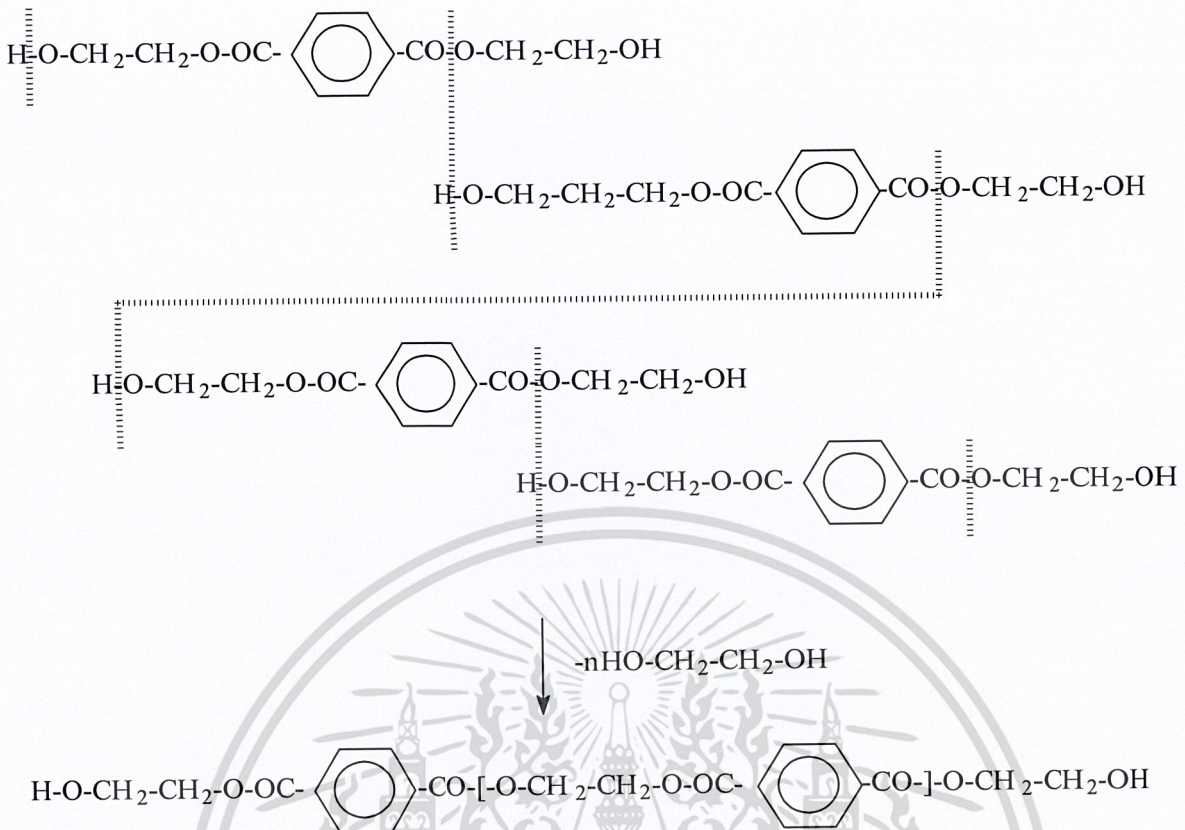
TPA จะถูกทำปฏิกิริยากับเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไป (1:1.5 โมลาร์) ที่ 250 °C และ 0.4 MPa และน้ำจะถูกแยกออกไปอย่างต่อเนื่องในระหว่างปฏิกิริยา

ในกระบวนการที่ใช้ DMT เป็นสารตั้งต้น (Ester-based process) จะเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (Ester interchange) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น BHET ดังนี้



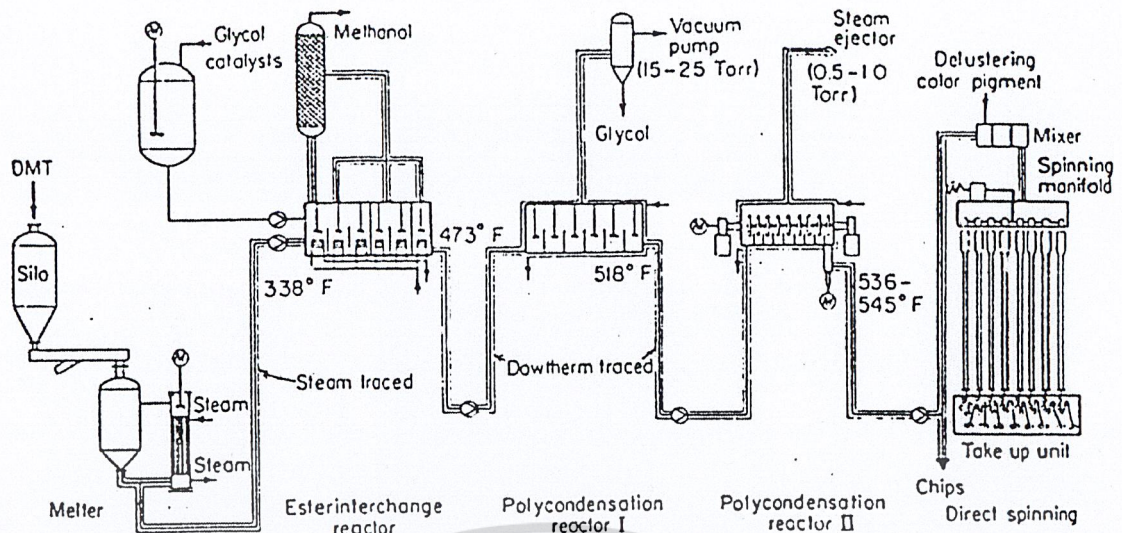
DMT จะถูกผสมกับเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไป (1:2.2 โมลาร์) ภายใต้ความดันบรรยากาศ ในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (ส่วนมากใช้ manganese acetate) เมทานอลจะถูกแยกออกจากปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง

ขั้นที่2 เป็นการทำปฏิกิริยาพอลิเอไมโรเซชัน โดยเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ระหว่าง BHET ซึ่งเป็นทั้งเอสเทอร์และแอลกอฮอล์ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น PET ภายใต้สภาวะการเกิดปฏิกิริยา EG จะถูกแยกออกจากระบบอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะเป็นการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของ PET



BHET จะถูกให้ความร้อนที่ 290 °C ในระบบที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น antimony trioxide เมื่อความดันต่ำประมาณ 0.1 kPa (1 mmHg) EG จะถูกกลั่นออกจากปฏิกิริยา การพอลิเมอไรเซชันจะดำเนินการต่อไป จนกระทั่งน้ำหนักโมเลกุลถึงระดับที่ต้องการ (20,000 สำหรับเส้นใยและฟิล์ม 30,000 สำหรับ molding material)

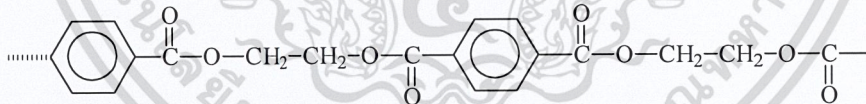
เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ ester - based process แล้ว acid - based process จะลดค่าใช้จ่ายในการใช้และการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ และยังให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่าด้วย แต่ในทางตรงกันข้าม ester - based process นั้นเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่ายกว่า ในรูปที่ 2.1 แสดงถึงกระบวนการผลิต PET ในอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.1 แผนภาพกระบวนการผลิต PET ในอุตสาหกรรม [8]

### 2.1.3 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ [9]

PET เป็นพอลิเมอร์ที่มีแข็งแรง ไม่มีสี ประกอบด้วยส่วนบริเวณที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งจะมีส่วนไหนมากกว่านั้นขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้เตรียม PET โมเลกุลมีรูปร่างแบบ Rectilinear คือระยะห่างของวงแหวนเบนซีนจะขนานกัน ส่วนหมู่  $-COO-$  จะอยู่คนละระยะห่างกับวงแหวนเบนซีน 12 องศา และ EG จะอยู่ห่างจากระยะห่างวงแหวนเบนซีน 20 องศา Wars [9] ได้แสดงรูปแบบของ PET ที่เป็นผลึก โดยหมู่  $-OCH_2-CH_2O-$  จะจัดเรียงตัวแบบ Trans-configuration



#### 2.1.3.1 สมบัติทางกายภาพ

โดยทั่วไป PET มีความถ่วงจำเพาะ 1.38 และเป็นพอลิเมอร์ที่มีส่วนที่เป็นผลึกอยู่มาก แต่ถ้าให้ความเย็นอย่างรวดเร็วแก่ PET ที่หลอมเหลว จะทำให้เกิดความเป็นอสัณฐานทั้งหมด โดยมีความถ่วงจำเพาะ 1.33 ถ้า PET เป็นผลึกอย่างสมบูรณ์ จะมีความถ่วงจำเพาะ 1.455 นอกจากนี้ PET ยังมีลักษณะโปร่งใส มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ประมาณ 80 °C

PET เป็นสารไม่ชอบน้ำ (Non-hydrophilic) โดยเมื่อนำไปจุ่มในน้ำที่ 25 °C เป็นเวลา 1 สัปดาห์ PET จะดูดน้ำได้น้อยกว่า 0.5 % ของปริมาณน้ำทั้งหมด โดยที่สมบัติเชิงกลยังคงเหมือนเดิม

### 2.1.3.2 สมบัติทางความร้อน

จุดหลอมเหลวของPET อยู่ที่ 255 °C และ Zero strength ของPET อยู่ที่ 248 °C (Zero strength) หมายถึง อุณหภูมิที่ฟิล์มของPET สามารถต้านทานต่อแรง 1.4 kg/cm<sup>3</sup> เป็นเวลา 5 วินาทีได้) โดยแสดงสมบัติทางความร้อนอย่างอื่นไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางความร้อนของPET [9]

คุณสมบัติ	ค่าที่วัดได้
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	265
จุดเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (องศาเซลเซียส)	80
ค่าความร้อนจำเพาะ (cal / g-degree) ที่ 25 °C	0.315
ค่าความร้อนจำเพาะ (cal / g-degree) ที่ 200 °C	0.476
ความสามารถในการนำความร้อน (cal / cm.sec.degree)	$3.63 \times 10^{-4}$
Zero strength (องศาเซลเซียส)	248

### 2.1.3.3 สมบัติเชิงกล

PET ที่อยู่ในรูปของฟิล์ม หรือเส้นใย ชีงงานจะมีความแข็งแรงสูง ดังแสดงในตารางที่

2.2 แสดงถึงสมบัติเชิงกลของPET สมบัติเชิงกลของฟิล์มPET จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่อุณหภูมิระหว่าง -20 ถึง 80 °C แต่มองไม่เห็นการเกิดการแข็งเปราะที่ -60 °C

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของ PET [9]

คุณสมบัติ	ค่าที่วัดได้
ความเค้นที่จุดคราด (Yield stress) , kg / cm <sup>3</sup>	980
ความแข็งแรงดึงที่จุดแตกหัก (Tensile strength at break) , kg / cm <sup>2</sup>	1,750
การยืดที่จุดแตกหัก (Elongation at break) , เปอร์เซ็นต์	50 - 70
ความต้านทานต่อการขาด (Resistance to breaking) , kg / mm <sup>2</sup>	50 - 70
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) , kg - cm	90
ความแข็งแรงดึงมอดูลัส (Tensile modulus) , kg / cm <sup>2</sup>	35,200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3.4 ความสามารถในการซึมผ่าน

ฟิล์มPETมีความสามารถในการทนต่อการซึมผ่านของไอน้ำ และไอของตัวทำละลายอินทรีย์ ในตารางที่ 2.3 แสดงถึงความสามารถทนต่อการซึมผ่านของสารต่างๆ ของฟิล์มPET นอกจากนี้ ฟิล์มPET ยังทนต่อการซึมผ่านของก๊าซด้วย เช่น ออกซิเจน และไนโตรเจน โดยฟิล์มPETที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ จะให้ออกซิเจนผ่านได้ 5.7 กรัม/(ตารางเมตร)(ชั่วโมง) และยอมให้ไนโตรเจนซึมผ่านได้ 5.2 กรัม/(ตารางเมตร)(ชั่วโมง)

ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการซึมผ่านฟิล์ม PET (หนา 1 มิลลิเมตร) ของน้ำและอากาศ [9]

สารละลาย	ความสามารถในการซึมผ่าน (กรัม/100 ตารางเมตร.ชั่วโมง)
น้ำ	160
เอทิลแอลกอฮอล์	0
เอทิลอะซิเตต	4
คาร์บอนเตตระคลอไรด์	7
เฮกเซน	6
เบนซีน	18
อะซิโตน	82
กรดอะซิติก	0

### 2.1.3.5 ความต้านทานต่อสารเคมี [9]

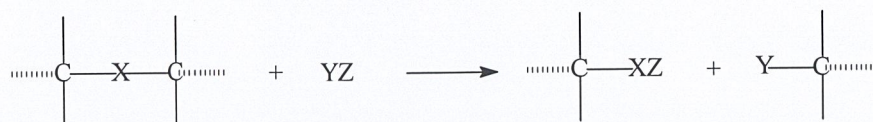
เกี่ยวกับสมบัติการละลาย ถ้ามีความเป็นผลึกมากจะละลายโดยเฉพาะในตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้อง เช่น กรดอะซิติกที่ถูกแทนที่ด้วยคลอรีน หรือฟลูออรีน ฟีนอลและกรดไฮโดรฟลูออริกที่ปราศจากน้ำ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะละลายในตัวทำละลายบางชนิด เช่น อะโรมาติกคีโตน ไคบิวทิลพทาเลต และไดเมทิลซัลโฟน เป็นต้น ถ้ามีความเป็นอสัณฐานจะละลายได้ดี แต่จะย่อยสลายได้ด้วยกรดไนตริก และกรดซัลฟูริกเข้มข้นยาก นอกจากนี้ยังมีความว่องไวกับด่างอีกด้วย เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์

ความต้านทานของPET ต่อการเสียหายจากแสง (Photochemical degradation) อยู่ในเกณฑ์ดี บางครั้งการเสียหายจากความร้อน (Thermal degradation) จะเกิดขึ้นเมื่อพอลิเมอร์ถูกความร้อนเหนือจุดหลอมเหลว

## 2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของการแตกสลายพันธะเอสเทอร์ด้วยตัวทำละลาย (Solvolysis)

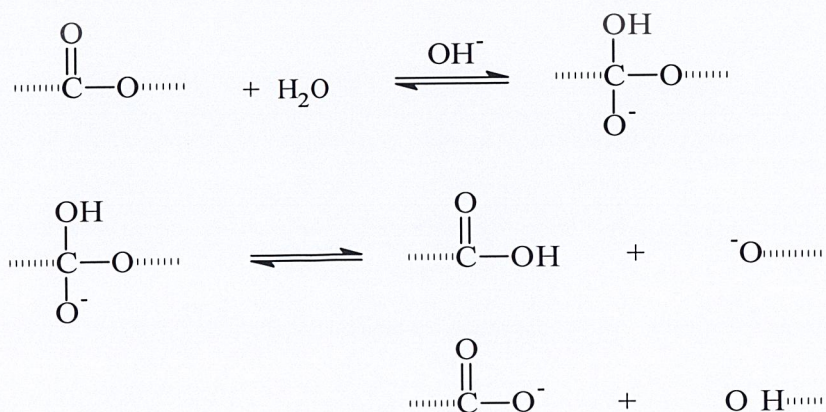
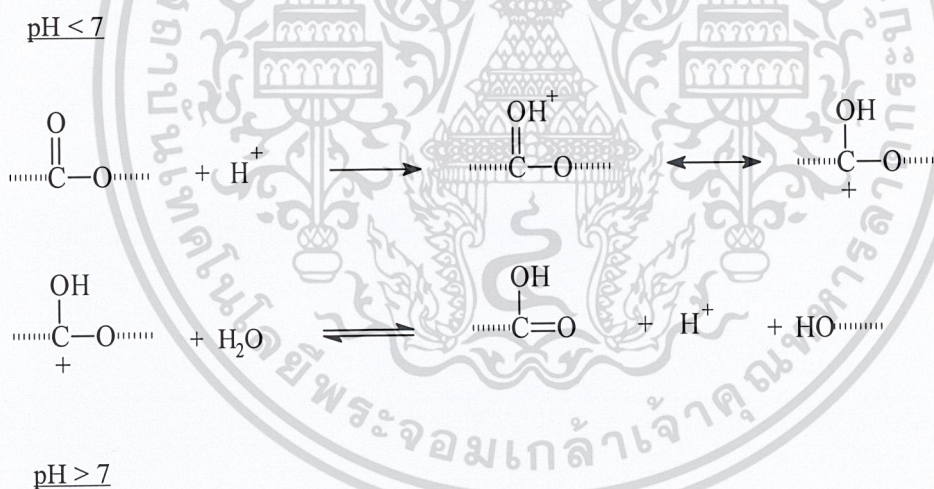
[10]

ปฏิกิริยา Solvolysis ของพอลิเมอร์ประกอบด้วย การแตกออกของพันธะ C-X ของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อ X คือ heteroatom (O, N, P, S, Si) หรือ halogen ในกรณีปฏิกิริยา solvolysis ของพอลิเมอร์ที่มี heteroatom อยู่ในสายโซ่หลัก การแตกสลายของสายโซ่จะสอดคล้องตามแผนภาพต่อไปนี้



เมื่อ YZ คือ Solvolysis agent เช่น น้ำ แอลกอฮอล์ กรด หรือด่าง

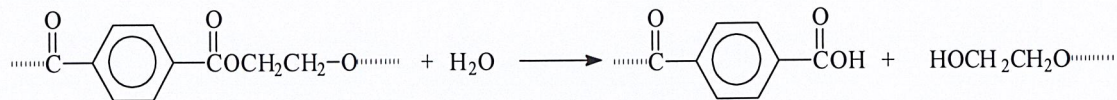
กลไกของการแตกพันธะในตัวกลางที่เป็นกรดและเป็นกลาง จะต่างจากกลไกของการแตกพันธะในตัวกลางที่เป็นด่าง โดยที่แผนภาพข้างล่างนี้เป็นกลไกของการแตกพันธะเอสเทอร์ด้วยน้ำ (Hydrolytic cleavage)



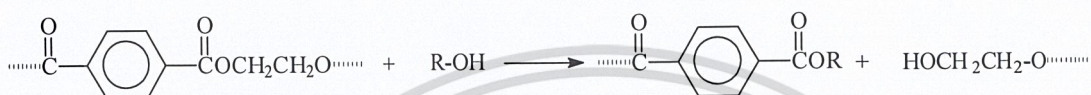
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PET สามารถแตกสลายด้วยทางเคมีได้ง่ายมาก จากกลไกเราสามารถแบ่งการแตกสลายเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

Hydrolysis:



Alcoholysis:



Acidolysis:



Aminolysis:



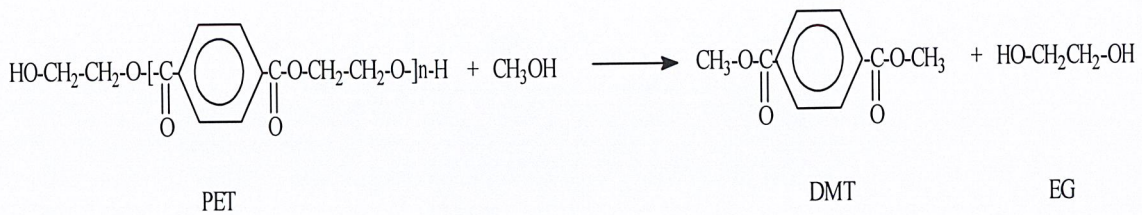
การนำ PET กลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Recycling Method) แบ่งเป็น

- 2.2.1 เมทานอลไลซิส (Methanolysis)
- 2.2.2 ไกลโกลไลซิส (Glycolysis)
- 2.2.3 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)
- 2.2.4 อะมิโนไลซิส (Aminolysis)

### 2.2.1 เมทานอลไลซิส (Methanolysis)

กระบวนการนี้ประกอบด้วย การแตกสลาย PET ด้วยเมทานอลที่อุณหภูมิสูงๆ และภายใต้ความดันสูง ผลิตภัณฑ์หลักของ PET ที่ถูก methanolysis คือ DMT และ EG ซึ่งเป็นวัตถุดิบของการผลิตพอลิเมอร์นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

