

ผลของสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ต่อการออกซิเดชันสถานะของแข็งของพอลิเอทิลีนแวกซ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effect of organic peroxides on solid state oxidation of polyethylene wax



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ต่อการออกซิเดชันสถานะ ของแข็งของพอลิเอทิลีนแวกซ์
โดย	น.ส.ธัญชฎา ทิพย์ไกรสร
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา หิญาชีระนันท์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ)	

ธัญญา ทิพย์ไกรสร : ผลของสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ต่อการออกซิเดชันสถานะของแข็งของพอลิเอทิลีนแวกซ์. (Effect of organic peroxides on solid state oxidation of polyethylene wax) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลของสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์และภาวะที่เหมาะสมในการผลิตออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ เพื่อให้ได้ค่าความเป็นกรดที่มากกว่า 13 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นในภาคอุตสาหกรรม ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดต้นทุนการผลิตได้ โดยใช้สารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์คือ หนึ่ง,หนึ่ง-บิส-(เติร์ต-เอมิลเปอร์ออกซี)ไฮโคลเฮกเซน และ ได-เติร์ต-บิวทิลเปอร์ออกไซด์ เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก และใช้แก๊สอากาศ (Air zero) ในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 60 ถึง 180 นาที อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 90 ถึง 130 องศาเซลเซียส และปริมาณของสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ในช่วงร้อยละ 2 ถึง 8 โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์จากปริมาณพอลิเอทิลีนแวกซ์ 100 กรัม ได้แก่ เวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 123 องศาเซลเซียส และปริมาณของสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์หนึ่ง,หนึ่ง-บิส-(เติร์ต-เอมิลเปอร์ออกซี)ไฮโคลเฮกเซน ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก จะได้ค่าความเป็นกรด 15.23 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR และ NMR ยังยืนยันว่าพอลิเอทิลีนแวกซ์ถูกออกซิไดซ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์	ลายมือชื่อนิสิต
ปี	2563	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
การศึกษา		

6270180723 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Polyethylene wax / Organic peroxides / Oxidation reaction / SEM / FTIR
/ NMR

Thananchada Tippayakraisorn : Effect of organic peroxides on solid state oxidation of polyethylene wax. Advisor: Assoc. Prof. PRASERT REUBROYCHAROEN, Ph.D.

This research aims to study the effect of organic peroxides and optimum conditions for producing oxidized polyethylene wax with an acid number of more than 13 mg KOH/g using a batch reactor. Considering this acid number of more than 13 mg KOH/g is an ideal value to be used as a lubricant in industries to increase production efficiency and to reduce production costs. Using organic peroxides, 1,1-Bis(tert-amylperoxy)cyclohexane and Di-tert-butyl peroxide as the initiator at a concentration of 80 wt% and using air zero in the oxidation reaction with the reaction time 60-180 min, the reaction temperature 90-130°C, and the amount of organic peroxides 2-8 wt%. From the experiment, the results showed that the optimal condition to produce oxidized polyethylene wax from 100 grams of polyethylene wax is from using the following conditions: the reaction time 180 min, the reaction temperature 123°C, and the amount of organic peroxides 1,1-Bis(tert-amylperoxy)cyclohexane 6 wt%, resulted in an acid number of 15.23 mg KOH/g. Furthermore, the FTIR spectroscopy and NMR analysis confirmed that polyethylene wax was oxidized in a batch reactor.

Field of Study:	Petrochemistry and Polymer Science	Student's Signature
Academic Year:	2020	Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีโดยความกรุณาจากรองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษา คอยสนับสนุน ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนการทำการวิจัยจนกระทั่งสำเร็จตามวัตถุประสงค์ ข้าพเจ้าตระหนักถึงความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา วิทยุธีระนันท์ ประธานสอบวิทยานิพนธ์ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทั้งสองท่านคือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต และรองศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ ที่ให้ความกรุณาและสละเวลาในการมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ รวมถึงเจ้าหน้าที่และนักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการทุกท่านที่คอยให้ คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณอาจารย์ทุก ๆ ท่านรวมถึงเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ทุกคนทั้งในภาควิชาเคมีเทคนิคและในหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่คอยให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้ และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จลุล่วง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ธัญชฎา ทิพย์ไกรสร

สารบัญ

หน้า

.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญรูป	1
สารบัญสมการ.....	2
สารบัญตาราง.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	2
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	2
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 พอลิเมอร์ (Polymer)	6
2.1.1 จำแนกตามแหล่งที่มา	6
2.1.2 จำแนกตามชนิดของมอนอเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุล.....	6
2.1.3 จำแนกตามลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์.....	8
2.1.4 จำแนกตามปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์.....	9
2.1.5 จำแนกตามลักษณะการใช้งาน	10

2.2 พอลิเอทิลีน (Polyethylene).....	11
2.2.1 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)	12
2.2.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE) ..	12
2.2.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาก (Very Low Density Polyethylene, VLDPE).....	13
2.2.4 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (Middle Density Polyethylene, MDPE).....	13
2.2.5 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)	14
2.3 พอลิเอทิลีนแวกซ์ (Polyethylene wax).....	16
2.4 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)	17
2.4.1 ปัจจัยที่ส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัว	17
2.4.2 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction)	18
2.4.3 กลไกการปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน.....	19
2.5 สารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ (Organic peroxide)	20
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	23
3.1 สารเคมี.....	23
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีนแวกซ์.....	23
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการไทเทรตหาค่าความเป็นกรด (Acid number).....	23
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	23
3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีนแวกซ์	23
3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการไทเทรตหาค่าความเป็นกรด (Acid number).....	27
3.2.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ โดยใช้วิธี ASTM D 1386-98	28
3.2.4 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของพอลิเอทิลีนแวกซ์และผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์ พอลิเอทิลีนแวกซ์	29

3.2.4.1 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	29
3.2.4.2 เครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)	30
3.2.4.3 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, NMR)	30
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	31
3.3.1 ทำการตั้งอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ก่อนใส่ตัวอย่าง	31
3.3.2 เตรียมพอลิเอทิลีนแวกซ์และสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่ใช้เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา	31
3.3.3 นำพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผสมสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์แล้วบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	32
4.1 ศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา	32
4.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	33
4.3 ศึกษาผลของปริมาณสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา	34
4.4 ภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันสถานะของแข็งของพอลิเอทิลีนแวกซ์	36
4.5 โครงสร้างของเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ต่อค่าความเป็นกรด	37
4.6 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	38
.....	39
4.7 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)	40
4.8 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, NMR)	42
4.9 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อเพิ่มความมีขั้วของพอลิเอทิลีนแวกซ์	44

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	46
5.1 สรุปผลการทดลอง	46
5.1.1 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา.....	46
5.1.2 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	46
5.1.3 ผลของปริมาณสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์	46
5.1.4 ภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันสถานะของแข็งของพอลิเอทิลีนแวกซ์ ..	47
5.1.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของพอลิเอทิลีนแวกซ์และผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	48
บรรณานุกรม	49
ภาคผนวก ก การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	52
ภาคผนวก ข การเตรียมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์.....	53
ประวัติผู้เขียน.....	54

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 โคพอลิเมอร์แบบสุ่ม.....	7
รูปที่ 2.2 โคพอลิเมอร์แบบสลับ	7
รูปที่ 2.3 โคพอลิเมอร์แบบบล็อก	8
รูปที่ 2.4 โคพอลิเมอร์แบบกราฟต์	8
รูปที่ 2.5 พอลิเมอร์แบบเส้นตรง	8
รูปที่ 2.6 พอลิเมอร์แบบกิ่ง	9
รูปที่ 2.7 พอลิเมอร์แบบร่างแห	9
รูปที่ 2.8 โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเอทิลีนชนิดต่าง ๆ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิเอ ทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	13
รูปที่ 2.9 พอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ใช้ในทางการค้า.....	16
รูปที่ 3.1 แผงผังชุดการทดลองเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์.....	23
รูปที่ 3.2 ภาพรวมของชุดการทดลองที่ใช้ในงานวิจัย	24
รูปที่ 3.3 ช่องขาเข้าของสารตัวอย่าง	24
รูปที่ 3. 4 เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์.....	24
รูปที่ 3.5 ท่อแก๊สเข้าเครื่องปฏิกรณ์.....	25
รูปที่ 3.6 เกจวัดความดันและวาล์วควบคุมความดันย้อนกลับ	25
รูปที่ 3.7 ไบพัตที่ใช้กวนสาร	25
รูปที่ 3.8 ไบพัตใช้กวนสารซึ่งต่ออยู่กับมอเตอร์	26
รูปที่ 3.9 แผงควบคุมอุณหภูมิ.....	26
รูปที่ 3.10 ส่วนควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส.....	26
รูปที่ 3.11 สีของสารละลายที่ทำการไทเทรต.....	29
รูปที่ 3.12 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	29

รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด.....	30
รูปที่ 3.14 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี.....	30
รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์.....	34
รูปที่ 4.2 พอลิเอทิลีนแวกซ์ละลายและสีเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 123 องศาเซลเซียส.....	34
รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ต่อค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์.....	35
รูปที่ 4.4 ผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์บางส่วนติดอยู่บริเวณพื้นผิวภายในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อใช้ปริมาณสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์มากกว่าร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก.....	36
รูปที่ 4.5 ขนาดอนุภาคของพอลิเอทิลีนแวกซ์.....	39
รูปที่ 4.6 ขนาดอนุภาคของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 1	39
รูปที่ 4.7 ขนาดอนุภาคของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 2	39
รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ยังไม่ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	40
รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 1	41
รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 2	41
รูปที่ 4.11 สเปกตรัมตัวอย่างอ้างอิงอุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์.....	41
รูปที่ 4.12 สเปกตรัมโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (1H-NMR) ของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	42
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (1H-NMR) ของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 1	43
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (1H-NMR) ของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 2	43
รูปที่ 4.15 สเปกตรัมโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (1H-NMR) ของตัวอย่างอ้างอิงอุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์	44

สารบัญสมการ

สมการที่ 2.1 การสลายตัวของพอลิเอทิลีนในขั้นเริ่มต้น (Initiation)	19
สมการที่ 2.2 การสลายตัวของพอลิเอทิลีนในขั้นแผ่ขยาย (Propagation)	19
สมการที่ 2.3 การแตกตัวของพอลิเอทิลีน (Decomposition).....	20
สมการที่ 2.4 การสลายตัวของพอลิเอทิลีนในขั้นสิ้นสุด (Termination)	20
สมการที่ 3.1 การคำนวณค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์.....	29
สมการที่ 4.1 การแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระของสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 1.....	37
สมการที่ 4.2 การแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระของสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 2.....	37
สมการที่ 4.3 อนุมูลอิสระเพอร์ออกไซด์เข้าไปรวมตัวกับสายโซ่พอลิเอทิลีนแวกซ์.....	37
สมการที่ 4.4 การเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลพอลิเอทิลีนแวกซ์.....	38
สมการที่ 4.5 ปฏิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีนแวกซ์	45

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 1	32
ตารางที่ 4.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 2	33



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่มีความต้องการในการใช้งานสูง ด้วยเหตุที่ว่าพอลิเอทิลีนสามารถนำไปขึ้นรูปทำเป็นของใช้พลาสติกในชีวิตประจำวันได้หลากหลาย นอกจากนี้ยังมีสมบัติที่เหมาะสมและต้นทุนในการผลิตต่ำเมื่อเทียบกับเม็ดพลาสติกประเภทอื่น ๆ โดยพบว่าบริษัทผู้ผลิตแต่ละที่จะต้องผลิตพอลิเอทิลีนปริมาณไม่น้อยกว่า 140,000 ตันต่อปี ทั้งนี้ในระหว่างกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนด้วยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันจะเกิดพอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ ซึ่งมีลักษณะทั่วไปเป็นเกล็ดสีขาวขุ่น แข็งแต่เปราะ เป็นต้น

เนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ เมื่อมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นทำให้ต้องมีการจัดการผลผลิตเพื่อเพิ่มมูลค่าให้ผลิตภัณฑ์ โดยพบว่าพอลิเอทิลีนแวกซ์ได้รับความนิยมในการนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ มากมาย เช่น การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเทียนไข เป็นสารเติมแต่งในการทำหมึกพิมพ์และสี เป็นตัวประสานในกระบวนการผลิตสายเคเบิล เป็นต้น แม้ว่าพอลิเอทิลีนแวกซ์มีการนำไปใช้งานอย่างหลากหลาย แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นแวกซ์ที่ไม่มีขั้ว ทำให้มีความแข็งแรงและคุณสมบัติที่จำกัดในการนำไปใช้งาน เช่น กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกที่มีมอนอเมอร์เป็นโมเลกุลที่มีขั้ว เช่น PVC เป็นต้น จำเป็นต้องใช้พอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขั้วผสมลงไปในตัวพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาได้ เพื่อให้สามารถขึ้นรูปพลาสติกนั้นได้ง่ายขึ้น ซึ่งกระบวนการหนึ่งที่เหมาะสมในการเปลี่ยนพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ไม่มีขั้วให้เป็นพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขั้วคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) โดยการปรับปรุงพื้นผิวในปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อทำการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เช่น คาร์บอกซิล คาร์บอนิล ไฮดรอกซิล แอลดีไฮด์ และเอสเตอร์ สำหรับสารตั้งต้นที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงอย่างพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้น จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในขณะที่สารตั้งต้นอยู่ในสถานะของแข็ง เพราะหากนำสารตั้งต้นไปทำการหลอมเหลวจะมีความหนืดขณะหลอมเหลวสูงซึ่งยากต่อการทำปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดในการนำพอลิเอทิลีนแวกซ์มาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อผลิตเป็นออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ และใช้สารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา โดยได้ทำการศึกษาสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ คือ หนึ่ง,หนึ่ง-บิส-(เตรีท-เอมิลเพอร์ออกไซด์)ไฮโคลเฮกเซน และ ได-เตรีท-บิวทิลเพอร์ออกไซด์ และศึกษาตัวแปรต่างๆ ในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และปริมาณของสารริเริ่มปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ซึ่งเป็นแวกซ์ที่มีขั้ว โดยต้องการค่าความเป็นกรดที่มากกว่า 13 มิลลิกรัม

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นสารหล่อลื่นในภาคอุตสาหกรรม เพื่อช่วยประหยัดพลังงาน และลดต้นทุนการผลิต

