

การเตรียมไขพอลิเอทิลีนจากการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีอีในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

นางสาวตรีณัฐ จิวระเศรษฐ์กุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF POLYETHYLENE WAX BY THERMAL CRACKING OF LDPE  
IN MICROREACTOR

Miss Threenuch Jivorasetkul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมโซลเจลจากสารเติมแต่งด้วยความร้อนของ  
แอลดีพีอีในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

โดย

นางสาวตรีณัฐ จิวระเศรษฐ์กุล

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรธน์ ประศาสน์สารกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. สุเมธ เจริญชัยเดช)

ตรีณัฐ จิวระเศรษฐ์กุล : การเตรียมไซพอลิเอทิลีนจากการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีอีในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (PREPARATION OF POLYETHYLENE WAX BY THERMAL CRACKING OF LDPE IN MICROREACTOR) อ. ที่ปรึกษา รศ. ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานนท์ , 54 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการแตกตัวแอลดีพีอีไปเป็นไซพอลิเอทิลีนด้วยความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก โดยศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมการเตรียมในไซพอลิเอทิลีนเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการจากการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีอีในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก โดยจะศึกษาตัวแปร ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ 350-380 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30-90 นาที ความดันเริ่มต้น 0-150 ปอนด์/ตารางนิ้ว ชนิดของแก๊สไนโตรเจนและไฮโดรเจน และเปอร์เซ็นต์ของเตตระรีน 0.5-5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ไซที่ได้จะนำไปคำนวณหาร้อยละของผลิตภัณฑ์ พร้อมทั้งวิเคราะห์จุดหลอมเหลวและวัดความหนืด ด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์และเครื่องวัดความหนืด ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบว่าคุณสมบัติตรงตามความต้องการนำไปใช้ประโยชน์

จากการวิจัยพบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแตกตัวแอลดีพีอีด้วยความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ซึ่งจะให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนมากกว่า 97 % จุดหลอมเหลวในช่วง 105-109 องศาเซลเซียส และความหนืดระหว่าง 544-1800 เซนติพอยด์ อุณหภูมิ 360-370 องศาเซลเซียสและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30-70 นาที ส่วนความดันเริ่มต้นไม่มีผลต่อร้อยละและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีน นอกจากนี้ยังพบว่าเตตระรีนจะมีส่วนร่วมในกลไกการแตกตัวด้วยความร้อน ซึ่งจะส่งผลให้จุดหลอมเหลวและความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้ลดลง

ภาควิชา...เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา...เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2551

# # 5072277823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: THERMAL CRACKING / LDPE / POLYETHYLENE WAX

THREENUCH JIVORASETKUL: PREPARATION OF POLYETHYLENE WAX BY THERMAL  
CRACKING OF LDPE IN MICROREACTOR. ADVISOR : ASSOC. PROF. THARAPONG  
VITIDSANT, Ms.D.54 pp

Thermal cracking of LDPE to Polyethylene wax in microreactor is investigated in this work. The effect of the reaction conditions including cracking temperature between 350 and 380°C, reaction time was 30-90 minutes, initial pressure from 0 to 150 psi, Tetralin solvent percent of 0.5-5.0 %weight and gas type are nitrogen and hydrogen on the yield and properties of polyethylene wax — such as melting point and viscosity.

The Polyethylene wax has a melting point ranges of 105-109 °C. The viscosity ranges from 544 to 1,800 Cps.; the yield is over 97%. The proper cracking temperature is 360-370°C and reaction time of 30 – 70 minutes. Initial pressure does not affect the yield and properties of Polyethylene wax. Moreover, Tetralin participates in the thermal cracking mechanism, which decreases melting point and viscosity of Polyethylene wax.

Department: Chemical Technology.....Student's Signature.....

Field of Study: Chemical Technology.....Advisor's Signature.....

Academic Year: 2008

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. ธรพวงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆด้วยดีตลอดมา และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจาก บริษัท ไทยโพลีเอททีลีน จำกัด และธนาคารเพื่อการพัฒนาแห่งเอเชีย ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ และดร. สุเมธ เจริญชัยเดช ที่กรุณามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และพี่น้องๆ ที่ให้กำลังใจ, ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่สอนตั้งแต่ประถมศึกษา มัธยมศึกษา อุดมศึกษา ที่ให้ความรู้และสั่งสอน

ขอขอบพระคุณพี่ชรี ชิวศรีรุ่งเรือง พี่ศรัญญา คัชมาตย์ และพี่พิชญ์ พฤษชาธร ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือในงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคน สำหรับมิตรภาพและกำลังใจที่ดีและคอยช่วยเหลือในเรื่องการเรียนตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การแตกตัว.....	3
2.2 พอลิเอทิลีน.....	8
2.3 ไซพอลิเอทิลีน.....	15
2.4 เตตระรีน.....	18
2.5 หลักการพื้นฐานการออกแบบการทดลอง.....	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
3. เครื่องมืออุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	25
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้.....	27
3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	27
3.4 วิธีการทดลอง.....	28
3.5 การออกแบบการทดลองแตกตัวแอลดีพีด้วยความร้อน.....	29

## บทที่

4. ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 3 ตัวแปร.....	31
4.2 ผลของเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของ แอลดีพีอีในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	33
4.3 ผลของความดันเริ่มต้นต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีอี ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	37
4.4 เปรียบเทียบผลของชนิดแก๊สต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีอี.....	40
4.5 เปรียบเทียบผลของเปอร์เซ็นต์เตตระรีนต่อการแตกตัวด้วยความร้อน ของแอลดีพีอีในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	42
5. สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	47
รายการอ้างอิง.....	49
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก รายละเอียดการคำนวณ.....	52
ภาคผนวก ข เทอร์โมกราฟจุดหลอมเหลวของ เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	53
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	54



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	29
ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 3 ตัวแปร (ซ้ำ 2 ครั้ง) .....	30
ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของไซพอลิเอทิลีนในทางการค้า.....	31
ตารางที่ 4.2 ตารางการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอุณหภูมิ เวลาและความดันเริ่มต้น ในการเกิดปฏิกิริยาจากผลร้อยละ จุดหลอมเหลว และความหนืดของผลิตภัณฑ์ ไซพอลิเอทิลีน.....	32
ตารางที่ 4.3 ตารางผลของเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	33
ตารางที่ 4.4 ตารางผลของเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อจุดหลอมเหลวของ ผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	35
ตารางที่ 4.5 ตารางผลของเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อความหนืดของ ผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	36
ตารางที่ 4.6 ตารางผลของความดันเริ่มต้นและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละ ของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	37
ตารางที่ 4.7 ตารางผลของความดันเริ่มต้นและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อจุดหลอมเหลว ของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	38
ตารางที่ 4.8 ตารางผลของความดันเริ่มต้นและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อความหนืด ของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	40
ตารางที่ 4.9 ตารางผลของปริมาณเตตระรีนและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละ ของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	43
ตารางที่ 4.10 ตารางผลของปริมาณเตตระรีนและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อ จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ ขนาดเล็ก.....	44
ตารางที่ 4.11 ตารางผลของปริมาณเตตระรีนและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา ที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ ขนาดเล็ก.....	46

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะโรมาติก.....6

รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนที่ความดันสูง.....10

รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของพอลิเอทิลีนที่ได้จากกระบวนการความดันสูง.....10

รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพกระบวนการซีเกลอร์ที่ใช้เตรียมพอลิเอทิลีน.....11

รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชันแบบฟิสิกส์.....12

รูปที่ 2.6 แสดงเม็ดพอลิเอทิลีนแบบต่างๆ และผลิตภัณฑ์บางชนิด.....15

รูปที่ 2.7 ผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ใช้งานทางการค้า.....17

รูปที่ 2.8 โครงสร้างเตตระรีน.....18

รูปที่ 2.9 การสังเคราะห์อนุพันธ์ของเตตระรีน.....18

รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตไซพอลิเอทิลีนขนาดเล็ก.....25

รูปที่ 3.2 เตาให้ความร้อนแบบขดลวด.....26

รูปที่ 3.7 แสดงแผนภาพรูปเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ใช้ในกระบวนการแตกตัวแอลดีพีอีด้วย  
 ความร้อน.....29

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของ  
 ผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก .....34

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อจุดหลอมเหลว  
 ของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....35

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์  
 ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....36

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันเริ่มต้นและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละ  
 ของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....38

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันเริ่มต้นและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อ  
 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....39

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันเริ่มต้นและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อ  
 ความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....40

รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลของชนิดแก๊สที่มีต่อจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้  
 จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....41

รูปที่ 4.8	เปรียบเทียบผลของชนิดแก๊สที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีน ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	42
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเตตระรีนและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	43
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเตตระรีนและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	44
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเตตระรีนและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	46
รูปที่ ข	ตัวอย่างเทอร์โมแกรมแสดงผลการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนด้วยเครื่องมือดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	53

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการบริโภคทรัพยากรต่างๆ เพิ่มขึ้นตามไปด้วย พลาสติกเป็นอีกหนึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีการบริโภคในอัตราเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งพลาสติกที่มีการนำมาใช้งานแพร่หลาย ได้แก่ พอลิเอทิลีน (polyethylene) ด้วยเหตุที่ว่าพอลิเอทิลีนสามารถนำไปขึ้นรูปทำเป็นของใช้พลาสติกในชีวิตประจำวันได้หลากหลาย นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมและต้นทุนในการผลิตต่ำเมื่อเทียบกับเม็ดพลาสติกประเภทอื่น ๆ แต่ข้อเสียของพลาสติกที่ใช้งานแล้ว ก็คือ ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติในระยะเวลานานสั้น นอกจากนี้ในการกำจัดโดยการเผาไหม้ยังก่อให้เกิดปัญหามลพิษตามมาอีกด้วย ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดที่จะเปลี่ยนพลาสติกซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติให้เป็นผลิตภัณฑ์ชีว ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมได้เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์และมูลค่าเพิ่มมากขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ชีวเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความสนใจเนื่องจากผลิตภัณฑ์ชีว นั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรมที่นำผลิตภัณฑ์ชีวไปใช้ ทำให้ในขณะนี้โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆมีความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ชีวที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้แนวคิดในการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ชีวพอลิเอทิลีนโดยการนำพอลิเอทิลีนมาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า “กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน” ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้มีขนาดของโมเลกุลที่เล็กลงโดยใช้ความร้อนอุณหภูมิสูง โดยหากควบคุมให้กระบวนการแตกตัวเป็นไปได้อย่างพอดี ก็จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีอีไปเป็นชีวพอลิเอทิลีน ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา ความดันเริ่มต้น ชนิดของแก๊ส และเปอร์เซ็นต์เตตระรีน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก
- 1.2.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ชีวพอลิเอทิลีนที่มีสมบัติตรงตามความต้องการนำไปใช้ประโยชน์

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ได้ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมชีวพอลิเอทิลีนจากการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีอี
- 1.3.2 ได้ชีวพอลิเอทิลีนจากแอลดีพีอีที่มีสมบัติสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆได้ต่อไป

#### 1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ

1.4.2 จัดสร้างและติดตั้งระบบเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (microreactor)

1.4.3 หาภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของแอลดีพีซีด้วยเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิ (350 – 380 องศาเซลเซียส) เวลา (30 – 90 นาที) ความดัน (0 – 150 ปอนด์/ตารางนิ้ว) ชนิดของแก๊ส (แก๊สไฮโดรเจนและไนโตรเจน) และเปอร์เซ็นต์เตตระรีน (0.5-5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

1.4.4 วิเคราะห์จุดหลอมเหลวด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter) และวัดความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด (Brookfield Viscometer)

1.4.5 วิเคราะห์ สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การแตกตัว (cracking)

#### 2.1.1 การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking)

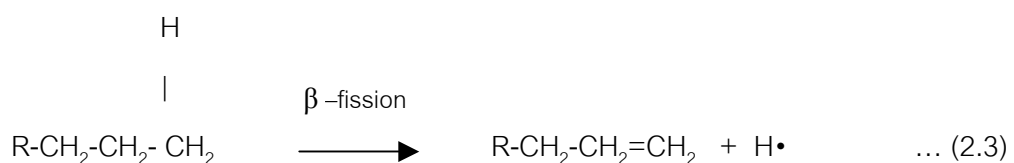
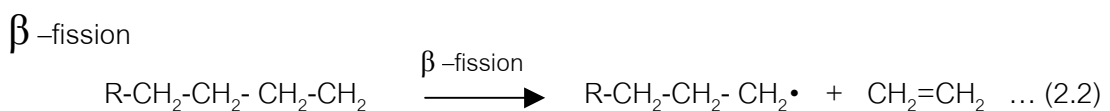
การแตกตัวด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้มีขนาดของโมเลกุลที่เล็กลงโดยใช้ความร้อนอุณหภูมิสูง โดยหากควบคุมให้การแตกตัวเป็นไปได้อย่างพอดี มีการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เนื่องจากการให้ความร้อนเกินพอดีจะทำให้การแตกตัวโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กเกินไปจนอยู่ในรูปแก๊ส  $C_1-C_4$  ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการและไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนจะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาโดยเฉพาะส่วนที่มีแขนโอเลฟิน (olefin) และ ไดโอเลฟิน (diolefin) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากันเองต่อไป

กระบวนการแตกตัวโมเลกุลด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาอนุมูลอิสระ (Free radical) แบบห่วงโซ่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน

1. ขั้นเริ่มต้น (Initial step) เป็นขั้นตอนในการเกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) เกิดจากความร้อนไปทำให้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขาดออกจากกัน เกิดเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยาในขั้นต่อไป



2. ขั้นเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (Propagation step) เกิดจากอนุมูลอิสระในขั้นเริ่มต้นทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง การแตกตัวจะเริ่มจากอนุมูลอิสระเข้าไปยังพันธะคาร์บอนที่ตำแหน่ง  $\beta$  เกิดอนุมูลอิสระใหม่ขึ้น ( $\beta$ -fission) ซึ่งทำให้ภายในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเกิดความไม่เสถียรส่งผลให้เกิดขั้นตอนการถ่ายทอดไฮโดรเจน (chain transfer) เพื่อให้โมเลกุลเกิดความเสถียร จึงเกิดเป็นสารต่างๆ ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงจากพอลิเมอร์เดิม พร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นต่อ เพื่อเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเรื่อยๆ



Chain transfer



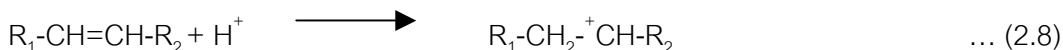
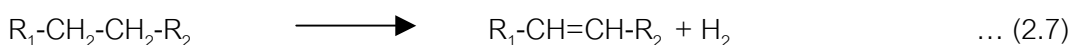
3. ขั้นหยุดปฏิกิริยา (Termination step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่องโดยจะทำปฏิกิริยากันเอง เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ใหญ่ขึ้น โดยอาจเกิดเป็นโมเลกุลใหม่โมเลกุลเดียวหรือ เกิดเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล



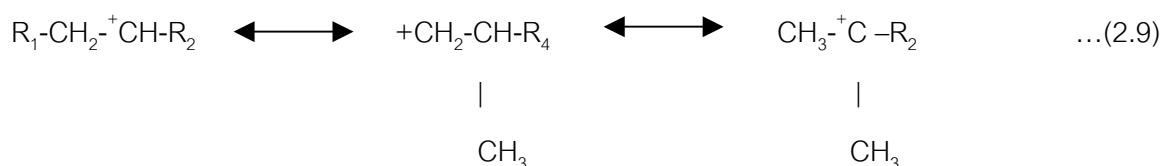
### 2.1.2 การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Cracking)

การแตกตัวด้วยโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามามีบทบาทในการช่วยแตกย่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสม คุณภาพที่เหมาะสมจะนำไปใช้ประโยชน์ตามต้องการได้ กลไกของการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย

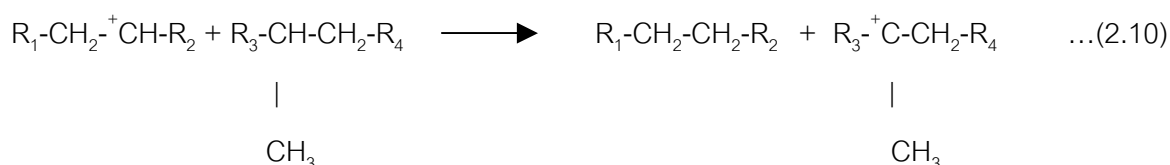
1. การเกิดดีไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนเนียมไอออน (carbonium ion) ซึ่งเกิดจากการที่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรดีไอออนที่มีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด ทำให้คาร์บอนเนียมไอออนมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า โดยคาร์บอนเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจะมีเสถียรภาพแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออน โดย tertiary ion จะมีเสถียรภาพมากกว่า secondary โมเลกุลไฮโดรคาร์บอน ion และ primary ion ตามลำดับ



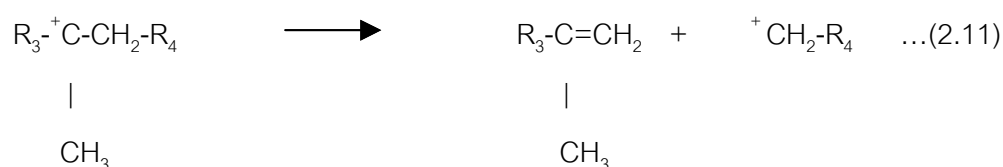
2. การเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลของคาร์บอนเนียมไอออน ซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างของคาร์บอนเนียมไอออนมีเสถียรภาพแตกต่างกัน