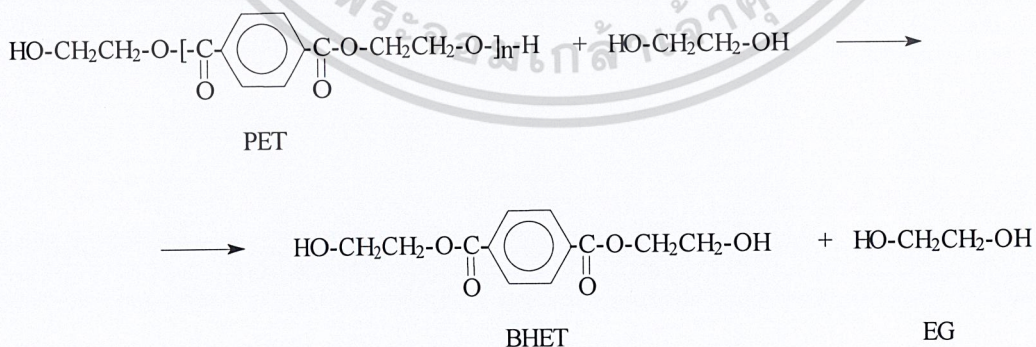


วิธีการสำหรับการทำให้เกิด methanolysis คือ ใช้ความดัน 2-4 MPa และอุณหภูมิ 180-280 °C เมื่อการแตกสลายพอลิเมอร์เกิดขึ้นนั้นจะมีการปล่อย EG ปฏิกริยานี้ถูกเร่งด้วย transesterification catalyst เช่น ซิงค์อะซิเตต (Zinc acetate) แมกนีเซียมอะซิเตต (Magnesium acetate) โคบอลต์อะซิเตต (Cobalt acetate) และเลดไดออกไซด์ (Lead dioxide) แต่ตัวเร่งที่นิยมที่สุดคือ ซิงค์อะซิเตต DMT ที่ได้จะถูกทำให้ตกตะกอนจากสารผสมหลังจากปฏิกริยาด้วยการทำให้เย็น และจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง ก็จะได้ผลึก DMT

EG ที่ได้จากการตีพอลิเมอร์รีไซเคิลของ PET สามารถนำกลับมาใช้ได้โดยการกลั่น และนำเข้าสู่กระบวนการ อย่างไรก็ตามจะมีส่วนที่เหลือจากการกลั่น ไกลคอลซึ่งประกอบไปด้วย 80 wt% ของ BHET, 5wt% ของ EG, ไดไกลคอล (diglycols) และเอทิลีนพอลิไกลคอล (ethylene polyglycol) รวมถึงอนุพันธ์ของ TPA และ EG ส่วนที่เหลือจากการกลั่น EG จะคลายน้ำมัน และเป็นอันตรายอย่างมากกับสิ่งแวดล้อม

### 2.2.2 ไกลโคไลซิส (Glycolysis)

วิธีที่สองสำหรับการนำ PET กลับมาใช้ใหม่คือ วิธีไกลโคไลซิส ซึ่งใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ผลของการไกลโคไลซิสด้วย EG จะได้ BHET ซึ่งจะคล้ายกับ DMT ถือเป็นสารตั้งต้นของการสังเคราะห์ PET



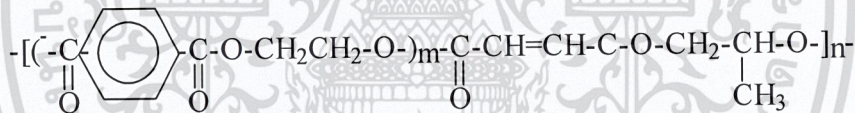
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดีพอลิเมอร์ไรซ์ของ PET จะทำได้โดยใช้เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol), ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol), โพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol) และไดโพรพิลีนไกลคอล (Dipropylene glycol)

กระบวนการนี้สามารถกระทำได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง (180-250 °C) ในระหว่างช่วงเวลา 0.5-8 ชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt % (ส่วนมากใช้ซิงค์อะซิเตต) เทียบกับปริมาณ PET ที่ใช้

ได้มีการสนใจศึกษาไกลโคไลซิสด้วย EG โดยในระบบนี้ได้ศึกษาถึงตัวแปรของปฏิกิริยา เช่น อุณหภูมิ (190-240 °C), ความดัน (0.1-0.6 MPa) และอัตราส่วน PET/EG ที่มีต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะแปรผันโดยตรงกับกำลังสองของความเข้มข้น EG ที่อุณหภูมิ, ความดัน และความเข้มข้นPETคงที่ PET ที่ถูกไกลโคไลซิสแล้วจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตเรซินพอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว โฟมพอลิยูรีเทน และโฟมพอลิไอโซไซยานูเรต (Polyisocyanurate foams)

วิธีการแรกในการผลิตเรซินพอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (URP) ทำได้โดยใช้ผลิตภัณฑ์ของการไกลโคไลซิส PET เพียงบางส่วน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซิส PET บางส่วนจะถูกทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์และโพรพิลีนไกลคอล ซึ่งจะได้พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวที่มีโครงสร้างดังนี้



การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์พอลิโออล (Polyester polyols) ที่มีส่วนของPET สามารถทำได้โดยใช้ผลิตภัณฑ์จากการไกลโคไลซิสPET กับ adipic acid ซึ่งพอลิเอสเตอร์พอลิโออลที่ได้จะทำปฏิกิริยาไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยานาต (Diphenyl methane diisocyanate, MDI) หรือโทลูอีน-2,4-ไดไอโซไซยานาต (Toluene-2,4-diisocyanate, TDI) ได้เป็นพอลิยูรีเทนที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ

### 2.2.3 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

การนำPETกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีนี้ จะได้ TPA และ EG เป็นผลิตภัณฑ์ กระบวนการไฮโดรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการขึ้นกับสถานะที่ใช้ ดังนี้

#### 2.2.3.1 การไฮโดรไลซิสในสถานะต่าง (Alkaline Hydrlysis)

กระบวนการไฮโดรไลซิสในสถานะต่างนี้สามารถทำได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้ PET จะถูกผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 4-20 wt % ปฏิกิริยาดำเนินไปที่อุณหภูมิ 210-250 °C เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้ความดัน 1.4-2 MPa เป็นเวลา 3-5 ชั่วโมง สารละลายต่างที่ใช้ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 18 wt % โดยPETจะถูกผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:20 ปฏิกริยาดำเนินไปที่ 100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกริยา คือ TPA และ EG

ในกรณีที่ใช้สารละลายแอมโมเนีย ปฏิกริยาจะดำเนินที่ 200 °C โดยจะเกิด TPA diammonium salt ซึ่งเมื่อทำให้เป็นกรดด้วยกรดซัลฟูริกแล้วจะได้ TPA ที่มีความบริสุทธิ์สูง (99 wt %) เป็นผลิตภัณฑ์

### 2.2.3.2 การไฮโดรลิซิสในสภาวะเป็นกลาง (Neutral Hydrolysis)

การไฮโดรลิซิสในสภาวะเป็นกลาง PETจะถูกไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำหรือไอน้ำ โดยกระบวนการนี้จะดำเนินไปที่ความดัน 1-4 MPa อุณหภูมิ 200-300 °C อัตราส่วนของPETต่อน้ำมันเป็น 1:2 ถึง 1:12

### 2.2.4 อะมิโนลิซิส (Aminolysis)

เมื่อนำPETมาทำปฏิกริยากับเอมีน จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น Diamide ของ TPA และEG โดยกระบวนการหลัก ๆ ของอะมิโนลิซิสของPET คือ PETที่อยู่ในรูปเส้นใยหรือผงจะถูกทำปฏิกริยากับสารละลายเอมีนปฐมภูมิ (Primary amine) ส่วนมากนิยมใช้ methylamine, ethylamine และ ethanolamine ในช่วงอุณหภูมิ 20-100 °C

## 2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพชีวภาพและเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดีและน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในก๊าซหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Absorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) สมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับ คือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้สมบัติอื่น ๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่ต้องการออกมา โดยให้ถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นเมื่อดูดซับจนอิ่มตัวแล้วจึงสามารถนำมาไล่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออกโดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับมีความสามารถในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น BOD COD ยาฆ่าแมลง เป็นต้น การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพดีและระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพคือ ต้องการพื้นที่น้อย

### 2.3.1 ลักษณะการดูดซับ

การดูดซับแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ [13] คือ

- 1) การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)
- 2) การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

การดูดซับทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของ โมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงวันเดอร์วาล์ว (Vander Waal's force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับ โมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นแบบหลายชั้นซึ่งแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่บนชั้น โมเลกุลก่อนหน้าโดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายซึ่งจำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับแบบกายภาพทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดซับมีพลังงานต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดูดซับระหว่างสารดูดซับและสารถูกละลาย ถ้าแรงนี้มีค่าน้อยการหลุดออกของสารถูกสามารถเกิดขึ้นได้

การดูดซับทางเคมีนั้น จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกละลายกลายเป็นสารประกอบเคมีใหม่ขึ้น ซึ่งเมื่อเกิดแล้วจะคงอยู่ในรูปนั้นจะแตกต่างจากการดูดซับแบบกายภาพ กระบวนการนี้จะมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (irreversible) แต่การดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับได้ (reversible) เนื่องจากมีการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำ โดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยจะให้พลังงานประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล [11]

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1) สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และ แอคติเวตเตด ซิลิกา สารธรรมชาติ มักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามข้อเสียคือจับ โมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

2) ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้น เพื่อจำกัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

### 2.3.2 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer)

2.3.2.1 กลไกการดูดซับ กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน [12] คือ

1) การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงตัวดูดซับซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ

2) การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของ สารดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายดูดซับที่ผิวของสารดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นแรงต้านทานจากปฏิกิริยา พื้นผิวจึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึง

2.3.2.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer) อัตราการดูดซับมี

ความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็วขึ้นอัตราการดูดซับจะถูกควบคุม โดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารจากสารละลายมี 3 ขั้นตอน คือ

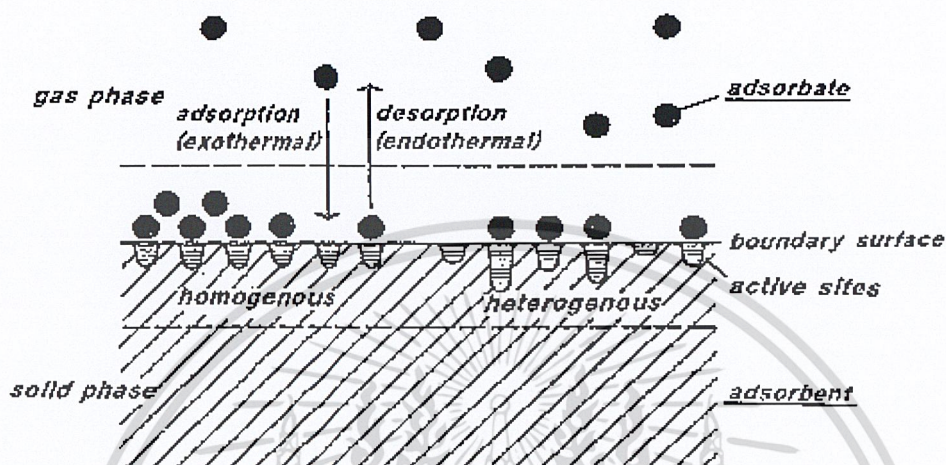
1. การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม จัดเป็นขั้นตอนที่ จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน  
ชั้นตอนนี้จัดเป็นชั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน ชั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูด  
ซับมายังสารดูดซับ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.2 ชั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับมายังตัวดูดซับ [13]

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่ง ๆ การขนส่งฟิล์มจัดเป็นชั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ  
แต่ถ้าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ชั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นชั้นตอนที่  
ควบคุมอัตราการดูดซับ

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

#### 1) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and surface area)

ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดซับ เป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับและพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับ การดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

#### 2) ลักษณะของสารดูดซับ (Adsorbate characteristics)

สิ่งสำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายอย่างหนึ่ง คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

#### 3) อัตราเร็วของการปั่นกวน (Mixing speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับความเร็วของการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์มและการแพร่เข้าสู่โพรง ซึ่งขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนกวนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรง จะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

#### 4) เวลาสัมผัส (Contact time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารถูกดูดซับซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง

#### 5) ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออน สามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่ออัตราการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 สีย้อม [14]

### 2.4.1 ลักษณะทางกายภาพของสีย้อม

สีย้อม (Dyestuff) คือ สีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมวัสดุสิ่งทอ สีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด ที่สร้างมาเพื่อดูดซึม หรือดูดซับแสงโดยการทำให้อยู่บนหรือในผิวหน้าของวัตถุ แล้วเกิดการแพร่แทรกซึมเข้าสู่ภายในโครงสร้างของวัตถุ เพื่อที่จะทำให้วัตถุนั้นมีสีขึ้นมาสีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำให้ลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400 – 700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างกันไป ซึ่งสายตาสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาคออกมาเป็นต่างกันไป ซึ่งความคงทนจะต่างกันออกไปตามแต่ละประเภท และการยึดเกาะของสีประเภทนั้นๆ

### 2.4.2 การแบ่งประเภทสีย้อม

โดยทั่วไปแล้วสีย้อมจะต้องมีระบบพันธะพาย (pi-bond system) และหมู่แทนที่ที่แสดงความเป็นขั้ว (Polar substituent) ที่ทำให้ตัวสีสามารถจะละลายได้ ซึ่งการละลายนี้จะทำให้สีย้อมสามารถที่จะแทรกซึมได้ เนื่องจากการละลายจะสามารถทำให้สีแยกตัวออกจากกัน ทำให้เข้าสู่โพรงของเส้นใยได้ ในทางอุดมคตินักย้อมสีต้องการสีที่มีขนาดโมเลกุลเล็กและสามารถละลายได้ดีในตัวกลางเพื่อความสะดวกและง่ายต่อการย้อม ในขณะที่ต้องการสีที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่และไม่ละลายในตัวกลางใดๆ เมื่อเข้าไปอยู่ในเส้นใยแล้วเพื่อความคงทนที่สูง ในระบบของเคมีเชิงฟิสิกส์นั้นสามารถที่จะแบ่งชนิดของสีย้อมตามหมู่ช่วยละลายของสีย้อม (Solubilising group) และไม่แบ่งละเอียดดังเช่นวิชาที่ศึกษาเกี่ยวกับการย้อมด้านอื่นๆ สาเหตุที่แบ่งอย่างนี้เนื่องจากว่าระบบการศึกษาของเคมีเชิงฟิสิกส์นั้นจะพิจารณาค่าการละลายและความเป็นอยู่ของสีย้อมในตัวกลางและเส้นใยเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถที่จะแบ่งออกได้เป็น

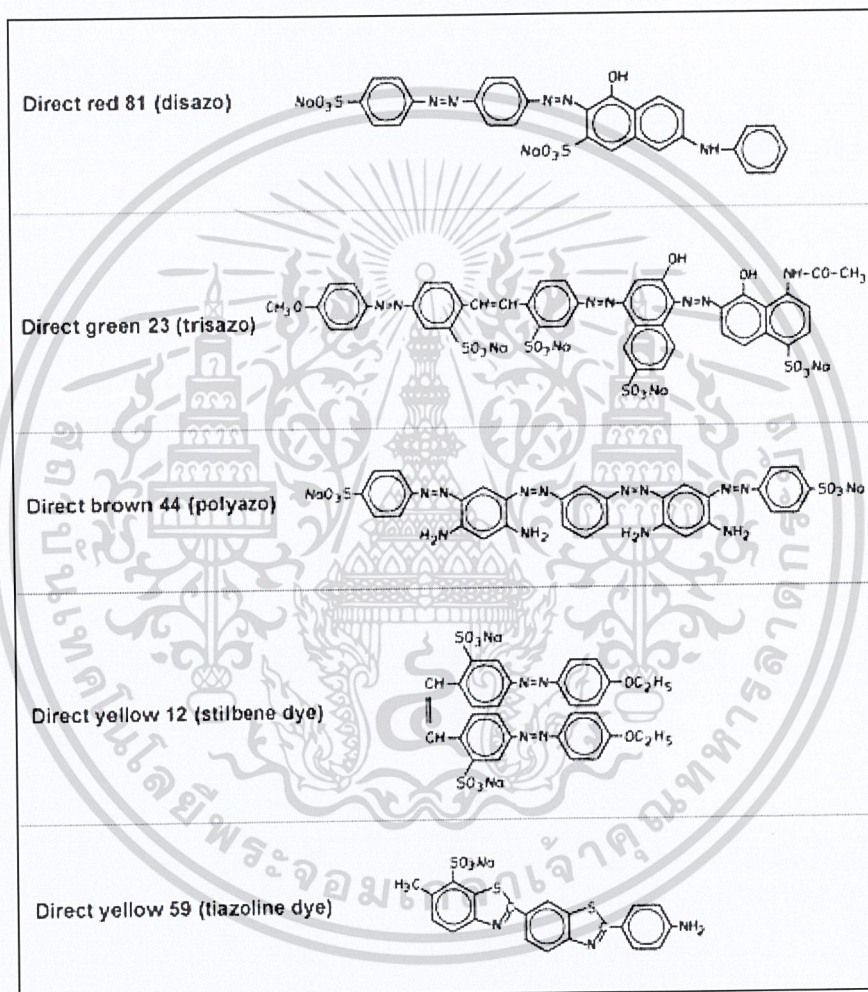
1. สีที่มีหมู่ช่วยละลายถาวร (Permanent solubilising group) กลุ่มนี้นั้นจะมีหมู่ช่วยละลายที่เกาะอยู่บนโครงสร้างสีอย่างถาวร แม้ว่าจะมีการผ่านกระบวนการใดๆ หมู่ช่วยละลายก็ยังคงอยู่บนโครงสร้างสี หรือ แม้กระทั่งสีที่เกาะบนผ้าแล้วก็ตาม สามารถแบ่งได้เป็น

1.1 หมู่ที่แสดงประจุลบ (Anionic group) ได้แก่ หมู่ซัลโฟเนต (Sulphonate) หมู่คาร์บอกซิลเลต (Carboxylate) ฯลฯ ในกลุ่มนี้เมื่อละลายน้ำออกมามักจะแตกตัวออกมาให้เป็นไอออนลบของตัวสีในน้ำ กลุ่มนี้จะละลายตัวได้ดีในสภาวะเบส เนื่องจาก ค่าของสารละลายนั้นจะมีค่าสูงกว่าค่า ทำให้สีกลุ่มนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการแตกตัวได้ดียิ่งขึ้น หมู่ซัลโฟเนตนั้นจะให้ความเป็นกรดที่แก่กว่าหมู่คาร์บอกซิลเลต ดังนั้น ค่าของตัวสีที่มีหมู่ซัลโฟเนตนั้นก็สามารที่จะแตกตัวได้ดีที่ต่ำกว่ายังผลทำให้ความสามารถในการทนสภาวะกรดได้สูงกว่าด้วย ตัวอย่างของสีในกลุ่มนี้ ได้แก่ สีไคเร็กต์ สีแอซิด ฯลฯ