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์และภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ในการผลิตออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์เพื่อให้ได้ค่าความเป็นกรดที่มากกว่า 13 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์และภาวะที่เหมาะสมในการผลิตออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีค่าความเป็นกรดมากกว่า 13 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
2. จัดหาอุปกรณ์และสารเคมี
 - 2.1 สารเคมีที่ใช้ในส่วนของการศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีนแวกซ์ ได้แก่ พอลิเอทิลีนแวกซ์ขนาด 130 ไมครอน แก๊สอากาศ (Air zero) และสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ คือ หนึ่ง,หนึ่ง-บิส-(เดิร์ท-เอมิลเพอร์ออกซี)ไฮโคลเฮกเซน และ ได-เดิร์ท-บิวทิลเพอร์ออกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator)
 - 2.2 สารเคมีที่ใช้ในส่วนของการหาค่าความเป็นกรดของออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ ได้แก่ โซลีน สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอก และสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน
3. ทำการทดลองเพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ในสถานะของแข็ง
 - 3.1 เตรียมพอลิเอทิลีนแวกซ์ปริมาณ 100 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร
 - 3.2 เตรียมสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ หนึ่ง,หนึ่ง-บิส-(เดิร์ท-เอมิลเพอร์ออกซี)ไฮโคลเฮกเซน และ ได-เดิร์ท-บิวทิลเพอร์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก ใส่ขวดสเปรย์ขนาด 20 มิลลิลิตร เนื่องจากต้องทำการผสมสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์เข้ากับพอลิเอทิลีนแวกซ์ ดังนั้นการพ่นสารจากขวดสเปรย์

ช่วยให้สารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์กระจายตัวและผสมกับพอลิเอทิลีนแวกซ์ได้ทั่วถึงมากขึ้น โดยใช้ปริมาณของสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ปริมาณร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

3.3 ทำการพ่นสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์จากขวดสเปรย์ใส่พอลิเอทิลีนแวกซ์ที่เตรียมไว้ในบีกเกอร์แล้วผสมให้เข้ากัน โดยใช้ปริมาณสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่แตกต่างกันในการทดลองแต่ละครั้ง

3.4 กระบวนการออกซิเดชันดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ชนิดของแก๊สที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ แก๊สอากาศ (Air zero) ที่ความเข้มข้น 21% และที่อัตราการไหลของแก๊ส 2 ลิตรต่อนาที อัตราความดันของระบบด้วยวาล์วควบคุมความดันย้อนกลับ (Back pressure valve) ที่ความดัน 5 บาร์ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 60 ถึง 180 นาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 90 ถึง 130 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

4. วิเคราะห์สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์

4.1 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดโดยใช้วิธี ASTM D 1386-98 เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับวัดค่าความเป็นกรดของแวกซ์ โดยนำผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้จากการทดลองปริมาณ 1 กรัม ใส่ไซลีนปริมาณ 75 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ นำไปตั้งบนเครื่องให้ความร้อน (Hotplate Stirrer) ทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จนสารละลายที่ได้มีลักษณะใส แล้วหยดฟีนอล์ฟทาลีนปริมาณ 3 หยด ลงในสารละลาย จากนั้นทำการไทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล และคำนวณหาค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์

4.2 วิเคราะห์เอกลักษณ์ของพอลิเอทิลีนแวกซ์และผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์

4.2.1 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

4.2.2 เครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)

4.2.3 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, NMR)

5. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์



บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์ (Polymer)

การที่มอนอเมอร์หลาย ๆ หน่วยมาเชื่อมต่อกันเข้า ๆ กันจนเกิดเป็นสายโซ่โมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลสูง จะเรียกสายโซ่โมเลกุลยาว ๆ นี้ว่าพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามการให้นิยามพอลิเมอร์มักจะพิจารณาจากน้ำหนักโมเลกุล และโครงสร้างของพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์มวลโมเลกุลต่ำ (Low polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลตั้งแต่ 10,000-20,000 g/mol ส่วนพอลิเมอร์มวลโมเลกุลสูง (High polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลเริ่มตั้งแต่ 20,000 g/mol เป็นต้นไป นอกจากนี้การจำแนกพอลิเมอร์ตามน้ำหนักโมเลกุลแล้ว ยังสามารถจำแนกชนิดของพอลิเมอร์โดยใช้เกณฑ์ในการจำแนกได้หลายแบบ ทำให้ได้ชนิดของพอลิเมอร์ต่าง ๆ ดังนี้ [1]

2.1.1 จำแนกตามแหล่งที่มา

2.1.1.1 พอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymers)

เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติสามารถพบได้ในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด โดยพอลิเมอร์ธรรมชาติเหล่านี้เป็นสิ่งที่สิ่งมีชีวิตผลิตขึ้น โดยอาศัยกระบวนการทางเคมีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ และมีการเก็บสะสมไว้ใช้ประโยชน์ตามส่วนต่าง ๆ ดังนั้นพอลิเมอร์ธรรมชาติจึงมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของสิ่งมีชีวิตและตำแหน่งที่พบในสิ่งมีชีวิต ตัวอย่างพอลิเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยพืช เซลลูโลส และไคติน เป็นต้น

2.1.1.2 พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymers)

เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นโดยมนุษย์ ด้วยวิธีการนำสารมอนอเมอร์จำนวนมากมาทำปฏิกิริยาเคมีภายใต้ภาวะที่เหมาะสม ทำให้มอนอเมอร์เหล่านั้นเกิดพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) ต่อกันกลายเป็นโมเลกุลพอลิเมอร์ เพื่อตอบสนองต่อการใช้งานและเทคโนโลยีใหม่ ๆ เนื่องจากพอลิเมอร์ธรรมชาติมีปริมาณ สมบัติ และขอบเขตการใช้งานที่จำกัด ได้แก่ พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีน และสไตรีน เป็นต้น [2]

2.1.2 จำแนกตามชนิดของมอนอเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุล

2.1.2.1 โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer)

พอลิเมอร์ที่ไม่เลกุลประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันมาเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาว ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีน ซึ่งเป็นพลาสติกที่นิยมใช้กันมากชนิดหนึ่ง

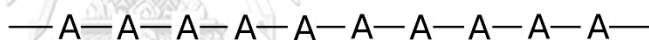


2.1.2.2 โคพอลิเมอร์ (Copolymer)

พอลิเมอร์ที่ไม่เลกุลประกอบด้วยมอนอเมอร์มากกว่าหนึ่งชนิดมาเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาว โดยพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะเป็นโคพอลิเมอร์ ทั้งนี้โคพอลิเมอร์สามารถแบ่งตามการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ออกเป็น 4 แบบ

1. โคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (Random Copolymer)

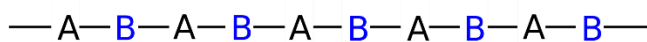
มอนอเมอร์หลาย ๆ หน่วยมาต่อกันแบบสุ่ม เรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบแน่นอน ซึ่งสามารถแทนสัญลักษณ์ของมอนอเมอร์เป็น A และ B (แสดงในรูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 โคพอลิเมอร์แบบสุ่ม

2. โคพอลิเมอร์แบบสลับ (Alternating Copolymer)

มอนอเมอร์มาเรียงต่อกันแบบสลับ โดยลำดับการเรียงของมอนอเมอร์มีลักษณะซ้ำกัน จัดเรียงสลับกันไปอย่างสม่ำเสมอตลอดโมเลกุล (แสดงในรูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 โคพอลิเมอร์แบบสลับ

3. โคพอลิเมอร์แบบบล็อก (Block Copolymer)

มอนอเมอร์ที่ต่อเชื่อมกันเป็นบล็อก ประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิด A ต่อกันเป็นระยะหนึ่งแล้วมอนอเมอร์ชนิด B ก็มาต่อ และสลับกันต่อเป็นช่วง ๆ จนกลายเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ (แสดงในรูปที่ 2.3)

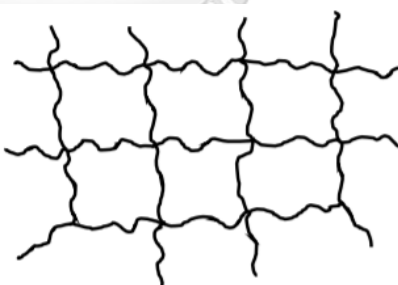
อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE, Low density polyethylene) เป็นต้น (แสดงในรูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 พอลิเมอร์แบบกิ่ง

2.1.3.3 พอลิเมอร์แบบร่างแห (Crosslinked polymer)

พอลิเมอร์ที่เกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างโซ่พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างต่อเนื่องกันเป็น ร่างแห ถ้ามีการเชื่อมโยงมากพอลิเมอร์จะแข็ง ไม่ยืดหยุ่น โดยพอลิเมอร์แบบร่างแหจะมีจุดหลอมเหลวสูง เมื่อขึ้นรูปแล้วไม่สามารถหลอมหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ ตัวอย่างเช่น พอลิฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ที่รู้จักกันในชื่อเบเคอไลต์ และพอลิเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่รู้จักกันในชื่อเมลามีนซึ่งใช้ทำถ้วยชาม เป็นต้น (แสดงในรูปที่ 2.7) [4, 5, 6]



รูปที่ 2.7 พอลิเมอร์แบบร่างแห

2.1.4 จำแนกตามปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์

2.1.4.1 ปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation polymerization)

กระบวนการควบแน่นจะเกิดขึ้นเมื่อมีมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ ทำปฏิกิริยากันได้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิเมอร์ และสารที่มีโมเลกุลเล็ก ๆ เช่น น้ำ แอมโมเนีย และเมทานอล เป็นต้น โดยพอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาควบแน่นนี้ มักจะมีโครงสร้างเป็นแบบร่างแห จึงทำให้พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นด้วยปฏิกิริยาแบบ

นี้มีความแข็งแรงมาก โค้งงอได้เล็กน้อย เปราะและหักง่าย ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นโดยวิธีนี้ ได้แก่ ไนลอน พอลิเอสเตอร์ และเรซิน เป็นต้น

2.1.4.2 ปฏิกริยาแบบเติม (Addition polymerization)

ปฏิกริยาการรวมตัวกันของมอนอเมอร์ที่ไม่มีการกำจัดส่วนใดของมอนอเมอร์ออกไป การสร้างพันธะระหว่างมอนอเมอร์จะเกิดขึ้นได้โดยการเปลี่ยนพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอนให้เป็นพันธะเดี่ยว เมื่อเกิดปฏิกริยาแบบเติมนี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีเพียงพอลิเมอร์เท่านั้น โดยไม่มีสารโมเลกุลเล็ก ๆ เกิดขึ้น พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นโดยวิธีนี้ ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น

2.1.4.3 ปฏิกริยาแบบเปิดวง (Ring-opening polymerization)

เป็นการเกิดพอลิเมอร์ที่มีการเปิดวงของมอนอเมอร์ เมื่อเกิดปฏิกริยาจะเกิดการเปิดวงแล้วเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว โดยจะได้ผลผลิตที่มีมวลโมเลกุลสูง [4]

2.1.5 จำแนกตามลักษณะการใช้งาน

2.1.5.1 พลาสติก (Plastics)

มีคุณสมบัติเป็นของไหลหนืด (Viscous fluid) ขณะที่อยู่ในกระบวนการขึ้นรูปและจะอยู่ในรูปของแข็งที่คงรูปได้เมื่ออยู่เป็นผลิตภัณฑ์ที่พร้อมใช้งาน โดยพลาสติกมีทั้งชนิดที่สามารถนำมาหลอมใช้ใหม่ได้กับชนิดที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก ถ้าใช้การเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนเป็นเกณฑ์จะจำแนกพลาสติกเป็น 2 ประเภทดังนี้

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

พอลิเมอร์ประเภทนี้มีโครงสร้างแบบเส้นหรือแบบกิ่ง มีการเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อยมาก ทำให้พลาสติกมีความโค้งงอและยืดหยุ่นได้มาก รวมถึงติดไฟง่ายจึงสามารถนำไปหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้ โดยยังคงสมบัติทางกายภาพเหมือนเดิม ดังนั้นพอลิเมอร์กลุ่มนี้จะสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก (Recycle) สำหรับตัวอย่างพอลิเมอร์กลุ่มนี้ ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน เป็นต้น โดยพอลิเมอร์กลุ่มนี้นิยมนำมาผลิตเป็นภาชนะใช้สำหรับบรรจุ เช่น ขวดพลาสติกต่าง ๆ

2. เทอร์โมเซตติง (Thermosetting)

เป็นพลาสติกที่มีโครงสร้างเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างแบบร่างแห เมื่อแข็งตัวแล้วมีความแข็งแรงมาก ทนต่อความร้อนสูง ส่วนใหญ่ไม่ติดไฟ ทำให้ไม่สามารถนำมาหลอมเพื่อขึ้นรูปใหม่ได้อีก ตัวอย่างพอลิเมอร์ประเภทนี้ได้แก่ เมลามีน พอลิยูรีเทน และฟีนอลิกเรซิน เป็นต้น โดยพอลิเมอร์กลุ่มนี้นิยมนำมาผลิตเป็นด้านจับภาชนะซึ่งทำมาจากฟีนอลิกเรซิน

2.1.5.2 เส้นใย (Fiber)

เส้นใยเซลลูโลสเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีคุณสมบัติที่ดีแต่เมื่อเปียกน้ำจะให้ความเหนียวและความแข็งแรงของเส้นใยลดลง และไม่ทนต่อแสงแดด จึงได้มีการพัฒนาพอลิเมอร์ที่เป็นเส้นใยสังเคราะห์ขึ้น เช่น ไนลอน พอลิเอสเตอร์ พอลิโพรพิลีน เป็นต้น โดยเส้นใยที่ผลิตได้จะมีความเหนียว ทนทาน ยับยาก ซักได้ดี ง่าย และทนกรด-เบสได้ดีกว่าเส้นใยธรรมชาติ

2.1.5.3 ยาง (Rubber)

สมบัติสำคัญของยางคือมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ตามแรงกระทำและจะกลับสู่สภาพเดิมเมื่อหยุดให้แรงกระทำ เช่น ยางสไตรีนบิวตะไดอีน (SBR) ยางธรรมชาติ เป็นต้น

2.1.5.4 โฟม (Foam)

เป็นพลาสติกที่ผ่านกระบวนการเติมแก๊สเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากแทรกอยู่ระหว่างเนื้อพลาสติก ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น ใช้ป้องกันหรือเก็บความร้อนได้ดี ในปัจจุบันสามารถผลิตโฟมได้จากพอลิเมอร์หลายชนิด เช่น พีวีซี พอลิเอทิลีน และพอลิสไตรีน เป็นต้น

2.1.5.5 สารเคลือบผิว (Surface coating agents)

ช่วยให้ผิวของวัสดุที่ถูกเคลือบมีความทนทานต่ออากาศ น้ำ และสารเคมีต่าง ๆ นอกจากนี้สารเคลือบผิวยังช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุมีความแข็งแรงขึ้น ทนทานต่อการขีดสี และมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น เช่น พอลิไวนิลอะซิเตต พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) และพอลิยูรีเทน เป็นต้น [7, 8]

2.2 พอลิเอทิลีน (Polyethylene)

พอลิเอทิลีนหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “PE” จัดเป็นพอลิเมอร์พวกเทอร์โมพลาสติกที่มีการใช้มากที่สุดชนิดหนึ่ง คือประมาณ 32% ของพลาสติกทั้งหมด ด้วยคุณสมบัติที่มีความทนทานต่อ

สารเคมี ทนต่อสภาวะอากาศ มีความยืดหยุ่นต่อแรงกระแทกไม่แตกร้าวง่าย และหดตัวแม่พิมพ์ได้ดีมากทำให้ถอดจากแม่พิมพ์ได้ง่าย โดยความยืดหยุ่นของพันธะ C-C ทำให้คุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าต่ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) และผลึก (Crystalline) โดยคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะอยู่ในช่วง 130 ถึง 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีทั้งต่ำกว่าและสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นพอลิเอทิลีนจึงมีทั้งลักษณะที่ยืดหยุ่นและแข็งที่สภาวะปกติแล้วแต่ชนิดของพอลิเอทิลีน และอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนคือ 130 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต) โดยผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของพอลิเอทิลีน ได้แก่ ขวดใส่สารเคมี ขวดใส่น้ำ ลังหรือกล่องบรรจุสินค้า ภาชนะต่าง ๆ ชิ้นส่วนแบตเตอรี่ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ฉนวนไฟฟ้า ถุงใส่ของ แผ่นฟิล์ม เป็นต้น [9, 10]

ประเภทของพอลิเอทิลีน

สามารถแบ่งประเภทของพอลิเอทิลีนตามความหนาแน่นได้ดังนี้ [11, 12, 13]

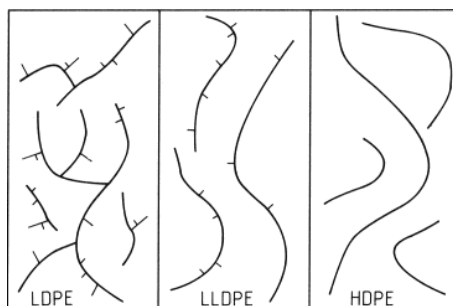
2.2.1 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)

เป็นพอลิเอทิลีนชนิดแรกที่ถูกผลิตขึ้นในทางการค้า มีความหนาแน่นต่ำคือ 0.910 ถึง 0.925 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากโครงสร้างมีกิ่งก้านสาขาแยกออกมามาก ทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ มีค่าความเหนียวพอสมควร มีลักษณะค่อนข้างใส มีผิวหน้ามันคล้ายขี้ผึ้งหรือเทียนไข โดยการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในทางการค้าถูกผลิตด้วยกระบวนการความดันระดับสูง (High pressure process) มีจุดหลอมเหลวประมาณ 110 องศาเซลเซียส และมีจุดอ่อนตัว 40 ถึง 50 องศาเซลเซียส จึงไม่ควรนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปถูกใช้เป็นภาชนะและฟิล์มบรรจุภัณฑ์

2.2.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE)

เป็นพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.925 ถึง 0.940 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีโครงสร้างอยู่ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (แสดงในรูปที่ 2.8) คือเป็นสายโซ่ยาวและมีกิ่งสั้น ๆ มาเกาะอยู่แบบสุ่ม มีค่าความทนต่อแรงดึงและแรงกระแทกสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากมีความยืดหยุ่น เหนียว และโปร่งใสจึงสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้แต่จะบางกว่าและทนต่อการเกิดรอยจากสภาพแวดล้อมได้

ดีกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ อย่างไรก็ตามจะขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ยาก มักจะถูกขึ้นรูปเป็นฉนวนหุ้มสายเคเบิล ของเล่น และฝาปิดภาชนะ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเอทิลีนชนิดต่าง ๆ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

2.2.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาก (Very Low Density Polyethylene, VLDPE)

มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.880 ถึง 0.913 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นพอลิเมอร์ที่มีจำนวนกิ่งขนาดสั้นจำนวนมาก ลักษณะโครงสร้างที่เป็นกิ่งมากของพอลิเอทิลีนชนิดนี้จะเป็นตัวขัดขวางการจัดตัวเป็นผลึก ทำให้ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์นี้ต่ำมาก มักนำมาผลิตเป็น สายยาง หลอด ถังบรรจุอาหารเย็น บรรจุภัณฑ์อาหาร เป็นต้น

2.2.4 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (Middle Density Polyethylene, MDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดนี้มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.926 ถึง 0.940 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ได้จากการพอลิเมอร์ไรซ์ที่ความดันสูง (High pressure process) โมเลกุลของพอลิเมอร์จะมีกิ่งก้านสาขามากทำให้โมเลกุลมีการเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน มีจุดหลอมเหลวที่ 124 องศาเซลเซียส และจุดอ่อนตัวที่ 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส ทนต่อแรงกระแทกได้ดี แต่จะเกิดรอยต่าง ๆ ได้ง่ายกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ส่วนใหญ่นิยมนำไปผลิตเป็น ถังพักน้ำ ถังแช่ และถังขยะ เป็นต้น

2.2.5 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)

เป็นพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.940 ถึง 0.965 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จัดเป็นพลาสติกสังเคราะห์ประเภทเทอร์โมพลาสติก ประกอบด้วยสายโซ่หลักที่มีจำนวนคาร์บอนเป็นเลขคู่ และมีหมู่ไฮโดรเจนอะตอมติดกับคาร์บอนแต่ละอะตอม (แสดงในรูป ที่ 2.9) โครงสร้างพื้นฐานเป็นโมเลกุลโซ่ตรงแทบไม่มีกิ่งก้านสาขาแยกออกมาเลย ทำให้โมเลกุลมีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบจึงทำให้พอลิเมอร์ ชนิดนี้มีความแข็งตึง ความเหนียว ความทนแรงดึง ความทนต่อความร้อนและสารเคมีได้มาก มีจุดหลอมเหลวประมาณ 135 องศาเซลเซียส และจุดอ่อนตัวประมาณ 125 องศาเซลเซียส พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงนิยมนำมาผลิตเป็น ขวดน้ำ ถัง กระจ่าง ลังผลไม้ เป็นต้น โดยการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงจะใช้ความดันและอุณหภูมิต่ำกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ซึ่งมีอยู่ 4 วิธี โดยมีการใช้กระบวนการผลิตและตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้ [11, 14, 15, 16]

1. กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process)

ในทางการค้าจะกระทำภายใต้ ความดันสูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย คือ 0.2 ถึง 0.4 เมกะปาสคาล (2 ถึง 4 บรรยากาศ) ที่อุณหภูมิประมาณ 50 ถึง 75 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ ไททาเนียมเตตระคลอไรด์/อะลูมิเนียมแอลคิล (เช่น ไดเอทิล อะลูมิเนียม คลอไรด์ อะลูมิเนียม ไตรเอทิล) ส่วนสารเจือจาง (Diluents) ที่ใช้ได้แก่ น้ำมันดีเซล เฮปเทน หรือโทลูอีน โดยปฏิกิริยาจะเกิดภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ต้องไม่มีความชื้นและออกซิเจนเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง หรืออาจทำให้เกิดการระเบิดได้ โดยเอทิลีน ตัวเร่งปฏิกิริยา และสารเจือจาง จะถูกป้อนอย่างต่อเนื่องเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ พอลิเมอร์จะละลายในสารเจือจางได้เล็กน้อย โดยอยู่ในรูปของสารขุ่นหนืด (Slurry) และถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วด้วยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือเอทานอล โดหะจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกแยกออกด้วยกรดเกลือ ถ้าต้องการฉนวนไฟฟ้าต้องทำให้บริสุทธิ์หลาย ครั้ง แล้วจึงเหวี่ยงด้วยความเร็วสูงแล้วทำให้แห้งจะได้

ผลิตผลออกเป็นเม็ดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีความหนาแน่นประมาณ 0.945 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร

2. กระบวนการฟิลลิปส์ (Philips process)

เป็นกระบวนการที่ใช้ความดัน 3 ถึง 4 เมกะปาสคาล (30 ถึง 40 บรรยากาศ) อุณหภูมิ 90 ถึง 160 องศาเซลเซียส และใช้โครเมียมออกไซด์ (CrO_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเอทิลีนจะถูกผ่านเข้าไปในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน เช่น ไซโคลเฮกเซน ซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยาแขวนลอยอยู่ พอลิเอทิลีนที่ได้อาจอยู่ในรูปของสารละลายหรือสารชั้นหนืดขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ ถ้าเป็นกระบวนการผลิตแบบสารละลายจะทำให้ที่อุณหภูมิ 120 ถึง 160 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอลิเมอร์ละลายได้ในสารเจือจาง และสารละลายพอลิเมอร์ที่ร้อนจะถูกดึงออกจากเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง เอทิลีนที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะถูกล้างออกและตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกแยกออกด้วยการกรองหรือการหมุนเหวี่ยง ส่วนกระบวนการผลิตแบบสารแขวนลอยทำที่อุณหภูมิ 90 ถึง 100 องศาเซลเซียส ซึ่งพอลิเมอร์ละลายในสารเจือจางได้น้อยในอุณหภูมินี้ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ได้มีความหนาแน่นสูงที่สุดประมาณ 0.960 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยสายโซ่โมเลกุลเกือบเป็นเส้นตรงอย่างสมบูรณ์แทบไม่มีกิ่งก้านเลย

3. กระบวนการสแตนดาร์ดออยล์ (Standard oil process)

กระบวนการนี้จะคล้ายกับกระบวนการฟิลลิปส์ คือตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยโลหะออกไซด์ เช่น โมลิบดีนัมไดออกไซด์บนอะลูมินา ซึ่งเตรียมได้โดยการเผาอะลูมินากับแอมโมเนียโมลิบดีตที่อุณหภูมิประมาณ 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส และผสมกับสารที่เป็นตัวช่วยรีดิวซ์ เช่น โลหะหมู่ IA, IIA หรือพวกไฮไดรด์ เป็นตัวช่วยกระตุ้นให้วงไวต่อปฏิกิริยา ความดันที่ใช้ประมาณ 4 ถึง 10 เมกะปาสคาล (40 ถึง 100 บรรยากาศ) ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส และใช้ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน พอลิเมอร์ที่ได้มีความหนาแน่นประมาณ 0.960 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเท่ากับที่ได้จากกระบวนการฟิลลิปส์ อีกทั้งน้ำหนักโมเลกุลก็ใกล้เคียงกันมากด้วย

4. กระบวนการยูเนียนคาร์ไบด์ (Union carbide process)

กระบวนการนี้ไอทิลีนจะถูกพอลิเมอไรซ์ในเฟสที่เป็นแก๊ส (Gas phase) ด้วยความดัน 0.2 ถึง 0.7 เมกะปาสคาล (2 ถึง 7 บรรยากาศ) ที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย Organochromium compound เช่น Chromacene $[(C_5H_5)_2Cr]$ กระบวนการนี้ Fluidized bed ที่มีเอทิลีนเป็น Fluidizing gas เป็นตัวทำปฏิกิริยา พอลิเมอร์ที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ด (ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้ถูกกำจัดออกไป) และสามารถใช้ได้โดยตรงเนื่องจากไม่มีตัวทำละลายมาเกี่ยวข้อง ทำให้กระบวนการผลิตแบบวัฏภาคแก๊สควบคุมได้ง่ายและใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการอื่น

2.3 พอลิเอทิลีนแวกซ์ (Polyethylene wax)

พอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีรสชาติ ไม่เป็นพิษ ปราศจากกลิ่น จุดหลอมละลายสูง และมีความแข็งตัวตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง มีค่าความหนืดในช่วงกว้างทำให้นำไปใช้ได้หลากหลาย โดยพอลิเอทิลีนแวกซ์จะมีมวลโมเลกุลต่ำกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ทนความร้อน ทนต่อสารเคมี และทนต่อการสึกหรอ โดยพอลิเอทิลีนแวกซ์ถูกใช้เป็นตัวช่วยในกระบวนการผลิตท่อพีวีซี ฟิล์ม สายเคเบิล รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางและพลาสติก เป็นต้น จะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนแวกซ์มีการนำไปใช้งานอย่างหลากหลาย แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นแวกซ์ที่ไม่มีขั้ว จึงทำให้มีแข็งแรงและคุณสมบัติที่จำกัดในการนำไปใช้งาน [17]



รูปที่ 2.9 พอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ใช้ในทางการค้า

2.4 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้า ๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยมีการแตกตัวเกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) นอกจากนี้ความร้อนยังส่งผลให้เกิดการทำลายพันธะในโมเลกุลขนาดใหญ่ และสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง [12, 18]

2.4.1 ปัจจัยที่ส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัว

การย่อยสลายที่เกิดในพอลิเมอร์ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลในสายโซ่เกิดการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม โดยสามารถแยกตัวการที่ทำให้เกิดการย่อยสลายในพอลิเมอร์ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.4.1.1 ปัจจัยที่เกิดจากพลังงาน

2.4.1.1.1 การย่อยสลายโดยความร้อน (Thermal)

เมื่อพอลิเมอร์อยู่ในที่ที่มีอุณหภูมิสูง หรือได้รับความร้อนระหว่างกระบวนการผลิต จะเกิดการย่อยสลาย โดยสายโซ่โมเลกุลจะแตกออกหรือขาด ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง โดยลักษณะของการย่อยสลายโดยความร้อนสามารถเกิดได้ 2 ลักษณะดังต่อไปนี้

1. การย่อยสลายแบบสุ่ม (Random degradation)

มักเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น การแตกออกของสายโซ่สามารถเกิดที่จุดใด ๆ ก็ได้ในสายโซ่พอลิเมอร์ โดยขนาดโมเลกุลของพอลิเมอร์ส่วนที่เหลือจะยังคงใหญ่กว่ามอนอเมอร์

2. การเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization)

หรืออาจเรียกว่า Unzipping คือมอนอเมอร์จะหลุดออกทีละหนึ่งหน่วยจากสายโซ่โมเลกุล มักเกิดกับพอลิเมอร์ที่ได้จากพอลิเมอร์ไรเซชันแบบรวมตัว

2.4.1.1.2 การย่อยสลายโดยพลังงานกล (Mechanical)

ในพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลยาวเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกก็อาจทำให้เกิดการย่อยสลายได้ ซึ่งเป็นผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง ตัวอย่างเช่นเมื่อพอลิเมอร์ได้รับแรงกระทำด้วยอัตราความเร็วสูงไม่ว่าจะอยู่ในสถานะของแข็งหรือสสารละลายก็สามารถทำให้เกิดการฉีกขาดได้

2.4.1.1.3 การย่อยสลายโดยพลังงานจากรังสี (Radiation)