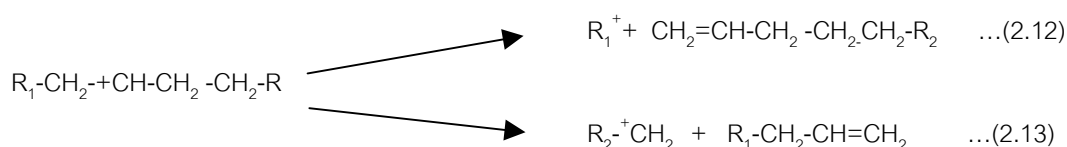
และเกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (hydride transfer) โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนเนียมไอออนกับโมเลกุลของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน



สำหรับคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยา  $\beta$ -fission หรือการแตกตัวที่ตำแหน่ง  $\beta$  ที่นับจากจุดที่มีประจุบวก ซึ่งจะให้สารประกอบโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลง โดยมักจะเป็น primary carbonium ion ดังสมการ



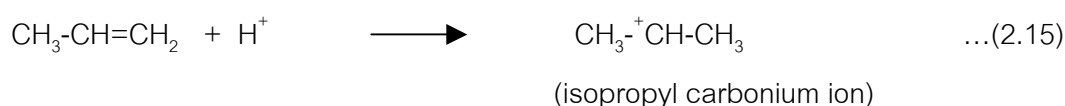
ในบางกรณีคาร์บอนเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่น ในตัวอย่างของ secondary carbonium ion



ถ้า  $R_1=H$  การเกิด  $\beta$ -scission จะสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ดังสมการ



โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ พอรฟินจะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและอยู่ในรูปคาร์บอนเนียมไอออนซึ่งไม่สามารถเกิด  $\beta$ -fission ต่อไปได้

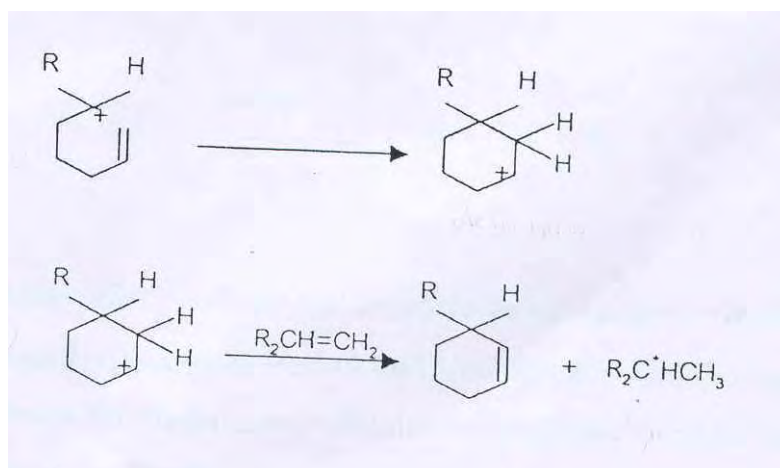
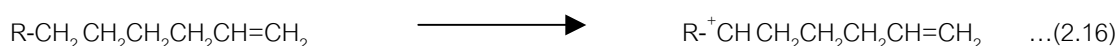


Isopropyl carbonium ion จะเกิดปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายไฮไดรด์กับโมเลกุลประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรเพน หรืออาจเกิดการสูญเสียโปรตอน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรฟิน



สารไฮโดรคาร์บอนพาราฟินจะถูกแยกสลายให้มีโมเลกุลเล็กลง พวกโอเลฟินจะถูกเปลี่ยนไปเป็น ISO-Paraffins ส่วนพวกแนฟทาลินก็ถูกแยกสลายไปเป็นพวกโอเลฟินและพาราฟิน ตัวอะโรมาติกที่มีอยู่มักจะเจือปนต่อปฏิกิริยาแต่บางส่วนก็จะกลายเป็นเขม่า (Coke) เกาะอยู่บนผิวสารเร่ง ทำให้สารเร่งเสื่อมสภาพเร็วขึ้น จึงต้องมีขบวนการ Regeneration เพื่อเผากำจัดเขม่าที่เกาะอยู่บนผิวสารเร่งให้หมดไปก่อนที่จะนำมาใช้อีก

ในการเกิดวงแหวนอะโรมาติกจากปฏิกิริยาดีไฮโดรไซคลิกเซชัน (dehydrocyclization) โดยโอเลฟิน เกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยา  $\beta$ -scission ได้สารประกอบ olefin carbonium ion ที่มีลักษณะเป็นวงแหวน จากนั้นเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟิน เกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ไอออนจากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะได้ allylic carbonium ion ที่มีเสถียรภาพและเกิดการรับโปรตอนจาก cyclohexadiene ซึ่งในขั้นสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะโรมาติก แสดงดังรูปที่ 2.1



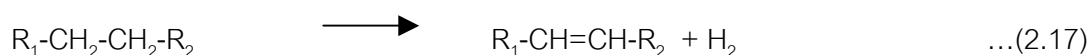
รูปที่ 2.1 การเกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะโรมาติก

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยแก๊สที่มีโอเลฟินสูง องค์ประกอบของเบนซินที่มีค่าออกเทนสูงเนื่องจากมีสารจำพวกอะโรมาติกและโอเลฟินมาก องค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดใสและโค้ก (coke) ที่จะเกาะติดอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้พื้นที่ผิวรูพรุนและความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงจนเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

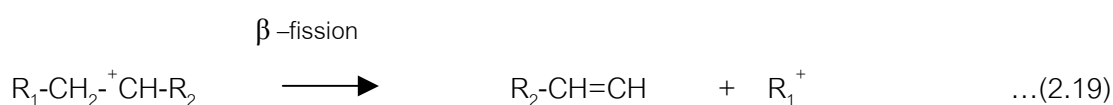
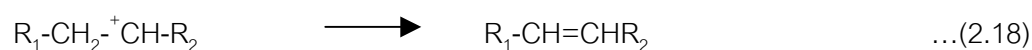
### 2.1.3 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking)

การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่รวมระหว่างการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและการเติมไฮโดรเจน ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงจำนวนมาก เกิดเป็นพาราฟินและแนฟทาลิน โดยตัวเร่ง

ปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภท 2 หน้าที่ (dual function) คือ ช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนและช่วยเติมไฮโดรเจน จึงมักประกอบด้วยสารจำพวกซิลิกา-อะลูมินาที่สามารถช่วยในการแตกพันธะคาร์บอนได้พร้อมๆกับการเติมไฮโดรเจนโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มต้นจากการเกิดคาร์บอนเนียมไอออนตรงบริเวณที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา



คาร์บอนเนียมไอออนอาจมีการจัดเรียงตัวใหม่ โดยการกำจัดโปรตอนออกจากโอเลฟินหรือเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า( $\beta$ -scission) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนตัวใหม่ จากนั้นการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนและการตั้งไฮโดรเจน โอเลฟินที่ผ่านการเติมไฮโดรเจนจะกลายเป็นสารประกอบพาราฟิน



หากปฏิกิริยาเกิดในภาวะที่อุณหภูมิ 400-480 องศาเซลเซียส ความดัน 35-170 บรรยากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบที่อิมตัวค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้เกิดโซลีนที่ได้จากกระบวนการนี้มีค่าออกเทนต่ำกว่ากระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีปริมาณสารประกอบอะโรมาติกน้อย เพราะเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนมากกว่า สารที่ได้จึงมักนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องบิน (jet fuel) รวมทั้งยังได้สารประกอบประเภท LPG ซึ่งใช้เป็นสารป้อนในกระบวนการปิโตรเคมี อย่างไรก็ดีตามการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ได้นั้นต้องอาศัยปัจจัยอื่นๆควบคู่กันไป โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับเวลา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งชนิดของปฏิกิริยาและชนิดของเม็ดพลาสติก

นอกจากนี้การเติมไฮโดรเจนบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะช่วยทำความสะอาดให้กับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไปพร้อมๆกันด้วย เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนจะช่วยกำจัดโค้กที่เกิดขึ้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาออกไป กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมนี้ เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นอย่างดี

เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโค้กและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความสามารถไปหรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายรวมทั้งไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ

## 2.2 พอลิเอทิลีน (Polyethylene)

พอลิเอทิลีนที่ผลิตในทางการค้าเป็นครั้งแรกเป็นพอลิเอทิลีนแบบมีกิ่งก้านสาขา ซึ่งจะมีความหนาแน่นต่ำ เรียกว่า ลอว์ดีนซีพียู (Low density polyethylene) ปัจจุบันมีการผลิตเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน มีทั้ง LLDPE (Linear Low density polyethylene), MDPE (Medium density polyethylene) และอีกตัวที่ผลิตได้นานมาแล้วและหลัง LDPE คือ HDPE (High density polyethylene)

พอลิเอทิลีนมีจุดเดือด -104 องศาเซลเซียส ได้มาจากการดีไฮโดรชันเอทานอล หรือโดยไฮโดรจีเนชันอะซีทีลีน วัตถุดิบจากธรรมชาติก็มีจากก๊าซธรรมชาติ กากน้ำตาลจากอุตสาหกรรมกากน้ำตาล ซึ่งได้มาในรูปแบบเอทานอล นอกจากนี้การเตรียมเอทิลีน อาจใช้ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลอีเทนหรือพอรเพนแล้วทำให้บริสุทธิ์ การทำให้โมโนเมอร์บริสุทธิ์มีความสำคัญมาก เพราะถ้ามีสารอื่นเจือปนอยู่จะมีผลต่อคุณสมบัติพอลิเมอร์ที่ได้ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ต้องไม่เกิน 0.02%

พอลิเอทิลีนผลิตขึ้นครั้งแรกที่ห้องทดลองของบริษัทอิมพีเรียล เคมีคัล อินดัสทรี (ICI) ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และความดัน 1400 atm ได้ผลผลิตเป็น LDPE

พอลิเอทิลีนจำแนกได้ 7 ประเภท ดังนี้

1. Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE)
2. High density polyethylene (HDPE)
3. Cross-linked polyethylene (PEX)
4. Medium density polyethylene (MDPE)
5. Low density polyethylene (LDPE)
6. Linear low density polyethylene (LLDPE)
7. Very low density polyethylene (VLDPE)

### 2.2.1 การเตรียมพอลิเอทิลีน

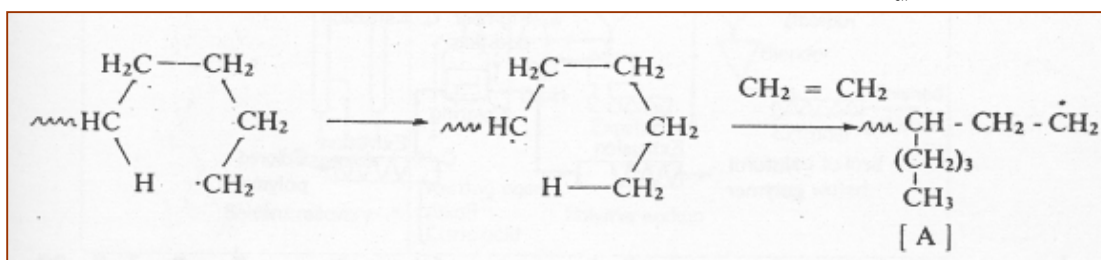
กระบวนการในการเตรียมพอลิเอทิลีนมีด้วยกันทั้งสิ้น 4 วิธี คือ

#### 2.2.1.1 พอลิเมอร์ไรเซชันที่ความดันสูง

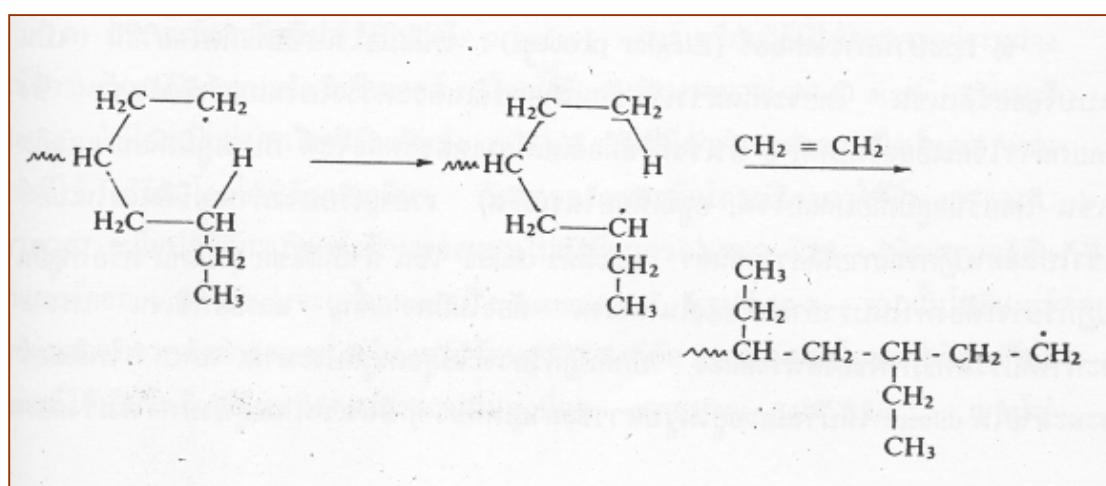
การเตรียมพอลิเอทิลีนทางการค้าที่ความดันสูงปกติใช้ความดันประมาณ 1000 – 3000 atm อุณหภูมิประมาณ 80 – 300 องศาเซลเซียส ใช้ตัวเริ่มเป็นฟรีเรดิคัล เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์, azo-di-isobutyronitrile, ออกซิเจน ถ้าใช้ออกซิเจนเป็นตัวเริ่มจะใช้ความดันประมาณ 1500 atm อุณหภูมิ 200

องศาเซลเซียส ใช้ออกซิเจนประมาณ 0.03 – 0.1% กระบวนการพอลิเมอไรเซชันทำโดยผ่านโมโนเมอร์และตัวเริ่มเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ (Reactors) จะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนสูงมากต้องมีการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ เช่นอาจใช้น้ำหรือเบนซีนช่วยในการระบาย ปกติในปฏิกิริยาจะเกิด 10 – 30% ของโมโนเมอร์ที่เปลี่ยนไปเป็นพอลิเมอร์ แล้วแยกพอลิเอทิลีนออกจากเอทิลีนได้ การใช้ความเข้มข้นของโมโนเมอร์มากๆ และความดันสูงจะทำให้พอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และได้เป็นพอลิเมอร์แบบมีกิ่งก้านสาขาจากการทดสอบด้วยอินฟราเรด สเปกโตรสโคปี พบว่าใน 1 โมเลกุลจะมีหมู่  $-CH_3$  ประมาณ 30 หมู่ต่ออะตอมคาร์บอน 1000 อะตอม นั่นคือ  $-CH_3$  จะต้องเป็นปลายสายโซ่โมเลกุล แสดงว่ามีกิ่งก้านจำนวนมาก เพราะถ้าเป็นโมเลกุลสายโซ่ตรงจะมีหมู่  $-CH_3$  เพียงสองหมู่เท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่ากิ่งก้านสาขาที่ได้จะไม่ยาวมากนัก จะมีเพียง 2 – 4 อะตอมคาร์บอนเท่านั้น การเกิดกิ่งก้านสาขานี้เชื่อว่าเกิดมาจากการย้ายแตรดดิคอลลภายในโมเลกุลเอง (intramolecular transfer) หรือเรียกว่าเกิด Backbiting

ซึ่งจะเกิดได้ดีในสภาวะที่เป็นวงรูป 6 เหลี่ยม จะได้สาขาเป็นหมู่บิวทิล ตามปฏิกิริยาข้างล่างนี้