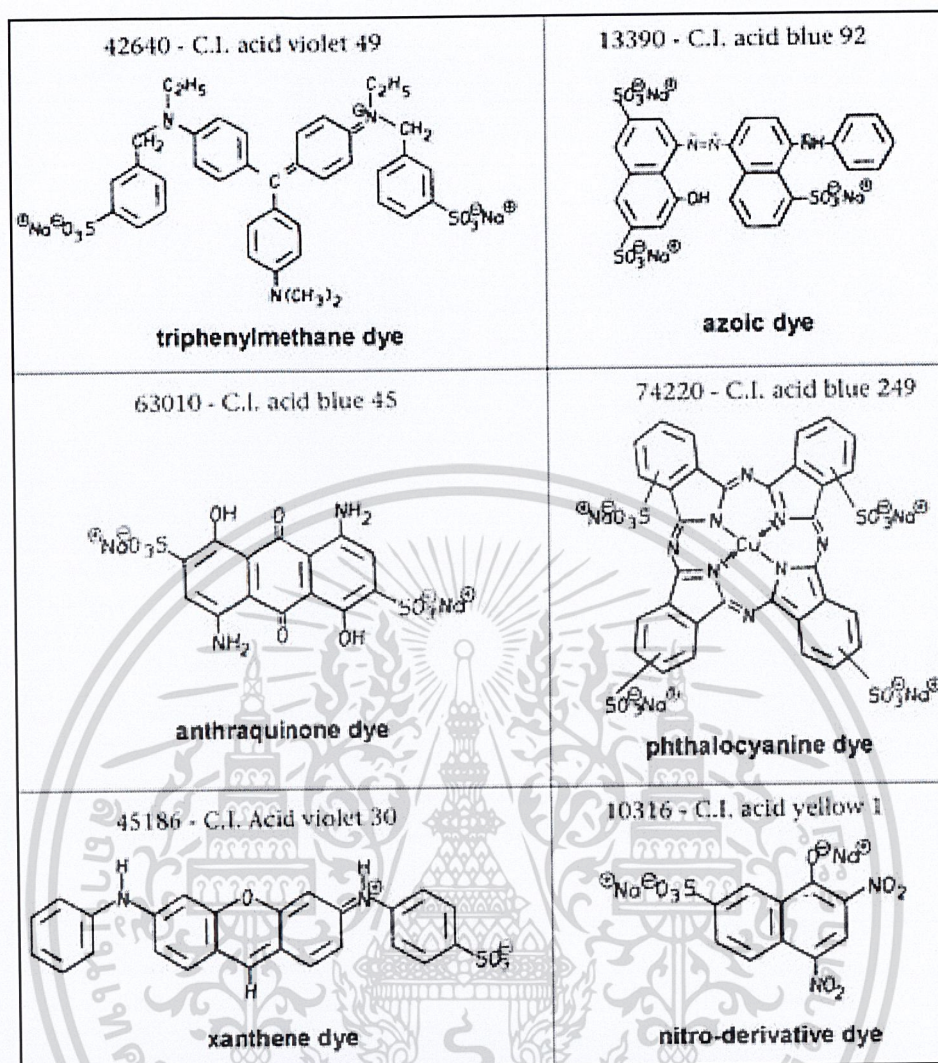
-สีไคเร็กต์ (direct dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอโซที่มีย่านักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟเนตที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย ทนแสง



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของสีไคเร็กต์สีต่างๆ [15]

-สีแอซิด (acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิกใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีแอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีแอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ

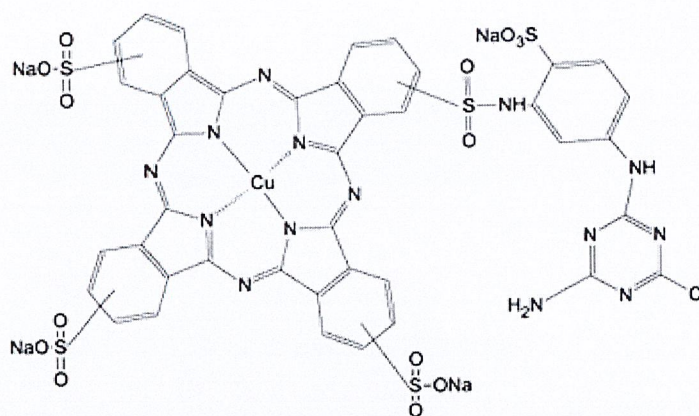
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดง โครงสร้างของสีแอสิด [15]

- สีรีแอคทีฟ (reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สี  
 ย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ ไฮดรอกไซด์  
 (OH) ของเซลลูโลสและเชื่อม โยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่างกลายเป็น  
 สารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-  
 75 °C และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

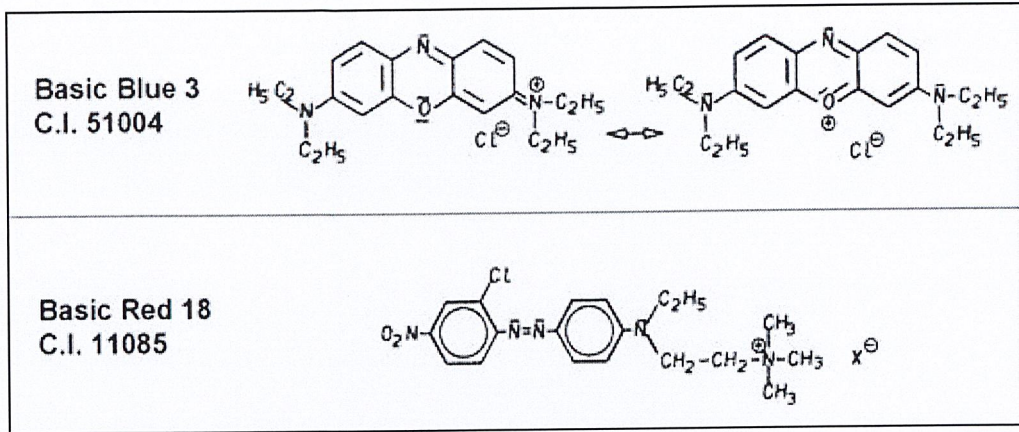


**Figure 1.** Molecular structure of the reactive dye turquoise blue 15 (AT15).

### รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของสีรีแอกทีฟ [16]

1.2 หมู่ที่แสดงประจุบวก (Cationic group) ได้แก่ หมู่เอมีนชนิดทุติยภูมิ (2°amine) หมู่เอมีนชนิดตติยภูมิ (3°amine) กลุ่มนี้เมื่อละลายน้ำจะเกิดการดึงโปรตอนจากโมเลกุลของน้ำเนื่องจากอิเล็กตรอนคู่อิสระของอะตอมของไนโตรเจนในหมู่เอมีนทำให้ลิกนด์สามารถละลายได้ดีในสภาวะที่เป็นกรดเพราะว่ามีโปรตอนในระบบมาก ซึ่งหมู่อัลคิลที่เกาะอยู่กับอะตอมของไนโตรเจนยิ่งมากเท่าไรก็จะทำให้อิเล็กตรอนคู่อิสระของไนโตรเจนมีความหนาแน่นยิ่งขึ้น ก็จะทำให้ความสามารถในการดึงโปรตอนจากน้ำได้ดียิ่งขึ้นทำให้ความเป็นเบสสูงขึ้นทำให้ตัวสีที่มีค่าต่ำกว่าและสามารถที่จะทนได้สูงขึ้น ตัวอย่างของลิกนด์นี้ได้แก่สีเบสิก เนื่องจากว่าค่า pH ของสารละลายจะมีผลต่อการแสดงประจุของสีนั้น ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการแตกตัวออกมา จะเห็นได้ว่าการละลายของสีในกลุ่มนี้จะเป็นกลไกการละลายด้วยการทำลายพันธะ ดังนั้นให้การความร้อนเข้าสู่ระบบก็จะทำให้สีนั้นสามารถละลายน้ำได้ดีขึ้น

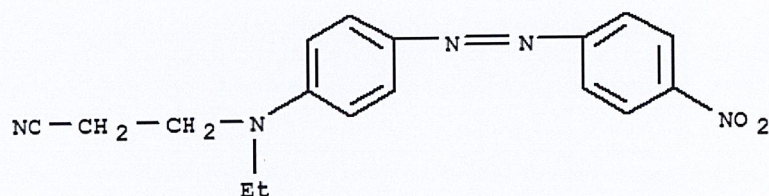
-สีเบสิก (basic or cationic dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของสีเบสิคชนิดต่างๆ [15]

1.3 หมู่ที่ไม่แสดงประจุ (Non-ionic group) ในกลุ่มนี้จะแตกต่างจาก 2 กลุ่มแรกซึ่งเป็นสีมีความไวต่อค่า pH ของสารละลายมากกว่า ในขณะที่สีกลุ่มนี้จะไวต่ออุณหภูมิของสารละลายมากกว่า เนื่องจากสีกลุ่มนี้ไม่มีหมู่ที่แสดงประจุใดๆบนโครงสร้าง แต่จะมีหมู่ที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซี (Hydroxy) หมู่เอมีนปฐมภูมิ (1° amine) หมู่ซัลโฟนาไมด์ (Sulphonamide) หมู่อีเทอร์ (Ether) และเมื่อให้พลังงานความร้อนเข้าไปก็จะทำให้พลังงานพันธะระหว่างสีย้อมและน้ำถูกทำลายลงไปด้วย ส่งผลทำให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลงด้วย ในกลุ่มนี้ ได้แก่ สีดิสเพอร์ส ฯลฯ

-สีดิสเพอร์ส (disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตต เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง สีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกวันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนโตรซอกไซด์ สีดิสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากหมู่เคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (azo dyes) และสีย้อมแอมมิโนแอนทราควิโนน (amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (ethanolamine;  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}$ ) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน



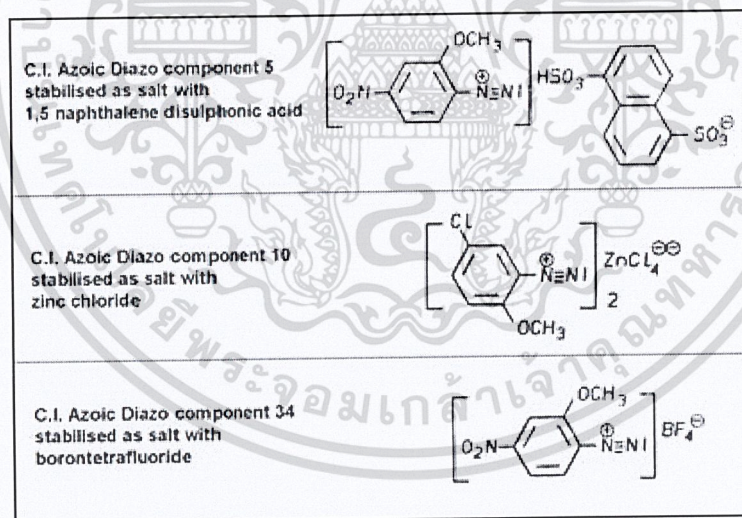
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของสีดิสเพอร์ส [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สีที่มีหมู่ช่วยละลายชั่วคราว (Temporary solubilising group) กลุ่มนี้มักจะมีหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ที่สามารถทำปฏิกิริยาระหว่างข้อมสีแล้วกลายเป็นหมู่ที่ละลายน้ำ หรือ ไม่ก็เป็นหมู่ที่มีมากับตัวสีข้อมเองอยู่แล้ว แต่เมื่อนำมาข้อมบนผ้าแล้ว หมู่เหล่านี้จะถูกทำให้กลายเป็นหมู่ที่ไม่ละลายน้ำเหมือนเดิม หรือ ไม่ก็ถูกเปลี่ยนรูปใหม่ให้ไม่สามารถละลายน้ำได้ ทำให้สีกลุ่มนี้จะมีควมคงทนต่อการเปียกสูง สามารถแบ่งได้เป็น

2.1 หมู่ที่แสดงประจุลบ ได้แก่ หมู่ฟีนอกไซด์ (Phenoxide) หมู่ซัลเฟต (Sulphate) กลุ่มนี้ก็เช่นเดียวกับหมู่ประจุลบที่ถาวรในแง่ของความสามารถละลายได้ในสภาวะเบสโดยเฉพาะอย่างยิ่งหมู่ฟีนอกไซด์ที่สามารถละลายได้ในเบสแก่ เช่น สารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่านั้น ตัวอย่างของสีที่ใช้หมู่ฟีนอกไซด์เป็นหมู่ช่วยละลายข้อมได้แก่ สีวัต สีอะโซอิก ฯลฯ ในขณะที่หมู่ซัลเฟตนั้นมีความเป็นกรดที่สูงกว่าจึงสามารถละลายในสภาวะที่เป็นเบสอ่อนกว่าฟีนอกไซด์ โดยที่สามารถละลายได้ในสภาวะที่เป็นกลางได้ สีในกลุ่มนี้ได้แก่ สีโซลูบิไลซ์วัต (Solubilised vat dyes)

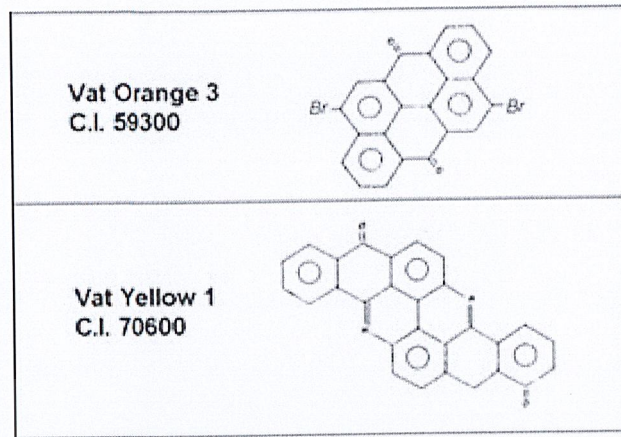
-สีอะโซอิก (azoic dye) สีข้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องข้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วข้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์ที่จะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ข้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตต สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของสีอะโซอิก [15]

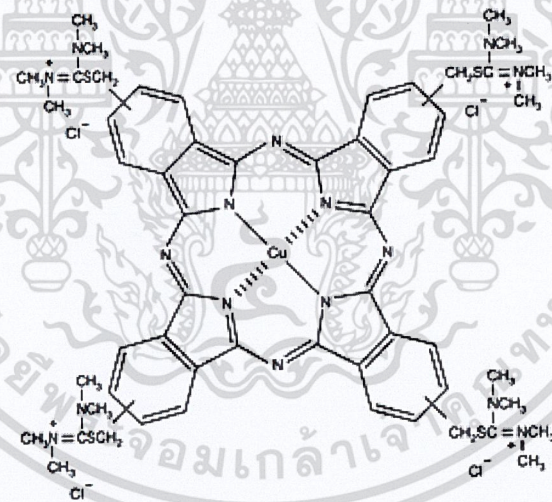
-สีวัต (vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการข้อมต้องเตรียมน้ำข้อมให้ สีวัตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีเว็ทจะถูกรีดิวส์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็น สีเว็ท สีข้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (antraquinoid)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดง โครงสร้างของสีย้อม [15]

2.2 หมู่ที่แสดงประจุบวก ได้แก่ หมู่ออนเนียม (Onium group) กลุ่มนี้มีประจุบวกติดกับโครงสร้าง เมื่อทำการออกซิเดชันตัวสีก็สามารถที่จะปล่อยหมู่ช่วยละลายออกมา แล้วตัวสีก็ตกตะกอนในเส้นใย สี Alcian ก็เป็นตัวอย่างของสีกลุ่มนี้ แต่ในปัจจุบันไม่มีการใช้งานแล้ว



รูปที่ 2.10 แสดง โครงสร้างของสีแอลเซียนบลู [16]

ส่วนใหญ่แล้วสีย้อมที่ปนเปื้อนมาจากน้ำเสียจะมาจากอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวสูง ทำให้มีการพัฒนาทั้งทางด้านกระบวนการผลิตและการแข่งขันที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องใช้ร่วมกับวัตถุดิบในทุกขั้นตอนการผลิตไม่ว่าจะเป็นการผลิตเส้นใย การปั่น การทอ การย้อมสี และการฟอกย้อมก็ตาม โดยวัตถุดิบที่ใช้ เช่น สีย้อมผ้า สารเคมี เป็นต้น บางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดละลายน้ำไม่ได้ จึงทำให้น้ำมีสภาพที่แปรเปลี่ยนไปที่เราเรียกว่าน้ำเสีย เช่น อุณหภูมิสูงขึ้น มีกลิ่น มีสี ตลอดจนทำให้สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำตาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากมีสารอินทรีย์ในน้ำปริมาณที่สูง ทำให้ขาดออกซิเจนและผลกระทบของน้ำเสียนี้ยังเป็นตัวบ่งชี้การทำงานของจุลินทรีย์ต่างๆ ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมประเภทที่มีการใช้น้ำและสารเคมีจำนวนมาก ปัญหาใหญ่ที่พบและนับว่ามีผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อมคือ การปล่อยน้ำเสียจากโรงงานลงสู่สิ่งแวดล้อม น้ำเสียที่ปล่อยออกมาประกอบด้วย สี, ค่าบีโอดี, ค่าซีโอดี, กรด-ด่าง, สารแขวนลอย, ความร้อน และอื่นๆ ซึ่งมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดการทำลายทัศนียภาพและเป็นที่น่ารังเกียจ มลสารส่วนใหญ่ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมนั้นมาจากกระบวนการย้อมสี(dyeing) และการตกแต่งสำเร็จ(finishing) โดยส่วนมากแล้วมลสารเหล่านี้และสีบางประเภทสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมี ทั่วไป แต่มีสีบางประเภทที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการดังกล่าว ซึ่งสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอคทีฟ, สีเอซิด, สีเบสิก, สีไดเรกต์, สีแว็ต, สีดิสเพอร์ส เป็นต้น ผลเสียที่เกิดขึ้นจากสีนอกจากจะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติขาดความสวยงามแล้วยังลดอัตราการนำเข้าของออกซิเจนที่เข้าสู่ผิวหน้าของแหล่งน้ำ และบดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ จะส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงทำให้สัตว์น้ำอาจตายได้ ดังนั้นการวางแผนการจัดการ สิ่งแวดล้อมของโรงงานจึงมีความจำเป็นในการป้องกันปัญหามลพิษที่แหล่งกำเนิดและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้าย โดยมีการศึกษาเทคโนโลยีที่ใช้ในระบบบำบัด น้ำเสีย เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งที่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์ที่กำหนด

#### 2.4.2 อันตรายที่อาจเกิดจากสีย้อม [17]

ส่วนใหญ่แล้วสีย้อมนั้นจะใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมากเป็นอันดับหนึ่ง ซึ่งสีย้อมที่ใช้นั้นเป็นสีสังเคราะห์จากสารเคมีทั้งสิ้น ซึ่งส่วนประกอบของสีย้อมนั้นจะเป็นพวกโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว ปรอท สารหนู และ โครเมียม เป็นต้น ซึ่งเป็นสีที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้ แต่พบว่ามีมีการนำสีย้อมเหล่านี้ไปใช้ในการบริโภคโดยใช้เป็นสีผสมอาหาร ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกาย ถ้าหากได้รับปริมาณมากๆ สะสมเป็นเวลานานอาจจะทำให้เกิดอันตรายถึงชีวิตได้ อันตรายจากโลหะหนักในสีย้อมได้แก่

ตะกั่ว : ระยะเวลาแรก จะทำให้ร่างกายอ่อนเพลีย เบื่ออาหาร ปวดศีรษะ โลหิตจาง ถ้าสะสมมากขึ้นจะมีอัมพาต ที่แขน ขา เพื่อ ชักกระตุก หมดสติ

ปรอท : กรณีเฉียบพลัน จะมีอาการคลื่นไส้ ท้องเดิน ปวดมวนท้องรุนแรง ถ้าสะสมเรื้อรังเหงือกจะบวมแดงคล้ำ ฟันตาย เบื่ออาหาร อ่อนเพลีย

สารหนู : จะเกิดพิษต่อระบบทางเดินอาหาร ทำให้ผิปกติ ตับอักเสบ หัวใจวาย

โครเมียม : ถ้าสะสมในร่างกายเกินขนาดจะเกิดอาการเวียนศีรษะ กระหายน้ำรุนแรงอาเจียน หมดสติ และ เสียชีวิต เนื่องจากไตไม่ทำงาน ปัสสาวะเป็นพิษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 การกำจัดสีขมออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แม่น้ำ [18]

กระบวนการบำบัดสีขมในน้ำเสียมีหลายวิธี จะเลือกวิธีใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพน้ำที่ต้องการหลังจากการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสรุปวิธีการบำบัดสีขมได้ดังนี้

#### 1) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด ด่าง และสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นนิยมน้ำปนเปื้อน สารส้ม เพอร์รัสคลอไรด์ หรือเพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสี โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างไปตามชนิดของโมเลกุลสีขม ถ้าสีขมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีแอซิด สีรีแอคทีฟ การเกิดตะกอนของสี โดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้ เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอนเช่น โพลีอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งต้องใช้ใน ปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง จะส่งผลกระทบต่อ กระบวนการไนตริฟิเคชัน

#### 2) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

การดูดซับบนถ่านกัมมันต์ เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสี ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนัก โมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรม สีจะมีน้ำหนักโมเลกุล ต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูน ขาวปริมาณมากในการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้พีเอชของน้ำทิ้งสูง ดังนั้น ต้องมีการปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้ง ด้วยการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบน ถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการ ที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ดังนั้น ประสิทธิภาพ การดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การ ทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึง สูงมาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับพี เอช ก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ ตาม

