

การสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ของแข็งเบสเป็น
ตัวเร่งปฏิกิริยา



ณรงค์เดช สุวรรณดาลัด
ณัฐวดี กวีวิรัชชัย

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 43926
วัน, เดือน, ปี 18 ต.ค. 2545

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

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Catalytic Cracking of Polyisoprene over solid base Catalyst



Narongdej Suwandalud

Nattawut Kaveevivitchai

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the

Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3
ซีโอไลต์ (Zeolite)	3
โครงสร้างของซีโอไลต์ (Zeolite structure)	3
ซีโอไลต์ชนิด X และ ชนิด Y	6
การสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking)	8
วัสดุคล้ายซีโอไลต์ (Zeotype materials)	9
การสังเคราะห์ซีโอไลต์	10
ขั้นตอนการเกิดซีโอไลต์	11
สมบัติความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญของซีโอไลต์	12
สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์	12
โลหะ และ โลหะออกไซด์	13
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	18
สารเคมี	18
อุปกรณ์ และเครื่องมือ	18
ขั้นตอนการวิจัย	19
ตอนที่ 1 การเตรียม และตรวจสอบโลหะออกไซด์ และซีโอไลต์	20
1 การเตรียมแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	20
2 การเตรียมแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO ₃)	20
3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ Y	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 การปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของซีโอไลต์ X และ Y	21
5 การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X	21
6 การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y	22
7 การตรวจสอบโลหะออกไซด์ และซีโอไลต์	23
ตอนที่ 2 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีน	25
1 ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนด้วยเครื่อง TGA	25
2 ศึกษาการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 360°C ด้วยเครื่อง GC	26
3 ศึกษาการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 425°C และ 475°C ด้วยเครื่อง GC	28
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	29
4.1 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ	29
4.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	29
4.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO ₃)	31
4.1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ (BaO)	34
4.1.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X (NaX)	35
4.1.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y (NaY)	39
4.2 การศึกษาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน	44
4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน	44
4.2.2 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์	55
4.2.3 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	58
4.2.4 อิทธิพลของโลหะไอออนภายในรูพรุนจุลภาคของซีโอไลต์	61
4.2.5 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ที่มีผลต่อความเฉพาเจาะจงของไอโซพรีน	64
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	66
ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารอ้างอิง	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก การสังเคราะห์ซีโอไลต์ Y	70
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณ	73
1. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ก๊าซ (%Gas) ของการทำปฏิกิริยา	73
2. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจง (% Selectivity) ของผลิตภัณฑ์ไอโซพรีน	75
3. การคำนวณหาปริมาณของไอโซพรีนในยาง	77
4. การคำนวณหา Oxygen Charge	78
5. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การแลกเปลี่ยนไอออน	81
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง	82
ภาคผนวก ง ผลการทดลองจากเครื่อง Gas Chromatograph	85
ภาคผนวก จ รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์มาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา	96
ภาคผนวก ฉ เทอร์โมแกรมของเครื่อง Thermogravimetric Analyzer	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า.
ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆของโลหะ	14
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบปริมาณธาตุโลหะหมู่ 1 ที่พบบนผิวโลก (โดยน้ำหนัก)	15
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบปริมาณธาตุโลหะหมู่ 2 ที่พบบนผิวโลก (โดยน้ำหนัก)	16
ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารสำหรับสังเคราะห์ ซีโอไลต์ Y	21
ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	24
ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารสำหรับการตรวจสอบปริมาณโลหะด้วยเครื่อง รังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์	24
ตารางที่ 3.4 สภาวะที่ใช้ในการตรวจสอบหาพื้นที่ผิว	25
ตารางที่ 3.5 สภาวะในการทดสอบการสลายตัวทางความร้อนโดยเครื่อง TGA	26
ตารางที่ 3.6 สภาวะของเครื่อง GC เพื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัว ทางความร้อนของพอลิไอโซพรีน	27
ตารางที่ 3.7 สภาวะของเครื่อง Temperature Controller เพื่อศึกษาการสลายตัวของ พอลิไอโซพรีน	27
ตารางที่ 4.1 เปอร์เซนต์การแลกเปลี่ยนไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ก่อน และหลังการปรับปรุงความเป็นเบส	38
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซนต์การแลกเปลี่ยนไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ก่อน และหลังการปรับปรุงความเป็นเบส	42
ตารางที่ 4.3 ค่า Sanderson's Electronegativity และ Oxygen Charge ที่แสดง ความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์แต่ละชนิด	43
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิที่การสลายพอลิไอโซพรีนสมบูรณ์ที่ สภาวะต่างๆ โดยเทคนิค TGA	48
ตารางที่ 4.5 เปอร์โดยน้ำหนักออกไซด์ของโลหะ ที่เป็นองค์ประกอบของซีโอไลต์ X	63
ตารางที่ ก.1 น้ำหนักสารที่ต้องการในการเตรียมเจล	70
ตารางที่ ก.2 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์ Y	72
ตารางที่ ข.1 น้ำหนักสารที่ได้หลังจากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 360°C โดยผสมตัวเร่งปฏิกิริยา NaX	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ข.2 พื้นที่ใต้พีกที่ได้จากโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 360°C โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา NaX	75
ตารางที่ ข.3 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจง (% Selectivity)	76
ตารางที่ ข.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 360°C โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา NaX	77
ตารางที่ ข.5 การคำนวณหาโมลอะตอมของออกซิเจนและแคทไอออนของ ตัวเร่งปฏิกิริยา CsX	78
ตารางที่ ข.6 ค่า Electronegativity (S) ของธาตุแต่ละชนิด	80
ตารางที่ ข.7 ปริมาณของโลหะชนิดต่างๆของตัวเร่งปฏิกิริยา CsX	81
ตารางที่ ค.1 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาการสลายตัวทาง ความร้อนของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 360°C	82
ตารางที่ ค.2 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาการสลายตัวทาง ความร้อนของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 425°C	82
ตารางที่ ค.3 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาการสลายตัวทาง ความร้อนของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 475°C	83
ตารางที่ ค.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนประกอบของก๊าซ และเปอร์เซ็นต์ไอโซพรีน ต่ออย่าง 1 กรัม จากการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน ที่อุณหภูมิ 360°C	83
ตารางที่ ค.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนประกอบของก๊าซ และเปอร์เซ็นต์ไอโซพรีน ต่ออย่าง 1 กรัม จากการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน ที่อุณหภูมิ 425°C	84
ตารางที่ ค.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนประกอบของก๊าซ และเปอร์เซ็นต์ไอโซพรีน ต่ออย่าง 1 กรัม จากการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน ที่อุณหภูมิ 475°C	84
ตารางที่ ค.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโลหะออกไซด์ที่ได้จากการตรวจหาปริมาณโลหะ ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์แต่ละชนิดด้วยเครื่องด้วยเครื่อง XRF	84

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ทรงสี่หน้าของอะลูมิเนียม และ ซิลิกา	4
รูปที่ 2.2 a) โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building unit, SBU) ของซีโอไลต์ b) โครงร่าง Polyhedral ของซีโอไลต์	4
รูปที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลต์ชนิด X Y และ A รวมถึงการรวมตัวเป็น โครงสร้างลักษณะต่างๆ	5
รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์โครงสร้างแบบ Faujasite (ซีโอไลต์ X และ Y)	6
รูปที่ 2.5 ตำแหน่งที่ไอออนบวก (Cation) อยู่ในช่องของซีโอไลต์ X	6
รูปที่ 2.6 ตำแหน่งของไอออนบวก (Cation) ซีโอไลต์ X	7
รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดผ่านคาร์แบนไอออน	8
รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ในการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน	26
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	29
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ที่ ปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิ 350°C 425°C และ 475°C	30
รูปที่ 4.3 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ในการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	31
รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO ₃)	32
รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนตที่ ปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิ 350°C 425°C และ 475°C	32
รูปที่ 4.6 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนตในการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	33
รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ (BaO)	34
รูปที่ 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X (NaX) ก่อนทำ การปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Calcination)	35
รูปที่ 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ก่อน และหลังทำ การปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Calcination)	36
รูปที่ 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงทาง ความร้อน และปรับปรุงความเป็นเบส	37
รูปที่ 4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y (NaY) ก่อน ทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Calcination)	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ก่อน และหลัง ทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Calcination)	40
รูปที่ 4.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ปรับปรุงทาง ความร้อน และปรับปรุงความเป็นเบส	41
รูปที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อน (Thermal cracking) ของพอลิไอโซพรีน	44
รูปที่ 4.15 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนผ่านอนุมูลอิสระ	45
รูปที่ 4.16 เทอร์โมแกรมของพอลิไอโซพรีน	45
รูปที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวทาง ความร้อน (Thermal cracking) ของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิต่างๆ	46
รูปที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักก๊าซที่ได้จากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน ของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิต่างๆ	47
รูปที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวที่ได้จากการสลายตัวทางความ ร้อนของพอลิไอโซพรีนและพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆที่ 360°C	49
รูปที่ 4.20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักคาร์บอนที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนของ พอลิไอโซพรีนและการสลายตัวเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ	49
รูปที่ 4.21 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสารประกอบแวกซ์ที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนของ พอลิไอโซพรีน และการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิต่างๆ	50
รูปที่ 4.22 กลไกการสลายพอลิไอโซพรีน แล้วได้ผลิตภัณฑ์สารประกอบแวกซ์	51
รูปที่ 4.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของก๊าซและของเหลวที่ได้จากปฏิกิริยาการสลายตัว ทางความร้อนของพอลิไอโซพรีน และพอลิไอโซพรีนที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิต่างๆ	51
รูปที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อพอลิไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อน ของพอลิไอโซพรีนและการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิต่างๆ	52
รูปที่ 4.25 กลไกการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติเป็นเบส	53

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.26 กลไกการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติเป็นกรด	53
รูปที่ 4.27 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนและการสลายตัวเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ	54
รูปที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีน และการสลายตัวเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ	55
รูปที่ 4.29 พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของโลหะออกไซด์	56
รูปที่ 4.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์	57
รูปที่ 4.31 เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนและการสลายตัวเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ	58
รูปที่ 4.32 เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไฮโดรคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่อุณหภูมิ 475°C	60
รูปที่ 4.33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ	60
รูปที่ 4.34 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่อุณหภูมิ 360°C	61
รูปที่ 4.35 Oxygen charge (- δ) ในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X และซีโอไลต์ Y	62
รูปที่ 4.36 เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ ในผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ที่อุณหภูมิ 360°C	63
รูปที่ 4.37 เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมแบเรียมคาร์บอเนต และ CsX	64
รูปที่ 4.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนต และ CsX	65

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ข.1 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 360°C โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา NaX	75
รูปที่ ง.1 โคโรมาโทแกรมสารมาตรฐานของสาร LPG	85
รูปที่ ง.2 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 360°C โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	86
รูปที่ ง.3 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 425°C โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	86
รูปที่ ง.4 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 475°C โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	87
รูปที่ ง.5 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MgO ที่อุณหภูมิ 360°C	87
รูปที่ ง.6 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MgO ที่อุณหภูมิ 425°C	88
รูปที่ ง.7 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MgO ที่อุณหภูมิ 475°C	88
รูปที่ ง.8 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา BaCO ₃ ที่อุณหภูมิ 360°C	89
รูปที่ ง.9 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา BaCO ₃ ที่อุณหภูมิ 425°C	89
รูปที่ ง.10 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา BaCO ₃ ที่อุณหภูมิ 475°C	90
รูปที่ ง.11 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา BaO ที่อุณหภูมิ 360°C	90
รูปที่ ง.12 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NaX ที่อุณหภูมิ 360°C	91
รูปที่ ง.13 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KX ที่อุณหภูมิ 360°C	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ง.14 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CsX ที่อุณหภูมิ 360°C	92
รูปที่ ง.15 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CsX ที่อุณหภูมิ 425°C	92
รูปที่ ง.16 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CsX ที่อุณหภูมิ 475°C	93
รูปที่ ง.17 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NaY ที่อุณหภูมิ 360°C	93
รูปที่ ง.18 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KY ที่อุณหภูมิ 360°C	94
รูปที่ ง.19 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CsY ที่อุณหภูมิ 360°C	94
รูปที่ ง.20 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CsY ที่อุณหภูมิ 425°C	95
รูปที่ ง.21 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CsY ที่อุณหภูมิ 475°C	95
รูปที่ จ.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO	96
รูปที่ จ.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา BaO	96
รูปที่ จ.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา BaCO ₃	97
รูปที่ จ.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา NaX	97
รูปที่ จ.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา KX	98
รูปที่ จ.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา CsX	98
รูปที่ จ.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา NaY	99
รูปที่ จ.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา KY	99
รูปที่ ฉ.1 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยไม่มี ตัวเร่งปฏิกิริยา	100

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ฉ.2 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ ตัวเร่งปฏิกิริยา MgO	101
รูปที่ ฉ.3 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ ตัวเร่งปฏิกิริยา BaO	101
รูปที่ ฉ.4 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ ตัวเร่งปฏิกิริยา BaCO ₃	102
รูปที่ ฉ.5 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ ตัวเร่งปฏิกิริยา KX	102
รูปที่ ฉ.6 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ ตัวเร่งปฏิกิริยา CsX	103
รูปที่ ฉ.7 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ ตัวเร่งปฏิกิริยา NaY	103
รูปที่ ฉ.8 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ ตัวเร่งปฏิกิริยา KY	104
รูปที่ ฉ.9 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ ตัวเร่งปฏิกิริยา CsY	104

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญ และที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันเชื้อเพลิงมีความสำคัญอย่างมากในชีวิตประจำวัน และกระบวนการต่างๆ เพื่อใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมายซึ่งใช้กันอยู่ในทุกวันนี้ โดยแหล่งเชื้อเพลิงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันเป็นแหล่งเชื้อเพลิงประเภทน้ำมันซึ่งจะได้มาจากแหล่งของ ก๊าซธรรมชาติ และ น้ำมันดิบซึ่งมีปริมาณจำกัด เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีการหาเชื้อเพลิงจากแหล่งอื่นๆ เพื่อมาทดแทนแหล่งเชื้อเพลิงเดิมที่ใกล้จะหมดลงในแต่ละวัน ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไอโซพรีนมอนอเมอร์ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 5 ตัว และเป็นสารที่อยู่ในช่วงของแก๊สโซลีน (Gasoline)

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (Acid catalyst) จะเกิดปฏิกิริยาผ่านคาร์โบแคทไอออน (Carbocation) ซึ่งสามารถเป็นตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่อไปทำให้ได้เป็นโมเลกุลใหญ่เกิดเป็น Coke และ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสียสภาพได้ แต่ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส จะทำหน้าที่ดึงโปรตอนในโมเลกุลของพอลิไอโซพรีนเกิดเป็นคาร์แบนไอออน (Carbanion) ซึ่งคาร์แบนไอออนนี้สามารถเหนี่ยวนำภายในโมเลกุลทำให้เกิดการแตกพันธะเกิดเป็นโมเลกุลเล็กๆ โดยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะสามารถควบคุมให้เกิดการแตกสลายไปในแนวทางที่เฉพาะเจาะจงกว่ากลไกที่ผ่านคาร์โบแคทไอออนและการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีรูพรุนจะช่วยควบคุมรูปร่างและขนาดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (Base catalyst) โดยศึกษาจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ (Metal oxide) ได้แก่ แบเรียมออกไซด์ (BaO) และ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ (Zeolite) ได้แก่ ซีโอไลต์ X (NaX) และซีโอไลต์ Y (NaY) โดยจะศึกษาถึงความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน เพื่อให้ได้ไอโซพรีนมอนอเมอร์ และผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สามารถสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดเบสได้
2. สามารถตรวจสอบสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดเบสได้
3. สามารถสังเคราะห์ไอโซพรีนมอนอเมอร์ได้จากกระบวนการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน
4. สามารถวิเคราะห์ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อปริมาณไอโซพรีนมอนอเมอร์ได้

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ และปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ ได้แก่ แบเรียมออกไซด์ (BaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีฤทธิ์เป็นเบส ได้แก่ ซีโอไลต์ X (Zeolite X) และซีโอไลต์ Y (Zeolite Y)
2. ศึกษาวิธีการตรวจสอบสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ โดยเทคนิค X-ray Powder Diffractometer (XRD) X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF) Thermogravimetric Analysis (TGA) และหาพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องทดสอบการดูดซับก๊าซของของแข็ง
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เพื่อใช้ในปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน
4. ศึกษาถึงปริมาณไอโซพรีนมอนอเมอร์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของความร้อน (Thermal cracking) ของพอลิไอโซพรีน (Polyisoprene) ที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา และเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงขั้นตอนการเตรียม และสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆที่ใช้ในการศึกษาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน
2. ทราบถึงอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อปริมาณไอโซพรีนมอนอเมอร์ที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ซีโอไลต์ (Zeolite) [1,2]

ซีโอไลต์มาจากภาษากรีกจากคำว่า “Zein” และ “Lithos” หมายความว่า “หินเดือด” (Boiling stone) ซึ่งถูกค้นพบในปี 1756 โดยนักแร่วิทยา ชาวสวีเดน ชื่อ Cronstedt

ซีโอไลต์ (Zeolite) คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต มีโครงสร้างเป็นรูพรุนแบบ 3 มิติ ประกอบด้วย พอลิฮีดรา (Polyhedra) ของ $[\text{SiO}_4]^{4-}$ และ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ ซึ่งไอออนบวก (Cation) และโมเลกุลของน้ำ จะสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนได้ การเกิดซีโอไลต์สามารถเกิดได้เองตามธรรมชาติ (ประมาณ 34 ชนิด) และสามารถเกิดได้จากการสังเคราะห์ผ่านไฮโดรเจล (Hydrogel) โดยทั่วไป ซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์กว่า 100 ชนิด ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง สูตรโครงสร้างของซีโอไลต์แสดงในรูปหน่วยเซลล์ของผลึกดังนี้



M = ไอออนบวกที่มีประจุ n

W = จำนวนโมเลกุลของน้ำ

y/x มีค่าระหว่าง 1 - ∞ ขึ้นกับโครงสร้างของผลึก

ผลรวม (x + y) จะเท่ากับจำนวนรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) ทั้งหมดในหน่วยเซลล์ในบางกรณีภายในโครงสร้างของซีโอไลต์อาจไม่มีอะลูมิเนียมอยู่ในเลย เช่น พวกซิลิกาไลต์ (Silicalite)

โครงสร้างของซีโอไลต์ (Zeolite structure)

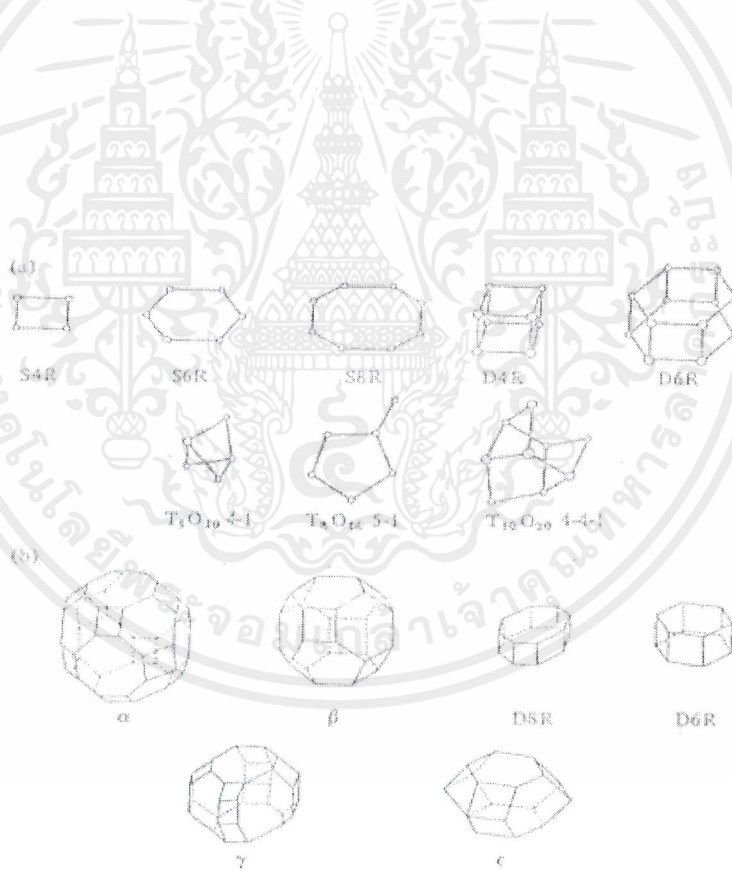
การจัดเรียงตัวของโครงสร้างซีโอไลต์ในขั้นต้นเริ่มจากโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary building unit) ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ที่มีออกซิเจน 4 อะตอมล้อมรอบ ซิลิกอน หรือ อะลูมิเนียม 1 อะตอม โครงสร้างปฐมภูมิจะมีการเชื่อมโยงกันโดยผ่านมุมของออกซิเจนทั้ง 4 อะตอม เพื่อจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building unit) ดังรูป 2.2a โครงสร้างทุติยภูมิสามารถมีการสร้างพันธะเชื่อมต่อกันระหว่างโครงสร้างทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกันเองเรียกว่าโครงสร้างตติยภูมิ (Tertiary building unit) ดังรูปที่ 2.2b และโครงสร้างตติยภูมินี้สามารถเชื่อมต่อกันได้เป็นโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.3

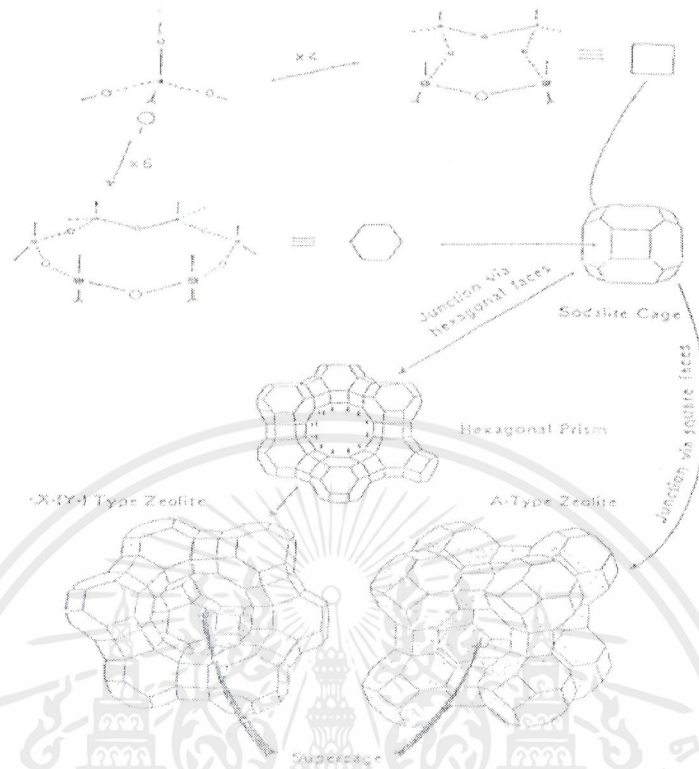


รูปที่ 2.1 ทรงสี่หน้าของอะลูมิเนียม และ ซิลิกา



รูปที่ 2.2 a) โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building unit, SBU) ของซีโอไลต์
b) โครงร่าง Polyhedral ของซีโอไลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลต์ชนิด X Y และ A รวมถึงการรวมตัวเป็นโครงสร้างลักษณะต่างๆ

การเชื่อมต่อกันของโครงสร้างทุติยภูมิ ในลักษณะแตกต่างกันทำให้ได้ลักษณะของโครงสร้างซีโอไลต์ที่แตกต่างกันหลายชนิด ดังรูปที่ 2.2 ในโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ จะมีช่องว่างที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งมีไอออนบวกและโมเลกุลของน้ำจะอยู่ในโพรงช่องว่างนี้ ธรรมชาติของช่องว่างและโพรงที่เชื่อมต่อกันในซีโอไลต์ เป็นตัวการสำคัญในการกำหนดสมบัติทางเคมีและกายภาพของซีโอไลต์ ในการแลกเปลี่ยนไอออนและดูดซับสาร ลักษณะของน้ำในผลึกของซีโอไลต์จะแปรผันกับขนาดของช่องว่างภายในโพรงของโครงสร้างผลึก ซึ่งอาจมีน้ำมากถึง 50% ของปริมาตรผลึกทั้งหมด เมื่อทำการไล่น้ำออกจากผลึกซีโอไลต์ ทำให้เกิดช่องว่างที่สามารถบรรจุโมเลกุลของสารชนิดอื่นเข้าไปได้

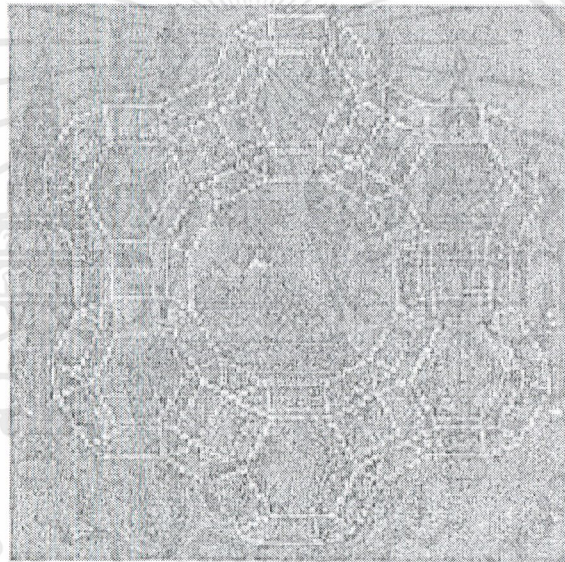
สำหรับปริมาณและตำแหน่งของน้ำในโครงร่างผลึกซีโอไลต์จะขึ้นอยู่กับ

1. ลักษณะของโครงร่างของโมเลกุลของซีโอไลต์เช่น
 - ขนาดของรูพรุนหรือโพรง
 - รูปร่างของรูพรุนหรือโพรง
2. จำนวนและธรรมชาติของไอออนประจุบวกที่อยู่ในโพรงของโครงร่างผลึกซีโอไลต์

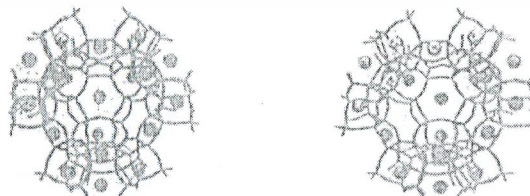
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีโอไลต์ชนิด X และ ชนิด Y

ซีโอไลต์ชนิด X และ Y มีโครงสร้างผลึกซีโอไลต์ (Zeolite structure) เดียวกันคือ ฟูจาไซต์ (Faujasite) โครงสร้างเริ่มจากทรงสี่หน้า (Tetrahedral) ที่มีอะลูมิเนียม (Al) หรือซิลิกอน (Si) เป็นอะตอมกลาง (Center atom) (อะตอม Al และ Si เรียก T อะตอม) T อะตอมสร้างพันธะกับออกซิเจน ส่วนออกซิเจนแต่ละอะตอมสร้างพันธะกับ T อะตอม 2 อะตอมเกิดพันธะเชื่อมโยงเป็น T-O-T ในโครงสร้างของซีโอไลต์ X และ Y ประกอบด้วยโพรงโซดาไลต์ (Sodalite cage) ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายเพชร ในแต่ละโพรงโซดาไลต์มีออกซิเจน 6 อะตอมเป็นตัวเชื่อมระหว่างโพรงโซดาไลต์เข้าด้วยกันเกิด ซุปเปอร์เคจ (Super cage) ซึ่งเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ (Large window) ขนาด 7-8 อังสตรอม



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์โครงสร้างแบบ Faujasite (ซีโอไลต์ X และ Y)



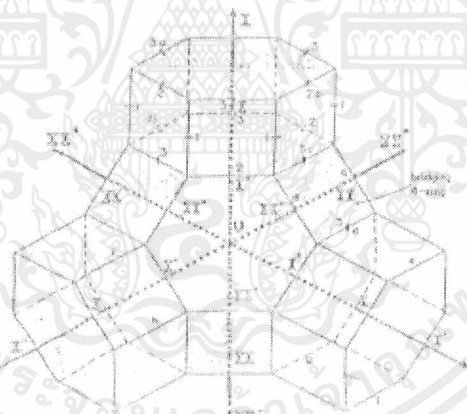
รูปที่ 2.5 ตำแหน่งที่ไอออนบวก (Cation) อยู่ภายในซุปเปอร์เคจของซีโอไลต์ X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซูเปอร์เคจ (Super cage) ในโครงสร้างของซีโอไลต์ฟุจาไซต์ (Faujasite) มีลักษณะทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.3 นาโนเมตร มีขนาดหน้าตาของรูพรุนประมาณ 0.74 นาโนเมตร โครงสร้างรูพรุน 3 มิตินี้มีขนาดใหญ่พอที่ให้โมเลกุลสารตั้งต้น เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอน อยู่ภายในได้ และหน้าตาของรูพรุนมีขนาดเล็กพอที่สามารถจำกัดการเคลื่อนที่เข้า และออกซูเปอร์เคจของโมเลกุลได้เช่นเดียวกัน องค์ประกอบของฟุจาไซต์ (Faujasite) มีหน่วยเซลล์ทั่วไปดังนี้คือ



เมื่อ Z มีค่าประมาณ 260 และค่า j มีค่าในช่วง 48-76 สำหรับ ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (NMR) สามารถใช้หาโครงสร้างของฟุจาไซต์ ซึ่งขนาดของหน่วยเซลล์จะเล็กลงเล็กน้อย เมื่อ Si / Al มีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยังช่วยหาตำแหน่งของแคตไอออนที่ทำหน้าที่ดุลประจุลบภายในโครงผลึก ตำแหน่งแคตไอออนแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตำแหน่งของไอออนบวก (Cation) ซีโอไลต์ X

ตำแหน่ง I (Type I site) ตั้งอยู่ที่ตรงกึ่งกลางของปริซึมทรง 6 เหลี่ยม (Hexagonal prism)

ตำแหน่ง I' (Type I' site) ตั้งอยู่ในโพรงไซดาไลต์ตรงกันข้ามกับผิวทรง 6 เหลี่ยม (Hexagonal face)

ตำแหน่ง II (Type II site) ตั้งอยู่ในซูเปอร์เคจใกล้กับผิวทรง 6 เหลี่ยมที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับหน่วยเซลล์อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่ง II' (Type II' site) ตั้งอยู่ในซูปเปอร์เซลล์ซึ่งห่างจากผิวทรง 6 เหลี่ยมมากกว่าตำแหน่ง II

สำหรับซีโอไลต์ฟูจาไซท์ ที่มี H^+ เป็นแคทไอออนที่ดุลประจุบนโครงร่างโปรตอนในตำแหน่ง II และตำแหน่ง II' มีส่วนในการเร่งปฏิกิริยา แต่โปรตอนในตำแหน่ง I และ I' มีอันตรกิริยา (Interaction) กับสารตั้งต้นได้น้อยกว่า จึงมีความสำคัญในการเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่า

การสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking)

การสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการแตกสลายพันธะทำให้เกิดสารมัธยันต์ (Intermediate) ที่สามารถสร้างพันธะเกิดสารโมเลกุลใหม่ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ควบคุมให้เกิดการแตกสลายไปในทิศทางที่ต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมขนาดโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ได้ กระบวนการสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นเบส (Base catalyst) นั้นมีคาร์เบนไอออน (Carbanion) ซึ่งเป็นคาร์บอนที่มีประจุลบเป็นสารมัธยันต์ (Intermediate) เช่น การสลายตัวของพอลิไอโซพรีน (Polyisoprene) โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูป



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดผ่านคาร์เบนไอออน

ปฏิกิริยาเริ่มจากเบสดึงโปรตอนของโมเลกุลพอลิไอโซพรีนเกิดคาร์เบนไอออนทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ (Delocalise) ทำให้สายโซ่พอลิไอโซพรีน (Polyisoprene) แตกออกเป็นมอนอเมอร์ (Isoprene monomer) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในกระบวนการการสลายตัวได้แก่โลหะออกไซด์ (MgO CaO และ BaO) และซีโอไลต์ (ซีโอไลต์ X และ Y) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดจุลภาค (Microporous catalyst) ได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการสลายตัวทางความร้อนเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface area) ที่เกิดปฏิกิริยามาก นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการดูดซับที่ความดันต่ำ และให้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างเฉพาะเจาะจงได้ (Shape selectivity)

วัสดุคล้ายซีโอไลต์ (Zeotype materials)

วัสดุคล้ายซีโอไลต์ (Zeotype materials) คือวัสดุพหุรูปผลึกที่มีโครงสร้างเหมือนซีโอไลต์ แต่มีอะตอมอื่นเข้ามาแทนที่ ซิลิกา หรือ อะลูมินา เช่น ออกไซด์ของโลหะ เป็นต้น ทำให้องค์ประกอบทางเคมีแตกต่างไปจากซีโอไลต์ ซึ่งวัสดุคล้ายซีโอไลต์จะมีองค์ประกอบของธาตุอื่น ทำให้สมบัติต่างๆ เปลี่ยนแปลงไปแม้จะมีโครงสร้างเป็นแบบเดียวกันก็ตาม สามารถแบ่งวัสดุคล้ายซีโอไลต์ ได้ดังนี้

1. Metallosilicates

เป็นวัสดุที่เกิดจากธาตุวาเลนซ์สาม (Trivalent) ชนิดอื่นนอกเหนือจากอะลูมิเนียม (Al) เช่น โบรอน (B) แกลเลียม (Ga) เป็นต้น ร่วมกับซิลิกาเป็นโครงสร้าง (Framework) ทำให้โครงสร้างที่ได้มีขั้วเกิดขึ้นและทำให้ควบคุมความเป็นกรดและเบสได้ ดังนั้นโลหะที่มาแทนที่อะลูมิเนียมทำให้วัสดุซีโอไลต์ มีสมบัติในการออกซิเดชัน (Oxidation) หรือรีดักชัน (Reduction) ได้

2. Metalloaluminate

เป็นวัสดุที่เกิดจากธาตุวาเลนซ์สี่ (Tetravalent) ชนิดอื่นมาแทนที่ซิลิกอนซึ่งการเกิด Metalloaluminate เกิดได้ยากเนื่องจากจะต้องทำให้มีประจุบวกมาดุลประจุเป็นจำนวนมาก ทำให้โครงสร้างไม่เสถียรต่อความชื้นและโลหะที่มีเวเลนซ์สี่มีไม่มาก ธาตุที่สามารถรวมกับอะลูมิเนียมแล้วเกิดเป็นโครงสร้างได้คือ ไททาเนียม (Ti)

3. Aluminophosphate

– Aluminium – Phosphorous – Oxygen Framework (AIPO₄s)

AIPO₄s เป็นโครงสร้างทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ PO₄ กับ AlO₄ ในปริมาณ ที่เท่าๆกัน ซึ่งประจุบวกของ PO₄ ไปดุลประจุลบของ AlO₄ จึงทำให้ภายในโครงสร้าง ไม่จำเป็นต้องมีแคทไอออน (Cation) มาดุลประจุ จึงทำให้ไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้

– Silicon – Aluminium – Phosphorous – Oxygen Framework (SAPOs)

SAPOs มีส่วนประกอบคล้าย AIPO₄ แต่โครงสร้างของ SAPOs จะประกอบด้วยธาตุ 3 ชนิดคือซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) และฟอสฟอรัส (P) ปริมาณของฟอสฟอรัส มีปริมาณน้อยกว่าอะลูมิเนียม ทำให้เกิดประจุลบเกิดขึ้น จึงทำให้ SAPOs ต้องมี แคทไอออนมาดุลประจุลบที่เกิดขึ้น ดังนั้น SAPOs จึงมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) SAPOs ที่มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับ AIPO₄ ซึ่งใช้ชื่อเหมือนกัน เช่น SAPO-5 จะมีโครงสร้างเหมือน AIPO₄-5

- Metal – Aluminium – Phosphorous – Oxygen Framework (MeAPOs)

MeAPOs เกิดจากโลหะอื่นๆรวมกับอะลูมิเนียม และฟอสฟอรัส เกิดเป็นโครงสร้างทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) โลหะที่สามารถเกิดเป็นโครงสร้างทรงเหลี่ยมสี่หน้า ได้แก่ โคบอลต์ (Co) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) และสังกะสี (Zn) โดยปริมาณโลหะที่เกิดเป็น MeAPOs มีได้ตั้งแต่ 0–40% ของอะลูมิเนียมทั้งหมด โครงสร้างของ MeAPOs จะเหมือนกับ $AlPO_4$ และ SAPO

- Metal – Aluminium – Phosphorous – Silicon – Oxygen Framework

MeAPSOs ประกอบด้วยโลหะอื่นๆ ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) ฟอสฟอรัส (P) และซิลิกอน (Si) รวมเป็นโครงสร้างทรงสี่หน้า โดยโครงสร้างของ MeAPSOs ที่มีการศึกษาโครงสร้างอย่างแน่นอนได้แก่ CoAPSOs

การสังเคราะห์ซีโอไลต์

ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์มีตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดของซีโอไลต์ ได้แก่

1. อัตราส่วนระหว่าง ซิลิกอน และอะลูมิเนียม (Si / Al)

อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมมีความสำคัญต่อการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ โดยการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่มีอะลูมิเนียมมาก การเกิดผลึกของซีโอไลต์จะเกิดอย่างรวดเร็วเนื่องจากอะลูมิเนียมมีความสามารถในการเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกได้สูงเพราะอะลูมิเนียมเป็นส่วนที่มีขั้ว ดังนั้นถ้าซิลิกอนเพิ่มมากขึ้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดที่มีอะลูมิเนียมสูง จะทำให้การเกิดผลึกของซีโอไลต์เกิดได้ช้าลง ส่วนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่มีซิลิกอนมาก การเกิดผลึกของซีโอไลต์จะเกิดได้ช้าเนื่องจากซิลิกอนไม่มีตัวที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการรวมตัวเป็นผลึก อย่างไรก็ตามถ้าเพิ่มอะลูมิเนียมให้มากขึ้นจะทำให้ซีโอไลต์เกิดผลึกช้าลง ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่มีซิลิกอนมาก เนื่องจากอะลูมิเนียมจะเป็นตัวขัดขวางการตกผลึกของซิลิกอน เป็นการเพิ่มความไม่บริสุทธิ์ให้แก่ซิลิกอน

2. ค่าความเป็นกรด - เบส (pH)

ซิลิกอนสามารถละลายได้ดีในสารละลายที่มีค่าความเป็นเบสสูง ดังนั้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จึงต้องใช้สารละลายที่มีค่าความเป็นเบสสูง เพราะจะทำให้ซิลิกอนที่อยู่ในสถานะของแข็งละลายออกมาเป็นสารละลายได้ดี เมื่อซิลิกอนละลายออกมาเป็นสารละลายจะเกิดการตกผลึกของซีโอไลต์ขึ้น แต่สารละลายต้องไม่มีค่าความเป็นเบสสูงเกินไปที่ทำให้ ซิลิกอนที่อยู่ในรูปสารละลายไม่สามารถตกผลึกกลายเป็นซีโอไลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เทมเพลท (Template)

เทมเพลทจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

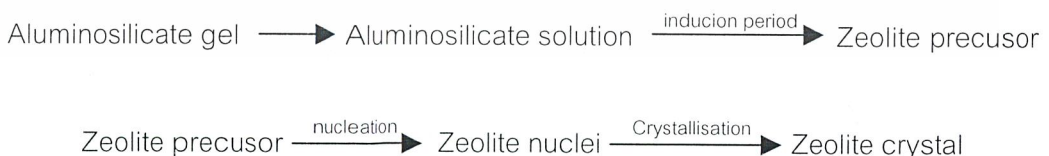
- เทมเพลทอนินทรีย์ จะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างและรูปร่างของโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building unit) และโครงสร้างของซีโอไลต์ (Unit cell) เนื่องจาก เทมเพลทอนินทรีย์ชนิดต่างๆจะมีความเฉพาะกับโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building unit) และโครงสร้างของ ซีโอไลต์ (Unit cell) ที่ต่างกันชนิดกันไป
- เทมเพลทอนินทรีย์ เป็นตัวช่วยให้สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้ในสภาวะที่ค่าความเป็นเบสต่ำลง และเทมเพลทอนินทรีย์ยังเป็นตัวกำหนดโครงสร้างของซีโอไลต์ที่จะเกิดขึ้นด้วย

4. อุณหภูมิและเวลาในการสังเคราะห์

อุณหภูมิในการสังเคราะห์ถ้าใช้อุณหภูมิสูงความสามารถในการเกิดผลึกของซีโอไลต์จะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการสังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิต่ำ และถ้าระยะเวลาในการตกผลึกมีมากก็จะทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีผลึกใหญ่

ขั้นตอนการเกิดซีโอไลต์

การเกิดซีโอไลต์เริ่มจากสารประกอบของซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่อยู่ในสภาวะของแข็งละลายกลายเป็นสารละลายหรือเจล ในการที่ซิลิกอนจะละลายออกมาเป็นสารละลายได้จะต้องใช้สภาวะที่มีค่าความเป็นเบสสูง จากนั้นซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมที่เป็นสารละลายซึ่งมีความไม่เสถียรจะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุดเท่าที่จะทำได้ซึ่งก็คือซีโอไลต์ (Zeolite precursor) ของซีโอไลต์ (โครงสร้างทุติยภูมิรูปร่างต่างๆ) จากนั้นซีโอไลต์ (Zeolite precursor) จะเกิดการรวมตัวเป็นนิวเคลียสของซีโอไลต์เล็กๆ ซึ่งนิวเคลียสของซีโอไลต์ เหล่านี้จะประกอบไปด้วยโครงสร้าง (Unit cell) ของ ซีโอไลต์ซึ่งมีโครงสร้างเดียวกันกับซีโอไลต์ที่จะสังเคราะห์จากนั้นจะเป็นช่วงที่เกิดการโตของผลึกทำให้ผลึกของซีโอไลต์มีขนาดใหญ่ขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญของซีโอไลต์

ซีโอไลต์สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) ทั้งนี้เนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสม กล่าวคือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ต้องเหมาะสมกับประเภทของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับชนิดการเกิดปฏิกิริยาได้หลายประเภทจึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาควรมีตำแหน่งที่ว่องไว (Active site) บนพื้นผิวมาก และสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาสามารถเข้าไปถึงตำแหน่งที่ว่องไว (Active site) ได้มากที่สุด ซึ่งซีโอไลต์มีพื้นผิวที่ใช้ทำปฏิกิริยาได้มาก เนื่องจากมีลักษณะเป็นรูพรุนจุลภาค
3. มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความดัน
4. มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

จากสมบัติดังกล่าวทำให้ซีโอไลต์มีความเหมาะสมในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาต่างๆ ได้อย่างมากมาย

สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์

1. สมบัติความทนต่อความร้อน (Thermal stability) ความชื้น (Hydrothermal stability) และสารเคมี (Chemical stability)

เนื่องจากซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็น 3 มิติ (3-Dimension network) จึงทำให้มีโครงสร้างแข็งแรง และยังมีรูพรุนที่มีขนาดเล็ก (มีความแข็งแรงกว่ารูพรุนขนาดใหญ่) ทำให้ซีโอไลต์มีความทนทานต่อความดัน และอุณหภูมิ ซีโอไลต์ที่มีซิลิกาในโครงสร้างมากจะมีความทนทานต่อกรด ส่วนซีโอไลต์ที่มีอะลูมินามากจะมีความทนทานต่อเบส

2. พื้นที่ผิว (Surface area)

ความมีรูพรุนของซีโอไลต์ (Porosity) ทำให้ซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาได้มาก

3. ทำหน้าที่เป็นปฏิกรณ์เคมีระดับโมเลกุล (Molecular reactor)

เนื่องจากซีโอไลต์มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporosity) ระดับโมเลกุลทำให้โมเลกุลตัวหนึ่งๆ สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ รูพรุนของซีโอไลต์จึงเปรียบเสมือนเป็นปฏิกรณ์เคมีระดับโมเลกุล

4. กำหนดความเฉพาะเจาะจง (Shape selectivity)

ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้สามารถกำหนดความเฉพาะเจาะจงของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดย

- 4.1 ความเฉพาะเจาะจงของสารตั้งต้น (Reactant shape selectivity) เราสามารถกำหนดหรือเลือกชนิดของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาในซีโอไลต์ได้ โดยเลือกขนาดของรูพรุนให้มีความเหมาะสมกับสารที่ต้องการให้เข้าทำปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัวของนอร์มัลอัลเคน สามารถเลือกให้เฉพาะนอร์มัลอัลเคนเข้าทำปฏิกิริยาเท่านั้น
- 4.2 ความเฉพาะเจาะจงของสารมัธยันต์ (Intermediate shape selectivity) ซีโอไลต์จะเลือกให้มีการเกิดปฏิกิริยาที่ผ่านสารมัธยันต์ (Intermediate) ที่เหมาะสมกับขนาดของรูพรุนเท่านั้น เช่น ไซลีนดิสพรอพอทิเนชัน (Xylene disproportionation)
- 4.3 ความเฉพาะเจาะจงของผลิตภัณฑ์ (Product shape selectivity) ซีโอไลต์จะยอมให้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเหมาะสมผ่านออกมา เนื่องจากผลของขนาดรูพรุนจุลภาค เช่น การผลิตพาราไซลีน (p-Xylene production)

โลหะ และ โลหะออกไซด์ [3,4]

สมบัติทางกายภาพทั่วไปของโลหะ คือ โลหะเป็นแวววาว นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีสามารถดึงเป็นเส้นได้ (Ductility) ตีเป็นแผ่นบางๆได้ (Malleability) นอกจากนี้แล้วโลหะทั่วไปยังมีจุดหลอมเหลวและความหนาแน่นสูง มีค่าพลังงานไอออไนเซชันต่ำ สมบัติทางกายภาพของโลหะอัลคาไลน์ และ อัลคาไลน์เอิร์ทแสดงในตารางที่ 2.1 นอกจากสมบัติทางกายภาพเหล่านี้แล้วยังมีสมบัติอื่นอีก ได้แก่ การรวมตัวกับอโลหะได้สารไอออนิก เช่น NaCl มีพลังงานไอออไนเซชัน (IE) อิเล็กโทรเนกาติวิตี (EN) และอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (EA) ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับอโลหะและกึ่งโลหะธาตุรีเฟอเรนทีฟ (Representative element) แบ่งโลหะออกเป็น 2 หมู่ได้แก่

หมู่ 1A	Li	Na	K	Rb	Cs	Fr
หมู่ 2A	Be	Mg	Ca	Sr	Ba	Ra

ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆของโลหะ [4]

ธาตุ		รัศมีอะตอม (อังสตรอม)	รัศมีไอออน (อังสตรอม)	EN	IE ₁ kJ/mol	IE ₂ KJ/mol	M _p (°C)	B _p (°C)
Li	2S ¹	1.52	0.76	1.0	520	7296	181	1347
Na	3S ¹	1.86	1.02	0.9	496	4563	98	881
K	4S ¹	2.27	1.38	0.8	419	3069	63	766
Rb	5S ¹	2.48	1.52	0.8	403	2650	39	688
Cs	6S ¹	2.65	1.67	0.7	376	2420	28.5	705
Be	2S ²	1.12	0.31	1.5	899	1757	1287	(2500)
Mg	3S ²	1.60	0.72	1.2	737	1450	649	1105
Ca	4S ²	1.97	1.00	1.0	590	1145	839	1494
Sr	5S ²	2.15	1.18	1.0	549	1064	768	1381
Ba	6S ²	2.22	1.35	0.9	503	965	727	(1850)
Ra	7S ²	-	1.48	-	509	979	(700)	(1700)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บเป็นค่าประมาณ

จากตารางพบว่าโลหะขนาดใหญ่ เช่น Cs และ Ba สามารถให้อิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าธาตุขนาดเล็ก เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ซึ่งมีสมบัติเป็นเบส จะมีความแรงของเบส (Basic strength) มากกว่าธาตุขนาดเล็กเช่น Mg เพราะธาตุขนาดใหญ่จะมีค่า IE น้อยทำให้เสียอิเล็กตรอนได้ง่าย และออกซิเจนซึ่งมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (EN) สูงจึงสามารถดึงอิเล็กตรอนของโลหะขนาดใหญ่ไปได้ และสามารถประพุดตัวของลิวอิสเบส (Base lewis)

โซเดียม (Na) และโพแทสเซียม (K) เป็นธาตุที่ใช้กันอย่างกว้างขวางและมีความสำคัญกับสิ่งมีชีวิต เนื่องจากความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของธาตุทั้งสองหมู่ทำให้สามารถพบธาตุเหล่านี้ในรูปสารประกอบ เมื่อเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์มีฤทธิ์เป็นเบสสามารถทำปฏิกิริยากับกรดได้เกลือหรือละลายในน้ำได้สารละลายที่มีสมบัติเป็นเบส แสดงดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการพบว่าเมื่อโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ละลายน้ำจะได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นเบสซึ่งสามารถแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ตามทฤษฎีของอาร์เรเนียส (Svante August Arrhenius) ออกไซด์ของโลหะบางชนิดไม่ละลายน้ำ จึงไม่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ แต่ยังคงแสดงสมบัติเป็นเบสอยู่เพราะทำปฏิกิริยากับกรดได้ เช่น



ปฏิกิริยาดังกล่าวมีประโยชน์ในทางปฏิบัติเพราะใช้ขจัดสนิมจากเหล็กหรือเหล็กกล้าก่อนที่จะฉาบด้วยสังกะสี หรือ ดีบุก กระบวนการขจัดสนิมด้วยกรดเรียกว่า "Pickling" แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุที่พบบ่อยเป็นอันดับที่ 5 และ 6 บนผิวโลก มีความว่องไวน้อยกว่าโลหะหมู่ 1 เมื่อเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์จะให้ฤทธิ์เป็นเบสน้อยกว่าโลหะหมู่ 1 เช่นกัน นอกจากสารประกอบออกไซด์แล้วยังเกิดสารประกอบอื่นได้ เช่น คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg^{2+}) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca^{2+}) เป็นธาตุที่สำคัญในร่างกายมนุษย์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg^{2+}) ยังเป็นส่วนประกอบของคลอโรฟิลล์ด้วย ลักษณะเฉพาะตัวของโลหะอีกประการหนึ่งคือเมื่อเกิดเป็นสารประกอบมักมีเลขออกซิเดชันเป็นบวก แต่มีข้อยกเว้น เช่น Ni มีเลขออกซิเดชันเท่ากับศูนย์ ใน $\text{Ni}(\text{CO})_4$ และ Co มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ -1 ใน $\text{NaCo}(\text{CO})_4$

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบปริมาณธาตุโลหะหมู่ 1 ที่พบบนผิวโลก (โดยน้ำหนัก) [4]

Element	Abundance in earth's crust		Relative Abundance
	(ppm)	(%)	
Li	18	0.0018	35
Na	22700	2.27	7
K	18400	1.84	8
Rb	78	0.0078	23
Cs	2.6	0.00026	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบปริมาณธาตุโลหะหมู่ 2 ที่พบบนผิวโลก (โดยน้ำหนัก) [4]

Element	(ppm)	Relative abundance
Be	2.0	51
Mg	27640	6
Ca	46600	5
Sr	384	15
Ba	390	14
Ra	1.3×10^{-6}	-



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดารณี พิมพ์ภาภรณ์ และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาถึงการสลายตัวของพอลิสไตรีน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส ซึ่งได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ (MgO และ BaO) และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ (ซีโอไลต์ X และ ซีโอไลต์ Y) ซึ่งสามารถวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดได้จากเทคนิค X-ray Powder Diffraction และ เทคนิคการดูดซับก๊าซของของแข็ง

งานวิจัยนี้จะใช้อุณหภูมิในการทำการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่อุณหภูมิ 400°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิเดียวกับอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่ได้จากเครื่อง TGA จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิสไตรีน เมื่อเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ จะให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ได้แก่ ก๊าซ (Gases) ของเหลว (Liquid hydrocarbons) สารประกอบแว็กซ์ (Wax-like compound) และกากคาร์บอน (Carbonaceous residues) ผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์ที่เกิดขึ้นอยู่ในส่วนของผลิตภัณฑ์ก๊าซ ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ได้จากเครื่อง Gas Chromatograph

จากการทดลองพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนตที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสในการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิสไตรีน สามารถให้ผลิตภัณฑ์รวมก๊าซและของเหลว และผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ และพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในการสลายตัวของพอลิสไตรีนเพราะให้ผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์มากที่สุด

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. ซีโอไลต์ X (Aldrich)
2. แบเรียมออกไซด์ (BaO) (Riedel deHaen)
3. ซีเซียมอะซิเตต (CH_3COOCs) (Fluka)
4. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (Carlo erba)
5. โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) (Carlo erba)
6. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Carlo erba)
8. โซเดียมอะลูมิเนต (Na_2O 45.5 %wt Al_2O_3 54.5 %wt) (Riedel deHaen)
9. สารแขวนลอยซิลิกา (Ludox 40% wt) (Aldrich)
10. อะลูมิเนียมไนเตรต ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3$) (Fluka)
11. พอลิไอโซพรีน
12. โทลูอีน (Toluene) (Carlo erba)
13. ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether) (Carlo erba)
14. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

1. เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Buck scientific model 910 gas chromatograph)
2. เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (Perkin elmer thermogravimetric analyzer)
3. เครื่องวิเคราะห์การดูดซับก๊าซของของแข็ง (Quanta chrome autosorb-1C)
4. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (Bruker AXS x-ray powder diffractometer)
5. เครื่องวัดรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (Bruker AXS x-ray fluorescence spectrometer)
6. เครื่องทำปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง (Continuous reactor)
7. เครื่องควบคุมการไหล (Flow controller)
8. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
9. เครื่องควบคุมความเย็น (Cooling system)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เตาเผาแบบท่อ (Tube furnace)
11. ภาชนะความดันสูง (Autoclave)
12. ชุดรีฟลักซ์ (Reflux)
13. เครื่องชั่งน้ำหนัก
14. ตู้อบ
15. คอลัมน์ (Column)
16. แท่งแม่เหล็กและเครื่องปั่นกวน
17. กระจกครอบเบอร์ 1
18. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว และ พลาสติกในห้องปฏิบัติการ

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

ตอนที่ 1 การเตรียม และตรวจสอบโลหะออกไซด์ และซีโอไลต์

1. การเตรียมแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)
2. การเตรียมแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3)
3. การสังเคราะห์ซีโอไลต์ Y
4. การปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของซีโอไลต์ X และ Y
5. การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X
6. การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y
7. การตรวจสอบโลหะออกไซด์ และซีโอไลต์

ตอนที่ 2 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีน

1. ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนด้วยเครื่อง TGA
2. ศึกษาการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 360°C ด้วยเครื่อง GC
3. ศึกษาการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 425°C และ 475°C ด้วยเครื่อง GC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการวิจัย

ตอนที่ 1 การเตรียม และตรวจสอบโลหะออกไซด์ และซีโอไลต์

1. การเตรียมสารแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) [5]

- นำสารแมกนีเซียมออกไซด์ที่ได้มาทำการเผา Calcine ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายในบรรยากาศของอากาศแห้ง (Air zero)
- ทำการลดอุณหภูมิ (Cool down) ทิ้งไว้ให้เย็น

2. การเตรียมสารแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃)

- นำสารแบเรียมออกไซด์ที่ทิ้งไว้ในบรรยากาศมาทำการเผา Calcine ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงภายในบรรยากาศของไนโตรเจน
- ทำการลดอุณหภูมิ (Cool down) ทิ้งไว้ให้เย็น

3. การสังเคราะห์ ซีโอไลต์ Y [6]

- ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 19.830 กรัม มาทำการละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ซึ่งชั่งมา 112.743 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
- ชั่งโซเดียมอะลูมิเนต (Na₂Al₂O₄) 5.868 กรัม ใส่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และทำการปั่นกวนอย่างแรงให้สารละลายละลายจนหมด
- ชั่งสารแขวนลอยซิลิกา (Ludox 40% wt) 90.135 กรัมใส่ในสารละลายแล้วปั่นกวนอย่างแรงจนสารละลายเป็นเจลที่มีสูตรเจลอย่างง่ายดังนี้



- นำเจลที่ได้ใส่ในภาชนะความดันสูง (Autoclave) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 20°C
- นำไปให้ความร้อนในตู้อบที่ 95 °C เป็นเวลา 36 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารสำหรับสังเคราะห์ ซีโอไลต์ Y

สารเคมี	ปริมาณ (กรัม)
โซเดียมอะลูมิเนต	5.868
โซเดียมไฮดรอกไซด์	19.830
สารแขวนลอยซิลิกา	90.135
น้ำปราศจากไอออน	112.743

4. การปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของซีโอไลต์ X และ Y [5]

- นำซีโอไลต์ X หรือ Y ใส่ในคอลัมน์ และทำการเผา Calcine ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ทำการลดอุณหภูมิ (Cool down) ที่ช้าให้เย็น โดยมีก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 60 ml/min ผ่านตลอด
- ซีโอไลต์ที่ได้นิยามว่า ซีโอไลต์ NaX หรือ NaY

5. การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X [2,5]

5.1 การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนของโพแทสเซียม

5.1.1 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 mol / l

- ชั่งสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.8 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ 100 มิลลิลิตร
- ทำการละลายด้วยน้ำกลั่นและถ่ายใส่ในขวดวัดปริมาตร 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

5.1.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนของโพแทสเซียม

- นำซีโอไลต์ X ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนน้ำหนัก 4 กรัม ใส่ในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร
- ทำการแลกเปลี่ยนไอออนโดยการเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 mol / l จำนวน 200 มิลลิลิตร ในขวดก้นกลม
- ต่อชุดรีฟลักซ์และให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และทำการปั่นกววนตลอดเวลาด้วยเครื่องกววนแม่เหล็กไฟฟ้า
- นำไปตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงสุญญากาศ (Centrifuge) จากนั้นนำไปล้างจนได้ pH ประมาณ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำไปกรองตะกอนออก จากนั้นนำไปอบเพื่อไล่น้ำออก
- สารที่ได้นิยามว่า ซีโอไลต์ KX

5.2 การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนของซีเซียม

5.2.1 การเตรียมสารละลายซีเซียมอะซิเตต เข้มข้น 0.1 mol / l

- ชั่งสารซีเซียมอะซิเตต 9.6 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ 100 มิลลิลิตร
- ทำการละลายด้วยน้ำกลั่นและถ่ายใส่ในขวดวัดปริมาตร 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

5.2.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนของซีเซียม

- นำซีโอไลต์ X ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนน้ำหนัก 4 กรัม ใส่ในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร
- ทำการแลกเปลี่ยนไอออนโดยการเติมสารละลายซีเซียมอะซิเตตเข้มข้น 0.1 mol / l จำนวน 200 มิลลิลิตร ในขวดก้นกลม
- ต่อชุดรีฟลักซ์และให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงและทำการปั่นกวนตลอดเวลาด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
- นำไปตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงศูนย์กลาง (Centrifuge) จากนั้นนำไปล้างจนได้ pH ประมาณ 8
- นำไปกรองตะกอนออก จากนั้นนำไปอบเพื่อไล่น้ำออก
- สารที่ได้นิยามว่า ซีโอไลต์ CsX

6. การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y [2,5]

6.1 การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนของโพแทสเซียม

6.1.1 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตเข้มข้น 0.1 mol / l

- ชั่งสารโพแทสเซียมไนเตรต 5.056 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ 100 มิลลิลิตร
- ทำการละลายด้วยน้ำกลั่นและถ่ายใส่ในขวดวัดปริมาตร 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

6.1.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนของโพแทสเซียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำซีโอไลต์ Y ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนน้ำหนัก 4 กรัม ใส่ในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร
- ทำการแลกเปลี่ยนไอออนโดยการเติมสารละลายโพแทสเซียมในเทรตเข้มข้น 0.1 mol / l จำนวน 200 มิลลิลิตร ในขวดก้นกลม
- ต่อชุดรีฟลักซ์และให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงและทำการปั่นจนตลอดเวลาด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
- นำไปตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงสุญญากาศ (Centrifuge) จากนั้นนำไปล้างจนได้ pH ประมาณ 8
- นำไปกรองตะกอนออก จากนั้นนำไปอบเพื่อไล่น้ำออก
- สารที่ได้นิยามว่า ซีโอไลต์ KY

6.2 การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนของซีเซียม

- นำซีโอไลต์ Y ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนน้ำหนัก 4 กรัม ใส่ในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร
- ทำการแลกเปลี่ยนไอออนโดยการเติม สารละลายซีเซียมอะซิเตตเข้มข้น 0.1 mol / l จำนวน 200 มิลลิลิตร ในขวดก้นกลม
- ต่อชุดรีฟลักซ์ และให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงและทำการปั่นจนตลอดเวลาด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
- นำไปตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงสุญญากาศ (Centrifuge) จากนั้นนำไปล้างจนได้ pH ประมาณ 8
- นำไปกรองตะกอนออก จากนั้นนำไปอบเพื่อไล่น้ำออก
- สารที่ได้นิยามว่า ซีโอไลต์ CsY

7. การตรวจสอบสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

7.1 ตรวจสอบลักษณะความเป็นผลึกและรูปพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray powder diffractometer)

- นำตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดที่สังเคราะห์ได้ตกใส่ภาชนะสำหรับทำการทดสอบ
- อัดผงตัวเร่งปฏิกิริยาให้เต็มภาชนะ และเกลี่ยผิวหน้าให้เรียบ
- นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ไปวัดในเครื่อง X-ray diffractometer โดยแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ได้แก่ $\text{CuK}\alpha$
- ทำการตรวจสอบโดยใช้สภาวะดัง ตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

Catalyst	Start (deg)	End (deg)	Step (deg)	Step time (s)	Divergence Slit	Antiscattering slit
BaCO ₃	10	60	0.04	1	1	1
BaO	10	60	0.04	1	1	1
MgO	35	115	0.04	1	1	1
NaX	5	60	0.04	1	0.5	0.5
KX	5	60	0.04	1	0.5	0.5
CsX	5	60	0.04	1	0.5	0.5
NaY	5	60	0.04	1	0.5	0.5
KY	5	60	0.04	1	0.5	0.5
CsY	5	60	0.04	1	0.5	0.5

หมายเหตุ Def. generator 40 kV และ 40 mA

7.2 ตรวจสอบหาปริมาณซิลิกอน และอะลูมิเนียมของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ด้วยเครื่องวัดรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence spectrometer)

- ซึ่งสารที่ต้องการตรวจสอบตามตารางที่ 3.3 ใส่ในภาชนะสำหรับทำการผสมกับกรดบอริก (HBO₃)
- ทำการผสมประมาณ 1 นาทีในเครื่องผสมจากนั้นตักของผสมใส่ในถาดใส่สาร
- นำไปอัดด้วยเครื่องอัดความดันเพื่อทำเป็นสารตัวอย่างสำหรับการตรวจสอบ
- นำสารตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณซิลิกอนและอะลูมิเนียมในตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องวัดรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence spectrometer)

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารสำหรับการตรวจสอบปริมาณโลหะด้วยเครื่องวัดรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์

ชนิด ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณ ตัวเร่งปฏิกิริยา (g)	ปริมาณ กรดบอริก (g)	ปริมาณรวม (g)
NaX	0.2192	4.7835	5.0027
KX	0.2117	4.7834	5.0051
CsX	0.2160	4.7869	5.0029
NaY	0.2268	4.7782	5.0050
KY	0.2174	4.7858	5.0032
CsY	0.2261	4.7762	5.0023

หมายเหตุ สภาวะที่ใช้ได้แก่ Method (St-less-HS-Vac) Type (Bulk) และ Source (Rhodium)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Autosorb

- เปิดถังก๊าซ N_2 และ He แล้วเปิดเครื่อง Autosorb
- เครื่องจะทำการ Check leak โดยปล่อยไว้ประมาณ 5 ชั่วโมงจึงพร้อมใช้งานได้
- ชั่งสารที่จะวิเคราะห์ 0.01 กรัม ใส่ในเซลล์ใส่สาร
- นำเซลล์ใส่ที่ Station 1 หรือ 2 จากนั้นทำการ Outgas ที่อุณหภูมิ $350^\circ C$ โดยใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นก๊าซพา
- หลังจาก Outgas ผ่านแล้วจึงเปลี่ยนช่องเสียบสำหรับการตรวจสอบการดูดซับก๊าซเพื่อหาพื้นที่ผิว ซึ่งคำนวณได้จาก BET-Equation

ตารางที่ 3.4 สภาวะที่ใช้ในการตรวจสอบหาพื้นที่ผิว

Adsorbate gas	N_2
Analysis point selection	BET 11 Point
Batch temperature	77 K
P_0 parameters	760 mmHg

ตอนที่ 2 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีน

2.1 ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนด้วยเครื่อง TGA

- ชั่งยางพอลิไอโซพรีนประมาณ 10 มิลลิกรัม และชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาให้ได้ 20% ของน้ำหนักยาง
- นำยางพอลิไอโซพรีนที่เตรียมได้ใส่ในมิกเกอร์แล้วละลายด้วยโทลูอีน
- เมื่อยางละลายหมดก็ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป จากนั้นทำการระเหยโทลูอีนออก
- ทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นส่งตัวอย่างไปตรวจสอบที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ด้วยเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (TGA) โดยใช้สภาวะตารางที่ 3.5

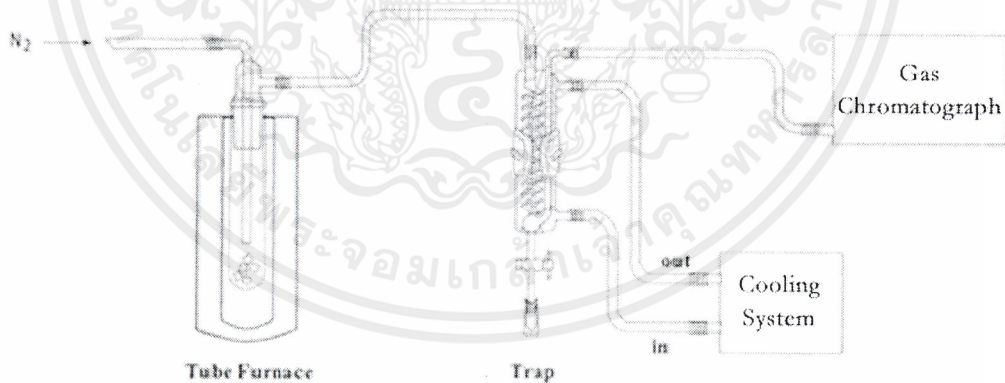
ตารางที่ 3.5 สภาวะในการทดสอบการสลายตัวของความชื้นโดยเครื่อง TGA

ปริมาณพอลิไอโซพรีน	10 mg
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	2 mg
ช่วงอุณหภูมิ	50-800 ^o C
อัตราการให้ความร้อน	20 ^o C/min
ก๊าซพา	N ₂
อัตราการไหลของก๊าซ	10 ml/min

หมายเหตุ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ MgO BaO BaCO₃ NaX KX CsX NaY KY และ CsY

2.2 ศึกษาการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 360^oC ด้วยเครื่อง GC

- ชั่งยางไอโซพรีน 1.0 กรัม ทำการตัดเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งชั่งมา 0.2 กรัม
- นำของผสมใส่ในท่อปฏิกิริยาเคมี (Tube reactor) แล้วต่อชุดทำปฏิกิริยา ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ในการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน

- เปิดถังก๊าซ N₂ เข้าเครื่อง Flow Controller โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซ 50 ml/min
- เปิดถังก๊าซ O₂ และ H₂ เข้าเครื่อง GC เพื่อทำการจุดไฟ เพราะใช้ Detector เป็น FID
- เปิดเครื่อง GC และเครื่อง Control Temperature ของ Tube Furnace
- เปิดเครื่องทำควบคุมความเย็นโดยควบคุมความเย็นที่ 5^oC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตั้งสภาวะในเครื่อง GC เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาตาม ตารางที่ 3.6
- เพิ่มอุณหภูมิให้กับเตาเผาแบบท่อ (Tube furnace) จากเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) โดยใช้สภาวะตาม ตารางที่ 3.7
- ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจากนั้นทำการลดอุณหภูมิ (Cool down)
- เก็บของเหลวที่ได้จาก Trap ในขวดเก็บสาร (Vial) เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป
- นำท่อปฏิกรณ์ (Tube reactor) ออกมาทำการละลายสารที่เหลือด้วย Petroleum Ether จากนั้นเทลงในกระดาษกรอง เพื่อแยก Coke กับ Wax ที่เกิดขึ้น
- ชั่งน้ำหนักของสารที่เกิดขึ้นทั้งหมด
- วิเคราะห์หาปริมาณผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเพื่อนำไปเปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด

ตารางที่ 3.6 สภาวะของเครื่อง GC เพื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของ
ความร้อนของพอลิไอโซพรีน

Column	Pressure (psi)			Column Oven					FID detector (°C)
	N ₂	O ₂	H ₂	Step	Temp (°C)	Rate (°C/min)	Hold (min)	Total (min)	
HP-Plot Length 30 m ID 0.53 mm	10	26	6	1	120	-	1	1	250
2				120-180	5	-	12		
3				180	-	7	7		

ตารางที่ 3.7 สภาวะของเครื่อง Temperature Controller เพื่อศึกษาการสลายตัวของ
พอลิไอโซพรีน

	Step 1	Step 2
Temp (°C)	80	360
Heating rate (°C/min)	5	Off
Holding time (min)	30	180
Carrier gas	N ₂	N ₂
Flow gas (ml/min)	50	50

หมายเหตุ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ MgO BaO BaCO₃ NaX KX CsX NaY KY และ CsY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ศึกษาการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 425°C และ 475°C ด้วยเครื่อง GC

- ชั่งยางไอโซพรีน 1.0 กรัม ทำการตัดเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งชั่งมา 0.2 กรัม
- ทำปฏิกิริยาการสลายตัวตามสภาวะดังตารางที่ 3.6 และ 3.7 โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 425°C และ 475°C ตามลำดับ
- ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาทำปฏิกิริยาการสลายตัวได้แก่ MgO BaCO₃ CsX และ CsY



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

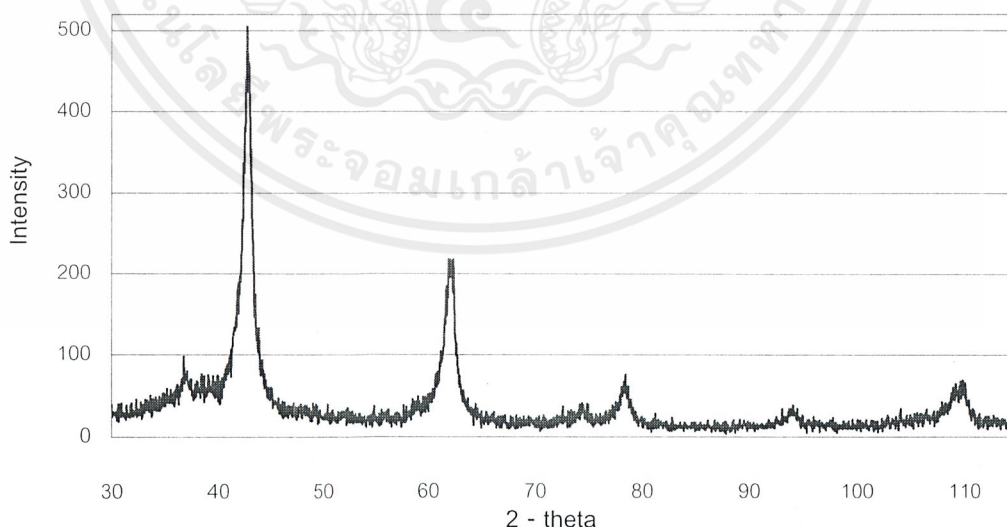
4.1 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ

การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสทำได้โดย เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray powder diffraction ; XRD) ด้วยเครื่อง Bruker AXS X-ray Powder Diffractometer โดยใช้แหล่งของรังสีเอ็กซ์ (X-ray) คือ $\text{CuK}\alpha$ การวิเคราะห์ปริมาณธาตุชนิดต่างๆ ในตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRF) และการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับของแข็ง (Autosorb) อาศัยความสามารถในการดูดซับก๊าซ โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน ค่าที่วัดได้คือค่าไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ซึ่งสามารถใช้สมการ BET ในการประเมินค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของของแข็งได้

จากการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

4.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

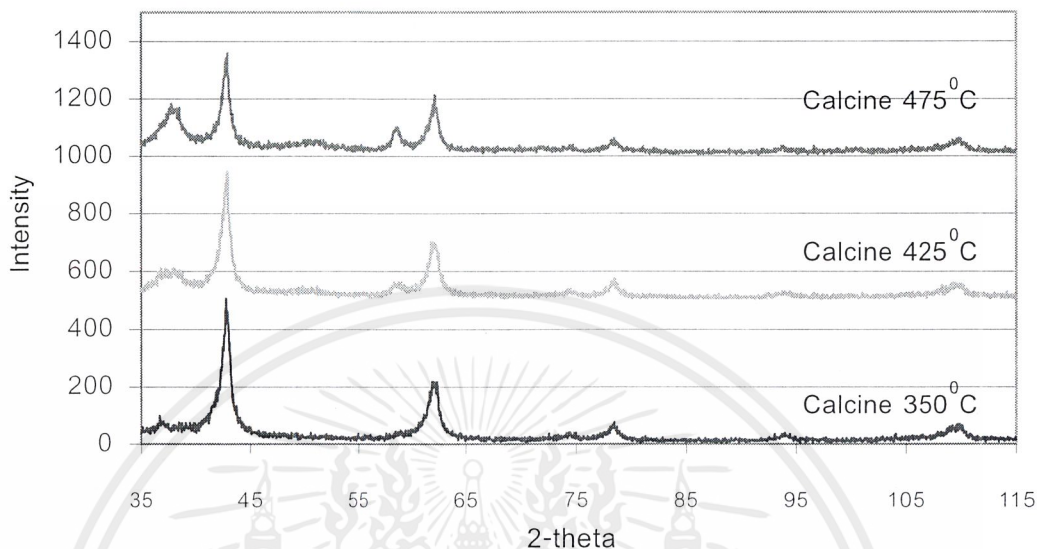
แมกนีเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นของแข็งที่เป็นผลึกเพราะ เมื่อทำการทดสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และเทียบกับพีคมาตรฐาน (ภาคผนวกที่ จ.1) พบว่าตำแหน่งพีคที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยมีตำแหน่ง 2-theta ขึ้นที่ 37.056° 43.049° 62.346° 74.339° 78.672° 94.048° และ 109.944° ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