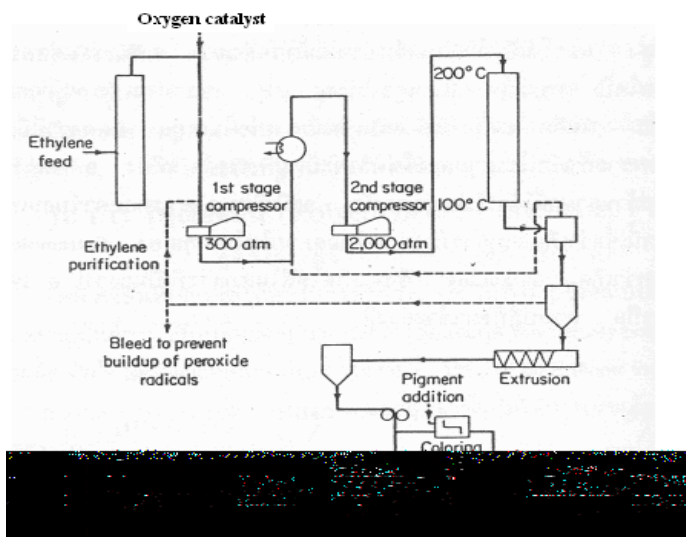


บางครั้งแตรดดิคอลล [A] อาจเกิด Backbiting ได้สาขาเป็นหมู่เอทิล ดังนี้

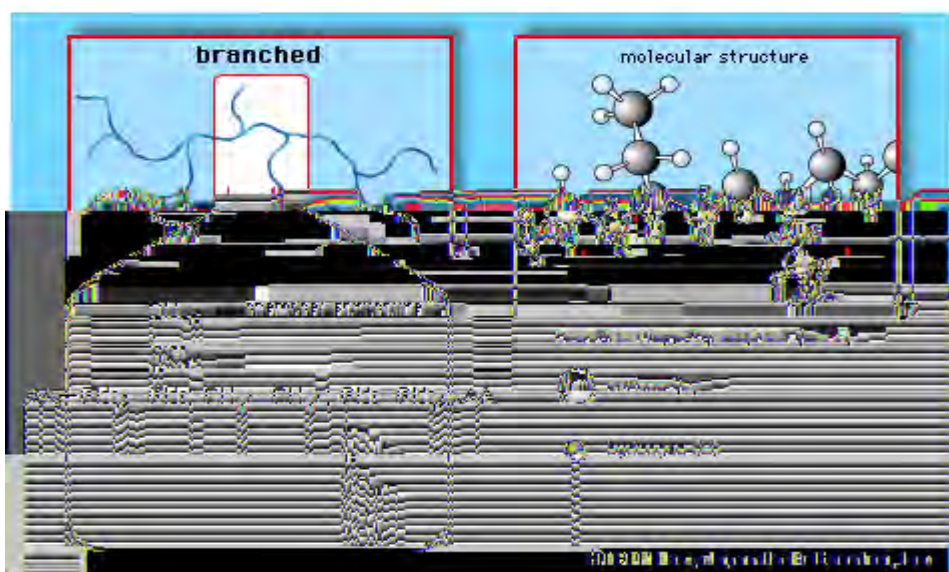


ถ้าต้องการลักษณะกิ่งก้านสาขาที่แตกต่างกันออกไป เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะอื่นๆ อาจทำได้โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิ ความดัน ชนิดของตัวเริ่ม หรืออาจฉีดตัวเริ่มเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งต่างๆ กัน พอลิเมอร์ที่ได้โดยวิธีนี้เป็น LDPE จะมีลักษณะยืดหยุ่นความหนาแน่นต่ำ  $0.915 - 0.94 \text{ g/cm}^3$  รูปที่ 2.2

แสดงแผนภาพการเตรียมพอลิเอทิลีนที่ความดันสูงซึ่งจะเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่ลูกโซ่ โดยโครงสร้างของพอลิเอทิลีนที่ได้จากกระบวนการความดันสูง แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนที่ความดันสูง

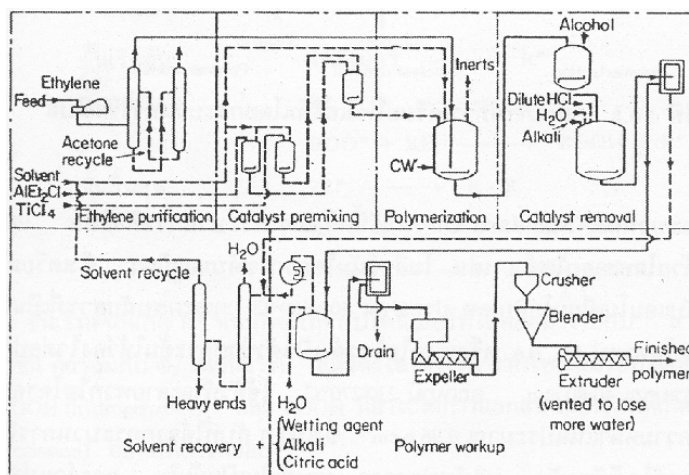


รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของพอลิเอทิลีนที่ได้จากกระบวนการความดันสูง

#### 2.2.1.2 กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process)

พอลิเมอร์ไรเซชันที่เกิดขึ้นโดยวิธีนี้เป็นแบบโคออร์ดิเนชัน โดยจะเกิดสารเชิงซ้อนโคออร์ดิเนชันระหว่างโมโนเมอร์กับตัวเร่ง โดยตัวเร่งที่ใช้คือ ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์กับอลูมิเนียมแอลคิล เวลาเตรียมจะ

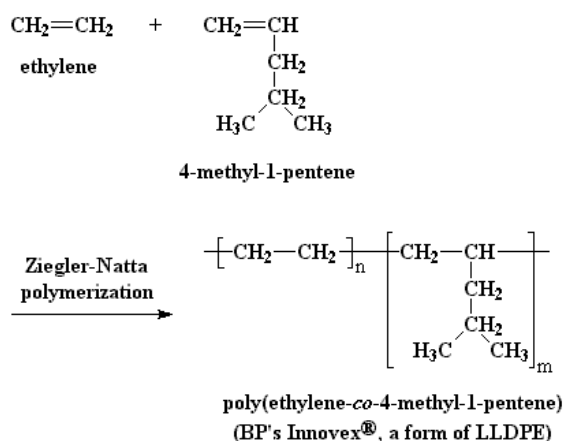
ผ่านเอทิลีนโมโนเมอร์เข้าไปในเตาปฏิกรณ์ภายใต้ความดันต่ำ และมีตัว diluent เช่น น้ำมันดีเซล เฮปเทน หรือโทลูอีน ปฏิกริยาจะต้องทำในบรรยากาศไนโตรเจน ต้องไม่มีความชื้น และออกซิเจนเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งลดลง ปกติปฏิกริยาจะใช้อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์จะละลายใน diluent ได้บ้างและอยู่ในรูปสารละลายเหนียวๆเหนียวๆมีตัวเร่งปนอยู่ด้วย ตัวเร่งแยกออกโดยสารละลายในเอทานอลหรือเมทานอล พวกโลหะจากตัวเร่งแยกออกโดยกรดเกลือ อุณหภูมิต้องการใช้งานเกี่ยวกับ ฉนวนไฟฟ้า จะต้องทำให้บริสุทธิ์หลายๆครั้ง แล้วเซนติฟิวจ์และทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นเม็ดๆ มีความหนาแน่นปานกลางประมาณ  $0.945 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งสูงกว่าวิธีที่ 1 ลักษณะที่สำคัญที่ต่างไปจากวิธีที่ความดันสูง คือ มีสาขาน้อยมากจากวิธีสเปกโตรสโคปี พบว่ามีหมู่เอทิล 5 - 7 หมู่ต่ออะตอมคาร์บอน 1000 อะตอมเท่านั้น และหมู่บิวทิลไม่พบเลย ซึ่งมีผลให้ความหนาแน่นสูงมากขึ้นกว่าวิธีที่ 1 ความยาวของโมเลกุลขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Al - Ti ที่ใช้เป็นตัวเร่ง และมักใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวย้ายสายโซ่ เพื่อหยุดการเติบโตของสายโซ่โมเลกุล รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพกระบวนการซีเกลอร์ที่ใช้เตรียมพอลิเอทิลีน



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพกระบวนการซีเกลอร์ที่ใช้เตรียมพอลิเอทิลีน

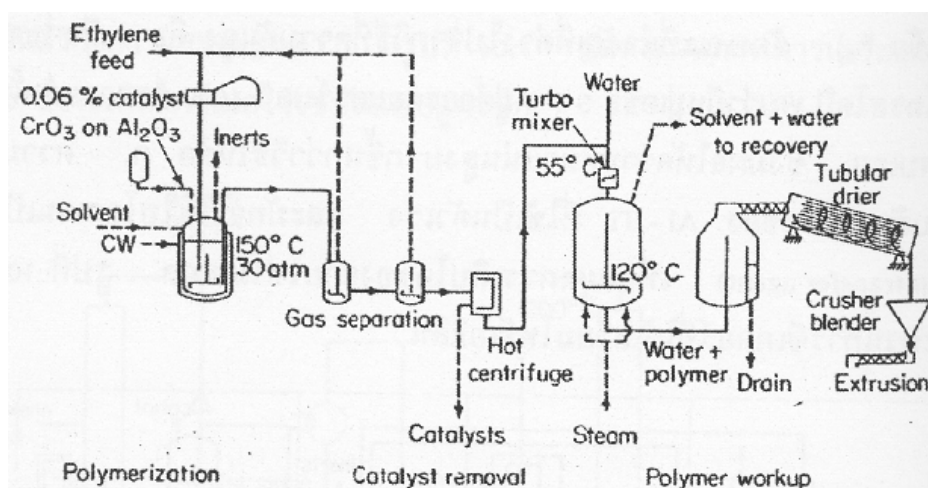
โครงสร้างข้างใต้เป็นตัวอย่างการนำกระบวนการซีเกลอร์-นัตตามาใช้ในการผลิตพอลิเอทิลีนแบบ

LLDPE



### 2.2.1.3 กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process)

การเตรียมวิธีนี้ใช้สภาวะความดันสูงและกระบวนการซีเกลอร์ โดยใช้ความดันประมาณ 30 – 40 atm อุณหภูมิ 90 – 160 องศาเซลเซียส ใช้โครเมียมออกไซด์เป็นตัวเร่ง (CrO<sub>3</sub>) และมีตัวทำละลายเช่น ไสโครเฮกเซน ตัวเร่งที่ใช้เตรียมโดยใส่ซิลิกา-อลูมินา กับสายละลายเกลือโครเมียมเผาให้ถึง 400 – 800 องศาเซลเซียส ในอากาศ เมื่อปฏิกิริยาเกิดแล้วผ่านของผสมไปยังที่แยกของเหลว-แก๊ส เพื่อแยกเอทิลีนโมโนเมอร์ออก แล้วตัวเร่งจะถูกแยกออกที่ hot centrifuge ดังรูปที่ 2.5 จากนั้นพอลิเมอร์จะถูกแยกออกจากตัวทำละลายโดยให้ความร้อนสูง (บางทีก็อาจตกตะกอนโดยทำให้เย็นก็ได้) ผลผลิตที่ได้เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่สุด ประมาณ 0.96 กรัม/ลบ.ซม. สายโซ่โมเลกุลเกือบจะเป็นสายตรงชนิดสมบูรณ์โดยแทบไม่มีกิ่งก้านเลย จะพบมีเพียงแค่มะเม็ดเท่านั้นที่ติดอยู่บ้าง หมูเอธิลหรือหมูบิวทิลไม่มีเลย จึงทำให้มีความหนาแน่นสูงมาก กลไกในการเกิดปฏิกิริยายังไม่เป็นที่รู้จักกัน เนื่องจากซับซ้อนมาก



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบฟิลลิปส์

#### 2.2.1.4 กระบวนการ Standard Oil

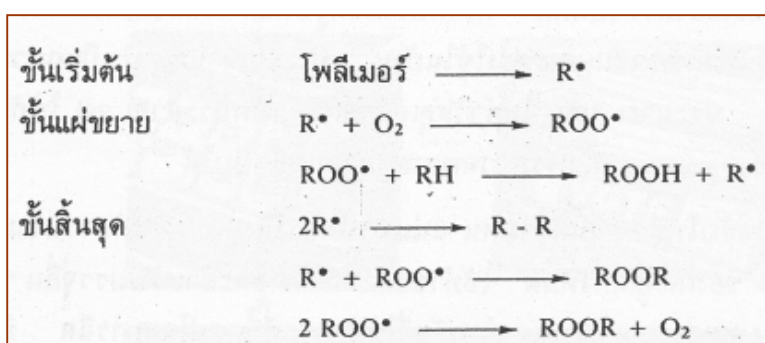
วิธีนี้คล้ายๆกระบวนการฟิลลิปส์ โดยใช้ตัวเร่งประกอบด้วยโลหะออกไซด์ เช่น โมลิบดีนัมไดออกไซด์บนอลูมินา ซึ่งเตรียมได้โดยเผาอลูมินา กับแอมโมเนียโมลิบเดท ประมาณ 500 – 600 องศาเซลเซียส และผสมกับสารที่เป็นตัวช่วยรีดิวซ์ เช่น โลหะหมู่ IA, IIA หรือพวกไฮโดรด์ เป็นตัวช่วยกระตุ้นให้ว่องไวต่อปฏิกิริยา ความดันที่ใช้ประมาณ 40 – 80 บรรยากาศ อุณหภูมิ 230 – 270 องศาเซลเซียส ใช้ตัวทำละลายพวกไฮโดรคาร์บอน ผลผลิตที่ได้มีความหนาแน่นประมาณ 0.96 กรัม/ลบ.ซม. ซึ่งเท่ากับที่ได้จากกระบวนการฟิลลิปส์น้ำหนักโมเลกุลก็ใกล้เคียงกัน บริษัทฟุควาของญี่ปุ่นเป็นผู้ผลิต และจำหน่ายในชื่อว่า Staflen

#### 2.2.2 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

พอลิเอทิลีนจัดเป็นพอลิเมอรัพวาทะโธรมโพลาสติก ความยืดหยุ่นของพันธะ C – C ทำให้อุณหภูมิ Tg มีค่าต่ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนที่เป็นอสัณฐานและผลึก Tg จะมีค่าตั้งแต่ -130 องศาเซลเซียสไปจนถึง 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีทั้งค่าต่ำกว่าและสูงกว่าที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้น พอลิเอทิลีนจึงมีคุณสมบัติทั้งยืดหยุ่น และแข็งที่สภาวะปกติแล้วแต่ชนิดของมัน อุณหภูมิ Tm ของพอลิเอทิลีนที่ได้จากวิธีใช้ความดันสูงมีค่าเท่ากับ 108 องศาเซลเซียส พอลิเอทิลีนที่ได้จากกระบวนการซีเกลอร์ Tm เท่ากับ 130 องศาเซลเซียส ที่ได้จากกระบวนการฟิลลิปส์และ Standard Oil มี Tm เท่ากับ 133 องศาเซลเซียส ความทนต่อแรงดึงมีค่าเท่ากับ 1500 – 6100 lb/in<sup>2</sup> ความยืดตัว กรณี LDPE 100 – 700 %, MDPE 50 – 650 % และ HDPE 10 – 650 %

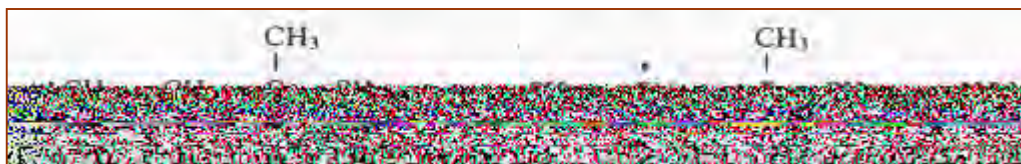
สมบัติในการละลาย ปกติพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆทั้งสิ้นที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส ขึ้นไป มันจะเริ่มพอง และละลายได้ในตัวทำละลายพวกโทลูอีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ไซลีน และไตรคลอโรเอทิลีน เป็นต้น พวกที่มีความหนาแน่นต่ำจะใสมากแต่จะขุ่นขึ้นเมื่อความหนาแน่นสูงขึ้น ทนต่อกรดและด่างได้ดีจึงมักใช้ทำภาชนะบรรจุกรด ด่าง พวกตัวออกซิไดซ์แรง เช่น กรดไนตริกเข้มข้น หรือโปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะทำให้คุณสมบัติเชิงกลเสียไป แต่อาจเพิ่มความต้านทานนี้โดยใช้พวกที่มีความหนาแน่นสูง

พอลิเอทิลีนอาจถูกออกซิไดซ์ในอากาศถ้าได้อุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย หรือถูกแสงแดดอาจเกิดปฏิกิริยาดังนี้

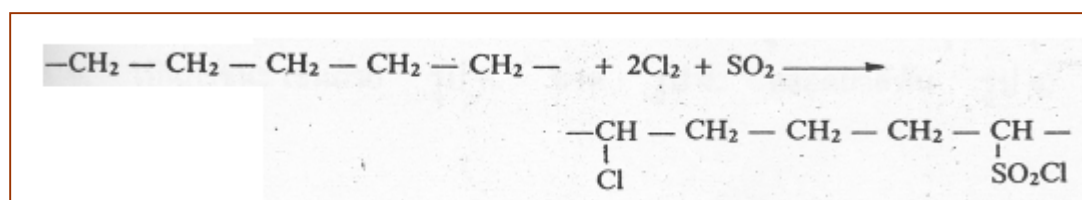




ขั้นเริ่มต้นที่เกิดแรดดิคอลนั้นมักเกิดกับพอลิเมอร์ที่ไม่ค่อยเป็นระเบียบ ส่วนขั้นแผ่ขยายเกิด 2 ขั้น คือ รวมกับ  $O_2$  ในขั้นแรก แล้วดึงไฮโดรเจนจากพอลิเมอร์อีกโมเลกุลหนึ่งมาเกิดเป็น ROOH (hydroperoxide) และ ROOH อาจเกิดการแยกสลายเป็นผลให้เกิดการติดสายโซ่ออกเป็นส่วนย่อยๆ



การเกิดปฏิกิริยาแบบนี้มีผลให้พอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ทำให้สมบัติเชิงกลเสียไป พอลิเอทิลีนอาจถูกคลอรีเนต (chlorinated) โดยเกิดปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับคลอรีน ดังปฏิกิริยา