### 3) กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment)

กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ในการลดสี โดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่จะมีการดูดซับสีไปด้วย ทำให้สามารถบำบัดสีได้ แบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ คือ

- ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการทำลาย กินดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ให้มีค่าความสกปรกตกลง
- ระบบที่ 2 คือระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) คัดแปลงจากการบำบัดน้ำเสียแบบที่มีอากาศ และไม่มีอากาศรวมกัน โดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบตะกอนเร่งต่างกัน เพียงบ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ชูจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่า บีโอดี ลดลงประมาณร้อยละ 30-50

### 4) การออกซิไดส์ด้วยโอโซน (Ozone treatment)

โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบ อินทรีย์เป็นพวกวงแหวน กับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่นานนัก ซึ่งอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น การโอโซนชั้น (Ozonation) เป็นการออกซิไดส์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมี ของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงมากจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสีย้อม ซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยไนโตรเจนคลอรีนหรือซัลเฟอร์จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษ ต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

### 5) เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี นำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

5.1 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ใช้ในการกำจัดสีย้อม ที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภทดีสเพอร์สที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์ และสีย้อมประเภทสียัลเฟอร์ สีแวต และสีอะโซอิกที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย และวิสคอส (Viscose) สีย้อมดีสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

### 5.2) ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)

เหมาะสำหรับใช้กำจัดไอออนสีย้อม และ โมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่ต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (Brackish Water) และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (Sea Water) ซึ่งเยื่อแผ่นแรกจะสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือ จะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 94 ใดๆก็ตามที่สีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้าย ไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

### 5.3) ไดนามิก เมมเบรน (Dynamic Membrane)

ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่น เหล็ก แสตนเลส วัสดุคาร์บอน หรือเซรามิก ซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ Hydrous zirconium (IV) oxide และกรด โพลีอะคลีลิก (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า

### 6) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration)

ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีรีแอกทีฟที่สีย้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีรีแอกทีฟต้องใช้สาร อิเล็กโทรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเล็กโทรไลต์เหล่านี้ ออกมาและนำกลับมาใช้ได้ด้วย

### 7) เทคโนโลยีใหม่ๆ (New Technology)

เทคโนโลยีใหม่ๆ มากมายที่เกิดขึ้น มีพื้นฐานตั้งอยู่บนเทคนิคต่างๆ กัน แต่มีวัตถุประสงค์เดียวกันคือเพื่อลดผลกระทบต่างๆ ให้เหลือน้อยที่สุดตัวอย่าง เช่น

#### 7.1) ตัวดูดซับ ชนิดอินทรีย์ ซึ่งถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นและมีการนำมาใช้กันอยู่ในโรงงาน

ประสิทธิภาพในการกำจัดสีค่อนข้างดี อัตราการกำจัดเป็นไปอย่างรวดเร็ว ให้ผลการกำจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ที่กำหนดไว้แม้จะมีความแปรผันของความเข้มข้นสีที่สูงหรือมีสารเจือปนก็ตาม ซึ่งต้นทุนวิธีนี้ต่ำกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่คล้ายกันดังนั้น เทคนิคนี้จึงคุ้มค่าต่อการพิจารณาต่อไป

7.2) ระบบที่มีพื้นฐานของอิเล็กโทรไลซิสที่อยู่ในระหว่างกำลังพัฒนา พลังงานที่ใช้จะสูง และบางครั้งคลอรีน และ ไฮดรอกซีเรดิคัลสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกพันธะอย่างควบคุมไม่ได้ ตัวดูดซับชนิดอินทรีย์หรือพืชแห้ง เช่น ผักตบชวาจะมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือเซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันนัลไว้แลกเปลี่ยนไอออน หรือโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**Yamada, E. และคณะ [19]** นำเศษ PET มาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอลที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลา 80 นาที และที่อุณหภูมิ  $180^{\circ}\text{C}$  เวลา 15 นาที ซึ่งจะเปลี่ยนสารให้กลายเป็น disodium terephthalate ( $\text{Na}_2 - \text{TPA}$ ) และเอทิลีนไกลคอล ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิต PET และเป็นวิธีการรีไซเคิล PET ได้เร็วมากขึ้น

**Tochiaki, Y. และคณะ [20]** ศึกษาการรีไซเคิลทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ให้เป็นกรดเทเรฟทาลิก (TPA) และกรดออกซาลิกด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสารละลาย NaOH ร่วมกับออกซิเดชันด้วยแก๊สออกซิเจนในช่วงอุณหภูมิ  $160-250^{\circ}\text{C}$  พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นเกลือโซเดียมเทเรฟทาเลต และเอทิลีนไกลคอล (EG) เมื่อมีการเตรียมแก๊สออกซิเจน EG จะถูกออกซิไดส์เป็นกรดออกซาลิกและ  $\text{CO}_2$  จากการทดลองพบว่า ร้อยละผลได้ของ TPA เป็น 100 ในทุกๆสถานะ และร้อยละของผลได้ของกรดออกซาลิกเป็น 60.7 ส่วนที่พื้นผิวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยา พบว่าเกิดรอยแตกและรูพรุนจำนวนมาก

**Krisztina, L. และ Andras, S. [21]** ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้วยกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ  $750^{\circ}\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน จากนั้นจะทำการกระตุ้นให้ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนมากขึ้น โดยการกระตุ้นในบรรยากาศของไอน้ำและไนโตรเจนที่ไหลผ่านตลอดเวลา จากการวิจัยพบว่าถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว BET  $1170 \text{ m}^2/\text{g}$  ปริมาตรรูพรุน  $0.625 \text{ cm}^3/\text{g}$  และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวส่วนใหญ่เป็นเบส ดังนั้นถ่านกัมมันต์ชนิดนี้จึงสามารถกำจัดฟีนอลและ 2,3,4-trichlorophenol ในน้ำทิ้งได้

**สุภาพ ธารศักดิ์ [22]** ศึกษาการย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เพื่อเตรียมกรดเทเรฟทาลิกด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเมทาโนไลซิส โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยาตามลำดับ ทำปฏิกิริยาในตัวกลางต่างกันคือเมทานอลและโทลูอีน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตในตัวกลางโทลูอีน จะได้ผลิตภัณฑ์กรดเทเรฟทาลิกในปริมาณมากกว่าในตัวกลางเมทานอล ในปฏิกิริยาที่ใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยาพบว่าปริมาณกรดเทเรฟทาลิกเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**จรวงจันทร์ และคณะ [23]** ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสภาวะกรดของขวดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ใช้แล้ว เพื่อนำมาผลิตวัสดุดูดซับ สำหรับกำจัดโครเมียม (+6) ในน้ำทิ้งสังเคราะห์ ตัวแปรที่มีผลต่อการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ถูศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริก (6 8 10 และ 12 โมลต่อลิตร) และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (6 8 10 และ 12 ชั่วโมง) จากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับที่ผลิตจาก PET ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำให้ทราบว่าบริเวณที่เป็นกรดจะอยู่ที่บริเวณรอยแตกบนผิวของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ซึ่งเกิดขึ้นโดยการไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายที่เป็นกรด และจากผลการการดูดซับของ โครเมียม (+6) ตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากการไฮโดรไลซิสพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตด้วยสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น  $10 \text{ mol L}^{-1}$  เวลา 6 ชม. จะมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดก้นกลมและขวดสามคอ ขนาด 500, 1000 มิลลิลิตร
2. บีกเกอร์ ขนาด 50, 100, 250 และ 500 มิลลิลิตร
3. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. กระบอกตวง ขนาด 10, 50, 100 และ 500 มิลลิลิตร
5. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 50, 100, 250, 500 และ 1000 มิลลิลิตร
6. บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
7. ปิเปต ขนาด 1, 5, 10 และ 25 มิลลิลิตร
8. หลอดหยด
9. เทอร์โมมิเตอร์ 300°C
10. เครื่องควบแน่น
11. เครื่องให้ความร้อน (heating mantle)
12. เครื่องชั่งไฟฟ้า
13. กระจกนาฬิกา
14. อ่างน้ำ (water bath)
15. กระจกกรอง
16. ชุดกรองแบบลดความดัน
17. เครื่องเขย่า (Shaker)
18. ตู้อบสาร
19. กระจกยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ (Universal Indicator)
20. เครื่อง Scanning Electron Microscope รุ่น LEO/1455VP
21. เครื่อง Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) รุ่น Thermo 470  
ยี่ห้อ Perkin Elmer Co.Ltd.,
22. เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer รุ่น 6405 ยี่ห้อ Jenway

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 สารเคมี

1. ขวดน้ำดื่มที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ชนิดใส
2. เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol , EG) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab System
3. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide,  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
4. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (potassium hydrogen phthalate,  $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fluka
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide,  $\text{NaOH}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
6. ฟีนอล์ฟทาเลิน (phenolphthalene) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
7. สีย้อม congo red บริษัท Fluka
8. กรดไฮโดรคลอริก (hydrochlorid acid,  $\text{HCl}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
9. โซเดียมไทโอซัลเฟต (sodium thiosulfate,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab System
10. ไอโอดีน ( $\text{I}_2$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
11. โพแทสเซียมไอโอเดต (potassium iodate,  $\text{KIO}_3$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท FLUKA
12. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (potassium iodide,  $\text{KI}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท FLUKA
13. แป้งมัน (starch) เกรดการค้า

### 3.3 การทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ในขั้นตอนแรกจะทำการเตรียมตัวดูดซับจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสารละลายเบส โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล ที่ความเข้มข้นและเวลาของปฏิกิริยาต่างๆ จากนั้นในขั้นตอนที่ 2 จะนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ไม่ถูกไฮโดรไลซิสไปดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมได้ รวมถึงนำตัวดูดซับไปตรวจสอบสมบัติต่างๆ เช่น ลักษณะพื้นผิว เลขไอโอดีน และหมู่กรด ต่อไป

### 3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับจากขวด PET ที่ใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสารละลายเบส

- 1) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอลโดยนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายในเอทิลีนไกลคอล ซึ่งขณะทำการละลายควรให้ความร้อนแก่สารละลายเพื่อให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายได้ดีขึ้น
- 2) ชั่งน้ำหนักขวดPETที่ตัดให้มีขนาดประมาณ 1×1 เซนติเมตร ปริมาณ 20 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอลที่เตรียมไว้ ปริมาตร 400 มิลลิลิตร ลงไป
- 3) วางขวดก้นกลมลงในเครื่องให้ความร้อน ต่อเครื่องควบแน่น และเทอร์โมมิเตอร์ 300 องศาเซลเซียส จากนั้นเปิดน้ำหล่อเย็นเข้าสู่เครื่องควบแน่น
- 4) ทำการให้ความร้อนจนกระทั่งสารละลายมีอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จากนั้นเริ่มทำการจับเวลา และรีฟลักซ์ตามเวลาที่กำหนด เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำขวดก้นกลมไปทำให้เย็นเพื่อหยุดปฏิกิริยา
- 5) กรองสารผสมในขวดก้นกลมด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน
- 6) ทำการแยกกรดเทรฟทาลิก (TPA) ออกจาก PET ที่ไม่ถูกย่อยสลาย โดยล้างของแข็งที่ได้จากการกรองด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 6 โมลาร์ เฉพาะ TPA เท่านั้นจะถูกละลายด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
- 7) PET ที่ไม่ถูกย่อยสลาย ซึ่งไม่ละลายในแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จะนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นและอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักและคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของPET (%conversion) ตามสมการ (3.1) และร้อยละของ PET ที่เหลืออยู่ดังสมการ (3.2)
- 8) ทำการตกผลึกกรดเทรฟทาลิก (TPA) ด้วยการเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น จากนั้นกรองแยกผลึกTPA ล้างผลึกด้วยน้ำเย็น และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักและคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักของTPA ดังสมการ (3.3)

สถานะในการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส PET ด้วยสารละลายเบสแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลาย NaOH และเวลาของปฏิกิริยา ที่มีต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส PET

การทดลองที่	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (โมลาร์)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)
1	0.25	10
2	0.25	30
3	0.25	60
4	0.25	90
5	0.50	10
6	0.50	20
7	0.50	30
8	0.75	10

สมการที่ใช้คำนวณ

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของ PET} = \frac{(\text{น้ำหนัก PET เริ่มต้น} - \text{น้ำหนัก PET ที่ไม่ถูกย่อยสลาย})}{\text{น้ำหนัก PET เริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{ร้อยละของ PET ที่เหลืออยู่} = \frac{\text{น้ำหนัก PET ที่เหลืออยู่}}{\text{น้ำหนัก PET เริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\text{ร้อยละของ TPA} = \frac{\text{น้ำหนัก TPA ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส}}{\text{น้ำหนัก PET เริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ผ่านการไฮโดรไลซิส

ในการทดลองตอนที่ 2 นี้ จะนำตัวดูดซับPET ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสภาวะเบส มาดูดซับสีย้อมชนิด congo red ในน้ำทิ้งสังเคราะห์ โดยจะทำการศึกษาผลของ pH สารละลาย ดังตารางที่ 3.2 และจะนำค่า pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับไปใช้ในการศึกษาผลของความเข้มข้นสีย้อม ดังตารางที่ 3.3 ต่อไป ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1. เตรียมสารละลายสต็อกสีย้อม congo red ความเข้มข้น 1000 mg/L โดยชั่ง congo red ปริมาณ 1 กรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ใส่ลงในน้ำกลั่นจำนวน 500 ml ละลายให้เข้ากัน จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีด เก็บไว้เป็นสารละลายสต็อก
2. ปิเปตสารละลายสต็อก congo red 20 ml ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 ml จากนั้นเติมน้ำกลั่นอีก 180 ml จะได้สารละลาย Congo red เข้มข้น 50 mg/L
3. ทำการปรับ pH ของสารละลาย congo red ด้วยสารละลาย 1 M NaOH หรือ 1 M HCl จนได้ pH ตามต้องการ
4. เติมตัวดูดซับจาก PET ใส่ลงในสารละลาย congo red ที่ปรับ pH แล้ว จากนั้นทำการเขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิห้อง และเริ่มจับเวลา
5. เมื่อครบเวลาของปฏิกิริยาให้นำสารละลายไปวิเคราะห์ความเข้มสีด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 498 nm (ต้องเตรียม Standard curve ของสี congo red เอาไว้แล้ว โดยนำสารละลาย congo red ตั้งแต่ 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10 mg/L มาทำการวัด)

**ตารางที่ 3.2** สภาวะที่ใช้ในการศึกษาผลของ pH ของสารละลายสีย้อมชนิด congo red ที่มีต่อการดูดซับด้วยตัวดูดซับ PET

pH	ความเข้มข้นสีย้อม(mg/l)	ตัวดูดซับ	ปริมาณตัวดูดซับ(g)	ปริมาตรน้ำทิ้ง (ml)	เวลา (ชั่วโมง)
2	50	เลือกตัวดูดซับ PET ที่ให้ค่า iodine number กับ ค่า acid side สูงสุด และต่ำสุด	0.25	25	2
3	50		0.25	25	2
4	50		0.25	25	2
5	50		0.25	25	2
7	50		0.25	25	2
9	50		0.25	25	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.3** สภาวะที่ใช้ในการศึกษาผลของความเข้มข้นสีย้อมชนิด congo red ที่มีต่อการดูดซับด้วยตัวดูดซับ PET

ความเข้มข้นสีย้อม (mg/L)	pH ของสารละลาย	ตัวดูดซับ	ปริมาณตัวดูดซับ (g)	ปริมาณน้ำทิ้ง (ml)	เวลา (ชั่วโมง)
25	pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับ เลือกจากตาราง 3.2	เลือกตัวดูดซับ PET ที่ให้ค่า iodine number กับค่า acid site สูงสุดและต่ำสุด	0.25	25	2
50			0.25	25	2
75			0.25	25	2
100			0.25	25	2

### 3.3.3 การทดสอบสมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา

กรดเทรฟทาสิก และตัวดูดซับ PET ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส PET ที่ใช้แล้วด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล จะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

### ตารางที่ 3.4 การทดสอบสมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา

สมบัติที่ทดสอบ	ผลิตภัณฑ์ที่ทำการทดสอบ	เครื่องมือหรือเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
1. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	TPA และตัวดูดซับ PET	Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)
2. ลักษณะพื้นผิว	ตัวดูดซับ PET	Scanning Electron Microscope (SEM)
3. ตำแหน่งที่เป็นกรด (Acid Site)	ตัวดูดซับ PET	ไทเทรตกับ KHP
4. เลขไอโอดีน (Iodine Number)	ตัวดูดซับ PET	ไทเทรตย้อนกลับกับ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3.1 การวิเคราะห์ตำแหน่งที่เป็นกรด (Acid site) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ

1. นำตัวดูดซับ PET ปริมาณ 0.03 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติม NaOH เข้มข้น  $0.0500 \text{ mol L}^{-1}$  ปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไปเขย่าเป็นเวลา 5 นาที
2. จากนั้นนำมาไทเทรตกับสารละลาย Potassium hydrogen phthalate เข้มข้น  $0.0250 \text{ mol L}^{-1}$  ที่มากเกินไป โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์
3. คำนวณหาค่าตำแหน่งที่เป็นกรดบนพื้นผิวตัวดูดซับจากจำนวน โมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับ Potassium hydrogen phthalate ต่อน้ำหนักเป็นกรัมของตัวดูดซับ

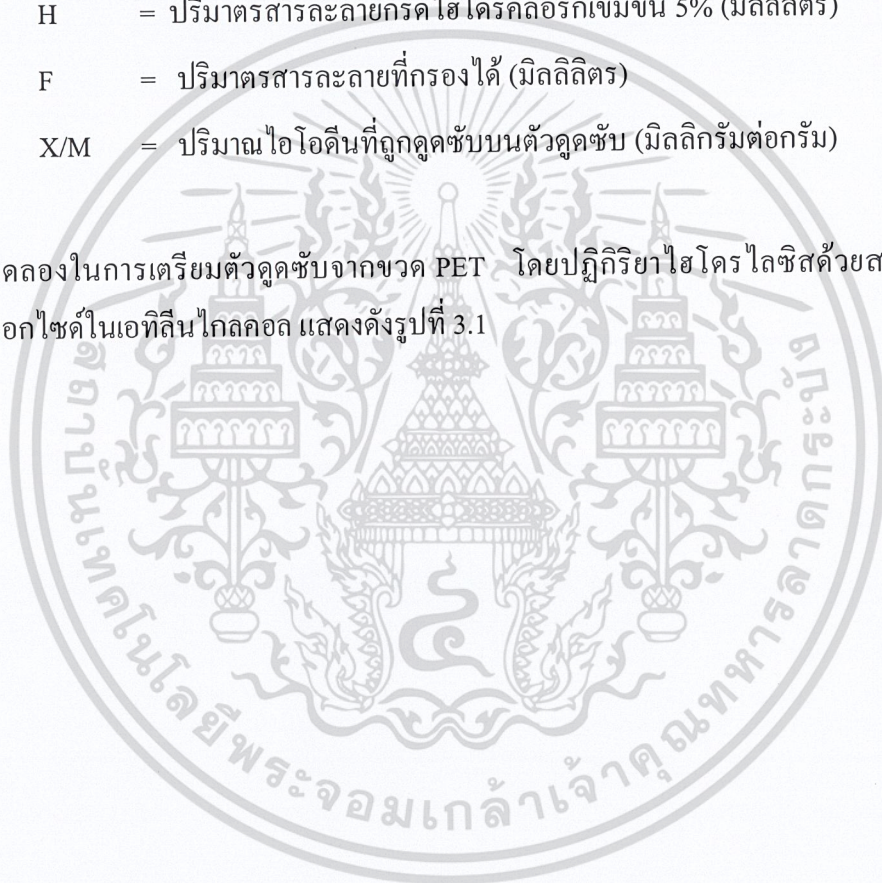
### 3.3.3.2 การวิเคราะห์เลขไอโอดีน (Iodine Number)