พอลิเมอร์ที่นำไปใช้งานส่วนมากจะต้องถูกแสงเกือบทั้งสิ้น ดังนั้นจึงมีโอกาสเกิดการย่อยสลายโดยพลังงานจากรังสีได้มาก โดยรังสีดังกล่าวอาจทำให้เกิดการเร้า (Exciting) หรืออาจทำให้เกิดการไอออไนซ์ (Ionization) ซึ่งเรียกว่ารังสีพลังงานสูง ในกรณีแรกมีพลังงานเพียงพอที่จะเร้าให้อิเล็กตรอนย้ายไปอยู่ในออร์บิทัลใหม่ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเดิม ซึ่งอาจนำไปสู่การแตกออกของพันธะระหว่างอะตอม แต่อะตอมที่เกี่ยวข้องจะไม่มี การสูญเสียหรือรับอิเล็กตรอนทำให้เกิดอนุมูลอิสระ แต่ถ้าพลังงานสูงขึ้นจะทำให้มีโอกาสเกิดการย้ายอิเล็กตรอนออกจากอะตอมซึ่งทำให้เกิดการไอออไนซ์ได้เป็นไอออน

2.4.1.2 ปัจจัยที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี

2.4.1.2.1 การย่อยสลายจากการเกิดไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

พอลิเมอร์ที่เกิดจากการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นส่วนใหญ่ มักจะถูกย่อยสลายได้โดยการไฮโดรไลซ์ โดยตัวการที่ทำให้เกิดไฮโดรไลซิสคือน้ำ ซึ่งเป็นตัวการที่เราพบมากที่สุดในสภาพทั่ว ๆ ไป นอกจากนี้ที่อาจพบได้อีกคือ แอลกอฮอล์ไฮโดรไลซิส (Alcoholysis)

2.4.1.2.2 การย่อยสลายจากการถูกออกซิเดชัน (Oxidation)

เป็นการย่อยสลายที่เกิดในพอลิเมอร์ซึ่งมีผลมาจากการถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจน โดยพบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดในพอลิเมอร์พวกไฮโดรคาร์บอน เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และยาง จะมีกลไกที่แตกต่างกันไป ในกระบวนการออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว

2.4.1.2.3 การย่อยสลายจากการเกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ

เช่น การสลายตัวเนื่องจากถูกจุลินทรีย์ทำลาย (Biological) ซึ่งจะเกิดกับพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันซึ่งจุลินทรีย์สามารถเข้าไป ทำลายได้

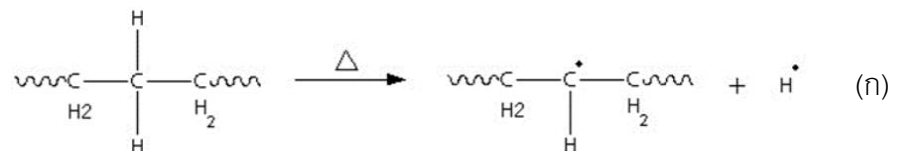
2.4.2 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction)

โดยทั่วไปการปรับปรุงพื้นผิวในปฏิกิริยาออกซิเดชันรวมกับการสลายตัวพอลิเมอร์ เพื่อทำการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เช่น คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล คาร์บอนิล แอลดีไฮด์ และเอสเทอร์ สามารถทำได้โดยการหลอมสารตั้งต้นให้อยู่ในสถานะของเหลว (Melt phase) และทำปฏิกิริยากับออกซิเจน แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดคือสารตั้งต้นที่หลอมเหลวต้องมีความหนืดที่ไม่สูงจนเกินไป สามารถปั่นกวานได้ดี และแก๊สออกซิไดซ์สามารถสัมผัสกับสารตั้งต้นได้อย่างทั่วถึง ดังนั้นวิธีการข้างต้นจึงเหมาะสำหรับสารตั้งต้นที่มีน้ำหนักโมเลกุล

ไม่สูง แต่สำหรับสารตั้งต้นที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเมื่อหลอมเหลวจะมีความหนืดขณะหลอมเหลวสูงซึ่งยากต่อการทำปฏิกิริยา เช่น พอลิเอทิลีน ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในขณะที่สารตั้งต้นอยู่ในสถานะของแข็ง (Solid phase) โดยทั่วไปปฏิกิริยานี้สามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่จะนิยมใช้สารละลายเพอร์ออกไซด์อินทรีย์เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) [19, 20]

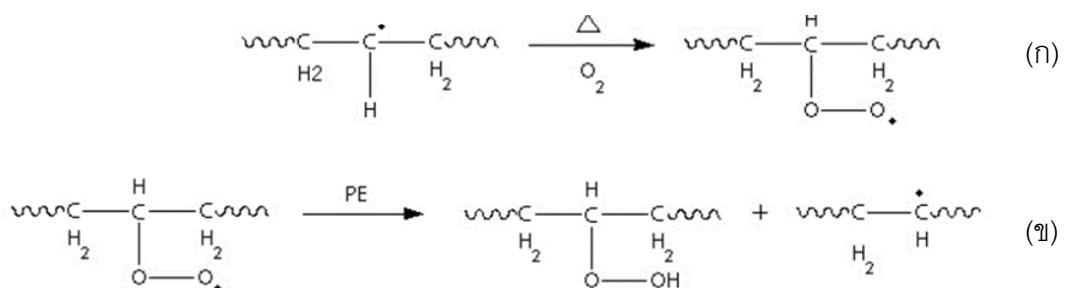
2.4.3 กลไกการปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน

กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นเริ่มต้น ขั้นแผ่ขยาย และขั้นสิ้นสุด โดยเริ่มจากการที่โมเลกุลเกิดการแตกออกเนื่องจากได้รับความร้อน ส่งผลให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) ที่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (แสดงในสมการที่ 2.1) [21, 22]



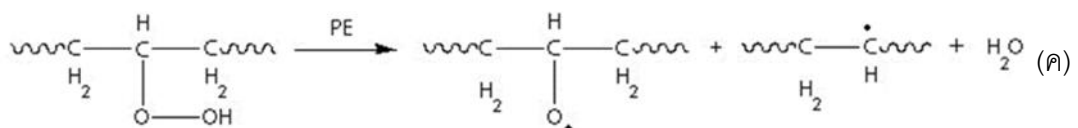
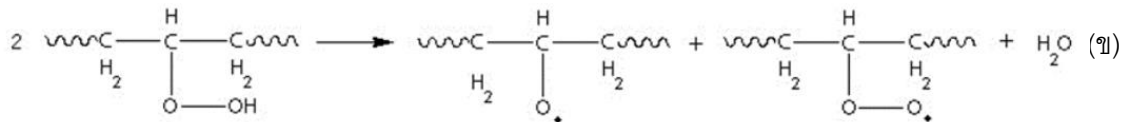
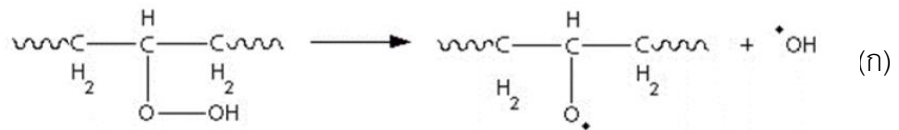
สมการที่ 2.1 การสลายตัวของพอลิเอทิลีนในขั้นเริ่มต้น (Initiation)

จากนั้นอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะรวมเข้ากับออกซิเจนโดยอัตโนมัติ เกิดเป็นอนุมูลอิสระเพอร์ออกไซด์ (Peroxide radical) แสดงในสมการที่ 2.2(ก) และเมื่ออนุมูลอิสระเพอร์ออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิเอทิลีนจะเกิดเป็นไฮโดรเพอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide) และอนุมูลอิสระ ซึ่งแสดงในสมการที่ 2.2(ข)



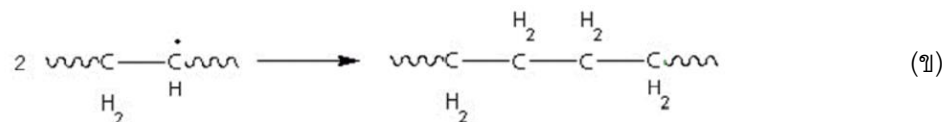
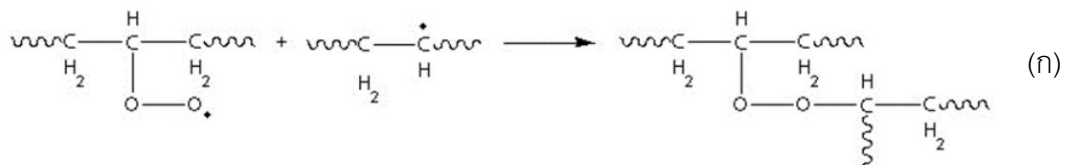
สมการที่ 2.2 การสลายตัวของพอลิเอทิลีนในขั้นแผ่ขยาย (Propagation)

ในส่วนของไฮโดรเพอร์ออกไซด์จะเกิดการสลายตัว ซึ่งแสดงในสมการที่ 2.3(ก), 2.3(ข) และ 2.3(ค)



สมการที่ 2.3 การแตกตัวของพอลิเอทิลีน (Decomposition)

จากนั้นในขั้นตอนสุดท้ายปฏิกิริยาจะสิ้นสุดลง แสดงในสมการที่ 2.4(ก) และ 2.4(ข)



สมการที่ 2.4 การสลายตัวของพอลิเอทิลีนในขั้นสิ้นสุด (Termination)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.5 สารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ (Organic peroxide)

สารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ คือ สารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนสองอะตอมติดกัน หรือเรียกว่าหมู่เปอร์ออกไซด์ (-O-O-) ในสูตรโครงสร้าง มักนิยมนำมาใช้เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) เพราะมีความไวต่อความร้อนได้ดี โดยนิยมนำใช้ในทางอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเมอร์ พลาสติก และยาง เป็นต้น ซึ่งอาจจะใช้อยู่ในรูปของสารบริสุทธิ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว เป็นสารละลาย หรือเป็นเม็ด ทั้งนี้แล้วแต่จุดประสงค์ของการนำไปใช้งาน โดยปกติแล้วการแตกตัวให้อนุมูลอิสระของตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะเกิดการแตกตัวขึ้นเมื่อมีการดูดกลืนพลังงานต่าง ๆ เข้าไป เช่น พลังงานความร้อน และพลังงานจากคลื่นความถี่สูง เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวริเริ่มที่จะนำมาใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jianyu และคณะ [25] ศึกษาการผลิตออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีค่าความเป็นกรดมากกว่า 30 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม พบว่าภาวะที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยา คือ ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 141 ถึง 148 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ถึง 7 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สที่ 4 ถึง 8 เมตรต่อวินาที ภายใต้ความดันบรรยากาศ แต่การใช้ระยะเวลาที่มากและอุณหภูมิที่สูงเกินไปส่งผลให้ผลผลิตของผลิตภัณฑ์ลดลงและสีของผลิตภัณฑ์มีสีที่หม่นขึ้น

Prana และคณะ [26] ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวของสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ จำนวน 38 ชนิด โดยใช้วิธี Quantitative Structure Property Relationship (QSPR) ซึ่งเป็นการนำข้อมูลทางสมบัติต่างๆในระดับ มหภาคของสารมาหาความสัมพันธ์กับโครงสร้างในระดับโมเลกุล โดยพบว่าสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ หนึ่ง,หนึ่ง-ได-(เตรท-บิวทิลเปอร์ออกไซด์) ไฮโคลเฮกเซน ใช้อุณหภูมิในการสลายตัวที่ 118 ถึง 121 องศาเซลเซียส

Yang [27] ศึกษาออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนโดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในงานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของออกซิเจน และชนิดของเปอร์ออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของออกซิเจน (21%) และได้คิวมิวเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) ให้ค่าความเป็นกรด (Acid number) เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลลดลงจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้โมเลกุลของพอลิเอทิลีนมีความหนืดเพิ่มขึ้นและจุดอ่อนตัวลดลง นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด (FTIR) พบว่าผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนปรากฏพีค 1720 cm^{-1} ซึ่งแสดงหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล และการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าก่อนทำปฏิกิริยาอนุภาคของโมเลกุลมีขนาดใหญ่และหลังทำปฏิกิริยาอนุภาคของโมเลกุลมีขนาดเล็กลง เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลเกิดการแตกออก

Zawadiak และคณะ [20] ศึกษาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงด้วยการกระจายตัวในน้ำ โดยทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา พบว่าในใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cobalt (II) acetylacetonates ภายใต้ความดัน 8 บาร์ของออกซิเจน อัตราการปั่นกววน 1,800 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างไฮพอลิเอทิลีนกับน้ำเท่ากับ 1:4 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 25 ชั่วโมง ใช้ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และ Rokanol L10 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เป็นสารตัว

เริ่มปฏิบัติการและสารลดแรงตึงผิว ตามลำดับ พบว่าได้ค่าความเป็นกรด (Acid number) เท่ากับ 26.8 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด นอกจากนี้การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด (FTIR) ปรากฏพีคที่ $1800 - 1650 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่คาร์บอนิล

Akbarian และคณะ [28] ศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนโดยไดคิมิวเพอร์ออกไซด์ในระดับอะตอม และการใช้เครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด (FTIR) รวมถึงเทคนิคการวัดการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่มุมกว้าง โดยจากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมไปถึง 500 เคลวินนั้น จะเพิ่มการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุล อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 500 เคลวินจะทำให้เกิดผลเสียต่อการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีน และสามารถบ่งบอกได้ว่าสนามแม่เหล็กไม่ได้ส่งผลกระทบต่อ การเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีน



บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีนแวกซ์

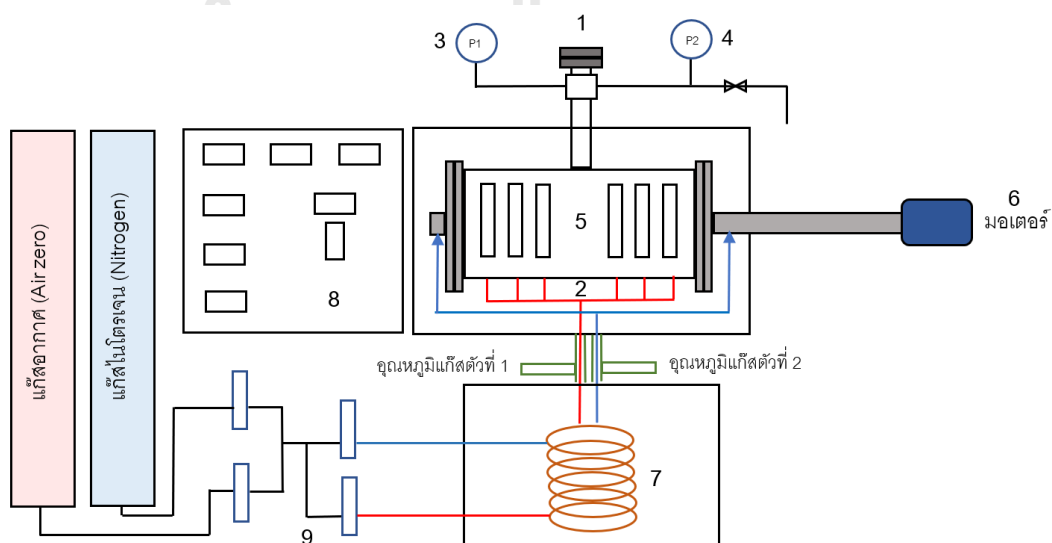
1. พอลิเอทิลีนแวกซ์ ขนาด 130 ไมครอน
2. สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ (Organic Peroxide) ที่ใช้เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator): หนึ่ง,หนึ่ง-บิส-(เติร์ต-เอมิลเปอร์ออกซี)ไซโคลเฮกเซน และ ได-เติร์ต-บิวทิลเปอร์ออกไซด์
3. แก๊สอากาศ (Air zero gas, Big gas) ที่ความเข้มข้น 21%
4. แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas, 99.99%, Big gas)