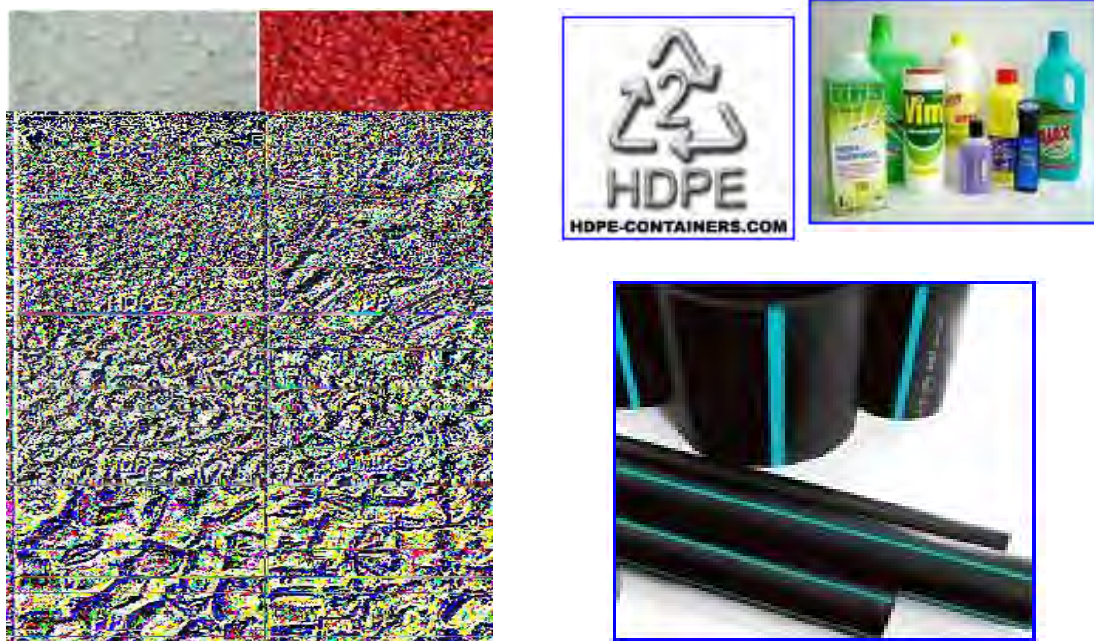
ผลิตภัณฑ์ได้คือ Chlorosulphonated polyethylene ซึ่งใช้เป็นอีลาสโตเมอร์ที่ตีตัวหนึ่ง พวกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำยอมให้แก๊สซึมผ่านได้ เนื่องจากมีส่วนของอสัณฐานซึ่งเป็นปริมาตรอิสระยอมให้มีการเคลื่อนไหวของโมเลกุลได้ จึงมีช่องว่างยอมให้โมเลกุลแก๊สซึมผ่านได้ สำหรับสมบัติทางไฟฟ้า เนื่องจากพอลิเอทิลีนเป็นวัสดุที่ไม่มีขั้ว ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกไม่ขึ้นกับอุณหภูมิจึงเหมาะกับการใช้เป็นฉนวน เช่น ทำสายไฟหุ้มทองแดง

พอลิเอทิลีนจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีปริมาณการใช้งานสูงสุด พวก LDPE ใช้ในรูปแผ่นฟิล์มถึง 2 ใน 3 ของผลผลิตทั้งหมด ใช้ผลิตเป็นเครื่องบรรจุหีบห่อ เช่น ถุง กระเป๋า ของใส่อาหาร เป็นต้น ที่ใช้กับงานขึ้นรูปโดยการฉีด (injection molding) มีประมาณ 13% ทำเป็นพวกของเล่นและของใช้ในบ้าน ประมาณ 10% ทำเป็นฉนวนหุ้มสายไฟและสายเคเบิล ประมาณ 10% ใช้ทำวัสดุเคลือบผิว อีกประมาณ 2% ใช้กับงานขึ้นรูปโดยการเป่า (blow molding) ทำพวกขวดพลาสติกอ่อนชนิดบีบได้ ดังรูปที่ 2.6

สำหรับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางถึงสูง ใช้กับงานขึ้นรูปโดยการเป่าประมาณ 40% ของผลผลิตทั้งหมดใช้ทำขวด และภาชนะสำหรับบรรจุอื่นๆที่ต้องใช้ความต้านทานสูง ทนต่อแรงเค้นสูง สำหรับที่ใช้กับงานที่ขึ้นรูปโดยการฉีด มีประมาณ 20% ของผลผลิตทั้งหมด ใช้ทำของเด็กเล่น เครื่องใช้ภายใน

ในบ้าน นอกจากนี้ยังใช้ทำแผ่นฟิล์มด้วย ทำเชือก ทำฉนวนหุ้มสายไฟและสายเคเบิล วัสดุเคลือบผิว ท่อ และรางน้ำ เป็นต้น

ปกติพอลิเอทิลีนที่ใช้งานมักจะมีการผสมสารต่างๆ เช่น ฟิลเลอร์ สี เพื่อให้ดูสวยงามน่าใช้ ตัวหน่วงเหนี่ยวการติดไฟ ตัวช่วยให้เกิดการเชื่อมโยง แอนติออกซิแดนซ์ ผงคาร์บอนดำสำหรับการดูดกลืนแสง และสารเติมแต่งที่ช่วยป้องกันการเกิดประจุไฟฟ้าสถิต เป็นต้น ซึ่งการเติมแต่งสารเหล่านี้จะช่วยให้ประสิทธิภาพการใช้งานเพิ่มมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.6 แสดงเม็ดพอลิเอทิลีนแบบต่างๆ และผลิตภัณฑ์บางชนิด

## 2.3 ไชพอลิเอทิลีน (Polyethylene wax)

### 2.3.1 คุณสมบัติทั่วไปของไชพอลิเอทิลีน

ลักษณะภายนอก	ของแข็ง, สีขาว โปร่งแสง ไม่มีรสชาติ ไม่เป็นพิษ ปราศจากกลิ่น
รูปแบบ	พบในรูปแบบเม็ด ผง และเกล็ด
จุดหลอมเหลว	97-115 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ	0.922
รายละเอียดอื่นๆ	ความเรียบมันเงาอย่างดี ด้านทานต่อการขีดข่วนและรอยข่วน

### 2.3.2 ไซพอลิเอทิลีนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

#### 1. ไซพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง

น้ำหนักโมเลกุล : ตั้งแต่ 4000 ขึ้นไป

คุณสมบัติ : จุดหลอมเหลวมากกว่าน้ำมัน 48 องศาเซลเซียส

การใช้งาน : พลาสติก เรซิน

#### 2. ไซพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

น้ำหนักโมเลกุล : ต่ำกว่า 4000 ลงมา

คุณสมบัติ : จุดหลอมเหลวต่ำกว่าน้ำมัน 48 องศาเซลเซียส

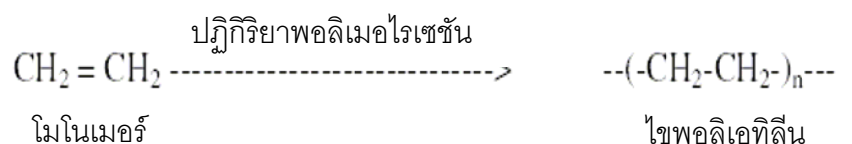
การใช้งาน : ไซ น้ำมัน

### 2.3.3 การเตรียมไซพอลิเอทิลีน

ไซพอลิเอทิลีนได้มาจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่ความดันสูง พอลิเมอไรเซชันที่ความดันต่ำ หรือโดยควบคุมการแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีนซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงให้เหมาะสม ไซพอลิเอทิลีนสามารถผลิตมาจากพอลิเอทิลีน หรือเอทิลีน ซึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาโดยบริษัทในสหรัฐอเมริกาจะใช้เอชดีพีอี และแอลดีพีอีเป็นวัตถุดิบหลัก

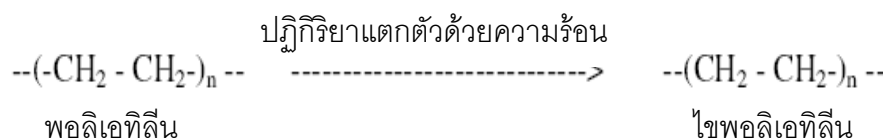
กระบวนการเตรียมไซพอลิเอทิลีน

#### 1. การสังเคราะห์



การผลิต : ประเทศเยอรมัน สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น

#### 2. การแตกตัว



การผลิต : ประเทศเกาหลี

### 2.3.4 การประยุกต์ใช้งาน

การเพิ่มไซพอลิเอทิลีนในไฮโดรคาร์บอนจะช่วยเพิ่มจุดหลอมเหลวของไฮให้สูงขึ้น ไซพอลิเอทิลีนยังเข้ากันได้กับปิโตรเลียมและไฮอื่น ๆ ไซพอลิเอทิลีนสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบอิมัลชัน และแบบ

ที่ไม่เป็นอิมัลชัน ดังรูปที่ 2.7 โดยแบบอิมัลชันใช้เกี่ยวกับสิ่งทอ เครื่องหนัง เครื่องสำอาง สีเทียน สารเคลือบกระดาษ กาวและอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ส่วนแบบที่ไม่เป็นอิมัลชันใช้เป็นกลางสำหรับความเข้มข้นของเม็ดสี สารหล่อลื่นสำหรับพลาสติกและอีลาสโตเมอร์ สี และอุตสาหกรรมหมึกพิมพ์

การใช้ในส่วนของบรรจุภัณฑ์

ไขจากพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีคุณสมบัติที่ใช้ร่วมกับไขปิโตรเลียม (petroleum waxes) ในการใช้กับบรรจุภัณฑ์อาหาร FDA ยอมให้ใช้พอลิเอทิลีนเติมในอาหารได้โดยอ้อมภายใต้ข้อบังคับโอเลฟินส์ ข้อบังคับควบคุมเกี่ยวกับการจำกัดน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่าด้วยการทดสอบการละลาย ข้อบังคับของ FDA ในไขสังเคราะห์ เช่น พอลิเอทิลีนต้องมีย่านน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 500 ถึง 1200 โดยจะใช้พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 1200 ถึง 2000 ใช้กับอาหาร

การใช้ในส่วนของสารเคลือบ

ในอดีตมีการใช้ไขกับหมึกพิมพ์ สี และสารเคลือบ จะใช้เพื่อดำเนินงานการขูดขีด ปรับปรุงการลื่น ทนทานการเสียดสี และการซึมผ่านของน้ำ ลักษณะหลักของไขจะพิจารณาจากขนาดอนุภาค ความหนืด และ จุดหลอมเหลว โดยทั่วไปไขจะเติมที่ประมาณ 0.25% - 2.0% ของหมึกหรือสูตรสารเคลือบ

การใช้ป้องกันต่อการถูกทำลาย

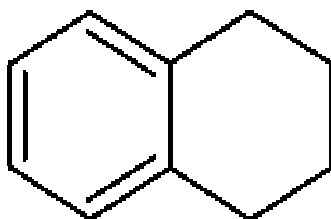
เพียง 0.25% - 1.0% ของไขในของแข็งเป็นประโยชน์ในเครื่องเคลือบที่ต้องผ่านการอบเคล็ดด้วยไฟได้พิสูจน์แล้วว่าเป็นการลดสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน จุดประสงค์หลักเพื่อให้ผิวหน้ามีความลื่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ไขพอลิเอทิลีนมีส่วนในการช่วยปรับปรุงความต้านทานการสึกกร่อน



รูปที่ 2.7 ผลิตภัณฑ์ไขพอลิเอทิลีนที่ใช้งานทางการค้า

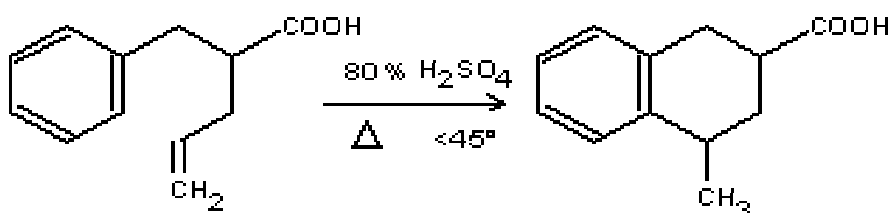
## 2.4 เตตระรีน (1,2,3,4-Tetrahydronaphthalene)

เตตระรีนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีสูตรเคมี  $C_{10}H_{12}$  โครงสร้างโมเลกุลเป็นวงแหวน 2 วงซึ่งประกอบด้วยวงอะโรมาติกและอะลิไซคลิก มีโครงสร้างคล้ายโครงสร้างแนฟทาลีนแต่จะต่างกันตรงบริเวณพันธะคู่ 2 ตำแหน่งในโครงสร้างแนฟทาลีน ซึ่งในโครงสร้างเตตระรีนจะเป็นพันธะเดี่ยว ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างเตตระรีน

สารประกอบเตตระรีนจะเตรียมด้วยกระบวนการไซคลิกเซชันเบกแมนซ์ ซึ่งในปฏิกิริยาดาร์เซนดซ์จะใช้สังเคราะห์อนุพันธ์ของเตตระรีนสามารถเตรียมได้ปฏิกิริยาปิดวงของภายในโมเลกุลของโครงสร้าง 1-aryl-4-pentene โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น ดังรูปที่ 2.9 หรือผ่านทางปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันแนฟทาลีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพตทินัม



รูปที่ 2.9 การสังเคราะห์อนุพันธ์ของเตตระรีน

การผลิตส่วนมากจะใช้การไฮโดรจีเนชันแนฟทาลีนไปเป็นเตตระรีน ส่วนสารที่ได้จะผสมระหว่างแนฟทาลีน เตตระรีน และเดคะรีน ซึ่งจะขึ้นกับความดัน และอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ เตตระรีนที่ได้มาจากการไฮโดรจีเนชันแนฟทาลีนในเชิงพาณิชย์จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $WS_2 + NiS + Al_2O_3$  และ  $CoO + MoO_3 + Al_2O_3$  ภายใต้ความดัน 50-300 บรรยากาศ ซึ่งแนฟทาลีนจะเกิดการไฮโดรจีเนที่ความ

ตัน 60-70 บรรยากาศ โดยตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CoO} + \text{MoO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$  หรือ  $\text{WS}_2 + \text{NiS} + \text{Al}_2\text{O}_3$  จะใช้ที่ อุณหภูมิระหว่าง 300-370 องศาเซลเซียส

## 2.5 หลักการพื้นฐานการออกแบบการทดลอง

ถ้าต้องการให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุด เราต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง คำว่า “ การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ ( Statistical Design of Experiment ) ” หมายถึงกระบวนการวางแผนในการวางแผนทดลองเพื่อที่จะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จะต้องจำเป็นอย่างยิ่ง ถ้าเราต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เราได้อยู่ และถ้ายังมีปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง ( Experimental Error ) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองก็คือการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ เพลกเคชัน (Replication) แรนดอมไมเซชัน (Randomization) และ บล็อกกิง (Blocking) ในที่นี้เรากำหนดให้ว่า เพลกเคชัน หมายถึงการทำการทดลองซ้ำ เพลกเคชันมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเพลกเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ตัวประมาณค่าความผิดพลาดนี้กลายเป็นหน่วยของการวัดขั้นพื้นฐานสำหรับพิจารณาว่า ความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สองถ้าค่าเฉลี่ย ( ตัวอย่างเช่น  $\bar{y}$  ) ถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเพลกเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้นี้ ตัวอย่างเช่น ถ้า  $\sigma^2$  คือความแปรปรวนของข้อมูลแต่ละตัว และมี  $n$  เพลกเคต ดังนั้นค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยของตัวอย่างนี้คือ

$$\sigma_y^2 = \frac{\sigma^2}{n}$$

ผลในทางปฏิบัติคือว่า ถ้าเรามี  $n = 1$  เพลกเคต และค่าที่ได้จากการทดลอง  $y_1 = 145$  และ  $y_2 = 147$  เราอาจจะไม่สามารถที่จะสรุปอะไรเกี่ยวกับผลการทดลองทั้งสองนี้ได้ นั่นคืออาจจะเป็นไปได้ว่าความแตกต่างที่สังเกตได้ อาจจะ เป็นผลมาจากการทดลองมีค่าน้อย ดังนั้นถ้าเราสังเกตได้ว่า

$\bar{y}_1 < \bar{y}_2$  เราก็จะสามารถสรุปได้อย่างปลอดภัยว่าผลของการทดลองในแบบที่ 2 มีค่ามากกว่าในการทดลองแบบที่ 1

แรนดอมไม่เซชัน เป็นพื้นฐานหลักสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลอง แรนดอมไม่เซชัน หมายถึง การทดลองที่มีวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทำการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไม่เซชันจะทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริง การที่เราแรนดอมไม่เซชันการทดลอง ทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

บล็อกกิง เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกกิงหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิง

หลักการพื้นฐานทางสถิติ

เราอาจจะเรียกค่าที่ได้จากการสังเกต (Observation) แต่ละค่าในการทดลองว่า “รัน (Run)” ซึ่งแต่ละรันจะมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากการแกว่งหรือสิ่งรบกวน (noise) เกิดขึ้นกับผลการทดลอง เราจะเรียกสิ่งรบกวนในการทดลองว่า “ความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error)” ซึ่งเป็นความผิดพลาดทางสถิติที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงที่สามารถควบคุมได้และไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ การปรากฏของความผิดพลาดหรือสิ่งรบกวนนี้ บอกให้เราทราบอย่างเป็นนัยว่า ตัวแปรตอบสนองเป็นตัวแปรสุ่ม (Random Variable) ซึ่งตัวแปรสุ่มอาจจะเป็นได้ทั้งแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) หรือแบบต่อเนื่อง (Continuous) ถ้าหากชุดของค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดของตัวแปรสุ่มมีค่าจำกัดหรือสามารถนับได้แบบไม่จำกัดแล้ว ตัวแปรสุ่มแบบนี้จะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง แต่ถ้าชุดของค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดของตัวแปรสุ่มมีค่าเป็นช่วง ตัวแปรสุ่มแบบนี้จะเป็นแบบต่อเนื่อง

การทดสอบสมมติฐาน

สมมติฐานทางสถิติ คือ ประโยคที่กล่าวเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น ซึ่งสามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ เช่น

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

ในการทดสอบสมมติฐาน เราอาศัยวิธีการในการสุ่มตัวอย่าง การคำนวณทางสถิติที่ใช้ในการทดสอบที่เหมาะสม และทำการสรุปเพื่อปฏิเสธหรือยอมรับ  $H_0$  นอกจากนี้ยังต้องมีการกำหนดกลุ่มของค่าที่จะนำไปปฏิเสธ  $H_0$  ซึ่งกลุ่มของค่านี้เรียกว่า “พื้นที่วิกฤต” หรือ “พื้นที่ของการปฏิเสธ” ของการทดสอบ

การใช้ P- Value ในการทดสอบสมมติฐาน

วิธีรายงานผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่ง คือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ค่า  $\alpha$  หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด วิธีการของ P- Value ได้ถูกนำมาใช้อย่างมากเพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยาก P- Value คือความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P- Value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ  $H_0$  และผู้ตัดสินใจสามารถสร้างข้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้ นอกจากนี้เรายังสามารถนิยาม P- Value ว่าเป็นเหมือนกับค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก  $H_0$  ก็ได้

ปกติแล้วเรานิยามที่จะบอกว่าค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก  $H_0$  ถูกปฏิเสธดังนั้นเราอาจจะพิจารณาค่า P- Value ว่าเป็นค่า  $\alpha$  ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ เมื่อรู้ค่า P- Value แล้ว ผู้ตัดสินใจก็สามารถทราบว่าคุณข้อมูลมีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดนัยสำคัญไว้ก่อน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

คำว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวน มาจากความหมายของการแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็นส่วนประกอบย่อยๆ จะได้ว่า Total Corrected Sum of Square คือ

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$$

ใช้สำหรับวัดความแปรผันทั้งหมดของข้อมูล เป็นการเหมาะสมถ้าเราหาร  $SS_T$  ด้วยระดับขั้นความเสรีที่เหมาะสม คือ  $N-1$  เมื่อ  $N$  คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด เราจะได้ความแปรปรวนของตัวอย่าง  $y$

ความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล ซึ่งวัดจาก Total Corrected Sum of Square สามารถแบ่งออกเป็น ส่วนของผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม รวมกับผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายใต้ระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ ค่าของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตเฉลี่ยของแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม คือ ตัววัดความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับ ในขณะที่ความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายในระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับ คือ ความผิดพลาดสุ่ม (Random Error) ดังนั้น สามารถเขียนสมการได้เป็น

ซึ่ง  $SS_{\text{Treatment}}$  เรียกว่า ผลรวมกำลังสองที่เกิดเนื่องจากระดับ ซึ่งหาได้จาก



$$SS_{Treatment} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2$$

มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $a-1$  และ  $SS_E$  เรียกว่า ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากความผิดพลาด มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $N-a$  และเมื่อนำค่าของ Sum of Square ของแต่ละตัวหารด้วยระดับขั้นความเสรีของตัวเองจะได้เป็น Mean Square (MS) ดังสมการ

$$MS_{Treatment} = \frac{SS_{Treatment}}{a-1}$$

และ

$$MS_E = \frac{SS_E}{a-1} \text{ การวิเคราะห์ทางสถิติ}$$

Source of Variance	Sum of Square	Degrees of Freedom	Mean Square	Fo
Between Treatment	$SS_{Treatment}$	$a-1$	$MS_{Treatment}$	$F_0 = \frac{MS_{Treatment}}{MS_E}$
Error (within treatment)	$SS_E$	$N-a$	$MS_E$	
Total	$SS_T$	$N-1$		

เราจะปฏิเสธ  $H_0$  ก็ต่อเมื่อ  $F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$  และสรุปว่ามีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยของระดับ

### การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

#### คำนิยามและหลักการ

การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น

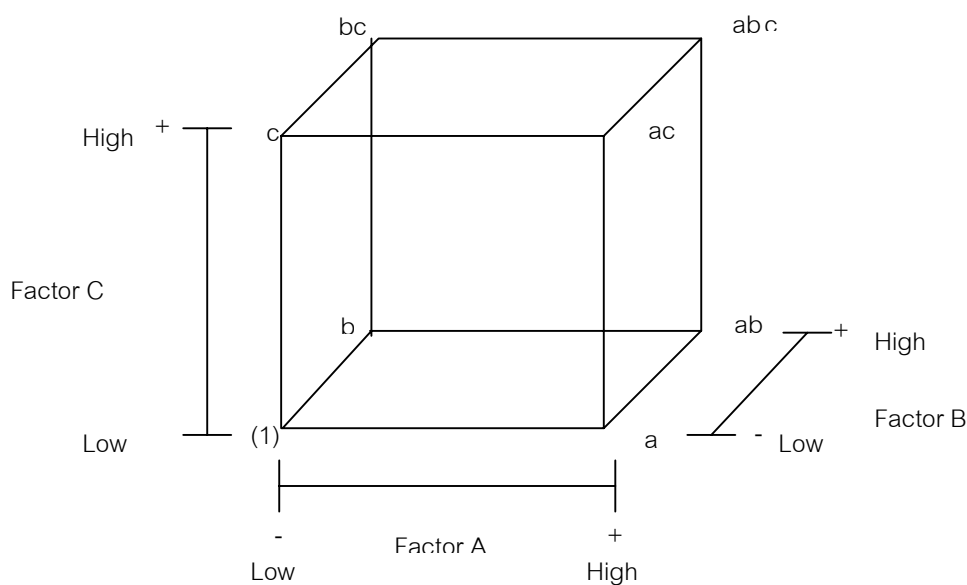
#### การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^k$

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งเราต้องการที่ศึกษาผลร่วมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น กรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย  $k$  ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ สูง หรือ ต่ำ ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ มี หรือ ไม่มี ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 เพลทเคดที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบ

ด้วยข้อมูลทั้งสิ้น  $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  ข้อมูล และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$

การออกแบบ  $2^3$

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^3$  นี้ คือการออกแบบการทดลองที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ซึ่งการทดลองรวมทั้ง 8 จะมีลักษณะเชิงเรขาคณิตเป็นรูปลูกบาศก์ ดังรูป b ซึ่งจะเรียกว่า เมทริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) เราสามารถเขียนลำดับมาตรฐานของการทดลองรวมปัจจัยที่จะเกิดขึ้นทั้งหมดได้เป็น (1), a, b, ab, c, ac, bc และ abc สัญลักษณ์เหล่านี้แทนผลรวมทั้งหมดของ  $n$  ข้อมูลที่เกิดขึ้นที่การทดลองรวมปัจจัยแต่ละตัว



Run no.	A	B	C	combination
1	-	-	-	1
2	+	-	-	a
3	-	+	-	b
4	-	-	-	ab
5	+	+	+	c
6	+	-	+	ac
7	-	+	+	bc
8	+	+	+	abc

การสร้างแบบจำลองการถดถอย

แบบจำลองการถดถอยถูกนำมาใช้บ่อยครั้งในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองที่ไม่ได้มีการวางแผนล่วงหน้า ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในกรณีของการเก็บข้อมูลจากปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถควบคุมได้ หรือจากสิ่งที่บันทึกไว้ในอดีต การวิเคราะห์การถดถอยยังมีประโยชน์อย่างมากต่อการทดลองที่ได้มีการออกแบบไว้ล่วงหน้าในกรณีที่มีบางอย่างเกิดผิดพลาดไปได้เช่นกัน ตัวอย่างแบบจำลองการถดถอย คือ

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jixing และคณะ (2003) ศึกษาการสังเคราะห์ไซพอลิเอทิลีนโดยใช้ขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมและผลกระทบของตัวแปรที่ใช้ในปฏิกิริยา ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และส่วนประกอบของสารเติมแต่ง ที่มีต่อร้อยละผลได้และสมบัติของผลิตภัณฑ์ จะพบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์มากกว่า 90 ได้มาเมื่อใช้อุณหภูมิ  $T_2$  หรือ  $T_3$  และเวลา  $t_2$  หรือ  $t_3$  จุดหลอมเหลวที่ได้อยู่ในช่วงระหว่าง 104-114 องศาเซลเซียส ส่วนระดับ penetration มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 - 0.4 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าสีผสมในขยะพลาสติกมีผลต่อสีไซพอลิเอทิลีนที่ได้ แต่ไม่มีผลต่อจุดหลอมเหลวและระดับ penetration ของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้

Sunder และคณะ (2006) ศึกษาการสลายพันธะเคมีของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ไซโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ ซึ่งได้แก่ สารเชิงซ้อนของเซอร์โคเนียม โดยใช้เวลาต่ำกว่า 8 ชั่วโมงและอุณหภูมิที่ 350 และ 370 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่า ผลิตภัณฑ์ไซที่ได้มีสมบัติบางประการใกล้เคียงกันกับผลิตภัณฑ์ไซทั่วไปในทางการค้า โดยน้ำหนักโมเลกุลจะมีค่าต่ำสุด 392 เมื่อใช้อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ส่วนจุดหลอมเหลวที่ได้ประมาณ 97 องศาเซลเซียสเมื่อใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง

## บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนจากพลาสติกแอลดีพีอีเพื่อผลิตไซพอลิเอทิลีน โดยอุปกรณ์การทดลองนั้นประกอบด้วย

1. เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กสำหรับปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน
2. ชุดควบคุมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน ประกอบไปด้วย
  - เตาให้ความร้อนแบบขดลวด (Heating Furnace) ขนาด 1200 วัตต์
  - เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (Thermocouple Type K) และขดลวดให้ความร้อน
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Regulate Temperature)
4. เครื่องซังน้ำหนักรผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ รุ่น HR-202
5. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry ; DSC) ยี่ห้อ Mettler Teledo รุ่น DC 822
6. เครื่องวัดความหนืด ( Brookfield Viscometer) รุ่น LVT

#### 3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตไซพอลิเอทิลีนขนาดเล็ก

เครื่องปฏิกรณ์ผลิตไซพอลิเอทิลีนขนาดเล็กสร้างขึ้นจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel ) โดยเครื่องปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.5 เซนติเมตร และมีความสูง 13.0 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตไซพอลิเอทิลีนขนาดเล็ก

### 3.1.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน

ชุดควบคุมอุณหภูมิจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่โดยภายนอกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนแบบใยแก้ว (Asbestos) รอบเตาให้ความร้อนเพื่อลดการสูญเสียความร้อน เตาให้ความร้อนที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยเตาให้ความร้อนจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิคงที่ตลอดความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ให้ได้ตามภาวะที่ต้องการ โดยจะแปรค่าจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนให้แก่เครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.2 เตาให้ความร้อนแบบขดลวด

### 3.1.3 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Regulate Temperature )

ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ได้ตั้งค่าไว้เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้ได้คงที่ตามสภาวะที่ต้องการ เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

#### 3.1.4 เครื่องชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้

เครื่องชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้เพื่อนำไปคำนวณหาร้อยละของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้

### 3.1.5 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry : DSC)

เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงพลังงานสสารเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ ได้แก่ เมื่อเพิ่ม หรือลดอุณหภูมิ โดยเปรียบเทียบระหว่างสารตัวอย่างและสารอ้างอิง ใช้วิเคราะห์หาอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ )

ในการศึกษานี้ใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ยี่ห้อ Mettler Teledo รุ่น DC 822 วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3418

### 3.1.6 เครื่องวัดความหนืด ( Brookfield Viscometer)

Brookfield Viscometer ใช้วัดค่าความหนืด ทำได้โดยการวัดแรงต้านทานการไหลภายในของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลีน ซึ่งจะวัดความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลีนที่อุณหภูมิ 149 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลีนจะมีค่าความหนืดเป็นค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับความเร็วของ Spindle ในการรบกวนทำให้เกิดแรงต้านส่งต่อไปที่สปริง สปริงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงและวัดค่าด้วย Rotary Transducer ค่าที่วัดได้จะคำนวณในหน่วย Centipoise ทั้งนี้ขึ้นกับความเร็ว และขนาดของ Spindle ขนาดของ Container ที่ Spindle หมุนและ Full Scale Torque ของ Calibrated Spring

โดยในการศึกษานี้ใช้เครื่องวัดความหนืด รุ่น LVT วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D1986 - 91(2007)

### 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้

1. โทลูอีน (commercial grade : ความบริสุทธิ์ 80 % minimum)
2. เตตระรีน (1,2,3,4-tetrahydronaphthalene) 97% จาก Fluka
3. เม็ดพลาสติกแอลดีพีอี ที่ได้รับมาจากบริษัท ไทยพอลิเอทีลีน จำกัด
4. แก๊สไฮโดรเจน 99.99% จากบริษัทแพรกอแอร์ จำกัด
5. แก๊สไนโตรเจน 99.99% จากบริษัทแพรกอแอร์ จำกัด

### 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

3.3.1 เวลาในการแตกตัว ( Cracking time ) เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงเวลาต่อการเกิดปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อน และศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้เวลาที่ 30, 50, 70 และ 90 นาที

3.3.2 อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (Temperature) เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อน และศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้อุณหภูมิที่ 350, 360, 370 และ 380 องศาเซลเซียส

3.3.3 ความดันเริ่มต้น (Initial Pressure) เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความดันเริ่มต้นต่อการเกิดปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อน และศึกษาความดันเริ่มต้นที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ความดันเริ่มต้นที่ 0, 50, 100 และ 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

3.3.4 ผลของชนิดแก๊ส (Gas Type) เพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจนต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ของแข็งโดยใช้ความดันเริ่มต้นที่ 50, 100 และ 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

3.3.5 ผลของเปอร์เซ็นต์เตตระรีน (Percent of Tetralin Solvent) เพื่อเปรียบเทียบผลของการเติมเตตระรีนต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ของแข็งโดยเติมเตตระรีนปริมาณ 0.5, 2.5 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

### 3.4 วิธีการทดลอง

### 3.4.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของเวลาที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อน เวลาที่ได้ทำการศึกษา คือ เวลา 30, 50, 70 และ 90 นาที

3.4.1.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อน อุณหภูมิที่ได้ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิ 350, 360, 370 และ 380 องศาเซลเซียส

3.4.1.3 ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของความดันเริ่มต้นที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อน ทำการศึกษาความดันเริ่มต้นที่ 0, 50, 100 และ 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

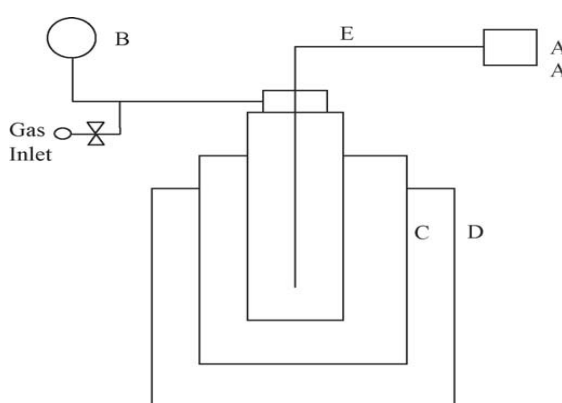
3.4.1.4 เปรียบเทียบผลของเพื่อเปรียบเทียบผลของชนิดแก๊สต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ชนิดของแก๊สที่ทำการศึกษา ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจน

3.4.1.5 เปรียบเทียบผลของการเติมเตตระรีนต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อน โดยใช้เตตระรีน 0.5, 2.5 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.4.1.6 ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้

### 3.4.2 การดำเนินการทดลอง

นำเม็ดพลาสติกแอลดีพีอีใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ 20 กรัม แล้วประกอบเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับส่วนประกอบต่างๆ นำเครื่องปฏิกรณ์ไปใส่ในอากาศที่อยู่ภายในออกโดยผ่านแก๊สไนโตรเจน ต่อจากนั้นอัดแก๊สไนโตรเจนหรือไฮโดรเจนตามความดันที่ต้องการ แล้วนำเครื่องปฏิกรณ์ต่อเข้ากับชุดควบคุมและทำการหุ้มฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 หลังจากนั้นจะทำการทดลองตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจึงนำผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์จุดหลอมเหลวด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) และวัดความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด ( Brookfield Viscometer)



รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพรูปเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ใช้ในกระบวนการแตกตัวแอลดีพีอีด้วยความร้อน

(A) เครื่องปรับอุณหภูมิ (B) อุปกรณ์วัดความดัน (C) เครื่องปฏิกรณ์ (D) เตาให้ความร้อน (E) เทอร์โมคอปเปิล

### 3.4.3 การคำนวณร้อยละของผลิตภัณฑ์

$$\text{ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแข็ง} = \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ของแข็ง}}{\text{น้ำหนักสารตั้งต้นเริ่มต้น}} \times 100$$

### 3.5 การออกแบบการทดลองแตกตัวแอลดีพีด้วยความร้อน

ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเตรียมไซพอลิเอทิลีนจากการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก พร้อมทั้งหาภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง และศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรที่สนใจ

การทดลองได้ออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) หมายถึงการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ซึ่งเป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยแต่ละตัวแปรจะมี 2 ระดับ และทำการทดลองครบทุกการทดลอง ตัวแปรที่สนใจมี 3 ตัวแปร คือ อุณหภูมิ เวลา และความดันเริ่มต้น ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปร	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
1. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), A	360	380
2. เวลา (นาที), B	30	90
3. ความดันเริ่มต้น (ปอนด์/ตารางนิ้ว), C	50	100