1. ออบสารที่จะนำมาเป็นตัวดูดซับให้แห้ง แล้วทิ้งให้เย็นในเดสซิเคเตอร์ (desiccator) หลังจากนั้นชั่งตัวดูดซับมาปริมาณ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีตัวดูดซับบรรจุอยู่
3. ปิเปตสารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วนำไปเขย่าเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นทำการกรองเพื่อแยกตัวดูดซับออก เก็บเฉพาะสารละลายที่กรองได้
4. ปิเปตสารละลายที่กรองได้มา 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร ไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เติมน้ำเปล่า 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปไทเทรตต่อกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต จนกระทั่งไม่มีสี
5. นำปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไปคำนวณหาเลขไอโอดีนในหน่วยมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักเป็นกรัมของตัวดูดซับ (mg/g) จากสมการ (3.4)

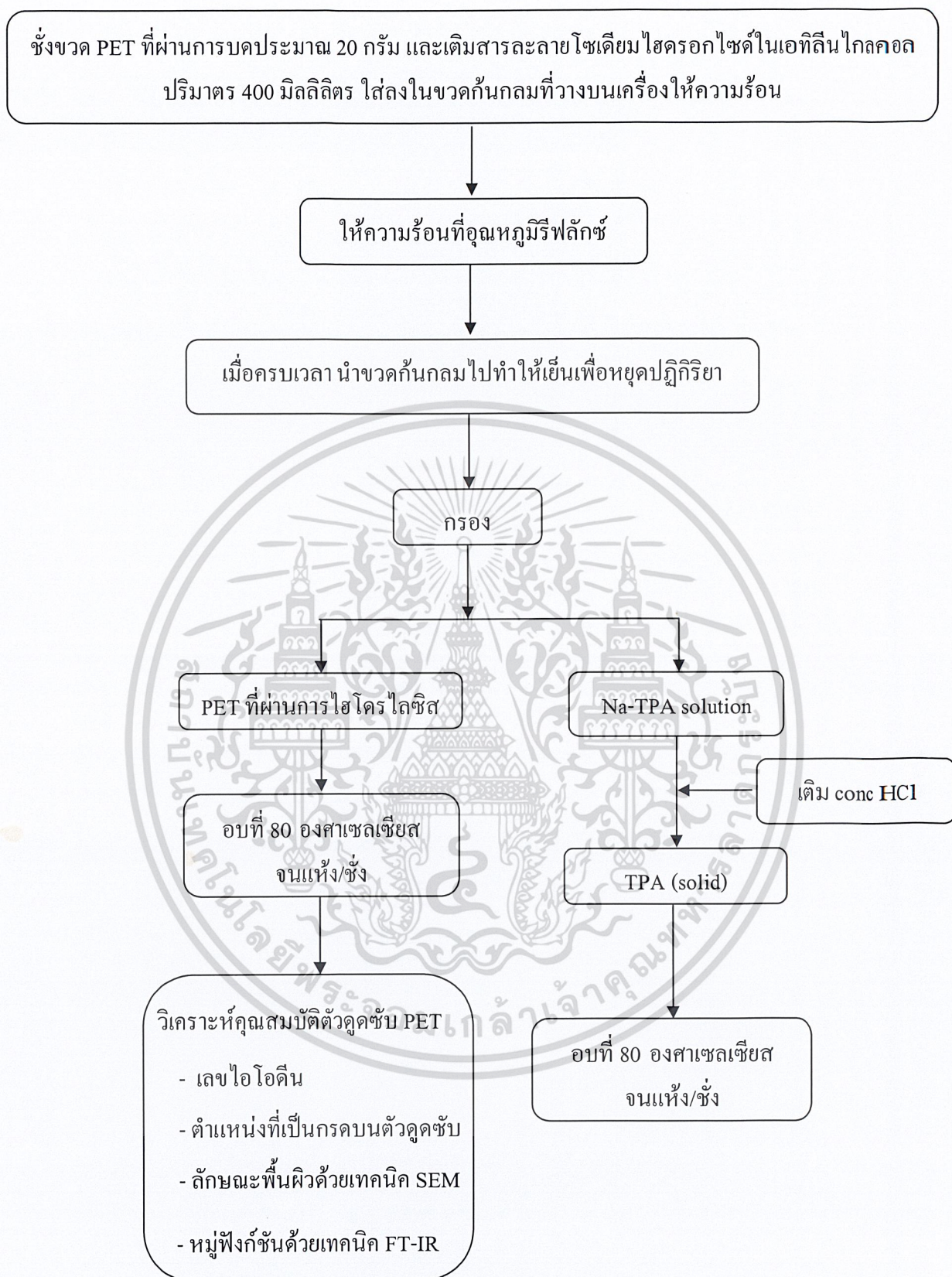
$$\text{เลขไอโอดีน} = \frac{X}{M} = \frac{[A - (DF)(B)(S)]}{M} \quad (3.4)$$

- เมื่อ
- S = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไป (มิลลิลิตร)
  - M = ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)
  - A = [ความเข้มข้นของไอโอดีน (นอร์มัล)] x 12693.0
  - B = [ความเข้มข้นของโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)] x 126.93
  - DF = dilution factor =  $\frac{(100 + H)}{F}$
  - H = ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5% (มิลลิลิตร)
  - F = ปริมาตรสารละลายที่กรองได้ (มิลลิลิตร)
  - X/M = ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

แผนผังการทดลองในการเตรียมตัวดูดซับจากขวด PET โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล แสดงดังรูปที่ 3.1



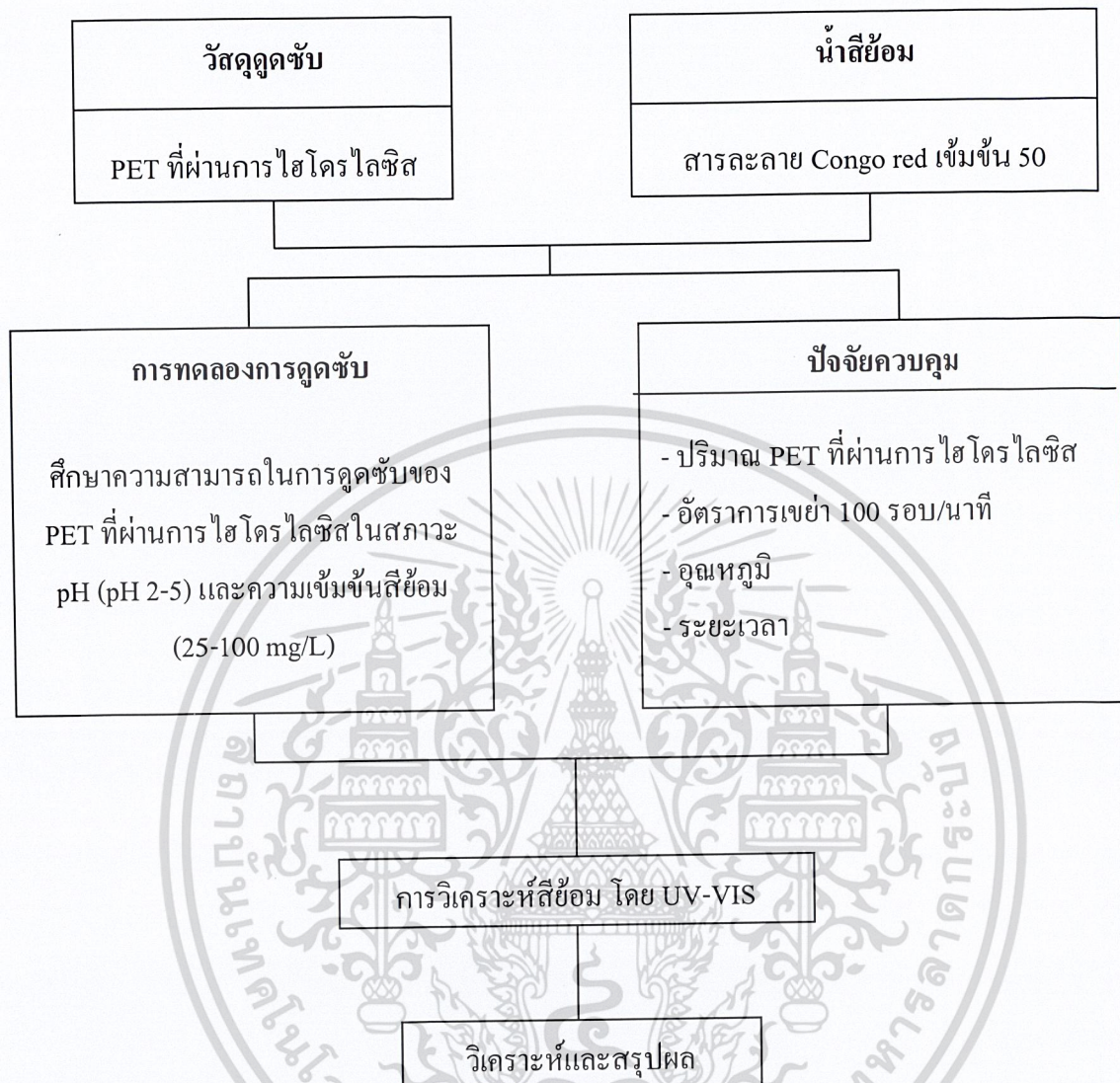
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.1** แผนผังการเตรียมตัวดูดซับจาก PET โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังการทดลองในการศึกษาการดูดซับสีของ ตัวดูดซับที่เตรียมได้ แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังการทดลองการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมจาก PET ที่ผ่านการไฮโดรไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการผลิตตัวดูดซับจากขวดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสภาวะเบส โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอลที่อุณหภูมิปลั๊กซ์ เพื่อนำมากำจัดสีข้อมชนิดคองโกเรดในน้ำทิ้งสังเคราะห์ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ถูกไฮโดรไลซิส ร้อยละของกรดเทรฟทาลิกที่เกิดขึ้น และร้อยละของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่เหลืออยู่ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเวลาของปฏิกิริยา จากนั้นนำตัวดูดซับจากพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้ไปดูดซับสีข้อมคองโกเรด และวิเคราะห์เลขไอโอดีน หมู่กรด และลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต

#### 4.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล

ผลของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของPET ร้อยละของกรดเทรฟทาลิกที่ (TPA) ได้จากปฏิกิริยา และร้อยละของPET ที่เหลืออยู่ แสดงดังตารางที่ 4.1

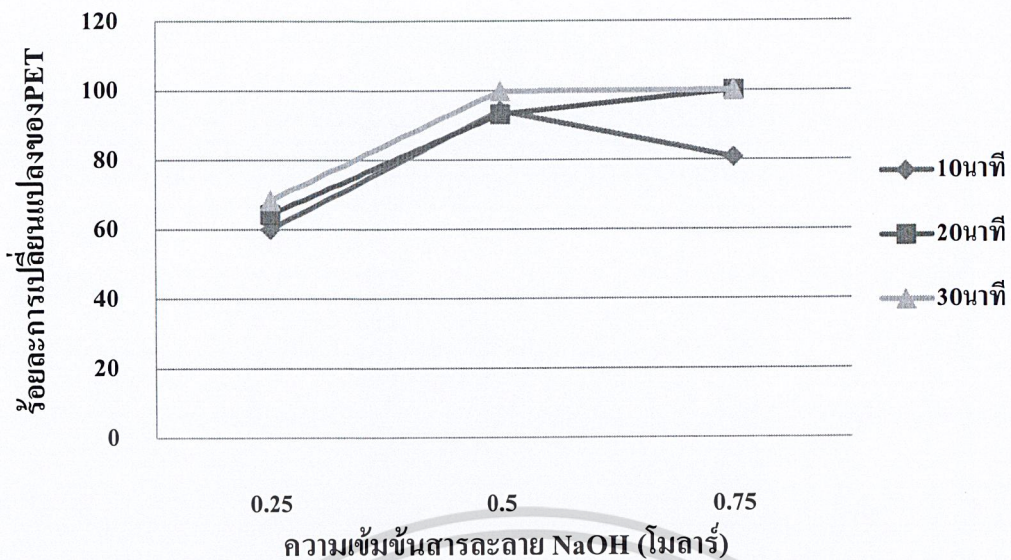
ตารางที่ 4.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ PET และผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่สภาวะการไฮโดรไลซิสต่างๆ

ความเข้มข้น NaOH (โมลาร์)	เวลาของการไฮโดรไลซิส (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ PET	ร้อยละของ PET ที่เหลือ	ร้อยละของ TPA ที่ได้
0.25	10	59.98	40.02	16.13
0.25	20	64.25	35.75	19.50
0.25	30	68.38	31.62	22.62
0.25	60	82.23	17.76	24.86
0.25	90	82.22	17.77	16.62
0.5	10	94.16	5.83	50.06
0.5	20	93.11	6.88	17.83
0.5	30	99.75	2.41	43.27
0.75	10	80.74	19.25	16.29
0.75	20	100	0	100
0.75	30	100	0	100

#### 4.1.1 ผลของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์

การทดลองในส่วนนี้จะศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ PET ร้อยละของกรดเทรฟทาสิกที่ได้จากปฏิกิริยา และร้อยละของ PET ที่เหลืออยู่ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล ที่ความเข้มข้น 0.25 , 0.5 และ 0.75 โมลาร์ ภายใต้อุณหภูมิจุดเดือดของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (180°C) และเวลาของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่าง ๆ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.3 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

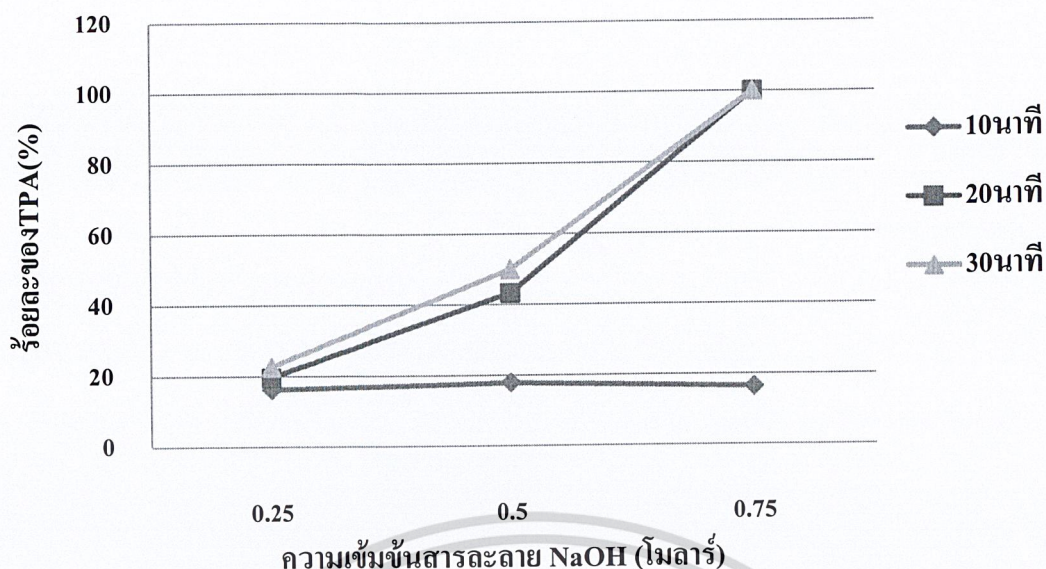


รูปที่ 4.1 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ PET ที่เวลาของปฏิกิริยาต่างๆ



รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อร้อยละของ PET ที่เหลืออยู่ที่เวลาของปฏิกิริยาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



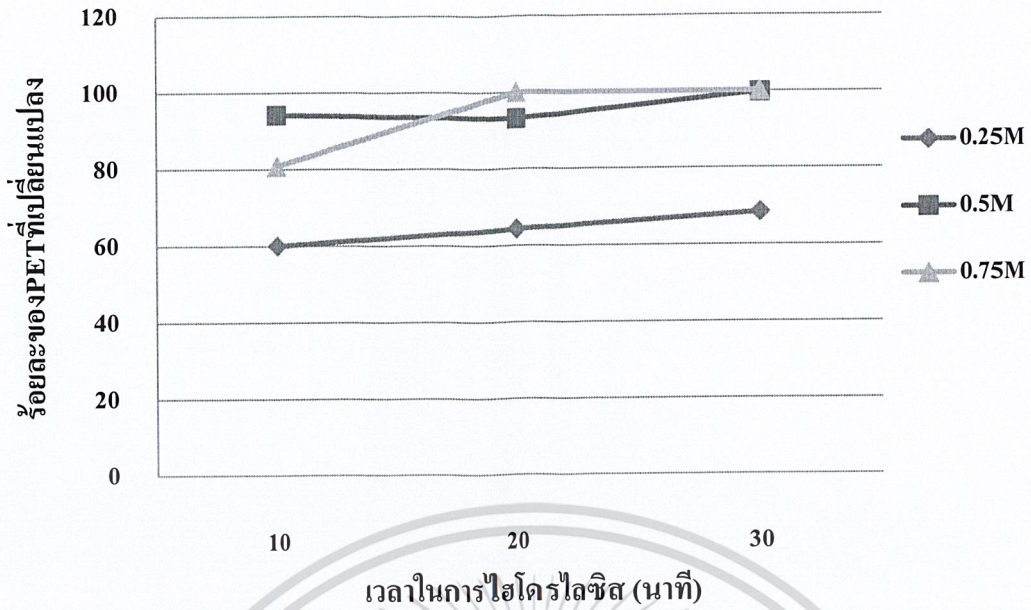
รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นของ โซเดียม ไฮดรอกไซด์ ที่มีต่อร้อยละของกรดเทรฟทาลิก ที่เวลาของปฏิกิริยาต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ PET ที่ถูกทำปฏิกิริยาไปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยในช่วงความเข้มข้น 0.25 M ถึง 0.50 M ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ PET จะเพิ่มขึ้นมากกว่าในช่วงความเข้มข้น 0.50 M ถึง 0.75 M และเมื่อคำนวณเป็นร้อยละของ PET ที่เหลืออยู่พบว่าร้อยละของ PET ที่เหลืออยู่จะลดลงอย่างมากเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0.25 M เป็น 0.50 M เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 0.75 M ร้อยละของ PET ที่เหลืออยู่จะน้อยมาก ดังแสดงผลในรูปที่ 4.2 สำหรับรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงร้อยละของกรดเทรฟทาลิกที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา ซึ่งมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

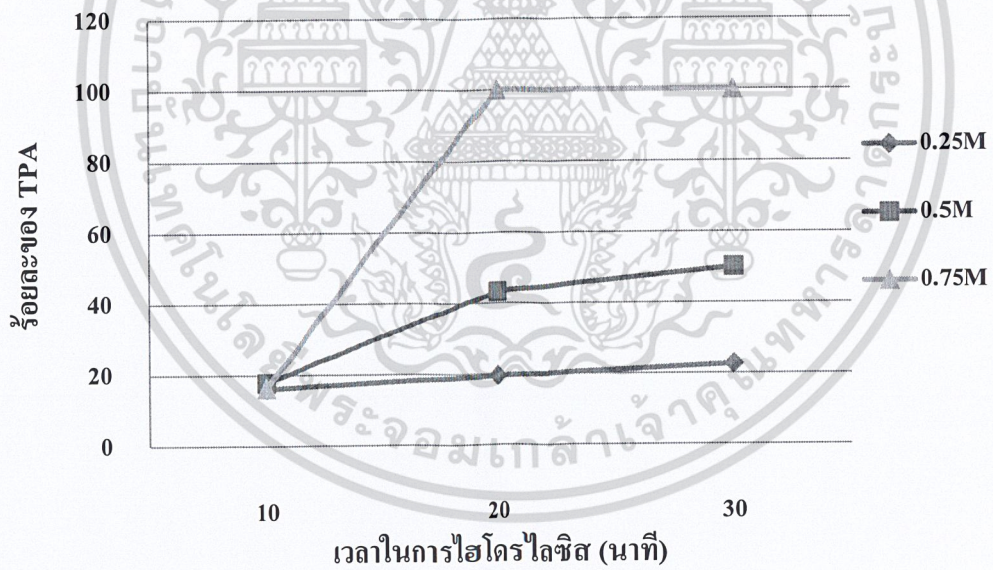
#### 4.1.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา

เวลาในการทำปฏิกิริยาถือว่าเป็นตัวแปรการทดลองที่สำคัญตัวแปรหนึ่ง ซึ่งมีผลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้จะศึกษาถึงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ PET ร้อยละของกรดเทรฟทาลิกที่ได้จากปฏิกิริยา และร้อยละของ PET ที่เหลืออยู่ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 10 20 และ 30 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 180°C ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล ต่าง ๆ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