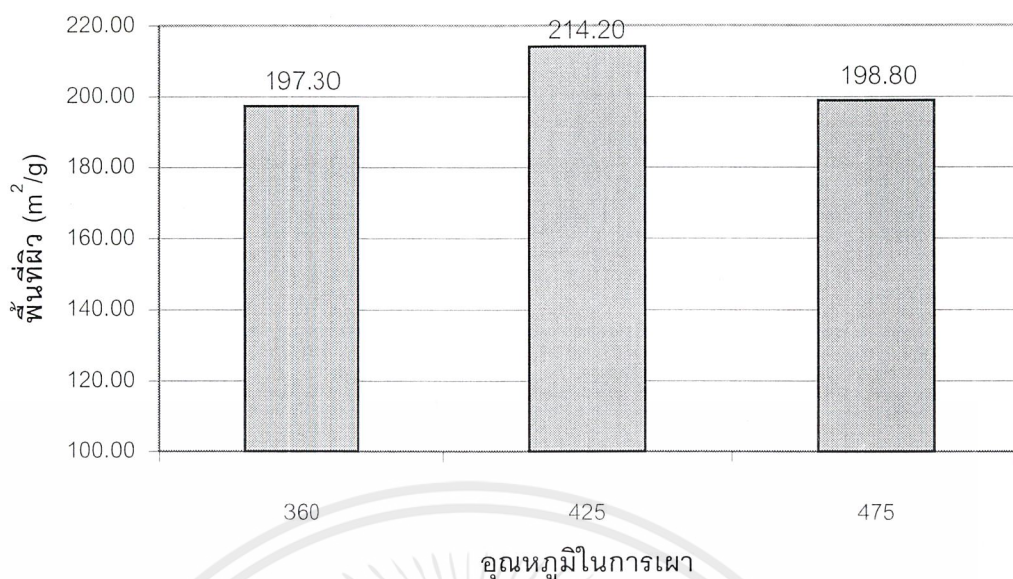
เมื่อนำแมกนีเซียมออกไซด์ไปทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Calcination) ที่อุณหภูมิ 425^oC และ 475^oC จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วย เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ที่ปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิ 350^oC 425^oC และ 475^oC

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิ 425^oC จะมีพีคที่เกิดขึ้นใหม่เมื่อเทียบกับที่ 350^oC เนื่องจากความร้อนที่สูงขึ้นทำให้โครงสร้างของแมกนีเซียมออกไซด์มีการจัดเรียงตัวใหม่โดยมีขนาดผลึกใหญ่มากขึ้น แต่จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะพบว่าการจัดเรียงตัวที่อุณหภูมิ 425^oC ยังไม่สมบูรณ์ทำให้มีลักษณะคล้ายรอยตำหนิ นอกจากนี้ยังมีการกำจัดหมู่ฟังก์ชันที่ปนเปื้อนอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนเป็น 475^oC พบว่า พีคที่เกิดขึ้นใหม่มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น แสดงให้เห็นว่าการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นด้วย

พื้นที่ผิวของแมกนีเซียมออกไซด์ที่ปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิ 360^oC 425^oC และ 475^oC ด้วยเครื่อง Autosorb แสดงได้ดังรูปที่ 4.3

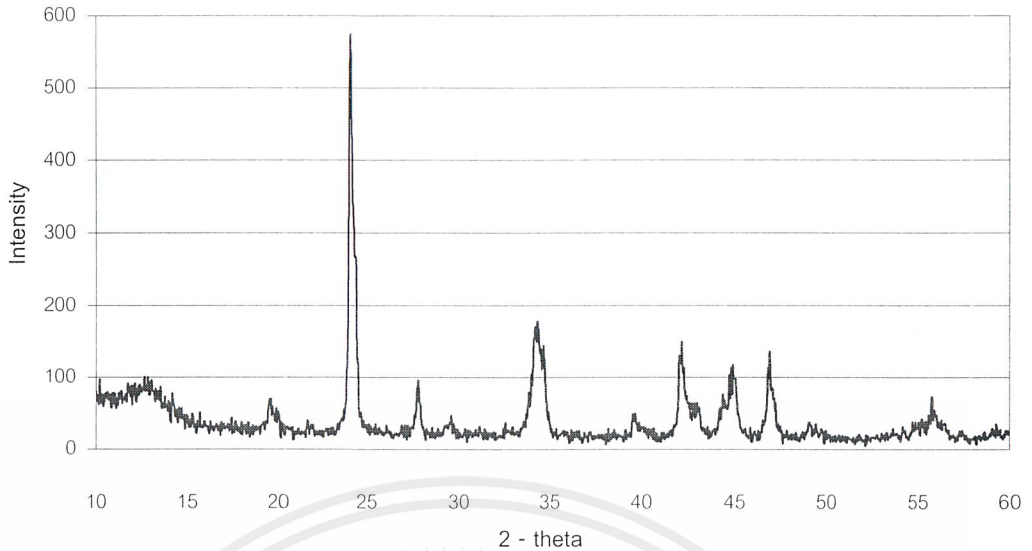


รูปที่ 4.3 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ในการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิ 425°C จะมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิ 360°C เนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ที่ยังไม่สมบูรณ์ ทำให้ผลึกมีลักษณะคล้ายรอยตำหนิ และการกำจัดหมู่ฟังก์ชันที่เป็นป้อนพื้นผิวของแมกนีเซียมออกไซด์ ทำให้พื้นที่ผิวของแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่ 425°C มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่ 360°C ขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนเป็น 475°C ผลึกที่เกิดขึ้นใหม่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิ 475°C มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวของแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิ 425°C

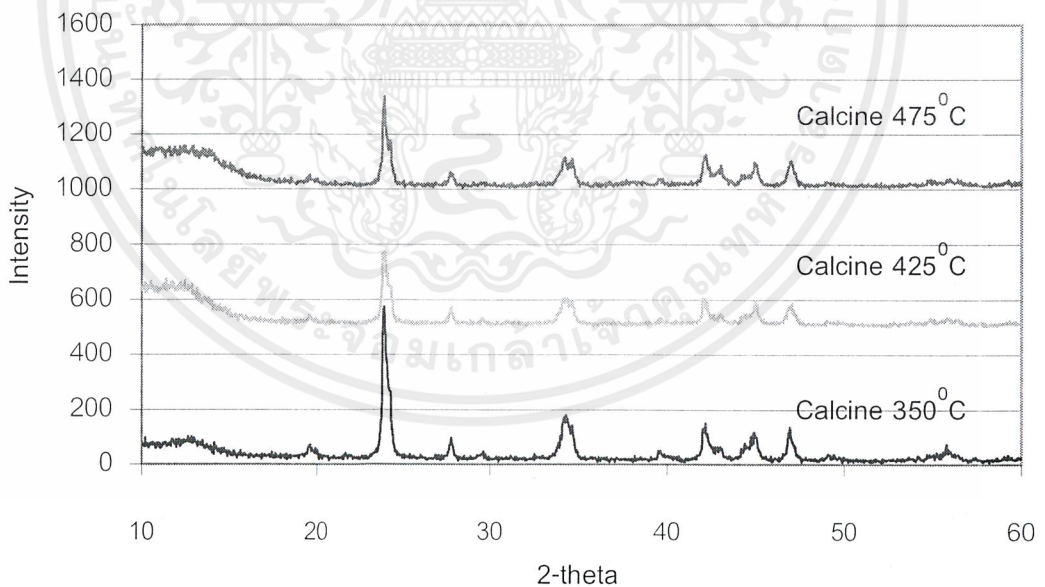
4.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃)

จากการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแบเรียมคาร์บอเนตเมื่อเทียบกับฟีกมาตรฐาน (ภาคผนวกที่ ๑.3) พบว่ามีลักษณะเป็นยอดแหลมขึ้นใกล้เคียงกันที่ตำแหน่ง 24.100° 27.806° 34.399° 39.623° 42.220° 44.837° 46.973° และ 55.780° แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3)

เมื่อนำแบเรียมคาร์บอเนตไปทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน ที่อุณหภูมิ 425°C และ 475°C แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.5



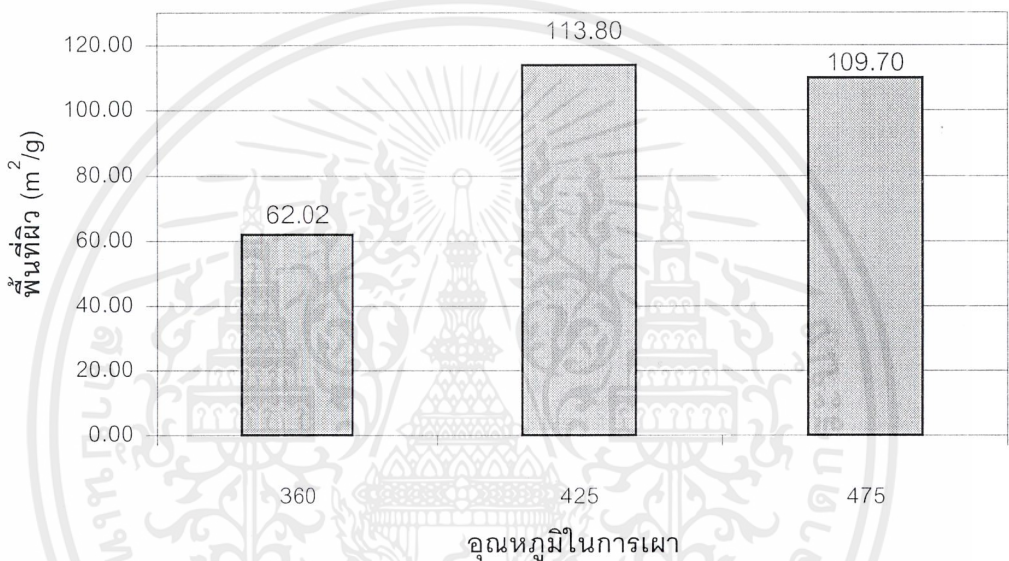
รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนตที่ปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิ 350°C 425°C และ 475°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นว่าลักษณะของพีคมีการแยกที่ชัดเจนขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นแบเรียมคาร์บอเนตมีการจัดเรียงตัวใหม่ของผลึกซึ่งทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น

ช่วงตำแหน่ง 2-theta ที่ต่ำกว่า 20° จะเห็นว่า หลังจากการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงมีความเข้มของ base line มากขึ้น เป็นผลจากการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์บริเวณระหว่างชั้น (Layer) ในโครงผลึกของแบเรียมคาร์บอเนต

สำหรับการพิจารณาพื้นที่ผิวของแบเรียมคาร์บอเนตที่ปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิ 360°C 425°C และ 475°C ด้วยเครื่อง Autosorb แสดงดังรูปที่ 4.6

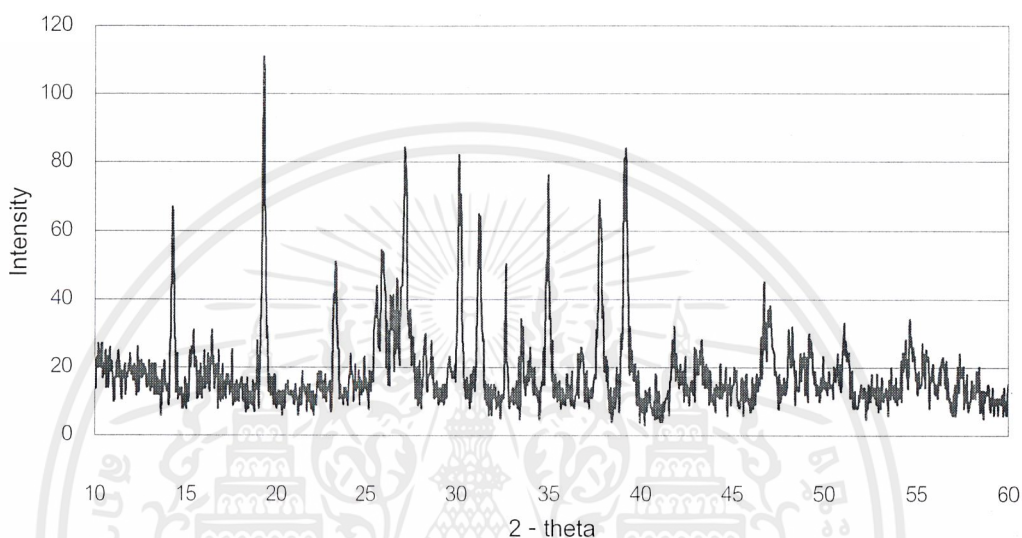


รูปที่ 4.6 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนตในการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า เมื่อให้ความร้อนในการเผาที่อุณหภูมิ 425°C พบว่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจากเดิม เนื่องจากการกำจัดหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่อยู่บริเวณพื้นผิวของแบเรียมคาร์บอเนต และมีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ให้มีผลึกขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีลักษณะเหมือนรอยดำหนิ จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ส่วนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการปรับปรุงทางความร้อนเป็น 475°C พบว่าพื้นที่ผิวลดลงเมื่อเทียบกับการปรับปรุงทางความร้อนที่ 425°C เนื่องจากการจัดเรียงโครงผลึกขนาดใหญ่ของแบเรียมคาร์บอเนตมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ดังนั้นพื้นที่ผิวของแบเรียมคาร์บอเนตเมื่อผ่านการปรับปรุงทางความร้อนที่ 475°C จึงลดลงเมื่อเทียบกับการปรับปรุงความร้อนที่ 425°C ซึ่งสอดคล้องกับผลของ XRD (รูปที่ 4.5)

4.1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ (BaO)

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองนี้ได้สั่งซื้อจากบริษัท Riedel deHaen เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าพีคที่เกิดขึ้นไม่ตรงกับพีคมาตรฐานที่ได้จากเครื่อง XRD ดังรูปที่ 4.7

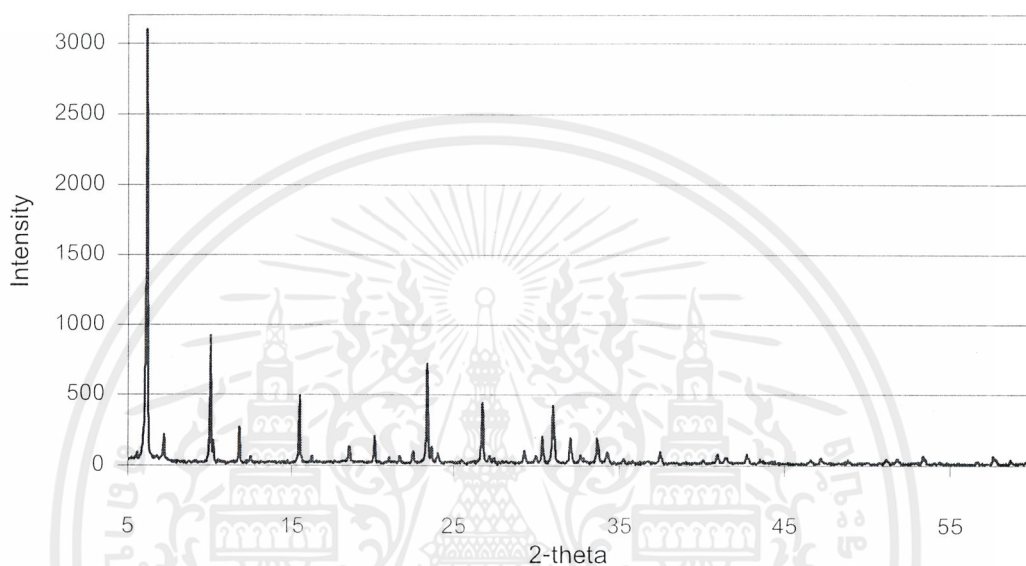


รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ (BaO)

จากรูปจะเห็นได้ว่าพีคที่เกิดขึ้นมีความสูงน้อยมาก แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ที่นำมาวิเคราะห์มีความเป็นผลึกต่ำ และอาจมีการเจือปนของสารอื่นๆ เช่น แบเรียมเปอร์ออกไซด์ โดยสารที่เจือปนนี้จะเป็นส่วนที่ไม่เป็นผลึก ซึ่งจะทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีเอกซ์ โดยสังเกตได้จาก Base line ของพิกัดรูปที่ 4.7 และสารเจือปนเหล่านี้มักจะเป็นสารที่ไม่แสดงความเป็นเบส จึงทำให้ ณ บริเวณที่มีการเจือปนของสารเหล่านี้มีความเป็นเบสลดลงไป

4.1.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X (NaX)

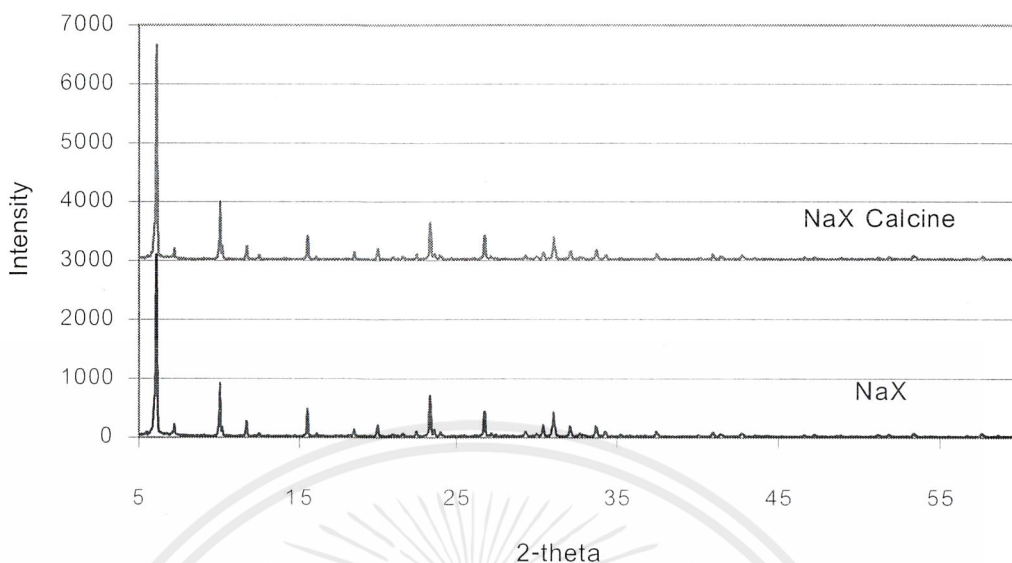
จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X พีคที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นยอดแหลมซึ่งเป็นลักษณะของสารที่เป็นผลึก เมื่อเทียบกับพีคมาตรฐาน (ภาคผนวกที่ ๑.4) พบว่ามีตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยตำแหน่งพีคขึ้นที่ 6.16° 10.10° 23.40° 26.80° และ 31.10° ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X (NaX) ก่อนทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Calcination)

จากรูปพบว่าซีโอไลต์ X มีตำแหน่งพีคขึ้นที่ 6.16° แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์ X เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Large pore) ซึ่งเรียกว่า "Super cage" โดยมีขนาด 12 T อะตอม

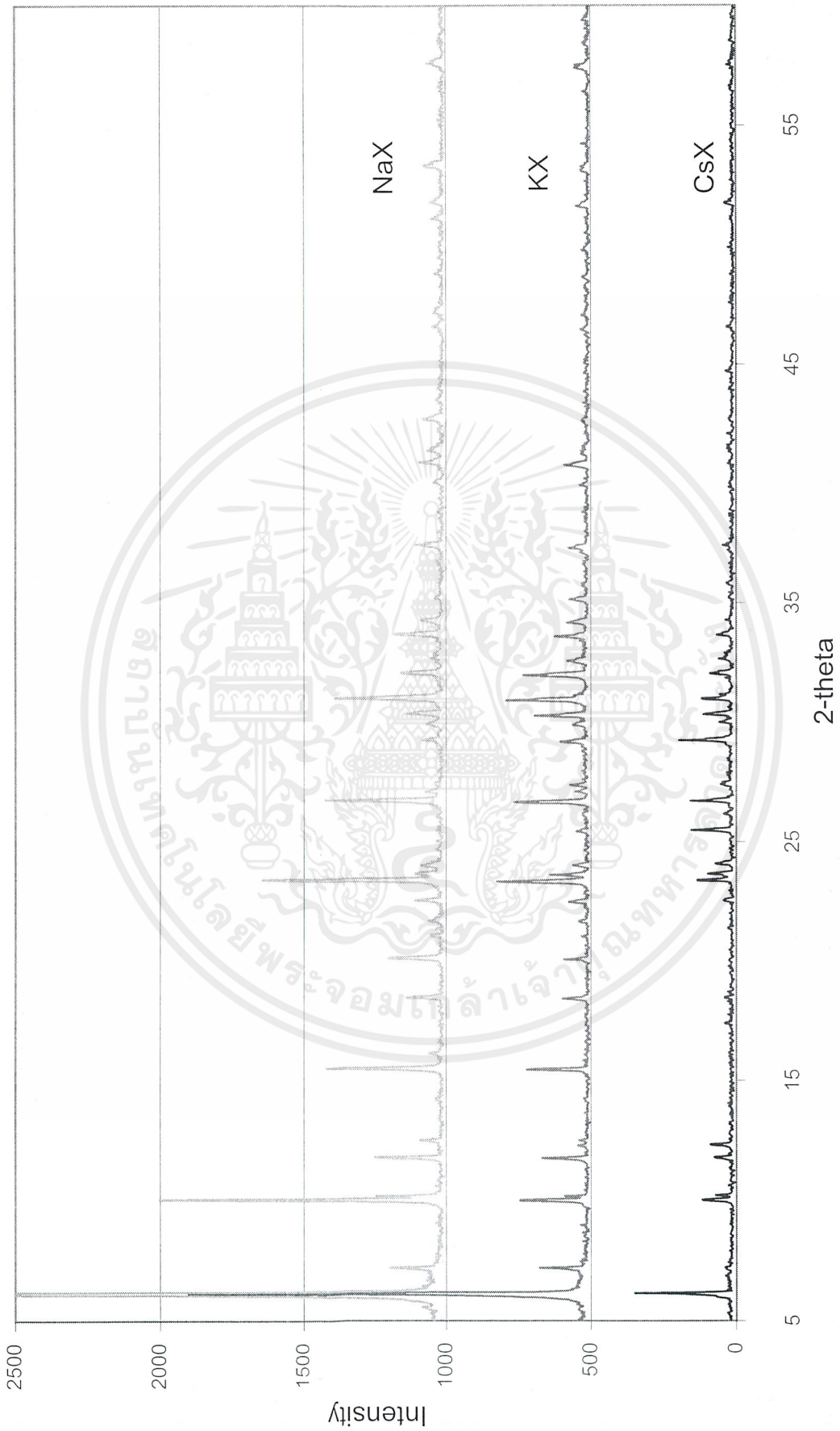
เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ไปทำการปรับปรุงทางความร้อน (Calcination) แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของซีโอไลต์ X ก่อนการปรับปรุงทางความร้อนได้ผลแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ก่อน และหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Calcination)

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าตำแหน่งพีกช่วง 2-theta ต่ำกว่า 15° ของซีโอไลต์ X ที่มีการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนจะมี Relative Intensity ของพีกมากกว่าซีโอไลต์ X ก่อนการทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนจะทำให้ซีโอไลต์ X มีความเป็นผลึกมากขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงตำแหน่ง 2-theta จากรูปที่ 4.9 พบว่ามีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แสดงให้เห็นว่าไม่มีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่เกิดขึ้น

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนไปทำการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส โดยการแลกเปลี่ยนกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และซีเอ็มไอออน แล้วทำการเปรียบเทียบผลจากวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเครื่อง XRD ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงทางความร้อน และปรับปรุงความเป็นเบส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะพบว่าพีคที่ตำแหน่ง 2-theta ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ทั้งก่อน และหลังการปรับปรุงความเป็นเบสนั้นมีตำแหน่งพีคที่เกิดขึ้นไม่เปลี่ยนไปจากเดิม แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X เมื่อผ่านการปรับปรุงความเป็นเบสจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยการแลกเปลี่ยนไอออนกับโพแทสเซียมและซีเซียมแล้ว พบว่าลักษณะของพีคที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มของพีคลดลงตามขนาดของแคทไอออน เนื่องจากโพแทสเซียมไอออนและซีเซียมไอออนมีขนาดไอออนใหญ่กว่าโซเดียมไอออนที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ก่อนทำการปรับปรุงความเป็นเบส ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก (d-spacing) ลดลง เป็นผลให้โครงสร้างซีโอไลต์ X หลังการแลกเปลี่ยนไอออนมีความเข้มของพีคลดลง และมี d-spacing บางส่วนเปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับโครงสร้างซีโอไลต์ X ก่อนทำการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ความเข้มของพีคในแต่ละมุม 2-theta นั้นมีความเข้มที่ลดลงดังรูปที่ 4.10

จากการวิเคราะห์ผลการหาปริมาณโลหะของซีโอไลต์ X ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสจากเครื่อง XRF ซึ่งสามารถนำมาประมวลหาค่าประมาณของ Unit Cell Composition และค่าเปอร์เซ็นต์การแลกเปลี่ยนไอออนได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซนต์การแลกเปลี่ยนไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ก่อน และหลังการปรับปรุงความเป็นเบส

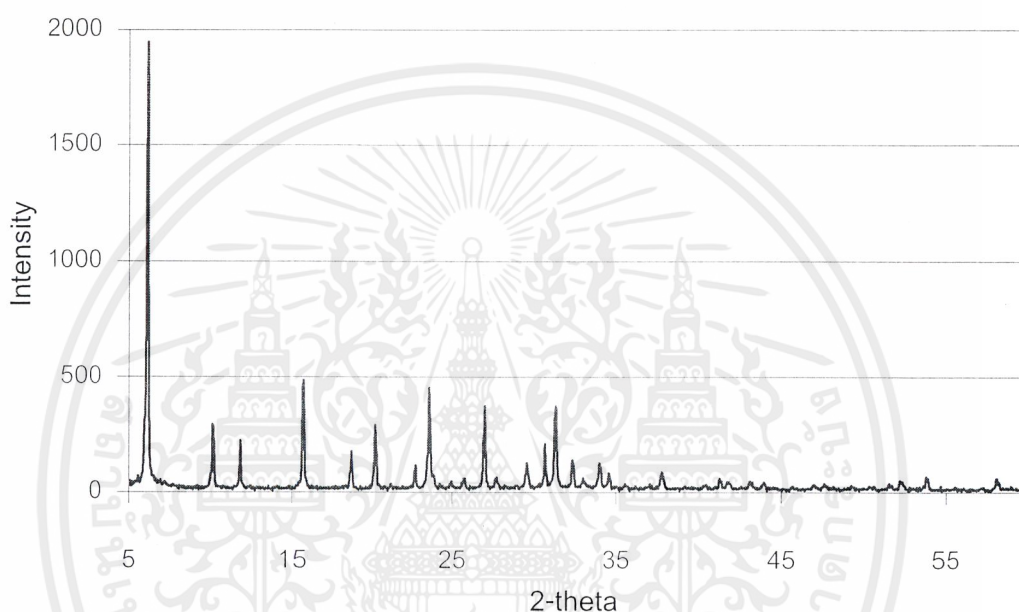
Zeolite X	Unit cell	Si / Al	Ion exchange (%)
NaX	$\text{Na}_{91}[\text{Al}_{91}\text{Si}_{101}\text{O}_{384}]$	1.1	-
KX	$\text{K}_{50}\text{Na}_{40}[\text{Al}_{90}\text{Si}_{102}\text{O}_{384}]$	1.1	56
CsX	$\text{Cs}_{48}\text{Na}_{42}[\text{Al}_{90}\text{Si}_{102}\text{O}_{384}]$	1.1	53

หมายเหตุ การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การแลกเปลี่ยนไอออนแสดงในภาคผนวก ข

จากตารางพบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนของโพแทสเซียมและซีเซียมไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X นั้นไม่ได้เกิดอย่างสมบูรณ์ โดยการแลกเปลี่ยนไอออนกับโพแทสเซียมไอออนจะมีเปอร์เซ็นต์การแลกเปลี่ยนมากกว่าซีเซียมไอออน เนื่องจากโพแทสเซียมไอออนมีขนาดไอออนที่เล็กกว่าซีเซียมไอออน และมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของซีโอไลต์ X ด้วย จึงมีโอกาสที่จะทำการแลกเปลี่ยนกับโซเดียมไอออนได้มากกว่าการแลกเปลี่ยนกับซีเซียมไอออน

4.1.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y (NaY)

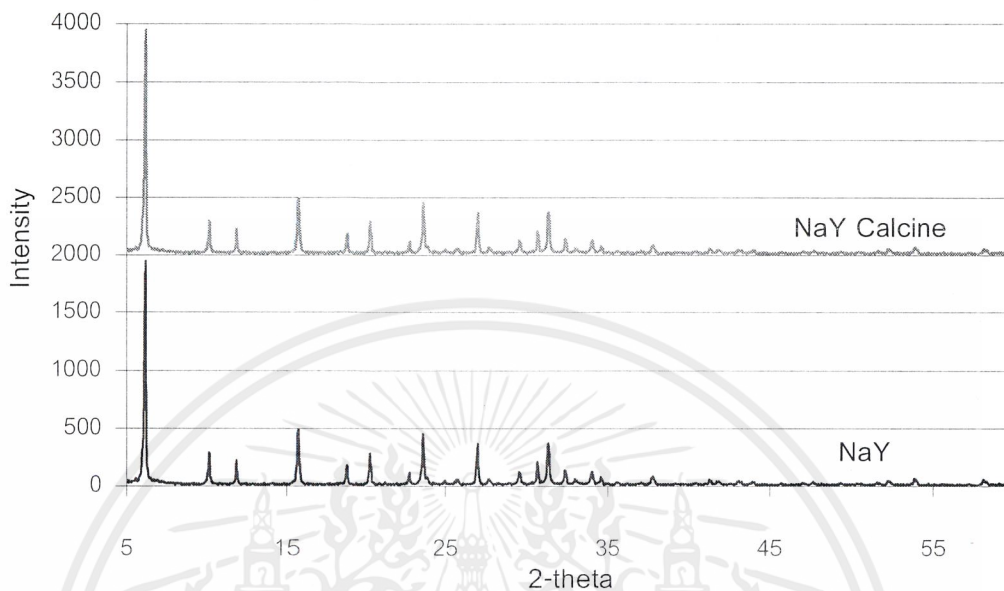
จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y พิกที่ เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นยอดแหลมซึ่งเป็นลักษณะของสารที่เป็นผลึกเมื่อเทียบกับพิกมาตรฐาน (ในภาคผนวก จ.7) แล้วพบว่าตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยตำแหน่งพิกที่ 6.200° 10.036° 11.805° 15.572° 20.125° 23.386° 30.413° 31.087° 32.099° 37.440° และ 40.925° ได้ผล แสดงดังรูป ที่ 4.11



รูปที่ 4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y (NaY) ก่อนทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Calcination)

จากรูปจะเห็นว่า มีลักษณะพิก และตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X และ Y มีโครงสร้างแบบเดียวกัน คือเป็นโครงสร้างของ Faujasite แต่ซีโอไลต์ X และ Y จะมีค่าอัตราส่วนของ Si/Al ที่ไม่เท่ากันโดยที่ซีโอไลต์ X จะมี Si/Al เท่ากับ 1 ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าซีโอไลต์ Y ที่มีค่าเท่ากับ 3

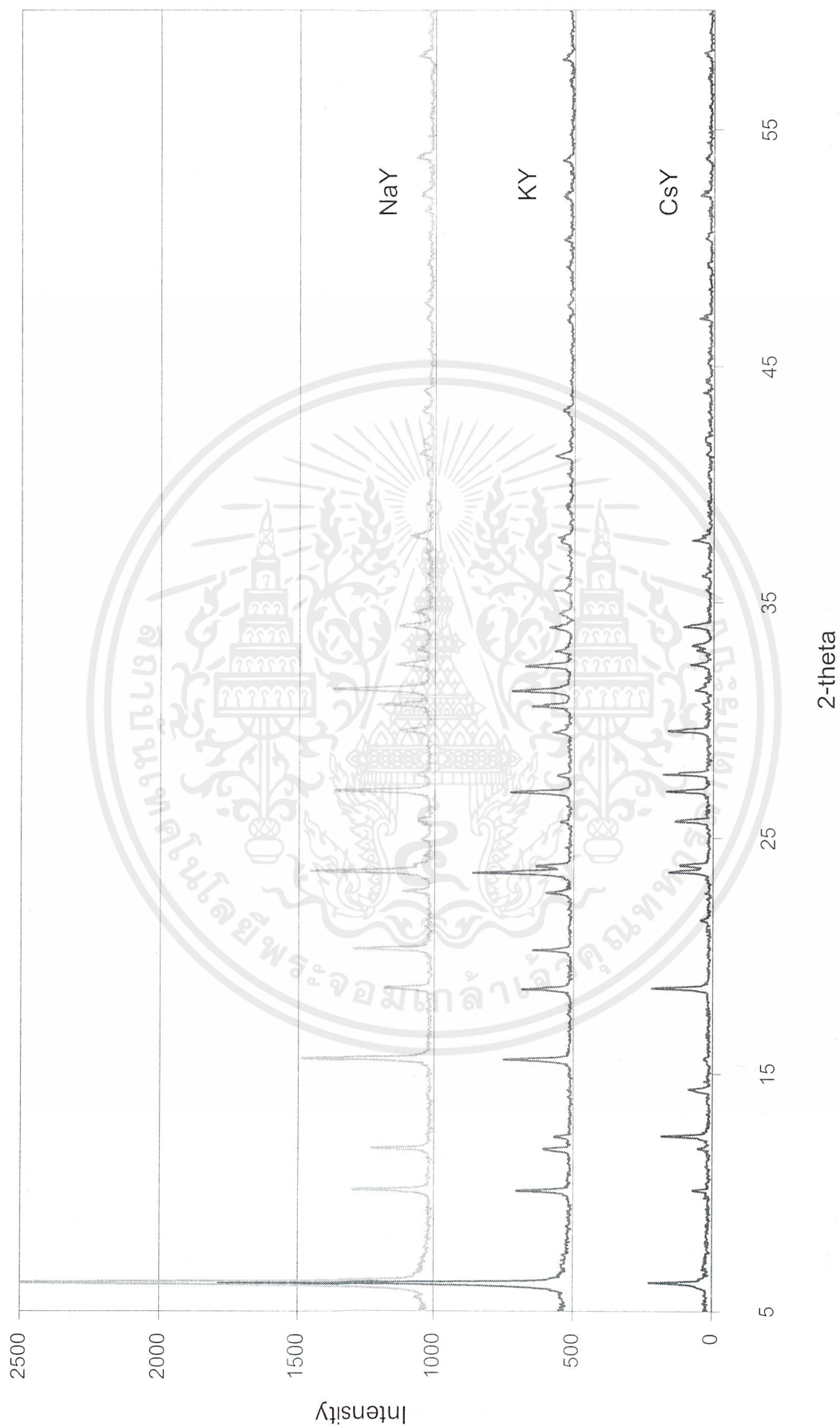
เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ไปทำการปรับปรุงทางความร้อน (Calcination) ที่อุณหภูมิ 500°C แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของซีโอไลต์ Y ก่อนการปรับปรุงทางความร้อนได้ผลแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ก่อน และหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Calcination)

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าตำแหน่งพีกของซีโอไลต์ Y ที่มีการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน จะมีตำแหน่ง และปริมาณของพีกไม่แตกต่างจากพีกของซีโอไลต์ Y ก่อนการทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์ Y ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนไม่มีผลทำให้ความเป็นผลึก และลักษณะโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนไปทำการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยการแลกเปลี่ยนกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และซีโอไลต์ไฮดรอกไซด์แล้วทำการเปรียบเทียบผลจากวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากเครื่อง XRD ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ปรับปรุงทางความร้อน และปรับปรุงความเป็นเบส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y มีลักษณะโครงสร้างที่เหมือนกับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ดังนั้นเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสแล้วจึงมีอิทธิพลของแคทไอออนที่แลกเปลี่ยนไอออนกับไฮโดรเจนไอออนเช่นเดียวกันในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ซึ่งทำให้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดจึงมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์ผลการหาปริมาณโลหะของซีโอไลต์ Y ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสจากเครื่อง XRF ซึ่งสามารถนำมาประมวลหาค่าประมาณของ Unit Cell Composition และค่าเปอร์เซ็นต์การแลกเปลี่ยนไอออนได้ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซนต์การแลกเปลี่ยนไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ก่อน และหลังการปรับปรุงความเป็นเบส (ในภาคผนวก ข)

Zeolite Y	Unit cell	Si / Al	Ion exchange (%)
NaY	$\text{Na}_{59}[\text{Al}_{59}\text{Si}_{133}\text{O}_{384}]$	2.3	-
KY	$\text{K}_{41}\text{Na}_{21}[\text{Al}_{62}\text{Si}_{130}\text{O}_{384}]$	2.1	66
CsY	$\text{Cs}_{33}\text{Na}_{28}[\text{Al}_{61}\text{Si}_{131}\text{O}_{384}]$	2.1	54

จากตารางพบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนของโพแทสเซียม และซีเซียมไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y นั้นไม่ได้เกิดอย่างสมบูรณ์เช่นเดียวกับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X แต่เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การแลกเปลี่ยนไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด (ในตารางที่ 4.1 และ 4.2) พบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y จะมีเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่าในซีโอไลต์ X เนื่องจากอิทธิพลของค่า Si/Al ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y มีค่าสูงกว่า จึงมีปริมาณอะลูมิเนียมใน Framework น้อยกว่าในซีโอไลต์ X ซึ่งจะทำให้บริเวณที่จะมีการแลกเปลี่ยนไอออนภายในรูพรุนหนึ่งๆ นั้นมีน้อยกว่าในซีโอไลต์ X เพราะฉะนั้นโอกาสในการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ Y จึงมีมากกว่าดังตารางที่ 4.2