เนื่องตัวแปรที่ทำการศึกษามี 3 ตัวแปร และแต่ละตัวแปรจะมี 2 ระดับ จำนวนการทดลอง คือ  $2^3 = 8$  การทดลอง พร้อมทั้งแต่ละการทดลองจะทำซ้ำ 2 ครั้ง จำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 16 การทดลอง เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของแต่ละตัวแปรต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 3 ตัวแปร (ซ้ำ 2 ครั้ง)

การทดลอง	ตัวแปร			Treatment Combination
	อุณหภูมิ (A)	เวลา (B)	ความดันเริ่มต้น (C)	
1	380	90	50	ab
2	380	30	100	ac
3	360	30	50	1
4	360	30	50	1
5	360	90	100	bc



6	360	90	50	b
7	360	90	50	b
8	380	90	100	abc
9	380	90	100	abc
10	380	30	50	a
11	380	90	50	ab
12	380	30	100	ac
13	380	30	50	a
14	360	30	100	c
15	360	30	100	c
16	360	90	100	bc

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงกระบวนการผลิตเตรียมไซพอลิเอทิลีนโดยปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อนจากแอลดีพีซีซึ่งเป็นพลาสติกที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เพื่อผลิตไซพอลิเอทิลีน ภายใต้วัตถุประสงค์เพื่อผลิตไซพอลิเอทิลีนในปริมาณสูงสุดและคุณสมบัติพื้นฐานตรงกับไซพอลิเอทิลีนในทางการค้า ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยตัวแปรที่จะศึกษาคือ เวลาในการแตกตัว อุณหภูมิ ความดันเริ่มต้น ชนิดของแก๊ส และเปอร์เซ็นต์ของเตตระรีน

ตารางที่ 4.1 สมบัติพื้นฐานของไซพอลิเอทิลีนในทางการค้า

คุณสมบัติพื้นฐาน	ไซพอลิเอทิลีน	
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส )	105	103
ความหนืด (เซนติพอยด์ )	198	1440

#### 4.1 ผลการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 3 ตัวแปร

ศึกษาผลของตัวแปร 3 ตัวแปรที่มีต่อค่าการตอบสนอง (Response) การออกแบบเพื่อศึกษาความสำคัญของแต่ละตัวแปรที่ศึกษาในการเตรียมไซพอลิเอทิลีนจากการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีซีในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก โดยทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบ 2 มีตัวแปรที่ศึกษา 3 ตัวแปรอุณหภูมิ เวลา และความดันเริ่มต้น โดยตัวแปรทั้งหมดแบ่งเป็น 2 ระดับ และทำการทดลองครบทุกการทดลอง (Montgomery, 1997) ซึ่งแต่ละการทดลองจะทำซ้ำ 2 ครั้งเพื่อป้องกันความผิดพลาด โดยผลการทดลองได้จากโปรแกรม MINITAB

ตารางที่ 4.2 ตารางการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอุณหภูมิ เวลาและความดันเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาจากผลของร้อยละ จุดหลอมเหลว และ ความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีน

Term	Coefficient		
	Yield	Melting point	Viscosity
Constant	1455.2	66.1	131.9
Temp.	-6.9	-1.3	-113.4
Time	-2.2	-0.3	-67.2
Initial Pressure	1.0	-1.0	1.0
Temp.*Time	0.6	0.2	53.6
Temp.*Initial Pressure	-0.5	-0.1	-3.8
Time*Initial Pressure	1.5	0.4	-4.9
Temp.*Time*Initial Pressure	-0.8	0.4	7.4

\* ในการพิจารณาค่า Coefficient จะไม่คิดเครื่องหมายหน้าตัวเลข

จากตารางที่ 4.2 จะพบว่าผลจากการเปรียบเทียบร้อยละของผลิตภัณฑ์จะให้ค่า Coefficient ของตัวแปรอุณหภูมิและเวลามีค่าเป็น 6.9 และ 2.2 เท่าของค่า Coefficient ที่ได้จากตัวแปรความดันเริ่มต้น ซึ่งให้เห็นว่าตัวแปรอุณหภูมิและเวลามีผลกระทบต่อระบบมากกว่าตัวแปรความดันเริ่มต้น เนื่องจากในการเปรียบเทียบค่า Coefficient ของตัวแปรอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าตัวแปรความดันเริ่มต้นค่อนข้างมาก ซึ่งบ่งบอกว่าตัวแปรความดันเริ่มต้นแทบจะไม่มีผลต่อระบบเลย

ในการพิจารณาค่า Coefficient ซึ่งได้จากผลของจุดหลอมเหลว จะเห็นว่า ค่า Coefficient ที่ได้จากทั้ง 3 ตัวแปรค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยค่า Coefficient ของตัวแปรอุณหภูมิจะให้ค่าสูงสุด ซึ่งจะหมายความว่า ตัวแปรอุณหภูมินี้มีกระทบมากกว่าตัวแปรเวลาและความดันเริ่มต้น ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่า Coefficient ของตัวแปรดังกล่าว มีค่าเป็นลบซึ่งหมายความว่า เมื่อเพิ่มค่าของตัวแปรดังกล่าวนี้จะส่งผลให้จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่ได้นี้มีค่าลดลง

ในการเปรียบเทียบค่า Coefficient ที่ได้จากผลของความหนืด สามารถเรียงลำดับค่า Coefficient ได้ดังนี้ ตัวแปรอุณหภูมิ เวลา และความดันเริ่มต้น ตามลำดับ จะพบว่า ค่า ของตัวแปรอุณหภูมิมีค่าเป็น 113.4 เท่าเมื่อเทียบกับค่า Coefficient ของตัวแปรความดันเริ่มต้น ส่วนค่า Coefficient ของตัวแปรเวลานั้น มีค่าเป็น 67.2 เท่าของค่า Coefficient ซึ่งมาจากตัวแปรความดันเริ่มต้น สามารถบ่งบอกถึงผลของตัวแปรดังกล่าวที่มีต่อระบบ โดยจะพบว่า ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อระบบสูงสุด ได้แก่ ตัวแปรอุณหภูมิ รองลงมาได้แก่ ตัวแปรเวลา ส่วนตัวแปรความดันเริ่มต้นแทบจะไม่มีผลต่อระบบเลย เมื่อเทียบกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มค่าของตัวแปรอุณหภูมิและเวลา จะส่งผลให้ค่าการตอบสนอง

หรือความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้นี้มีค่าลดลง เนื่องจากค่า Coefficient ของตัวแปรอุณหภูมิ และเวลาที่ได้มีค่าเป็นลบ

การเตรียมไซพอลิเอทิลีนด้วยกระบวนการแตกตัวของแอลดีพีอีด้วยความร้อนโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก จะพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง (Response) คือ อุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ( ตัวแปร A และ ตัวแปร B ) โดยตัวแปรอุณหภูมามีผลต่อระบบมากกว่าตัวแปรเวลา เวลา ส่วนตัวแปรความดันเริ่มต้นแทบจะไม่มีมีผลต่อระบบ

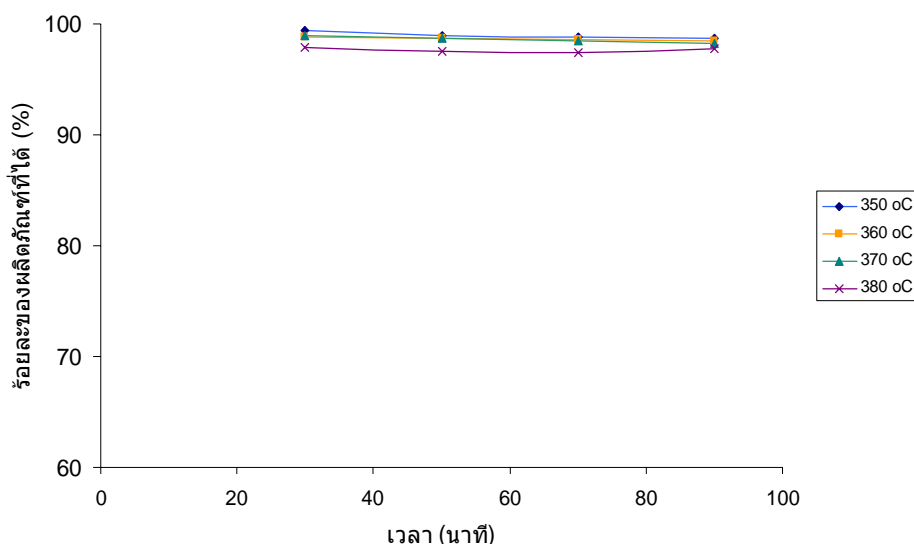
#### 4.2 ผลของเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีอีในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของเวลา และอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ 30, 50, 70 และ 90 นาที และอุณหภูมิ 350, 360, 370 และ 380 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่มีต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิตั้งที่ 360 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจาก 30 นาทีไปเป็น 90 นาที ร้อยละของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนจะคงที่ที่ประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์

ในขณะที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาคงที่ที่ 70 นาที จะพบว่า ร้อยละของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนค่อนข้างจะคงที่ที่ประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 350 องศาเซลเซียส ไปเป็น 380 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง 30 - 90 นาที และอุณหภูมิในการแตกตัวระหว่าง 350 - 380 องศาเซลเซียส โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่ได้ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้ไม่แตกต่างกันมาก ส่งผลให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง 30 - 90 นาที และอุณหภูมิในการแตกตัวระหว่าง 350 - 380 องศาเซลเซียส ค่อนข้างคงที่

ตารางที่ 4.3 ตารางผลของเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

เวลา (นาที)	ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (%)			
	350 °C	360 °C	370 °C	380 °C
30	99.4	98.8	98.9	97.9
50	99.0	98.7	98.7	97.6
70	98.9	98.6	98.4	97.4
90	98.8	98.4	98.3	97.8



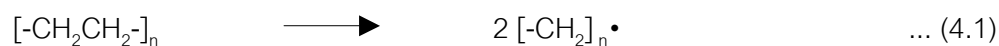
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อ

ร้อยละของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของเวลา และอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ 30, 50, 70 และ 90 นาที และอุณหภูมิ 350, 360, 370 และ 380 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่มีต่อจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิคงที่ที่ 360 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจาก 30 นาทีไปเป็น 90 นาที จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนจะลดลงจาก 109.9 องศาเซลเซียสไปเป็น 107.0 องศาเซลเซียส

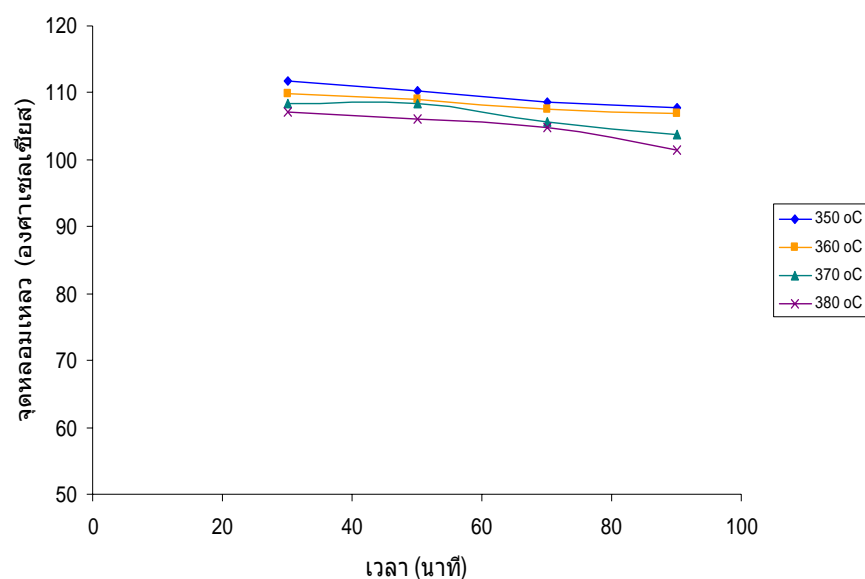
ในขณะที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาคงที่ที่ 70 นาที จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไฮจะลดลง โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 350 องศาเซลเซียสไปเป็น 380 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนจะลดลงจาก 108.6 องศาเซลเซียสไปเป็น 104.9 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงเกิดการแตกตัวไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง ดังสมการที่ 4.1 จึงทำให้จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีน ซึ่งมีโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบลดตามลงมาด้วย

Thermal Cracking :



ตารางที่ 4.4 ตารางผลของเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		350 °C	360 °C	370 °C	380 °C
เวลา (นาที)	30	111.8	109.9	108.3	107.1
	50	110.2	109.0	108.3	106.1
	70	108.6	107.5	105.6	104.9
	90	107.7	107.0	103.9	101.5



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไบพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

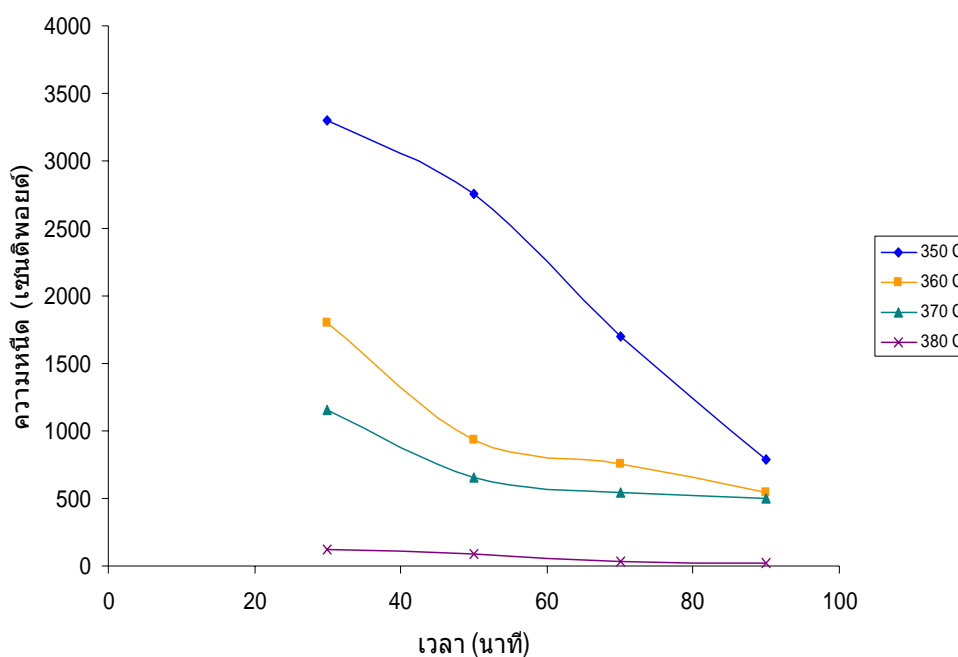
ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของเวลา และอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ 30, 50, 70 และ 90 นาที และอุณหภูมิ 350, 360, 370 และ 380 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ไบพอลิเอทิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิกงที่ 360 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจาก 30 นาทีจนถึง 90 นาที ความหนืดของผลิตภัณฑ์ไบพอลิเอทิลีนจะลดลงจาก 1800 เซนติพอยด์ไปเป็น 550 เซนติพอยด์

ที่เวลาคงที่ 70 นาที ความหนืดของผลิตภัณฑ์ไบพอลิเอทิลีนจะลดลงจาก 1700 เซนติพอยด์ เป็น 36.8 เซนติพอยด์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 350 องศาเซลเซียส จนเป็น 380 องศาเซลเซียส โดยความหนืดผลิตภัณฑ์ไบพอลิเอทิลีนที่ลดลง สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มพลังงานในการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ทำให้อนุภาคสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ ซึ่งมีความหนืดสูงเนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลสูง เกิดการแตกตัวไปเป็นอนุภาคสารประกอบ

ไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลงซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่ามีจำนวนเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ความหนืดของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนมีค่าลดลง เมื่อเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4.5 ตารางผลของเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ความหนืด (เซนติพอยด์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		350 °C	360 °C	370 °C	380 °C
เวลา (นาท)	30	3300	1800	1160	126
	50	2760	928	652	89.8
	70	1700	752	544	36.8
	90	790	550	498	21.4



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

จากการทดลองได้ว่าเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยามีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่ได้ โดยเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนนี้ คือ ที่อุณหภูมิ 360-370 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-70 นาที เพราะผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่ได้มีคุณสมบัติพื้นฐานใกล้เคียงกับไฮพอลิเอทิลีนซึ่งใช้ในทางการค้าทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 4.1

#### 4.3 ผลของความดันเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีอี

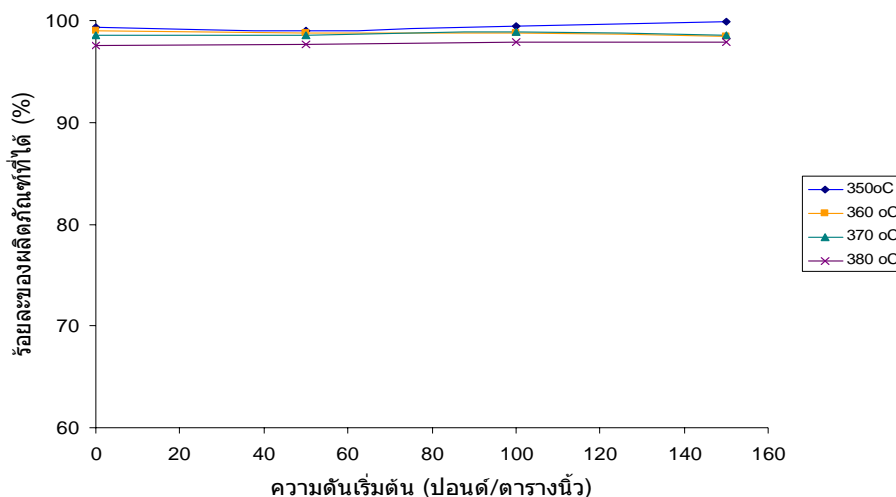
ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของความดันเริ่มต้น และอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาดเล็กที่ 0, 50, 100 และ 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิ 350, 360, 370 และ 380 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่มีต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิคงที่ที่ 350 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มความดันเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาจาก 0 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไปเป็น 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ร้อยละของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนจะคงที่ที่ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์

ในขณะที่อุณหภูมิคงที่ที่ 380 องศาเซลเซียส จะพบว่า ร้อยละของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนค่อนข้างจะคงที่ที่ประมาณ 97 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความดันเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาจาก 0 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไปเป็น 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าที่ความดันเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาตั้งแต่ 0 - 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิในการแตกตัวระหว่าง 350 - 380 องศาเซลเซียส โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่ได้ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่ได้ไม่แตกต่างกันมาก ส่งผลให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่ความดันเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาในช่วง 0 - 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิในการแตกตัวระหว่าง 350 - 380 องศาเซลเซียส ค่อนข้างคงที่

ตารางที่ 4.6 ตารางผลของความดันเริ่มต้นและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ความดันเริ่มต้น (ปอนด์/ตร.นิ้ว)	ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (%)			
	350 °C	360 °C	370 °C	380 °C
0	99.3	99.0	98.6	97.6
50	99.0	98.8	98.6	97.7
100	99.4	98.8	98.9	97.9
150	99.9	98.4	98.6	97.9





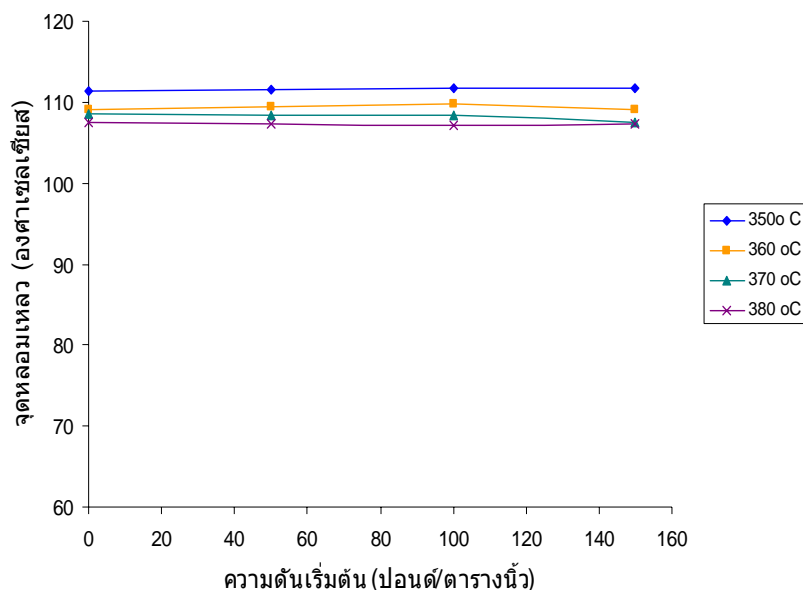
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันเริ่มต้นและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา ที่มีต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของความดันเริ่มต้น และอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ 0, 50, 100 และ 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิ 350, 360, 370 และ 380 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่มีต่อจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีน พบว่า พบว่า อุณหภูมิคงที่ที่ 350 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มความดันเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาจาก 0 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไปเป็น 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนจะคงที่ที่ประมาณ 111 องศาเซลเซียส

ในขณะที่อุณหภูมิคงที่ที่ 380 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มความดันเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาจาก 0 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไปเป็น 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนจะคงที่ที่ประมาณ 107 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.7 ตารางผลของความดันเริ่มต้นและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ความดันเริ่มต้น (ปอนด์/ตร.นิ้ว)	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)			
	350 °C	360 °C	370 °C	380 °C
0	111.4	109.1	108.6	107.5
50	111.5	109.4	108.3	107.3
100	111.8	109.9	108.3	107.1
150	111.7	109.2	107.4	107.4



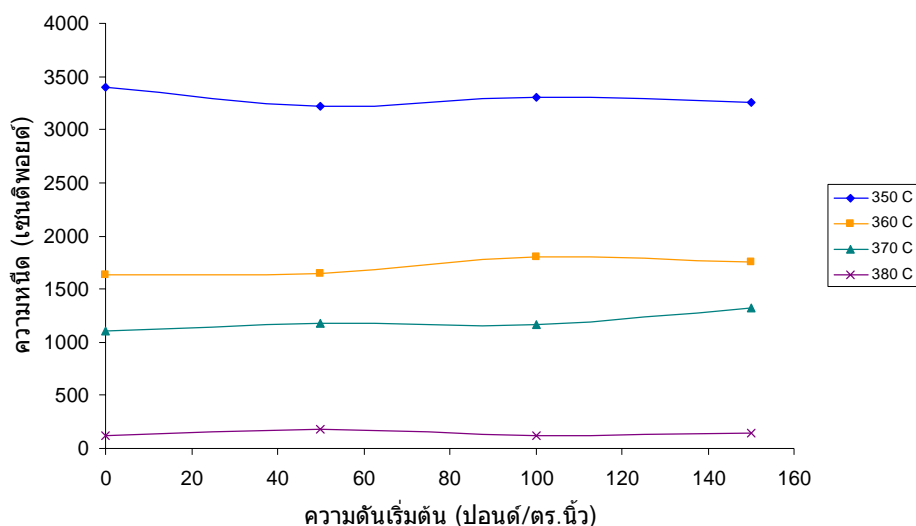
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันเริ่มต้นและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของความดันเริ่มต้น และอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ 0, 50, 100 และ 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิ 350, 360, 370 และ 380 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลีน พบว่า อุณหภูมิคงที่ที่ 350 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มความดันเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาจาก 0 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไปเป็น 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลีนจะคงที่ที่ประมาณ 3300 เซนติพอยด์

ในขณะที่อุณหภูมิคงที่ที่ 380 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มความดันเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาจาก 0 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไปเป็น 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลีนจะคงที่ที่ประมาณ 140 เซนติพอยด์

ตารางที่ 4.8 ตารางผลของความดันเริ่มต้นและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ความดันเริ่มต้น (ปอนด์/ตร.นิ้ว)	ความหนืด (เซนติพอยด์)			
	350 °C	360 °C	370 °C	380 °C
0	3400	1636	1100	120
50	3220	1640	1180	176
100	3300	1800	1160	126
150	3260	1752	1220	140



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันเริ่มต้นและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

#### 4.4 เปรียบเทียบผลของชนิดแก๊สต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีอี

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดแก๊ส ซึ่งได้แก่ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจน ที่ความดันเริ่มต้น 50, 100 และ 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ผลจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีน จะเห็นว่า ที่ความดันเริ่มต้น 50, 100 และ 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อใช้แก๊สไนโตรเจน จะให้จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนต่ำกว่า จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนจากปฏิกิริยาที่ใช้แก๊สไฮโดรเจน นั่นคือ ผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนจากปฏิกิริยาที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีน

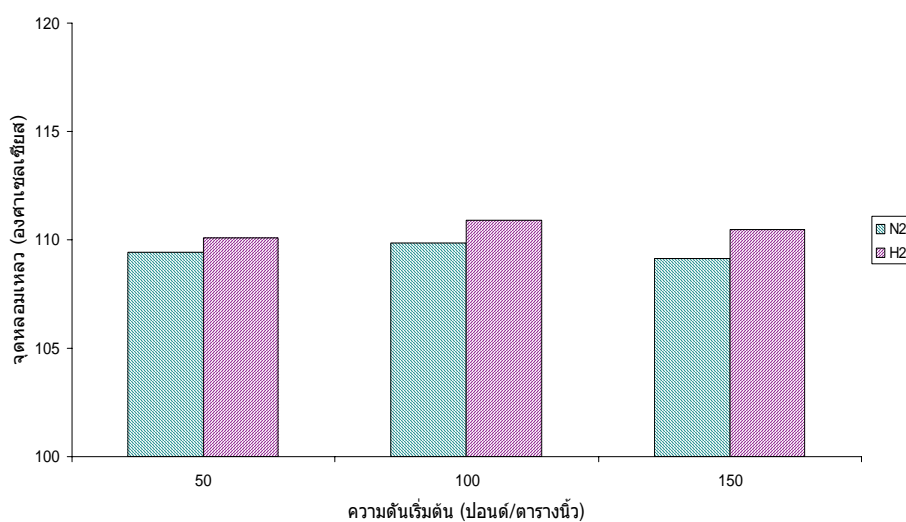
เอทิลีนจากปฏิกิริยาที่ใช้แก๊สไนโตรเจน เนื่องจากปฏิกิริยาที่ใช้แก๊สไฮโดรเจน สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ ดังสมการต่อไปนี้



ซึ่งอนุมูลอิสระดังกล่าวนี้จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันบริเวณตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งเป็นการยับยั้งกลไกในการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังสมการที่ 4.3



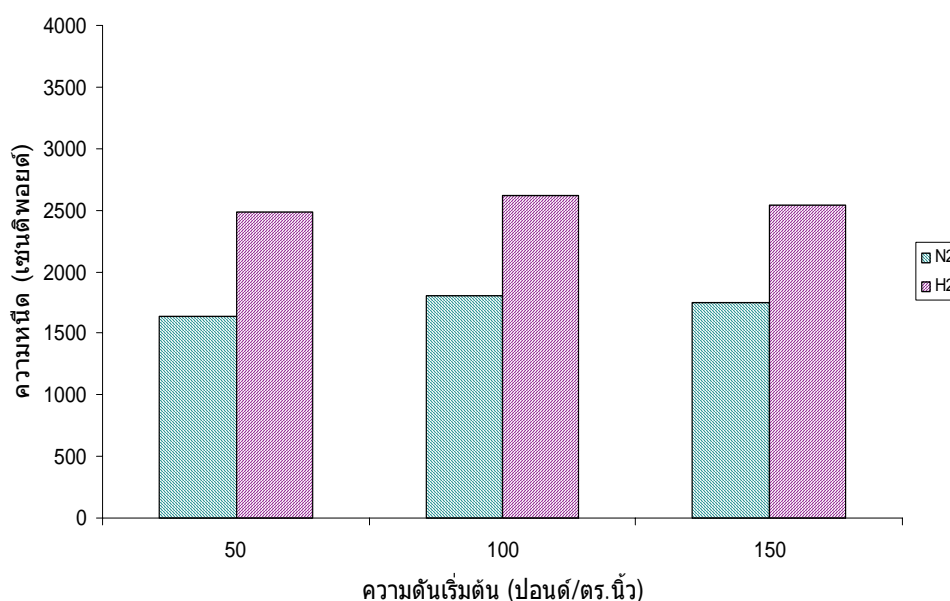
จึงทำให้ในปฏิกิริยาที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนจะได้ผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าปฏิกิริยาที่ใช้แก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลของชนิดแก๊สที่มีต่อจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีน จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดแก๊ส ซึ่งได้แก่ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจน ที่ความดันเริ่มต้น 50, 100 และ 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่มีต่อความเหนียวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีน จะพบว่า ผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากปฏิกิริยาที่ใช้แก๊สไฮโดรเจน ที่ความดันเริ่มต้น 50, 100 และ 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะให้ความเหนียวสูงกว่าผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนจากปฏิกิริยาที่ใช้แก๊สไนโตรเจน ซึ่งเป็นผลมาจาก ในกรณีที่ใช้แก๊สไฮโดรเจน สารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นองค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันขึ้น ดังสมการที่ 4.2 และ 4.3 ทำให้เกิดกลไกยับยั้งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนจากปฏิกิริยาที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนประกอบด้วย

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า จึงทำให้ความสามารถในการต้านทานการไหลสูงกว่า ผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนจากปฏิกิริยาที่ใช้แก๊สไนโตรเจน



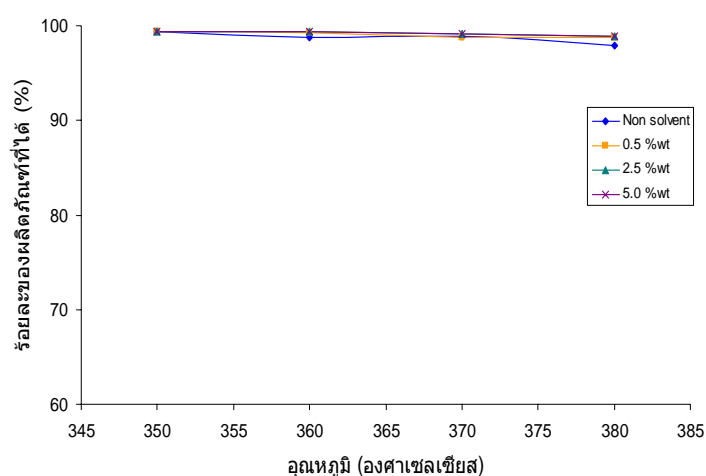
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบผลของชนิดแก๊สที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีน จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

#### 4.5 เปรียบเทียบผลของเปอร์เซ็นต์เตตระรีนต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีอี

ตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เตตระรีนและอุณหภูมิใน เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 350, 360, 370 และ 380 องศาเซลเซียส และปริมาณเตตระรีน 0.5, 2.5, และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่มีต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีน จะพบว่า ใน ปฏิกิริยาที่ใช้เตตระรีน 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 350 องศาเซลเซียส ไปเป็น 380 องศาเซลเซียส ร้อยละของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนค่อนข้างจะคงที่ที่ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์

ขณะที่อุณหภูมิคงที่ที่ 360 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มเตตระรีนที่ใช้ในปฏิกิริยาจาก 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไปเป็น 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเห็นว่า ร้อยละของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนจะ คงที่ที่ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกัน ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง 350 - 380 องศาเซลเซียส และเตตระรีนที่ใช้ในปฏิกิริยาตั้งแต่ 0.5 - 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โมเลกุล ไฮโดรคาร์บอนที่ได้ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่ได้ไม่แตกต่างกันมาก ส่งผลให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่เกิดปฏิกิริยาระหว่าง 350 - 380 องศาเซลเซียส และเตตระรีนที่ใช้ในปฏิกิริยาตั้งแต่ 0.5 - 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่อนข้างคงที่ ตารางที่ 4.9 ตารางผลของปริมาณเตตระรีนและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ไฮพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ปริมาณเตตระรีน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (%)			
	350 °C	360 °C	370 °C	380 °C
0	99.4	98.8	98.9	97.9
0.5	99.4	99.3	98.8	98.7
2.5	99.5	99.3	99.1	98.9
5.0	99.4	99.4	99.2	98.9



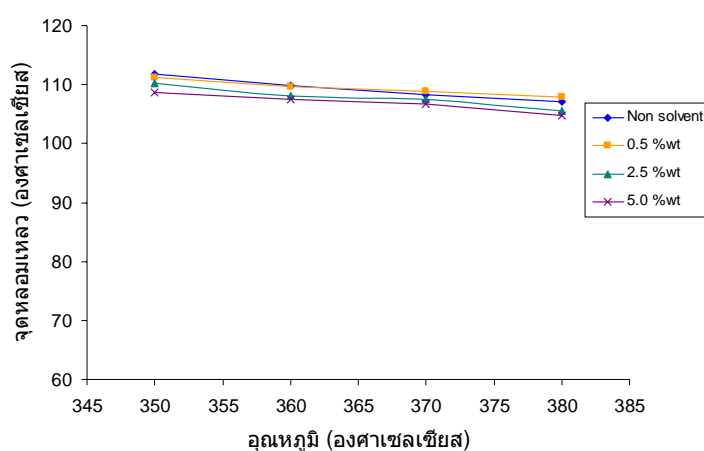
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเตตระรีนและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา ที่มีต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณเตตระรีนและอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 350, 360, 370 และ 380 องศาเซลเซียส และเตตระรีน 0.5, 2.5, และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่มีต่อจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลีน พบว่า ในปฏิกิริยาที่ใช้เตตระรีน 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 350 องศาเซลเซียส ไปเป็น 380 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลีนจะลดลงจาก 108.6 องศาเซลเซียสไปเป็น 104.2 องศาเซลเซียส

ในขณะที่อุณหภูมิคงที่ที่ 360 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มเตตระรีนที่ใช้ในปฏิกิริยาจาก 0 ไปเป็น 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเห็นว่า จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลีนจะลดลงจาก 109.9 องศาเซลเซียสไปเป็น 107.6 องศาเซลเซียส

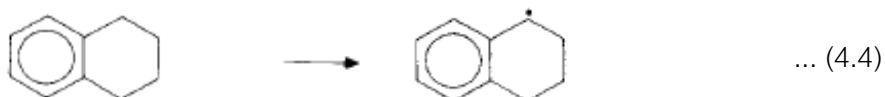
ตารางที่ 4.10 ตารางผลของปริมาณเตตระรีนและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ปริมาณเตตระรีน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)			
	350 °C	360 °C	370 °C	380 °C
0	111.8	109.9	108.3	107.1
0.5	111.3	109.6	108.8	107.8
2.5	110.3	108.1	107.6	105.6
5.0	108.6	107.6	106.7	104.8