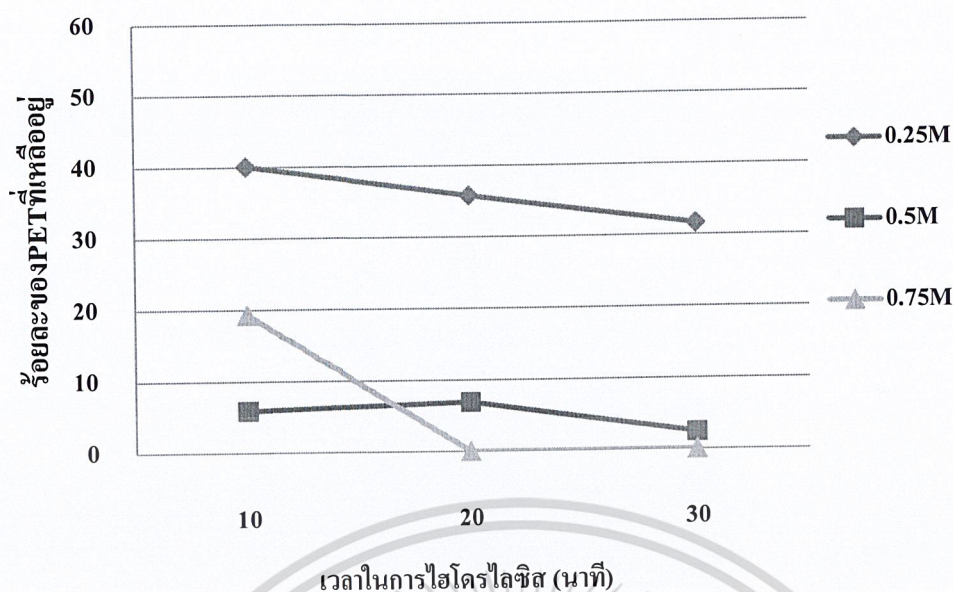


รูปที่ 4.5 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ PET ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.6 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของกรดเทรฟทาลิก ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของโซเดียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของPETที่เหลืออยู่ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ PET และร้อยละของกรดเทรฟทาลิกที่ได้จากปฏิกิริยา มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในทุก ๆ ความเข้มข้น โดยเฉพาะเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 และ 0.75 โมลาร์ ร้อยละของกรดเทรฟทาลิกจะสูงขึ้นมากกว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นที่ต่ำกว่า โดยปกติแล้วสำหรับปฏิกิริยาเคมีที่ทำในระบบแบบกะ (batch) เมื่อเพิ่มเวลาของปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตั้งต้นมีเวลามากพอที่จะเข้าทำปฏิกิริยาจนสมบูรณ์ การทดลองนี้ทำในระบบแบบกะเช่นกัน ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับที่กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นสรุปได้ว่า ที่เวลาของปฏิกิริยา 30 นาทีเป็นเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการไฮโดรไลซิสพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต โดยได้ร้อยละของกรดเทรฟทาลิกสูงสุดคือ 50.06 โดยร้อยละของ PET ที่ถูกทำปฏิกิริยาคือ 99.75 ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ และสภาวะที่ได้ร้อยละของ PET ที่เหลืออยู่สูงสุด คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 M และใช้เวลาของปฏิกิริยา 10 นาที

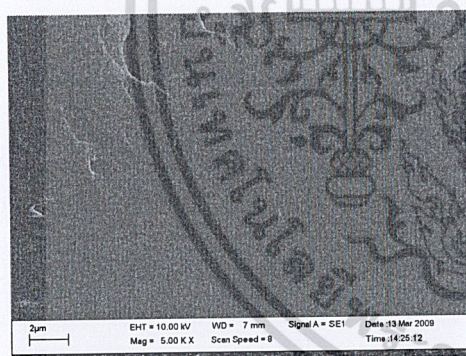
เนื่องจากในงานวิจัยนี้ จะนำ PET ที่เหลืออยู่ไปดูดซับสีข้อมองโกเรด ดังนั้นจากการทดลองสภาวะที่ไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตตัวดูดซับจาก PET คือ ความเข้มข้น NaOH 0.75 M เวลาไฮโดรไลซิส 20 และ 30 นาที เนื่องจากที่สภาวะนี้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดได้ดี ทำให้ PET ทั้งหมดถูก

เปลี่ยนไปเป็น TPA จึงไม่เหลือ PET มาใช้เป็นตัวดูดซับ สำหรับที่สภาวะการไฮโดรไลซิสด้วย NaOH 0.5 M และเวลา 30 นาที เหลือ PET อยู่เล็กน้อย ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการดูดซับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือก PET ที่เหลืออยู่จากสภาวะที่ใช้ NaOH 0.25 M และ 0.50 M ไปใช้ในการดูดซับสีข้อมคองโกเรด และนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่อไป

## 4.2 การวิเคราะห์กรดเทอร์พทาติกและพอลิเอทีลินเทอร์พทาเลตที่เหลือจากปฏิกิริยา

### 4.2.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

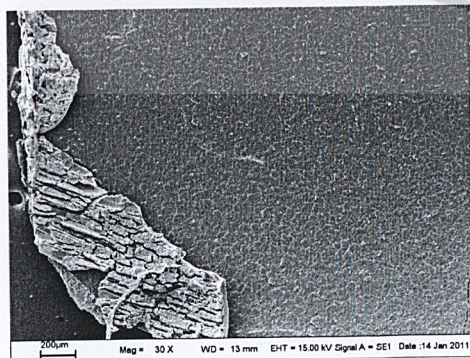
การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของขวด PET ที่ใช้แล้วและตัวดูดซับที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของขวด PET โดยวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เวลาและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.25 และ 0.50 โมลาร์ เวลาของการไฮโดรไลซิสต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.8



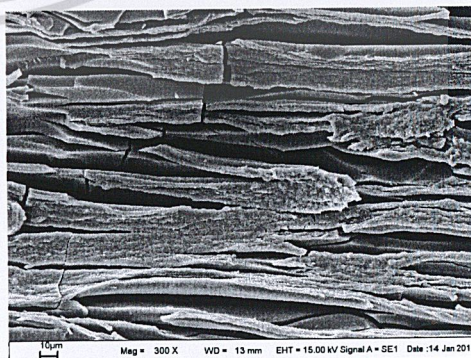
(ก) PET ก่อนทำปฏิกิริยา



(ข) NaOH 0.25 M 30 นาที 300 เท่า

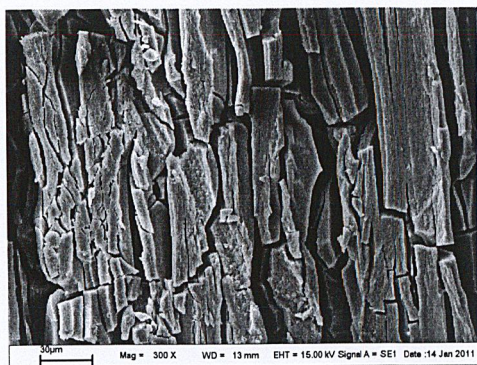


(ค) NaOH 0.25 M 30 นาที 30 เท่า

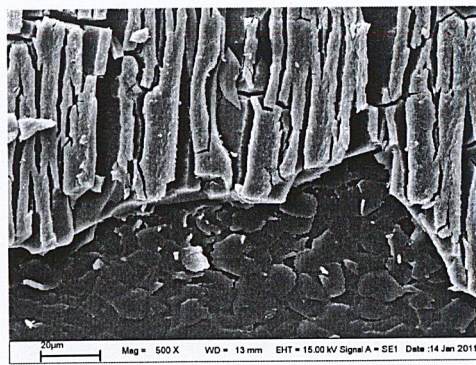


(ง) NaOH 0.25 M 90 นาที 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) NaOH 0.50 M 10 นาที 300 เท่า



(ฉ) NaOH 0.50 M 30 นาที 500 เท่า

#### รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ผ่านการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

- (ก) ก่อนทำปฏิกิริยาที่กำลังขยาย 5,000 เท่า
- (ข) โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.25 โมลาร์ เวลา 30 นาที ที่กำลังขยาย 300 เท่า
- (ค) โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.25 โมลาร์ เวลา 30 นาที ที่กำลังขยาย 30 เท่า
- (ง) โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.25 โมลาร์ เวลา 90 นาที ที่กำลังขยาย 300 เท่า
- (จ) โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ เวลา 10 นาที ที่กำลังขยาย 300 เท่า
- (ฉ) โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ เวลา 30 นาที ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.8 (ก) เป็นลักษณะพื้นผิวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตก่อนการทำปฏิกิริยาพบว่า ลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ เมื่อนำ PET ไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.25 โมลาร์ เวลา 30 นาที ลักษณะพื้นผิวจะถูกกัดเซาะเป็นร่องดังรูป 4.8 (ข) และจะเกิดเฉพาะบริเวณขอบของ PET ดังรูปที่ 4.8 (ค) เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นที่ 60 นาที พบว่าลักษณะพื้นผิวที่เกิดขึ้นจะเป็นริ้วยาวต่อเนื่องเป็นบริเวณกว้าง และเกิดร่องจำนวนมาก ดังรูปที่ 4.8 (ง) เนื่องจากใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้นจึงทำให้ริ้วรอยแตกมากขึ้น

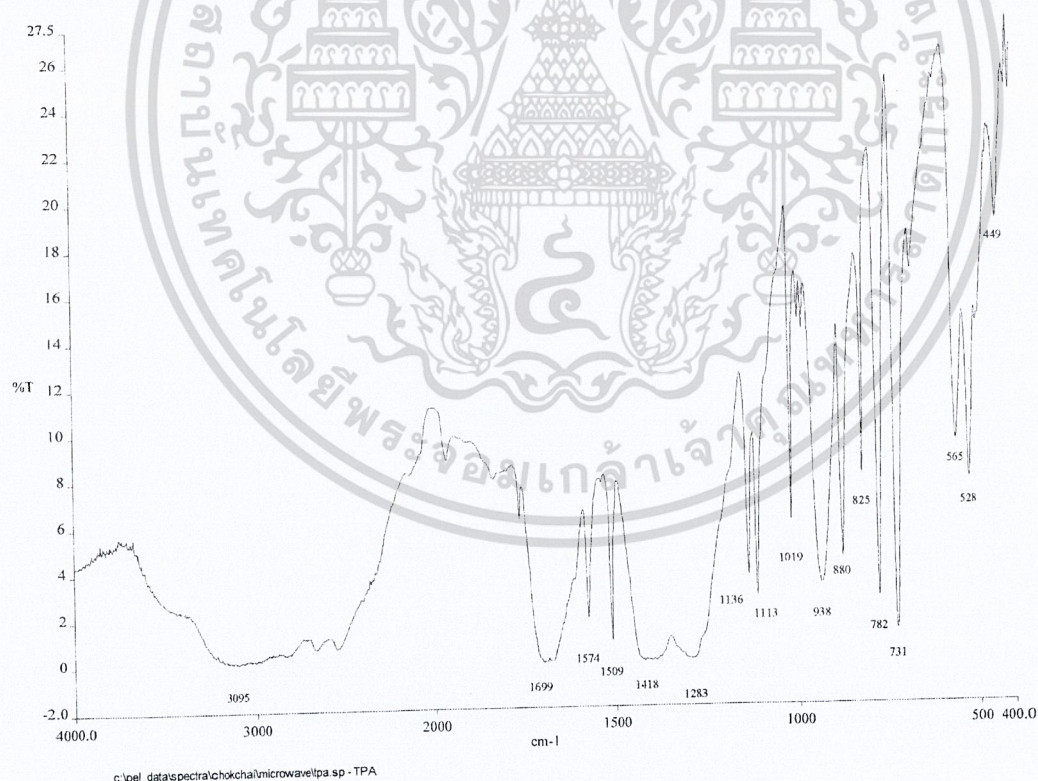
รูปที่ 4.8 (จ) เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ เวลา 10 นาที และ 30 นาที พบว่า ลักษณะพื้นผิวที่ได้รอยแตกเป็นริ้วเกิดขึ้นและหลุดร่อนออกไป ดังนั้นสรุปได้ว่า PET ที่ผ่านการไฮโดรไลซิสจะมีลักษณะพื้นผิวที่เป็นรอยแตกเป็นริ้ว นั่นคือจะทำให้พื้นที่ผิวของ PET ที่เหลืออยู่เพิ่มขึ้น โดยคาดว่า การแตกและหลุดร่อนจะเริ่มจากบริเวณขอบของชิ้น PET และค่อยๆ เข้าสู่ด้านในของ PET

#### 4.2.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ PET และกรดเทเรฟทาลิก ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR)

กรดเทเรฟทาลิก และ PET ที่เหลือจากปฏิกิริยา เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ PET ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล จะถูกนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมี ด้วยเครื่อง Fourier Transfer Infrared Spectrophotometer (FTIR) รุ่น Thermo 470 สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิธีการเตรียมตัวอย่างทำได้โดยนำกรดเทเรฟทาลิก มาบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ จากนั้นนำไปเข้าเครื่องอัดไฮดรอลิกอัดให้เป็นแผ่น แล้วนำมาใส่ลงในเซลล์ จากนั้นทำการวัดค่าสำหรับการเตรียมตัวอย่างตัวดูดซับ PET ทำเช่นเดียวกันกับขั้นตอนข้างต้น

FT-IR สเปกตรัมของกรดเทเรฟทาลิกบริสุทธิ์ กรดเทเรฟทาลิกที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของกรดเทเรฟทาลิกบริสุทธิ์ ประกอบด้วยแถบการดูดกลืนดังนี้

ก.ที่เลขคลื่น  $2400-3095\text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ O-H (O-H Stretching)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

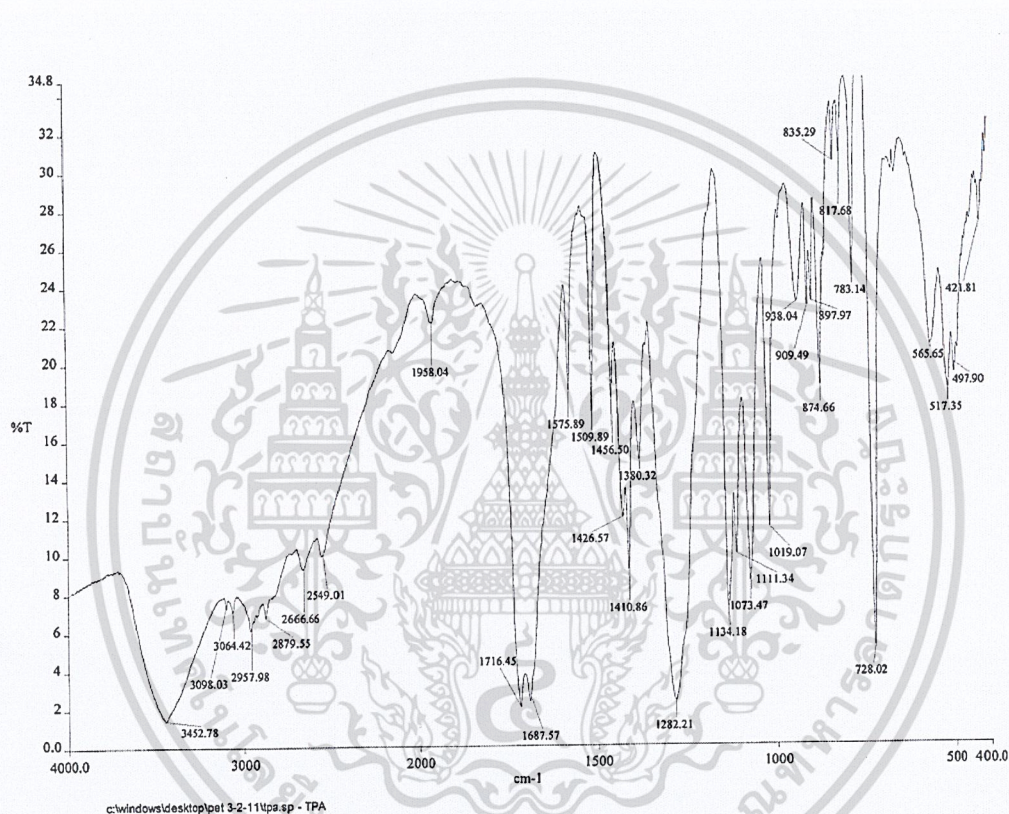
ข. ที่เลขคลื่น  $1699\text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของหมู่คาร์บอนิล C=O (C=O Stretching)

ค. ที่เลขคลื่น  $1509\text{-}1574\text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ C=C ในวงเบนซีน (C=C Stretching)

ง. ที่เลขคลื่น  $1283\text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ C-O-H (C-O-H Stretching)

จ. ที่เลขคลื่น  $825\text{-}880\text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ p-substituent ของ benzene

ฉ. ที่เลขคลื่น  $938\text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ O-H out-of plane bending vibration



รูปที่ 4.10 FT-IR สเปกตรัมของกรดเทเรฟทาลิกที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ PET ที่ความเข้มข้น NaOH 0.25 M เวลา 10 นาที ประกอบด้วย แถบการดูดกลืนดังนี้

ก. ที่เลขคลื่น  $3452\text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ O-H (O-H Stretching)

ข. ที่เลขคลื่น  $1716\text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของหมู่คาร์บอนิล C=O (C=O Stretching)

ค. ที่เลขคลื่น  $1410\text{-}1426\text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ C=C ในวงเบนซีน (C=C Stretching)

ง. ที่เลขคลื่น  $1282\text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ C-O-H (C-O-H Stretching)

จ. ที่เลขคลื่น  $817\text{-}835\text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ p-substituent ของ benzene

ฉ. ที่เลขคลื่น  $728\text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ O-H out-of plane bending vibration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 จะเห็นได้ว่า FT-IR สเปกตรัมของกรดเทรฟทาติกที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ PET มีลักษณะที่แสดงรายละเอียดขององค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีเหมือน FT-IR สเปกตรัมของกรดเทรฟทาติกบริสุทธิ์ โดยจะสังเกตได้ว่าเลขคลื่นของแต่ละองค์ประกอบมีความใกล้เคียงกัน

สำหรับ FT-IR สเปกตรัมของ PET จากขบวนการที่ยังไม่ผ่านการไฮโดรไลซิสและตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้ความเข้มข้น NaOH 0.25 M เป็นเวลา 10 นาที แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 FT-IR สเปกตรัมของ PET จากขบวนการที่ยังไม่ผ่านการไฮโดรไลซิส ประกอบด้วยแถบการดูดกลืนดังนี้

ก. ที่เลขคลื่น  $\sim 3000-3600 \text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของหมู่แอลคิล ( $\text{CH}_2$ )

ข. ที่เลขคลื่น  $\sim 1699-1800 \text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของหมู่คาร์บอนิล  $\text{C}=\text{O}$  ( $\text{C}=\text{O}$  Stretching) ของสารประกอบ ester

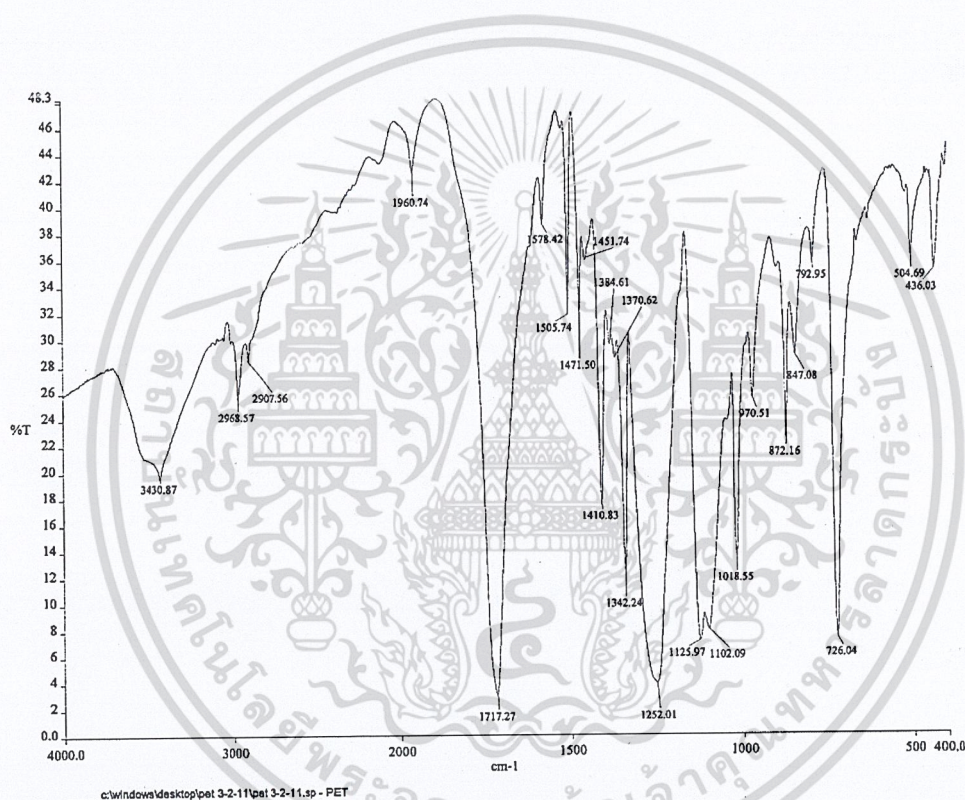
ค. ที่เลขคลื่น  $\sim 1500-1600 \text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ  $\text{C}=\text{C}$  ในวงเบนซีน ( $\text{C}=\text{C}$  Stretching)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.ที่เลขคลื่น  $\sim 1070-1150 \text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ C-O-H (C-O-H Stretching)

จ.หมู่ฟังก์ชันอื่นนอกเหนือจากที่กล่าว จะเป็นหมู่ฟังก์ชันของสารเติมแต่งต่างๆ

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่า PET ที่ได้จากขบวนการโพลีเมอไรเซชันที่ไม่ผ่านการไฮโดรไลซิส จะปรากฏเป็นแถบการยืดของหมู่คาร์บอนิล C=O (C=O Stretching) ของ สารประกอบ ester ที่ช่วงความยาวคลื่น  $\sim 1699-1800 \text{ cm}^{-1}$  และจะมีสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันอื่นปรากฏอยู่นอกเหนือจากที่ได้กล่าวไว้ หมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ที่ปรากฏจะเป็นหมู่ฟังก์ชันของสารเติมแต่งต่างๆที่มีอยู่ในขบวนการโพลีเมอไรเซชัน



รูปที่ 4.12 FT-IR สเปกตรัมของตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากการไฮโดรไลซิสด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นเวลา 10 นาที

จากรูปที่ 4.12 FT-IR สเปกตรัมของตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากการไฮโดรไลซิสด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นเวลา 10 นาที ประกอบด้วยแถบการดูดกลืนดังนี้

ก.ที่เลขคลื่น  $3430 \text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ O-H (O-H Stretching)

ข.ที่เลขคลื่น  $1717 \text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของหมู่คาร์บอนิล C=O (C=O Stretching)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.ที่เลขคลื่น  $1451 - 1471 \text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ C=C ในวงเบนซีน (C=C Stretching)

ง.ที่เลขคลื่น  $1102 - 1125 \text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการยืดของ C-O (C-O Stretching)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขวด PET ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่มีบทบาทในการดูดซับสีย้อม ซึ่งดูได้จากแถบการยืดของหมู่คาร์บอนิล C=O ของ สารประกอบ คาร์บอกซิลิกในช่วงความยาวคลื่น  $\sim 1717 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมีเลขคลื่นที่ต่ำกว่า แถบการยืดของหมู่คาร์บอนิล C=O ของ สารประกอบเอสเทอร์ ที่ได้จาก PET ที่ยังไม่ผ่านการไฮโดรไลซิส เนื่องจาก สารประกอบเอสเทอร์ มีหมู่เอเทอร์โออะตอมที่ต่ออยู่กับคาร์บอนิลคือ หมู่อัลคิล(-OCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-) ที่มีความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนจากหมู่คาร์บอนิลมากกว่า สารประกอบคาร์บอกซิลิกที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จึงทำให้ออกซิเจนในสารประกอบเอสเทอร์ดึงอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวเข้าไปช่วยเสริมพันธะไพของคาร์บอนิลมากกว่า เป็นผลให้พันธะไพแข็งแรงขึ้น ดังนั้นพลังงานที่จะทำให้พันธะคาร์บอนิลของสารประกอบเอสเทอร์สั่นได้ จะต้องมีความถี่ที่สูงขึ้น ก็คือมีเลขคลื่นที่มากกว่าของสารประกอบคาร์บอกซิลิก นั่นเอง

นอกจากนี้การปรากฏของแถบการยืดของ O-H ที่ช่วงความยาวคลื่น  $3204 \text{ cm}^{-1}$  ที่ปรากฏเฉพาะสารประกอบคาร์บอกซิลิก ไม่ปรากฏในสารประกอบเอสเทอร์ ทำให้เราสรุปได้ว่า ตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขวด PET ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกเปลี่ยนโครงสร้างจากเอสเทอร์เป็นคาร์บอกซิลิกซึ่งมีความเป็นหมู่กรดบนพื้นผิว

### 4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ PET

#### 4.3.1 การหาเลขไอโอดีน

เลขไอโอดีน เป็นค่าที่ใช้บอกความพรุนของอนุภาคของตัวดูดซับ หรือพื้นที่ผิวรวม (Total Surface Area, TSA) โดยมีหลักการคือหาปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเลขไอโอดีนจะแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวรวมของตัวดูดซับ เลขไอโอดีนของตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ PET ที่ใช้แล้ว ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 และ 0.5 โมลาร์ และเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสที่เวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 เลขไอโอดีนของตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เวลาของปฏิกิริยาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.25 และ 0.5 โมลาร์

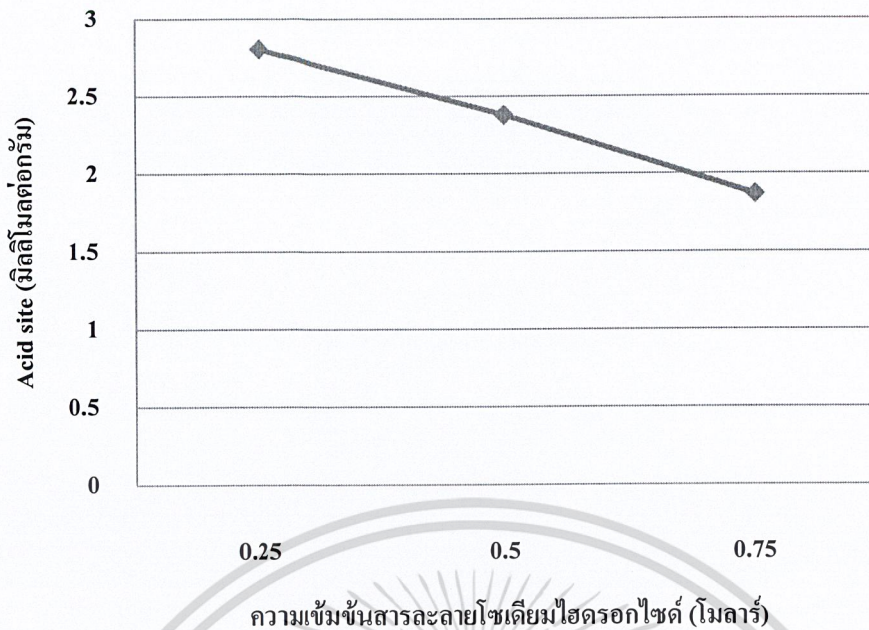
จากรูป 4.13 จะเห็นว่าตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ จะมีค่าเลขไอโอดีนสูงกว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ นั่นคือ ตัวดูดซับ PET ที่ถูกไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.25 โมลาร์ จะมีพื้นที่ผิวโดยรวมมากกว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM ในรูปที่ 4.8 นั่นคือ PET ที่ผ่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.25 โมลาร์ จะเกิดรอยแตกบนพื้นผิว แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นในการไฮโดรไลซิสเป็น 0.5 โมลาร์ รอยแตกก็จะเกิดการหลุดร่อนออกไป ทำให้พื้นที่ผิวโดยรวมลดลง ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซิส PET ในการเตรียมตัวดูดซับ คือ 0.25 โมลาร์

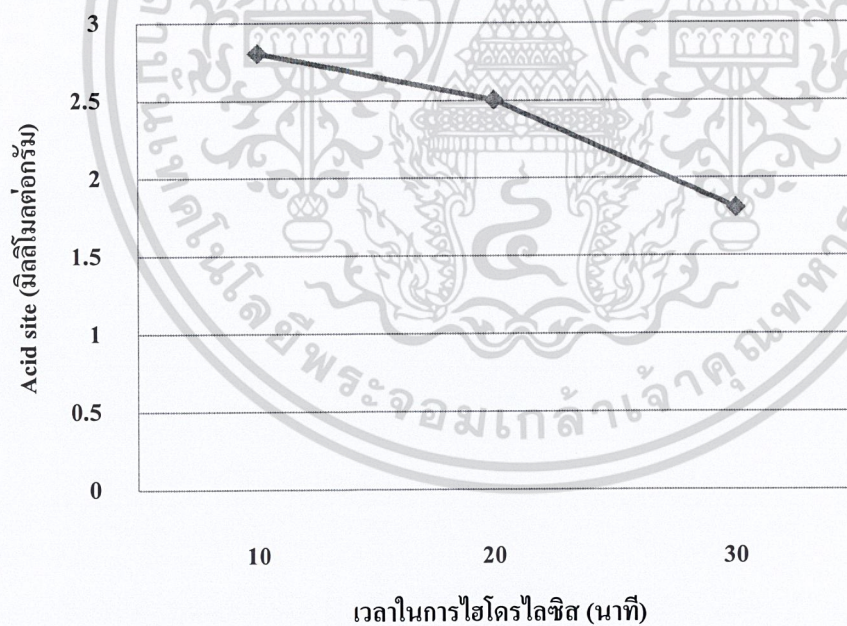
นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเวลาในการไฮโดรไลซิสมากขึ้น ค่าเลขไอโอดีนของตัวดูดซับ PET จะมีแนวโน้มลดลงที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาดำเนินไปมากขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาของปฏิกิริยา ทำให้ PET ถูกไฮโดรไลซิสจนเกิดเป็นรอยแตกบนพื้นผิว และเกิดการหลุดร่อนออกเมื่อใช้เวลาของปฏิกิริยานานขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวโดยรวมลดลง ดังนั้น เวลาที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสที่ทำให้ค่าเลขไอโอดีนสูงสุดคือ 10 นาที

#### 4.2.3 การหาหมู่กรด ( Acid Site) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ PET

จากการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ PET ที่ใช้แล้ว จะเห็นได้ว่า PET ที่ถูกไฮโดรไลซิสได้สมบูรณ์ จะให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลง PET เป็น 100 แต่ถ้การไฮโดรไลซิสนั้นเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ PET จะถูกไฮโดรไลซ์ได้บางส่วน (partial hydrolysis) ซึ่งทำให้บริเวณพื้นผิวของ PET ที่เหลืออยู่เกิดรอยแตกและอาจเกิดหมู่กรดขึ้น ซึ่งหมู่กรดที่พื้นผิวตัวดูดซับจะมีบทบาทในการดูดซับกับสีย้อมได้ ดังนั้นในการทดลองนี้ จะทำการวิเคราะห์หมู่กรดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับ PET ด้วยวิธีการไทเทรตย้อนกลับ (back titration) ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการวิเคราะห์หมู่กรดบนพื้นผิวตัวดูดซับ PET ที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.25 , 0.5 , และ 0.75 โมลาร์ โดยใช้เวลาของปฏิกิริยา 10 นาที แสดงดังรูปที่ 4.14 และผลของเวลาของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่มีผลต่อปริมาณหมู่กรดของตัวดูดซับ PET แสดงดังรูป 4.15



รูปที่ 4.14 ปริมาณหมู่กรดของตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ และเวลาไฮโดรไลซิส 10 นาที



รูปที่ 4.15 ปริมาณหมู่กรดของตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้เวลาของปฏิกิริยาต่างๆ และใช้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 โมลาร์

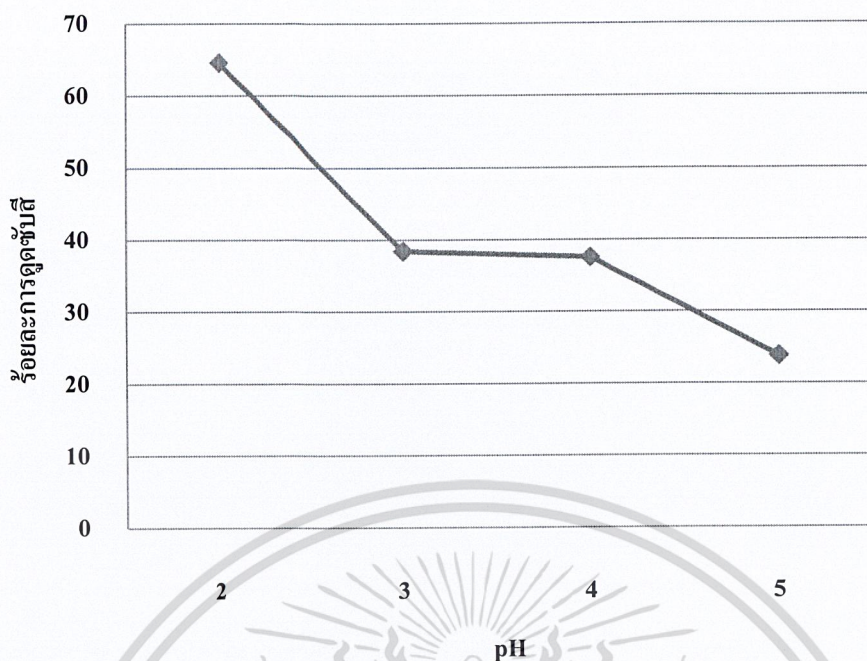
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.14 จะเห็นได้ว่าปริมาณหมู่กรดของตัวดูดซับ PET จะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และจากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้เวลาในการไฮโดรไลซิส PET นานขึ้น ปริมาณหมู่กรดของตัวดูดซับ PET จะมีค่าลดลงด้วยเช่นกันซึ่งสอดคล้องกับค่าเลขไอโอดีนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 โมลาร์ หมู่กรดที่พื้นผิวตัวดูดซับ PET นี้คาดว่าเป็นหมู่คาร์บอกซิลิกที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอสเทอร์ ดังนั้นสรุปได้ว่าปริมาณหมู่กรดของตัวดูดซับ PET จะมากขึ้นเมื่อเตรียมตัวดูดซับจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ (เวลาไฮโดรไลซิสคงที่) หรือใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสน้อยลง (ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่)

#### 4.4 การศึกษาการดูดซับสีย้อมสังเคราะห์ของไก่อเรดโดยใช้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ได้จากการไฮโดรไลซิสเป็นตัวดูดซับ

##### 4.4.1 ผลของ pH ของสารละลายสีย้อมของไก่อเรด

การทดลองในส่วนนี้จะศึกษาถึงผลของค่า pH ของสารละลายสีย้อมของไก่อเรด โดยจะนำตัวดูดซับ PET ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยเลือกตัวดูดซับที่ทำปฏิกิริยาที่สภาวะความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 โมลาร์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมของไก่อเรดเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่า pH 2 , 3 , 4 และ 5 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.16



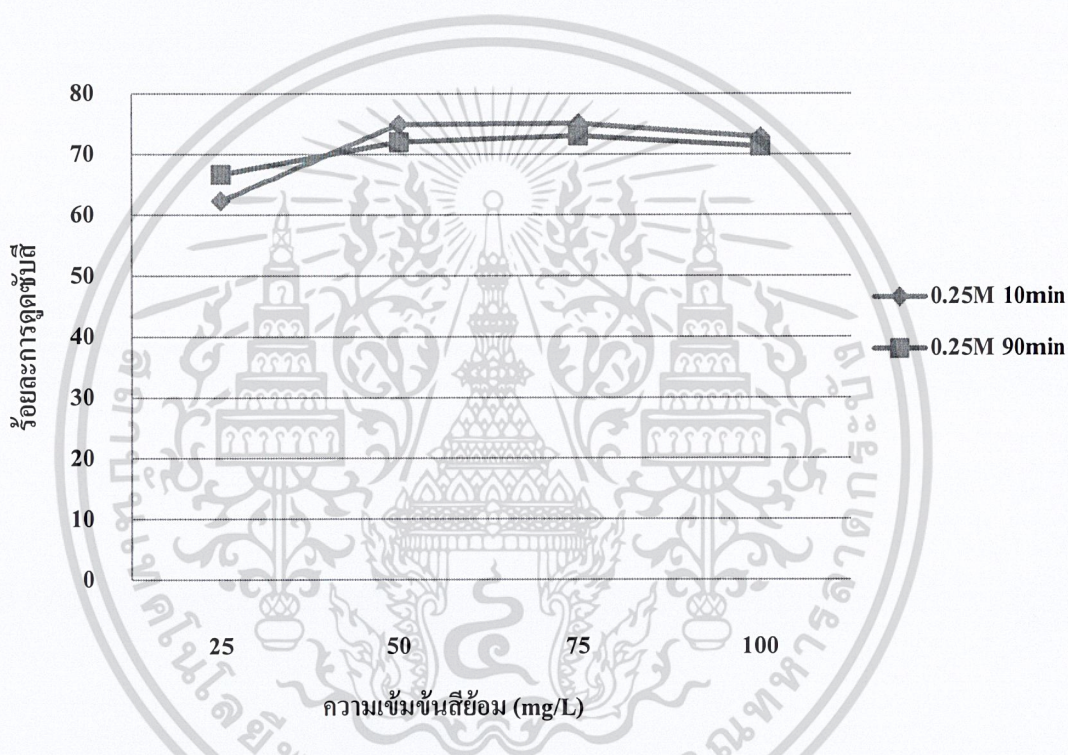
รูปที่ 4.16 ร้อยละการดูดซับตะกั่วของไอออนของโคบอลต์ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสภาวะค่า pH ต่างๆ โดยใช้ตัวดูดซับ PET จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ที่เวลา 10 นาที

จากรูปที่ 4.16 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับตะกั่วกับค่า pH ของสารละลายตะกั่วของไอออนโคบอลต์ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ตัวดูดซับ PET จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ที่เวลา 10 นาที พบว่า ร้อยละการดูดซับตะกั่วที่มีค่าที่สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 64.54 ซึ่งอยู่ในสภาวะค่า pH เท่ากับ 2 และร้อยละการดูดซับตะกั่วที่มีค่าที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 23.85 ในสภาวะค่า pH เท่ากับ 5

จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว จึงบอกได้ว่า เมื่อสารละลายตะกั่วของไอออนโคบอลต์อยู่ในสภาวะที่เป็นกรด คือ มีค่า pH เท่ากับ 2 จะทำให้เกิดประจุบวกภายในโครงสร้างของตะกั่ว ทำให้ตัวดูดซับที่มีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่แตกตัวเป็นคาร์บอกซิเลตไอออนบนพื้นผิวของตัวดูดซับ PET สามารถเกิดการดึงดูดทางประจุไฟฟ้ากัน จึงทำให้เกิดการดูดซับ

#### 4.4.2 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และความเข้มข้นของสีย้อมคองโกเรด

การทดลองในส่วนนี้จะศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีผลต่อความเข้มข้นของสีย้อมคองโกเรดที่ถูกดูดซับบน PET ซึ่งเตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยเลือกตัวดูดซับ PET ที่ได้จากปฏิกิริยาที่สภาวะความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 โมลาร์ ที่เวลา 10 และ 90 นาทีของปฏิกิริยาตามลำดับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมคองโกเรดเท่ากับ 25 , 50 , 75 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ของสารละลายเท่ากับ 2 โดยใช้เวลาในการดูดซับ 2 ชั่วโมง ผลการทดลองดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ร้อยละการดูดซับสีย้อมคองโกเรดในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตัวดูดซับ PET จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ที่เวลา 10 และ 90 นาที