เมื่อพิจารณาความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X และ Y นั้นจะพิจารณาจากค่าของ Sanderson's Electronegativity และ Oxygen Charge ซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลของการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะของซีโอไลต์จากเครื่อง XRF (การคำนวณดูได้จากภาคผนวก ข) ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่า Sanderson's Electronegativity และ Oxygen Charge ที่แสดงความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์แต่ละชนิด [7,8]

Zeolite	Sanderson's Electronegativity	Oxygen Charge
NaX	3.25	-0.41
KX	3.11	-0.44
CsX	3.04	-0.46
NaY	3.52	-0.36
KY	3.38	-0.38
CsY	3.34	-0.39

จากตารางค่าของ Sanderson's Electronegativity (S_{int}) เป็นค่า Electronegativity (EN) เฉลี่ยโดยรวมของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด ซึ่งจะบ่งบอกถึงความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น

ส่วนค่าของ Oxygen Charge จะเป็นค่าที่บอกปริมาณประจุลบบน Framework ของซีโอไลต์ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า Sanderson's Electronegativity ดังตารางที่ 4.3

จากตารางที่ 4.3 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ทั้งก่อน และหลังการปรับปรุงความเป็นเบสจะมีค่า S_{int} ต่ำกว่าในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ทั้งก่อน และหลังการปรับปรุงความเป็นเบส เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X มีปริมาณอะลูมิเนียมภายใน Framework มีมากกว่าซีโอไลต์ Y ทำให้ปริมาณประจุลบบน Framework ในซีโอไลต์ X มีมากจึงมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนภายใน Framework ได้มากส่งผลให้ EN โดยรวมของซีโอไลต์ X มีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ก่อน และหลังการปรับปรุงความเป็นเบส พบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนกับซีเทียมไอออนจะมีความเป็นเบสมากที่สุดทั้งในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X และ Y เนื่องจากซีเทียมไอออนเป็นแคทไอออนขนาดใหญ่ ซึ่งมีพลังงานไอออนไนเซชัน (IE) ต่ำ ทำให้สามารถให้อิเล็กตรอนได้มากกว่าโพแทสเซียมไอออน และโซเดียมไอออน

4.2 การศึกษาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาศาสตร์การสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนที่ไม่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาและที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยผ่านกระบวนการแบบกะ (Batch operation) ที่อุณหภูมิ 360°C 425°C และ 475°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน (N_2) โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน (Polyisoprene) ดังนี้

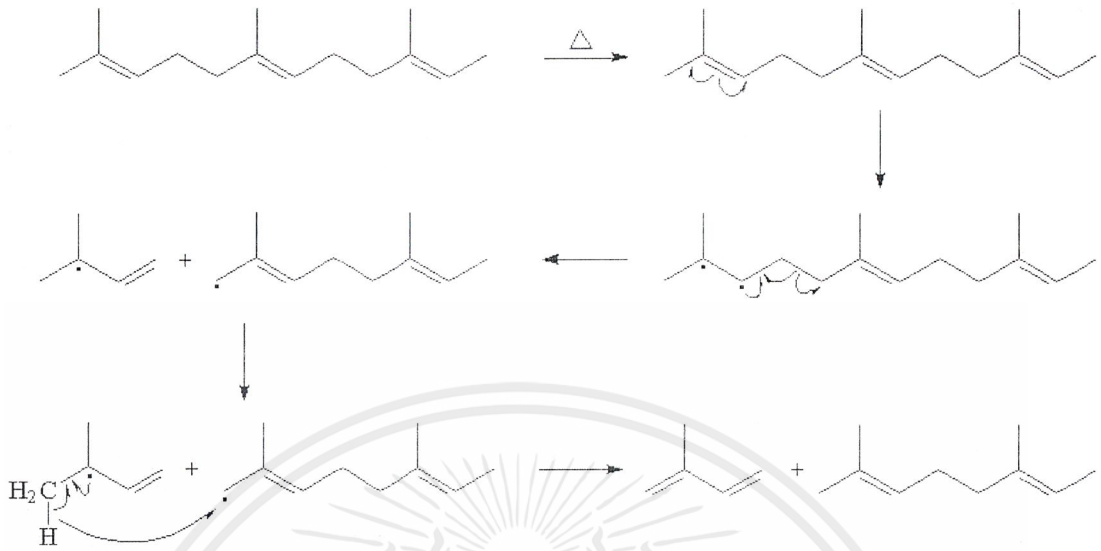
4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน

จากการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อน (Thermal cracking) ของพอลิไอโซพรีนสามารถแสดงดังรูป 4.14



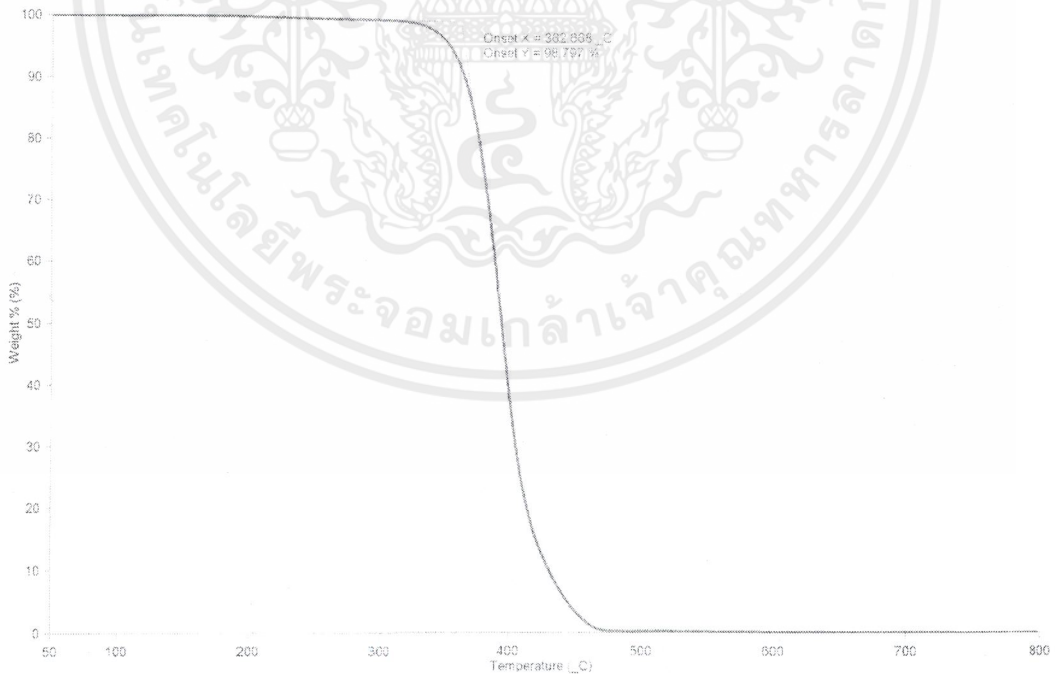
รูปที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อน (Thermal cracking) ของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวเพิ่มมากขึ้น ส่วนสารประกอบแว็กซ์ และกากคาร์บอน มีปริมาณลดลงเพราะความร้อนทำให้ปฏิกิริยาการสลายตัวผ่านอนุมูลอิสระเกิดอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากปฏิกิริยาการสลายตัวเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ดังนั้นเมื่อเพิ่มความร้อนจะมีผลให้การสลายตัวเกิดได้ดียิ่งขึ้นดังรูปที่ 4.14 พบว่าพอลิไอโซพรีนสลายตัวให้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของก๊าซ และของเหลวสูงสุดที่อุณหภูมิ 475°C กลไกการสลายตัวผ่านอนุมูลอิสระแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กลไกการเกิดปฏิกิริยาสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนผ่านอนุมูลอิสระ

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการสลายตัวทางความร้อนของไอโซพรีนสามารถวิเคราะห์โดยเทคนิค TGA ดังรูปที่ 4.16



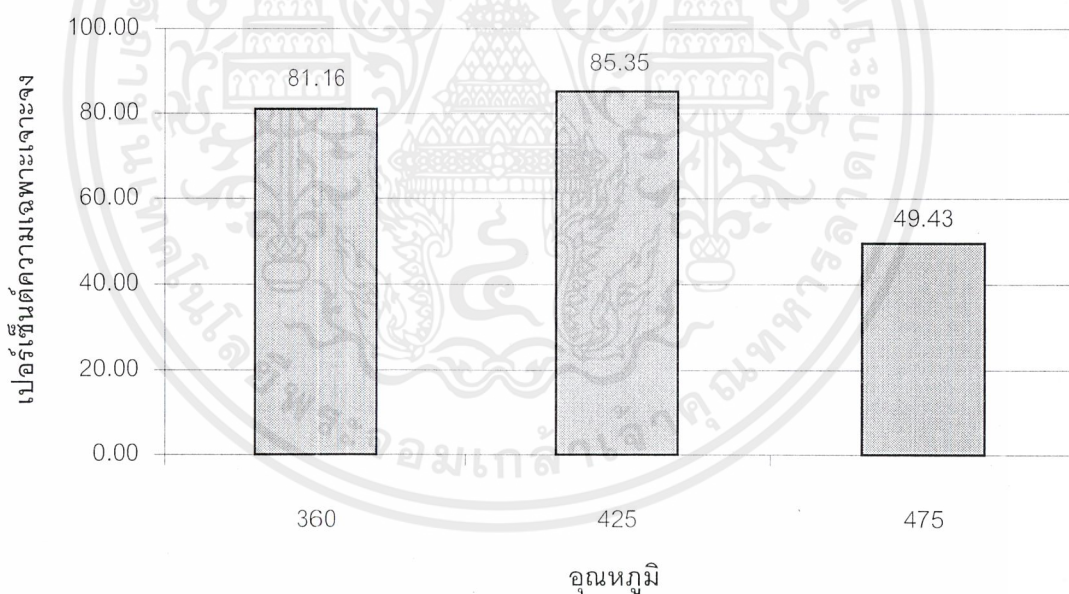
รูปที่ 4.16 เทอร์โมแกรมของพอลิไอโซพรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเทอร์โมแกรมรูปที่ 4.16 จะให้เห็นว่า อุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวคือ 360°C เป็นผลให้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของก๊าซและของเหลวจากการสลายตัวที่อุณหภูมิ 360°C มีค่าต่ำที่สุด และสลายตัวสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 475°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ได้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของก๊าซ และของเหลวสูงที่สุดด้วย (รูปที่

เมื่อพิจารณาเทอร์โมแกรมรูปที่ 4.16 จะเห็นว่า พอลิไอโซพรีนสามารถสลายตัวได้หมดโดยไม่เหลือกากคาร์บอนอยู่เลย แต่จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 475°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการสลายตัวยังคงเหลือกากคาร์บอน สันนิษฐานได้ว่ากากคาร์บอนเกิดจากการเสียสภาพของพอลิไอโซพรีนโดยเกิด Crosslinking ระหว่างสายโซ่พอลิไอโซพรีนได้กากคาร์บอน

สำหรับความสามารถในการผลิตไอโซพรีนพบว่าเปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิ 425°C แต่ลดลงที่อุณหภูมิ 475°C ดังรูปที่ 4.17

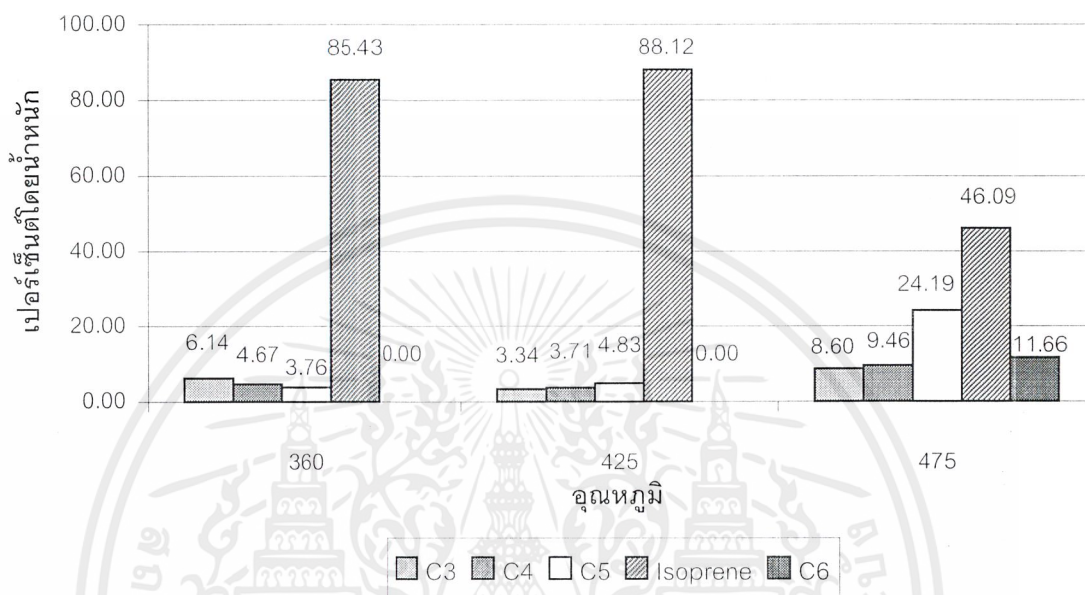


รูปที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อน (Thermal cracking) ของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนดังรูปที่ 4.17 พบว่าความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนที่ได้จากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 425°C มีค่ามากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 475°C กลับมีผลให้เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่ำลงเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 425°C เนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงทำให้การสลายตัวเกิดได้ดีเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลต่ำเช่น ก๊าซหุงต้ม (LPG) และของเหลวจำนวนมากดังรูป 4.18



รูปที่ 4.18 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักก๊าซที่ได้จากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ อุณหภูมิ 425°C เป็นอุณหภูมิที่การสลายตัวทางความร้อนที่ให้ เปอร์เซนต์ก๊าซ และของเหลว และค่าความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนสูงที่สุด

จากโครงการพิเศษเรื่องการสลายตัวของพอลิไสไตรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส [5] พบว่าการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติเป็นเบสลงในปฏิกิริยาการสลายตัว จะให้เปอร์เซนต์ความเฉพาะเจาะจงสูงขึ้น ในการทดลองนี้จึงเลือกตัวเร่งที่มีสมบัติเป็นเบส 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทโลหะออกไซด์และซีโอไลต์ เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ประเภท ผสมลงในพอลิไอโซพรีน แล้วนำไปวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (TGA) ได้ผลดังตาราง 4.4

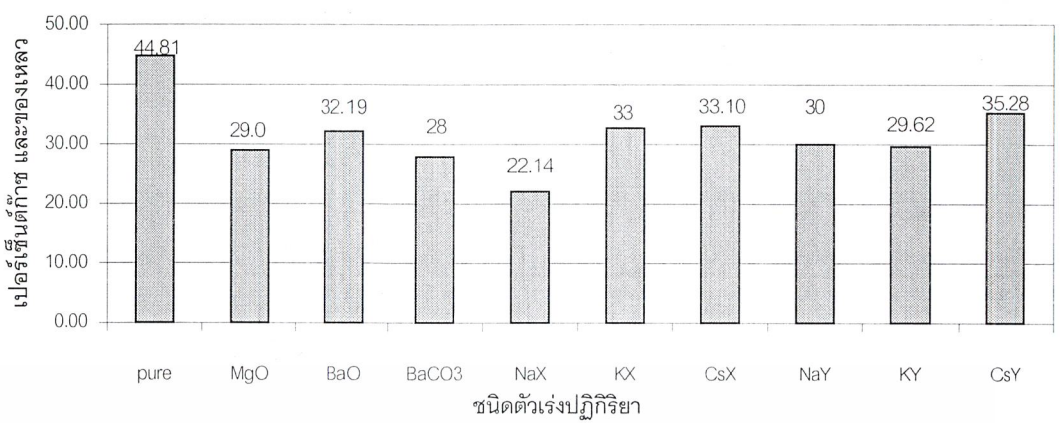
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิที่การสลายพอลิไอโซพรีนสมบูรณ์ที่สภาวะต่างๆ

โดยเทคนิค TGA

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิสลายตัวสมบูรณ์($^{\circ}\text{C}$)
-	363	475
MgO	360	475
BaCO ₃	357	475
BaO	353	470
NaX	360	475
KX	360	475
CsX	362	460
NaY	364	460
KY	353	460
CsY	339	460

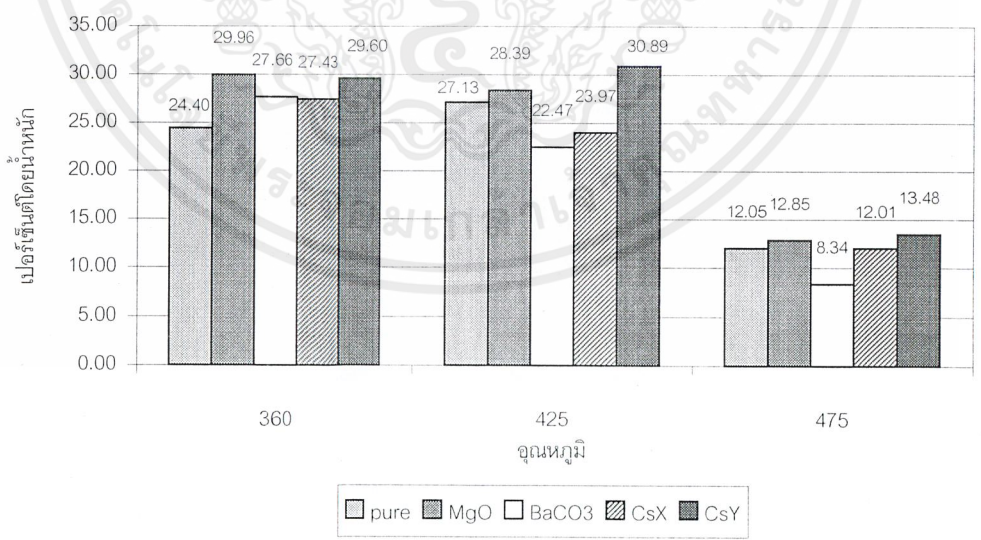
จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า การผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดในพอลิไอโซพรีนจะมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัว และอุณหภูมิที่การสลายตัวเสร็จสิ้นสมบูรณ์ใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างจากการสลายตัวทางความร้อน

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ประเภทผสมในปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน จากผลการทดลองพบว่าปฏิกิริยาการสลายตัวที่อุณหภูมิ 360°C ได้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักก๊าซ และของเหลว ดังนี้



รูปที่ 4.19 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวที่ได้การสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนและพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆที่ 360°C

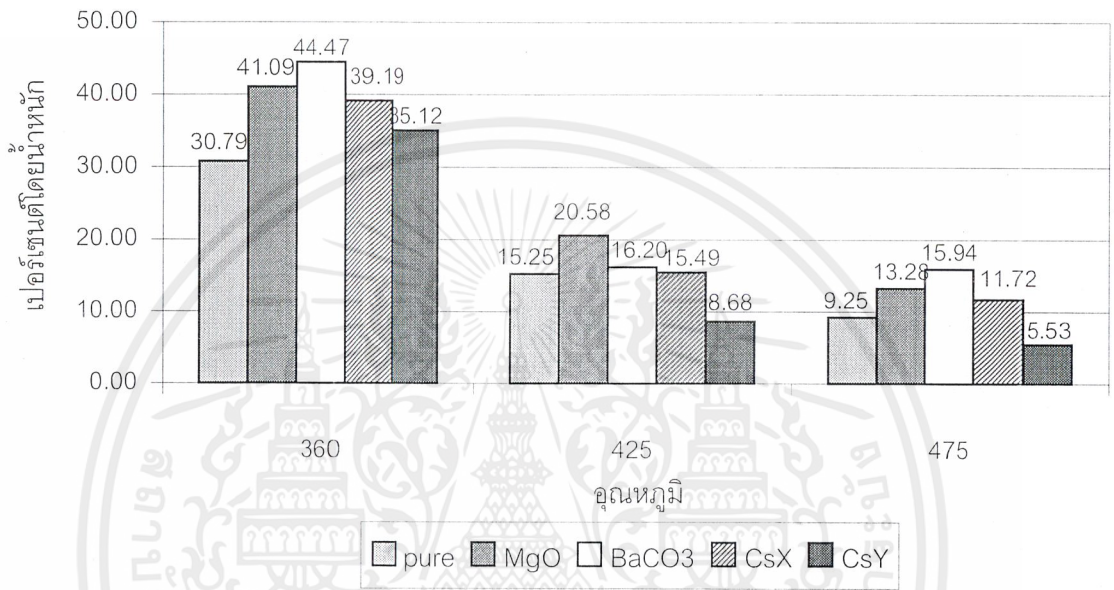
จากรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่า เมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในปฏิกิริยาการสลายของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 360°C ทำให้เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของก๊าซและของเหลวลดต่ำลงเมื่อเทียบกับการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีน เนื่องจากกลไกการเกิดการสลายตัวมิได้เกิดผ่านการสลายตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยามีอิทธิพลในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิไอโซพรีน ส่งผลให้การสลายตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กนั้นเกิดได้ยากกว่าการสลายตัวทางความร้อนผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังคงเป็นไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลสูงดังรูป 4.20



รูปที่ 4.20 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักกากรับอนที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนและการสลายตัวเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

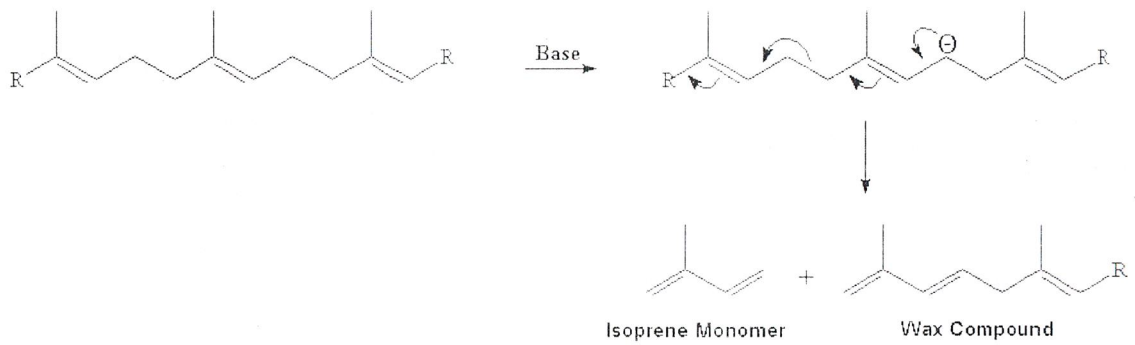
เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนขึ้นเป็น 425°C จะพบว่า กากคาร์บอนมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักใกล้เคียงกับการสลายตัวที่อุณหภูมิ 360°C (รูปที่ 4.20) แต่สารประกอบแวกซ์มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลดลงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักสารประกอบแวกซ์ที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนและการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูป 4.21 จะเห็นว่าได้ที่อุณหภูมิ 360°C สารประกอบแวกซ์ที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนมีเปอร์เซ็นต์สูง เพราะเมื่อมีการริเริ่มปฏิกิริยา (Initiation) ณ บริเวณใดๆ ที่มีโซ่ปลายสายโซ่ สารมัธยันต์จะดำเนินไปในทิศทางเดียว (รูปที่

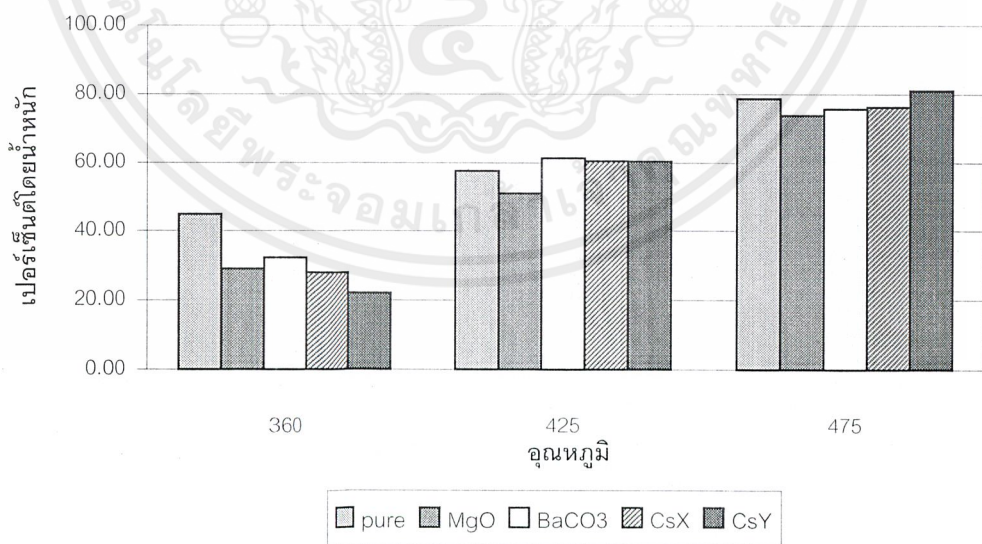
กลไกการสลายพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสารประกอบแวกซ์จำนวนมากดังรูป 4.22



รูปที่ 4.22 กลไกการสลายพอลิไอโซพรีน แล้วได้ผลิตภัณฑ์สารประกอบแว็กซ์

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่า สายโซ่ส่วนที่เหลือจะไม่ผ่านกลไกการสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา และยังคงสภาพเป็นสายโซ่พอลิเมอร์โมเลกุลใหญ่ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำสายโซ่พอลิเมอร์จะมีการเคลื่อนตัวได้น้อย ทำให้สายโซ่โมเลกุลใหญ่เหล่านี้ มีโอกาสเคลื่อนที่เข้าไปเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณพื้นผิวภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็น Active site ได้น้อยกว่า เมื่อเทียบกับการเกิดปฏิกิริยาที่ 425°C และ 475°C จากรูป 4.19 จะพบว่า สารประกอบแว็กซ์ที่ได้จากการสลายตัวที่สองอุณหภูมินี้มีเปอร์เซ็นต์ลดลงเมื่อเทียบกับสารประกอบแว็กซ์ที่ได้จากการสลายตัวที่ 360°C อย่างมาก

เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาการสลายตัวเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก เช่น ก๊าซและของเหลวมากยิ่งขึ้นดังรูป 4.23

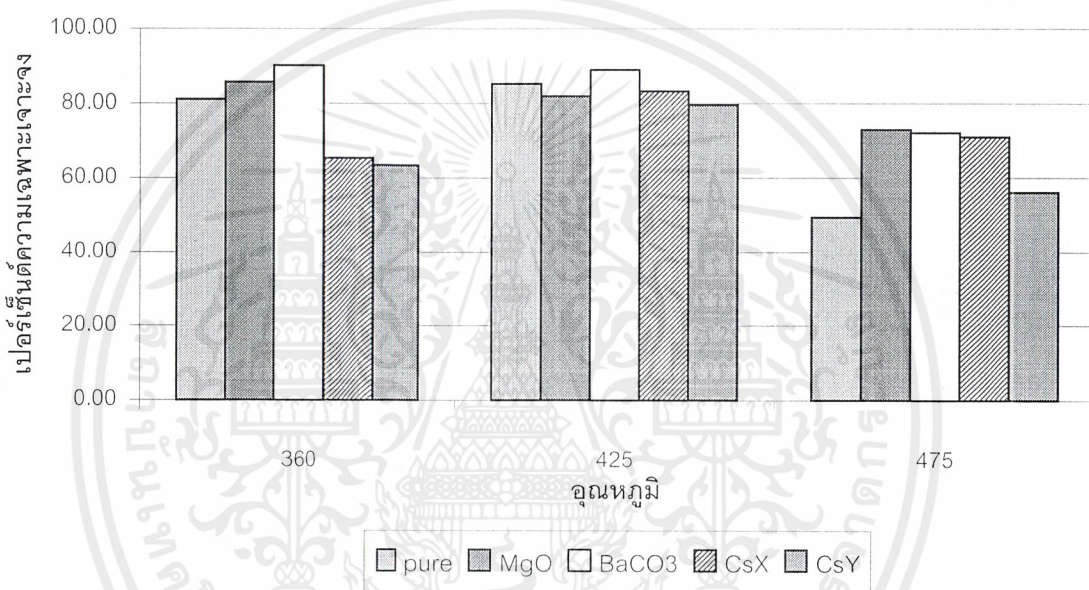


รูปที่ 4.23 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของก๊าซและของเหลวที่ได้จากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีน และพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

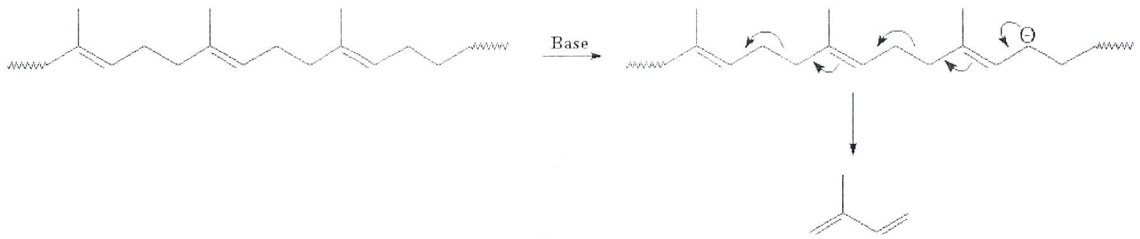
จากรูปที่ 4.23 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 425⁰C และ 475⁰C พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลต่อความสามารถในการสลายพอลิไอโซพรีนเมื่อเทียบกับการสลายตัวทางความร้อน เห็นได้จากเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของก๊าซและของเหลวจากพอลิไอโซพรีนที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์ก๊าซและของเหลวที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อน

แต่เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีน จะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิดที่มีความแรงของเบสมาก จะช่วยให้ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนดีขึ้นแสดงได้ดัง รูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อพอลิไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนและการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.24 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอิทธิพลต่อความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความแรงของเบสมาก เช่น แบเรียมคาร์บอเนต และ CsX จะเหนี่ยวนำให้กลไกการเกิดปฏิกิริยาเกิดผ่านคาร์เบนไอออน ซึ่งช่วยให้การสลายตัวของพอลิไอโซพรีนได้ไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็กเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนดังรูปที่ 4.25

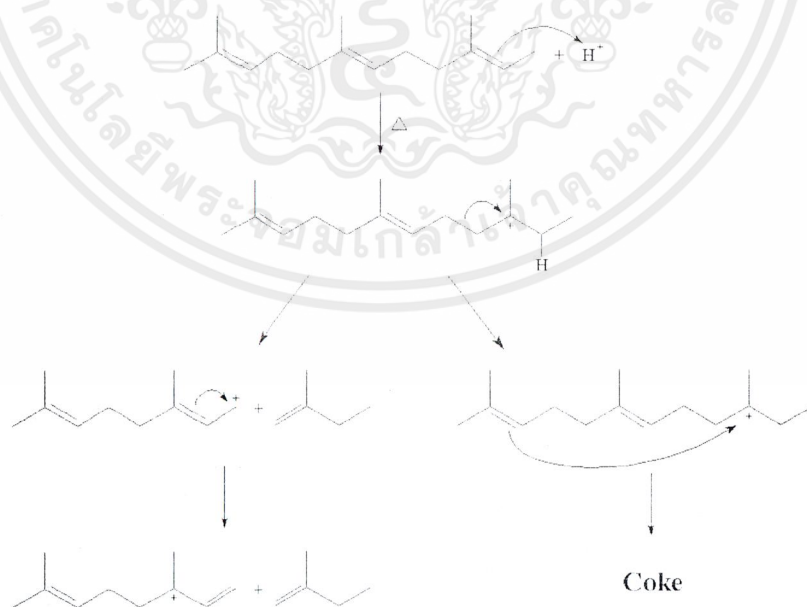


รูปที่ 4.25 กลไกการสลายตัวของพอลิโอไซพรีนเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติเป็นเบส

นอกจากนี้พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนต และ CsX ทำให้กากคาร์บอนลดลง (รูปที่ 4.20)

ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ และ CsY ซึ่งมีสมบัติเป็นเบส แต่ก็มีบางส่วนแสดงสมบัติเป็นกรดลิวอิส เนื่องจากแมกนีเซียมเป็นโลหะไอออนขนาดเล็กทำให้ประจุนิวเคลียสสุทธิ (Effective nuclear charge) ที่ดึงดูดอิเล็กตรอนชั้นนอกมีค่ามาก การจ่ายอิเล็กตรอนแก่ออกซิเจน จะเกิดได้ยากกว่าแบเรียม ส่วนซีโอไลต์ Y มีค่า Si/Al สูง เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X จึงมีความเป็นเบส ต่ำกว่าซีโอไลต์ X เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิด แสดงสมบัติเป็นกรดลิวอิสจะทำให้กลไกการสลายตัวบางส่วน เกิดในลักษณะเดียวกับการสลายตัวด้วยคาร์โบแคทไอออน ซึ่งจะเกิดกากคาร์บอนจำนวนมาก เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนต และ CsX (รูปที่ 4.20)

กลไกการสลายตัวของพอลิโอไซพรีนผ่านคาร์โบแคทไอออนที่ริเริ่มโดย H^+ แสดงดังนี้



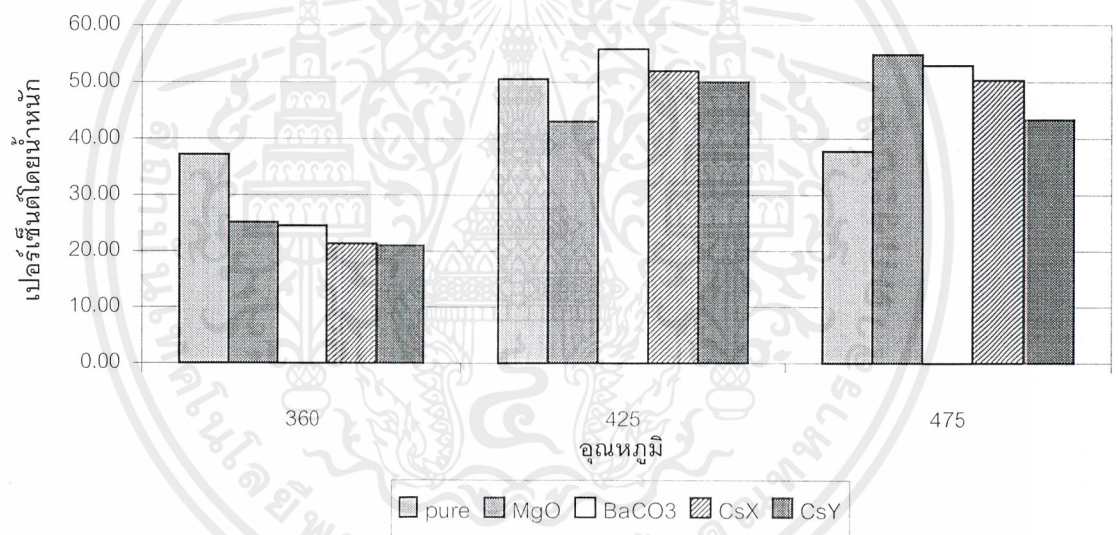
รูปที่ 4.26 กลไกการสลายตัวของพอลิโอไซพรีนเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติเป็นกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 475⁰C เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนลดลง เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 425⁰C ดังรูปที่ 3 เนื่องจากกลไกการสลายตัวมิได้เกิดผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว แต่ได้รับอิทธิพลจากการสลายตัวทางความร้อนด้วย ทำให้ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 475⁰C มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 425⁰C

แต่เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อพอลิไอโซพรีนที่สลายตัวทางความร้อน (Thermal cracking) ที่อุณหภูมิ 475⁰C จะพบว่ามีค่าต่ำกว่าการสลายตัวเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างมาก (รูปที่ 4.23) แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีอิทธิพลต่อความเฉพาะเจาะจงที่อุณหภูมิสูงอย่างเห็นได้ชัด

แม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอิทธิพลต่อความสามารถในการสลายพอลิไอโซพรีน แต่มีอิทธิพลกับค่าความเฉพาะเจาะจงในการเกิดไอโซพรีน (รูปที่ 4.24) และเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไอโซพรีน ดังรูปที่ 4.27

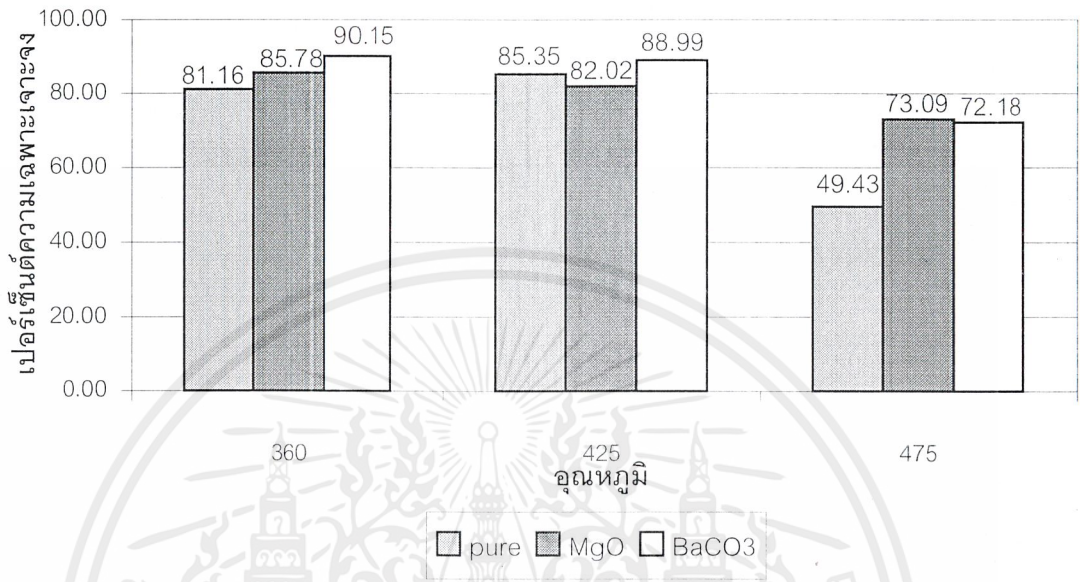


รูปที่ 4.27 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนและการสลายตัวเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.27 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าที่ 425⁰C สามารถผลิตไอโซพรีนได้สูงสุด