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการไทเทรตหาค่าความเป็นกรด (Acid number)

1. ผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์
2. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, QREC)
3. ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein)
4. ไซลีน (Xylene, RCI Labscan)
5. เอทานอล (Ethanol, 95%)
6. น้ำกลั่น (Deionized water)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีนแวกซ์



รูปที่ 3.1 แผนผังชุดการทดลองเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์



รูปที่ 3.2 ภาพรวมของชุดการทดลองที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.3 ช่องขาเข้าของสารตัวอย่าง



รูปที่ 3.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์



รูปที่ 3.5 ท่อแก๊สเข้าเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.6 เกจวัดความดันและวาล์วควบคุมความดันย้อนกลับ



รูปที่ 3.7 ใบพัดที่ใช้กวนสาร



รูปที่ 3.8 ไขพัดใช้กวนสารซึ่งต่ออยู่กับมอเตอร์



รูปที่ 3.9 แผงควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 3.10 ส่วนควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส

3.2.1.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ (แสดงในรูปที่ 3.1)

เครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์เป็นถังทรงกระบอกสตีลขนาด 2 ลิตร ยาวประมาณ 10.5 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5.2 นิ้ว มีส่วนประกอบดังนี้

1. ช่องขาเข้าของสารตัวอย่าง (หมายเลข 1)
2. ด้านหลังของเครื่องปฏิกรณ์ต่อกับท่อแก๊ส (หมายเลข 2)
3. ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ต่อกับเกจวัดความดัน (หมายเลข 3) โดยมีวาล์วควบคุมความดันย้อนกลับ (Back pressure valve) ทำหน้าที่ควบคุมความดันภายในระบบ (หมายเลข 4)
4. ด้านข้างมีชุดฝาปิดทำจากสตีลทั้งสองข้าง โดยด้านหนึ่งต่อกับใบพัดที่ใช้กวนสารและเชื่อมต่อกับมอเตอร์ ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์อยู่ภายในเตาเผาไฟฟ้า (หมายเลข 5 และ 6 ตามลำดับ)

3.2.1.2 อุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์

อยู่ส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ประกอบด้วยขดลวดไฟฟ้า (หมายเลข 7)

3.2.1.3 แผงควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)

1. ตัวควบคุมอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor temperature)
2. อุณหภูมิพื้นผิวเครื่องปฏิกรณ์ (Surface temperature)
3. ตัวควบคุมอุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ (Preheat temperature)
4. อุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ (Preheater temperature)
5. อุณหภูมิแก๊สตัวที่ 1 (Inline temperature 1)
6. อุณหภูมิแก๊สตัวที่ 2 (Inline temperature 2)
7. ตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ (Motor speed controller) (หมายเลข 8)

3.2.1.4 ส่วนควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (Rotameter)

ตัวควบคุมอัตราการไหลของแก๊สจะต่อกับถังแก๊สชนิดต่าง ๆ ประกอบด้วย ตัวควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน แก๊สอากาศ (Air zero) แก๊สเฉื่อย และแก๊สที่ไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์โดยตรง (หมายเลข 9)

3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการไทเทรตหาค่าความเป็นกรด (Acid number)

1. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50 และ 100 มิลลิลิตร
2. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmayer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร

3. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 มิลลิลิตร
4. กระจกตวง (Graduated cylinder)
5. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
6. ช้อนตักสาร (Spatula)
7. หลอดหยด (Dropper)
8. แผ่นฟรอยด์อะลูมิเนียม (Aluminium foil)
9. เครื่องชั่งสาร (Analytical balance)
10. เครื่องกวนสารพร้อมให้ความร้อน (Hot-plate stirrer)

3.2.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ โดยใช้วิธี ASTM D 1386-98

1. นำผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ที่อยู่ในรูปของแข็ง (ลักษณะเป็นผง) มาชั่งให้ได้ปริมาณประมาณ 1 กรัม และบันทึกผล
2. นำผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ปริมาณประมาณ 1 กรัม ที่ได้จากการชั่งข้างต้น ใส่ในขวดรูปชมพู่แล้วเติมสารไซลีนปริมาตร 75 มิลลิลิตรลงไป จากนั้นนำไปตั้งบนเครื่องให้ความร้อน (Hotplate stirrer) เพื่อทำการละลายให้อยู่ในรูปของเหลว โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จนสารละลายที่ได้มีลักษณะใส
3. เมื่อผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ในไซลีนละลายหมดจนมีลักษณะใสเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ทำการใส่แท่งแม่เหล็กกวนสารเพื่อให้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ในไซลีนมีความสม่ำเสมอ หลังจากนั้นหยุดฟีนอล์ฟทาลีนลงในสารละลายปริมาณ 3 หยด
4. ทำการไทเทรตโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล และสังเกตสีของสารละลายเมื่อถึงจุดยุติ โดยสีของสารละลายควรเป็นสีชมพูอ่อน (แสดงในรูปที่ 3.11) ติดต่อกันเป็นระยะเวลา นานกว่า 10 วินาที จากนั้นทำการบันทึกผล
5. นำปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไปและน้ำหนักผลิตภัณฑ์ ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนที่ใช้ในการไทเทรต มาคำนวณหาค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ (แสดงในสมการ 3.1)

$$\text{Acid number} \left(\frac{\text{mg KOH}}{\text{g}} \right) = \frac{V \times 0.1 \times 56.1}{W}$$

สมการที่ 3.1 การคำนวณค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์

โดยที่ V คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (มิลลิลิตร)

W คือ น้ำหนักผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนที่ใช้ในการไทเทรต (กรัม)

0.1 คือ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

56.1 คือ มวลโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3.1 สีของสารละลายที่ทำการไทเทรต

3.2.4 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของพอลิเอทิลีนแวกซ์และผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์

3.2.4.1 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)



รูปที่ 3.12 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพและพื้นผิวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ ทั้งก่อนและหลังทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง SEM-EDS (IT300) (แสดงในรูปที่ 3.12)

3.2.4.2 เครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)



รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด

เครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของพอลิเอทิลีนแวกซ์และผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง FTIR-ATR spectroscopy (Thermo Fisher, Nicolet iS5) (แสดงในรูปที่ 3.13)

3.2.4.3 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, NMR)



รูปที่ 3.14 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี เพื่อศึกษาอะตอมใน โมเลกุลและสูตรโครงสร้างของสาร โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง NMR 500 MHz. (Avance III HD) (แสดงในรูปที่ 3.14)

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.3.1 ทำการตั้งอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ก่อนใส่ตัวอย่าง

โดยตั้งค่าอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ที่ 123 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ที่ 110 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนนี้จะทำการเปิดแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศหรือแก๊สที่ตกค้างอยู่

3.3.2 เตรียมพอลิเอทิลีนแวกซ์และสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่ใช้เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา

ชั่งน้ำหนักพอลิเอทิลีนแวกซ์ 100 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ (ความเข้มข้นร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก) ปริมาตรร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ใส่ขวดสเปรย์ขนาด 20 มิลลิลิตร จากนั้นพ่นสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่เตรียมไว้ลงไปบนพอลิเอทิลีนแวกซ์แล้วทำการผสมให้ทั่วทุกส่วน โดยใช้ปริมาณของสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่แตกต่างกันในการทดลองแต่ละครั้ง

3.3.3 นำพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผสมสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์แล้วบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์

เมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และอุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่กำหนด (จากข้อที่ 3.3.1) ทำการบรรจุพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผสมสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์แล้ว (จากข้อที่ 3.3.2) ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ และกำหนดปัจจัยต่าง ๆ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตออกซีไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ให้ค่าความเป็นกรดมากกว่า 13 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และปริมาณของสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ในสถานะของแข็ง เพื่อให้ได้ค่าความเป็นกรดที่มากกว่า 13 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และปริมาณสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2 ชนิด ได้แก่ หนึ่ง, หนึ่ง-บิส-(เติร์ท-เอมิลเพอร์ออกซี)ไซโคลเฮกเซน (กำหนดให้เป็นสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 1) และ ได-เติร์ท-บิวทิลเพอร์ออกไซด์ (กำหนดให้เป็นสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 2)

4.1 ศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา

ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แตกต่างกัน ได้แก่ 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ตามลำดับ จากภาวะการทดลองที่ปริมาณสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 123 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 5 บาร์ อัตราการไหลของแก๊สอากาศ (Air zero) 2 ลิตรต่อนาที พบว่าค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์จะเพิ่มมากขึ้นตามเวลาในการทำปฏิกิริยา (แสดงในตารางที่ 4.1) แต่การใช้เวลานานเกินไปทำให้เกิดการสะสมความร้อน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นสีเหลืองอ่อนซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์สำหรับโรงงาน ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาที่ 180 นาที ในการทำปฏิกิริยา เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาต่อไป

เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ค่าความเป็นกรด ของสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 1 (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)
60	4.41	0.006
90	6.23	0.025
120	7.92	0.020
150	9.12	0.015
180	11.15	0.017

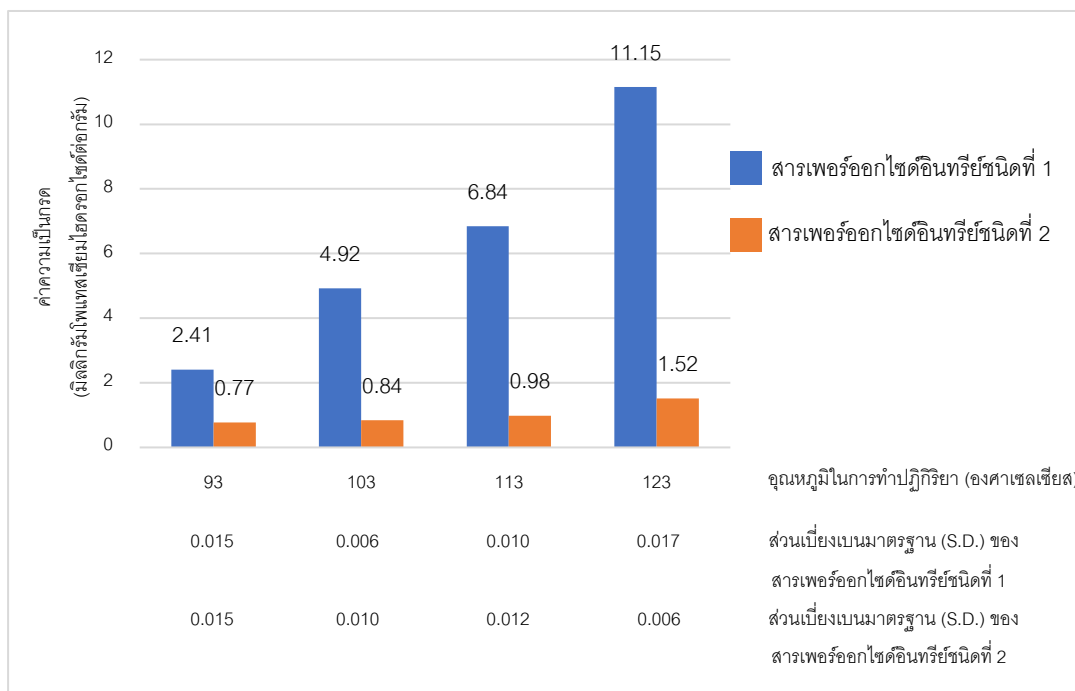
ตารางที่ 4.1 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 1

เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ค่าความเป็นกรด ของสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 2 (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)
60	0.86	0.006
90	0.93	0.020
120	1.12	0.010
150	1.34	0.035
180	1.52	0.012

ตารางที่ 4.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 2

4.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แตกต่างกัน ได้แก่ 93, 103, 113 และ 123 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากภาวะการทดลองที่ปริมาณสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก และเวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที ที่ความดัน 5 บาร์ อัตราการไหลของแก๊สอากาศ (Air zero) 2 ลิตรต่อนาที พบว่าค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์จะเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในการทำปฏิกิริยา (แสดงในรูปที่ 4.1) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 123 องศาเซลเซียส พอลิเอทิลีนแวกซ์จะเกิดการละลายและสีของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีขาวขุ่นเป็นสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลไหม้ (แสดงในรูปที่ 4.2) ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 123 องศาเซลเซียส มาศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาต่อไป



รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์

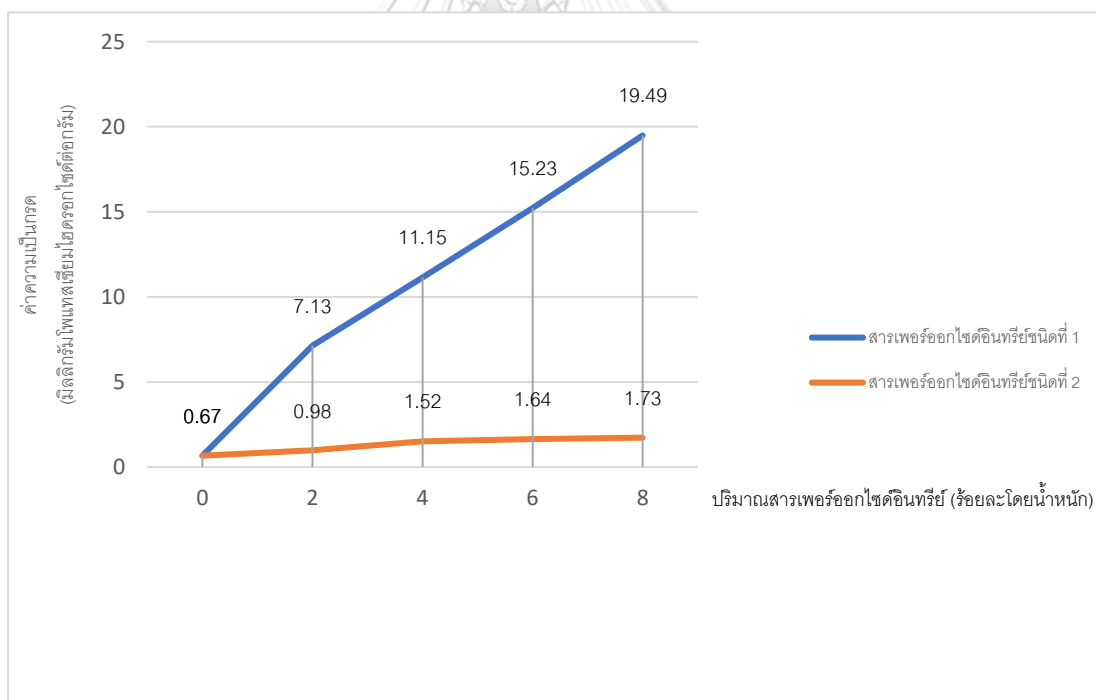


รูปที่ 4.2 พอลิเอทิลีนแวกซ์ละลายและสีเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 123 องศาเซลเซียส

4.3 ศึกษาผลของปริมาณสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

ผลของปริมาณสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ได้แก่ ปริมาณร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากภาวะการทดลองที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที และ

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 123 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 5 บาร์ อัตราการไหลของแก๊สอากาศ (Air zero) 2 ลิตรต่อนาที พบว่าค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่มากขึ้นในการทำปฏิกิริยา (แสดงในรูปที่ 4.3) เนื่องจากสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระและส่งผลให้พอลิเอทิลีนแวกซ์เกิดการแตกตัว รวมถึงปลายสายโซ่เป็นอนุมูลอิสระที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์มากกว่าร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้พอลิเอทิลีนแวกซ์เกิดการจับตัวไปก่อนและมีบางส่วนติดอยู่บริเวณพื้นผิวภายในเครื่องปฏิกรณ์ (แสดงในรูปที่ 4.4) รวมทั้งทำให้มอเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์หยุดหมุน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ปริมาณสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 1 ที่ปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความเป็นกรดมากกว่า 13 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม และในส่วนของสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 2 จะให้ค่าความเป็นกรดสูงสุดที่ 1.73 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม โดยใช้ปริมาณสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ต่อค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์



รูปที่ 4.4 ผลิตรถยนต์ออกซีไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์บางส่วนติดอยู่บริเวณพื้นผิวภายในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อใช้ปริมาณสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์มากกว่าร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

4.4 ภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาออกซีเดชันสถานะของแข็งของพอลิเอทิลีนแวกซ์

จากการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตออกซีไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ จากปริมาณพอลิเอทิลีนแวกซ์ 100 กรัม เพื่อให้ได้ค่าความเป็นกรดมากกว่า 13 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม มีภาวะที่เหมาะสมดังต่อไปนี้

เวลาในการทำปฏิกิริยา	180	นาที
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	123	องศาเซลเซียส
ปริมาณสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์	6	ร้อยละโดยน้ำหนัก
หนึ่ง,หนึ่ง-บิส-(เตรีท-เอมิลเพอร์ออกซี)ไซโคลเฮกเซน		
ความดันของระบบ	5	บาร์
อัตราการไหลของแก๊สอากาศ (Air zero)	2	ลิตรต่อนาที
อัตราการปั่นกววน	99	รอบต่อนาที

โดยภาวะที่แสดงข้างต้นจะให้ค่าความเป็นกรด 15.23 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม จากภาวะที่ทำการศึกษากำหนดให้เป็นผลิตรถยนต์ออกซีไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 1

ในขณะที่การใช้สารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ คือ ได-เตรีท-บิวทิลเพอร์ออกไซด์ เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ค่าความเป็นกรดที่ได้จะมีค่าสูงสุดที่ 1.73 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม โดยใช้ภาวะการทำปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

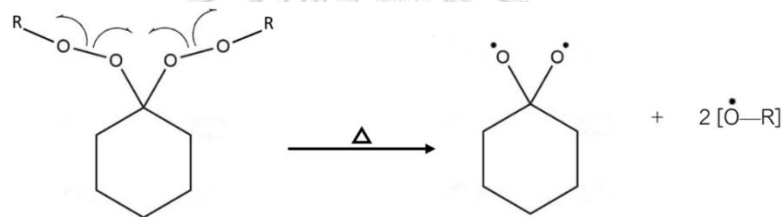
เวลาในการทำปฏิกิริยา	180	นาที
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	123	องศาเซลเซียส

ปริมาณสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์	8	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ได-เทอร์ท-บิวทิลเปอร์ออกไซด์		
ความดันของระบบ	5	บาร์
อัตราการไหลของแก๊สอากาศ (Air zero)	2	ลิตรต่อนาที
อัตราการปั่นกววน	99	รอบต่อนาที

จากภาวะที่ทำการศึกษากำหนดให้เป็นผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 2

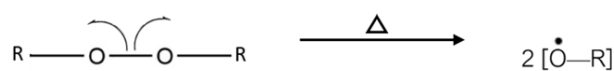
4.5 โครงสร้างของเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ต่อค่าความเป็นกรด

โครงสร้างของสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 1 คือ หนึ่ง,หนึ่ง-บิส-(เทอร์ท-เอมิลเปอร์ออกไซด์)ไซโคลเฮกเซน ซึ่งให้ค่าความเป็นกรด 15.23 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม แสดงกลไกการการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ดังต่อไปนี้ (แสดงในสมการที่ 4.1)



สมการที่ 4.1 การแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระของสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 1

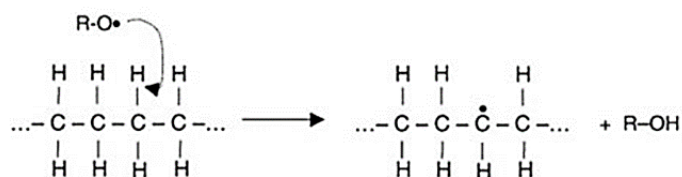
โครงสร้างของสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 2 คือ ได-เทอร์ท-บิวทิลเปอร์ออกไซด์ ซึ่งให้ค่าความเป็นกรด 1.73 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม แสดงกลไกการการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ดังต่อไปนี้ (แสดงในสมการที่ 4.2)



สมการที่ 4.2 การแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระของสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 2

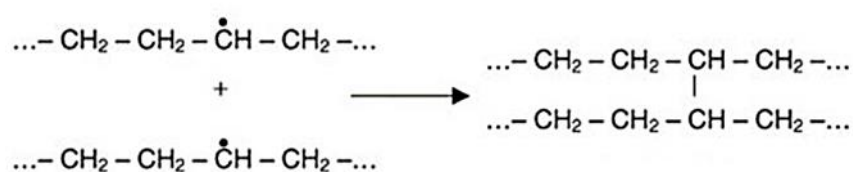
จากนั้นอนุมูลอิสระเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเข้าไปรวมตัวกับสายโซ่พอลิเอทิลีนแวกซ์

ดังสมการที่ 4.3



สมการที่ 4.3 อนุมูลอิสระเปอร์ออกไซด์เข้าไปรวมตัวกับสายโซ่พอลิเอทิลีนแวกซ์

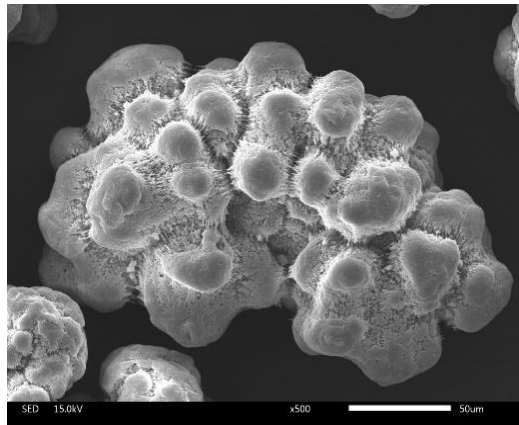
จากกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะเห็นว่า สารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 1 เกิดอนุมูลอิสระมากกว่าสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 2 ซึ่งการที่มีอนุมูลอิสระเยอะส่งผลให้มีความสามารถในการดึงไฮโดรเจนมาก จึงทำให้เกิดการกำจัดไฮโดรเจนได้มากกว่า ทำให้สารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 1 ให้ค่าความเป็นกรดสูงกว่า นอกจากนี้ตัว $\text{CH}\cdot$ ของแต่ละสายโซ่โมเลกุลสามารถไปเกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ต่อได้ (แสดงในสมการที่ 4.4)



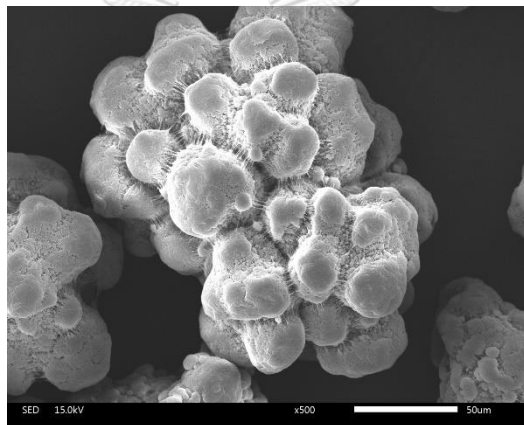
สมการที่ 4.4 การเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลพอลิเอทิลีนแวกซ์

4.6 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

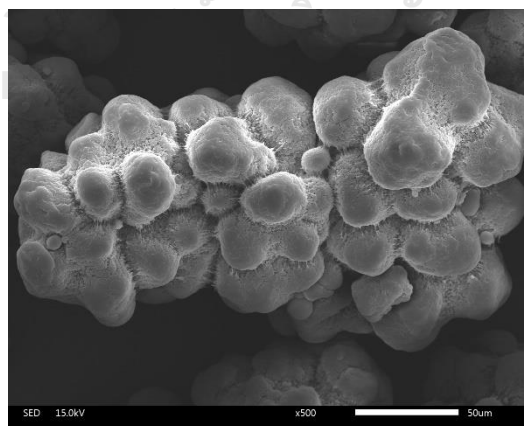
จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนแวกซ์ รวมถึงผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 1 และ 2 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าพอลิเอทิลีนแวกซ์มีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดใหญ่ผิวขรุขระรวมอยู่กับอนุภาคทรงกลมขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 230.8 ไมโครเมตร (แสดงในรูปที่ 4.5) โดยหลังจากนำมาผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เหมาะสม พบว่ามีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมขนาดใหญ่ผิวขรุขระรวมอยู่กับอนุภาคทรงกลมขนาดเล็กจำนวนมากเช่นเดียวกัน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 225.8 ไมโครเมตร และ 234.5 ตามลำดับ (แสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7) ซึ่งทั้งลักษณะทางสัณฐานวิทยาและเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเอทิลีนแวกซ์และผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าหลังทำปฏิกิริยาที่พื้นผิวไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของโมเลกุล



รูปที่ 4.5 ขนาดอนุภาคของพอลิเอทิลีนแวกซ์



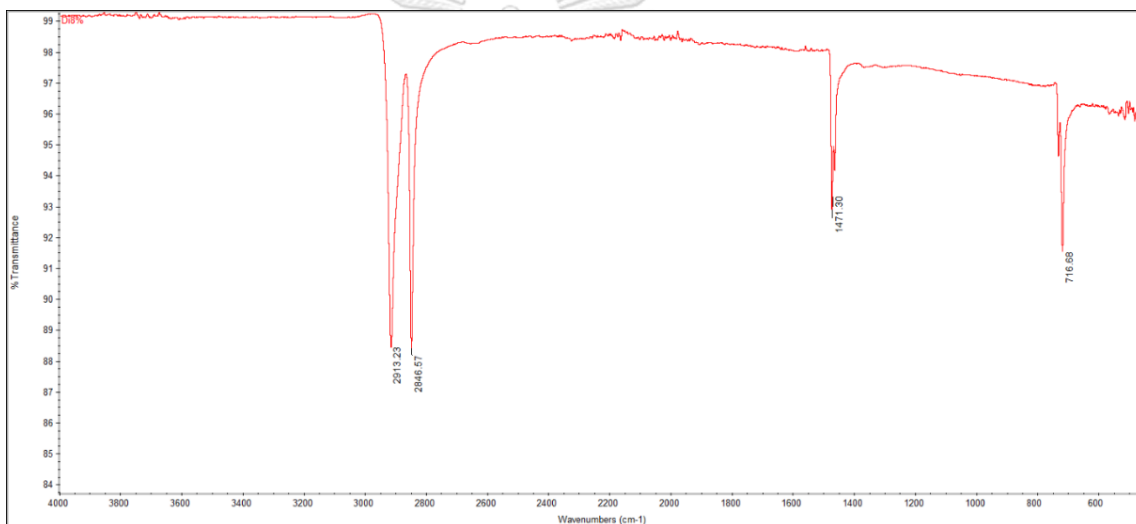
รูปที่ 4.6 ขนาดอนุภาคของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 1



รูปที่ 4.7 ขนาดอนุภาคของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 2

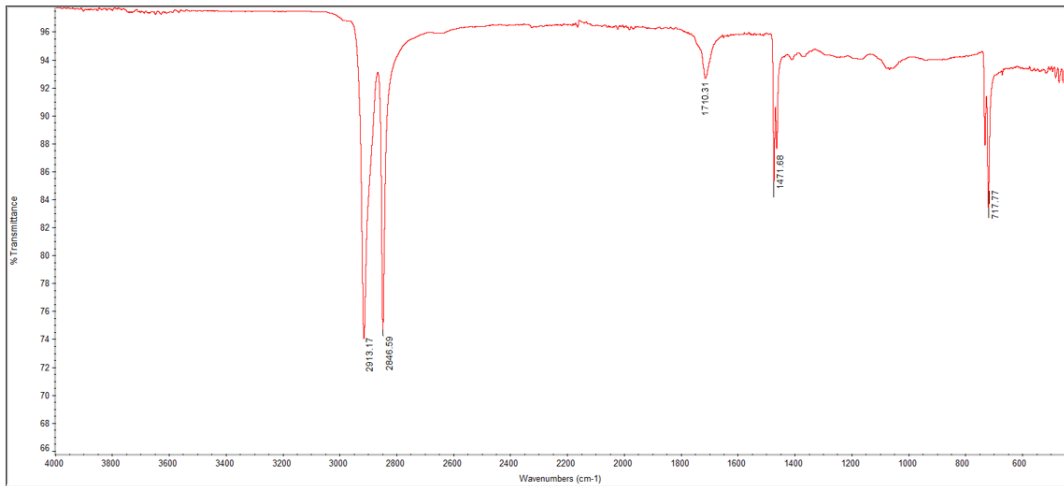
4.7 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)

จากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน เพื่อศึกษา หมู่ฟังก์ชันของพอลิเอทิลีนแวกซ์ รวมถึงผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จึงได้ทำการวิเคราะห์สารที่กล่าวมาข้างต้นด้วยเครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด (FTIR) โดยพบว่าพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ยังไม่ได้ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (แสดงในรูปที่ 4.8) แสดงพันธะ C-H แบบยืด (C-H stretching) แบบสมมาตรที่มีความถี่ 2847 cm^{-1} และแบบไม่สมมาตรที่มีความถี่ 2913 cm^{-1} แสดงพันธะ C-H แบบงอ (C-H bending) ที่ความถี่ 1471 cm^{-1} และแสดงหมู่ฟังก์ชันของการสั่นแบบโยกของพันธะ CH_2 (CH_2 rocking) ที่ความถี่ 717 cm^{-1}