จากรูปที่ 4.17 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นก่อนทำการดูดซับ โดยเลือกตัวดูดซับที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่สภาวะความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 โมลาร์ ที่เวลา 10 และ 90 นาที จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นจาก 25 จนถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ร้อยละการกำจัดสีย้อมจะอยู่ในช่วง 65 ถึง 75 โดยพบว่า ตัวดูดซับที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาที่ สามารถดูดซับสีย้อมได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมคองโก้เรด 75 มิลลิกรัมต่อลิตร ร้อยละการดูดซับสีอยู่ที่ร้อยละ 75.11 ส่วนตัวดูดซับที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที สามารถดูดซับสีย้อมได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมคองโก้เรด 75 มิลลิกรัมต่อลิตร ร้อยละการดูดซับสีอยู่ที่ร้อยละ 73.02

สำหรับกลไกในการดูดซับระหว่างตัวดูดซับ PET กับสีย้อมคองโก้เรด คาดว่าเกิดการดึงดูดทางประจุไฟฟ้าระหว่างหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่แตกตัวเป็นคาร์บอกซิเลตไอออนบนพื้นผิวตัวดูดซับ PET กับสีย้อมคองโก้เรดที่มีประจุบวกในสภาวะความเป็นกรดของสารละลายสีย้อม โดยจากรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เวลา 10 นาที จะสามารถดูดซับสีย้อมคองโก้เรดได้มากกว่าตัวดูดซับ PET ที่เตรียมได้ในเวลา 90 นาที อาจเนื่องมาจากหมู่กรดบนพื้นผิวตัวดูดซับ PET ที่เตรียมจากเวลาไฮโดรไลซิส 10 นาที มากกว่านั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมตัวดูดซับจากขวด PET ที่ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล เพื่อนำมาดูดซับสีข้อมองโกเรด ในน้ำเสียดังเคราะห์ โดยศึกษาผลของเวลาและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมองโกเรด จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นมากขึ้นและเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นกรดเทเรพทาติก และผลิตภัณฑ์รองคือ PET ที่เหลือ ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวเป็นรอยแตก และเกิดหมู่กรดบนพื้นผิว

2. เลขไอโอดีนและหมู่กรดของตัวดูดซับ PET มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเวลาในการไฮโดรไลซิส ตัวดูดซับ PET ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นเวลา 10 นาที จะมีเลขไอโอดีนและหมู่กรดสูงสุด

3. จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสี พบว่า ร้อยละการดูดซับสี จะดูดซับสีได้มากที่สุดเมื่อมีจำนวนหมู่กรดบนพื้นผิวมาก ดังนั้นที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อยๆและเวลาทำปฏิกิริยาสั้นๆจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีดีขึ้น

โดยตัวดูดซับ PET ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นเวลา 10 นาที จะให้ร้อยละการดูดซับสี 75.11% โดยมีร้อยละของตัวดูดซับ PET ที่สังเคราะห์ได้ 40.02%

## 5.2. ข้อเสนอแนะ

1. จากการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าพื้นผิวของ PET ที่ไฮโดรไลซิสไม่สมบูรณ์จะมีความเป็นรูพรุน มีรอยแตกบนพื้นผิวมากขึ้น ดังนั้นสามารถนำ PET ที่เหลือจากปฏิกิริยาไปพัฒนาเป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น สามารถดูดซับสารได้หลากหลายชนิดมากยิ่งขึ้น เช่น สารอินทรีย์ในน้ำเสีย โลหะหนักชนิดอื่น เป็นต้น

2. ควรศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับสีย้อมคองโกเรด ด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสPET

3. ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ PET ด้วยเทคนิคที่มีความแม่นยำสูง เช่น วิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเทคนิค BET และวิเคราะห์อุณหภูมิในการสลายตัวด้วยเทคนิค TGA

4. ควรศึกษาในสถานะที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 0.25 โมลาร์ และเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้อยกว่า 10 นาที เพื่อเปรียบเทียบดูผลกับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 โมลาร์

5. การศึกษา FT-IR สเปกตรัม ของ PET บริสุทธิ์ของขวดน้ำก่อนทำปฏิกิริยา อาจจะเตรียมตัวอย่างได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากจะต้องบดให้ละเอียดแล้วอัดเป็นแผ่นบางๆ ดังนั้นควรนำ PET จากขวดดื่มก่อนทำปฏิกิริยาไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเพื่อให้แข็งตัว จากนั้นนำมาบดเป็นผงแล้วนำไปอัดเป็นแผ่นบางๆแล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Vaidya , U.R.; Nadlkarni , V.M. Unsaturated Polyesters from PET Wastes : Kinetics of Polycondensation. *J.Appl. Polym. Sci.* 1987 , 34, 235-245.
- [2] Vaidya , U.R.; Nadlkarni , V.M. Polyester Polyols for Polyurethanes from PET Waste :Kinetics of Polycondensation. *Appl. Polym.Sci.* 1988, 35, 775-785.
- [3] Gentic , D. Glycolytic Recycle of Poly[ethylene terephthalate] [PET]. *Macromol. Chem., Macromol. Symp.* 1992, 57, 185-190.
- [4] Ravens , D.A.S. The chemical Reactivity of Poly[ethylene terephthalene] : Heterogeneous Hydrolysis by Hydrochloric Acid. *Polymer [London]*. 1960, 1, 375-380.
- [5] Yoshioka , T.; Sato , T.; Okuwaki , A. Hydrolysis of Waste PET by Sulfuric Acid at 150 °C for a chemical Recycling. *J. Appl.Polym. Sci.* 1994 , 52 , 1353-1355.
- [6] Yoshioka , T.; Motoki , T.; Okuwaki , A. Kinetics of Hydrolysis of Poly[ethylene terephthalate] Powder in Sulfuric Acid by a Modified shrinking-Core Model. *Ind.Eng.Chem.Res.* 2001 , 40 , 75-79.
- [7] Kao , C.Y.; Cheng , W.H.; Wan , B.Z. Investigation of Alkaline Hydrolysis of Poly[ethylene terephthalate] by Differential Scanning Calorimeter and Thermogravimetric Analysis. *J. Appl. Polym.Sci.* 1988 , 70 , 1939-1944
- [8] Wan , B.; Kao , C.Y.; Cheng , W.H. Kinetics of Depolymerization of Poly[ethylene terephthalate] in a Potassium Hydroxide Solution. *Ind. Eng.Chem.Res.* 2001 , 40 , 509-514.
- [9] Saunders, K.J. Organic Polymer Chemistry. London: Chapman and Hall, 1973.
- [10] Brydon, J.A. Plastics Materials. 3<sup>rd</sup> edition, London: Newnes-Butterworths, 1975.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] ชูติมา สันท์ภักดี และ พรพิมล พัดภู , การดูดซับทองแดงและแคดเมียมในน้ำชะละลายจากกากตะกอนโดยใช้ไคโตซาน , วิศวกรรมพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพมหานคร 2544
- [12] Faust , S.D. and Aly , O.M. Adsorption Process for Water Treatment. Stoneham , Butterworth , 1977 , 217-225
- [13] The basic operating principles of the sorptomatic , 1990[online] , เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 ตุลาคม 2552) , <http://saf.chem.ox.ac.uk/Instruments/BET/sorptoptprin.html>
- [14] ณิษรัตน์ มะลิมาศ , วีรพงศ์ วุฒิวัฒนากุล และ อสมานัยวิริยะ , ศึกษาการกำจัดฤทธิ์โลหะหนักด้วยวิธีดูดซับด้วยเส้นใยเคลือบด่างและการทำให้เป็นก้อนซีเมนต์ , วิศวกรรมพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพมหานคร 2546
- [15] พรสุดา ชุนน์ลือชานนท์ และ สุวภัทร์ อภัยสุวรรณ , การฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนด้วยพีซีบีเอด้วย , วิศวกรรมพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพมหานคร 2545
- [16] สุภาพ ธาราศักดิ์. การศึกษาปฏิกิริยาเคมีย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต , วิศวกรรมพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณบูร. 2540.
- [17] Yoshioka , T.; Motoki , T.; Okuwaki , A. Kinetics of Hydrolysis of PET Powder in Nitric Acid by a Modified shrinking-Core Model. *Ind.Eng.Chem.Res.* 1998 , 37 , 336-339.
- [18] Wan , B.; Kao , C.Y.; Cheng , W.H. Kinetics of Depolymerization of Poly[ethylene terephthalate] in a Potassium Hydroxide Solution. *Ind. Eng.Chem.Res.* 2001 , 40 , 509-514.
- [19] Krisztina L., Andras, S. Surface Characterization of Polyethyleneterephthalate (PET) Based Activated Carbon and The Effect of pH on Its Adsorption Capacity from Aqueous Phenol and 2,3,4-Trichlorophenol Solutions. *Carbon.* 2001, 39, 1945-1953.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[20] Yoshioka , T.; Masaki,O.; Akitsugu,O. Conversion of a Used Poly(ethylene terephthalate) Bottle into Oxalic Acid and Terephthalic Acid by Oxygen Oxidation in Alkaline Solutions at Elevated Temperature. *Ind.Eng.Chem.Res.* 2003, 42, 675 -679.

[21] จิราวัฒน์ มั่นชูพงษ์, วิศวไพศาล ชมเดชดี, การเปลี่ยนพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจากขวดที่ใช้แล้วให้เป็นกรดเทเรฟทาลิกและกรดออกซาลิกด้วยสารละลายกรดไนตริก, โครงการงานพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.

[22] ภาสกร สว่างวุฒิธรรม, ศุภโชค ชายแสน, สมชาย กองทรัพย์เจริญ, การดูดซับตะกั่วและโครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์และซีเถ้าลอย โครงการงานพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.

[23] นางสาวจตุภัทร วชิรปानी, นางสาวจรุงจันทร์ ศักดิ์ธรรมเจริญ, นางสาวจุติพร อ่ำไพรัตน์, การเตรียมตัวดูดซับจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว สำหรับกำจัดโครเมียม(+6) ในน้ำเสีย โครงการงานพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.

[24] APHA , AWWA and WPCF , 1995 Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 19<sup>th</sup> ed

[25] สีย้อมและการแบ่งประเภทของสีย้อม (ออนไลน์). (2552). สืบค้นจาก : <http://chartree.wordpress.com/> [15 กันยายน 2553]

[26] ANNEX II DYES AND PIGMENTS (ออนไลน์). (2552). สืบค้นจาก : [http://aida.ineris.fr/bref/bref\\_text/bref\\_text/anglais/bref/BREF\\_tex\\_gb45.html](http://aida.ineris.fr/bref/bref_text/bref_text/anglais/bref/BREF_tex_gb45.html) [15 กันยายน 2553]

[27] Journal of the Brazilian Chemical Society(ออนไลน์). (2003). สืบค้นจาก : [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-50532003000400025&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-50532003000400025&script=sci_arttext) [15 กันยายน 2553]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[28] อินทรายจากสี่ข้อม(ออนไลน์). (2540). สืบค้นจาก :

<http://www.bknowledge.org/index.php/object/page/access/health/files/9.html> [15 กันยายน 2553]

[29] วิธีการบำบัดน้ำเสีย(ออนไลน์). (2551). สืบค้นจาก :

[http://www.wvomc.com/index.php?lay=boardshow&ac=webboard\\_show&Category=wwomccom&hispage=1&No=225263](http://www.wvomc.com/index.php?lay=boardshow&ac=webboard_show&Category=wwomccom&hispage=1&No=225263) [15 กันยายน 2553]

[30] A.OKU,L.-C. HU, E. YAMADA . Alkali Decomposition of Poly(ethylene terephthalate) with Sodium Hydroxide in Noaqueous Ethylene Glycol : A Study on Recycling of Terephthalic Acid and Ethylene Glycol. *Ind. Eng.Chem.Res.*1996 . 15.595-601.

[31] Toshiaki Yoshioka, Tsutomu Motoki and Akisugu Okuwaki. Kinetic of Hydrolysis of Poly(ethylene terephthalate) Powder in Sulfuric Acid by a Modified Shrinking-Core Model. *Ind. Eng.Chem.Res.*2001,40.75-79.

[32] L.D. Benefield, J.F. Judkins Jr., B.L. Weand, Process Chemistry for Wastewater Treatment, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1982,pp. 433-439.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### การเตรียมสารเคมีในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส PET ในสถานะเบส

#### 1. การเตรียมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)

นำขวดน้ำดื่มPETชนิดใส ปริมาตร 1.5 ลิตร นำไปล้างให้สะอาดและตากแดดให้แห้งเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก จากนั้นนำไปตัดเป็นชิ้นเล็กๆขนาด 1x1 เซนติเมตร

#### 2. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอล

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ เตรียมได้โดยให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเม็ดละลายในเอทิลีนไกลคอล

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 4, 8 และ 12 กรัมโดยใช้เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง จากนั้นตวงเอทิลีนไกลคอลปริมาตร 400 มิลลิลิตรใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร ใส่โซเดียมที่ชั่งแล้วลงไปโดยการละลายนั้นให้ความร้อนเล็กน้อยเพื่อให้สารละลายนั้นละลายได้เร็วขึ้นจะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไกลคอลเข้มข้น 0.25, 0.5 และ 0.75 โมลาร์ตามลำดับ

## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์ปริมาณสีข้อม

#### 1. การเตรียมสารเคมี

##### 1.1 สารละลายสต็อกสีข้อมคองโกเรดเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งสีข้อมคองโกเรดจำนวน 1 กรัม ใช้เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง จากนั้นละลายด้วยน้ำกลั่นจำนวน 500 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้พอดี จะได้สารละลายสต็อกสีข้อมคองโกเรดเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

##### 1.2 การสร้างกราฟมาตรฐานสีข้อมคองโกเรด

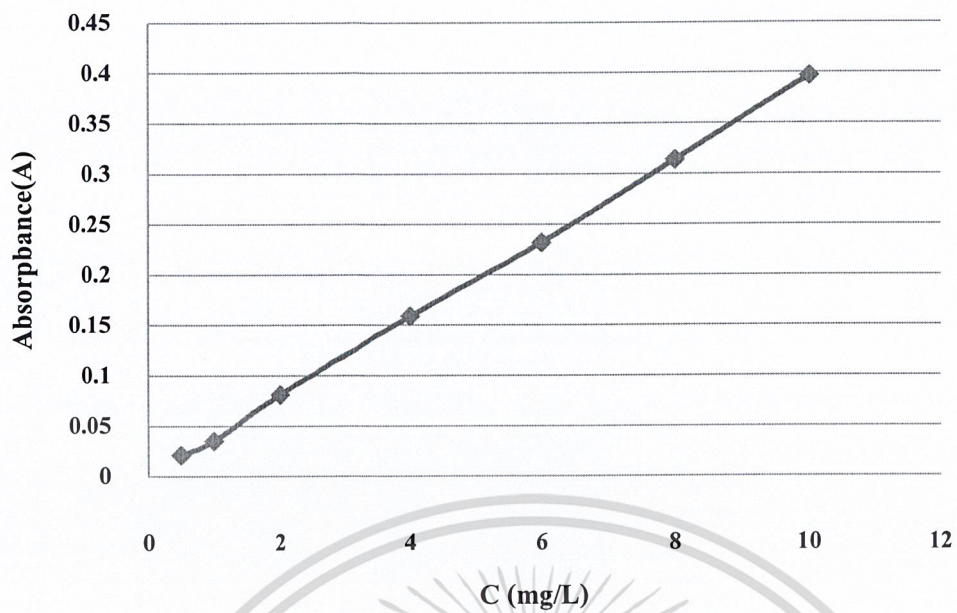
เปิดสารละลายสต็อกสีข้อมคองโกเรดมา 12.5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายสีข้อมคองโกเรดเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

เปิดสารละลายสต็อก 0.5 , 1 , 2 , 4 , 6 , 8 และ 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้ความเข้มข้น 0.5 , 1 , 2 , 4 , 6 , 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ดังตารางที่ ข-1 และกราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ ข-1 จากนั้นนำมาตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 498 นาโนเมตร

ตาราง ข-1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นของสีข้อมคองโกเรดต่างๆ

C (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.5	0.021
1	0.035
2	0.081
4	0.159
6	0.232
8	0.314
10	0.397

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานของสีข้อมคองโก้เรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์เลขไอโอดีน

#### 1. การเตรียมสารละลายสำหรับวิเคราะห์เลขไอโอดีน

- 1) กรดไฮโดรคลอริกปริมาตร 70 ml มาใส่ในน้ำกลั่น 550 ml. โดยใช้ขวดวัดปริมาตร
- 2) โซเดียมไทโอซัลเฟต (0.1M) ละลาย  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  24.820 g ในน้ำกลั่นต้มเดือดเติม 0.1 g ของโซเดียมคาร์บอเนต ปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร
- 3) สารละลายมาตรฐาน  $\text{I}_2$  (0.1M) ชั่ง 12.7 g และ KI 19 g ใส่ในบีกเกอร์เขย่าในเข่าก้น เติมน้ำ 2-5 ml เขย่าจนกระทั่ง  $\text{I}_2$  และ KI เข่าก้นดี ค่อยๆเติมน้ำทีละ 5 ml ลงในบีกเกอร์ ขณะที่ยังปั่นคววนอยู่จนปริมาตรรวมเท่ากับ 60 ml เขย่าเป็นเวลา 4 hr หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้เทลงใน Volume metrix flask ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
- 4) โพแทสเซียมไอโอเดต (0.1M) ชั่ง  $\text{KIO}_3$  3.65 g ในน้ำ 100 ml ปรับปริมาตรเป็น 1000 ml
- 5) แป้ง 1g ละลายน้ำกลั่นที่ต้มเดือด ปรับปริมาตรเป็น 1000 ml

#### 2. การเทียบมาตรฐานสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

ปิเปต 25 ml  $\text{KIO}_3$  จากข้อ 4 ลงใน 250 ml flask จากนั้นเติม  $2 \pm 0.01$  g ของ KI ลงใน flask แล้วเขย่า ปิเปต 5 ml ของ HCl ลงใน flask ไทเทรต iodine ด้วยสารละลาย  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  จนเป็นสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแป้งลง 2-3 หยด แล้วไทเทรตต่อจนไม่มีสี

#### 3. การเทียบมาตรฐานสารละลายไอโอดีน

ปิเปต 25 ml ละลาย  $\text{I}_2$  (ข้อ 3) ลงใน 250 ml flask แล้วไทเทรตกับ  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  จนสารละลาย iodine เป็นสีเหลืองเติมน้ำแป้ง 2-3 หยด แล้วไทเทรตต่อจนไม่มีสี

#### 4. ตัวอย่างวิธีการวิเคราะห์หาค่าเลขไอโอดีน(Iodine Number)

การหาค่าความเข้มข้นมาตรฐานของโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่	ปริมาณ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ ( $\text{cm}^3$ )
1	27.5
2	26.2
3	27.5
เฉลี่ย	27.06

$$N_1 = \frac{(PR)}{S}$$

โดย  $N_1$  คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไทโอซัลเฟต  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (N)

P คือ ปริมาณของโพแทสเซียมไอโอเดต  $\text{KIO}_3$  (mL)

R คือ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอโอเดต  $\text{KIO}_3$  (N)

S คือ ปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (mL)

ตัวอย่าง : 
$$N_1 = \frac{25(0.1)}{27.06} = 0.0923 \text{ N}$$

การหาความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลายไอโอดีน

ครั้งที่	ปริมาณ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ ( $\text{cm}^3$ )
1	22.95
2	24.6
3	25.00
เฉลี่ย	24.18

$$N_2 = \frac{(SN_1)}{I}$$

โดย  $N_2$  คือ ความเข้มข้นของไอโอดีน (N)

S คือ ปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (mL)

$N_1$  คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไทโอซัลเฟต  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (N)

I คือ ปริมาณของไอโอดีน (mL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง :

$$N_2 = \frac{23.8(0.1)}{24.18} = 0.0967N$$

การหาเลขไอโอดีน หาได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{Iodine Number} = \frac{X}{M} = \frac{[A - (DF)(B)(S)]}{M}$$

โดย  $\frac{X}{M}$  คือ การดูดซับไอโอดีนเป็นมิลลิกรัมต่อตัวดูดซับ 1 g (mg/g)

M = ปริมาณตัวดูดซับ (g)

$N_1$  คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไทโอซัลเฟต  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (N)

$N_2$  คือ ความเข้มข้นของไอโอดีน (N)

$$A = 12693.0 * N_2$$

$$B = 126.93 * N_1$$

ตัวอย่าง :

$$\frac{X}{M} = \frac{1227.4131 - (2.2)(11.72)(44.2)}{0.1053}$$

$$= 833.4311$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้