4.2.2 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์

การผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ในปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน พบว่ามีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงของไอโซพรีนดังรูปที่ 4.28



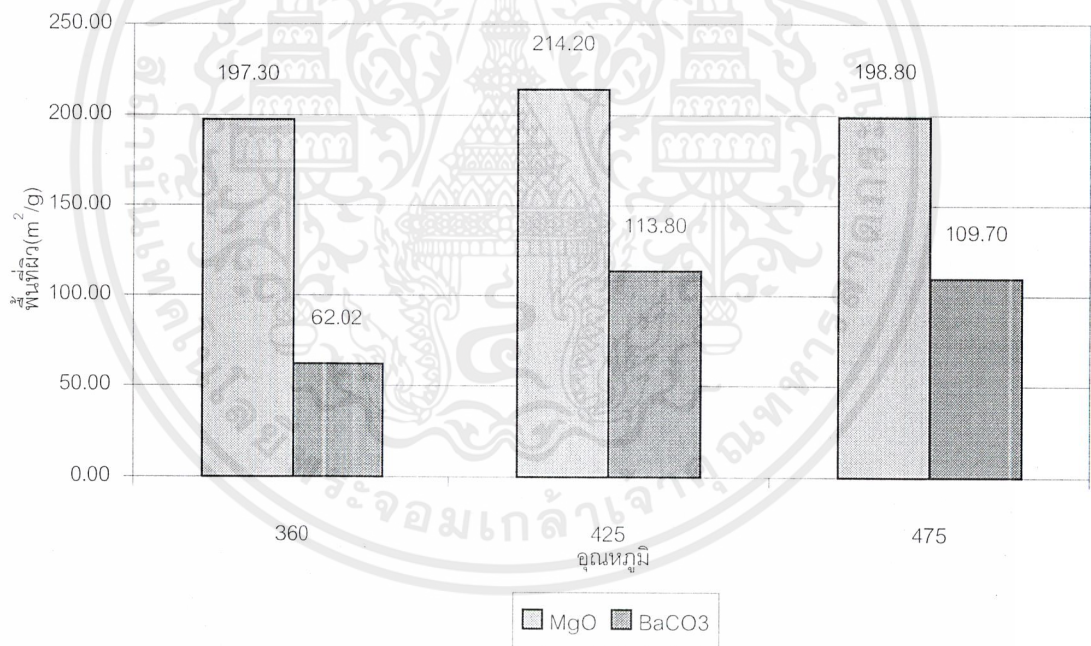
รูปที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีน และการสลายตัวเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิ 360°C และ 425°C ตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนตมีส่วนช่วยเพิ่มความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ เนื่องจากความสามารถในการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนขึ้นกับความแรงของเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งแบเรียมไฮดรอกไซด์มีความหนาแน่นของประจุน้อยกว่าแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เพราะมีขนาดไฮดรอกไซด์น้อยกว่าแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ประจุอิเล็กตรอนที่ดึงดูดอิเล็กตรอนชั้นนอกของแบเรียมจะมีค่าน้อยกว่าแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ จึงสามารถให้อิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อแบเรียมรวมตัวกับออกซิเจน และคาร์บอน แบเรียมคาร์บอเนตจึงมีความแรงของเบสมากกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ ดังนั้นแบเรียมคาร์บอเนตจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนมากกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ แต่ที่อุณหภูมิ 475°C จะเห็นได้ว่า ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนต พบว่ามีค่าลดลงอย่างมาก และไม่แตกต่างกับเมื่อผสมแมกนีเซียมออกไซด์ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนมิได้เกิดผ่านกลไกของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้นแต่ได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลจากการสลายตัวทางความร้อนด้วย ส่งผลให้ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนเมื่อใช้แบเรียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 475^oC มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 425^oC

นอกจากนั้นจากรูปที่ 4.28 ยังพบอีกว่า ที่อุณหภูมิ 475^oC การสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมโลหะออกไซด์ ให้ความเฉพาะเจาะจงของไอโซพรีนเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเทียบกับการสลายตัวทางความร้อนของไอโซพรีน แต่การสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมโลหะออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 360^oC และ 425^oC พบว่า ความเฉพาะเจาะจงที่ได้จากการสลายตัวผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ และการสลายตัวทางความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน สามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์มีอิทธิพลต่อความเฉพาะเจาะจงอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิ 475^oC เนื่องจากพอลิไอโซพรีนเป็นสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่ กลไกการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนจึงเกิดที่พื้นผิวภายนอก (External surface) เท่านั้น ดังนั้นพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน จากการหาพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง Autosorb สามารถวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของโลหะออกไซด์ ดังรูปที่ 4.29



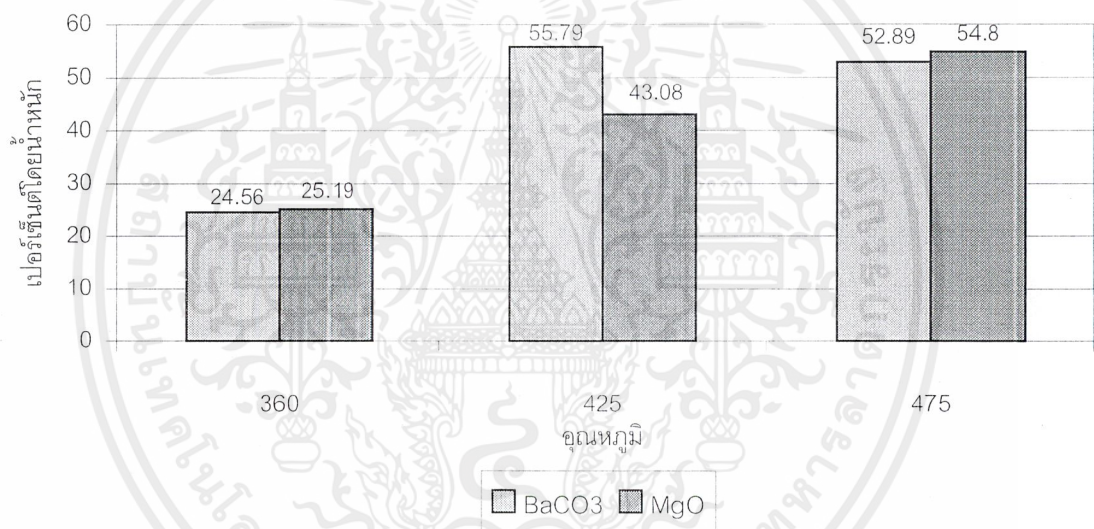
รูปที่ 4.29 พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของโลหะออกไซด์

จากรูปที่ 4.29 พบว่า พื้นที่ผิวของแบเรียมคาร์บอเนตมีค่าน้อยกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ แต่เมื่อผสมแบเรียมคาร์บอเนตในปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน จะให้เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนมากกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ (รูปที่ 4.28)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 425°C สันนิษฐานได้ว่า แบเรียมคาร์บอเนตมีความแรงของเบสมากกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ ส่งผลให้ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนมีค่ามากกว่าเมื่อใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แม้ว่าพื้นผิวของแบเรียมคาร์บอเนตมีค่าน้อยกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ก็ตาม แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสลายตัวเป็น 475°C พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีน เมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดลดลงเมื่อเทียบกับการสลายตัวที่อุณหภูมิ 425°C แล้วมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกลไกการสลายตัวได้รับอิทธิพลจากการสลายตัวทางความร้อน มิได้เกิดผ่านกลไกของตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว จึงไม่สามารถประเมินความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนได้

แต่เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไอโซพรีน เมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ ดังรูปที่ 4.30

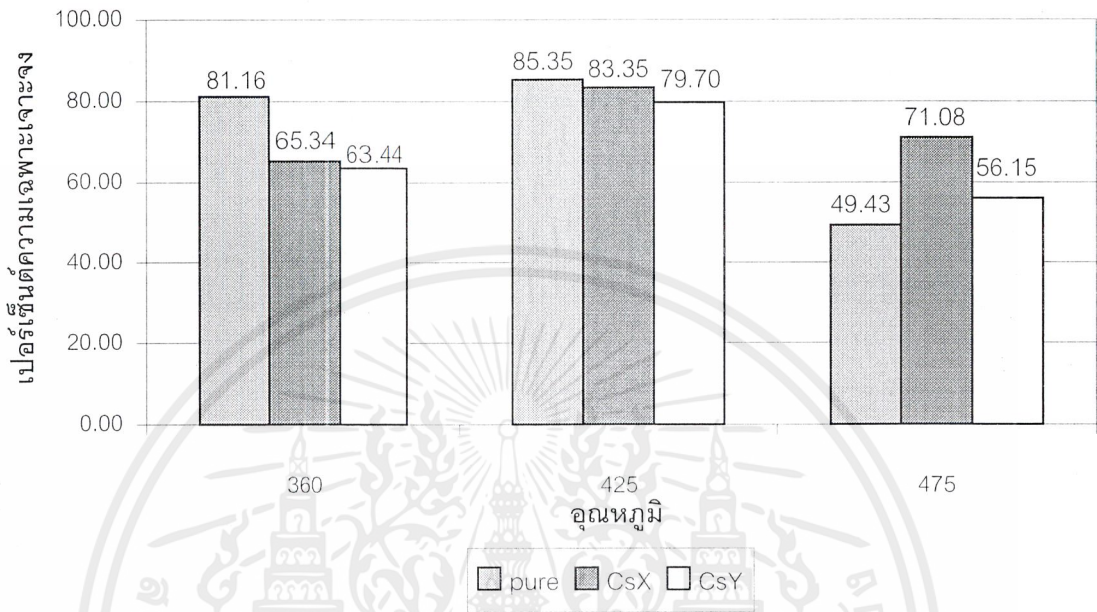


รูปที่ 4.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์

จากรูปที่ 4.30 จะพบว่าแบเรียมคาร์บอเนตสามารถผลิตไอโซพรีนได้มากที่สุดที่ 425°C ดังนั้นแบเรียมคาร์บอเนตจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน

4.2.3 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

การผสมซีโอไลต์ลงในปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนพบว่ามียุทธผลต่อความเฉพาะเจาะจงดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนและการสลายตัวเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 360°C เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงของการสลายตัวผ่านกลไกของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับการสลายตัวทางความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นที่ 425°C ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับความเฉพาะเจาะจง เมื่อพอลิไอโซพรีนสลายตัวทางความร้อน และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นอีกที่ 475°C พบว่าความเฉพาะเจาะจงที่ได้จากการสลายตัวผ่านซีโอไลต์มีค่ามากกว่าความเฉพาะเจาะจงที่ได้จากการสลายตัวผ่านความร้อน

เมื่อพิจารณาจากรูปจะพบว่าเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยา CsX จะทำให้ความเฉพาะเจาะจงสูงกว่าการผสม CsY เนื่องจาก CsX มีความเป็นเบสมากกว่า CsY จึงช่วยให้กลไกการเกิดปฏิกิริยาผ่านคาร์เบนไอออนได้มากยิ่งขึ้นทำให้มีความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนสูง

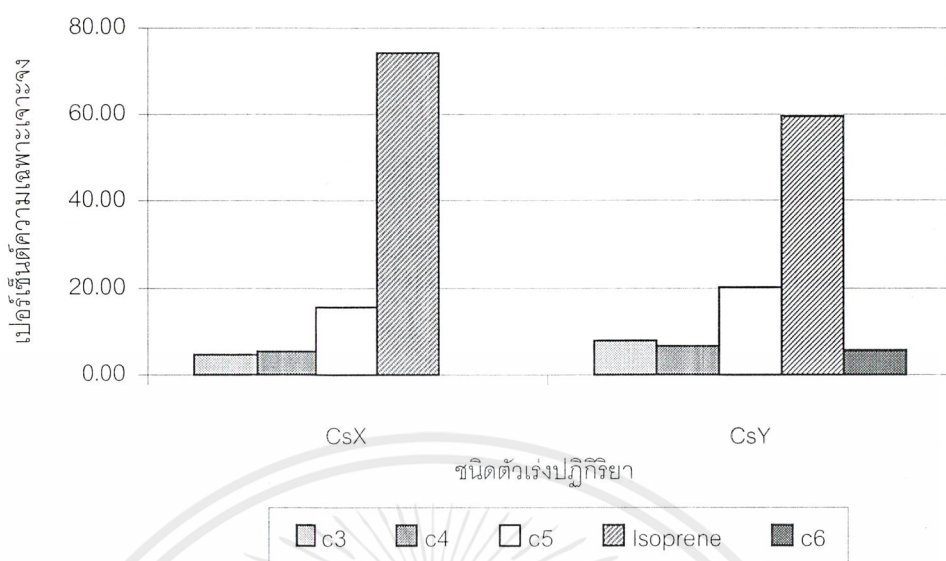
จากทฤษฎีความเป็นกรดเบสของซีโอไลต์อธิบายได้ว่าซีโอไลต์ X และซีโอไลต์ Y มีโครงสร้างเดียวกันคือ Faujasite แต่มีค่า Si/Al ต่างกันซีโอไลต์ที่มี Si/Al ต่ำจะมีความหนาแน่นของประจุลบภายใน Framework สูง เนื่องจากอะลูมิเนียมมีความสามารถในการดึงอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Electronegativity) ต่ำกว่าซิลิกอน ส่งผลให้ซีโอไลต์นั้นมีความเป็นเบสมาก ในทางตรงกันข้ามถ้าค่า Si/Al สูงจะมีความหนาแน่นของประจุลบภายใน Framework ต่ำซีโอไลต์นั้นจะมีความเป็นเบสน้อยลง โดยซีโอไลต์ X มีค่า Si/Al เท่ากับ 1 และซีโอไลต์ Y มีค่า Si/Al เท่ากับ 3 จะเห็นได้ว่าซีโอไลต์ X มีความเป็นเบสภายใน Framework มากกว่าซีโอไลต์ Y การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของซีโอไลต์ โดยทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับซีเทียมไอออน ซึ่งเป็นแคทไอออนขนาดใหญ่จะช่วยเพิ่มอิเล็กตรอนแก่ Framework ออกซิเจนของซีโอไลต์ ทำให้ความแรงของเบสของซีโอไลต์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนเพิ่มมากขึ้น

เนื่องจากพอลิไอโซพรีนมีโมเลกุลขนาดใหญ่ ทำให้กลไกการเกิดปฏิกิริยาโดยส่วนใหญ่เกิดที่บริเวณพื้นผิว ดังนั้นที่อุณหภูมิ 360°C และ 425°C ซึ่งความร้อนยังไม่สูงเพียงพอที่พอลิไอโซพรีนจะสลายตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กและแพร่เข้าไปเกิดปฏิกิริยาภายในรูพรุนจุลภาคของซีโอไลต์ ทำให้ไม่เห็นอิทธิพลของซีโอไลต์อย่างชัดเจน ดังนั้นความเฉพาะเจาะจงของซีโอไลต์ทั้งสองชนิดจึงใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.31)

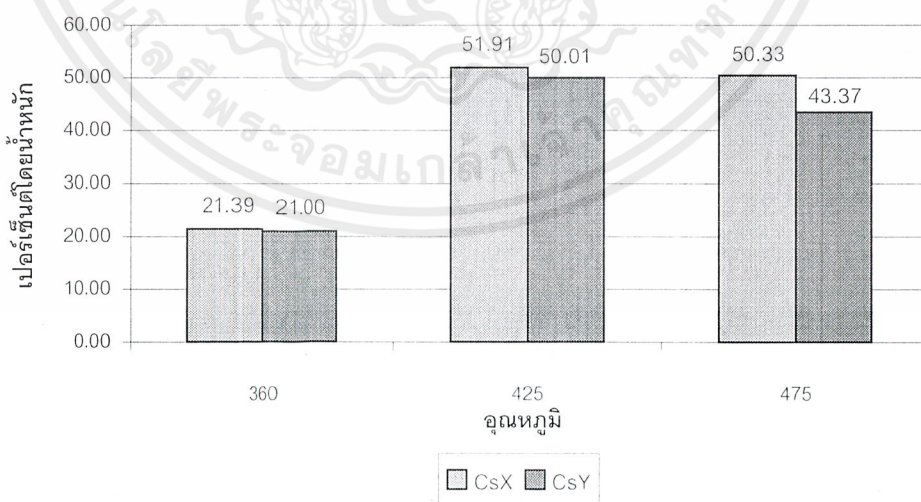
เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสลายตัวพอลิไอโซพรีนเป็น 475°C ทำให้การสลายตัวของพอลิไอโซพรีนได้ไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็กเกิดอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กบางส่วนสามารถเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวภายใน Framework ของซีโอไลต์ได้ ส่งผลให้ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยา CsY จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยา CsX เนื่องจาก CsY มีรูพรุนจุลภาคขนาดใหญ่กว่า CsX เป็นผลให้ไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็ก สามารถแพร่เข้าสู่ Framework ของ CsY และเกิดปฏิกิริยาสลายตัวเป็น LPG และไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยคาร์บอน 5 ตัวและ 6 ตัวดังรูป 4.32



รูปที่ 4.32 เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไฮโดรคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่อุณหภูมิ 475°C

จากรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยา CsY จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไอโซพรีนลดลง แต่มี LPG และไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยคาร์บอน 5 และ 6 ตัว เป็นองค์ประกอบในก๊าซเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการผสมตัวเร่งปฏิกิริยา CsX

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไอโซพรีน จะพบว่า เมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยา CsX ในปฏิกิริยาสลายตัวของพอลิไอโซพรีนจะได้ผลดังรูป 4.33



รูปที่ 4.33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

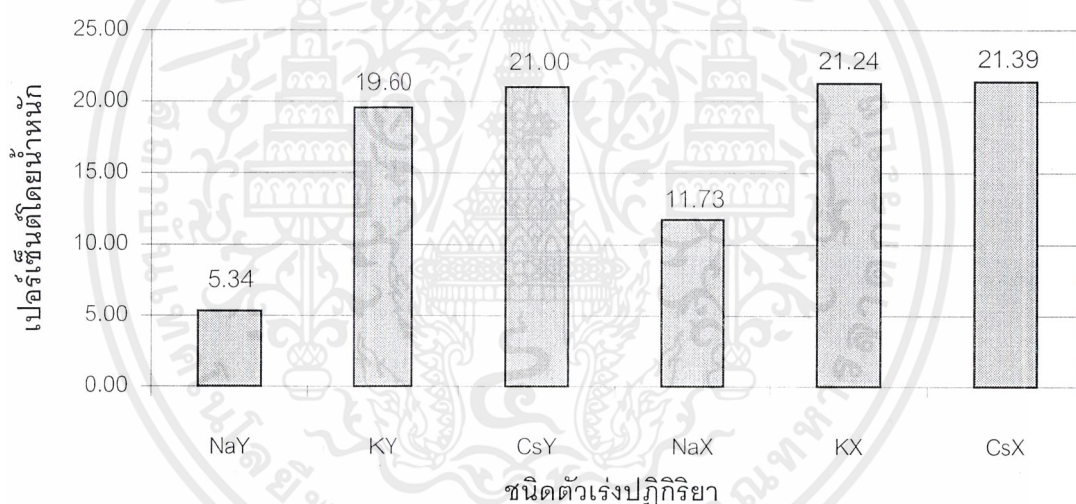
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.33 จะเห็นได้ว่าการผสมตัวเร่งปฏิกิริยา CsX สามารถผลิตไอโซพรีนได้มากกว่าการผสม CsY ดังนั้น CsX จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการสลายพอลิไอโซพรีน

4.2.4 อิทธิพลของโลหะไอออนภายในรูพรุนจุลภาคของซีโอไลต์

กลไกการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่พื้นผิวภายนอก แม้ว่าที่อุณหภูมิ 360°C จะเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัว แต่สันนิษฐานได้ว่าไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กบางส่วนที่ผ่านกระบวนการสลายตัวแล้ว สามารถเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวภายในรูพรุนจุลภาคของซีโอไลต์ได้ อิทธิพลของโลหะไอออนภายในรูพรุนจุลภาคของซีโอไลต์ จึงปรากฏให้เห็นเป็นแนวโน้มได้

การสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์มีอิทธิพลต่อความเฉพาะเจาะจงดังรูปที่ 4.34

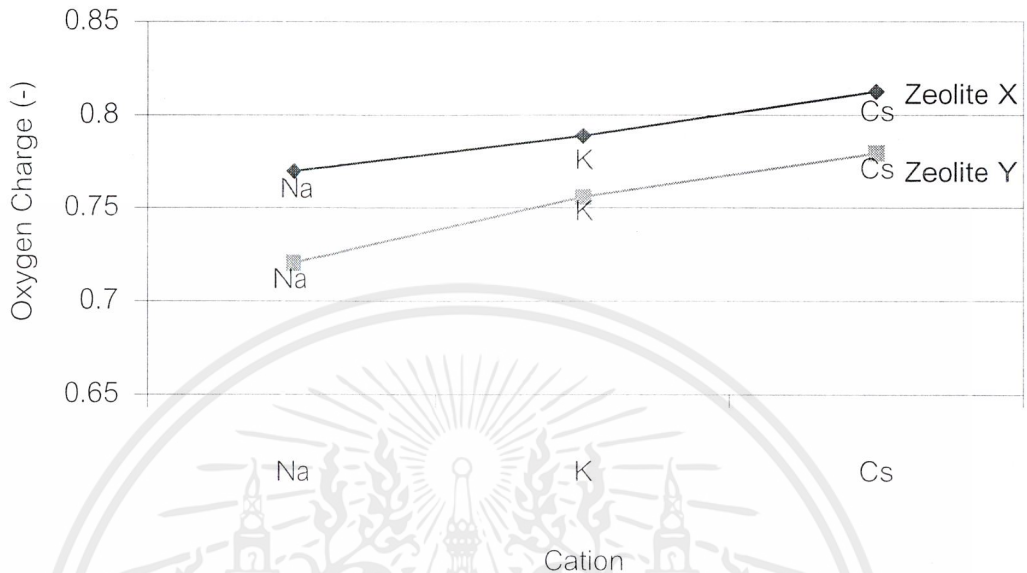


รูปที่ 4.34 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่อุณหภูมิ 360°C

จากรูปที่ 4.34 จะเห็นได้ว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทซีโอไลต์ X สามารถผลิตไอโซพรีนได้มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทซีโอไลต์ Y โดยผลิตภัณฑ์ไอโซพรีนเพิ่มมากขึ้นเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y (NaY) ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยการแลกเปลี่ยนไอออนกับแคโทไอออนขนาดใหญ่ เช่น โพแทสเซียมไอออน และซีเซียมไอออน ซึ่งจะช่วยให้เกิดโครงข่าย Framework ออกซิเจนของซีโอไลต์ ทำให้ความแรงของเบสเพิ่มมากขึ้นสามารถแสดงโดยค่า Oxygen Charge ดังรูปที่ 4.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

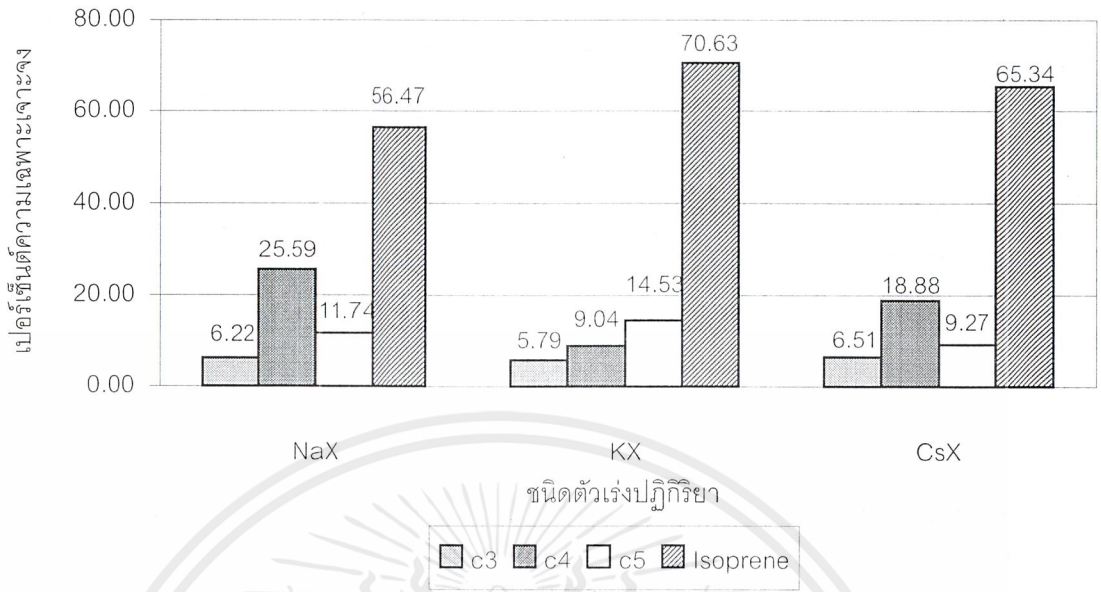
ค่า Oxygen Charge สามารถคำนวณได้จาก Unit cell (ภาคผนวก) โดยใช้วิธี Sanderson's electronegativity model [7,8] ซึ่งบ่งบอกถึงประจุลบที่ Framework ออกซิเจนของซีโอไลต์



รูปที่ 4.35 Oxygen charge ($-\delta$) ในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X และซีโอไลต์ Y

จากรูปที่ 4.35 จะเห็นได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด X มีค่า Oxygen charge มากกว่าจึงมีความเป็นเบสมากกว่า ซีโอไลต์ชนิด Y และเมื่อปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของซีโอไลต์โดยการแลกเปลี่ยนไอออนพบว่า การแลกเปลี่ยนกับไอออนขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้มีความเป็นเบสมากยิ่งขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ ความสามารถในการสลายพอลิไอโซพรีนของ ซีโอไลต์ X มากกว่าซีโอไลต์ Y และ เมื่อมีการเปลี่ยนไอออนภายในรูพรุน ไอออนขนาดใหญ่จะทำให้ซีโอไลต์มีความเฉพาะเจาะจงในการสลายพอลิไอโซพรีนได้มากกว่าไอออนขนาดเล็ก ($Cs^+ > K^+ > Na^+$)

แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 4.36 จะพบว่า เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนที่ได้จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสม CsX มีค่าต่ำกว่าเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยา KX ดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ ในผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ที่อุณหภูมิ 360°C

จากรูปที่ 4.36 จะเห็นได้ว่า เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนที่ได้จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสม CsX มีค่าต่ำกว่าเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยา KX เนื่องจากซีซีเอ็มไอออน มีน้ำหนักอะตอมมาก (282 g/mol) เมื่อชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา CsX ในน้ำหนัก (กรัม) ที่เท่ากับ KX จะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CsX จะมี Active site / gram น้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา KX ดังตาราง 4.5

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักออกไซด์ของโลหะ ที่เป็นองค์ประกอบของซีโอไลต์ X

ตัวเร่งปฏิกิริยา	% โดยน้ำหนักของโลหะออกไซด์				
	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Cs ₂ O
NaX	25.3	32.3	42.4	-	-
KX	9.7	30.9	41.4	18.0	-
CsX	7.6	22.9	30.4	-	39.1

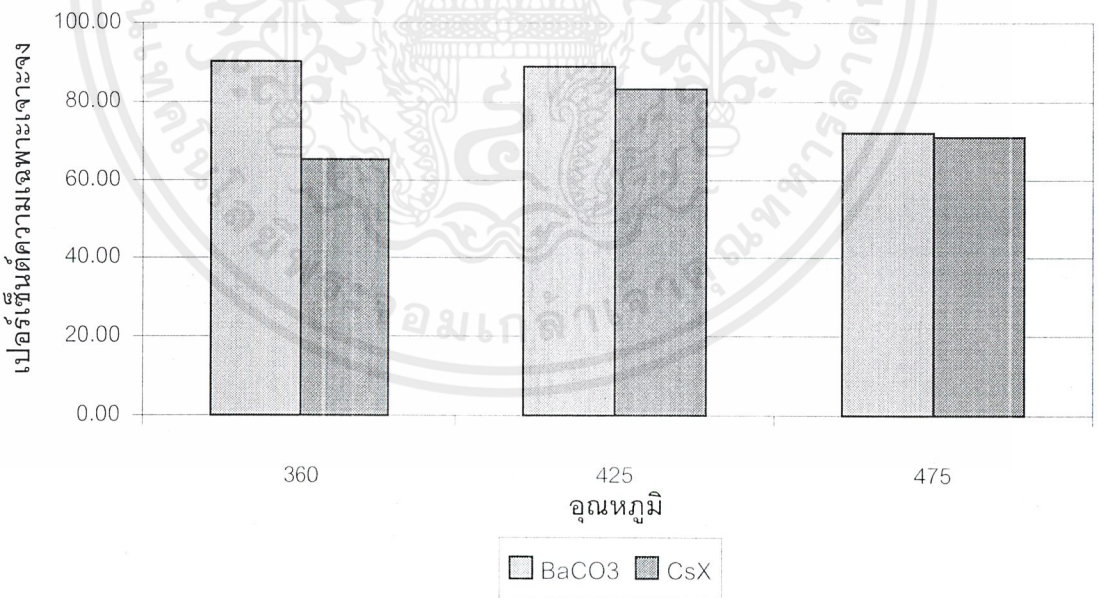
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเปอร์เซ็นต์ของ Al_2O_3 ที่เป็นองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา CsX มีเปอร์เซ็นต์ลดลง เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ชนิดอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าในน้ำหนักที่เท่ากัน CsX จะมีประจุลบจากอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นบริเวณที่แสดงสมบัติความเป็นเบสน้อยกว่าซีโอไลต์ X ชนิดอื่น จึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงที่อุณหภูมิ $360^{\circ}C$ ลดน้อยลง เมื่อเทียบกับ KX

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองประเภท ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสแล้ว (รูปที่ 4.35) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CsX เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการสลายพอลิไอโซพรีน

4.2.5 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีผลต่อความเฉพาะเจาะจงของไอโซพรีน

จากผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนสูงสุดในประเภทโลหะออกไซด์ส่วนประเภทซีโอไลต์นั้นพบว่า CsX เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเฉพาะเจาะจงสูงสุด เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนตและตัวเร่งปฏิกิริยา CsX แสดงดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมแบเรียมคาร์บอเนต และ CsX

จากรูปที่ 4.37 จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนตสามารถให้ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนได้มากกว่าเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยา CsX ถึงแม้ว่าซีโอไลต์จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวมาก แต่เนื่องจากพอลิไอโซพรีนมีโมเลกุลขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาภายในรูพรุนจุลภาคของซีโอไลต์ได้ ปฏิกิริยาการสลายตัวจึงไม่ได้เกิดผ่านตำแหน่งที่ว่างไวภายในซีโอไลต์ แต่เกิดบริเวณปากรูพรุน (Pore mouth) ของซีโอไลต์ และบริเวณพื้นผิวภายนอก ดังนั้นการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนตในปฏิกิริยาการสลายตัว จึงมีความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนมากกว่าเนื่องจากมีตำแหน่งว่างที่มีสมบัติเป็นเบสอยู่บริเวณพื้นผิว ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์มีตำแหน่งว่างไวส่วนใหญ่อยู่ในรูพรุนจุลภาค เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไอโซพรีน พบว่ามีแนวโน้มเหมือนเปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักไอโซพรีนที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนต และ CsX

จากรูปที่ 4.38 จะเห็นได้ว่า เมื่อผสมแบเรียมคาร์บอเนตลงในปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน จะสามารถผลิตไอโซพรีนได้มากกว่าการผสมตัวเร่งปฏิกิริยา CsX ที่ทุกอุณหภูมิ และสามารถผลิตไอโซพรีนได้มากที่สุด เมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 425°C

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนตลงในปฏิกิริยาการสลายตัวที่อุณหภูมิ 425°C เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการสลายตัวพอลิไอโซพรีนเพื่อให้ความเฉพาะเจาะจงและปริมาณไอโซพรีนสูงที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติเป็นเบสโดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน ดังนี้

5.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน

การสลายตัวทางความร้อน (Thermal cracking) ของพอลิไอโซพรีน พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสลายตัวจะได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวจำนวนมากขึ้น เนื่องจากความร้อนสูงมีผลให้อนุโมลอิสระซึ่งเป็นสารมัธยันต์ของปฏิกิริยาเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ 475°C จะได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวมากที่สุด แต่ก็มีเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนลดลง โดยจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น LPG จำนวนมาก

เมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และซีโอไลต์ลงในปฏิกิริยาการสลายตัว พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีส่วนช่วยในการสลายตัวให้ได้ก๊าซและของเหลวเพิ่มขึ้น แต่มีส่วนช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนให้มากขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติเป็นเบสซึ่งช่วยเหนี่ยวนำให้กลไกการสลายตัวเกิดผ่านคาร์เบนไอออน โดยพบว่าการสลายตัวที่อุณหภูมิ 425°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสลายพอลิไอโซพรีน เพราะมีเปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงในการผลิตไอโซพรีนมากที่สุด ส่วนที่อุณหภูมิ 360°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น การสลายตัวจะได้รับอิทธิพลจากการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิไอโซพรีน และที่อุณหภูมิ 475°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่การสลายตัวเสร็จสมบูรณ์ การสลายตัวได้รับอิทธิพลจากการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็ก จึงทำให้ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนต่ำ

5.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์

เนื่องจาก แบเรียมคาร์บอเนตมีความแรงของเบส มากกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ ดังนั้นการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 360°C และ 425°C เมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนตจะให้เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนมากกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ ส่วนที่อุณหภูมิ 475°C เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจง เมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดมีค่าลดลงใกล้เคียงกัน เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีน

การสลายตัวที่อุณหภูมิ 425°C เมื่อผสมแบเรียมคาร์บอเนตจะได้เปอร์เซ็นต์มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

พบว่า การสลายตัวของพอลิไอโซพรีนเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X จะให้เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนมากกว่าการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y เนื่องจากซีโอไลต์ X จะมีความเป็นเบสมากกว่าซีโอไลต์ Y (รูปที่ 4.35) จึงช่วยเหนี่ยวนำให้กลไกการสลายตัวเกิดผ่านคาร์เบนไอออนได้ดีกว่าซีโอไลต์ Y

5.4 ผลของโลหะไอออนภายในรูพรุนจุลภาคของซีโอไลต์

เมื่อนำซีโอไลต์มาทำการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส โดยการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยไอออนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เช่น โพแทสเซียม และซีเซียมไอออนจะทำให้มีความเป็นเบสเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 4.35) ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงมากยิ่งขึ้นด้วย โดย CsX จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจง และเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไอโซพรีนสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 425°C

5.5 การเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และซีโอไลต์ที่มีต่อความเฉพาะเจาะจงของไอโซพรีน

พบว่า การผสมตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์จะให้เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงต่อไอโซพรีนมากกว่าการผสม CsX เนื่องจากพอลิไอโซพรีนเป็นพอลิเมอร์โมเลกุลขนาดใหญ่ ทำให้กลไกการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวจะเกิดบริเวณพื้นผิวภายนอก ซึ่งเป็นบริเวณที่เป็น active site ของแบเรียมคาร์บอเนต แต่ active site ของซีโอไลต์นั้นอยู่ภายในรูพรุนจุลภาค ซึ่งพอลิไอโซพรีนไม่สามารถจะเข้าไปเกิดปฏิกิริยาได้

ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนต จึงเหมาะกับการสลายพอลิไอโซพรีนมากที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไอโซพรีนเพิ่มขึ้น
2. ควรใช้พอลิไอโซพรีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำในการทำปฏิกิริยาการสลายตัวเพื่อให้เกิดการสลายตัวได้สมบูรณ์มากขึ้น
3. ควรทดลองทำปฏิกิริยาการสลายตัวที่อุณหภูมิอื่น เช่น 450°C

เอกสารอ้างอิง

1. ตะวัน สุขน้อย เอกสารประกอบการสอนเรื่อง ซีโอไลต์และสารมีรูพรุนที่เกี่ยวข้อง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2000
2. Dyer A., "An Introduction to Zeolite Molecular Sieves", Wiley, New York, 1998
3. ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์ "หลักเคมี 2 (ทฤษฎี โครงสร้าง ปฏิกริยา)" ฉบับปรับปรุง พิมพ์ครั้งแรก สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์ 1987 252 - 258
4. Lee , J.D., "Concise Inorganic Chemistry", 5th ed. , Chapman & Hall, 1996
5. ดารณี พิมพ์ภรณ์ พิริยา พุทธิมัย และ สุภาภักดิ์ ชูโต โครงการพิเศษเรื่องการสลายตัวของ พอลิสไตรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 1999
6. Singh R. and Dutta P.K., "Use of surface-modified zeolite Y for extraction of metal ions from aqueous to organic phase". *Microporous and Mesoporous Materials*, 32, 1999, 29-35
7. Mortier W.J., "Zeolite Electronegativity Related to Physicochemical Properties", *Journal of Catalysis*, 55, 1978, 138-145
8. Hočevár S. and Držaj B., "Electronegativity and Catalytic Properties of Zeolites", *Journal of Catalysis*, 73, 1982, 205-215

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

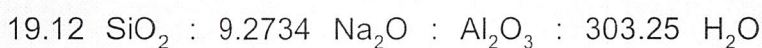
ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก การสังเคราะห์ซีโอไลต์ Y

การสังเคราะห์ ซีโอไลต์ Y สามารถหาปริมาณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ได้จากการคำนวณหาจากสูตรเจล ของซีโอไลต์ Y ซึ่งมีสูตรเจลดังนี้



จากสูตรเจลข้างต้นนี้จะทำการคำนวณหาโมลของสารแต่ละชนิดโดยเทียบเป็น 0.1 โมลของซิลิกา จะได้สูตรเจลดังนี้



จากสูตรเจลนี้ทำการคำนวณหาน้ำหนักของสารแต่ละชนิดที่ใช้ในการเตรียมเจลของซีโอไลต์ได้ตามตารางที่

ตารางที่ ก.1 น้ำหนักสารที่ต้องการในการเตรียมเจล

สาร	โมล	น้ำหนักที่ต้องการ (กรัม)
SiO ₂	0.1	6.009
Na ₂ O	0.049	0.533
Al ₂ O ₃	0.005	3.006
H ₂ O	1.586	28.548

คำนวณหา SiO₂

แหล่ง SiO₂ หาได้จาก สารแขวนลอยซิลิกา (Ludox 40 SiO₂ %wt)

ต้องการ SiO₂ 40 กรัม เตรียมจากสารแขวนลอยซิลิกา 100 กรัม

ต้องการ SiO₂ 6.009 กรัม เตรียมจากสารแขวนลอยซิลิกา $(6.009 / 40) \times 100$

$$= 15.023 \text{ กรัม}$$

สารแขวนลอยซิลิกา 15.023 กรัม จะให้น้ำ (H₂O) = 15.023 – 6.009

$$= 9.014 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหา Al_2O_3

แหล่ง Al_2O_3 หาได้จาก โซเดียมอะลูมิเนต (Na_2O 45.5 %wt , Al_2O_3 54.5 %wt)

ต้องการ Al_2O_3 54.5 กรัม เตรียมจาก โซเดียมอะลูมิเนต 100 กรัม

ต้องการ Al_2O_3 0.533 กรัม เตรียมจาก โซเดียมอะลูมิเนต $(0.533 / 54.5) \times 100$
 $= 0.978$ กรัม

คำนวณหา Na_2O

แหล่ง Na_2O หาได้ 2 แหล่งดังนี้

1.) แหล่งโซเดียมอะลูมิเนต (Na_2O 45.5 %wt , Al_2O_3 54.5 %wt)

เตรียมโซเดียมอะลูมิเนต 100 กรัม จะได้ Na_2O 45.5 กรัม

เตรียมโซเดียมอะลูมิเนต 0.978 กรัม จะได้ Na_2O $(0.978 / 100) \times 45.5$
 $= 0.445$ กรัม

ปริมาณโซเดียมอะลูมิเนตที่ต้องการอีก = ปริมาณที่ต้องการทั้งหมด - แหล่ง Na_2O
 $= 3.006 - 0.445$
 $= 2.561$ กรัม

2.) แหล่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)



จากสมการจะหาปริมาณ Na_2O ได้ดังนี้

$$\frac{\text{น้ำหนัก NaOH}}{\text{มวลโมเลกุล NaOH}} = \frac{\text{น้ำหนัก Na}_2\text{O}}{\text{มวลโมเลกุล Na}_2\text{O}} \times 2$$

$$\frac{\text{น้ำหนัก NaOH}}{39.9838} = \frac{2.561}{61.9736} \times 2$$

จะต้องเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) = 3.305 กรัม

แหล่งโซเดียมไฮดรอกไซด์จะให้ น้ำ (H_2O) = $3.305 - 2.561$

= 0.744 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหา H₂O

แหล่ง H₂O หาได้ 3 แหล่งดังนี้

- 1.) สารแขวนลอยซิลิกา ให้ H₂O = 9.014 กรัม
- 2.) โซเดียมอะลูมิเนต ให้ H₂O = 0.744 กรัม
- 3.) ต้องการ H₂O ทั้งหมด = 28.548 กรัม
 ดังนั้นต้องเติมน้ำกลั่นอีก = 28.548 - (9.014 + 0.744)
 = 20.278 กรัม

จากการคำนวณหาปริมาณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Y ได้รวบรวมดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์ Y

สารที่ใช้สังเคราะห์	ปริมาณสาร (กรัม)
สารแขวนลอยซิลิกา (Ludox)	15.023
โซเดียมอะลูมิเนต	0.978
โซเดียมไฮดรอกไซด์	3.305
น้ำกลั่น	20.278

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณ

1. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ก๊าซ (% Gas) ของการทำปฏิกิริยา

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ก๊าซสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของสารที่เหลือหลังจากการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน โดยคำนวณจากตัวอย่างการทำปฏิกิริยาการสลายตัวที่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา NaX โดยทำที่อุณหภูมิ 360°C ได้ผลดังตารางที่ .1

ตารางที่ ข.1 น้ำหนักสารที่ได้หลังจากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 360°C โดยผสมตัวเร่งปฏิกิริยา NaX

	น้ำหนักที่ใช้การคำนวณ (กรัม)		น้ำหนักสารที่ได้ (กรัม)
	ก่อนทำปฏิกิริยา	หลังทำปฏิกิริยา	
พอลิไอโซพรีน	1.002	-	1.002
ตัวเร่งปฏิกิริยา	0.206	-	0.206
ท่อปฏิกรณ์เคมี	84.037	84.073	0.036
ขวดเก็บสาร	4.799	4.828	0.029
บีกเกอร์	33.423	33.790	0.367
กระดาษกรอง	1.074	1.647	0.573
กรวยกรอง	54.391	54.399	0.008

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักได้ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา} &= \text{น้ำหนักจากท่อปฏิกรณ์} + \text{น้ำหนักจากกระดาษกรอง} \\ &= 0.036 + 0.573 \\ &= 0.609 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักกากคาร์บอน (Coke)} &= \text{น้ำหนักได้ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา} - \text{น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา} \\ &= 0.608 - 0.206 \\ &= 0.402 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักของเหลว (Liquid)} &= \text{น้ำหนักจากขวดเก็บสาร} \\ &= 0.029 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักแว็กซ์ (Wax)} &= \text{น้ำหนักจากปีกเกอร์} + \text{น้ำหนักจากกรวยกรอง} \\
 &= 0.367 + 0.008 \\
 &= 0.375 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักก๊าซ} &= \text{น้ำหนักพอลิไอโซพรีน} - (\text{น้ำหนัก Coke} + \text{น้ำหนัก Liquid} + \text{น้ำหนัก Wax}) \\
 &= 1.002 - (0.403 + 0.029 + 0.375) \\
 &= 0.195 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

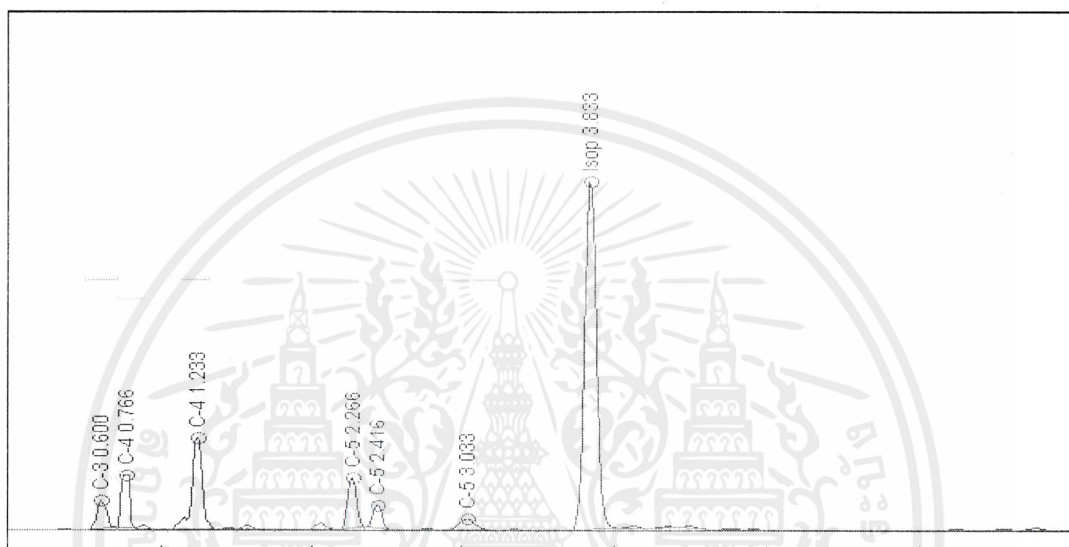
$$\begin{aligned}
 \text{เปอร์เซ็นต์ก๊าซ (\% Gas)} &= (\text{น้ำหนักก๊าซ} / \text{น้ำหนักพอลิไอโซพรีน}) \times 100 \\
 &= (0.193 / 1.002) \times 100 \\
 &= 19.261 \%
 \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจง (% Selectivity) ของผลิตภัณฑ์ไอโซพรีน

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้พีคของโครมาโทแกรมที่ได้จากการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน โดยตัวอย่างการคำนวณได้นำโครมาโทแกรมของปฏิกิริยาการสลายตัวที่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา NaX ลงไปได้ผลดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 360°C โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา NaX

จากรูปที่ ข.1 เมื่อทำการ Integration หาพื้นที่ใต้พีคจะได้ผลออกมาดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 พื้นที่ใต้พีคที่ได้จากโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 360°C โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา NaX

สารที่เกิดขึ้น	Retention time (min)	Area Peak (Count)
C ₃	0.600	22.368
C ₄	0.766	122.679
C ₅	2.266	70.384
Isoprene	3.833	338.283
รวม		553.714

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจง (% Selectivity) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะรายงานจากเปอร์เซ็นต์โดยโมลของผลิตภัณฑ์นั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรหา Corrected Area ดังนี้

$$\text{Corrected Area ของ } C_n = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีคของ } C_n}{n}$$

n = จำนวนอะตอมคาร์บอน

จากสูตรข้างต้นสามารถคำนวณได้ผลดังตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจง (% Selectivity)

สารที่เกิดขึ้น	พื้นที่ใต้พีค (Count)	Corrected Area	Selectivity (%)
C_3	22.368	7.456	6.221
C_4	122.679	30.670	25.588
C_5	70.384	14.077	11.745
Isoprene	338.283	67.657	56.447
รวม	553.714	119.859	100

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{Corrected Area ของ } C_3 &= 22.368 / 3 \\ &= 7.456 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจง ของ } C_3 &= (7.456 / 119.859) \times 100 \\ &= 6.221 \% \end{aligned}$$

จากตารางที่ ข.3 จะได้เปอร์เซ็นต์ความเฉพาะเจาะจงของผลิตภัณฑ์ไอโซพรีน = 56.447 %

3. การคำนวณหาปริมาณของไอโซพรีนในยาง

จากการหาพื้นที่ใต้พีคของการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา NaX ที่อุณหภูมิ 360°C ได้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของก๊าซแต่ละชนิดดังตารางที่ ข.4

ตารางที่ ข.4 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 360°C โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา NaX

สารที่เกิดขึ้น	พื้นที่ใต้พีค (Count)	เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก (%)
C ₃	22.368	4.040
C ₄	122.679	22.156
C ₅	70.384	12.711
Isoprene	338.283	61.094
รวม	553.714	100

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของ } C_{\text{Isoprene}} &= (338.283 / 553.714) \times 100 \\ &= 61.094 \% \\ \text{พอลิไอโซพรีนซึ่งมา (จากตารางที่)} &= 1.002 \text{ กรัม} \\ \text{น้ำหนักก๊าซ (จากการคำนวณ \%Gas)} &= 0.193 \% \end{aligned}$$

เปอร์เซนต์ไอโซพรีนต่อยาง 1 กรัมหาได้จากสมการดังนี้

$$\text{เปอร์เซนต์ไอโซพรีนในยาง} = \frac{\text{เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของ } C_{\text{Isoprene}}}{\text{น้ำหนักพอลิไอโซพรีน}} \times \text{น้ำหนักก๊าซ}$$

$$= \frac{61.094}{1.002} \times 0.193$$

$$\text{เปอร์เซนต์ไอโซพรีนต่อยาง 1 กรัม} = 11.768 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การคำนวณหา Oxygen Charge

ผลจากการตรวจสอบหาปริมาณโลหะของซีโอไลต์ CsX จากเครื่อง XRF ได้ผลดังตารางที่ ข.5

ตารางที่ ข.5 การคำนวณหาโมลอะตอมของออกซิเจนและแคทไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยา CsX

โลหะออกไซด์	% โดยน้ำหนัก	โมลโมเลกุลโลหะออกไซด์	โมลอะตอมออกซิเจน	โมลอะตอมแคทไอออน
Na ₂ O	7.6	0.1226	0.1226	0.2452
Al ₂ O ₃	22.9	0.2245	0.6735	0.4490
SiO ₂	30.4	0.5067	1.0134	0.5067
Cs ₂ O	39.1	0.1387	0.1387	0.2774
โมลอะตอมรวม (Al ₂ O ₃ +SiO ₂)			1.6869	-

จากตารางที่ ข.5 จะเห็นว่าปริมาณของแคทไอออนรวมของโซเดียม และซีเซียมมีมากกว่าปริมาณของอะลูมิเนียม เนื่องจากมีแคทไอออนบางตัวที่อยู่กับหมู่ฟังก์ชันของซีโอไลต์จำพวกหมู่ Silanol เป็นต้น ดังนั้นการคำนวณจึงทำการสมมติปริมาณของแคทไอออนที่อยู่บน Framework ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{โมลรวมของแคทไอออน (Na+Cs)} &= 0.2452 + 0.2774 \\ &= 0.5226 \end{aligned}$$

ปริมาณอะลูมิเนียม 0.5226 โมล มีปริมาณโซเดียมอยู่ 0.2452 โมล

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอะลูมิเนียม 0.4490 โมล มีปริมาณโซเดียมอยู่ } & (0.2452 / 0.5226) \times 0.4490 \\ &= 0.2106 \text{ โมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอะลูมิเนียม 0.4490 โมล มีปริมาณซีเซียมอยู่ } & (0.2774 / 0.5226) \times 0.4490 \\ &= 0.2383 \text{ โมล} \end{aligned}$$

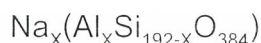
ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned} \frac{\text{น้ำหนัก Na}_2\text{O}}{\text{มวลโมเลกุล}} &= \frac{7.6}{62} \\ &= 0.1226 \text{ โมลโมเลกุล} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Na ₂ O	1	โมลโมเลกุล มีออกซิเจนอยู่	1	โมลอะตอม
Na ₂ O	0.1226	โมลโมเลกุล มีออกซิเจนอยู่	0.1226	โมลอะตอม
Na ₂ O	1	โมลโมเลกุล มีแคทไอออนอยู่	2	โมลอะตอม
Na ₂ O	0.1226	โมลโมเลกุล มีแคทไอออนอยู่	2 × 0.1226	
				= 0.2106 โมลอะตอม

จากตารางที่ ข.5 นำเอาโมลอะตอมของแคทไอออนมาทำการคำนวณให้เป็นโมลอะตอมที่อยู่ในรูปของสูตรอย่างง่ายดังนี้



ในการคำนวณจะคิดเทียบกับค่าของออกซิเจนซึ่งมี 384 โมลอะตอม โดยคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Na} &= \frac{0.2106}{1.6869} \times 384 = 47.94 \text{ โมลอะตอม} \\ \text{Al} &= \frac{0.4490}{1.6869} \times 384 = 102.21 \text{ โมลอะตอม} \\ \text{Si} &= \frac{0.5067}{1.6869} \times 384 = 115.34 \text{ โมลอะตอม} \\ \text{Cs} &= \frac{0.2383}{1.6869} \times 384 = 54.25 \text{ โมลอะตอม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ผลรวมโมลอะตอมของแคทไอออน} &= 47.94 + 102.21 + 115.34 + 54.25 \\ &= 319.7382 \text{ โมลอะตอม} \end{aligned}$$

จากการคำนวณข้างต้นนำไปคำนวณหา Intermediate electronegativity (S_{int}) ได้ดังสมการนี้

$$S_{\text{int}} = [S_{\text{P}}^p \cdot S_{\text{Q}}^q \cdot S_{\text{R}}^r]^{1/(p+q+r)}$$

S = Electronegativity ของธาตุแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ค่า Electronegativity (S) ของธาตุแต่ละชนิด

Element	S	Element	S
H	3.55	Si	2.84
C	3.79	K	0.42
N	4.49	Na	0.70
O	5.21		
Al	2.22		

$$S_{\text{int}}(\text{CsX}) = [0.7^{47.94} \times 2.22^{102.21} \times 2.84^{115.34} \times 0.28^{54.25}]^{1/298.55}$$

$$= 1.5553$$

เมื่อได้ค่า Intermediate electronegativity แล้วจึงนำไปคำนวณหาค่า Oxygen Charge ได้ดังสมการนี้

$$\sigma_i = \frac{S_{\text{int}} - S_i}{2.08(S_i)^{1/2}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\sigma_i = \frac{1.5553 - 5.21}{2.08(5.21)^{1/2}}$$

$$= -0.7698$$

จะเห็นว่าค่า Oxygen Charge ของ CsX เท่ากับ -0.7698 ซึ่งค่าลบที่ได้จะเป็นค่าที่บอกลถึงความเป็นเบส ถ้ามีค่าลบมากก็จะมีความเป็นเบสมาก

5. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การแลกเปลี่ยนไอออน

จากตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยา CsX ซึ่งได้ทำการคำนวณข้างต้นสามารถนำไปทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การแลกเปลี่ยนไอออนได้โดยทำการคำนวณจากโมลอะตอมของโลหะต่างๆ ในซีโอไลต์ CsX มีดังตารางที่ ข.7

ตารางที่ ข.7 ปริมาณของโลหะชนิดต่างๆของตัวเร่งปฏิกิริยา CsX

ธาตุต่างๆ	โมลอะตอม
Na	0.211
Al	0.449
Si	0.507
Cs	0.238

ตัวอย่างการคำนวณ

ปริมาณของอะลูมิเนียม 0.449 โมลอะตอม มีซีเซียมอยู่ 0.238 โมลอะตอม

ปริมาณของอะลูมิเนียม 100 โมลอะตอม มีซีเซียมอยู่ $(0.238 / 0.449) \times 100$
 $= 53.074$ โมลอะตอม

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การแลกเปลี่ยนไอออนของซีเซียมเท่ากับ 53.0735 %

ภาคผนวก ค

ผลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของ
พอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 360°C

ตัวเร่งปฏิกิริยา	Coke (%)	Liquid (%)	Wax (%)	Gas (%)	Selectivity (%)	Isoprene (%)
Pure Rubber	24.396	1.236	30.793	43.575	81.158	37.237
MgO	29.960	0.259	41.087	28.694	85.776	25.194
BaCO ₃	27.665	1.078	44.471	26.786	90.151	24.561
BaO	49.044	2.270	18.767	29.918	61.976	19.843
NaX	40.198	2.933	37.434	19.206	56.447	11.733
KX	23.056	3.929	44.187	28.829	70.635	21.242
CsX	27.433	2.284	39.190	30.814	65.341	21.395
NaY	35.321	1.201	34.656	28.822	15.866	5.341
KY	32.112	3.974	37.869	25.647	50.888	19.600
CsY	29.602	4.124	35.120	31.155	63.438	21.002

ตารางที่ ค.2 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของ
พอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 425°C

ตัวเร่งปฏิกิริยา	Coke (%)	Liquid (%)	Wax (%)	Gas (%)	Selectivity (%)	Isoprene (%)
Pure Rubber	27.126	0.169	15.252	57.452	85.350	50.598
MgO	28.386	0.000	20.575	51.039	82.017	43.085
BaCO ₃	22.471	0.000	16.199	61.330	88.995	55.789
CsX	23.968	0.000	15.486	60.546	83.350	51.915
CsY	30.887	0.000	8.675	60.438	79.697	50.013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของ
พอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 475°C

ตัวเร่งปฏิกิริยา	Coke (%)	Liquid (%)	Wax (%)	Gas (%)	Selectivity (%)	Isoprene (%)
Pure Rubber	12.054	6.117	9.250	72.580	49.429	37.766
MgO	12.854	1.387	13.283	72.475	73.088	54.797
BaCO ₃	8.338	6.944	15.939	68.779	72.180	52.890
CsX	12.014	8.492	11.716	67.778	71.077	50.334
CsY	13.476	8.417	5.528	72.849	56.155	43.369

ตารางที่ ค.4 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของส่วนประกอบของก๊าซ และเปอร์เซนต์ไอโซพรีนต่ออย่าง
1 กรัม จากการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 360°C

ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของก๊าซ (%)					เปอร์เซนต์ไอโซพรีนต่อ อย่าง 1 กรัม (%)
	C ₃	C ₄	C ₅	Isoprene	C ₆	
Pure	6.14	4.67	3.76	85.43	-	37.24
MgO	2.81	5.05	4.36	87.79	-	25.19
BaCO ₃	1.50	2.81	3.99	91.69	-	24.56
BaO	9.14	3.74	20.79	66.33	-	19.84
NaX	4.04	22.16	12.71	61.09	-	11.73
KX	3.63	7.54	15.16	73.68	-	21.24
CsX	4.17	16.13	9.90	69.79	-	21.39
NaY	3.73	57.23	37.06	18.53	-	5.34
KY	3.47	11.97	8.14	76.42	-	19.60
CsY	3.63	15.37	13.59	67.41	-	21.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนประกอบของก๊าซ และเปอร์เซ็นต์ไอโซพรีนต่ออย่าง 1 กรัม จากการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 425^oC

ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของก๊าซ (%)					เปอร์เซ็นต์ไอโซพรีนต่อ อย่าง 1 กรัม (%)
	C ₃	C ₄	C ₅	Isoprene	C ₆	
Pure	3.39	3.71	4.83	88.07	-	50.60
MgO	2.92	3.91	8.75	84.41	-	43.08
BaCO ₃	2.35	2.59	3.73	90.96	-	55.79
CsX	2.82	3.96	7.47	85.74	-	51.91
CsY	3.79	5.21	8.25	82.75	-	50.01

ตารางที่ ค.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนประกอบของก๊าซ และเปอร์เซ็นต์ไอโซพรีนต่ออย่าง 1 กรัม จากการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 475^oC

ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของก๊าซ (%)					เปอร์เซ็นต์ไอโซพรีนต่อ อย่าง 1 กรัม (%)
	C ₃	C ₄	C ₅	Isoprene	C ₆	
Pure	0.08	8.40	20.38	59.60	11.54	37.77
MgO	4.23	3.67	14.77	75.61	1.73	54.80
BaCO ₃	6.87	7.84	8.39	76.90	-	52.89
CsX	4.70	5.41	15.63	74.26	-	50.33
CsY	7.95	6.66	20.17	59.53	5.69	43.37

ตารางที่ ค.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโลหะออกไซด์ที่ได้จากการตรวจหาปริมาณโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์แต่ละชนิดด้วยเครื่องด้วยเครื่อง XRF

ตัวเร่งปฏิกิริยา	% โดยน้ำหนักของโลหะออกไซด์				
	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Cs ₂ O
NaX	25.3	32.3	42.4	-	-
KX	9.67	30.9	41.4	18.0	-
CsX	7.6	22.9	30.4	-	39.1
NaY	18.5	23.0	58.5	-	-
KY	5.85	22.2	54.9	17.1	-
CsY	6.48	16.7	42.3	-	34.4

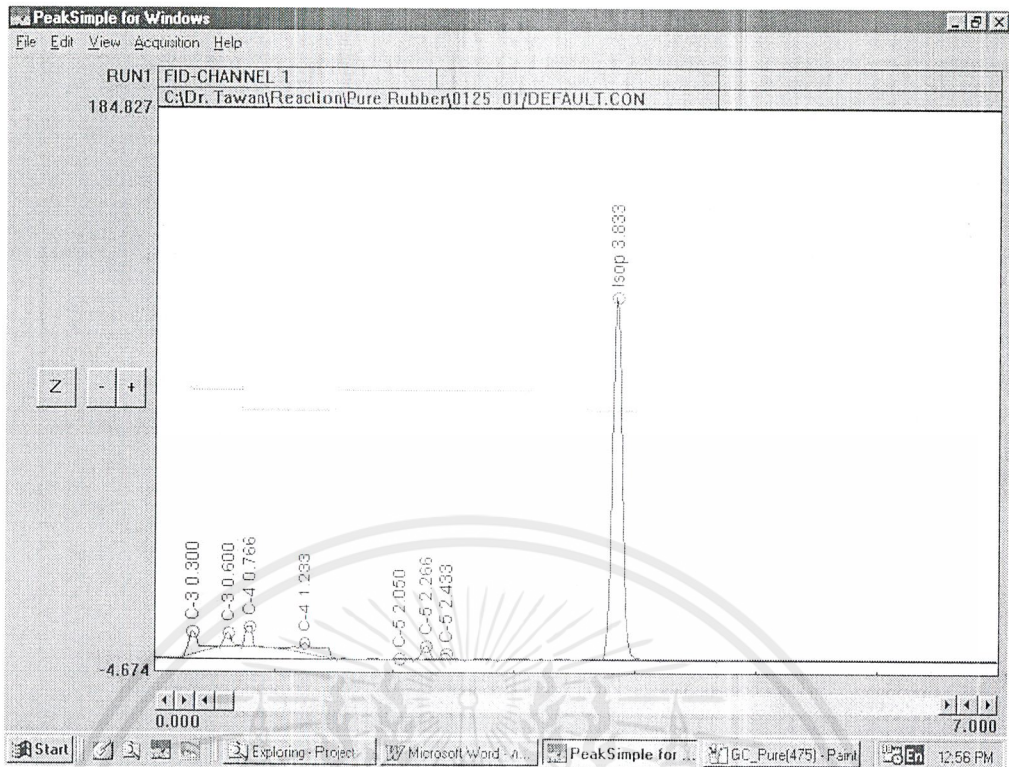
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
ผลการทดลองจากเครื่อง Gas Chromatograph

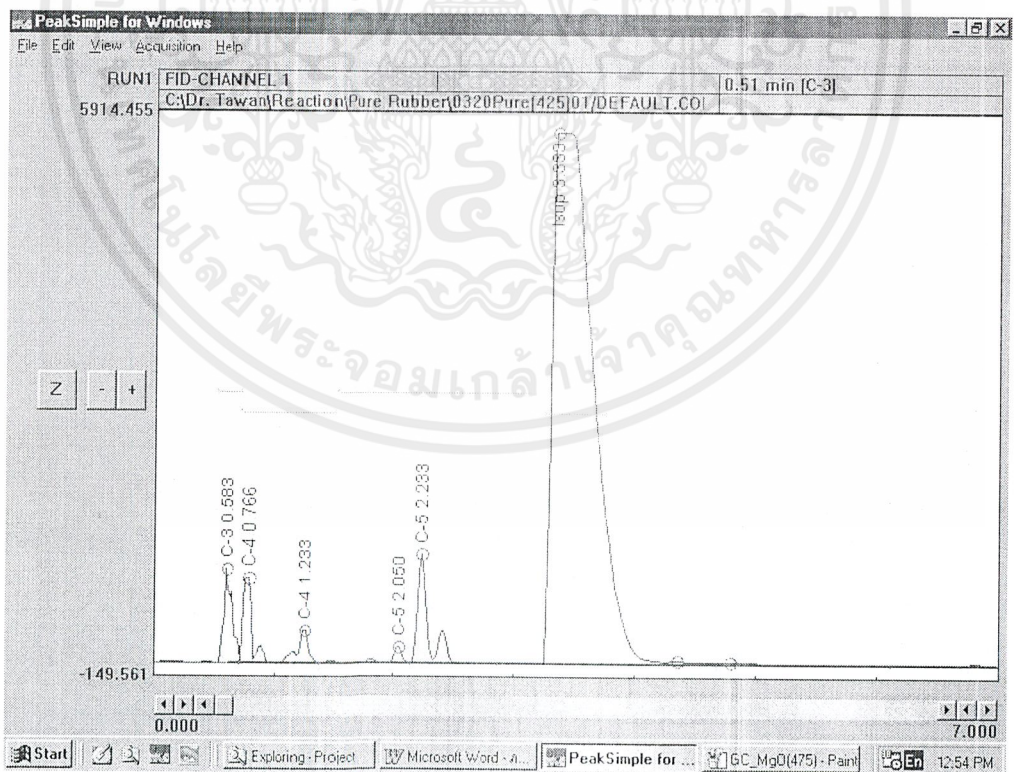


รูปที่ ง.1 โครมาโทแกรมสารมาตรฐานของสาร LPG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

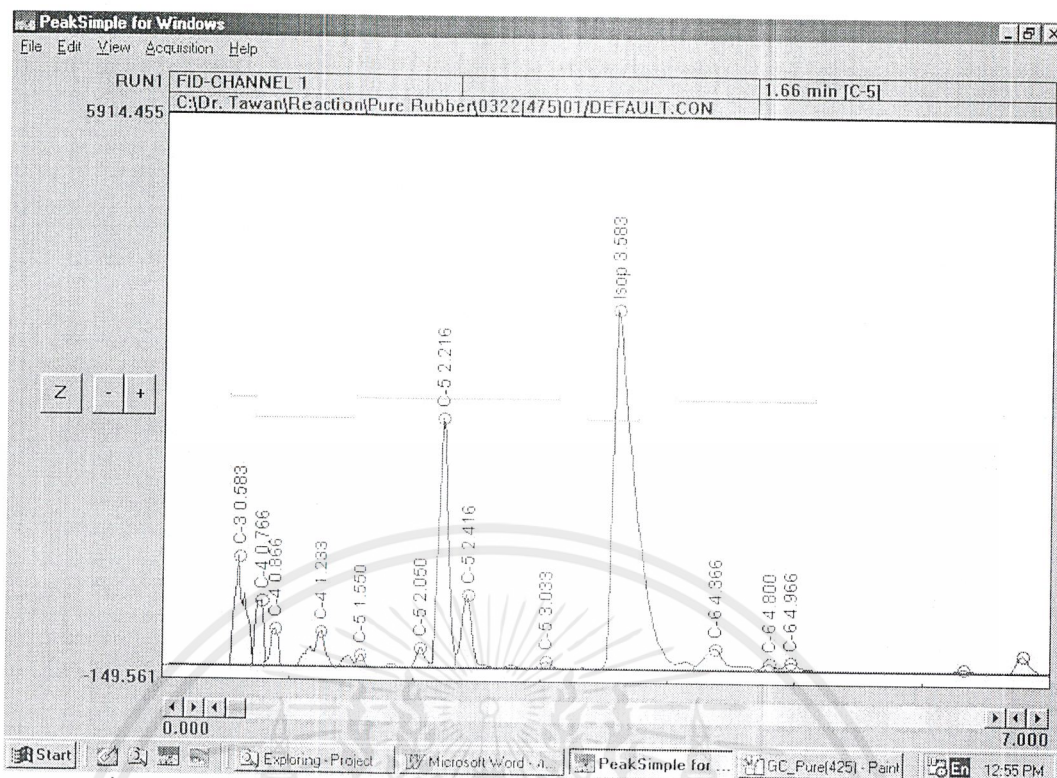


รูปที่ ง.2 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 360°C โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

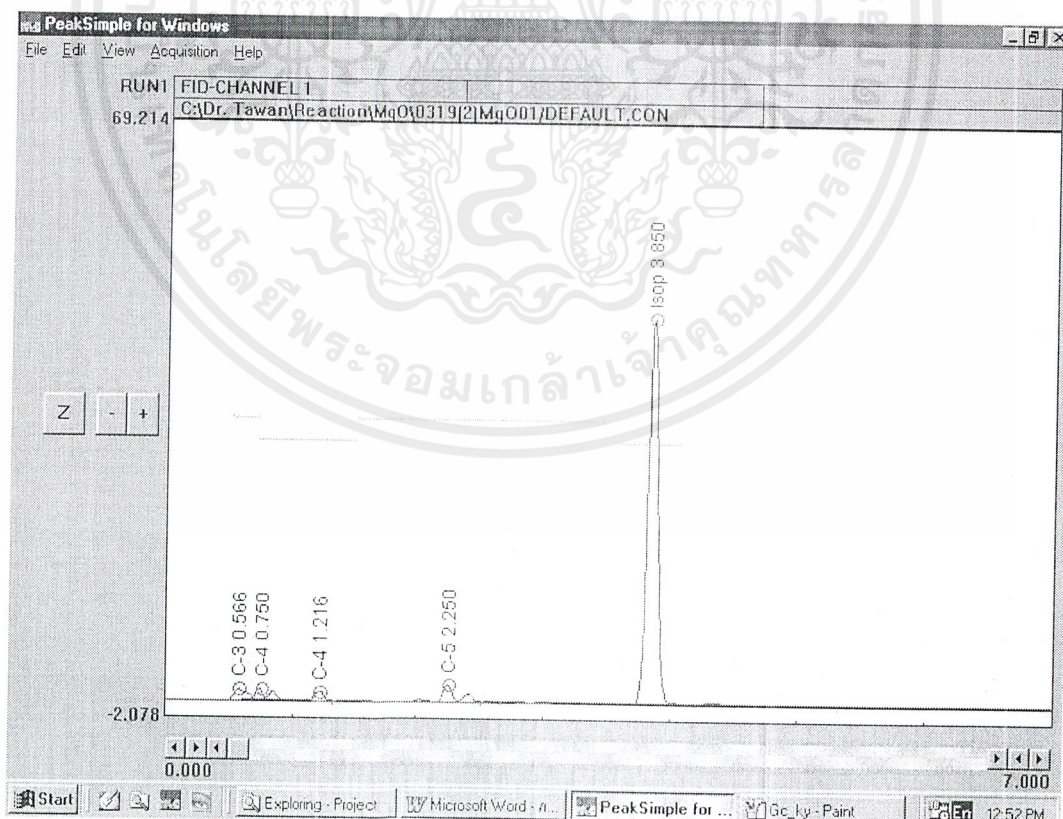


รูปที่ ง.3 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 425°C โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

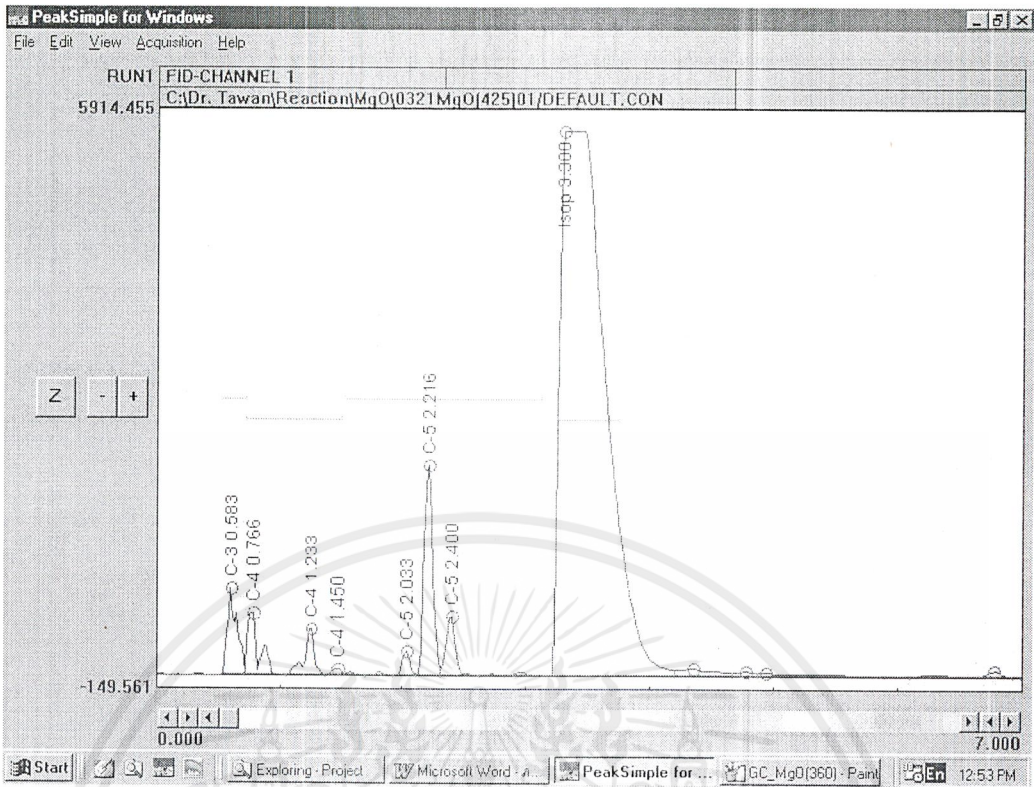


รูปที่ ง.4 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 475°C โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

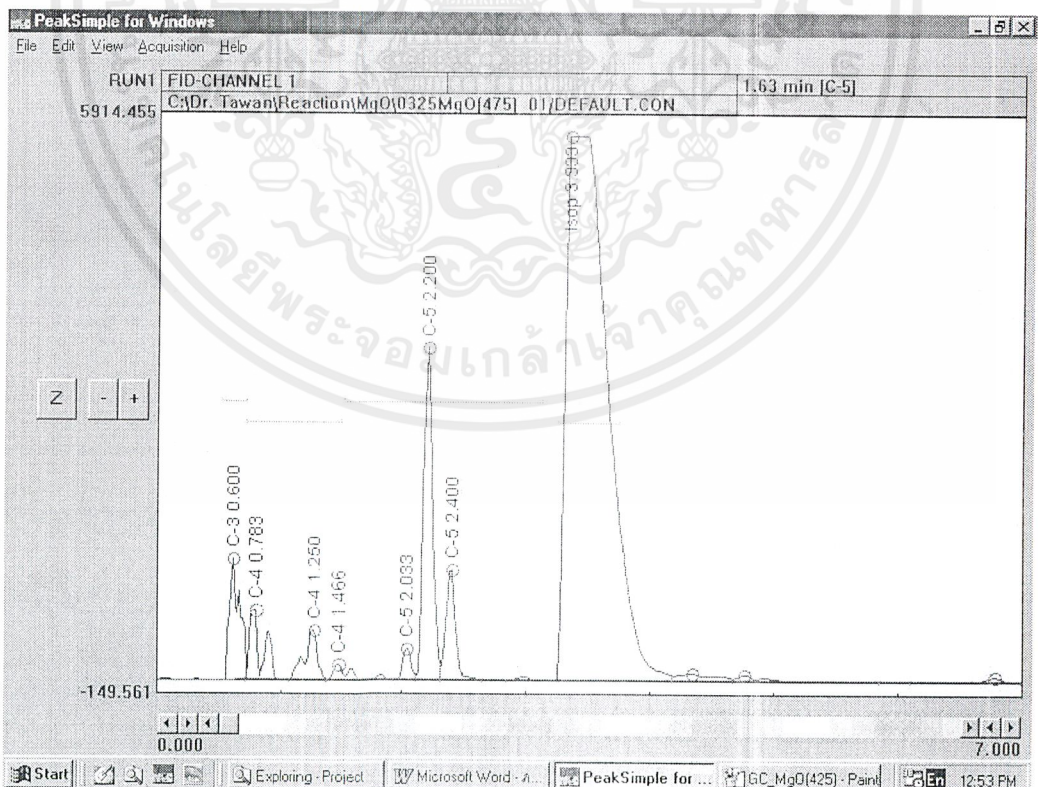


รูปที่ ง.5 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MgO ที่อุณหภูมิ 360°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

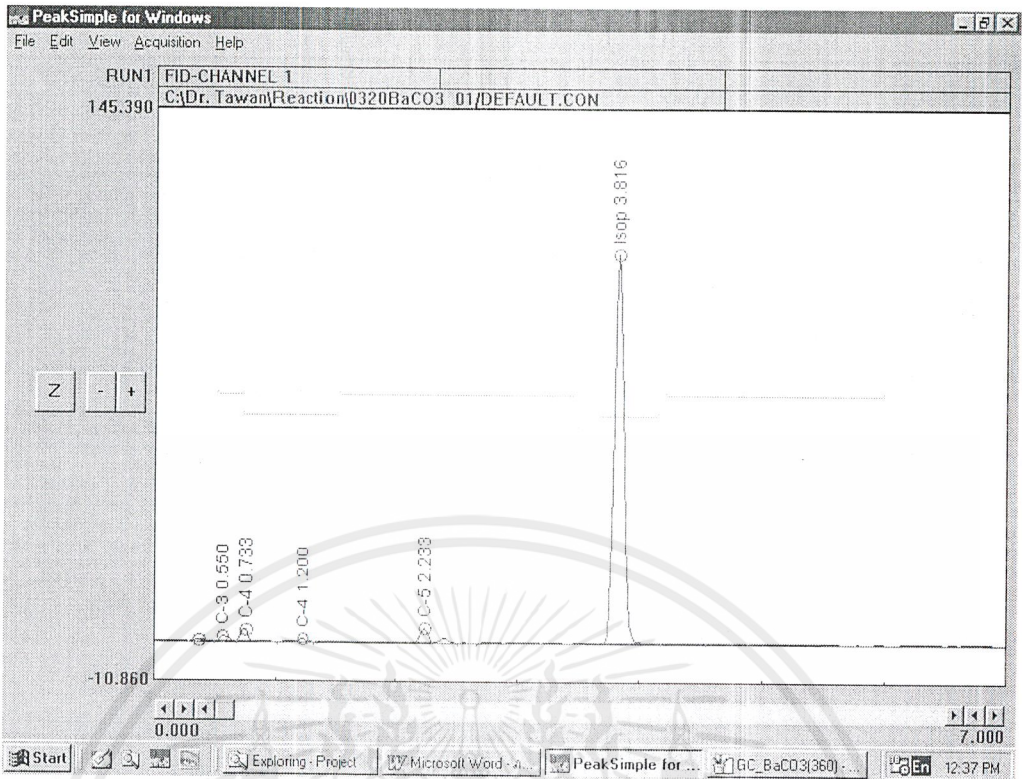


รูปที่ ง.6 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ ตัว
 เเร่งปฏิกิริยา MgO ที่อุณหภูมิ 425°C

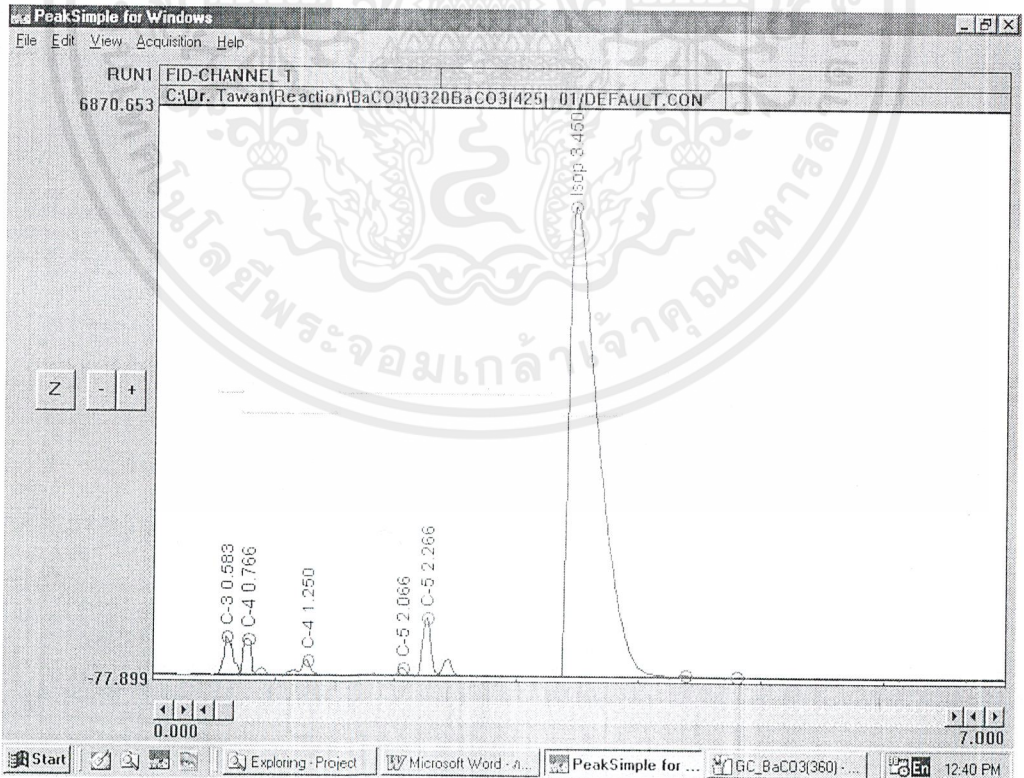


รูปที่ ง.7 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ ตัว
 เเร่งปฏิกิริยา MgO ที่อุณหภูมิ 475°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

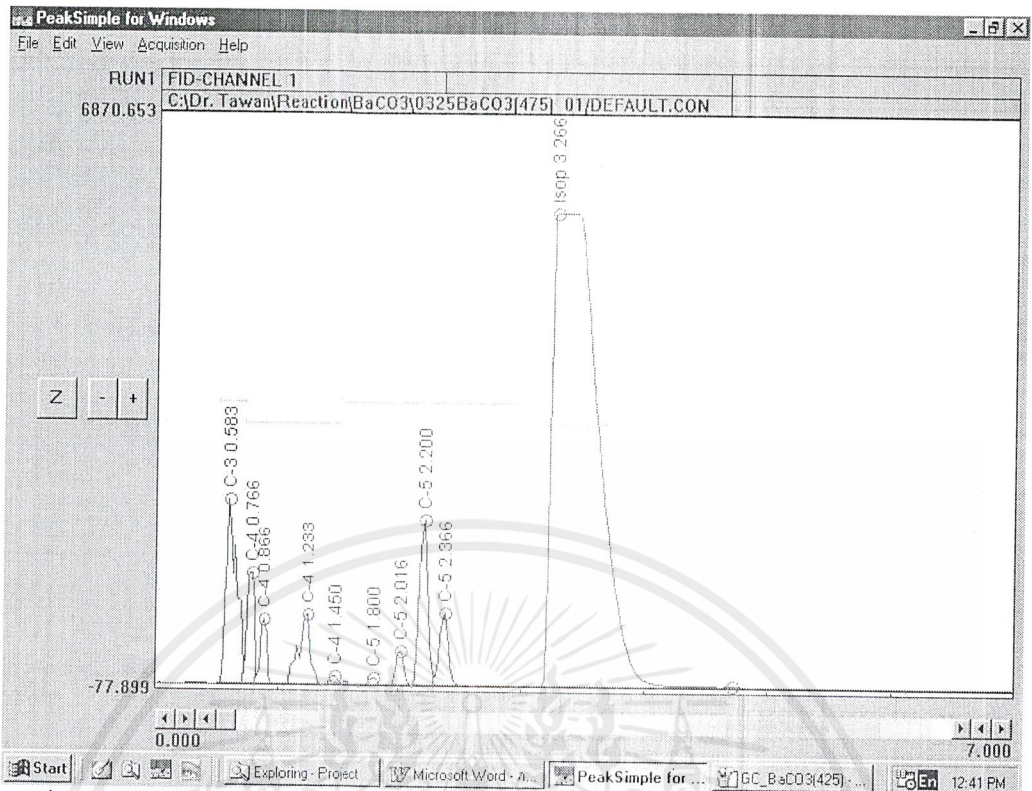


รูปที่ ง.8 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา BaCO_3 ที่อุณหภูมิ 360°C

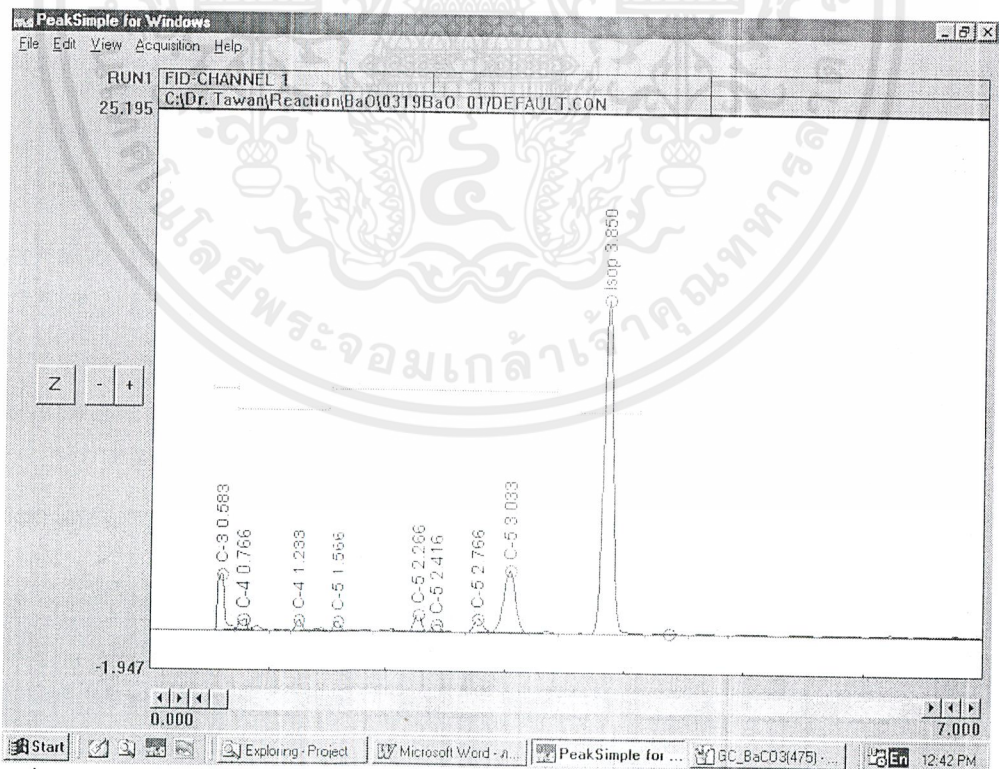


รูปที่ ง.9 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา BaCO_3 ที่อุณหภูมิ 425°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

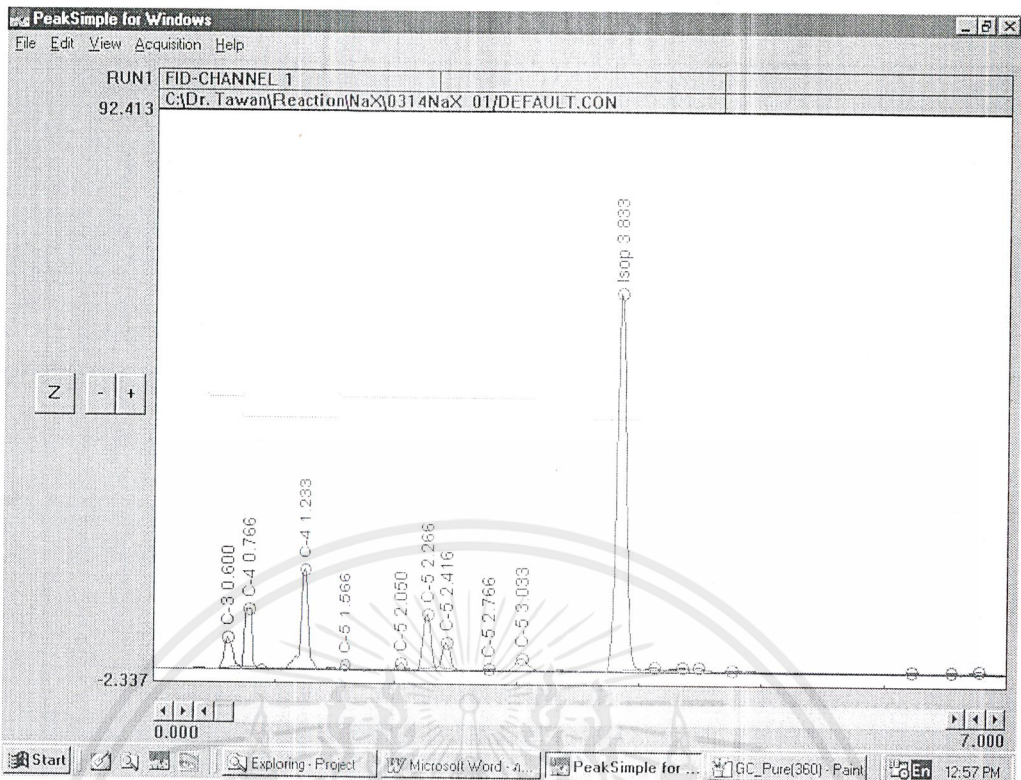


รูปที่ ง.10 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยา BaCO_3 ที่อุณหภูมิ 475°C

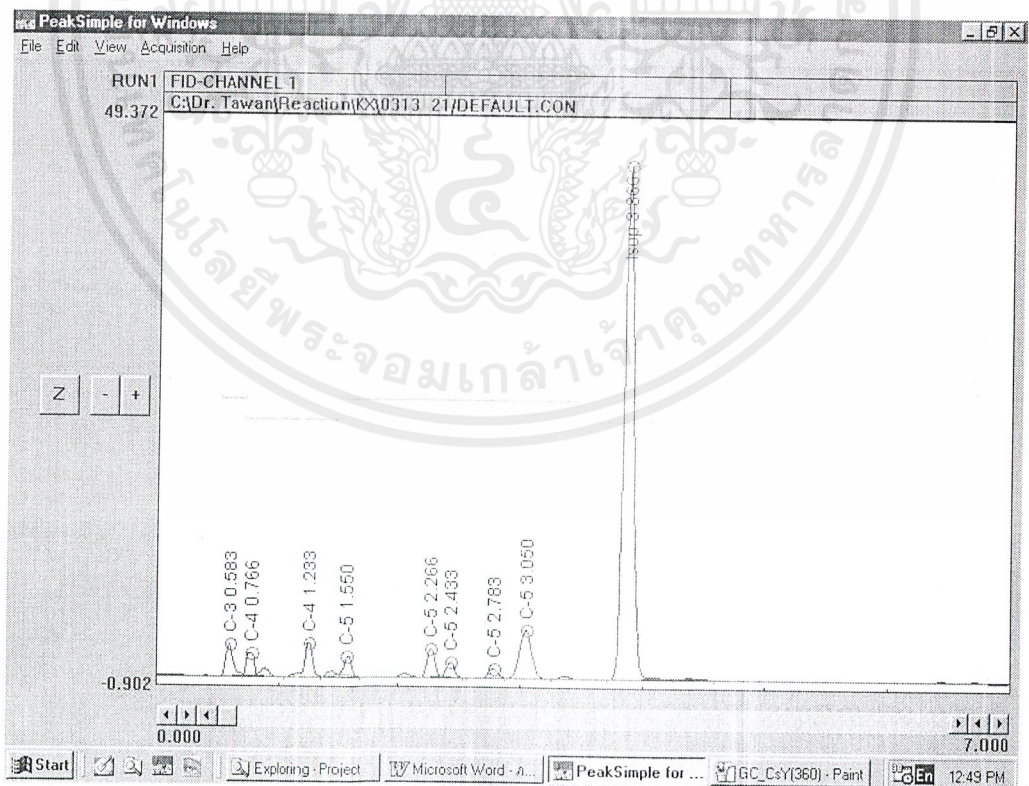


รูปที่ ง.11 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยา BaO ที่อุณหภูมิ 360°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

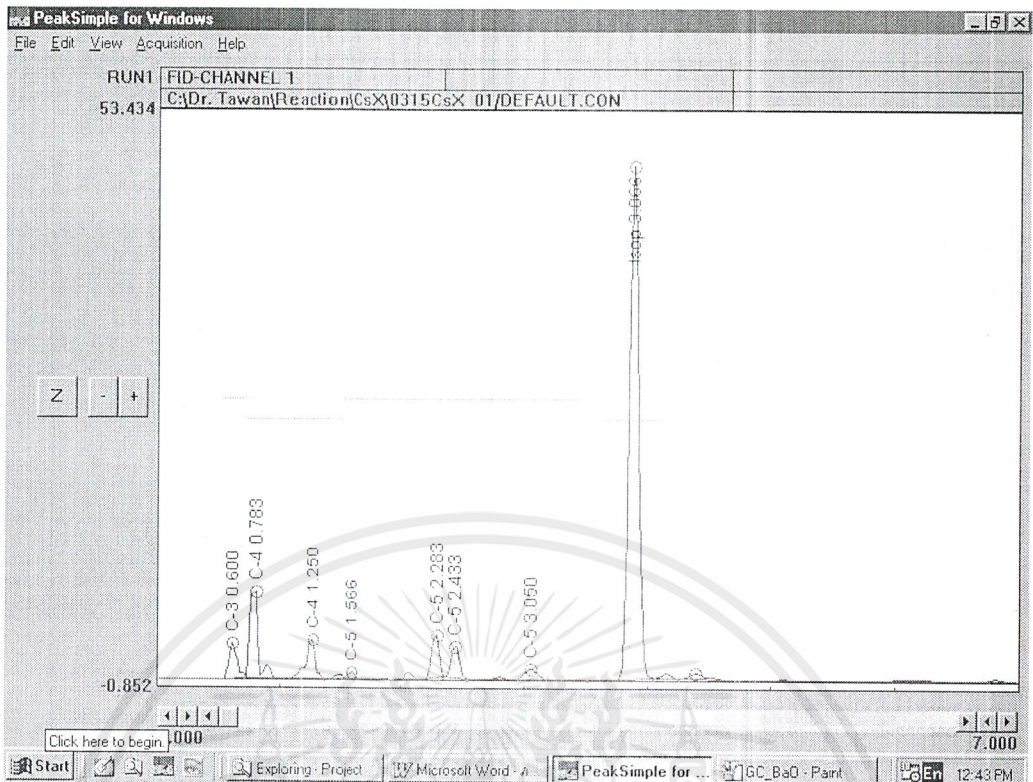


รูปที่ ง.12 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยา NaX ที่อุณหภูมิ 360°C

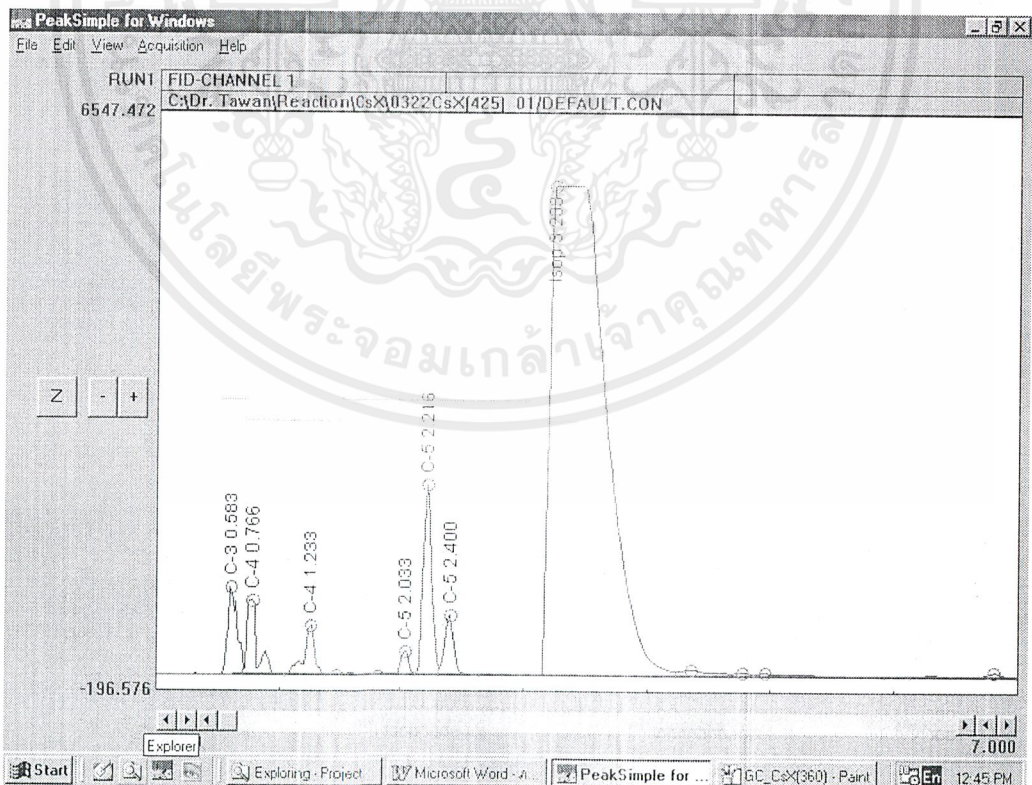


รูปที่ ง.13 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยา KX ที่อุณหภูมิ 360°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

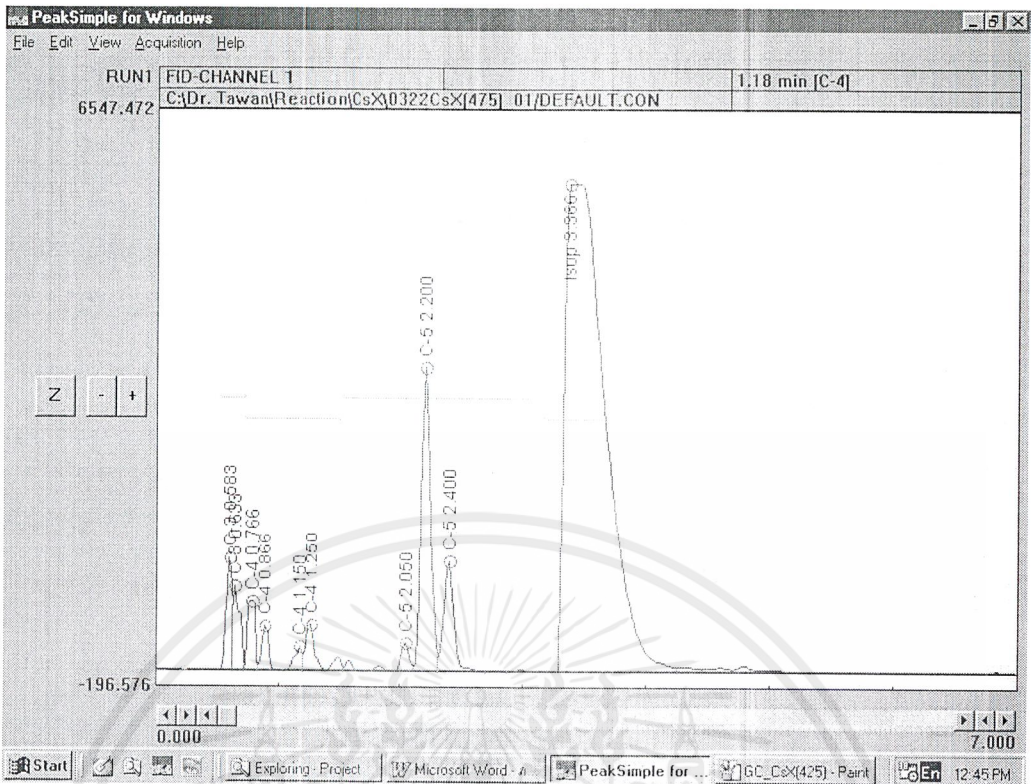


รูปที่ ง.14 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยา CsX ที่อุณหภูมิ 360°C

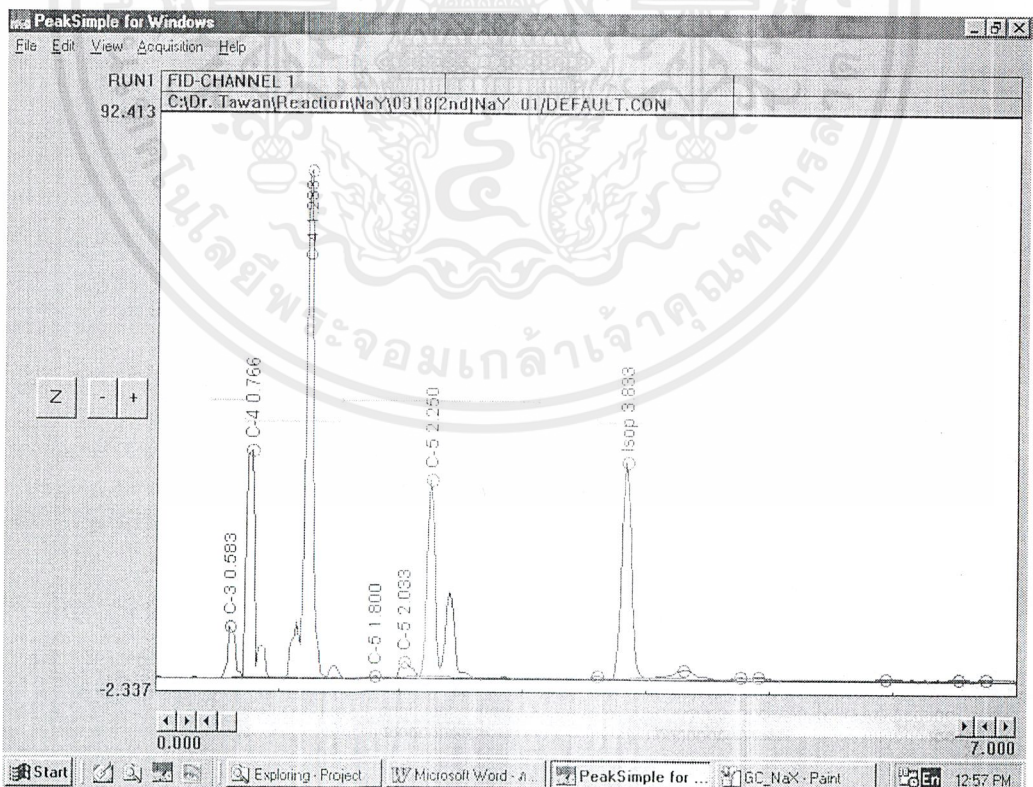


รูปที่ ง.15 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยา CsX ที่อุณหภูมิ 425°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

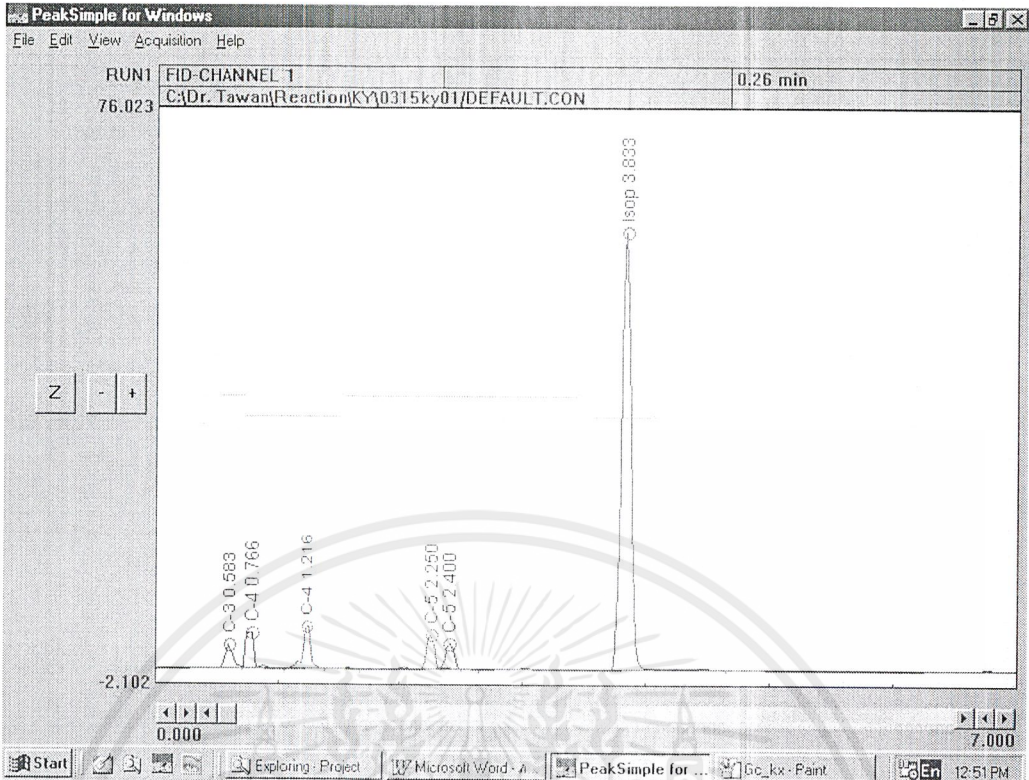


รูปที่ ง.16 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CsX ที่อุณหภูมิ 475°C

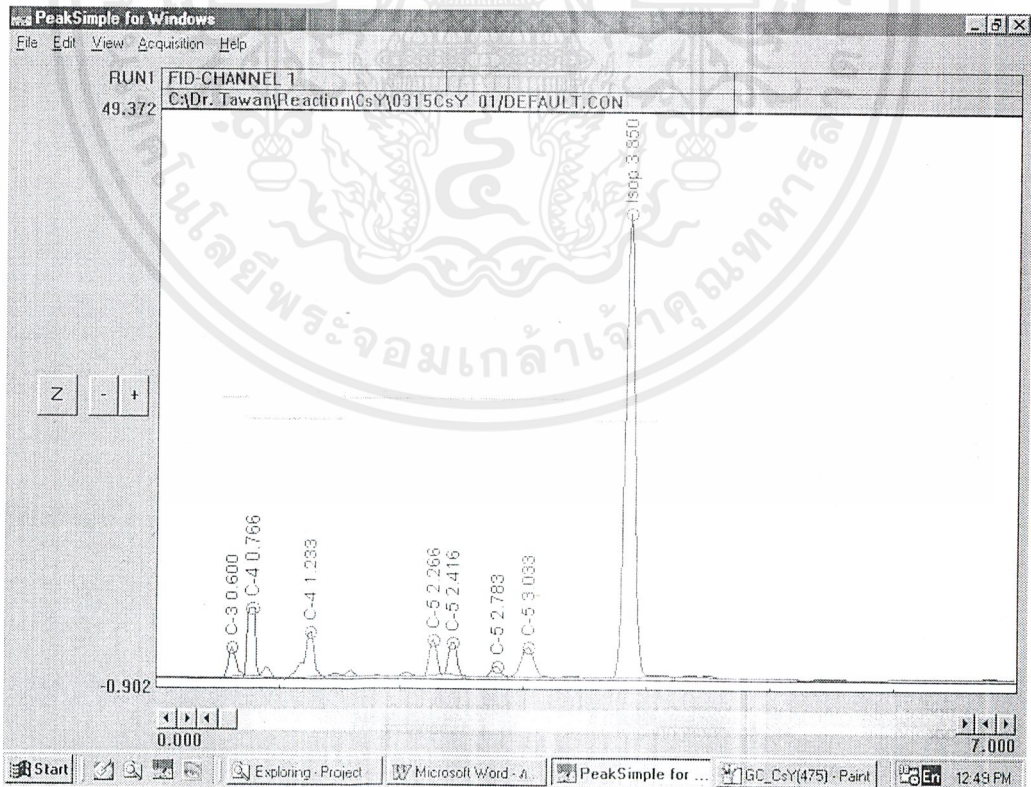


รูปที่ ง.17 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NaY ที่อุณหภูมิ 360°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

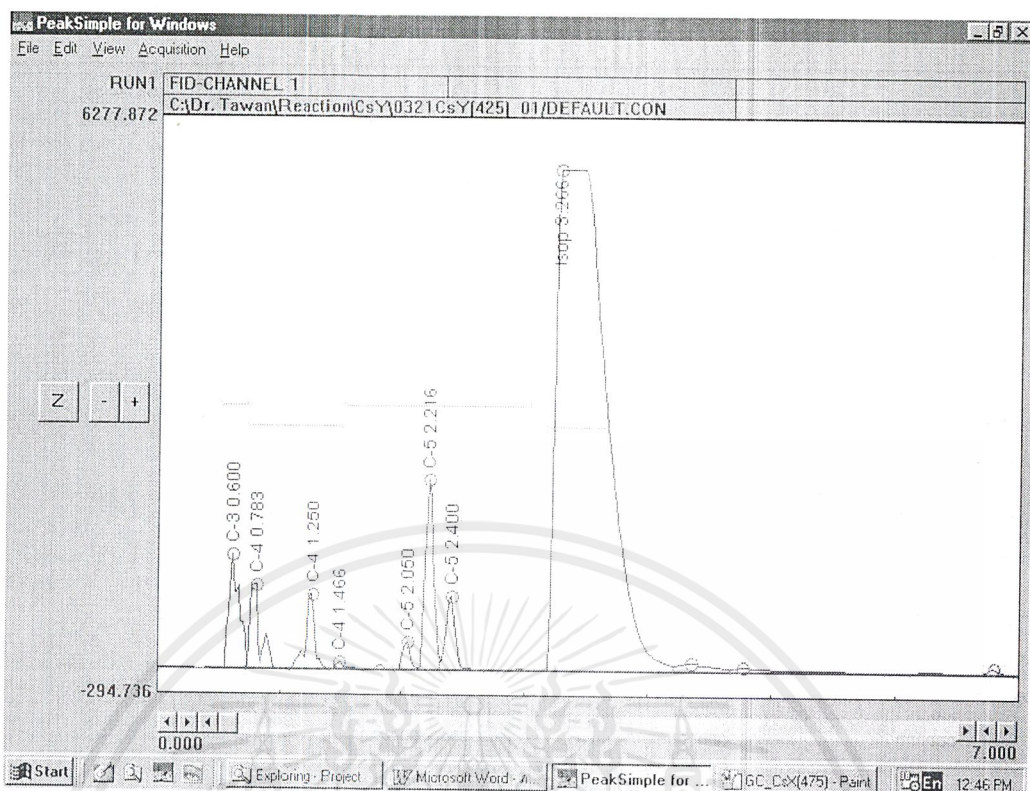


รูปที่ ง.18 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KY ที่อุณหภูมิ 360°C

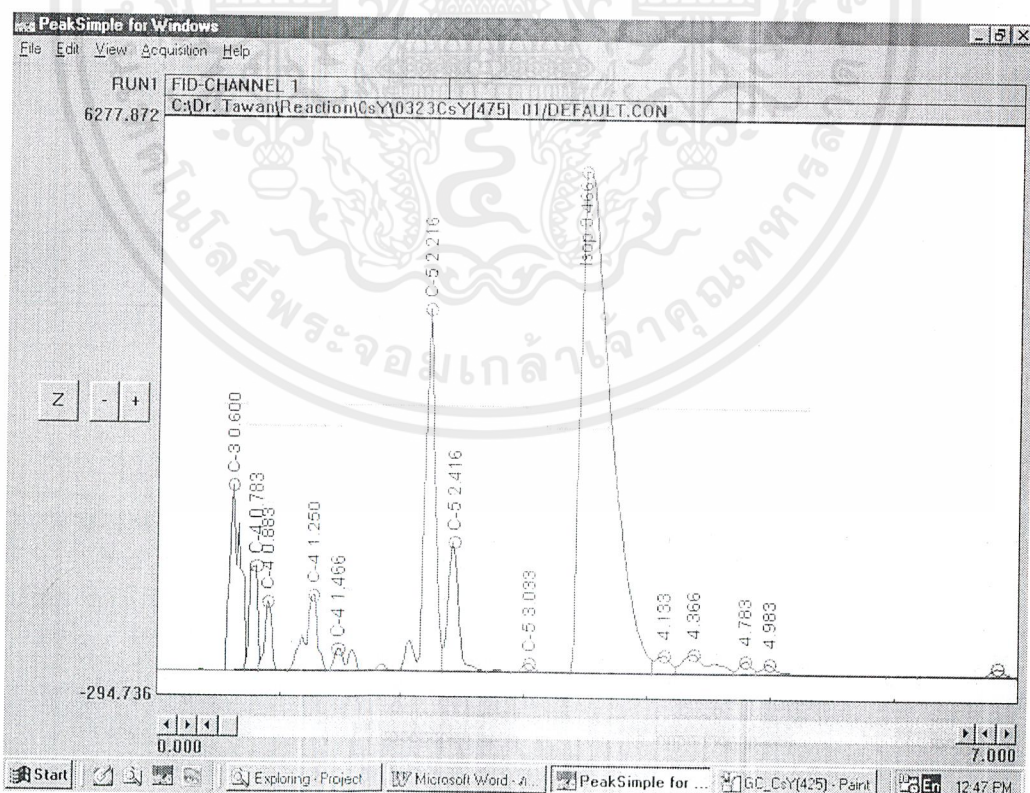


รูปที่ ง.19 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CsY ที่อุณหภูมิ 360°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.20 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CsY ที่อุณหภูมิ 425°C

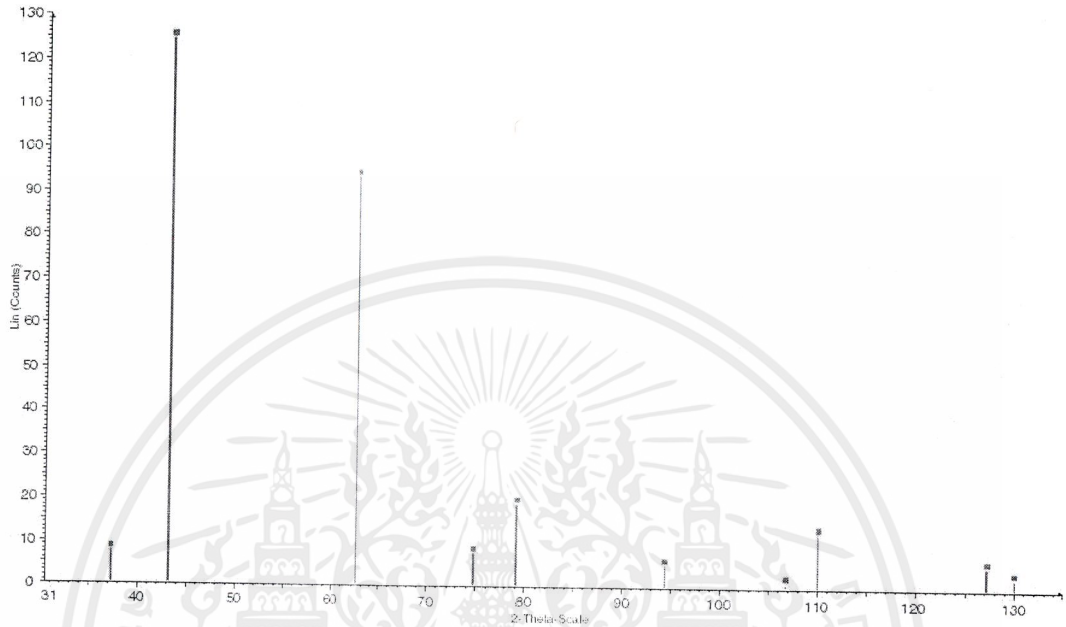


รูปที่ ง.21 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CsY ที่อุณหภูมิ 475°C

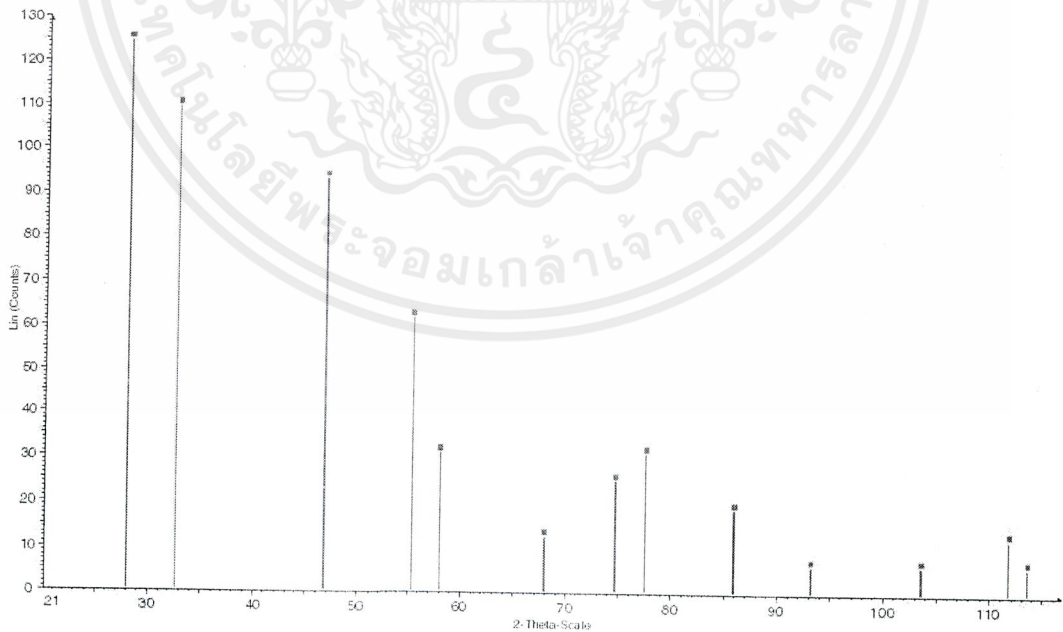
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

รูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา

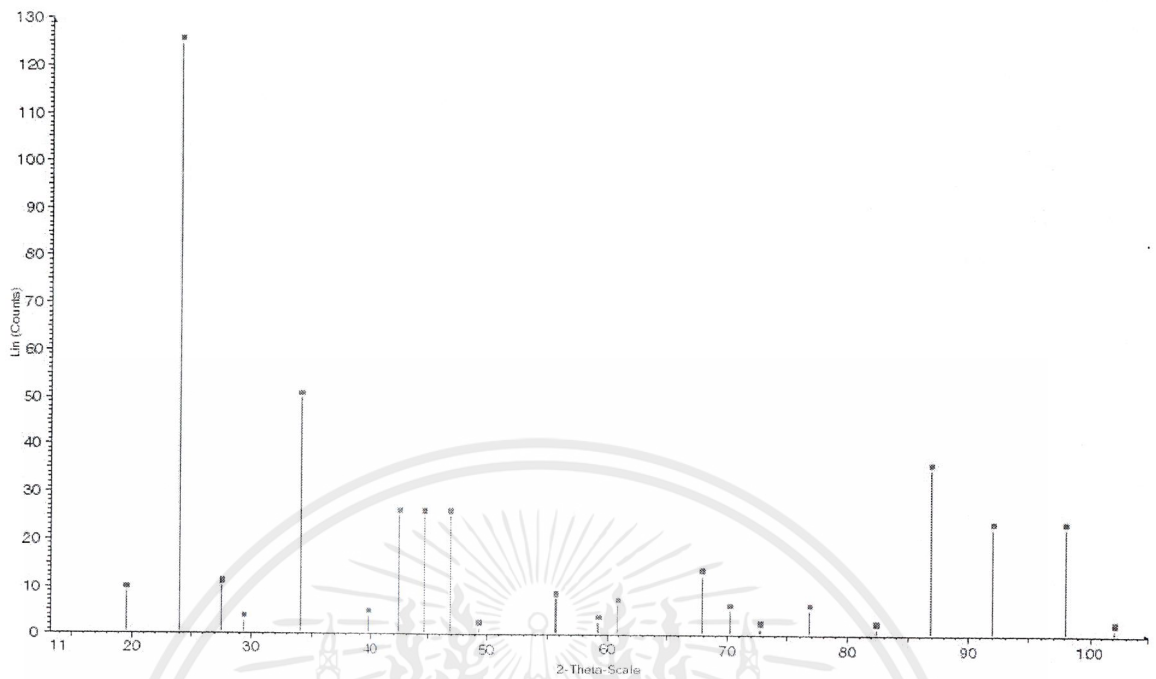


รูปที่ จ.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO



รูปที่ จ.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา BaO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

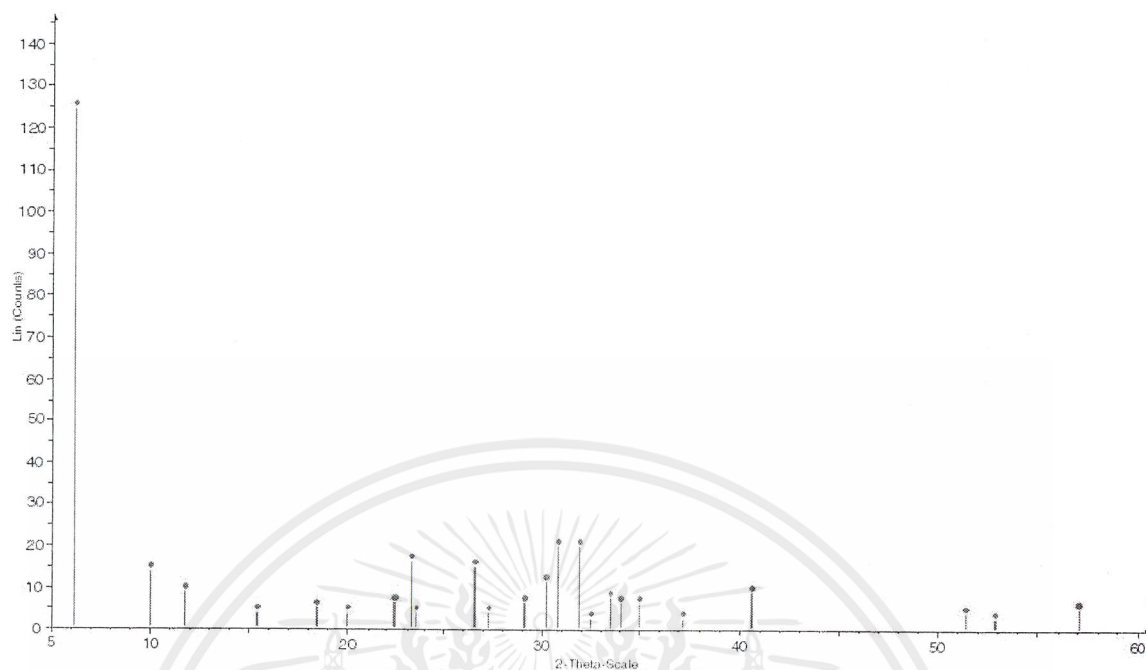


รูปที่ ๑.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา BaCO₃



รูปที่ ๑.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา NaX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

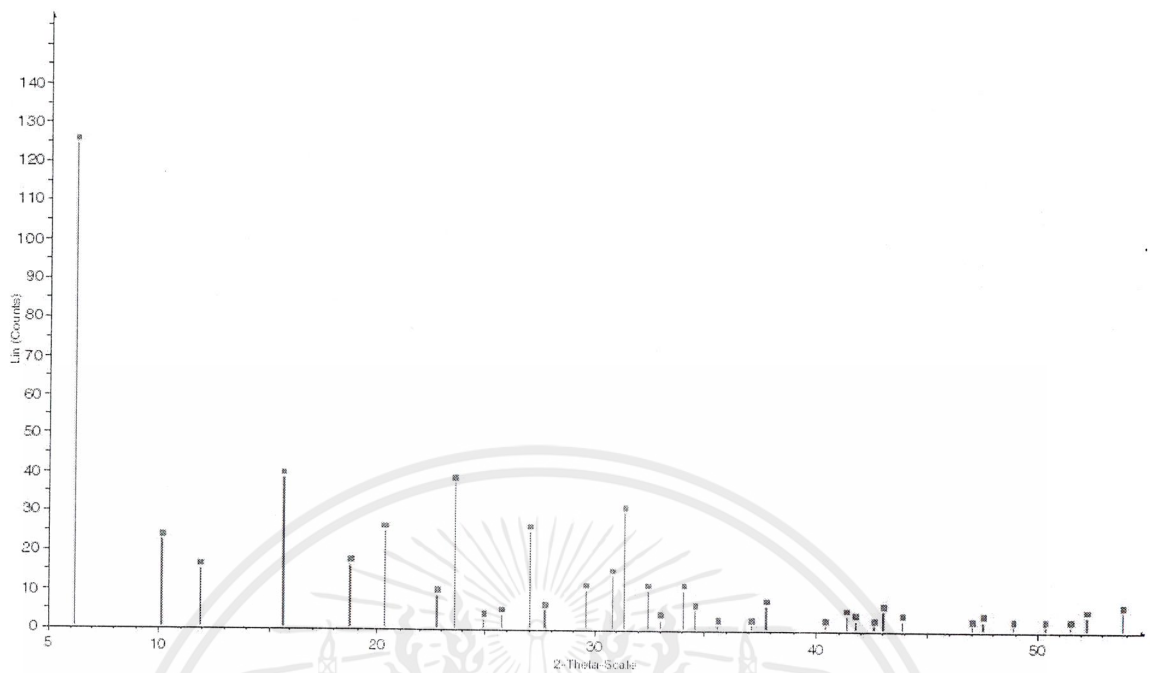


รูปที่ ๑.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา KX

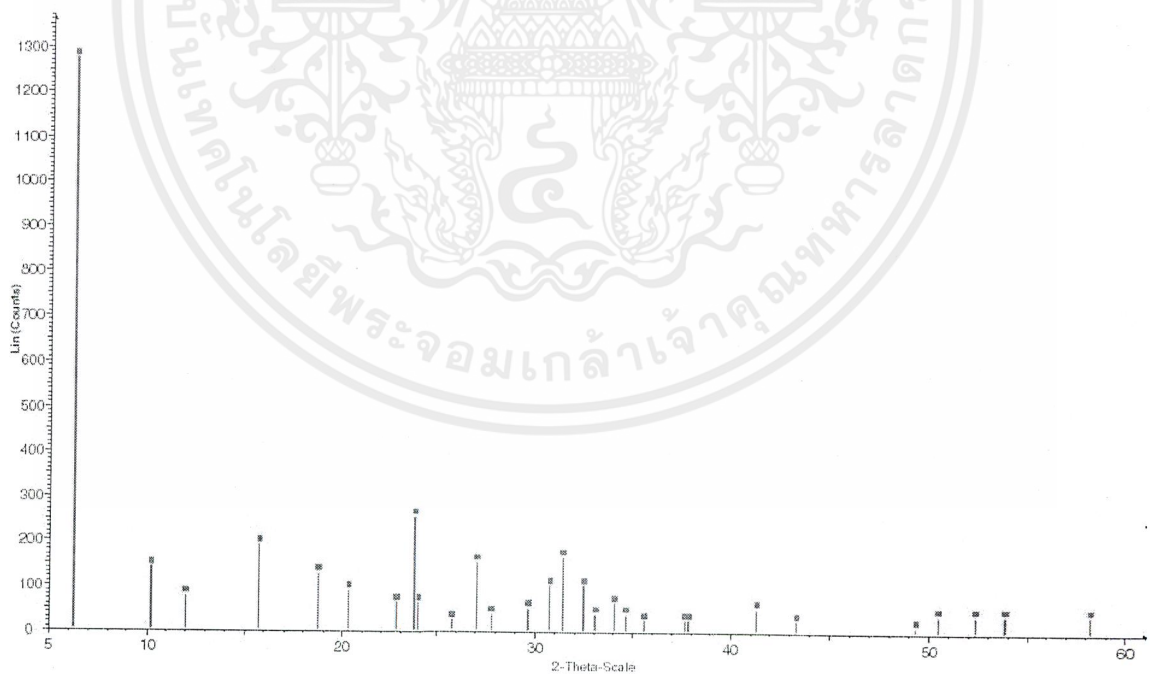


รูปที่ ๑.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา CsX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑.๗ รูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา NaY



รูปที่ ๑.๘ รูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา KY

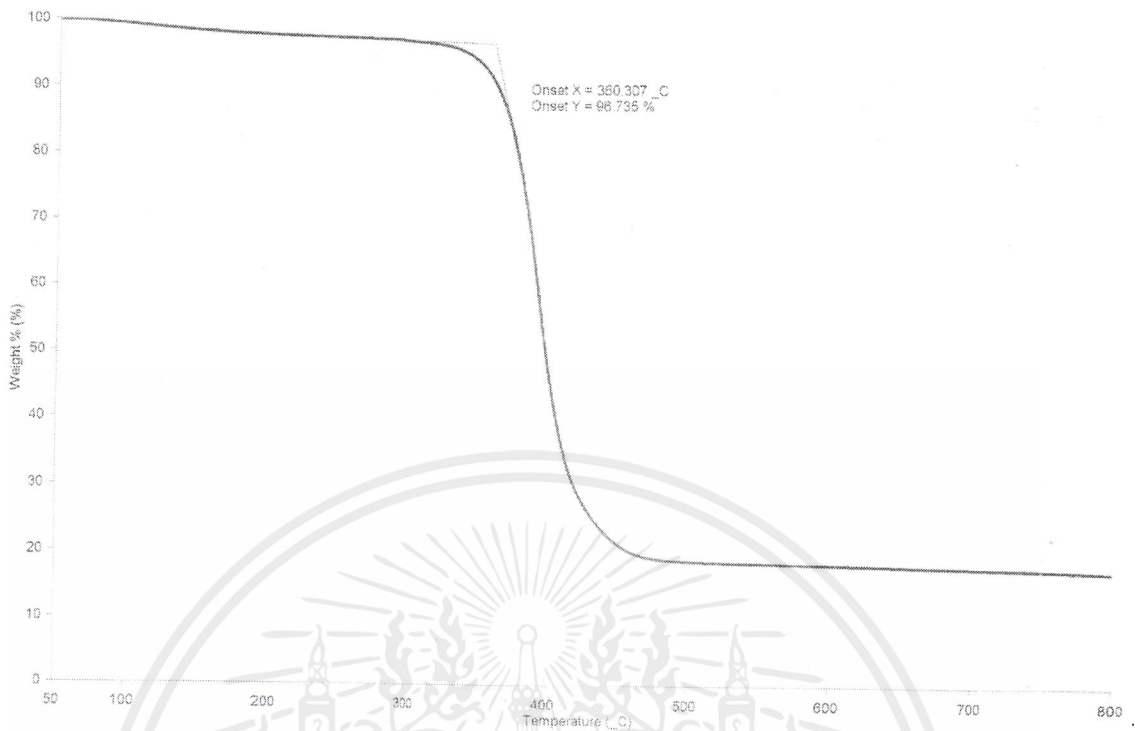
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ
เทอร์โมแกรมของเครื่อง Thermogravimetric Analyzer

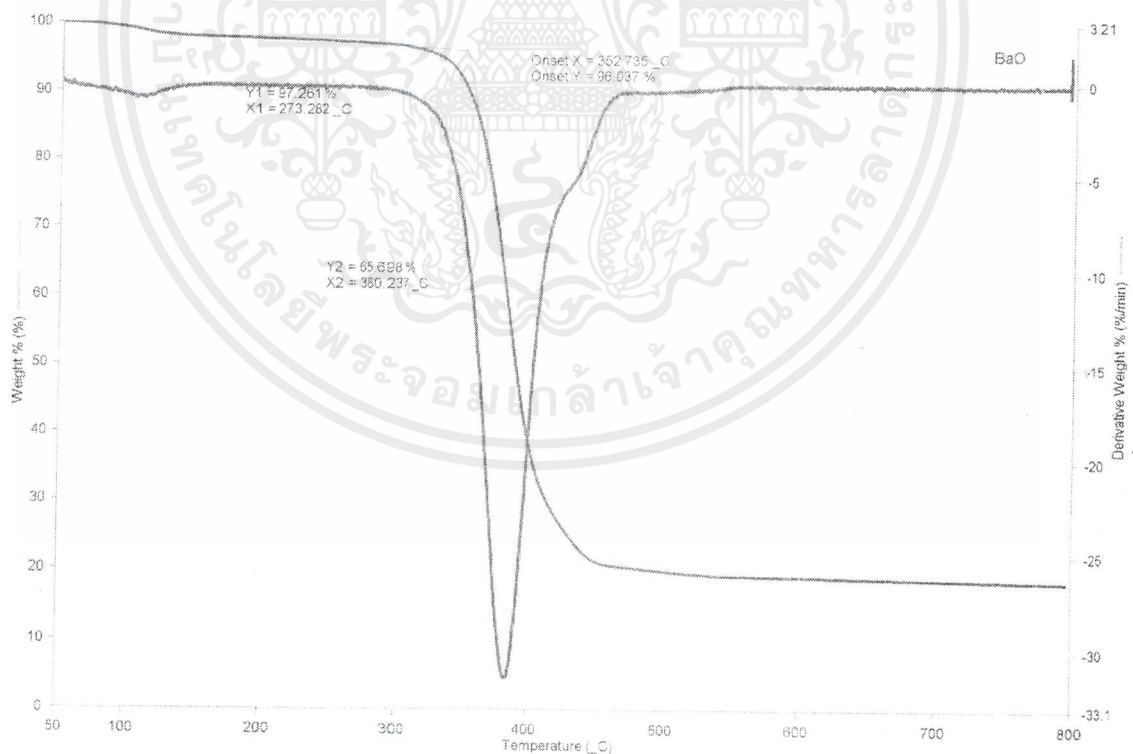


รูปที่ จ.1 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

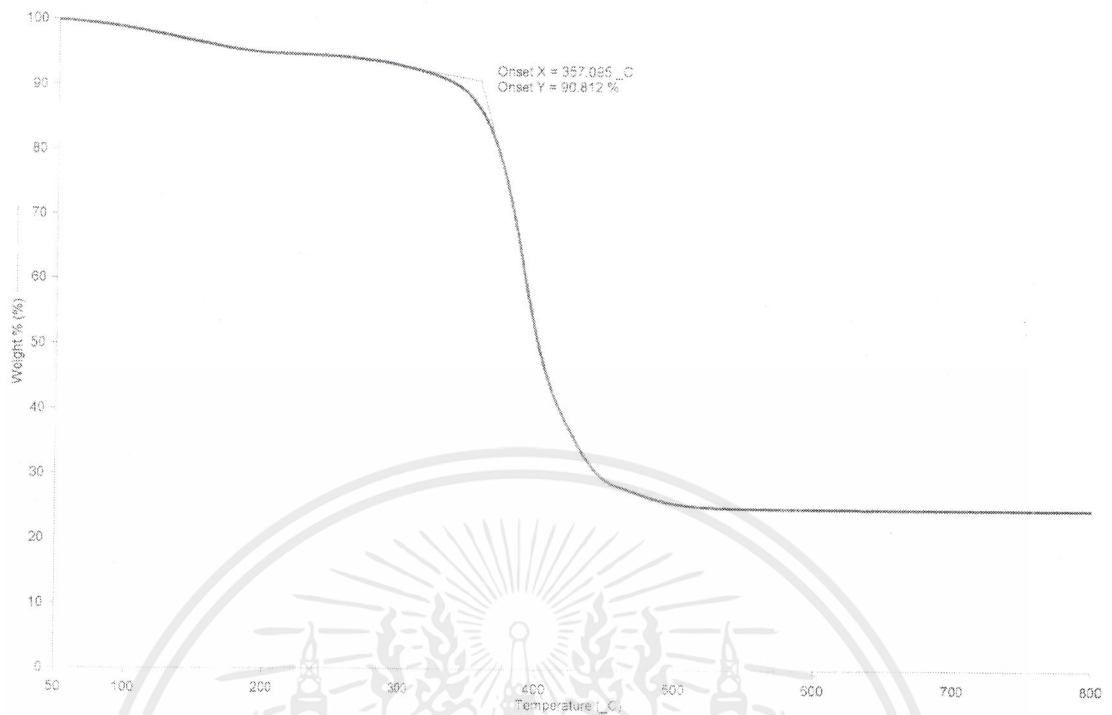


รูปที่ จ.2 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา MgO

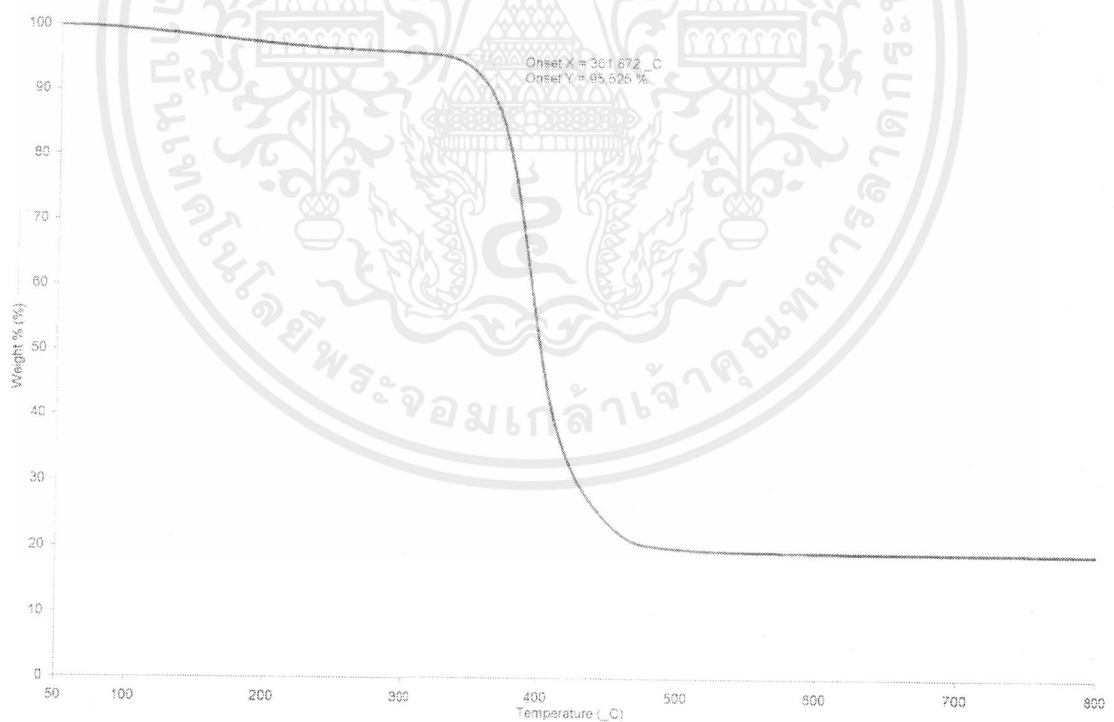


รูปที่ จ.3 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา BaO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

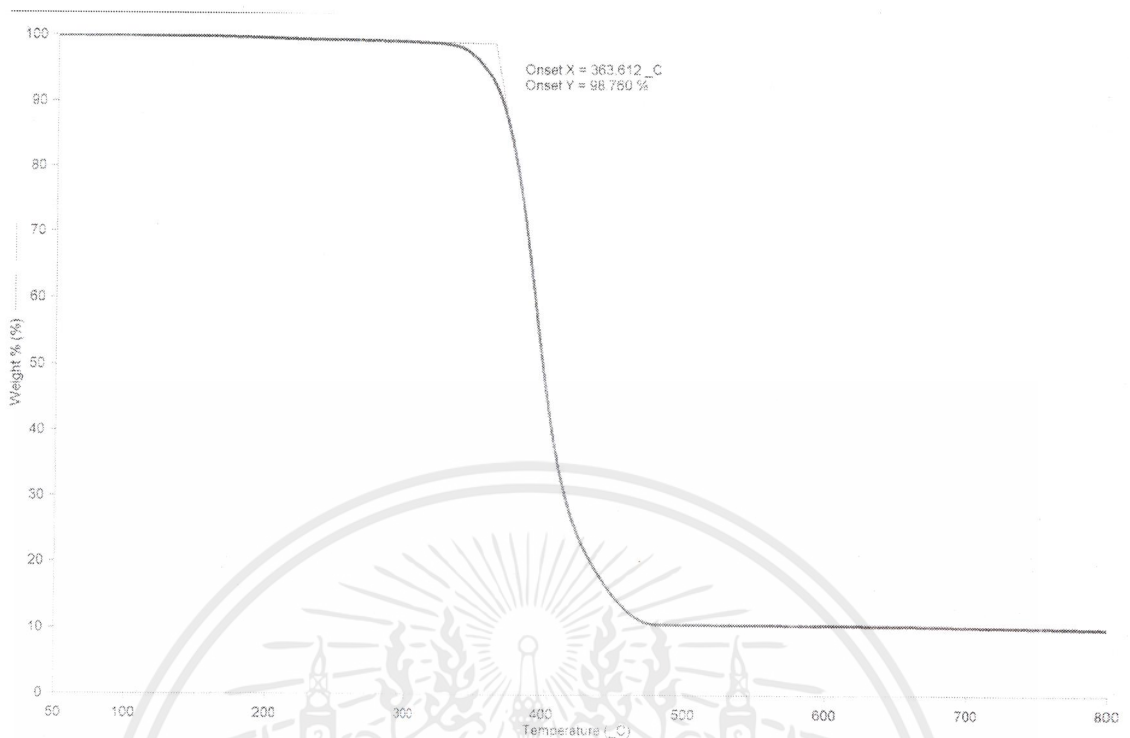


รูปที่ ๔.4 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา BaCO_3

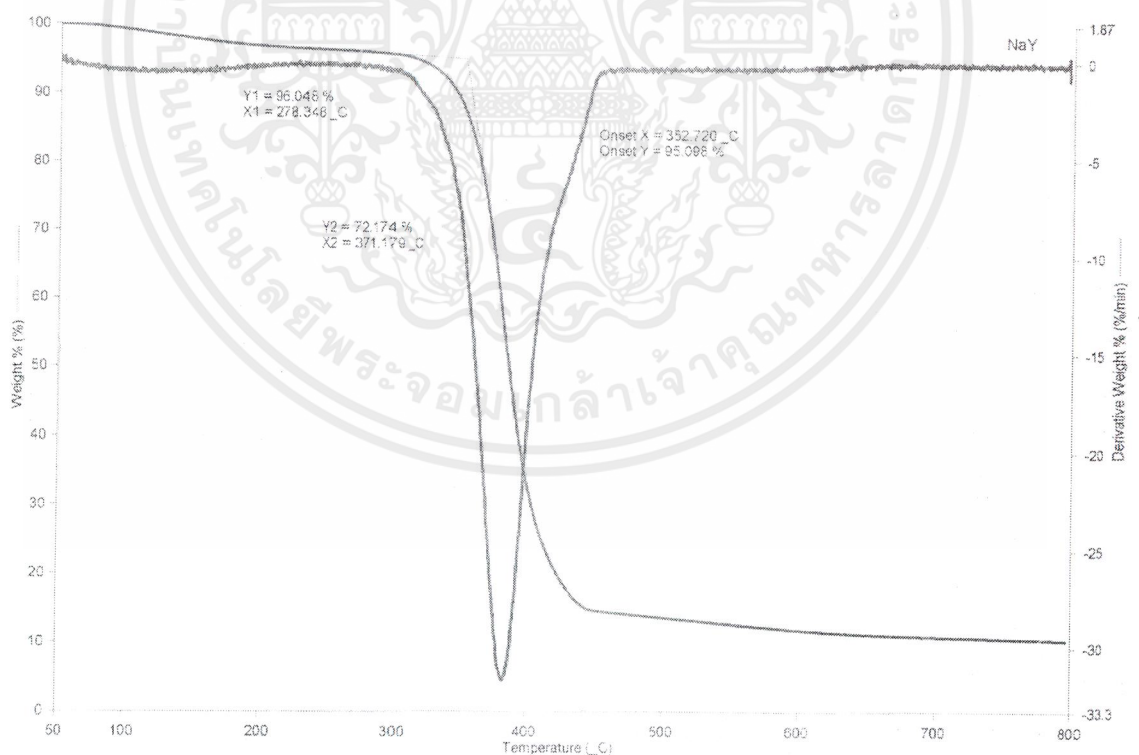


รูปที่ ๔.5 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา KX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

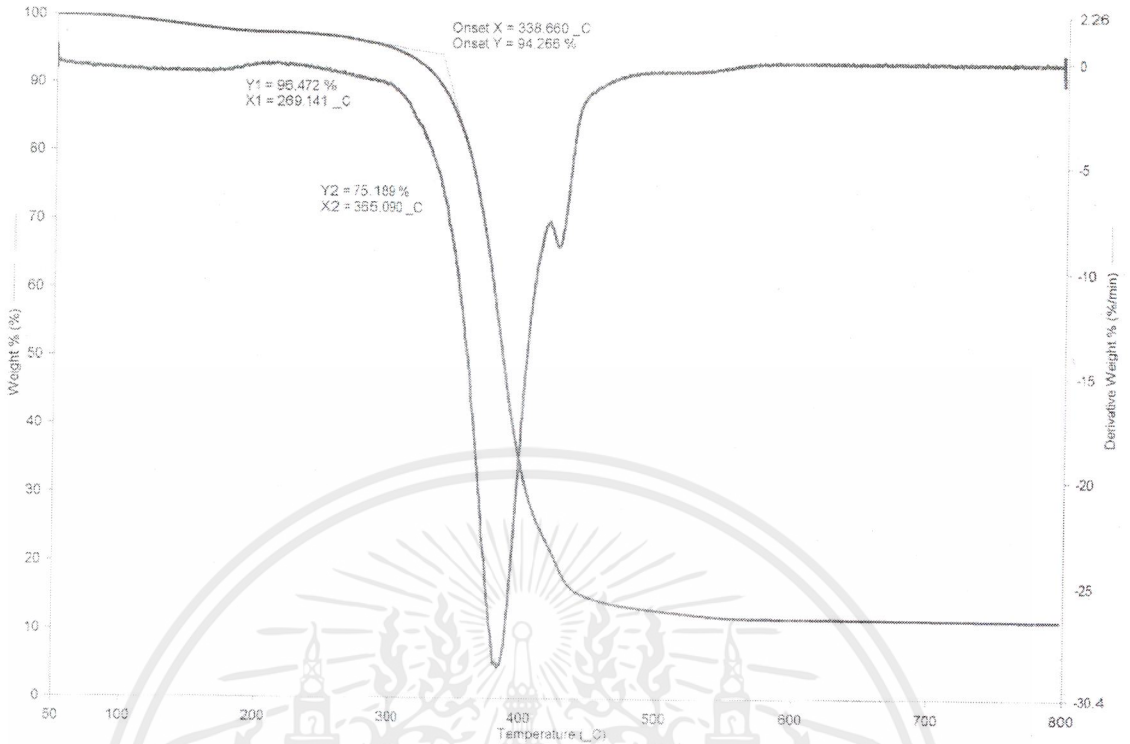


รูปที่ ๖.6 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา CsX

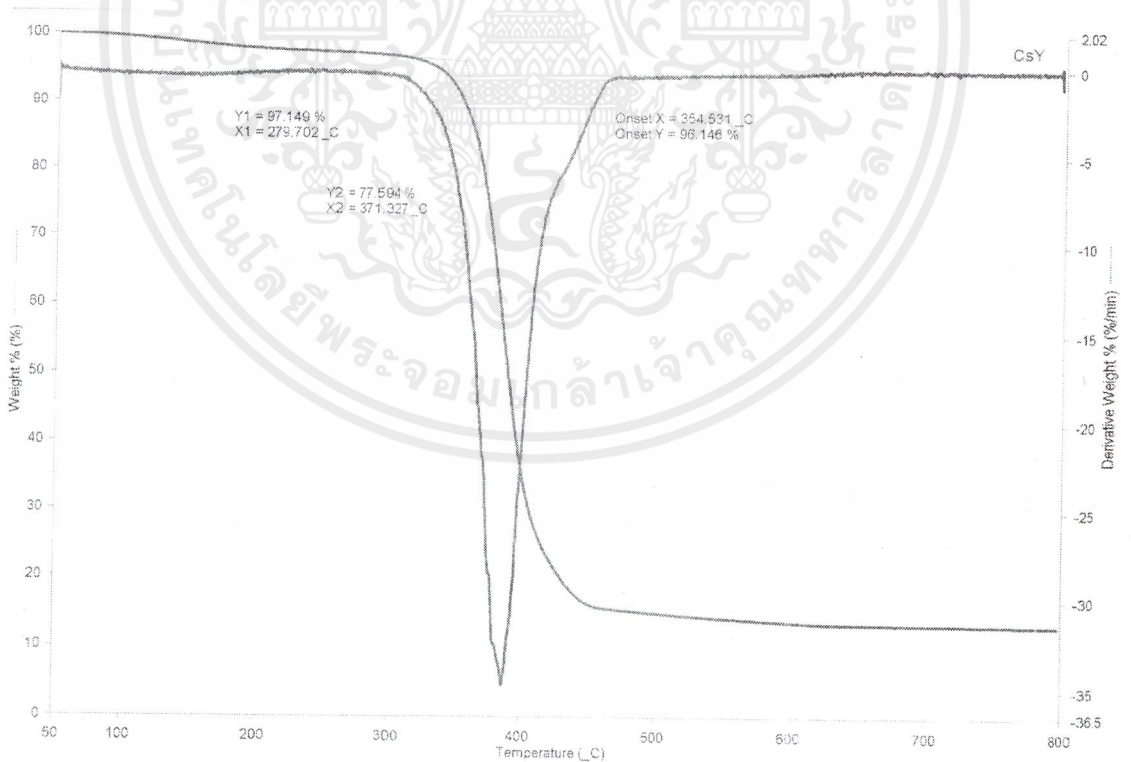


รูปที่ ๖.7 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา NaY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๘.8 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา KY



รูปที่ ๘.9 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไอโซพรีนโดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา CsY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้