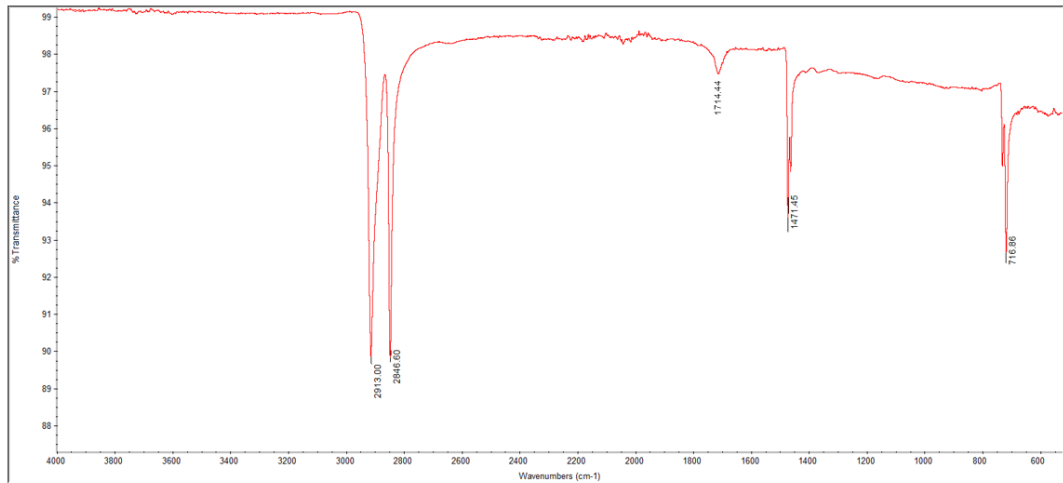


รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ยังไม่ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน

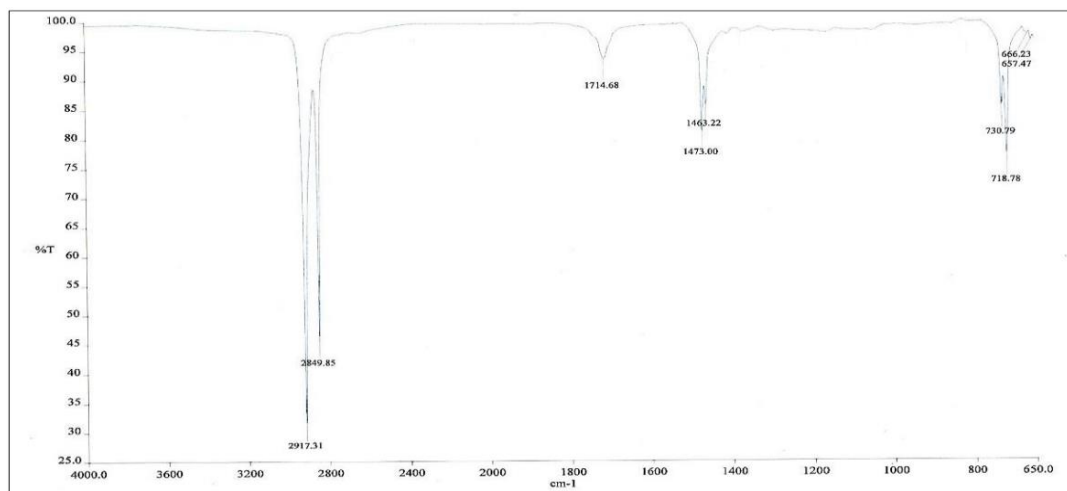
เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 1 และ 2 (แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10ตามลำดับ) ที่ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ภาวะที่เหมาะสม พบว่าปรากฏความถี่ที่ 1710 cm^{-1} และ 1714 cm^{-1} ตามลำดับ แสดงถึงพันธะ C=O แบบยืด (C=O stretching) ซึ่งเป็นหมู่คาร์บอนิล แสดงถึงการมีอยู่ของออกซิเจน โดยเมื่อเทียบกับตัวอย่างอ้างอิงอุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้รับการยืนยันว่ามีค่าความเป็นกรด 20.75 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม (แสดงในรูปที่ 4.11) พบว่าปรากฏความถี่ที่ 1715 cm^{-1} แสดงถึงพันธะ C=O แบบยืด (C=O stretching) ซึ่งเป็นหมู่คาร์บอนิลเช่นกัน



รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 1



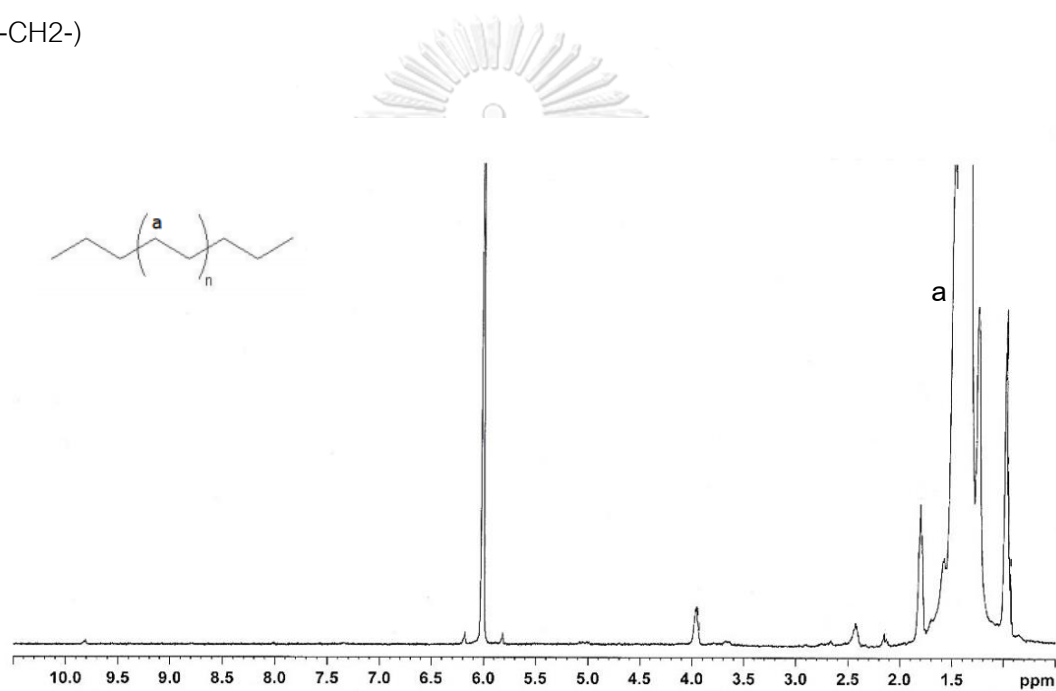
รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 2



รูปที่ 4.11 สเปกตรัมตัวอย่างอ้างอิงอุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์

4.8 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, NMR)

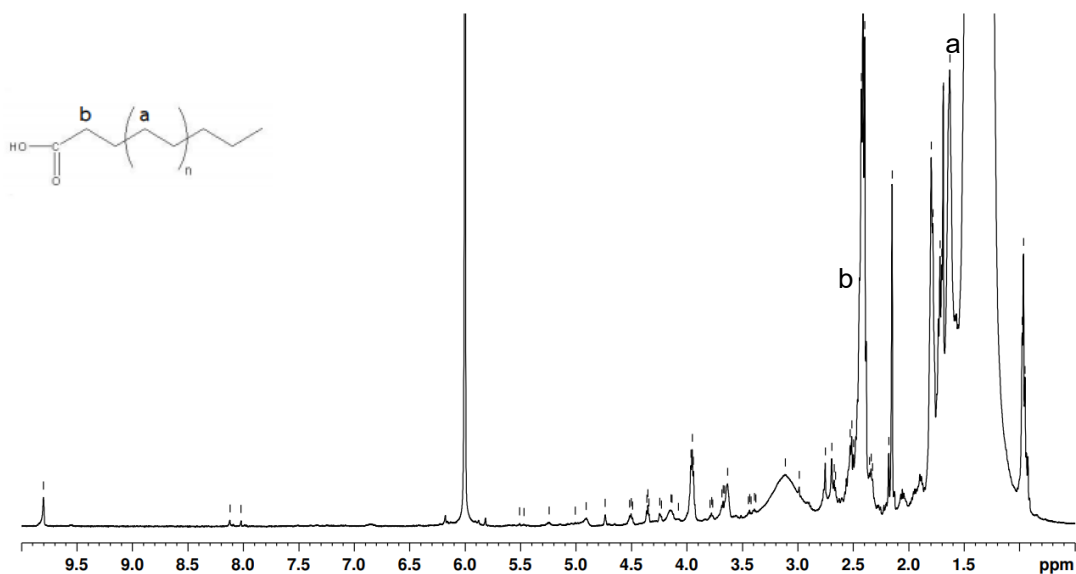
จากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน เพื่อศึกษา หมู่ฟังก์ชันของพอลิเอทิลีนแวกซ์ รวมถึงผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 1 และ 2 จึงได้ทำการวิเคราะห์สารที่กล่าวมาข้างต้นด้วยเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (1H-NMR) โดยใช้ 1,1,2,2-Tetrachloroethane เป็นตัวทำละลาย พบว่าสเปกตรัม 1H-NMR ของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ยังไม่ผ่านการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปรากฏค่าเคมีคัลชิฟท์ (Chemical shift) ที่ประมาณ 1.1-2.0 ppm ซึ่งเป็นค่าเคมีคัลชิฟท์ของโปรตอนของหมู่เมทิลีน (-CH₂-)



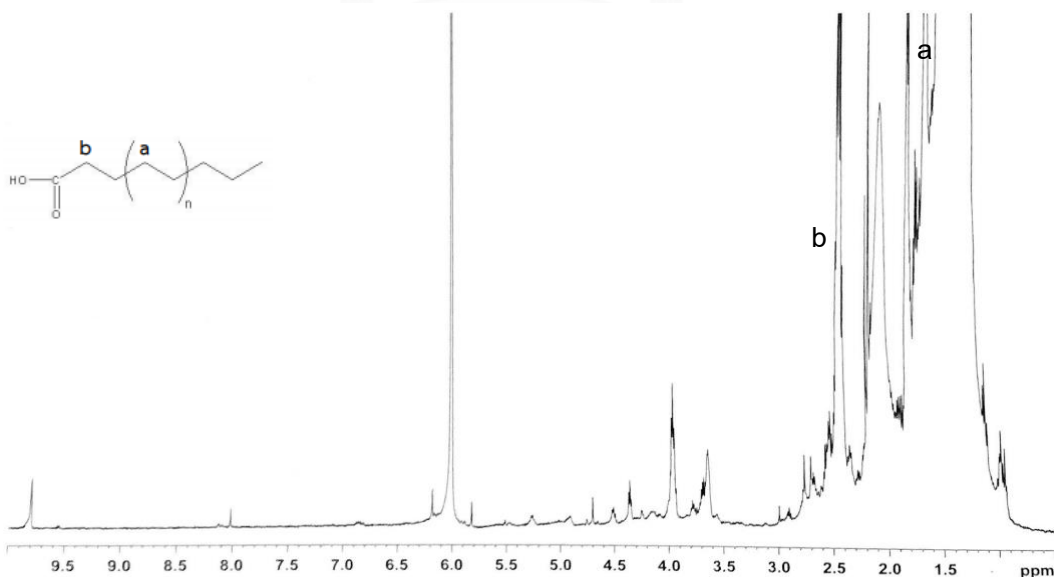
รูปที่ 4.12 สเปกตรัมโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (1H-NMR) ของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน

และจากสเปกตรัม 1H-NMR ของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 1 และ 2 ซึ่งมีความเป็นกรดเท่ากับ 15.23 และ 1.73 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ตามลำดับ พบว่า ปรากฏค่าเคมีคัลชิฟท์ที่ประมาณ 1.1-2.0 ppm ซึ่งเป็นค่าเคมีคัลชิฟท์ของโปรตอนของหมู่เมทิลีน (-CH₂-) นอกจากนี้ยังปรากฏค่าเคมีคัลชิฟท์ที่ประมาณ 2.5 ppm ซึ่งคาดว่าเป็นหมู่เมทิลีนที่เกาะอยู่กับกรดคาร์บอกซิลิก โดยเทียบกับตัวอย่างอ้างอิงอุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้รับการยืนยันว่ามีค่าความเป็นกรด 20.75 mg KOH/g (แสดงในรูปที่ 4.14) และจากงานวิจัยของ Báez, J.E. และคณะ [29] พบว่าในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์

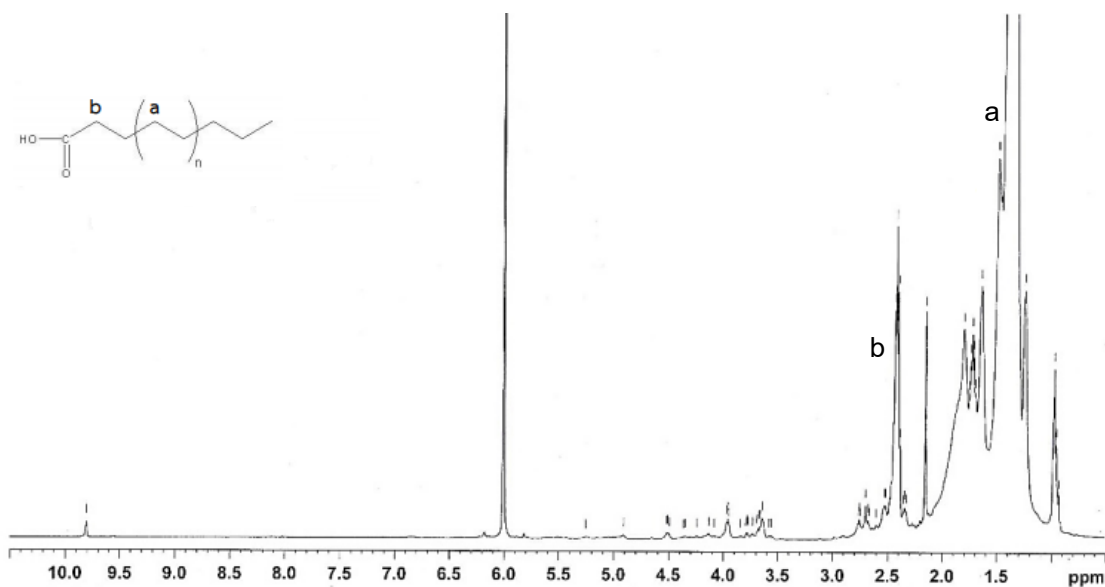
แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี ($^1\text{H-NMR}$) ปรากฏค่าเคมีคัลชิฟท์ที่ประมาณ 2.5 ppm ซึ่งเป็นหมู่เมทิลีนที่เกาะอยู่กับกรดคาร์บอกซิลิกเช่นกัน [29] นอกจากนี้ยังปรากฏค่าเคมีคัลชิฟท์ที่ประมาณ 9.8 ppm ซึ่งเป็นค่าเคมีคัลชิฟท์ของแอลดีไฮด์ เนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์มีโมเลกุลจำนวนมาก เมื่อได้รับความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์สายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนแวกซ์เกิดการแตกออก จากนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาถูกโซ่ของอนุมูลอิสระแบบสุ่ม ทำให้มีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาในทุกตำแหน่งของสายโซ่โมเลกุล