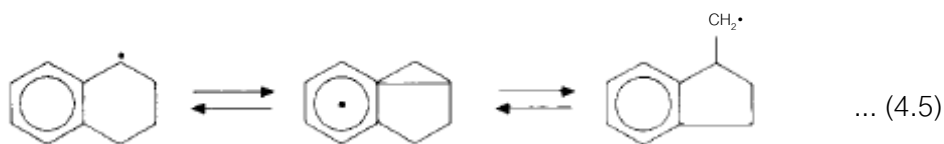


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเตตระรีนและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลินที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

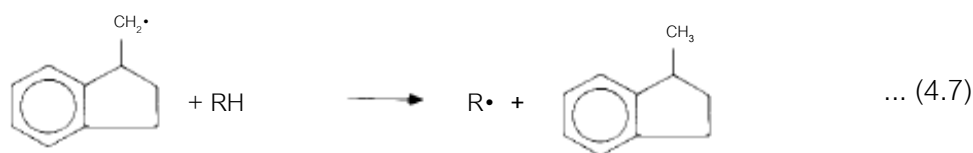
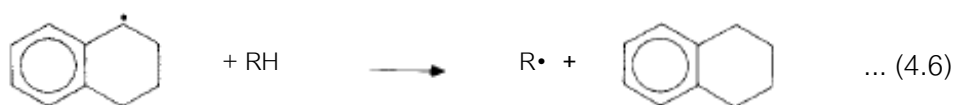
ผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลินจากปฏิกิริยาที่ใช้เตตระรีนมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทีลินจากปฏิกิริยาที่ไม่ใช้เตตระรีน เนื่องจากในปฏิกิริยาที่ใช้เตตระรีน เมื่อเตตระรีนได้รับความร้อน จะเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลเตตระรีน ดังสมการต่อไปนี้



โดยอนุมูลเตตระรีนซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูง จะเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน กลายเป็นอนุมูลบิวทิลเบนซีน ดังสมการที่ 4.5



ขณะเดียวกันอนุมูลเตตระรีนและอนุมูลบิวทิลเบนซีนที่เกิดขึ้น จะดึงไฮโดรเจนอะตอมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นการเร่งกลไกในการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง โดยหลังจากนั้นอนุมูลเตตระรีนจะกลับเป็นเตตระรีนดั้งเดิม ส่วนอนุมูลบิวทิลเบนซีนกลายเป็น 1-methyl indan ดังสมการที่ 4.6 และ 4.7 ส่งผลให้ในปฏิกิริยาที่ใช้เตตระรีนจะได้ผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าปฏิกิริยาที่ไม่ใช้เตตระรีน



นอกจากนี้ในการเพิ่มปริมาณเตตระรีนจะช่วยทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนได้จึงลดลง เมื่อปริมาณเตตระรีนเพิ่มขึ้น

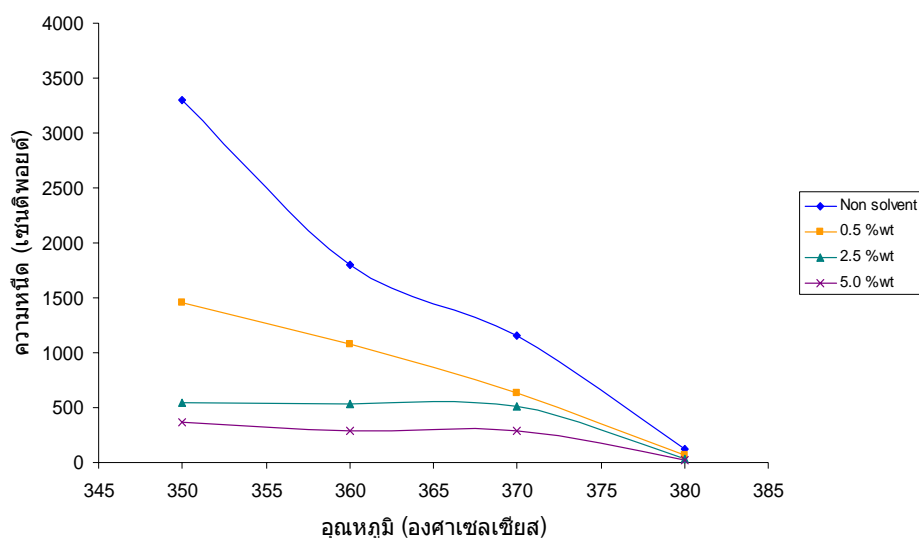
ตารางที่ 4.11 และ รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณเตตระรีนและอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 350, 360, 370 และ 380 องศาเซลเซียส และเตตระรีน 0.5, 2.5, และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีน จะเห็นว่า เมื่อใช้เตตระรีน 5.0 เปอร์เซ็นต์ ความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนจะลดลงจาก 370 เซนติพอยด์ไปเป็น 24.2 เซนติพอยด์เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 350 องศาเซลเซียส จนเป็น 380 องศาเซลเซียส

ในกรณีที่อุณหภูมิคงที่ที่ 360 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มเตตระรีนที่ใช้ในปฏิกิริยาจาก 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไปเป็น 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนจะลดลงจาก 1800 เซนติพอยด์ไปเป็น 286 เซนติพอยด์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนจากปฏิกิริยาที่ใช้เตตระรีนจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนจากปฏิกิริยาที่ไม่ใช้เตตระรีน เนื่องจากในปฏิกิริยาที่ใช้เตตระรีน อนุมูลเตตระรีนที่มาจาก การแตกตัวของเตตระรีนเมื่อได้รับความร้อน จะเกิดการไอโซเมอไรเซชัน กลายเป็นอนุมูลบิวทิลเบนซีน ดังสมการที่ 4.5 โดยอนุมูลเตตระรีนและอนุมูลบิวทิลเบนซีนที่เกิดขึ้น สามารถดึงไฮโดรเจนอะตอมจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ทำให้อนุมูลเตตระรีนกลับเป็นโมเลกุลเตตระรีนดั้งเดิม ส่วนอนุมูลบิวทิลเบนซีนกลายเป็น 1-methyl indan ดังสมการที่ 4.6 และ 4.7



ซึ่งเป็นการเร่งกลไกในการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง ความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนจากปฏิกิริยาที่เพิ่มเตตระรีนจึงลดลงตามไปด้วย ตารางที่ 4.11 ตารางผลของปริมาณเตตระรีนและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ปริมาณเตตระรีน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ความหนืด (เซนติพอยด์)			
	350 °C	360 °C	370 °C	380 °C
0	3300	1800	1160	126
0.5	1460	1080	634	62.4
2.5	550	538	506	38.8
5.0	370	286	284	24.2



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเตตระรีนและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 ข้อสรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยเรื่องการเตรียมไซพอลิเอทิลีนจากการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีอีด้วยเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

##### 5.1.1 ผลการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 3 ตัวแปร

ตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง คือ อุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ( ตัวแปร A และ ตัวแปร B ) โดยตัวแปรอุณหภูมามีผลต่อระบบมากกว่าตัวแปรเวลา นอกจากนี้ยังพบว่าความดันเริ่มต้น ( ตัวแปร C ) ไม่มีผลกระทบต่อระบบ

##### 5.1.2 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีน

เมื่อเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจาก 30, 50, 70 และ 90 นาที ตามลำดับ พบว่า เมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นร้อยละของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนมีค่าคงที่ จุดหลอมเหลวและความหนืดมีค่าลดลง

##### 5.1.3 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีน

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 350, 360, 370 และ 380 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นร้อยละของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนมีค่าคงที่ จุดหลอมเหลวและความหนืดมีแนวโน้มลดลง

##### 5.1.4 ผลของความดันเริ่มต้นต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีน

เมื่อเพิ่มความดันเริ่มต้นจาก 0, 50, 100 และ 150 ปอนด์/ตารางนิ้ว ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 350, 360, 370 และ 380 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่า เมื่อความดันเริ่มต้นเพิ่มขึ้นร้อยละ จุดหลอมเหลวและความหนืดของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนมีค่าคงที่

##### 5.1.5 ผลของชนิดของแก๊สต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีน

เมื่อใช้แก๊สไนโตรเจนและแก๊สไฮโดรเจน ที่ความดันเริ่มต้นจาก 50, 100 และ 150 ปอนด์/ตารางนิ้ว ตามลำดับ ได้ว่า ในการใช้แก๊สไฮโดรเจน จะให้ผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนซึ่งมีจุดหลอมเหลวและความหนืดสูงกว่าการใช้แก๊สไนโตรเจน

##### 5.1.6 ผลของปริมาณเตตระรีนต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีน

เมื่อเพิ่มปริมาณเตตระรีนที่ 0.5, 2.5 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 350, 360, 370 และ 380 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ได้ว่า ปริมาณเตตระรีน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะได้ผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนซึ่งมีจุดหลอมเหลวและความหนืดสูงที่สุด เนื่องจากความสามารถดึงไฮโดรเจนจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีค่าน้อย และที่ปริมาณเตตระรีน 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าผลิตภัณฑ์

ไซพอลิเอทิลีนที่ได้มีจุดหลอมเหลวและความหนืดต่ำสุด

5.1.7 สรุปได้ว่า ภาวะที่เหมาะสมในการทดลองคือ ที่อุณหภูมิ 360-370 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-70 นาที

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองจะต้องไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์ก่อนเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนของแอลดีพีอี

## รายการอ้างอิง

1. Xing J., Li S., Wang X., Li X. Study on the Conversion Technology of Waste Polyethylene Plastic to Polyethylene Wax. Energy Source 2003 : 77-82.
2. Lal S. , Anisia K. S., Kumar A. Depolymerization of HDPE to wax in the presence of a catalyst formed by homonuclear macrocyclic zirconium complex chemically bonded to alumina support. Applied Catalysis A 2006 : 9–17.
3. Xing J., Li S., Wang X., Li L. Study on the Controlled Unsequential Pyrolysis of Polyethylene to Polyethylene Wax with Desired Molecular Weight Range. Energy Source 2003 : 217-222.
4. Serrano D. P., Agudo J., Vicente G., Sanchez N. Effects of hydrogen-donating solvents on the thermal degradation of HDPE. Analytical and Applied Pyrolysis 78 : 194–199.
5. Williams P.T., Williams E.A. Fluidised bed pyrolysis of low density polyethylene to produce petrochemical feedstock. Analytical and Applied Pyrolysis 51 : 107–126.
6. Guy L., Fixari B. Waxy polyethylenes from solution thermolysis of high density polyethylene: inert and H-donor solvent dilution effect. Polymer 40 : 2845–2857.
7. Soják L., Kubinec R., Jurdáková H., Hájeková E., Bajus M. GC-MS of polyethylene and polypropylene thermal cracking products. Petroleum & Coal 48 : 1–14.
8. Hájeková E., Bajus M. Recycling of low-density polyethylene and polypropylene via copyrolysis of polyalkene oil/waxes with naphtha: product distribution and coke formation. Analytical and Applied Pyrolysis 74 : 70–80.
9. McCaffrey W.C., Kamal M. R., Cooper D. G. Thermolysis of polyethylene. Polymer Degradation and Stability 47 : 133–139.
10. Conesa A., Font R., Marcilla A., Angela N. Pyrolysis of Polyethylene in a Fluidized Bed Reactor. Energy & Fuel 8 : 1238–1246.
11. Hooper J., Battaerd A. J., Evans G. Thermal dissociation of tetralin between 300 and 450°C. FUEL 58 : 132–138.
12. นฤภัทร ตั้งมันคงถาวร. การแยกสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

13. นิสิตา วิสุทธีรังษีอุไร. การแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีน และน้ำมันพืชใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
14. อรรดา วงศ์สกุลภักดิ์. การแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
15. ประชาธน์ แต่ภักดี. การแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
16. สมศักดิ์ ไตรสุภกิตติ. การเปลี่ยนพอลิเอทิลีนไปเป็นก๊าซโซลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
17. ปรีชา พหลเทพ. พอลิเมออร์. ภาควิชาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2546.
18. แม้น อมรสิทธิ์และอมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์ชวนพิมพ์, 2534.
19. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ. เทอร์โมไดนามิกสวิตจกรวมเคมี. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
20. กัญจนา บุญเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## รายละเอียดการคำนวณ

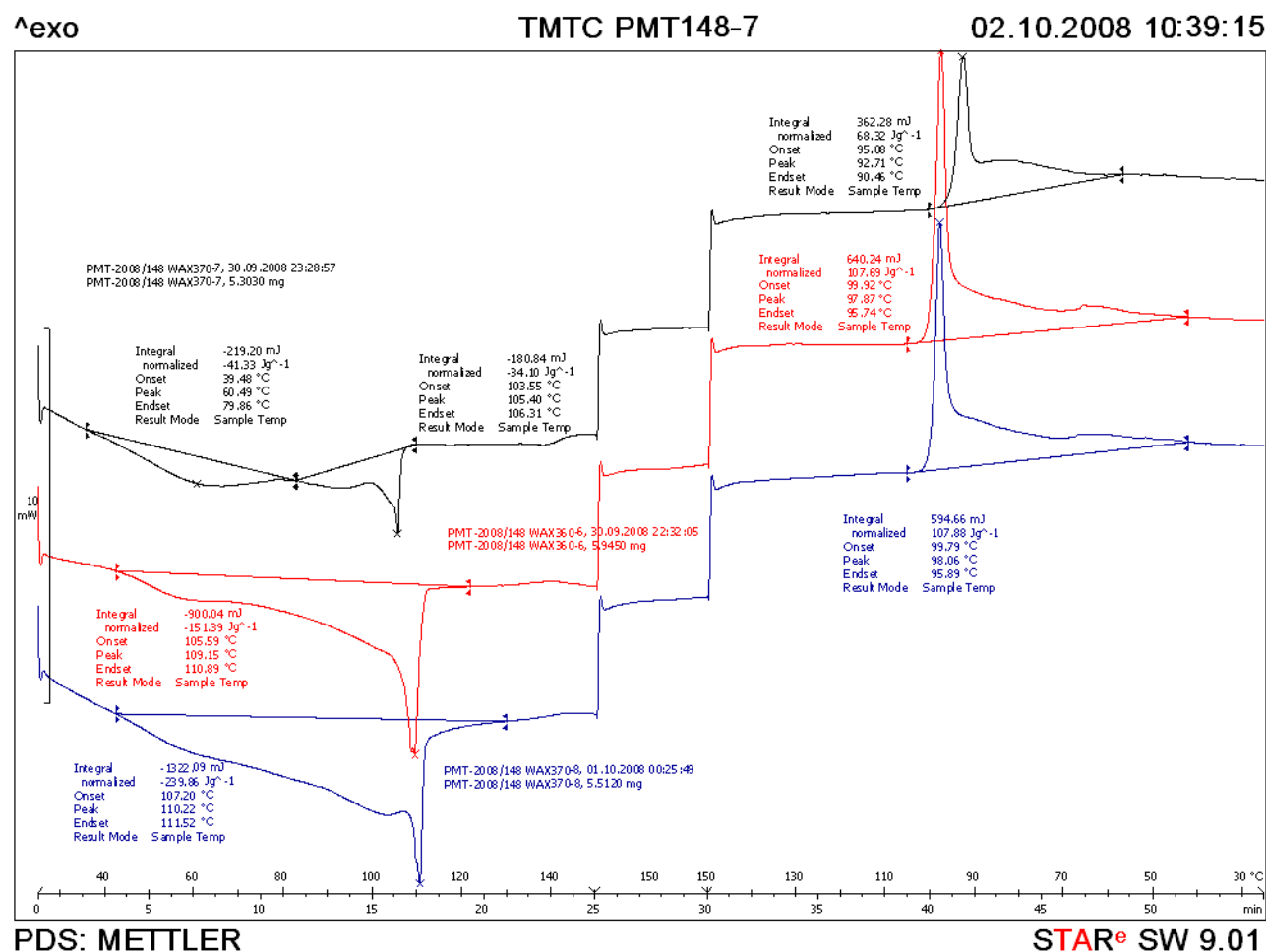
น้ำหนักเม็ดพลาสติกแอลดีพีอี	20.0157	กรัม
น้ำหนักผลิตภัณฑ์ไซ	19.4287	กรัม
น้ำหนักกระดาษทิชชู + ผลิตภัณฑ์ไซ (ที่อบแล้ว)	2.6493	กรัม
น้ำหนักกระดาษทิชชู	2.3147	กรัม

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (\%)} &= \frac{\text{น้ำหนักของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ของแข็ง}}{\text{น้ำหนักเม็ดพลาสติกแอลดีพีอี}} \times 100 \\
 &= \frac{(19.4287 + 2.6493 - 2.3147)}{20.0157} \times 100 \\
 &= 98.739 \%
 \end{aligned}$$

## ภาคผนวก ข

## การวิเคราะห์เทอร์โมกราฟจุดหลอมเหลวของเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลแคลอริมิเตอร์

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลแคลอริมิเตอร์ ยี่ห้อ Mettler Teledo รุ่น DC 822 รูปที่ ข แสดงตัวอย่างกราฟ DSC (DSC Thermogram) ของไซพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวแอลดีพีอีดด้วยความร้อน ยกตัวอย่างเทอร์โมแกรมเส้นสีแดง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนถึง 2 ลักษณะ โดยที่ Melting Point เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบดูดพลังงาน (Endothermic) อยู่ที่ประมาณ  $109.15^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่ Crystallization เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบคายพลังงาน (Exothermic) ที่ประมาณ  $97.87^{\circ}\text{C}$



รูปที่ ข ตัวอย่างเทอร์โมแกรมแสดงผลการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ไซพอลิเอทิลีนด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลแคลอริมิเตอร์



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวตรีณัฐ จิวระเศรษฐ์กุล เกิดเมื่อวันที่ 6 กรกฎาคม 2526 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2550