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี ($^1\text{H-NMR}$) ของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 1



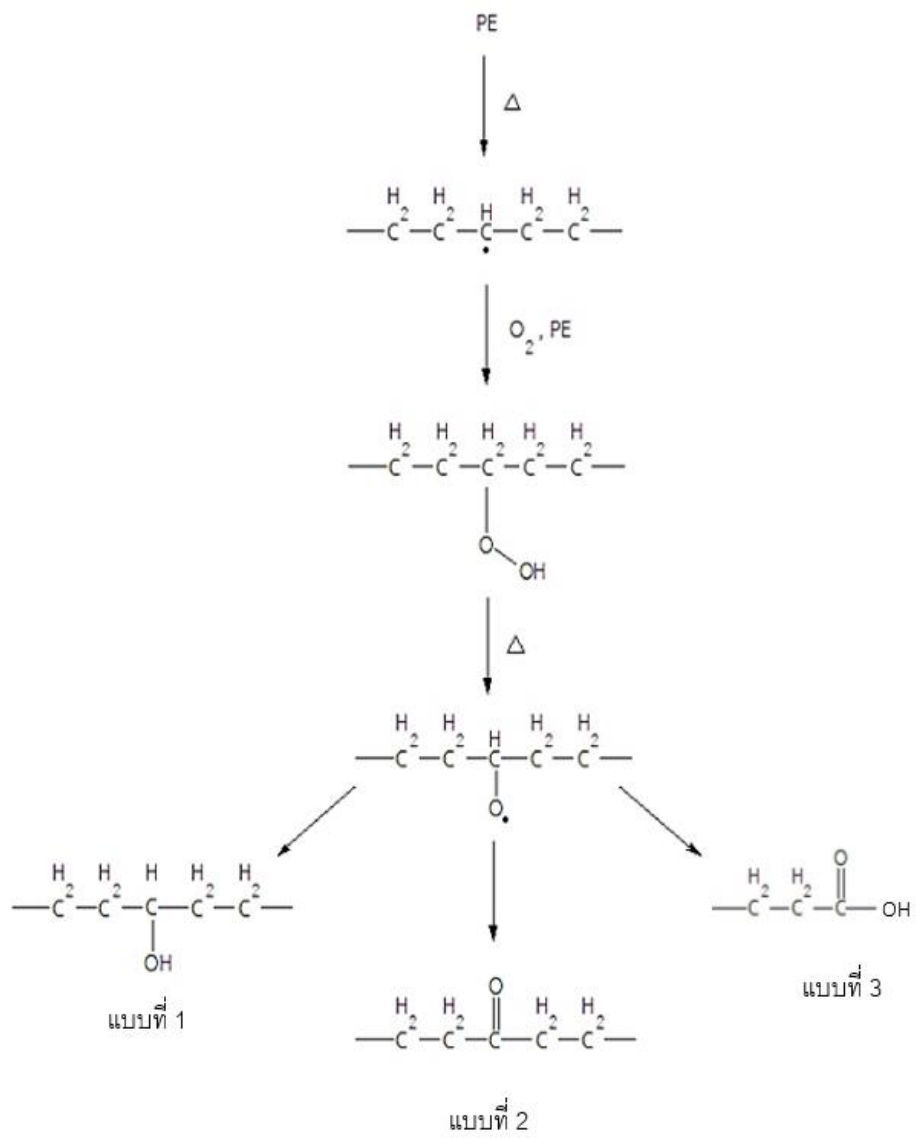
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี ($^1\text{H-NMR}$) ของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิดที่ 2



รูปที่ 4.15 สเปกตรัมโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (1H-NMR) ของตัวอย่างอ้างอิงอุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทีลีนแวกซ์

4.9 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อเพิ่มความมีขั้วของพอลิเอทีลีนแวกซ์

เมื่อสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) จับกับสายโซ่พอลิเอทีลีนแวกซ์แล้ว พันธะ C-H จะเกิดการแตกออก เนื่องจากพันธะ C-H มีพลังงานพันธะ (Bond energy) ต่ำกว่าพันธะ C-C ส่งผลให้พันธะเกิดการสลายตัวได้ง่ายกว่า เมื่อสารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์เข้าไปดั่งไฮโดรเจนออกแล้ว ออกซิเจนจะเข้าไปแทนที่ โดยในงานวิจัยนี้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของพอลิเอทีลีนแวกซ์ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในสถานะของแข็งของพอลิเอทีลีนแวกซ์ และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด (FTIR) และเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (1H-NMR) พบว่าสายโซ่ของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทีลีนแวกซ์ ปราบกฎโครงสร้างตามแบบที่ 3 (แสดงในสมการที่ 4.5)



สมการที่ 4.5 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์และภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ เวลানাในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และปริมาณสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เพื่อผลิตออกซิไดซ์กพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีค่าความเป็นกรดที่มากกว่า 13 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา

จากการทดลองพบว่าอัตราของค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้น แต่การใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานเกินไปอาจทำให้เกิดการสะสมความร้อนและส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนสี ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันคือ 180 นาที เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาต่อไป

5.1.2 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาพบว่า ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์จะเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในการทำปฏิกิริยา แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 123 องศาเซลเซียส พอลิเอทิลีนแวกซ์จะเกิดการละลายและสีของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 123 องศาเซลเซียส มาศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาต่อไป

5.1.3 ผลของปริมาณสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์

จากการศึกษาปริมาณของสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่ใช้พบว่า ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์มากกว่าร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้พอลิเอทิลีนแวกซ์เกิดการจับตัวไปก่อนและมีบางส่วนติดอยู่บริเวณพื้นผิวภายในเครื่องปฏิกรณ์ รวมทั้งทำให้มอเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์หยุด

หมุน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ปริมาณสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ หนึ่ง,หนึ่ง-บิส-(เตรีท-เอมิลเพอร์ออกซี)ไซโคลเฮกเซน ที่ปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความเป็นกรดมากกว่า 13 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

5.1.4 ภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันสถานะของแข็งของพอลิเอทิลีนแวกซ์

จากการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ จากปริมาณพอลิเอทิลีนแวกซ์ 100 กรัม เพื่อให้ได้ค่าความเป็นกรดมากกว่า 13 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม มีภาวะที่เหมาะสมดังต่อไปนี้

เวลาในการทำปฏิกิริยา	180	นาที
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	123	องศาเซลเซียส
ปริมาณสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ หนึ่ง,หนึ่ง-บิส-(เตรีท-เอมิลเพอร์ออกซี)ไซโคลเฮกเซน	6	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ความดันของระบบ	5	บาร์
อัตราการไหลของแก๊สอากาศ (Air zero)	2	ลิตรต่อนาที
อัตราการปั่นกววน	99	รอบต่อนาที

โดยภาวะที่แสดงข้างต้นจะให้ค่าความเป็นกรด 15.23 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

5.1.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของพอลิเอทิลีนแวกซ์และผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ต่อค่าความเป็นกรด พบว่าสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 1 เกิดอนุมูลอิสระมากกว่าสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 2 ซึ่งการที่มีอนุมูลอิสระเยอะส่งผลให้มีความสามารถในการดึงไฮโดรเจนมาก จึงทำให้สารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ชนิดที่ 1 ให้ค่าความเป็นกรดสูงกว่า ในการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อทำการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วของพอลิเอทิลีนแวกซ์ และทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ยืนยันการมีอยู่ของออกซิเจนในผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ โดยได้ทำการไทเทรตเพื่อหาค่าความเป็นกรดที่เกิดขึ้นเมื่อนำพอลิเอทิลีนแวกซ์ไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเมื่อตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของพอลิเอทิลีนแวกซ์และผลิตภัณฑ์

ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์พบว่า ผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังทำปฏิกิริยามีลักษณะพื้นผิวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของโมเลกุล ในส่วนของผลวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนแวกซ์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด (FTIR) ปรากฏความถี่ที่ 1710 cm^{-1} และ 1714 cm^{-1} ตามลำดับ แสดงถึงพันธะ C=O แบบยืด (C=O stretching) ซึ่งเป็นหมู่คาร์บอนิล นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี ($^1\text{H-NMR}$) ปรากฏค่าเคมีคอลชิฟท์ที่ประมาณ 2.5 ppm ซึ่งคาดว่าเป็นหมู่เมทิลีนที่เกาะอยู่กับกรดคาร์บอกซิลิก

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันสำหรับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ
- 5.2.2 ศึกษาชนิดของสารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- 5.2.3 ศึกษาผลของการลดเวลาในการทำปฏิกิริยา เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุด
- 5.2.4 ศึกษาผลของการลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุด
- 5.2.5 ศึกษาผลของการลดปริมาณการใช้สารเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ในการทำปฏิกิริยา เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุด

บรรณานุกรม

1. ปรีชา พหลเทพ. พอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 7 กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรามคำแหง 2548.
2. พอลิเมอร์. แหล่งที่มา: <https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/9631-1-9631>
3. อโนดาษฐ์ รัชเวทย์. พอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ดวงกลมพับลิชชิ่ง, 2555.
4. ปิยฉัตร วัฒนชัย. หลักเคมีพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ฟาสต์บุ๊กส์, 2559.
5. พอลิเมอร์. แหล่งที่มา: <https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7095-2017-06-04-02-45-14>
6. พัชรกัญย์ สุขามาลาวงษ์. การแตกตัวของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีซีใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
7. พอลิเมอร์. แหล่งที่มา: <http://eng.sut.ac.th/polymer/2015/newversion/administrator/document/subjectDocument/14850672621264.pdf>
8. AlMaadeed, M.A.A., D. Ponnamma, and A.A. El-Samak, Polymers to improve the world and lifestyle: physical, mechanical, and chemical needs. Polymer Science and Innovative Applications, 2020. p. 1-19.
9. วรณัฐ เรืองโกสม. การศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีน/เคลย์ นาโนคอมโพสิต. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย ศิลปากร, 2550.
10. สมศักดิ์ ไตรสุภกิตติ. การเปลี่ยนพอลิเอทิลีนไปเป็นก๊าซโซลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
11. ประทุมมา สุโสะ. สมบัติเชิงกลของพลาสติกผสม 3 ชนิด ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิโพรพิลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
12. อรอุมา สันตวิธิ. ผลของโครงสร้างโมเลกุลและองค์ประกอบของความเป็นกิ่งของพอลิเอทิลีนที่มีต่อกลไก การสลายตัวของพอลิไวนิลคลอไรด์ในพอลิเมอร์ผสมของพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิ

เอทิลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2548.

13. พอลิเมออร์. แหล่งที่มา:
https://chemistry.mju.ac.th/goverment/25610518095245_chemistry/Doc25630708162917_141865.pdf
14. ตรีนุช จิรวรเศรษฐ์กุล. การเตรียมโซลเจลจากเอทิลีนจากการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีอีในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551
15. ณัฐชยา อโนชาเดช. การปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น โดยเทคนิคการทำพอลิเมออร์ผสม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
16. ฉกาจ จบนุช. การศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบจากยูคาลิปตัสและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.
17. อุบลวรรณ มะเดื่อ. การผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์โดยใช้กระบวนการพ่นละออง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลาคคนรินทร์, 2555.
18. Degradation of polymers. แหล่งที่มา:
<https://polymerdatabase.com/polymer%20chemistry/Thermal%20Degradation.html>
19. Zawadiak, J., et al., Catalytic oxidation of polyethylene with oxygen under solid-state conditions. Journal of Applied Polymer Science, 2010. p. 1414-1420.
20. Zawadiak, J., B. Orlińska, and A.A. Marek, Catalytic oxidation of polyethylene with oxygen in aqueous dispersion. Journal of Applied Polymer Science, 2013. 127(2): p. 976-981.
21. Bracco, P., et al., A review of experimental studies of the role of free-radicals in polyethylene oxidation. Polymer Degradation and Stability, 2018. 155: p. 67-83.
22. Kumar, S., et al., Partial Liquid Phase Oxidation of Microcrystalline Waxes to Produce Emulsifiable Waxes. Petroleum Science and Technology, 2007. 25(11): p.

- 1367-1374.
23. Sisanth, K.S., et al., General introduction to rubber compounding. Progress in Rubber Nanocomposites, 2017. p. 1-39.
 24. Organic peroxides. แหล่งที่มา: <https://www.chemicalsafetyfacts.org/organic-peroxide/>
 25. Jianyu, Z., et al., Development of Oxidized Polyethylene Waxes. Petroleum Science and Technology, 2000. 18(9-10): p. 1077-1088.
 26. Prana, V., et al., Prediction of the thermal decomposition of organic peroxides by validated QSPR models. Journal of Hazardous Materials, 2014. 276: p. 216-24.
 27. Yang CH, A Study on the Synthesis of Oxidized Polyethylene Wax by Controlling Reaction Parameters. Journal of The Korean Oil Chemists Society 20, 2003. p. 141-147.
 28. Akbarian, D., et al., Atomistic-scale insights into the crosslinking of polyethylene induced by peroxides. Polymer, 2019. 183.
 29. Báez, J.E., A. Martínez-Richa, and A. Marcos-Fernández, One-Step Route to α -Hydroxyl- ω -(carboxylic acid) Polylactones Using Catalysis by Decamolybdate Anion. Macromolecules, 2005. 38(5): p. 1599-1608.

ภาคผนวก ก
การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล

1. ชั่งของแข็งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 5.611 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. นำไปละลายในน้ำกลั่น 5.6 มิลลิลิตร และใช้แท่งแก้วคนจนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ละลายหมด
3. จากนั้นนำไปเจือจางโดยใช้เอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 เพื่อปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร โดยใช้ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร



ภาคผนวก ข
การเตรียมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน

1. ชั่งของแข็งฟีนอล์ฟทาลีนปริมาณ 1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. จากนั้นนำไปละลายในเอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 ในปริมาตร 20 มิลลิลิตร และใช้แท่งแก้วคนจนฟีนอล์ฟทาลีนละลายหมด
3. นำสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนที่ละลายแล้วใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมเอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 เพื่อปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ธัญชฎา ทิพย์ไกรสร
วัน เดือน ปี เกิด	07 ตุลาคม 2536
สถานที่เกิด	ปราจีนบุรี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	IDEO O2 อาคารB 195/772 แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY