

ซีไอไลต์จากถ้ำลอยซานอ้อยเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์
สารทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิง



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 116971
วัน,เดือน,ปี..... 21 ส.ค. 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปี พ.ศ. 2551

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12/5/0073
b.....
i.....

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ที่เป็นสารทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงจากเมทานอล โดยทำปฏิกิริยาจัดน้ำของเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของขานอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอยของขานอ้อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์บีต้า และใช้เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetraethylammonium hydroxide, TEOH) เป็นสารเคมีกำหนดโครงสร้าง สภาพะในการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 135 องศาเซลเซียส ความดันเริ่มต้นคงที่ 3 บาร์ของไนโตรเจน เวลาในการตกผลึก 48 ชั่วโมงและอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 15 จากนั้นนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ไปปรับปรุงโดยเติม Zr และ Ni ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค XRD และ BET แล้วนำไปทดสอบปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเมทานอลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 200 225 250 และ 275 องศาเซลเซียส โดยมีการป้อนเมทานอลที่มีอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อไนโตรเจนเป็น 1 ต่อ 4 ซึ่งมีอัตราไหลรวมเท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อนาที จากการทดลองพบว่าซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์ โดยมีค่าร้อยละผลได้สูงที่สุดที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 225 องศาเซลเซียสเท่ากับ 80.5 และซีโอไลต์ที่ถูกปรับปรุงด้วย Zr และ Ni มีค่าร้อยละผลได้สูงสุดเท่ากับ 57.2 และ 55.2 ตามลำดับ

ABSTRACT

The aim of this research is to study the possibility of synthesis of dimethyl ether (DME), an alternative fuel, from methanol using methanol dehydration over beta zeolite catalysts. Beta zeolite has been synthesized from bagasse fly ash using hydrothermal process. Silica extracted from bagasse fly ash by sodium hydroxide solution was used as a precursor to synthesize the beta zeolite. Tetraethylammonium hydroxide (TEAOH) was used as a template. Beta zeolite was synthesized at a constant hydrothermal temperature of 135 °C, initial pressure of 3 bars pressured by nitrogen, the crystallization time was 48 hours and silicon to aluminium ratio was 15. Next, Beta zeolite has been ion exchange with Zr and Ni. Then, the synthesized beta zeolite catalysts were characterized using X-ray diffraction spectroscopy and BET surface area. The dehydration of methanol reactions over beta zeolite catalysts were carried out in fixed-bed reactor at 200 225 250 and 275 °C with a constant total flow rate of methanol and nitrogen of 60 ml/min with methanol to nitrogen ratio of 1:4. From the result, it was found that the synthesized zeolite showed the good performance for the methanol conversion to dimethyl ether and had a percent yield for dimethyl ether of 80.5 at 225 °C. Zr-Beta zeolite and Ni-Beta zeolite had percent yield for dimethyl ether of 57.2 and 55.2, respectively.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการงานวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1.1 ชานอ้อย	3
2.1.2 ซิลิกา	6
2.1.3 ซีโอไลต์	7
2.1.4 ซีโอไลต์ชนิดบีต้า	13
2.1.5 ไคเมทิลอิมิเทอร์	14
2.1.6 การแลกเปลี่ยนไอออน	20
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	21
3.1 สารเคมี	21
3.2 วิธีการทดลอง	21
3.2.1 การเตรียมซิลิกาจากเถ้าลอยของชานอ้อย เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้น ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์บีต้า	21
3.2.1.1 การสกัดซิลิกาบริสุทธิ์จากเถ้าลอยของชานอ้อย	21
3.2.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดบีต้า	23
3.2.2.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดบีต้าจากแหล่งซิลิกาที่สกัดจาก เถ้าลอยของชานอ้อย	22
3.2.2.2 การเผาครั้งที่ 1	24
3.2.2.3 การแลกเปลี่ยนไอออนด้วยแอม โมเนียมไนเตรท	24
3.2.2.4 การเผาครั้งที่ 2	24
3.2.2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะ	24
3.2.2.6 การคำนวณหาขนาดของผลึกจากการกว้างออก ของพีค XRD ด้วยสมการเชอร์เรอร์	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3 การนำซีโอโลต์ชนิดบีต้าที่สังเคราะห์ได้มาทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับ โลหะ	25
3.2.3.1 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน	25
3.2.4 การนำซีโอโลต์ชนิดบีต้าที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะ มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของการเปลี่ยนเมทานอลเป็น ไดเมทิลอีเทอร์	25
3.2.4.1 การทดสอบปฏิกิริยา	25
3.2.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	28
4.1 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยของชานอ้อย	28
4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของซิลิกาอสัณฐานที่สกัดจากเถ้าลอยของชานอ้อย	30
4.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของซีโอโลต์บีต้าที่สังเคราะห์ได้	30
4.4 การทดสอบปฏิกิริยา	33
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก ผลงานวิชาการ	40

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ค่า Si/AI ของเจลที่สามารถใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ	10
2.2	สมบัติทางกายภาพและทางเชิงเพลิงของไดเมทิลอีเทอร์และเชิงเพลิงชนิดต่าง ๆ	17
3.1	สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดบีต้าจากเถ้าลอยของชานอ้อย	24
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากชานอ้อย	29
4.2	ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์บีต้าจากแหล่งซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอยของชานอ้อยที่ใช้เวลาในการตกผลึก 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/AI) เท่ากับ 15	31



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	โครงสร้างทฤษฎีของซีโอไลต์	8
2.2	โครงสร้างตติยภูมิของซีโอไลต์	9
2.3	โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดบีต้า	14
2.4	ไดเมทิลอีเทอร์เหลว	16
2.5	การใช้ไดเมทิลอีเทอร์ทดแทนแอลพีจีหรือแก๊สหุงต้มที่ใช้ในครัวเรือน	16
2.6	การใช้ไดเมทิลอีเทอร์ทดแทนน้ำมันดีเซล	17
2.7	การผลิตไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลผ่านปฏิกิริยาดังน้ำออก	18
2.8	การผลิตไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์	18
2.9	โรงงานผลิตไดเมทิลอีเทอร์	18
2.10	ประโยชน์ของไดเมทิลอีเทอร์	19
2.11	โรงงานผลิตไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากแก๊สธรรมชาติ ที่มีกำลังในการผลิต 100 ตันต่อวัน ณ ประเทศญี่ปุ่น	20
3.1	แผนผังขั้นตอนการทดลอง	22
3.2	เครื่องอัดความดัน	23
3.3	แผนภาพอย่างง่ายของชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	26
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยจากชานอ้อย	29
4.2	XRD ของซิลิกาอสัณฐานที่สกัดจากถ้ำลอยของชานอ้อย	30
4.3	XRD ของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์จากแหล่งซิลิกาในเชิงพาณิชย์	31
4.4	XRD ของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยของชานอ้อย	32
4.5	SEM ของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์จากซิลิกาที่สกัดจากถ้ำลอยของชานอ้อยที่มีอัตราส่วน ของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 15, เวลาในการตกผลึก 48 ชั่วโมง	32
4.6	ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละการแปลงผันของเมทานอล	33
4.7	ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละการเลือกเกิดของ ไดเมทิลอีเทอร์	34
4.8	ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละผลได้ของไดเมทิลอีเทอร์	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

อ้อยเป็นที่รู้จักกันว่าใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตน้ำตาลของโลกมาช้านาน ผลผลิตอ้อยที่ปลูกใน 20 ประเทศทั่วโลก มีมากกว่า 1,300 ล้านตัน [1] อ้อยเป็นพืชที่สำคัญในการผลิตพลังงาน ทั้งในรูปของพลังงานที่ใช้ในการบริโภค คือ น้ำตาล และยังสามารถนำกากอ้อยไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานที่ใช้ในการอุปโภคคือ ไฟฟ้า และปัจจุบันกำลังนำไปผลิตเอทานอล เพื่อเป็นส่วนผสมกับน้ำมัน ซึ่งจะประหยัดเงินตราในการซื้อน้ำมันจากต่างประเทศ [2] ซึ่ง ณ วันนี้ประเทศไทยนำเข้าน้ำมันดิบมากถึง 5 หมื่นล้านลิตรต่อปี คิดเป็นเม็ดเงิน 7-8 แสนล้านบาท เมื่อน้ำมันแพงย่อมส่งผลกระทบต่อเนื่องถึงต้นทุนในการผลิตสินค้าและบริการที่จะเชื่อมโยงสู่ราคาสินค้า และบริการที่จะปรับสูงขึ้น กระทบต่อค่าครองชีพจนสังคมต้องร้องหาพลังงานทางเลือกอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้[3]

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยทั่วไปหมายถึงอ้อยโรงงาน ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ประเทศไทยบริโภคน้ำตาลปีละ 1.9 ล้านตัน [4] และไทยสามารถส่งออกได้เฉลี่ย 4-5 ล้านตัน ในปี 2550 และปี 2551 [5] ทำให้ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกน้ำตาลอันดับที่ 4 ของโลก [6] แต่ปริมาณผลผลิตอ้อยในแต่ละปีนั้นไม่มีความแน่นอน ขึ้นอยู่กับพื้นที่ปลูกและผลผลิตต่อไร่ [7] ผลผลิตอ้อยรวมในปี 2549-2550 อยู่ระหว่าง 60-70 ล้านตัน โดยผลผลิตอ้อยของไทยปี 2551 คาดว่าจะสูงขึ้น 14.91% [4]

ขานอ้อยส่วนใหญ่ได้ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการต้มน้ำ และเดินเครื่องจักรตามโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ จึงได้มีผู้คิดค้นหาวิธีนำขานอ้อยไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เช่น การผลิตเชื้อและกระดาษ อย่างไรก็ตาม การใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงก็ยังจัดว่าเป็นการใช้ประโยชน์ที่ไม่คุ้มค่าเท่าที่ควร อีกทั้งกระดาษที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยนั้นก็ยังอยู่ในเกณฑ์คุณภาพต่ำ เนื่องจากกระบวนการเตรียมเยื่อมันได้ทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลงไปจากเดิม [8]

งานวิจัยเกี่ยวกับเถ้าลอยของแกลบพบว่าสามารถนำไปผลิตเป็นสารดูดซับ โมเลกุล (Molecular sieve) และซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ ได้ [9] ซึ่งซีโอไลต์เหล่านั้นถูกใช้ประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมเคมี เช่น อุตสาหกรรมผลิตสารซักล้าง (Detergents) กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) กระบวนการแยกสาร (Separation) และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเทคโนโลยีการกลั่นและอุตสาหกรรมปิโตรเคมีต่าง ๆ เช่น กระบวนการแตกตัว (Fluid Catalytic Cracking, FCC) กระบวนการไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) กระบวนการแยกไข (Dewaxing) กระบวนการเปลี่ยนเมทานอลเป็นแก๊สโซลีน (Methanol to Gasoline, MTG) และ กระบวนการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ (Methanol to Olefins, MTO) เป็นต้น [10] และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการสังเคราะห์ซีโอไลต์บีตาโดยใช้ซิลิกาจากแกลบข้าว โดยนำซิลิกาจากแกลบข้าวมาใช้เป็นสารตั้งต้น ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์บีตาด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มัล และใช้โซเดียมเตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกำหนดโครงสร้าง [11] จึงได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มมูลค่าของเถาของชานอ้อยโดยการผลิตซิลิกาเจลจากเถาลอยชานอ้อยเนื่องจากในเถาลอยชานอ้อยมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูงซึ่งพบว่าซิลิกาเจลที่ผลิตได้สามารถใช้เป็นสารดูดความชื้นได้ [12] และมีการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถาลอยชานอ้อย ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานหลอมตะกั่วจากเบตเตอรีเก่าได้ [13] และเถาลอยของชานอ้อยยังมีความน่าสนใจเนื่องจากว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถาลอยของชานอ้อยมีปริมาณซิลิกาใกล้เคียงกับเถาลอยของแกลบ โดยมีปริมาณซิลิกาสูงถึงร้อยละ 90 จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดบีตาได้ [14]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

สังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดบีตาจากเถาลอยของชานอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์ซึ่งเป็นสารทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงได้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. การเพิ่มมูลค่าของเถาลอยชานอ้อยให้สูงขึ้น
2. การลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม
3. ข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาการปรับปรุงซีโอไลต์ชนิดบีตาด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ชานอ้อย

ชานอ้อย (bagasse) หมายถึงเศษเหลือจากการหีบเอาน้ำอ้อยออกจากท่อนอ้อยแล้ว เมื่อท่อนอ้อยผ่านลูกหีบชุดแรก อาจจะมีน้ำอ้อยตกค้างเหลืออยู่ ยังหีบออกไม่หมด แต่พอผ่านลูกหีบชุดที่ 3-4 ก็จะมีน้ำอ้อยตกค้างอยู่น้อยมาก หรือแทบจะไม่เหลืออยู่เลย คือเหลือแต่เส้นใยล้วน ๆ จึงมีผลพลอยได้อันดับต่อมา ได้แก่ ฟิลเตอร์มุด (filter mud) หรือบางแห่งก็เรียกว่า ฟิลเตอร์เพรสเค้ก หรือฟิลเตอร์มุด (filter-press cake, filter muck) ซึ่งจะถูแยก หรือกรอง หรือทำให้น้ำอ้อยบริสุทธิ์ โดยวิธีอื่นใดก็ตาม สิ่งสกปรกที่แยกออกมาก็คือ ฟิลเตอร์เค้ก และผลพลอยได้อันดับสุดท้ายจากโรงงานน้ำตาลก็ได้แก่ กากน้ำตาล หรือโมลาส (molasses) ซึ่งมีลักษณะข้น เหนียว สีน้ำตาลแก่ ที่ไม่สามารถจะสกัดเอาน้ำตาลออกได้อีกโดยวิธีปกติ

ในอดีตมักจะใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับต้มน้ำในหม้อน้ำให้เดือดแล้ว ใช้กำลังไอน้ำสำหรับเดินเครื่องจักรไอน้ำและสำหรับกำเนิดไฟฟ้าในระยะเวลาดังกล่าว ชานอ้อยในยุคก่อน ๆ ยังมีน้ำตาลที่หีบออกไม่หมดหลงเหลืออยู่มาก และเป็นภาระสะดวกในการที่ป้อนชานอ้อยจากลูกหีบลูกสุดท้ายเข้าสู่เตาต้มน้ำได้ทันที ถึงกระนั้นก็ตามชานอ้อยก็ยังคงเหลืออยู่อีกมาก เนื่องจากหม้อน้ำใช้ไม่หมดทำให้เกิดปัญหาในการกำจัดและทำลายให้หมดไปจากบริเวณโรงงาน แม้ว่าบางโรงงานจะดัดแปลงไปใช้ก้นเหล้ารัมหรือแอลกอฮอล์บ้าง แต่ชานอ้อยก็ยังคงเหลืออยู่มากมาย [15]

2.1.1.1 การใช้ประโยชน์ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จากชานอ้อย [16]

1. การใช้ประโยชน์ชานอ้อยในการอุตสาหกรรม

นักวิจัยได้พยายามคิดค้นหาวิธีนำชานอ้อยไปประดิษฐ์ใช้ให้เป็นประโยชน์แก่มนุษย์ โดยการนำไปอัดเป็นแผ่นคล้ายไม้อัด และใช้ทำเยื่อกระดาษ ตลอดจนพลาสติก และสารเฟอิวราล (Furfural) เป็นที่ทราบกันดีว่ากระดาษอัดที่ทำจากชานอ้อย มีคุณสมบัติเก็บเสียงได้ดี และใช้ทำฝ้าเพดานตลอดจนใช้บุผนังห้องในบ้านหรือแม้แต่ในเรือและรถยนต์

เมื่อมองในแง่พลังงาน ซึ่งกำลังมีราคาแพงขึ้นในทุกวันนี้ ชานอ้อยแม้ว่าจะให้พลังงานน้อยกว่า น้ำมันหรือถ่านหิน แต่ก็ยังเป็นผลพลอยได้ที่โรงงานน้ำตาลไม่ต้องลงทุนซื้อหามาเหมือนน้ำมันปิโตรเลียม มีผู้คำนวณไว้ว่า ชานอ้อยหกตันที่มีความชื้นประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ มีไฟเบอร์ประมาณ 46 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำตาลเหลืออยู่ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ จะมีความร้อนเทียบเท่ากับน้ำมันเตาหนึ่งตัน ทั้งนี้ ถ้าชานอ้อยยังมีความชื้นน้อยมีเปอร์เซ็นต์ไฟเบอร์สูง และมีน้ำตาลซูโครสที่เหลืออยู่สูงก็จะให้ความร้อนสูงมากยิ่งขึ้น โดยวัดค่าความร้อนออกมาเป็น L.C.V. (lower calorific value) ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2,800 ถึง 3,700 B.T.U. ต่อปอนด์

การทำเยื่อกระดาษจากชานอ้อยมีประวัติมานาน และมีผู้จดทะเบียนสิทธิมาตั้งแต่ปี 1838 ต่อมาก็มีการผลิตกระดาษชนิดต่าง ๆ จากเยื่อกระดาษที่ได้จากชานอ้อย ในปี 1856 มีรายงานว่า มีผู้ประดิษฐ์กระดาษชนิดกระดาษหนังสือพิมพ์ได้จากชานอ้อย จนกระทั่งปัจจุบันเทคโนโลยีในการผลิตเยื่อกระดาษจากชานอ้อยได้รุดหน้าไปไกลมาก ชานอ้อยจะถูกนำมาแยกสิ่งสกปรกและสิ่งที่ละลายปนมาตลอดจน pith ออกก่อน โดยวิธีทำให้เปียกแล้วทำให้แห้งทันที แล้วนำไปผสมกับเยื่อกระดาษที่ได้จากไม้ไฟและเยื่อกระดาษจากกระดาษเก่า ๆ (Cellulosic Material) หรืออีกวิธีหนึ่งในการแยก pith ออก โดยวิธีที่เรียกว่า ไฮดรอปัลเปอร์ (Hydrapulper) คือ การใช้น้ำล้างอย่างแรงและชะให้ pith แยกออกโดยผ่านตะแกรงหมุนแล้วทำให้แห้ง

ส่วนประกอบทางเคมีของชานอ้อยคล้ายกับของไม้เนื้อแข็ง (ในแง่การทำเยื่อกระดาษ) ส่วนประกอบดังกล่าวแปรไปตามชนิดพันธุ์ อายุและสภาพที่อ้อยเติบโตขึ้นมา ชานอ้อยมีลิกนิน (lignin) น้อยกว่าไม้ยืนต้น มีสารเพนโตแซน (pentosan) มากกว่าไม้สน ไม้สปรูซ (spruce) และไม้ยืนต้นอื่น ๆ บางชนิด ส่วนประกอบเซลลูโลสชนิด Cross และ Bevan ของอ้อยมีลักษณะคล้ายกับไม้ที่ใช้ทำกระดาษชนิดอื่น ๆ ซึ่งถ้าของอ้อยมีส่วนประกอบผิดแผกจากไม้ชนิดอื่น คือมี ซิลิกา (silica) สูงมาก และมีโพแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น เส้นใยอ้อยยกเว้น pith เหมาะสมที่จะนำมาทำเยื่อกระดาษมาก คือ จัดเป็นเยื่อชนิดดี และฟอกสีได้ง่าย

2. เฟอฟูรอล (Furfural)

เฟอฟูรอล ซึ่งเป็นสารประกอบที่สกัดได้จากชานอ้อย มีชื่ออื่นอีก คือ ฟูรอล, เฟอฟูรอล, เฟอฟูรอลดีไฮด์ (Furoi, Furfurol, Furfuraldehyde) เป็นสารเคมีที่ไม่มีสี ไม่ติดไฟ มีกลิ่นหอม และระเหยได้ง่าย เมื่อถูกแสงสว่างหรืออากาศจะเปลี่ยนเป็นสีแดงน้ำตาล เฟอฟูรอล ใช้ในอุตสาหกรรมกลั่นไม้และน้ำมันหล่อลื่น ใช้เป็นส่วนผสมของกาวหรือตัวการที่ทำให้พลาสติกแข็งตัว นอกจากนี้เฟอฟูรอลยังเป็นตัวละลายชนิดเดียวของ Butadiene ในอุตสาหกรรมผลิตยางสังเคราะห์ และใช้ในอุตสาหกรรมเภสัชกรรม ส่วนมากในปัจจุบันใช้เป็นวัตถุดิบประกอบสำคัญในการผลิตไนลอน 5-6 เราสามารถที่จะผลิตสารเฟอฟูรอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริสุทธิ์ได้ 98-99 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อน้ำ และใช้ทำเป็นปุ๋ยอินทรีย์ก็ได้

3. แอลฟา - เซลลูโลส (μ - cellulose)

เป็นสารขั้นต้นของเยื่อกระดาษและสามารถนำสารแอลฟา - เซลลูโลสนี้ไปผลิตสิ่งต่าง ๆ ได้อีก เช่น เซลโลเฟน เรยอง พลาสติก วิสโคส (Viscose) เซลลูโลสอะซิเตต ไนโตรเซลลูโลส ซึ่งเป็นสารที่ใช้ทำวัตถุระเบิด เป็นต้น

4. พลาสติก (Plastics)

พลาสติกมีกรรมวิธีผลิตได้หลายวิธี วิธีหนึ่งก็คือ การใช้ขานอ้อยที่บริสุทธิ์ปราศจาก pith ปั่นให้เป็นผง ใช้เป็นฟิลเลอร์ (Filler) ของพลาสติก ขานอ้อยเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับทำพลาสติกมาก เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาถูก และมีส่วนประกอบทางเคมีเหมาะสม ขานอ้อยมีส่วนประกอบของลิกนิน 13 ถึง 22 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารพลาสติกไซส์ วัสดุอื่นที่ได้จากขานอ้อยในการแยกขานอ้อย เพื่อทำพลาสติก ได้แก่ อนิลินฟีนอล และ เฟอฟูรอล ซึ่งแยกโดยการไฮโดรไลซ์เพนโตแซนในขานอ้อย

กรรมวิธีอีกแบบหนึ่ง ได้แก่ การย่อยขานอ้อย ด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง หรือย่อยด้วยน้ำผสมกับอนิลิน สารเฮมิเซลลูโลสจะถูกละลายออกมา ซึ่งจะทำให้ส่วนประกอบที่เป็นลิกนินมีมากขึ้น หลังจากนั้นก็ใช้สารละลายชะล้างสิ่งทีละลายได้ออกไป นำไปทำให้แห้งและบดเป็นผงนำไปผสมหรือเข้าแบบหล่อร่วมกับสารพลาสติกไซส์ จะได้สารชนิดหนึ่งที่มีประกายแข็งสีดำและไม่ละลายน้ำและเป็นฉนวนไฟฟ้า สารที่ได้นี้สามารถนำไปผ่านกรรมวิธีได้สารเรซินที่เรียกว่า โนวอลแลค (Novolak)

5. โพรดิวเซอร์แก๊ส (Producer gas)

ได้มีผู้ค้นพบว่าขานอ้อยสามารถผลิตโพรดิวเซอร์แก๊สได้ ซึ่งเป็นสารที่ให้พลังงานเผาไหม้ ถ้าเผาขานอ้อยได้ความร้อนเท่ากับ 100 เปรียบเทียบกับโพรดิวเซอร์แก๊สน้ำหนักเท่ากัน จะให้ความร้อนในการผลิตไอน้ำเท่ากับ 1.8 (เครื่องจักรชนิด non-condensing) และจะให้ความร้อน 252 Btu จากเครื่องจักรชนิด condensing engine

6. การทำไม้อัดชนิด Medium density fiber particle board (MDFB)

โรงงานน้ำตาลส่วนมากจะใช้ขานอ้อยเพื่อเป็นเชื้อเพลิงต้มหม้อน้ำ เพื่อใช้ไอน้ำในการทำน้ำตาลและปั่นกระแสไฟฟ้าในโรงงาน ทุกปีจะมีขานอ้อยเหลืออยู่มากมาย ซึ่งเป็นภาระแก่โรงงาน ปัจจุบันมีโรงงานน้ำตาลใช้ขานอ้อยเพื่อผลิตกระดาษอัดชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDFB) ไม้อัดที่ได้จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่บิดเบี้ยว ทาสีได้ ไม่คุดสี ทนทานต่อการทำลายของแมลงและเชื้อรา ทนทานต่อฝนและน้ำค้าง โดยมักจะทำให้มีขนาด 153 x 350 เซนติเมตร มีความหนา 4 ถึง 40 มิลลิเมตร เพื่อให้เหมาะสมแก่ความต้องการของตลาด [17]

7. การผลิตสาร ซีเอ็มซี [18]

แนวทางหนึ่งของการวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์จากขานอ้อยให้คุ้มค่าที่สุดก็คือ การมองในแง่ของแหล่งเซลลูโลส ซึ่งจากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าขานอ้อยเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจ สำหรับการผลิตเซลลูโลสคุณภาพสูง เนื่องจากมีราคาถูก และมีสมบัติทางเคมีที่ดี ปัจจุบันอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้นำเซลลูโลสไปใช้ประโยชน์เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะการผลิตอนุพันธ์ของเซลลูโลส ซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิด และมีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้คุณภาพของอนุพันธ์ก็ขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัตถุดิบเป็นสำคัญ อนุพันธ์ชนิดหนึ่งของเซลลูโลสที่มีการใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันก็คือ คาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส หรือที่เรียกกันว่า ซีเอ็มซี (Carboxymethylcellulose, CMC) ซึ่งจัดเป็นพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้ ผลิตภัณฑ์ซีเอ็มซีที่สังเคราะห์ได้จากขานอ้อยมีสมบัติคือ เป็นสารที่เพิ่มความหนืดละลายได้ในน้ำ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ ไม่เปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อทิ้งไว้นาน ๆ ทำหน้าที่เป็นตัวคงสภาพ สารแขวนลอยและสารช่วยในการยึดเกาะ ให้ฟิล์มที่ใสและแข็งแรง ไม่ละลายในน้ำมัน ในไขมันและสารอินทรีย์ มีความคงทนต่อสารเคมีและเชื้อจุลินทรีย์สูงกว่าสารธรรมชาติ ไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติแม้เก็บไว้เป็นเวลานาน และเป็นสารที่มีแคลอรีต่ำ

ปัจจุบันพบว่ามีการนำซีเอ็มซีไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมายเช่น อุตสาหกรรมผงซักฟอก อุตสาหกรรมอาหาร การขูดเจาะ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ การผลิตยาและเวชภัณฑ์ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมเซรามิก การผลิตกาว อุตสาหกรรมไม้อัด การผลิตซีเมนต์ ลวดเชื่อมไฟฟ้า ดินสอ วัตถุระเบิด บุหรี่ หนังก ยาง เครื่องสำอาง ของใช้ประจำบ้านจำพวกยาสีฟัน โฟมล้างหน้า โลชั่น เป็นต้น และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวในด้านอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะอาหารและเครื่องดื่มที่มีแคลอรีต่ำเพื่อการลดน้ำหนัก

2.1.2 ซิลิกา (Silica) [19]

ซิลิกา (Silica) เป็นสารสังเคราะห์ในรูปของซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide, SiO_2) ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนจับอยู่กับอะตอมของออกซิเจน ซิลิกาเป็นสารที่เฉื่อย ไม่มีพิษ ใช้เป็นตัวดูดความชื้น ตัวดูดซับ และใช้เป็นวัสดุในการบรรจุคอลัมน์ในโครมาโทกราฟี ซิลิกามีหลายรูป แต่โครงสร้างที่มีความพรุนมาก ได้แก่ ซิลิกาเจล ซึ่งเตรียมได้จากสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) เรียกว่า วอเตอร์กลาส (Water glass) ซึ่งในที่นี้เราจะใช้ซิลิกาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตซีโอไลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.1 การสังเคราะห์ซีลิกา

การสังเคราะห์ซีลิกานั้นสามารถสังเคราะห์จากสารตั้งต้นได้หลายตัว เช่น จากชานอ้อย จาก แกลบ จากดินขาว ฯลฯ

ในที่นี้ทำการสังเคราะห์ซีลิกาจากชานอ้อย เนื่องจากเถ้าลอยของชานอ้อยมีซีลิกาอยู่มาก สมบัติของซีลิกา คือ ไม่ละลายทั้งในกรดและเบส ดังนั้นจึงใช้คุณสมบัตินี้ในการแยกซีลิกาออกจากองค์ประกอบอื่น ซึ่งในการสังเคราะห์จะใช้ในรูปของ Water Glass

2.1.3 ซีโอไลต์ [20]

ซีโอไลต์ มีรากศัพท์เดิมมาจากภาษากรีก 2 คำ คือ ZeO แปลว่า to boil หรือเดือด และ Lithos แปลว่า stone หรือหิน รวมความหมายแล้วก็คือ boiling stone หรือ หินที่เดือดได้

ซีโอไลต์ คือสารประกอบจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างเป็นผลึก รูปทรงแบบสามมิติ ประกอบด้วยทรงเหลี่ยมสี่หน้าของซิลิเกต $[\text{SiO}_4]^{4-}$ และอะลูมิเนต $[\text{AlO}_4]^{5-}$ ซึ่งอะตอมของโลหะที่เป็นโครงสร้างหลักนี้รวมเรียกว่า T-อะตอม (T-Atom) ส่วนโครงสร้างทรงเหลี่ยมสี่หน้าของซิลิกาและอะลูมินา เรียกว่าหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Building Units) ซึ่งสามารถเกิดการจัดเรียงตัวโดยการเชื่อมกันด้วยอะตอมออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ของหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ ซึ่งเรียกว่า Oxygen Bridge เกิดเป็นโครงสร้างที่มีรูปทรงสามมิติขนาดใหญ่ (Three dimensional) ที่แตกต่างกัน ขึ้นกับการจัดเรียงตัวของหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ

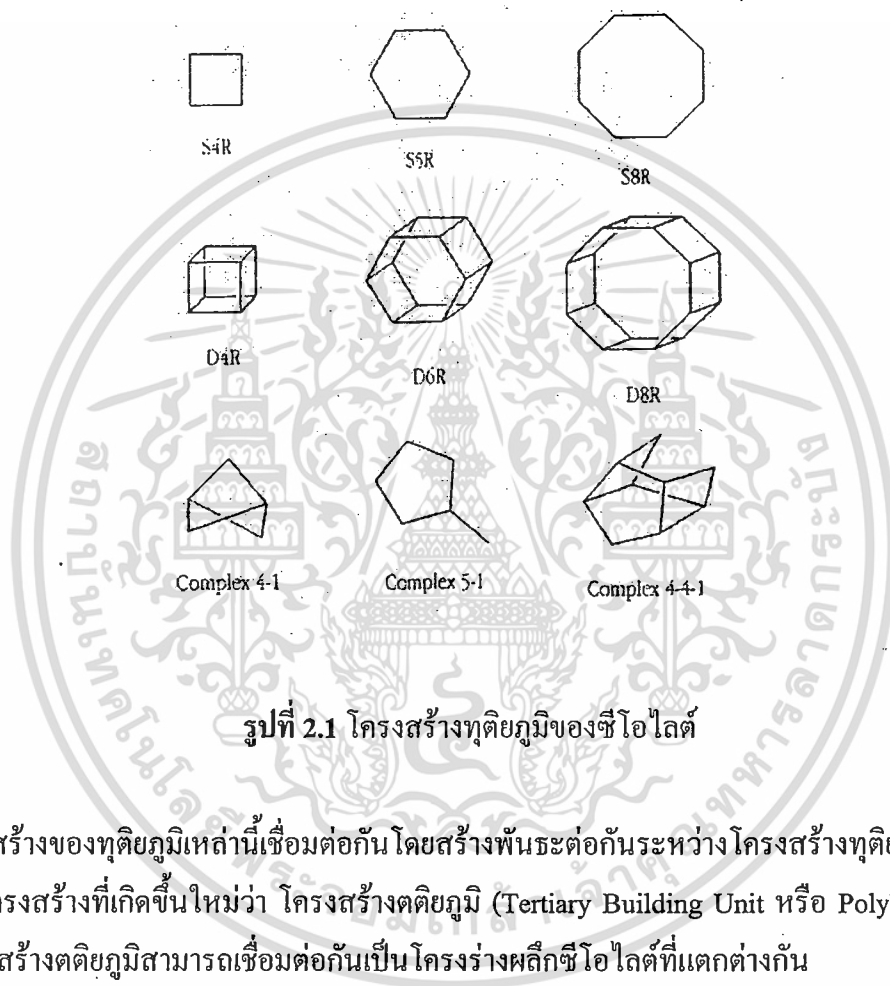
โดยปกติ Hybridization ของอะตอมอะลูมิเนียมในโครงผลึกออกไซด์ มักมีโครงสร้างแบบทรงเหลี่ยมแปดหน้า จึงไม่สามารถรับอิเล็กตรอนเพิ่มเติมได้อีก แต่เนื่องจากอะลูมิเนียมในโครงสร้างของซีโอไลต์มีโครงสร้างแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า ดังนั้น ออร์บิทัลที่ว่างของอะลูมิเนียมจึงสามารถรับอิเล็กตรอนจากออกซิเจนทำให้โครงสร้างของอะลูมิเนต $[\text{AlO}_4]^{5-}$ ที่ได้มีประจุลบเกิดขึ้น ทั้งนี้ประจุลบ (-1) ที่เกิดขึ้นจะกระจายอยู่รอบออกซิเจนทั้งสี่อะตอมที่ติดกับอะลูมิเนียมด้วยความยาวพันธะที่เท่ากัน ดังนั้นประจุลบนี้จะอยู่กับที่บริเวณตำแหน่งของอะลูมินาในโครงสร้างเท่านั้นเราจึงเรียกประจุลบนี้ว่า

Negative Framework Charge

เมื่อโครงสร้างที่เชื่อมต่อกันมี Primary Building Units ของอะลูมินา $[\text{AlO}_4]^{5-}$ เป็นองค์ประกอบจึงต้องมีไอออนประจุบวก (Cation) มาดุลประจุลบที่เกิดขึ้น ซึ่งเราเรียกไอออนบวกที่มาดุลนี้ว่า Charge balancing cation หากโครงสร้างมีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบมากเท่าใด ก็จะมีประจุลบเกิดขึ้นในโครงสร้างมากเท่านั้น และมี Charge balancing cation มากตามไปด้วยแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่าง Charge balancing cation กับ Negative Framework Charge เป็นแรงระหว่างประจุ (Coulombic force) ทำให้ Charge balancing cation มีอิสระในการเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ Negative Framework Charge สภาพเช่นนี้ทำให้รูปทรงของซีโอไลต์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบอยู่มากมีสนามไฟฟ้าสถิตที่แรงมาก มีความเป็นขั้วสูง ซีโอไลต์จึงสามารถดูดซับน้ำไว้ในรูปทรงนี้ได้ดี และ Charge balancing cation ก็จะลอยอยู่ในน้ำที่ดูดเอกลักษณะนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

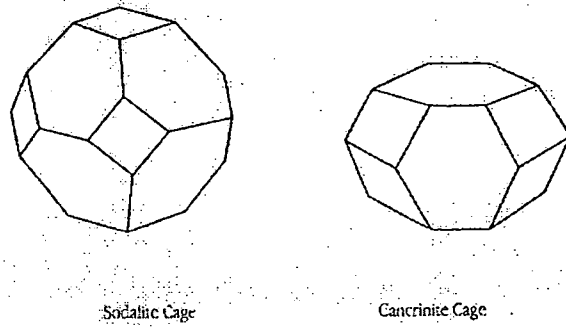
ซับซ้อนอยู่ในรูปพหุนั้น ดังนั้นความเป็นขั้วและความสามารถในการดูดซับน้ำของซีโอไลต์ จึงขึ้นกับ ปริมาณอะลูมิเนียมในองค์ประกอบ

การจัดเรียงโครงสร้างของซีโอไลต์เริ่มจากโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary unit) ที่มีลักษณะเป็นทรง สี่เหลี่ยมสี่หน้าที่มีออกซิเจนสี่ตัวล้อมรอบ โครงสร้างปฐมภูมิประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน อะลูมิเนียม และออกซิเจน ที่เชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายสามมิติเกิดการจัดเรียงตัวเป็น โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Unit; SBUs) ดังรูปที่ 2.1



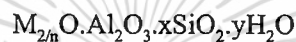
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์

โครงสร้างของทุติยภูมิต่างเหล่านี้เชื่อมต่อกันโดยสร้างพันธะต่อกันระหว่างโครงสร้างทุติยภูมิด้วย กันเอง เรียกโครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่ว่า โครงสร้างตติยภูมิ (Tertiary Building Unit หรือ Polyhedral) ดัง รูปที่ 2.2 โครงสร้างตติยภูมิสามารถเชื่อมต่อกันเป็น โครงสร้างผลึกซีโอไลต์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.2 โครงสร้างคตติภูมิของซีโอไลต์

ซีโอไลต์มีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังนี้



เมื่อ M คือจำนวนไอออนบวกที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดเท่ากับ n ค่า x มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2 ค่า y มีค่าอยู่ในช่วง 10-200

หน่วยย่อยของซิลิกาไม่มีประจุ แต่หน่วยของอะลูมินามีประจุลบหนึ่ง ทำให้ประจุสุทธิของโครงสร้างซีโอไลต์มีค่าเป็นลบ โดยมีไอออนบวกของโลหะอัลคาไลด์ที่อยู่ในโครงสร้างทำหน้าที่ดุลประจุสุทธิให้ซีโอไลต์สำหรับทุกตำแหน่งหน่วยอะลูมินาในโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดนั้น ๆ อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา (Si/Al) และลักษณะโครงสร้างทำให้ซีโอไลต์มีความแตกต่างกัน การนำซีโอไลต์มาประยุกต์ใช้งาน เช่น เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange) ตัวดูดซับ (Adsorbent) ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ต้องพิจารณาถึงอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา โครงสร้างของซีโอไลต์ และชนิดของไอออนประจุบวก

2.1.3.1 แหล่งกำเนิดของซีโอไลต์

โดยทั่วไปแล้วซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติจาก 2 แนวทางใหญ่ คือ แนวทางแรก ซีโอไลต์สามารถเกิดในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำมาก (ต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส) ซีโอไลต์ธรรมชาติทุกชนิดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบจำพวกอะลูมิโนซิลิเกตที่ละลายน้ำได้ทั่วโลก ผ่านกระบวนการตกผลึก (Crystallization) ภายใต้ความร้อนและความดันอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของชั้นเปลือกโลก โดยมีองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น โลหะแอลคาไลและแอลคาไลด์ไฮดรอกไซด์ที่เอื้ออำนวยต่อการเกิดโครงสร้างของซีโอไลต์ร่วมอยู่ด้วย กระบวนการการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ อาจยาวนานถึง 1-10 ล้านปี ขึ้นกับความเหมาะสมของความดัน อุณหภูมิ และชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น สภาวะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อให้เกิดการตกผลึกซึ่งมีน้ำ ความร้อน และความดันนี้ เราเรียกว่า การตกผลึกแบบไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal Crystallization) [21]

กระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์แบบดั้งเดิม ซึ่งพัฒนามาจากการศึกษาสถานะที่เกิดซีโอไลต์ในธรรมชาติ โดยใช้สารละลายเบสเป็นตัวกลางเท่านั้น ซึ่ง บาร์เรอร์ (Barrer) เป็นผู้มีบทบาทสำคัญในยุคแรก ๆ (ในปี ค.ศ. 1940-1960) [20] ที่เริ่มจำลองสภาวะดังกล่าวเพื่อสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดใหม่ที่ไม่เคยมีมาก่อนเป็นจำนวนมาก และยังคงศึกษาสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์อย่างจริงจัง โดยที่เราสามารถเลือกชนิดและองค์ประกอบ ตลอดจนออกแบบโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ต้องการได้ โดยการควบคุมชนิดและสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบของสารตั้งต้น รวมทั้งอุณหภูมิและความดันที่เพิ่มขึ้นเอง เมื่อให้ความร้อนในระบบปิด (Autogeneous pressure)

2.1.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ [20]

ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์มี 4 ประการ กล่าวคือ

- อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al ratio)
- ค่าความเป็นเบส (Basicity)
- สารเทมเพลต (Template)
- อุณหภูมิและเวลา (Temperature and Time)

ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ ตกผลึกได้เร็วกว่า ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูง และเมื่อมีปริมาณอะลูมิเนียมมากขึ้นจะตกผลึกได้เร็วขึ้น อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมที่สูง ช่วยให้ซีโอไลต์ทนทานต่อการรุด ความร้อน และมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งลดแรงดึงดูดตัวดูดซับมีขั้ว และลดปริมาณไอออนบวก เมื่อลดอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ทำให้เพิ่มความชอบน้ำและสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งซีโอไลต์แต่ละชนิดก็จะมีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่า Si/Al ของเจลที่สามารถใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ [20]

ชนิด	โครงสร้าง	อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม
Zeolite A	LTA	1 – 1.25
Zeolite Y	FAU	1.5 – 3
ZSM-5	MFI	15 – infinity
Beta	BEA	12 – infinity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จำเป็นต้องมีสารเหนี่ยวนำให้เกิดการจัดเรียงตัวของผลึก โดยสารที่ทำหน้าที่นี้เรียกว่า สารกำหนดโครงสร้าง (Template หรือ Structure directing template) สามารถแบ่งกำหนดโครงสร้างได้เป็น 2 ชนิด คือ สารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์ (Organic template) และสารกำหนดโครงสร้างอนินทรีย์ (Inorganic template) จากการศึกษพบว่า สารกำหนดโครงสร้างอนินทรีย์มีความสำคัญอย่างมากต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ (< 3) ซึ่งซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาติโดยทั่วไปจะมีไอออนของโลหะหมู่ 1 และ 2 เช่น โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) และ แคลเซียม (Ca) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งไอออนของโลหะเหล่านี้เป็นตัวที่ก่อให้เกิดโครงสร้างทุติยภูมิ และเกิดเป็นโครงสร้างของซีโอไลต์ขึ้น เนื่องจากไอออนบวกจะเกิดอันตรกิริยากับสารพวกอะลูมิเนียมในสารละลาย ก่อให้เกิดโครงสร้างที่แตกต่างกันไป สำหรับสารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์เริ่มมีบทบาทสำคัญ เมื่อมีความพยายามที่จะสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูงเกินกว่าซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาติ และมีความแรงของเบสสูงกว่าสารกำหนดโครงสร้างอนินทรีย์ซึ่งทำให้ซิลิกาละลายตัวรวมกับอะลูมินาได้ดี โดยไม่ทำให้สารละลายซิลิกาเกิดเสถียรเกินไป จนซิลิกาไม่อยู่ในรูปสารละลายคอลลอยด์ หรือไม่เกิดการตกผลึกเลย โดยทั่วไปสารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์จะช่วยในการเหนี่ยวนำให้เกิดการก่อผลึก ควบคุมการเกิดโครงสร้าง ขนาดของรูพรุน และรูปร่างของผลึกของซีโอไลต์ โดยการก่อผลึกจะเกิดผ่านการจัดเรียงตัวของสารพวกอะลูมิเนียม-ซิลิกา-เกิดล้อมรอบสารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์ การใช้สารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์ที่ต่างกันจะทำให้เกิดโครงสร้างที่แตกต่างกัน [14]

หากชนิดของสารกำหนดโครงสร้างไม่เหมาะสม อาจทำให้ไม่สามารถตกผลึกได้เลย หรือเกิดขึ้นได้แต่ไม่สมบูรณ์ เช่น ในการตกผลึกซีโอไลต์บีตา ที่มีโครงสร้างแบบ BEA หากมี Na^+ ในเจลที่ใช้สังเคราะห์อาจทำให้ไม่เกิดการตกผลึกเลย จึงถือว่า Na^+ เป็นตัวยับยั้งการเกิดผลึก (Inhibitor) ของโครงสร้าง BEA [20]

อุณหภูมิในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เป็นปัจจัยสำคัญทั้งอัตราการตกผลึกและโครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำเป็นตัวกลางในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลต่อความหนืดที่ลดลง รวมทั้งทำให้ความดันของถึงปฏิกิริยาในการสังเคราะห์สูงขึ้นด้วย โดยปกติอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้ความดันในระบบสูงมากและเกิดการจัดเรียงตัวของสารพวกอะลูมิเนียม-ซิลิกาที่หนาแน่น ไม่เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำสามารถเกิดการตกผลึกได้ดี ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงในการสังเคราะห์ (70-110 องศาเซลเซียส) ขณะที่ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูงจะต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า (100-180 องศาเซลเซียส) จึงสามารถเกิดการตกผลึกได้ [20]

เวลาในการสังเคราะห์เป็นตัวกำหนดความสมบูรณ์ของการเกิดผลึก เมื่อใช้เวลาในการสังเคราะห์นานเกินไป การสลายตัวของผลึกเก่าและการก่อผลึกของซีโอไลต์ชนิดใหม่เกิดขึ้นได้ ทั้งในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูงและต่ำ ในกรณีซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูงนั้น ผลึกที่เกิดขึ้นใหม่มักจะเป็นควอตซ์ (Quartz) [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.3. การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ (Application of Zeolite) [22]

1. ตัวกรองสารที่ต้องการ

โมเลกุลที่เล็กกว่าขนาดโพรงซีโอไลต์ก็จะสามารถผ่านไปได้ ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถผ่านออกมาได้ และโมเลกุลที่ต้องการซึ่งมีขนาดพอดีกับโพรงซีโอไลต์ก็จะถูกกักไว้ภายในโพรง

2. ตัวแลกเปลี่ยนประจุ

เนื่องจากประจุบวกของโลหะที่เกาะกับซีโอไลต์นั้น จะเกาะกันอยู่อย่างหลวม ๆ มันจึงพร้อมที่จะแลกเปลี่ยนประจุกับโลหะอื่นเมื่ออยู่ในสารละลายได้ ด้วยหลักการนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้กับการลดความกระด้างของน้ำ (Water Hardness Modifier) โดยโลหะอัลคาไล เช่น โซเดียม หรือ โพแทสเซียม ที่เกาะกับซีโอไลต์จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งเป็นประจุของโลหะในน้ำที่เป็นตัวการทำให้น้ำกระด้าง และมีการนำซีโอไลต์มาใช้ลดความกระด้างของน้ำแทนฟอสเฟตในผงซักฟอกเนื่องจากฟอสเฟตนั้นถือว่าเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และด้วยหลักการแลกเปลี่ยนประจุนี้ทำให้สามารถใช้ซีโอไลต์ในการบำบัดน้ำเสีย (Waste Water Treatment) เช่น การกำจัดแอมโมเนียออกจากร่างน้ำเสีย โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแอมโมเนียกับโลหะโซเดียมที่อยู่ในโพรงของซีโอไลต์รวมทั้งสามารถใช้กำจัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จากไอเสียเครื่องยนต์ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน และก๊าซออกซิเจนที่ปลอดภัย และยังสามารถใช้ในการจัดไอโซโทปแกมมาของซีซีเอ็มและสตรอนเชียมจากกากนิวเคลียร์ (Nuclear Waste) ได้อีกด้วย

3. ตัวดูดซับ (Adsorbent)

การใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับนั้น ใช้ทั้งในกระบวนการทำให้แห้ง (Dehydration) การทำให้บริสุทธิ์ (Purification) และการแยกสาร (Separation) ซึ่งซีโอไลต์มีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่างอันเป็นหลักการพื้นฐานของกระบวนการดูดซับระดับโมเลกุล โดยสามารถเลือกให้มีการเลือกดูดซับเฉพาะบางโมเลกุล ส่วนการทำให้แห้งนั้นเนื่องจากซีโอไลต์ที่มีประจุบวกสามารถดูดซับน้ำได้ดีเป็นพิเศษ และสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ กล่าวคือ เมื่อมีการให้ความร้อน น้ำก็จะระเหยออกไปหมดแต่เมื่อซีโอไลต์เหล่านี้สัมผัสกับไอน้ำอีกครั้ง ก็จะสามารถดูดซับน้ำได้อีก หรืออาจนำไปใช้ดูดซับสารอื่นแทน เช่น ก๊าซไอโอดีน ตะกั่ว หรือแอมโมเนีย แบบย้อนกลับได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังใช้ในการแยกก๊าซซึ่งโมเลกุลของก๊าซต่างชนิดจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตกับไอออนโลหะ ในทางกลับกันซีโอไลต์บางชนิดจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ แต่จะดูดซับเฉพาะโมเลกุลอินทรีย์เท่านั้น

4. ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts)

ประโยชน์ของซีโอไลต์ในแง่ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจัดว่ามีมูลค่ามหาศาล โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยในแต่ละปีประเทศไทยต้องนำเข้าตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเคมีปิโตรเคมีกว่าพันล้านบาท และกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของตัวเร่งปฏิกิริยานี้คือ ซีโอไลต์ (ราคาซีโอไลต์มีตั้งแต่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

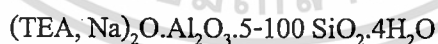
กิโลกรัมละ 4,000 บาทไปจนถึงประมาณล้านบาท) ด้วยเหตุที่ข้อดีของซีโอไลต์ คือ มันจะอยู่ในรูปของแข็งที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้คงทนกว่า และนำกลับมาใช้ได้ง่ายกว่าสารเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปของเหลวหรือก๊าซทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงานและเป็นมิตรกับธรรมชาติ

จากความรู้ที่ว่าสมบัติการเป็นตัวแยกโมเลกุล (molecular sieve) ของซีโอไลต์นั้นขึ้นกับขนาดของช่องว่างที่อยู่ระหว่างโครงสร้างหน่วยย่อย และเราสามารถควบคุมขนาดของช่องนี้โดยควบคุมอุณหภูมิและประจุบวกที่อยู่ภายในหรืออยู่รอบ ๆ ช่องว่าง ทำให้ช่องว่างนี้ไว้บางส่วน และนักเคมีสามารถเพิ่มหรือลดขนาดช่องว่างนี้ได้โดยการปรับปัจจัยในการสังเคราะห์ จึงมีการสังเคราะห์สารที่มีโครงสร้างคล้ายซีโอไลต์ และใช้สารกลุ่มนี้เป็นตัวแยกโมเลกุล และใช้สารดังกล่าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งนอกจากจะเป็นการประหยัดพลังงานและลดขั้นตอนเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมีเร็วขึ้นแล้ว ยังสามารถสร้างมูลค่าของสารตั้งต้นให้เป็นออกมาเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น เพิ่มค่าออกเทนของน้ำมัน โดยกำจัดองค์ประกอบที่เป็นสายตรงหรือแยกสารไฮโดรคาร์บอนชนิดอิมตัวออกจากชนิดไม่อิมตัว

2.1.4 ซีโอไลต์ชนิดบีต้า [14]

เมื่อแบ่งประเภทของซีโอไลต์ตามอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมแล้ว ซีโอไลต์บีต้าจัดเป็นซีโอไลต์ที่มี Si/Al สูง [20]

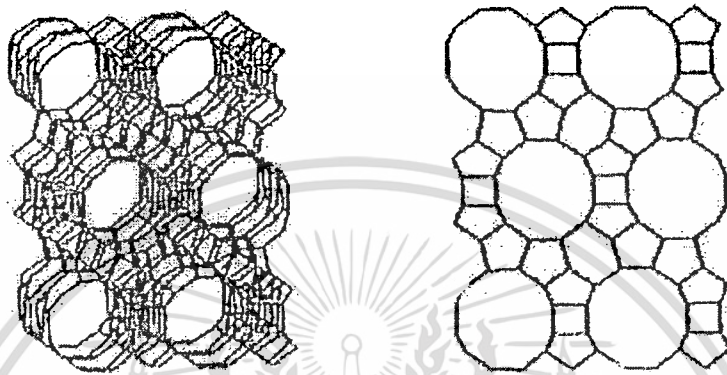
ซีโอไลต์ชนิดบีต้ามีโครงสร้างเป็นระบบเปิดสามทิศทาง (3-dimensional pore open-framework) แบบท่อ (channel structure) รูพรุนจุลภาค (microporous) ของซีโอไลต์ชนิดบีต้าเป็นรูพรุนจุลภาคขนาดใหญ่ (12T-ring หรือ Large pore) มีขนาด 0.76×0.64 นาโนเมตรเชื่อมต่อกับขนาด 0.55×0.55 นาโนเมตร และมีสัดส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาสูงในช่วงประมาณ 5-100 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิเป็นแบบวงแหวนคู่ 6 เหลี่ยม (D6R) เชื่อมต่อกับหน่วยวงแหวน 4 เหลี่ยมและ 5 เหลี่ยม องค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์ชนิดบีต้า คือ



ซีโอไลต์ชนิดบีต้าสังเคราะห์ได้โดยใช้เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีกำหนดโครงสร้าง โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดบีต้ามีความซับซ้อนมาก การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดบีต้าสามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น วิธีไฮโดรเทอร์มัล, วิธี dry gel และ วิธีที่ใช้ไอน้ำร่วมในกระบวนการตกผลึก (Steam-assisted Crystallization) โดยมีสารตั้งต้นหลักคือซิลิกาและสารเคมีกำหนดโครงสร้างสำหรับแหล่งซิลิกาที่ใช้อย่างแพร่หลายอยู่ในรูปของของเหลว คอลลอยด์ หรือเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethyl orthosilicate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีโอไลต์ชนิดบีต้ามีความเป็นกรดแรง มีความว่องไวสูง ทนทานต่อความร้อนมากและมีความเสถียร จึงมีความน่าสนใจเหมาะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี เนื่องจากมีลักษณะเฉพาะที่สำคัญคือ มีรูพรุนขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยอะตอมออกซิเจนที่มี 12 อะตอม มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาสูง และมีรูพรุนขนาดประมาณ 5.5 Å ที่มีความคงที่ในการเลือกให้สารหนึ่ง ๆ ผ่านเข้าออก ซึ่งจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดบีต้า [23]

2.1.5 ไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl ether, DME)

ในปัจจุบันนี้พบว่าปัญหาด้านการใช้พลังงานของโลกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากมีการขยายตัวทั้งในด้านอุตสาหกรรม การขนส่ง และการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร จากความต้องการในการใช้น้ำมัน ทำให้ราคาของน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ขณะที่ประเทศไทยมีแหล่งผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงไม่เพียงพอ จึงต้องนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก อีกทั้งน้ำมันยังเป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดไปในอนาคต ซึ่งทั่วโลกกำลังประสบปัญหาจากการที่ปริมาณสำรองของเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและน้ำมันดิบลดลง และในการนำมาใช้นั้นยังเป็นสาเหตุหนึ่งในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นหลังจากการทำปฏิกิริยาเคมีตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาการเผาไหม้ ดังนั้นจึงต้องหาพลังงานทดแทนขึ้น ซึ่งพลังงานทดแทนนี้ควรหาได้ง่าย นำไปใช้ได้ง่าย และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย

พลังงานที่เริ่มมีการวิจัยกันในปัจจุบัน คือ ไดเมทิลอีเทอร์ (DME) โดยมีการนำเอาองค์ความรู้ทางการพัฒนาเชื้อเพลิง เพื่อคิดค้นพลังงานใหม่ ๆ โดยเฉพาะเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรกับธรรมชาติ ล่าสุดสามารถพัฒนา “ไดเมทิลอีเทอร์” หรือ “ดีเอ็มอี” ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะเป็นแก๊ส มีคุณสมบัติทางกายภาพคล้ายแก๊สหุงต้ม หรือ LPG ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น สามารถเก็บรักษาและทำการควบคุมได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน จึงทำให้มีความสะดวกในการขนส่งภายในประเทศ และยังสามารถใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ขับเคลื่อนจรวด น้ำยาลดอุณหภูมิ และเป็นพลังงานทางเลือกสำหรับรถยนต์ดีเซล และน่าจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเป็นไปได้ในการกระจายและใช้ในพื้นที่ชนบท และในปัจจุบันสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ใช้ในเกษตรกรรม โดยปราศจากควันท่ออีกด้วย ทำให้เห็นว่านอกจากไบโอดีเซลและแก๊สแอลพีจีแล้วยังมีพลังงานทางเลือกอื่นอีกมาก ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ ไดมethylอีเทอร์ ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ในอนาคตหากภาครัฐสนับสนุนพลังงานนี้ จะทำให้ประเทศลดการพึ่งพาน้ำมันได้อย่างมาก สำหรับคุณสมบัติของไดเมทิลอีเทอร์ที่สำคัญคือ จุดติดไฟง่าย สามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ ไม่เกิดเขม่า ปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และออกไซด์ของไนโตรเจนต่ำกว่าเชื้อเพลิงทั่วไป รวมทั้งไม่มีส่วนประกอบของกำมะถัน จึงไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

เมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าของการลงทุน หากเปรียบเทียบตามหลักเศรษฐศาสตร์ระหว่างการใช้ไดเมทิลอีเทอร์และน้ำมันดีเซล พบว่า ไดมethylอีเทอร์ยังมีต้นทุนการผลิตสูงขึ้นอยู่กับต้นทุนวัตถุดิบ หากใช้วัตถุดิบราคาถูก และพัฒนาในเชิงพาณิชย์ ด้วยการสนับสนุนให้มีการใช้มากขึ้น จะทำให้มีต้นทุนที่ถูกกว่าน้ำมันดีเซลได้ นอกจากนี้ในเชิงคุณภาพชีวิตและสิ่งแวดล้อม การใช้ไดเมทิลอีเทอร์น่าจะเป็นทางเลือกใหม่ที่ดีกว่าดีเซล เพราะไม่มีมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ขณะนี้มีหลายประเทศให้ความสนใจพลังงานชนิดนี้เป็นอย่างมาก เช่น ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา และจีน เป็นต้น คาดว่าหากผู้ประกอบการด้านเครื่องยนต์และยานพาหนะต่าง ๆ จะผลิตเทคโนโลยีที่ใช้เชื้อเพลิงชนิดนี้โดยเฉพาะ เชื่อว่าไดเมทิลอีเทอร์จะเป็นทางเลือกที่สำคัญอันดับต้น ๆ ที่จะมาทดแทนน้ำมันดีเซลในอนาคต เพราะน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด สำหรับภาวะราคาน้ำมันแพงในปัจจุบัน และยังมีการคาดการณ์ว่าจะสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิงได้ด้วย นอกจากนี้ยังไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์และสลายตัวได้เองในบรรยากาศ

ไดเมทิลอีเทอร์ หรือดีเอ็มอี มีสูตรเคมีคือ CH_3OCH_3 มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิห้อง ไม่มีสี (ดังรูปที่ 2.4) ไม่มีกลิ่น สามารถทำให้เป็นของเหลวได้เมื่อถูกอัดภายใต้ความดัน โดยปกติแล้วจะถูกใช้เป็นส่วนขับเคลื่อนในกระป๋องสเปรย์ และ สารทำความเย็น ทดแทนการใช้สารฟรอน หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ไดมethylอีเทอร์สามารถจุดติดไฟได้ มีจุดเดือดที่ -25°C และมีความดันไอ 6 bar ที่อุณหภูมิ 25°C จึงได้รับความนิยมนำมาใช้ทดแทนแก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquid petroleum gas, LPG) เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพคล้ายแก๊สปิโตรเลียมเหลว และยังสามารถนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในเครื่องกังหันแก๊ส และนอกจากนั้นยังมีค่าซีเทนสูง ประมาณ 55 จึงทำให้เมื่อเผาไหม้จะสามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ ไม่เกิดเขม่า ปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ต่ำกว่าเชื้อเพลิงทั่วไป และไม่มีส่วนประกอบของกำมะถัน ซึ่งไม่ก่อให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลในรถบรรทุกได้และยังมีการคาดการณ์ว่าจะสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิงได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ และสลายตัวได้เองในบรรยากาศ ดังนั้น ไดมethylอีเทอร์จึงได้รับการยอมรับว่าเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกแห่งศตวรรษที่ 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

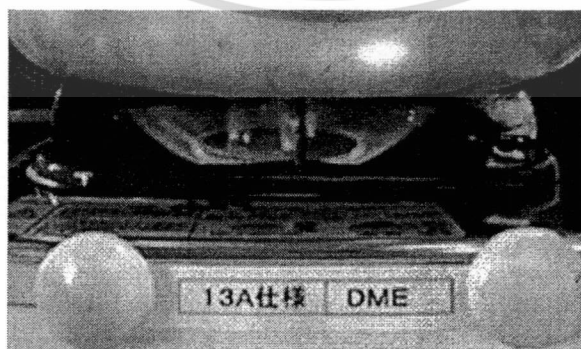
ไดเมทิลอีเทอร์ เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มที่เริ่มมีการนำมาใช้ทั่วไปในประเทศสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่น ส่วนในประเทศจีนนั้น ไดเมทิลอีเทอร์กำลังได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้แทนที่ถ่านหินสำหรับการทำความร้อนและหุงต้มในครัวเรือน แสดงดังรูปที่ 2.5

ในปัจจุบันนี้กำลังการผลิตและตลาดไดเมทิลอีเทอร์ก็โตขึ้นอย่างต่อเนื่องและกำลังขยายตัวทั้งในแง่ของการนำไปใช้ทำความร้อนและการคมนาคม ไดเมทิลอีเทอร์ถูกนำไปใช้ในรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซลและรถเมล์ในญี่ปุ่นและจีนแล้ว ส่วนบริษัททอลโว่ก็ออกรถบรรทุกที่ใช้ไดเมทิลอีเทอร์เป็นเชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ 2.6 [24]

ถึงแม้ว่าน้ำมันเบนซินและดีเซลนั้นมีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำกว่าไดเมทิลอีเทอร์ ประสิทธิภาพของพลังงานของเชื้อเพลิงสองประเภทก็ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ไดเมทิลอีเทอร์ยังเผาไหม้สะอาดกว่าอีกด้วย การเปลี่ยนน้ำมันขางดำกับถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงนั้นยังปล่อยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ออกมาเป็นปริมาณน้อยกว่าการใช้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว และเหตุผลอีกอย่างที่เราน่าจะลองหันมาศึกษากระบวนการนี้ก็เพราะเรามีถ่านหินอยู่จำกัดและเราก็คงไม่อยากจะขุดถ่านหินจากผืนดินทุกแห่ง เพื่อจะเอามันมาใช้เพราะผลกระทบต่ออันมากมายมหาศาลจากการทำเหมืองถ่านหินมันคงไม่คุ้มกัน [25]



รูปที่ 2.4 ไดเมทิลอีเทอร์เหลว [26]



รูปที่ 2.5 การใช้ไดเมทิลอีเทอร์ทดแทนแอลพีจีหรือแก๊สหุงต้มที่ใช้ในครัวเรือน [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การใช้ไดเมทิลอีเทอร์ทดแทนน้ำมันดีเซล [28]

2.1.5.1 สมบัติของไดเมทิลอีเทอร์และเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

ในปัจจุบันนี้น้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาแพงและยังมีความต้องการที่จะใช้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จึงเป็นเรื่องจำเป็นที่จะต้องคิดหาเชื้อเพลิงจากแหล่งใหม่มาใช้แทนน้ำมันที่ใช้ในปัจจุบันนี้ และหนึ่งในทางเลือกนั้นก็คือ ได-เมทิลอีเทอร์ เนื่องจากประสิทธิภาพของพลังงานเชื้อเพลิงต่าง ๆ และไดเมทิลอีเทอร์มีความใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังมีสมบัติทางด้านกายภาพใกล้เคียงกันอีกด้วย แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและทางเชื้อเพลิงของ ไดเมทิลอีเทอร์และเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ [29]

Properties คุณสมบัติ	DME* ไดเมทิลอีเทอร์*	Methane มีเทน	Propane โพรเพน	Methanol เมทานอล	Diesel** น้ำมันดีเซล**
ความถ่วงจำเพาะ (20 °C)	0.67	0.42	0.49	0.79	0.832 (10 °C)
จุดเดือด (°C)	- 25	- 161	- 42	65	180 – 370
ความดันไอ (atm, 25 °C)	6.1	26	9.3	-	-
ค่าซีเทน	55 - 60	0	5	5	40 – 55
ค่าพลังงานความร้อน (kcal / kg)	6,900	12,000	11,100	4,800	10,000
โครงสร้างทางเคมี	CH ₃ OCH ₃	CH ₄	C ₃ H ₈	CH ₃ OH	C ₁₀ - C ₂₀

ปริมาณกำมะถัน *0 ppm (1 ส่วนใน 1 ล้านส่วน) **350 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5.2 กระบวนการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ [30]

กระบวนการผลิตไดเมทิลอีเทอร์แบบดั้งเดิมจะใช้เมทานอลเป็นวัตถุดิบในการผลิตผ่านปฏิกิริยาดังน้ำออกหรือปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นกระบวนการ 2 ขั้นตอนหรือการสังเคราะห์ทางอ้อม คือ การสังเคราะห์เมทานอล แล้วจึงนำเมทานอลมาผลิตเป็นไดเมทิลอีเทอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เช่น แกมมาออกลูมินา ซีโอไลท์ ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสโดยประมาณและที่ความดันบรรยากาศ อย่างไรก็ตามค่าการเปลี่ยนและค่าการเลือกเกิดอยู่ในระดับต่ำ อีกทั้งยังมีต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตสูง เนื่องจากสารตั้งต้นคือ เมทานอลมีราคาสูง

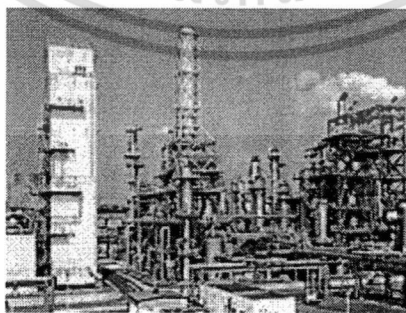


รูปที่ 2.7 การผลิต ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลผ่านปฏิกิริยาดังน้ำออก

ปัจจุบันกระบวนการผลิตที่ได้รับความนิยมคือ การผลิตไดเมทิลอีเทอร์โดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์ ($CO:H_2 = 1:1$) ผ่านกระบวนการความร้อนเคมี แสดงดังรูปที่ 2.8 ในเครื่องปฏิกรณ์ slurry บนตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของทองแดง สังกะสี และอลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส และความดัน 30 บรรยากาศ มีค่าการเปลี่ยนของแก๊สสังเคราะห์สูงถึงร้อยละ 40 และมีค่าการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์ถึงร้อยละ 90 ซึ่งเทคโนโลยีนี้ได้ผ่านการทดสอบในโรงงานต้นแบบขนาดกำลังผลิต 50 ตันต่อวันในประเทศญี่ปุ่นเป็นที่สำเร็จแล้ว แสดงดังรูปที่ 2.9 และหลายประเทศทั่วโลกกำลังสร้างโรงงานที่ใช้เทคโนโลยีนี้ผลิตไดเมทิลอีเทอร์



รูปที่ 2.8 การผลิต ไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์

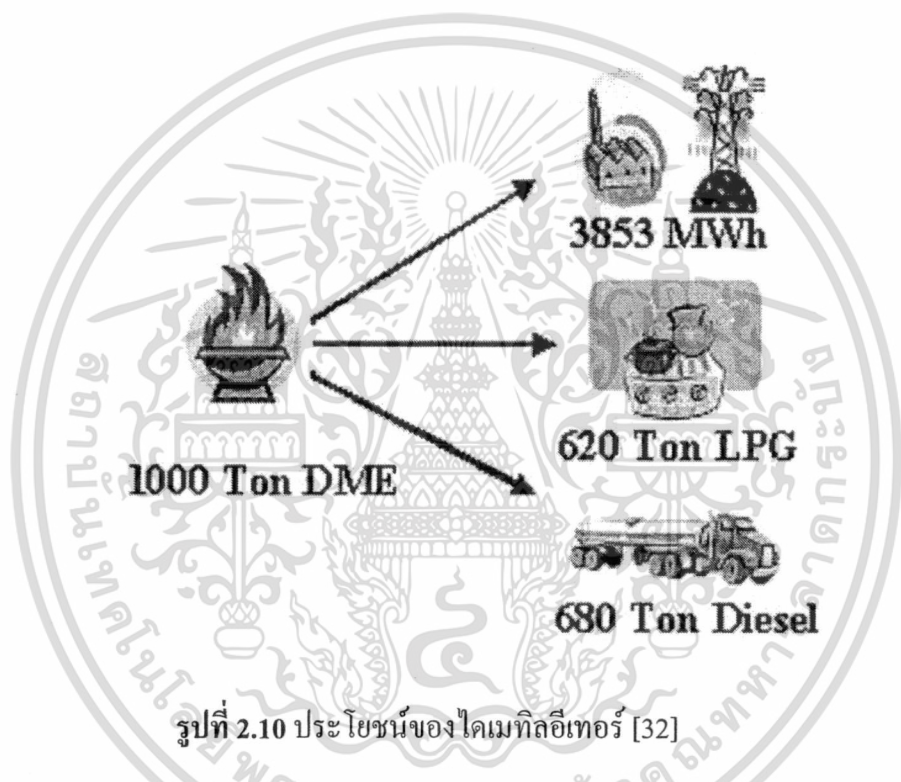


รูปที่ 2.9 โรงงานผลิตไดเมทิลอีเทอร์ [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5.3 อนาคตของไดเมทิลอีเทอร์ในด้านเชื้อเพลิง [30]

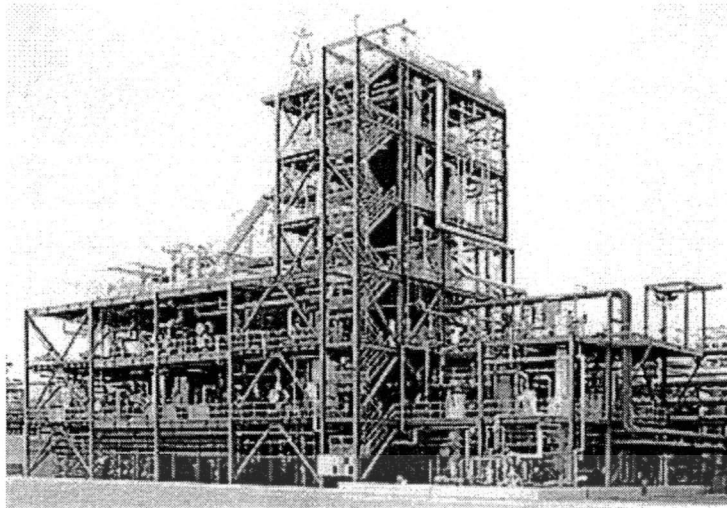
จากการที่ไดเมทิลอีเทอร์ สามารถนำมาใช้ทดแทนแก๊สหุงต้มและน้ำมันดีเซลได้นั้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.10 เมื่อเปรียบเทียบในเชิงเศรษฐศาสตร์ พบว่าไดเมทิลอีเทอร์ยังคงมีต้นทุนที่สูงกว่าแก๊สหุงต้มและน้ำมันดีเซล เนื่องจากความซับซ้อนในการผลิตและต้นทุนของแก๊สสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาราคาของน้ำมันดิบที่สูงขึ้น ประกอบกับหากเราพิจารณาในเชิงคุณภาพชีวิต สิ่งแวดล้อม ภาวะโลกร้อนนั้น จะพบว่าโอกาสสำหรับไดเมทิลอีเทอร์ นั้น อยู่ไม่ไกลนัก ซึ่งในขณะนี้ มีหลายประเทศกำลังให้ความสนใจอย่างมาก เช่น ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา จีน เป็นต้น



รูปที่ 2.10 ประโยชน์ของไดเมทิลอีเทอร์ [32]

ประเทศต่าง ๆ เหล่านี้กำลังพัฒนากระบวนการผลิตและจัดสร้างโรงงานผลิตขนาดใหญ่ แสดงดังรูปที่ 2.11 เพื่อลดต้นทุนของไดเมทิลอีเทอร์ และนำมาใช้ทดแทนแก๊สหุงต้มในบริเวณที่ขาดแคลน ปัจจุบันในประเทศไทย ชื่อของไดเมทิลอีเทอร์ยังไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลายนัก มีเพียงนักวิจัยบางกลุ่มในสถาบันอุดมศึกษา และหน่วยงานวิจัยของรัฐเท่านั้นที่ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตไดเมทิลอีเทอร์และการทดสอบการใช้ไดเมทิลอีเทอร์เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ดีเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 โรงงานผลิตไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากแก๊สธรรมชาติ ที่มีกำลังในการผลิต 100 ตันต่อวัน ณ ประเทศญี่ปุ่น [29]

2.1.6 การแลกเปลี่ยนไอออน [19]

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจะมีการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นนอกเหนือ จากโปรตอน ไอออนที่มีประจุต่ำ เช่น Na^+ จะแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุสูงกว่า เช่น Ni^{2+} และมีสมมูลเกิดขึ้นดังนี้ (S คือ หมู่ฟังก์ชันใด ๆ)



การแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อไอออนตัวใหม่ที่เข้ามาแทนที่สามารถจับกับตัวรองรับได้แข็งแรงกว่าไอออนเดิม ส่วนใหญ่เมื่อพูดถึงการแลกเปลี่ยนไอออน เรามักจะนึกถึงการแช่ตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือของโลหะที่ต้องการแลกเปลี่ยน แล้วรอจนได้ปริมาณการแลกเปลี่ยนที่ต้องการ ซึ่งข้อดีของการแลกเปลี่ยนไอออน คือ จะได้การกระจายตัวของไอออนโลหะที่เป็นเนื้อเดียว แต่การแลกเปลี่ยนมีข้อจำกัดเนื่องจากต้องใช้เวลาาน และเมื่อการแลกเปลี่ยนอิ่มตัวแล้วจะไม่สามารถเพิ่มปริมาณไอออนได้อีก

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

- 3.1.1 ฝั่ลลอยของขานอ้อยจากโรงงานผลิตน้ำตาล
- 3.1.2 กรดไฮโครคลอริก (36 wt% HCl, Ajak Finechem)
- 3.1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Analytical grade, Merck)
- 3.1.4 เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (40 wt% TEAOH solution in water, Fluka Chimika)
- 3.1.5 โพแทสเซียมคลอไรด์ (Analytical grade, Merck)
- 3.1.6 โซเดียมคลอไรด์ (Analytical grade, Lab Scan)
- 3.1.7 โซเดียมอะลูมิเนต (Wako)
- 3.1.8 แอมโมเนียมไนเตรท (Analytical grade, Ajax Finechem)
- 3.1.9 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Asia Pacific Specialty Chemicals Limited)
- 3.1.10 $\text{Zr}(\text{NO}_3)_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (Sigma-aldrich)

3.2 วิธีการทดลอง

แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนคือ

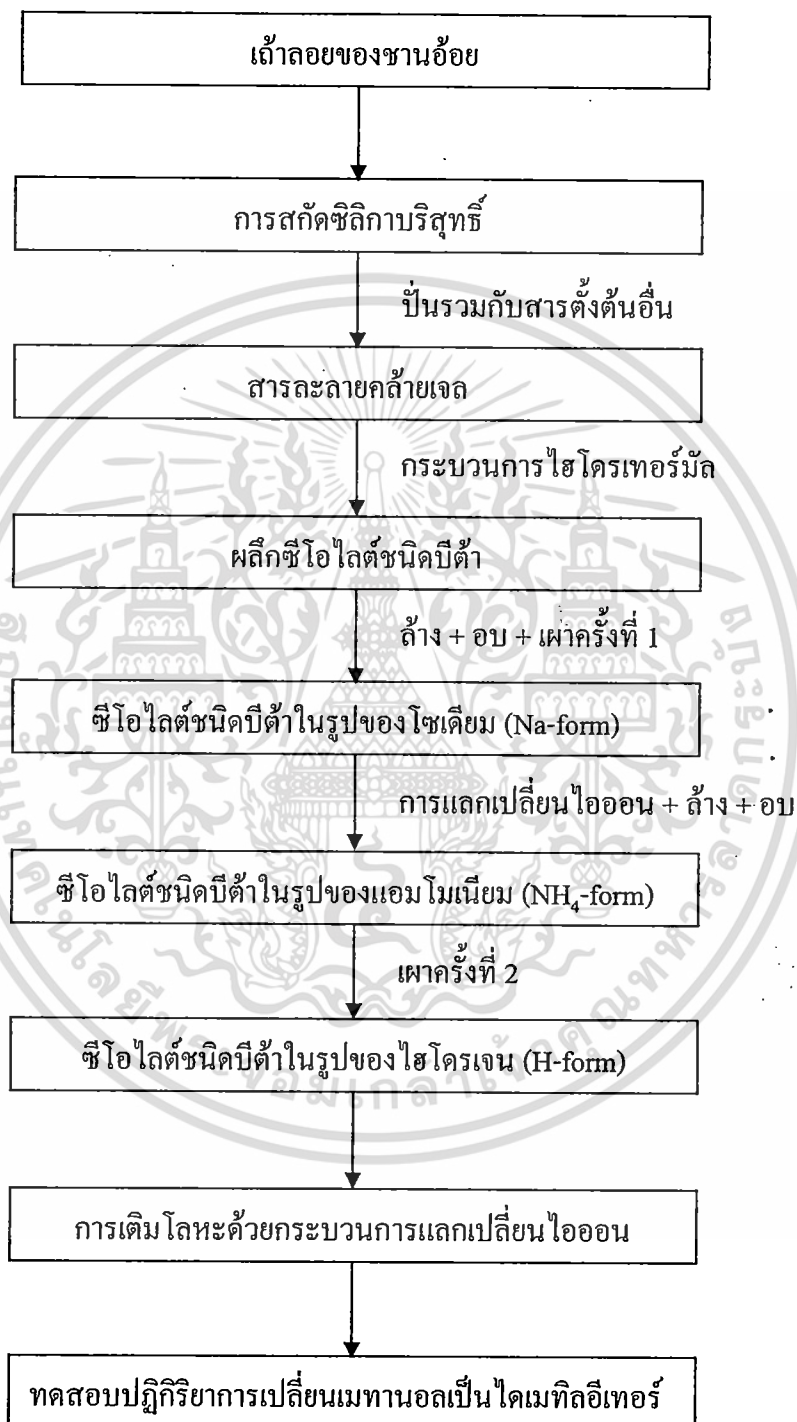
- 3.2.1 การเตรียมซลิกาจากฝั่ลลอยของขานอ้อยเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์บีต้า
- 3.2.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดบีต้า
- 3.2.3 การนำซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่สังเคราะห์ได้ มาทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะ
- 3.2.4 การนำซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะ มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์

3.2.1 การเตรียมซลิกาจากฝั่ลลอยของขานอ้อย เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์บีต้า

3.2.1.1 การสกัดซลิกาบรสิฐธิจากฝั่ลลอยของขานอ้อย

เริ่มจากการนำฝั่ลลอยของขานอ้อย 10 กรัม ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 60 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 70 ถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองสารละลายของซลิกาจากฝั่ลลอยของขานอ้อยด้วยกระดาษกรอง (Whatman No. 41) และล้างฝั่ลลอยของขานอ้อยด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้จนเย็น จากนั้นไทเตรตสารละลายของซลิกาคด้วยสารละลายกรดไฮโครคลอริก 1 โมลาร์ จนมีค่า pH เท่ากับ 7 ทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 18 ชั่วโมง จะเกิดเป็นเจลของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกา จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำออกจากซิลิกาเจล อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อได้เป็นซิลิกา แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้งเพื่อละลายเกลือ อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ซิลิกาบริสุทธิ์



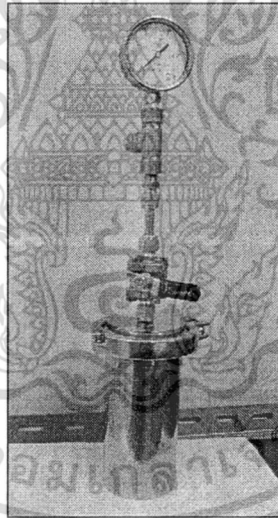
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดบีต้า

3.2.2.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดบีต้าจากแหล่งซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอยของชานอ้อย

เริ่มจากการผสมซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอยของชานอ้อย เตะตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมอะลูมิเนต และน้ำเข้าด้วยกันโดยปริมาณซิลิกาที่ใช้กำหนดจากอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ซึ่งปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.1 โดยในระหว่างที่มีการเติมสารแต่ละตัวจะทำการปั่นกวนอย่างแรงจนได้สารละลายใส ใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง นำสารที่ได้เทลงในภาชนะเทปลอนและติดตั้งอุปกรณ์อัดความดัน (Autoclave) แสดงในรูปที่ 3.2 โดยปรับค่าความดันไว้ที่ 3 บาร์ของไนโตรเจน ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกที่ 135 องศาเซลเซียส และอบทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้จนเย็นที่อุณหภูมิห้อง นำสารที่ได้ออกจากเครื่องอัดความดัน นำมาล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อปรับค่า pH ให้ได้ประมาณ 8-9 นำผลึกที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาครั้งที่ 1 ได้ผลึกในรูปของโซเดียม และแลกเปลี่ยนไอออนด้วยแอมโมเนียมไนเตรท ได้ผลึกในรูปของแอมโมเนียม และสุดท้ายนำไปเผาครั้งที่ 2 ได้ผลึกในรูปของไฮโดรเจน



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดบีต้าจากเถ้าลอยของชานอ้อย

สารตั้งต้น	น้ำหนัก (กรัม)
ซิลิกา (Si/Al = 15)	11.78
เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์	18.63
โซเดียมไฮดรอกไซด์	0.33
โพแทสเซียมคลอไรด์	0.30
โซเดียมคลอไรด์	0.12
โซเดียมอะลูมินต	0.36
น้ำกลั่น	16.2

3.2.2.2 การเผาครั้งที่ 1

นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปเผาในสภาวะที่มีอากาศ ที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส โดยเริ่มเผาที่อุณหภูมิห้องจนถึง 540 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 60 นาที และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง เพื่อเผากำจัดสารเคมีกำหนดโครงสร้างออกจากผลึก จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นผลึกในรูปของโซเดียม

3.2.2.3 การแลกเปลี่ยนไอออนด้วยแอมโมเนียมในเตรท

การแลกเปลี่ยนไอออน ทำโดยผสมผลึกของผลิตภัณฑ์ที่เผาครั้งที่ 1 แล้ว กับสารละลายแอมโมเนียมในเตรทความเข้มข้น 2 โมลาร์ ซึ่งมีอัตราส่วนของผลึกต่อสารละลาย คือ 1 กรัม ต่อ 30 มิลลิลิตร ปั่นกวนพร้อมทั้งให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งของผสมไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น และทำการแลกเปลี่ยนไอออนซ้ำอีก 2 ครั้ง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นผลึกในรูปของแอมโมเนียม

3.2.2.4 การเผาครั้งที่ 2

นำผลึกของผลิตภัณฑ์ในรูปแอมโมเนียมไปเผา โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึง 500 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารที่ไม่สมดุล เช่น แอมโมเนีย และ NO_x ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นผลึกในรูปของโปรตรอน (H-beta)

3.2.2.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะ (Characterization)

ตัวอย่างเถ้าลอยของชานอ้อยถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF ซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอยของชานอ้อย และผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ จะถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF, วิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง XRD (D8 Advance AG) ในช่วงการสแกน (2 θ) 5 - 80° และศึกษาลักษณะรูปร่างของผลึกด้วยเครื่อง SEM (JEOL รุ่น JSM-5410LV)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.6 การคำนวณหาขนาดของผลึกจากการกว้างออกของพีค XRD ด้วยสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer equation) [19]

$$\langle L \rangle \text{ ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)} = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3.1)$$

โดยที่ $\langle L \rangle$ คือ ขนาดของอนุภาคในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบที่เกิดการกระเจิงของรังสีเอกซ์
 K คือ ค่าคงที่ มักจะมีค่าเท่ากับ 1
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
 β คือ ความกว้างของพีคที่ครึ่งหนึ่งของพีคที่สูงที่สุด
 θ คือ มุมระหว่างลำรังสีเอกซ์กับระนาบที่เกิดการกระเจิงของรังสีเอกซ์

3.2.3 การนำซีโอไลต์ชนิดบีตัวที่สังเคราะห์ได้ มาทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะ

3.2.3.1 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน [33]

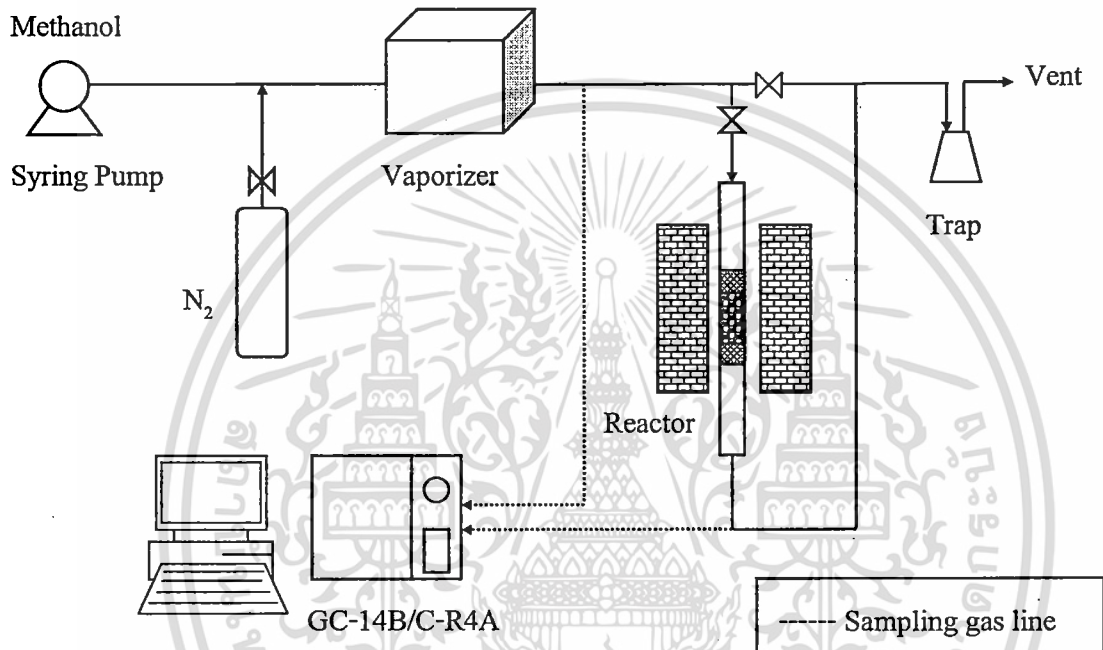
เริ่มโดยการเติมซีโอไลต์บีตัว 10 กรัม ลงในสารละลาย $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Zr}(\text{NO}_3)_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งในแต่ละสารละลายจะทำกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ภายใต้การรีฟลักซ์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ต่อจากนั้นนำของแข็งที่ได้ไปกรอง ล้าง และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน แล้วนำไปเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณโลหะในซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนแล้ว

3.2.4 การนำซีโอไลต์ชนิดบีตัวที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะ มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์

3.2.4.1 การทดสอบปฏิกิริยา

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงกระบวนการการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลด้วยปฏิกิริยาดีไฮโดรเดชัน (ปฏิกิริยาการขจัดน้ำ) ในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องซึ่งมีอุปกรณ์หลักแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยเมทานอลที่มีสถานะเป็นของเหลวจะถูกป้อนด้วย syringe pump เข้าไปรวมกับแก๊สไนโตรเจนซึ่งเป็นแก๊สพา จากนั้นจะผ่านเข้าไปในอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนสถานะเมทานอลจากของเหลวให้กลายเป็นไอ (Vaporizer) ในอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อไนโตรเจน 1 ต่อ 4 ซึ่งจะมีอัตราไหลรวมเท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อนาที ช่วงแรกของการทดลองจะมีการตรวจวัดความเข้มข้นของเมทานอลก่อนเริ่มทำปฏิกิริยาให้คงที่ โดยการใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟ (Shimadzu, GC-14B) และเครื่องประมวลผล (Shimadzu, C-R4A) ในระหว่างที่ความเข้มข้นของเมทานอลยังไม่คงที่นั้น กระแสของเมทานอลจะไหลเข้าสู่เครื่องดักจับโดยตรงโดยไม่ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ และเมื่อความเข้มข้นของเมทานอลคงที่แล้ว กระแสของเมทานอลจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งมีท่อแก้วสำหรับทำปฏิกิริยาที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีต้า 0.1 กรัมอยู่ โดยจะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200, 225, 250 และ 275 องศาเซลเซียส ซึ่งทุกอุณหภูมิจะทำปฏิกิริยา 3 ครั้ง หลังจากทำปฏิกิริยาการขจัดน้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์แล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกส่งไปวิเคราะห์และประมวลผลด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟและเครื่องประมวลผล ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้นำมาวิเคราะห์จะถูกดักจับด้วยอุปกรณ์ดักจับสารที่ควบแน่นง่าย โดยทำการหล่อเย็น เพื่อป้องกันการปล่อยไอของสารระเหยออกสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนั้นภายในระบบจะมีการพันท่อด้วยแถบให้ความร้อนเพื่อป้องกันการควบแน่นของสารต่าง ๆ และมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 110 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 แผนภาพอย่างง่ายของชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลอง คือ การนำผลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีมาทำการคำนวณหาค่าร้อยละการแปลงผันของเมทานอล (% Conversion of Methanol) ค่าร้อยละการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์ (% Selectivity of Dimethyl ether) และค่าร้อยละผลได้ของไดเมทิลอีเทอร์ (% Yield of Dimethyl ether) โดยมีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$\text{ค่าร้อยละการแปลงผัน} = \frac{\text{จำนวน โมลขาเข้า} - \text{จำนวน โมลขาออก}}{\text{จำนวน โมลขาเข้าของเมทานอล}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\text{ค่าร้อยละการเลือกเกิด} = \frac{\text{จำนวน โมลอะตอมของคาร์บอนของไดเมทิลอีเทอร์}}{\text{จำนวน โมลอะตอมของคาร์บอนในเมทานอลที่ถูกใช้ในปฏิกิริยา}} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{ค่าร้อยละผลได้ของ ไดเมทิลอีเทอร์} = \frac{\text{ค่าร้อยละการแปลงผัน} \times \text{ค่าร้อยละการเลือกเกิด}}{100} \quad (3.4)$$

ค่าต่าง ๆ นั้นวัดเทียบจากพื้นที่ใต้กราฟของเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี โดยจำนวน โมลขาเข้าของเมทานอลคิดจากความเข้มข้นของเมทานอลในสายป้อนก่อนการทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนค่าอื่น ๆ นั้น คำนวณจากผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดลองนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์โคเมทิลอิเทอร์จากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์บีต้า โดยการสังเคราะห์ซีโอไลต์บีตานั้นเริ่มจากการสกัดแยกซิลิกาออกจากเถ้าลอยของขานอ้อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นทำให้สารละลายของซิลิกาตกผลึกด้วยสารละลายกรดไฮโดรครอริก อบให้แห้ง และล้างผลึกที่ได้ด้วยน้ำกลั่นเพื่อขจัดเกลือจากผลึกของซิลิกา อบให้แห้งอีกครั้ง จะได้ซิลิกาบริสุทธิ์ที่สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์บีต้าด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและใช้เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีกำหนดโครงสร้างสถานะในการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 135 องศาเซลเซียส ความดันคงที่ 3 บาร์ของไนโตรเจน เวลาในการตกผลึก 48 ชั่วโมงและอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 15 จากนั้นนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ไปปรับปรุงโดยเติม Zr และ Ni ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง XRF (X-Ray Fluorescence spectroscopy) วิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction spectroscopy) และศึกษาลักษณะรูปร่างของผลึกด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy) วิเคราะห์พื้นที่ผิวของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีบีอีที (BET) รวมทั้งศึกษาปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโคเมทิลอิเทอร์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 200 225 250 และ 275 องศาเซลเซียส โดยมีการป้อนเมทานอลที่มีอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อไนโตรเจนเป็น 1 ต่อ 4 ซึ่งมีอัตราไหลรวมเท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อนาที

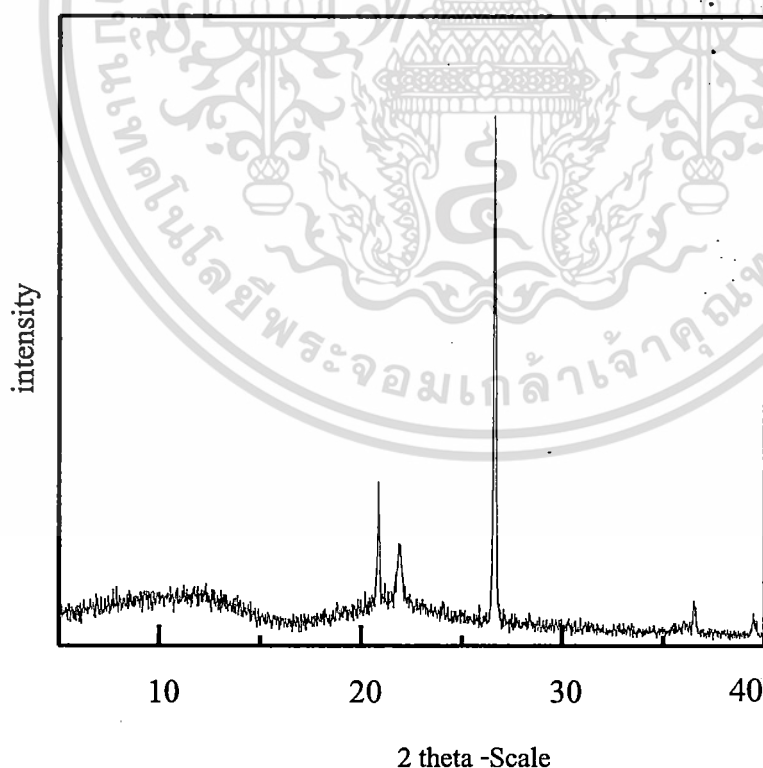
4.1 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยของขานอ้อย

องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าลอยของขานอ้อยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยของขานอ้อยมีปริมาณซิลิกาประมาณร้อยละ 72.8 โดยน้ำหนัก และมีโลหะอื่น ๆ

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของเถ้าลอยของขานอ้อยด้วยเครื่อง XRD ปรากฏพีกหลักที่ตำแหน่ง 2 θ เท่ากับ 20.6 และ 21.8 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งของผลึกควอartz (SiO₂) ชนิดไตรโดไมท์และแอลฟาคริสโตบาไลต์ตามลำดับ แสดงผลดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากขานอ้อย

องค์ประกอบ	ปริมาณ (wt %)
Silica (SiO ₂)	72.8
Alumina (Al ₂ O ₃)	6.80
Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	4.27
Potassium oxide (K ₂ O)	2.21
Magnesium oxide (MgO)	1.68
Phosphorus pentoxide (P ₂ O ₅)	1.10
Titanium oxide (TiO ₂)	0.62
Sodium oxide (Na ₂ O)	0.13
Sulphur trioxide (SO ₃)	0.20
Calcium oxide (CaO)	9.70
Manganese oxide (MnO)	0.19

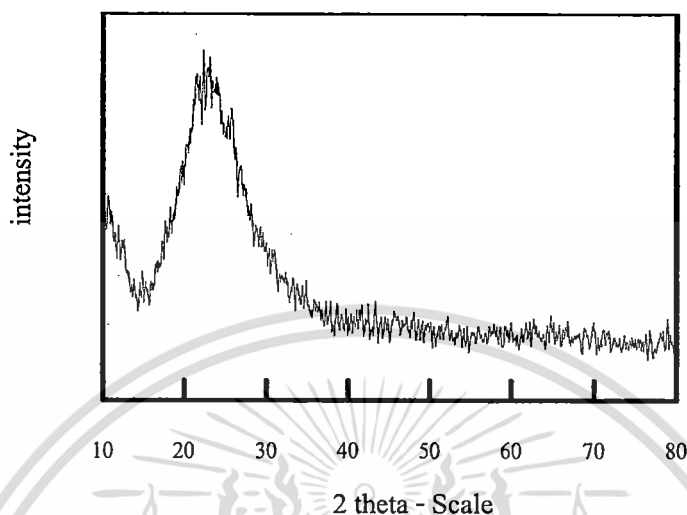


รูปที่ 4.1 XRD ของเถ้าลอยของขานอ้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของซิลิกาอสัณฐานที่สกัดจากเถาตอยของชานอ้อย

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของซิลิกาอสัณฐานที่เตรียมจากเถาตอยของชานอ้อยด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.2 ปรากฏจุดสูงสุดที่ 2θ เท่ากับ 22.16 องศา



รูปที่ 4.2 XRD ของซิลิกาอสัณฐานที่สกัดจากเถาตอยของชานอ้อย

4.3 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์ได้

การสังเคราะห์ซีโอไลต์บีต้า โดยใช้ซิลิกาที่สกัดจากเถาตอยของชานอ้อยเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์บีต้าด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ใช้สภาวะคงที่ที่ความดัน 3 บาร์ของไนโตรเจน อุณหภูมิในการตกผลึก 135 องศาเซลเซียส และมีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 15 โดยใช้เวลาในการตกผลึก 48 ชั่วโมง แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

รูปแบบพิกตรฐานของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์ด้วยแหล่งซิลิกาในเชิงพาณิชย์ ปรากฏพิกหลักที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 7.8 และ 22.5 องศา แสดงดังรูปที่ 4.3 เมื่อวิเคราะห์ความเป็นผลึกของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์ได้ด้วย XRD แสดงดังรูปที่ 4.4 เมื่อเวลาในการตกผลึกเป็น 48 ชั่วโมง ปรากฏพิกหลักของซีโอไลต์บีต้าที่ตำแหน่งหลัก 2θ เท่ากับ 7.8 และ 22.5 องศา

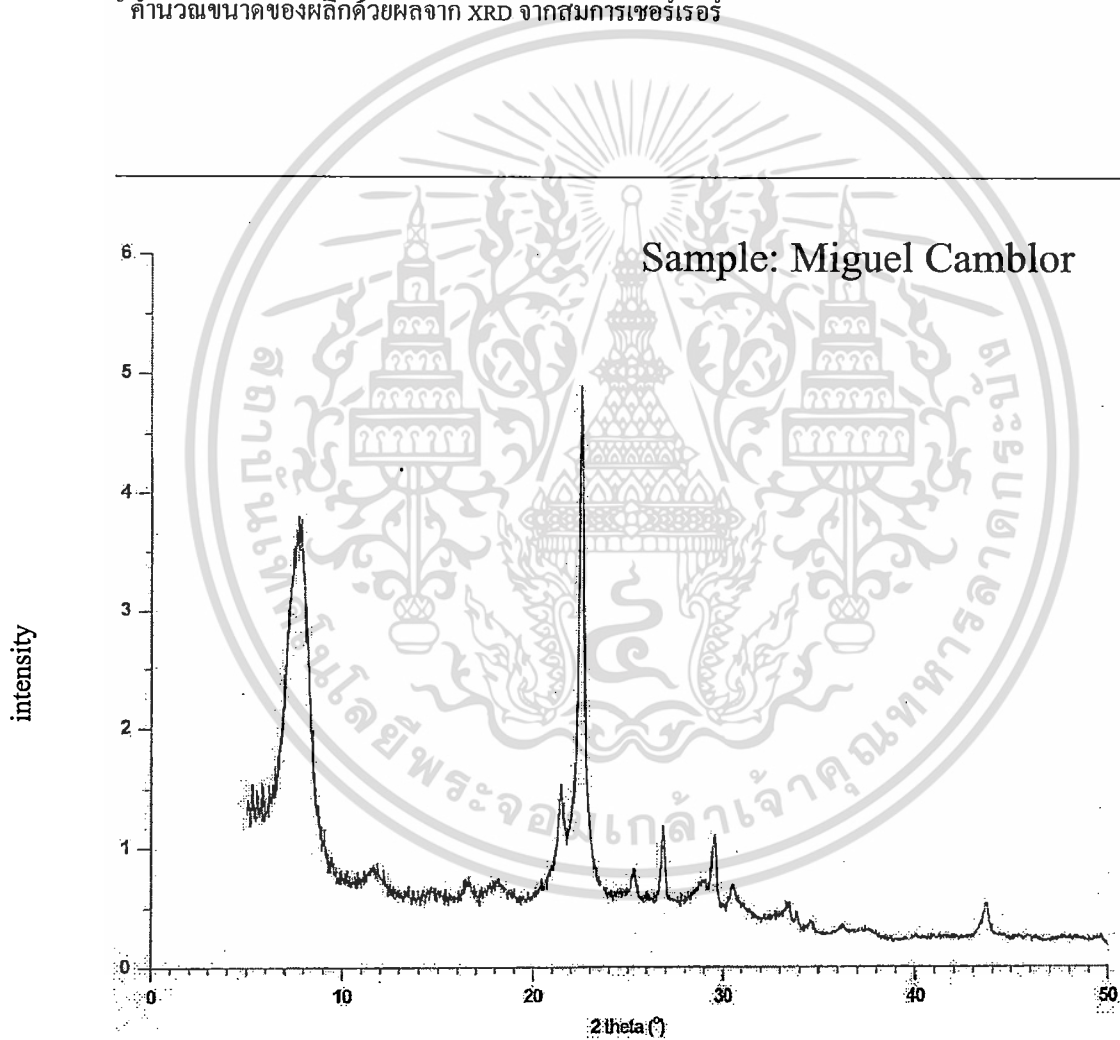
เมื่อวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าผลึกซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์จากซิลิกาที่สกัดจากเถาตอยของชานอ้อยที่มีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 15 และใช้เวลาในการตกผลึก 48 ชั่วโมง ผลึกมีขนาดสม่ำเสมอ มีความเป็นผลึกที่สมบูรณ์ โดยมีขนาดประมาณ 0.1-1.4 ไมโครเมตร และมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.51 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.2 ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์บีต่ำจากแหล่งซิติกาที่สกัดจากเถาวัลย์ของชานอ้อยที่ใช้เวลาในการตกผลึก 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิติกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al) เท่ากับ 15 และอุณหภูมิในการสังเคราะห์ 135 องศาเซลเซียส

Si/Al ^a	เวลาในการตกผลึก (ชั่วโมง)	ขนาดผลึก (ไมโครเมตร)		ผลการสังเคราะห์
		SEM	สมการเชอร์เรอร์ ^b	
15	48	0.1-1.4	0.45	เกิดซีโอไลต์บีต่ำ

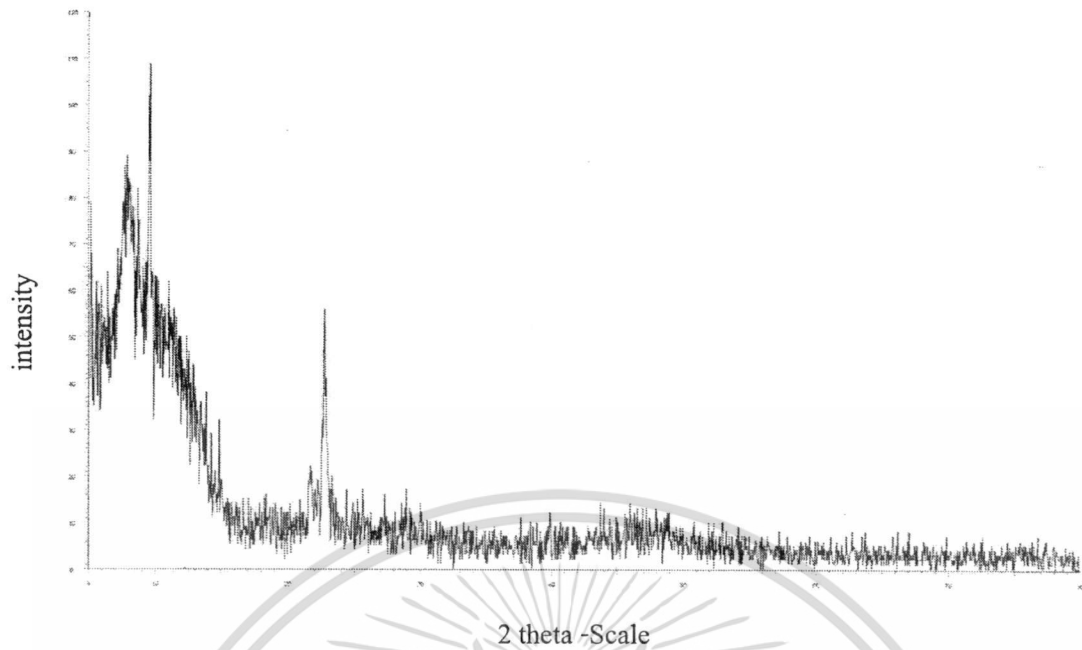
^a XRF วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

^b คำนวณขนาดของผลึกด้วยผลจาก XRD จากสมการเชอร์เรอร์

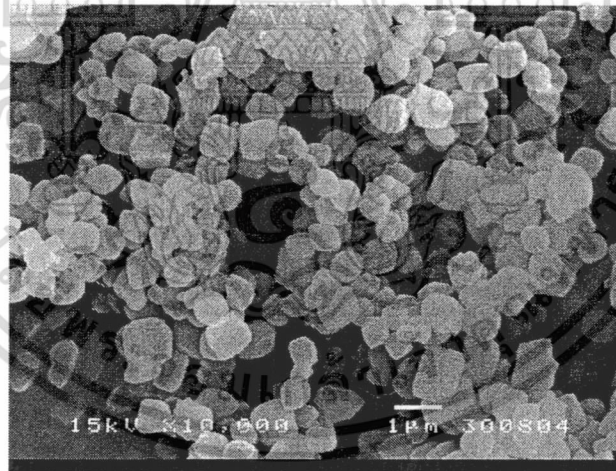


รูปที่ 4.3 XRD ของซีโอไลต์บีต่ำที่สังเคราะห์จากแหล่งซิติกาในเชิงพาณิชย์ [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 XRD ของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของชานอ้อย

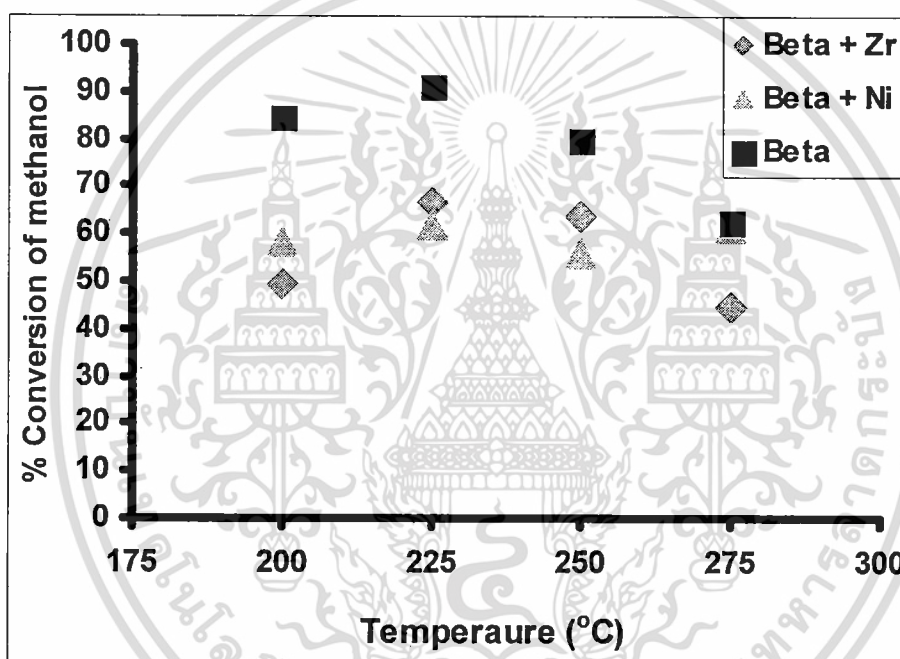


รูปที่ 4.5 SEM ของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์จากซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอยของชานอ้อยที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 15, เวลาในการตกผลึก 48 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบปฏิกิริยา

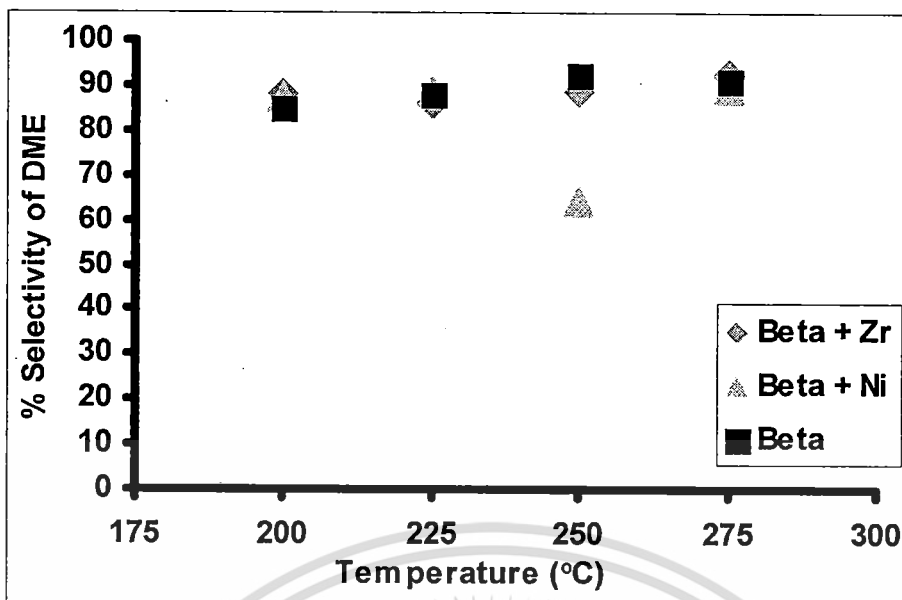
การทดสอบปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์โดยใช้ซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์จากซิลิกาที่สกัดจากเถาวัลย์ชานอ้อย ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200, 225, 250 และ 275 องศาเซลเซียส พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแปลงผันของเมทานอลกับอุณหภูมิปฏิกิริยา ดังรูปที่ 4.6 ค่าการแปลงผันของเมทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิปฏิกิริยาเท่ากับ 225 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 91.3 และเมื่อทำการปรับปรุงซีโอไลต์บีต้าด้วย Zr และ Ni พบว่าค่าการแปลงผันของเมทานอลมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 225 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 66.6 และ 62.2 ตามลำดับ แต่ค่าการแปลงผันของเมทานอลลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น คาดว่าเกิดจากการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ เนื่องจากการเกิดโค้กทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละการแปลงผันของเมทานอล

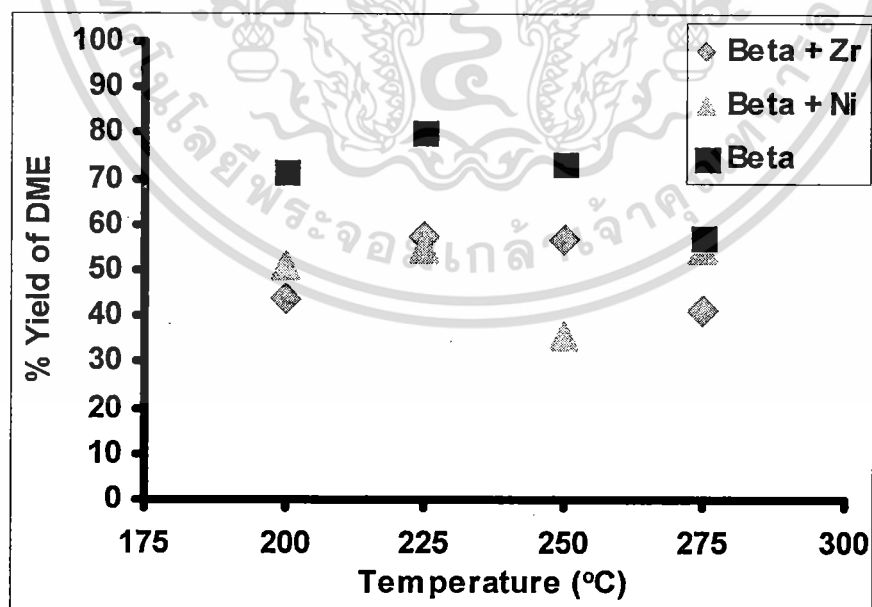
สำหรับค่าการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์พิจารณาที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 225 องศาเซลเซียส พบว่าซีโอไลต์บีต้ามีค่าร้อยละการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์สูงสุดเท่ากับ 88.2 และเมื่อทำการปรับปรุงซีโอไลต์บีต้าด้วย Zr และ Ni พบว่ามีค่าร้อยละการเลือกเกิดสูงสุดเท่ากับ 86.0 และ 88.8 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์

สำหรับค่าร้อยละผลได้ของไดเมทิลอีเทอร์ แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่ามีค่าร้อยละผลได้ของไดเมทิลอีเทอร์สูงสุด ที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 225 องศาเซลเซียส โดยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์ได้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 80.5 และซีโอไลต์บีต้าที่ถูกรับปรุงด้วย Zr และ Ni มีค่าร้อยละผลได้สูงสุดเท่ากับ 57.2 และ 55.2 ตามลำดับ

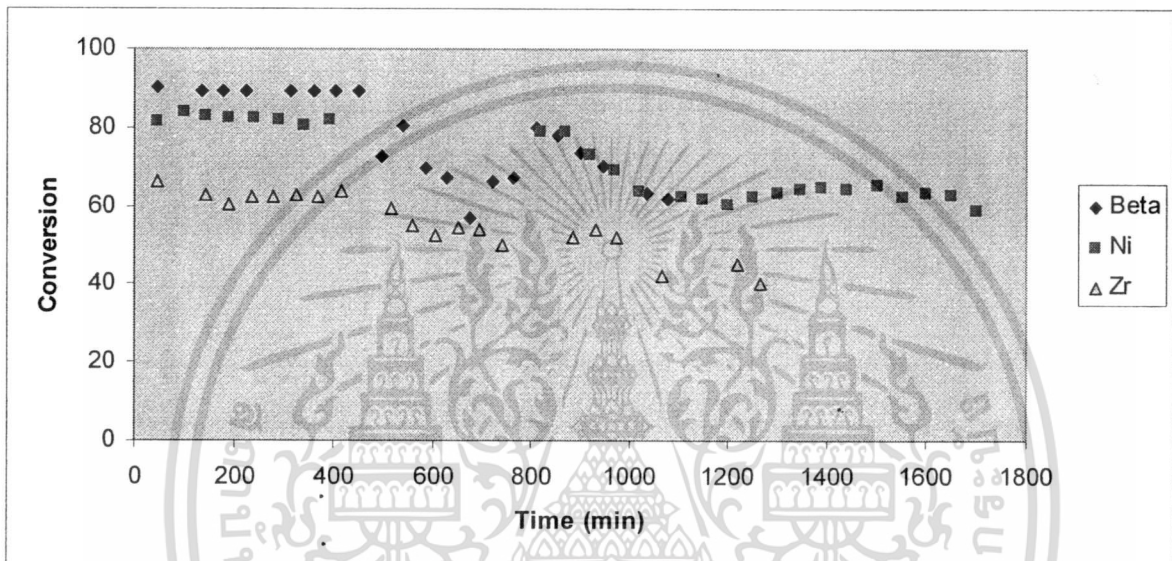


รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละผลได้ของไดเมทิลอีเทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาจากค่าร้อยละผลได้ของโคเมทิลอิเทอร์ที่ลดลงของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น คาดว่าเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาอันเนื่องมาจากการเกิดโค้ก ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละการแปลงผันของเมทานอลที่ลดลง

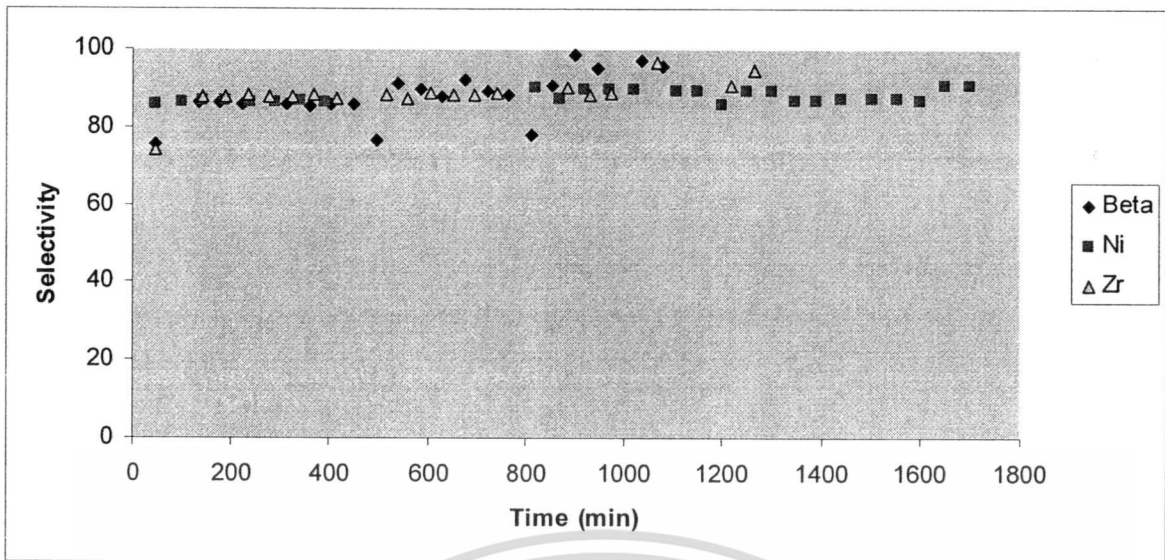
เมื่อศึกษาความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิด โดยทดสอบต่อเนื่องจนกระทั่งพบการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์บีดำมีการเสื่อมสภาพที่รวดเร็วมาก แต่เมื่อเติมโลหะนิกเกิลลงไปบนซีโอไลต์บีดำจะทำให้ค่าการแปลงผันของเมทานอลมีความเสถียรสูงมากสามารถใช้ต่อเนื่องได้เป็นเวลานาน (ดังรูปที่ 4.9)



รูปที่ 4.9 ผลของค่าการแปลงผันของเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์บีดำทั้งสามชนิด เมื่อทดสอบความเสถียร ที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส

และเมื่อพิจารณาค่าความการเลือกเกิดโคเมทิลอิเทอร์ พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.10 ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าการเติมโลหะนิกเกิลบนซีโอไลต์บีดำไม่ส่งผลถึงการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง แต่มีผลเพียงทำให้เกิดความเสถียรเท่านั้น ซึ่งอาจเกิดจากโลหะที่เติมได้ไปบวกรวมจุดว่างไวของซีโอไลต์บีดำเพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเป็นสารอื่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ผลของค่าการเลือกเกิด ไดเมทิลอีเทอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์บีต้าทั้งสามชนิด เมื่อทดสอบความเสถียร ที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ซีโอไลต์ชนิดบีต้าสามารถสังเคราะห์ได้จากซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอยของชานอ้อยโดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล และใช้เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TEAOH) เป็นสารเคมีกำหนดโครงสร้าง และมีการปรับปรุงด้วย Zr- และ Ni- โดยใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่สังเคราะห์ได้ในการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์ ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งที่อุณหภูมิ 200 225 250 และ 275 องศาเซลเซียส พบว่าซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์ โดยพบว่ามีค่าร้อยละผลได้สูงที่สุดที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 225 องศาเซลเซียส เท่ากับ 80.5 และซีโอไลต์ที่ถูกปรับปรุงด้วย Zr และ Ni มีค่าร้อยละผลได้สูงที่สุดที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 225 องศาเซลเซียส เท่ากับ 57.2 และ 55.2 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ศึกษาความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยาและศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากการทำปฏิกิริยาเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารอ้างอิง

- [1] FAO, 2005
- [2] ดร.พิพัฒน์ วีระถาวร, “วิจัย พัฒนาอ้อยและน้ำตาล”
- [3] http://vivaldi.cpe.ku.ac.th/~note/newscrawler/view_news.php?id=400643
- [4] [http://www.dft.moc.go.th/the_files/\\$\\$10/level4/SUGAR.XLS](http://www.dft.moc.go.th/the_files/$$10/level4/SUGAR.XLS)
- [5] Kingsman News Summary
- [6] <http://www.ocsb.go.th/>
- [7] <http://www.sugarzone.in.th/>
- [4] [http://www.dft.moc.go.th/the_files/\\$\\$10/level4/SUGAR.XLS](http://www.dft.moc.go.th/the_files/$$10/level4/SUGAR.XLS)
- [8] <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/march/radio3-1.htm>
- [9] Prasetyoko, D., Ramli, Z., Endud, S., Hamdan, H. and Sulikowski, B., “Conversion of rice husk ash to zeolite beta”, Waste Management, Vol. 26, 2006, pp.1173-1179.
- [10] Hagen J., Industrial catalysis, Wiley-VCH: A practical approach, 1999.
- [11] Sittichai Kulawong, “Synthesis of zeolite beta from rice husk silica and utilization as catalytic support for platinum”, Institute of Science, Suranaree University of Technology
- [12] Nuttapon Akanit, “Silica Gel Production from Bagasse Ash”, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, 2006
- [13] จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์, “การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยและเถ้าลอยถ่านหิน”, โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์-สภาวะแวดล้อม (สหสาขาวิชา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [14] จุฑามาศ อินตะศรี, “การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดบีต้าจากเถ้าลอยของขานอ้อย”, โครงการงานพิเศษวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550
- [15] <http://www.sugarzone.in.th/know/know2.asp>
- [16] ปรีชา สุริยพันธ์, กรมวิชาการเกษตร
- [17] Langreny, F and Hugot, 1969
- [18] <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/march/radio3-1.htm>
- [19] ตะวัน สุขน้อย, “หนังสือประกอบการเรียนวิชาซีโอไลต์และสารมีรูพรุนที่เกี่ยวข้อง”, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [20] King R.B, “Encyclopedia of inorganic chemistry”, Chichester: John Wiley, 1994,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pp. 4365-4391.

- [21] คทาศ พลสว่าง, “การผลิตซีโอไลต์ชนิด Linde type A จากซีเถ้าขานอ้อย”, โครงการงานพิเศษ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2550
- [22] Mrier W.M. and Olson D.H., “Atlas of zeolite structure types”, 3rd revised ed., int. zeolite Assoc. Boston: Butterworth-Heiemann, 1992.
- [23] <http://www.sciencedaily.com/releases/2007/08/070820141055.htm>
- [24] <http://www.vcharkarn.com/include/vcafe/showkratoo.php?Pid=109712>
- [25] www.vcharkarn.com/varticle/33231/2
- [26] www.sc.chula.ac.th/.../topic_synfuel.htm
- [27] www.greencarcongress.com/2005/05/volvo_introd...
- [28] www.dmeforum.jp
- [29] www.jgc.co.jp/.../05cleanenergy_power/index.html
- [30] www.ripi.ir/en/dme.asp
- [31] <http://www.vcharkarn.com/varticle/37452>
- [32] จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, “การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์”, กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547
- [33] Jinhua Fei, Zhaoyin Hou, Bing Zhu, Hui Lou, Xiaoming Zheng, “Synthesis of dimethyl ether (DME) on modified HY zeolite and modified HY zeolite-supported Cu–Mn–Zn catalysts”, Applied Catalysis A: General, Vol 304, 2006, pp. 49-54.
- [34] www.iza-online.org/.../Zeolite%20Beta.html

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Department of Chemical Engineering

Faculty of engineering

Mahidol University

Tel. 02-889-2138 ext. 6117

Fax. 02-889-2138 ext. 6129

To : Sasitorn Intarachit, Sutasinee Neramittagapong, Pomsawan Assawasaengrat, Arthit Neramittagapong

Date : September 17, 2008

Dear Sir or Madam,

It is our pleasure to invite you to participate in the 18th Thailand Chemical Engineering and Applied Chemistry conference (TICHE 18) which will be held in Pattaya from October 20th to 21st, 2008 .

Your contribution entitled "Methanol Conversion to DME over Beta Zeolite Synthesized from Bagasse Fly Ash" has been accepted as oral presentation.

Yours sincerely,



Prof. Dr. Nuttawan Yoswathana

Head of Chemical Engineering Department,

Faculty of engineering ,

Mahidol University.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
ซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย
Methanol Conversion to Dimethyl ether (DME)
over Beta Zeolite Synthesized from Bagasse Fly Ash**

ศศิธร อินทรชิต¹, สุธาสนิ นรมิตตภพงค์^{1,2*}, พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์¹ และ อาทิตย์ นรมิตตภพงค์³

- 1) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
- 2) ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตรายแห่งชาติ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี 12120
- 3) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

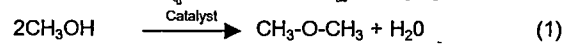
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของขานอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล โดยใช้ซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอยของขานอ้อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์บีต้า และใช้เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetraethylammonium hydroxide, TEAOH) เป็นสารเคมีกำหนดโครงสร้าง สภาวะในการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 135 องศาเซลเซียส ความดันคงที่ 3 บาร์ของไนโตรเจน เวลาในการตกผลึก 48 ชั่วโมงและอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 15 จากนั้นนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ไปปรับปรุงโดยเติม Zr⁺ และ Ni ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค XRD แล้วนำไปทดสอบปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเมทานอลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 200 225 250 และ 275 องศาเซลเซียส โดยมีการป้อนเมทานอลที่มีอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อไนโตรเจนเป็น 1 ต่อ 4 ซึ่งมีอัตราไหลรวมเท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อวินาที จากการทดลองพบว่าซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์ โดยมีค่าร้อยละผลได้สูงที่สุดที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 225 องศาเซลเซียสเท่ากับ 80.46 และซีโอไลต์ที่ถูกปรับปรุงด้วย Zr- และ Ni- มีค่าร้อยละผลได้สูงที่สุดเท่ากับ 57.22 และ 55.21 ตามลำดับ

1. บทนำ (Introduction)

ซีโอไลต์เป็นสารที่มีประโยชน์มากสำหรับอุตสาหกรรมเคมี เช่น อุตสาหกรรมผลิตสารซักล้าง (Detergents) กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) กระบวนการแยกสาร (Separation) และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเทคโนโลยีการกลั่นและอุตสาหกรรมปิโตรเคมีต่าง ๆ [1] ซึ่งมีผู้สนใจการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยของพืชชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นกากของเสียที่เกิดขึ้นจากการเกษตร เช่น เถ้าลอยของแกลบ เถ้าลอยขานอ้อย โดยนำเถ้าลอยของแกลบที่มีผลึกของซิลิกา [2] ไปผลิตเป็นสารดูดซับโมเลกุล (Molecular sieve) และซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ ได้ [3] เช่น ซีโอไลต์บีต้าโดยนำซิลิกาจากแกลบข้าวมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์บีต้าด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มัล และใช้เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกำหนดโครงสร้าง (Template) [4] และแหล่งของซิลิกาที่น่าสนใจอีกแหล่ง คือ เถ้าลอยของขานอ้อย เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศผู้ส่งออกน้ำตาลมากเป็นอันดับสี่ของโลกและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยของขานอ้อยมีปริมาณซิลิกาใกล้เคียงกับเถ้าลอยของแกลบ โดยมีปริมาณซิลิกาสูงถึงร้อยละ 90 ซึ่งมีผู้วิจัยนำเถ้าลอยของขานอ้อยไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของเถ้าลอยขานอ้อยโดยนำไปสังเคราะห์ซีโอไลต์บีต้าเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์ [5] ซึ่งไดเมทิลอีเทอร์นี้สามารถเรียกได้ว่าเป็นพลังงานสะอาดสำหรับศตวรรษที่ 21 [6] เมื่อเปรียบเทียบกับคลอโรฟลูออโรคาร์บอน

(CFCs, ฟรีออน) และ R-134a (HFC-134a) ไดเมทิลอีเทอร์ และฟลูออโร-ไดเมทิลอีเทอร์ เป็นสารชนิดในขวดสเปรย์และเป็นสารทำความเย็นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีศักยภาพในการทำลายโอโซน (Ozone Depletion Potential, ODP) เป็นศูนย์ และทำให้เกิดภาวะโลกร้อนต่ำ (Globe Warming Potential, GWP) [7] นอกจากนี้ยังสามารถใช้ไดเมทิลอีเทอร์เป็นเชื้อเพลิงแทนที่น้ำมันดีเซลสำหรับยานพาหนะได้ เนื่องจากมี NO_x, คาร์บอนมอนอกไซด์ และจำนวนอนุภาคเล็ก ๆ ในไอเสียต่ำจึงไม่จำเป็นต้องมีการปรับสภาพไอเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาใด ๆ [8] และยังสามารถใช้เป็นสารเติมแต่งในเชื้อเพลิงและใช้เป็นแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแทนที่ LPG ได้อีกด้วย [9] ซึ่งไดเมทิลอีเทอร์เกิดจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งที่มีรูพรุนและมีความเป็นกรด [10] ตัวอย่างเช่น ซีโอไลต์, ซิลิกา-อะลูมินา เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [11]



เป็นที่ทราบกันดีว่าอะลูมินาที่ถูกกระตุ้นมีประสิทธิภาพสูงในการเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของแอลกอฮอล์เพื่อให้ได้เป็นไดเมทิลอีเทอร์ที่ให้การเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์สูง แต่ความว่องไวของอะลูมินาที่ถูกกระตุ้นจะมีค่าต่ำกว่าซีโอไลต์ HZSM-5 และซีโอไลต์ HY [12] และมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ (DME) ผ่านปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเมทานอลบนซีโอไลต์ HY และบนซีโอไลต์ HY ที่ถูกปรับปรุงด้วย Fe-, Co-, Ni-, Cr- หรือ Zr- พบว่าซีโอไลต์ HY ที่ถูกปรับปรุงด้วย Zr- และ Ni- มีความว่องไว

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

* Corresponding author; kksutasi@kmit.ac.th

และความเสถียรในปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเมทานอลสูงกว่าซีโอไลต์ HY ที่ถูกปรับปรุงด้วย Fe-, Co- และ Cr- ซึ่งเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเกาะติดของคาร์บอน [13]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการปรับปรุงซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของชานอ้อยที่ถูกปรับปรุงด้วยโลหะทรานซิชัน (Zr- และ Ni-) ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งมีการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ XRD และนำไปทดสอบปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเมทานอลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 200 225 250 และ 275 องศาเซลเซียส

2. การดำเนินการทดลอง (Experiment)

2.1 การเตรียมและวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

เริ่มจากการนำเถ้าลอยของชานอ้อย (จากโรงงานผลิตน้ำตาล) 10 กรัม ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 60 มิลลิลิตร บ่มกวนที่อุณหภูมิ 70 ถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองและล้างเถ้าลอยของชานอ้อยด้วยน้ำกลั่น เติบ 100 มิลลิลิตร ที่ไว้จนเย็น จากนั้นไทเทรตสารละลายของซิลิกาด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (36 wt% HCl, Ajax Finechem) 1 โมลาร์ จนมีค่า pH เท่ากับ 7 ซึ่งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 18 ชั่วโมง จะเกิดเป็นเจลของซิลิกา จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อได้เป็นซิลิกาแล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้งเพื่อละลายเกลือ อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ซิลิกาบริสุทธิ์

ผสมซิลิกาที่สกัดได้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Analytical grade, Merck) เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (40 wt% TEAOH solution in water, Fluka Chimika) โฟแทสเซียมคลอไรด์ (Analytical grade, Merck) โซเดียมคลอไรด์ (Analytical grade, Lab Scan) โซเดียมอะลูมิเนต (Wako) และน้ำเข้าด้วยกันโดยปริมาตรซิลิกาที่ใช้กำหนดจากอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา พร้อมทั้งทำการบ่มกวนอย่างแรงประมาณ 4 ชั่วโมง จะได้สารละลายใส เทสารที่ได้อลงในภาชนะที่เคลือบและติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน (ความดัน 3 บาร์ของไนโตรเจน) ทำการตกผลึกที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้จนเย็นที่อุณหภูมิห้อง นำสารที่ได้มาล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อปรับค่า pH ให้ได้ประมาณ 8-9 นำผลึกที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาครั้งที่ 1 ได้ผลึกในรูปของโซเดียมแลกเปลี่ยนไอออนด้วยแอมโมเนียมไนเตรท (Analytical grade, Ajax Finechem) ได้ผลึกในรูปของแอมโมเนียม และสุดท้ายนำไปเผาครั้งที่ 2 ได้ผลึกในรูปของไฮโดรเจน (ซีโอไลต์บีต้า)

นำซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์ได้ 10 กรัม ทำกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลาย $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (Asia Pacific Specialty Chemicals Limited) หรือ $Zr(NO_3)_4 \cdot 3H_2O$ (Sigma-aldrich) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ภายใต้การรบกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำของแข็งที่ได้ไปกรอง ล้าง และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน แล้วนำไปเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

2.2 การทดสอบการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์

การศึกษาถึงกระบวนการการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลด้วยปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (ปฏิกิริยาการขจัดน้ำ) ในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องซึ่งมีอุปกรณ์หลักดังนี้ Syring pump ใช้เพื่อควบคุมอัตราการไหลของเมทานอลให้คงที่ และ Vaporizer ใช้เปลี่ยนสถานะของเมทานอลจากของเหลวให้กลายเป็นไอ และเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed Reactor) ใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาการขจัดน้ำของเมทานอล เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดเมทิลอีเทอร์ ซึ่งภายในเครื่องปฏิกรณ์จะมีหลอดแก้วสำหรับบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา อีกด้านหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์ต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี (Shimadzu GC-14B) ซึ่งบรรจุ Porapak Type Q (50-80 Mesh) และ Molecular sieve 13X (pore size 10 Å) เพื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการขจัดน้ำของเมทานอล

เริ่มทำการศึกษากการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์โดยป้อนเมทานอลเข้าไปรวมกับแก๊สไนโตรเจนซึ่งเป็นแก๊สพา จากนั้นจะเข้าไปใน Vaporizer เปลี่ยนสถานะของเมทานอลจากของเหลวให้กลายเป็นไอ (อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อไนโตรเจน 1 ต่อ 4 ซึ่งจะมีอัตราไหลรวมเท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อนาที) ช่วงแรกของการทดลองจะมีการตรวจวัดความเข้มข้นของเมทานอลก่อนเริ่มทำปฏิกิริยาให้คงที่ และเมื่อคงที่แล้วกระแสของเมทานอลจะถูกส่งเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งมีท่อแก้วสำหรับทำปฏิกิริยาที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์บีต้า 0.1 กรัม โดยจะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200, 225, 250 และ 275 องศาเซลเซียส ซึ่งทุกอุณหภูมินั้นจะทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากทำปฏิกิริยาการขจัดน้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์แล้วผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกส่งไปวิเคราะห์และประมวลผลด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีและเครื่องประมวลผล ภายในระบบจะมีการพันท่อด้วยแถบให้ความร้อนเพื่อป้องกันการควบแน่นของสาร และมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 110 องศาเซลเซียส

2.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลอง คือ การนำค่าที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี มาทำการคำนวณหาค่าร้อยละการแปลงผันของเมทานอล (% Conversion of methanol) ค่าร้อยละการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์ (% Selectivity of DME) และค่าร้อยละผลได้ของไดเมทิลอีเทอร์ (% Yield of DME) โดยคำนวณดังนี้

ค่าร้อยละการแปลงผันของเมทานอล

$$= \frac{\text{จำนวนโมลขาเข้าของเมทานอล} - \text{จำนวนโมลขาออกของเมทานอล}}{\text{จำนวนโมลขาเข้าของเมทานอล}} \times 100 \quad (2)$$

ค่าร้อยละการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์

$$= \frac{\text{จำนวนโมลอะตอมของคาร์บอนของไดเมทิลอีเทอร์}}{\text{จำนวนโมลอะตอมของคาร์บอนในเมทานอลที่ใช้ในปฏิกิริยา}} \times 100 \quad (3)$$

ค่าร้อยละผลได้ของไดเมทิลอีเทอร์

$$= \text{ค่าร้อยละการแปลงผันเมทานอล} \times \text{ค่าร้อยละการเลือกเกิดไดเมทิลอีเทอร์} \quad (4)$$

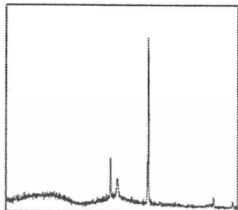
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล (Results and Discussion)

3.1 คุณสมบัติทางเคมีของถ้ำลอยของซันอ้อย

องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างถ้ำลอยของซันอ้อยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยของซันอ้อยมีปริมาณซิลิกาประมาณร้อยละ 77.2 โดยน้ำหนัก

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของถ้ำลอยของซันอ้อยด้วยเครื่อง XRD ปรากฏพีคหลักที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 20.6 และ 21.8 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งของผลึกควอร์ตซ์ (SiO₂) ชนิดไตรไดมัทและแอลฟาคริสโตบาลไลท์ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 1

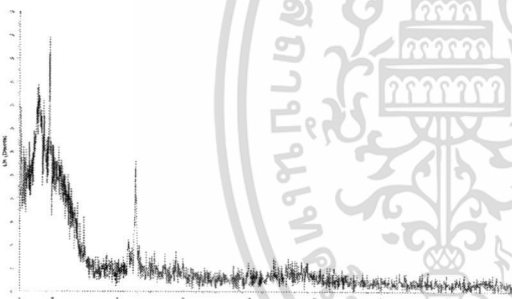


2-Theta - Scale

รูปที่ 1 XRD ของถ้ำลอยของซันอ้อย

3.2 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์

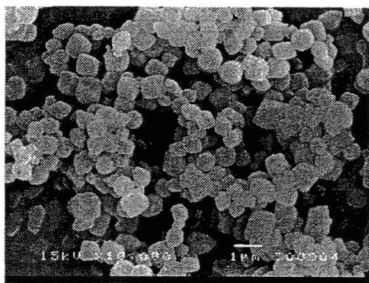
เมื่อวิเคราะห์ความเป็นผลึกของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์ด้วย XRD ปรากฏพีคหลักของซีโอไลต์บีต้า ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 7.8 และ 22.5 องศา แสดงดังรูปที่ 2



2-Theta - Scale

รูปที่ 2 XRD ของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยของซันอ้อย

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผลึกของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าผลึกมีขนาดสม่ำเสมอ มีความเป็นผลึกที่สมบูรณ์

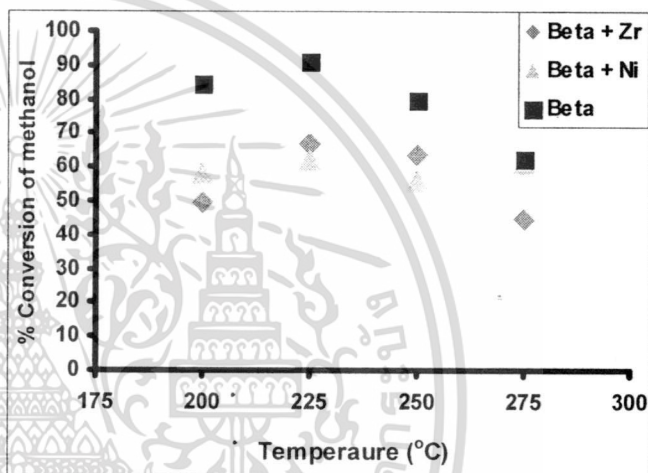


รูปที่ 3 SEM ของซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์จากซิลิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

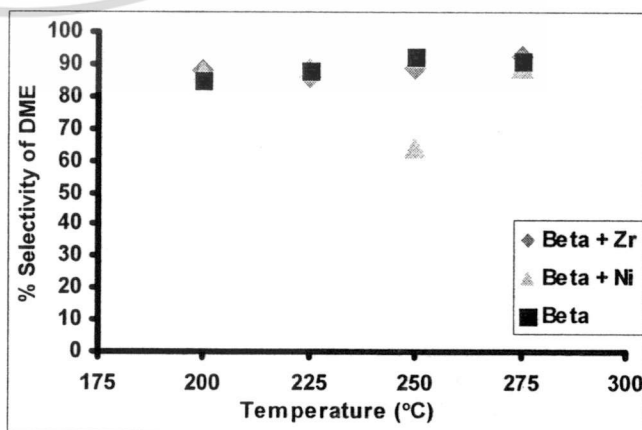
3.3 การทดสอบปฏิกิริยา

การทดสอบปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์โดยใช้ซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์จากซิลิกาที่สกัดจากถ้ำลอยซันอ้อย ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200, 225, 250 และ 275 องศาเซลเซียส พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการแปลงผันของเมทานอลกับอุณหภูมิปฏิกิริยา ดังรูปที่ 4 ค่าการแปลงผันของเมทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิปฏิกิริยาเท่ากับ 225 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 91.3 และเมื่อทำการปรับปรุงซีโอไลต์บีต้าด้วย Zr- และ Ni- พบว่าค่าการแปลงผันของเมทานอลมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 225 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 66.6 และ 62.2 ตามลำดับ แต่ค่าการแปลงผันของเมทานอลลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น คาดว่าเกิดจากการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ เนื่องจากการเกิดโค้กทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง



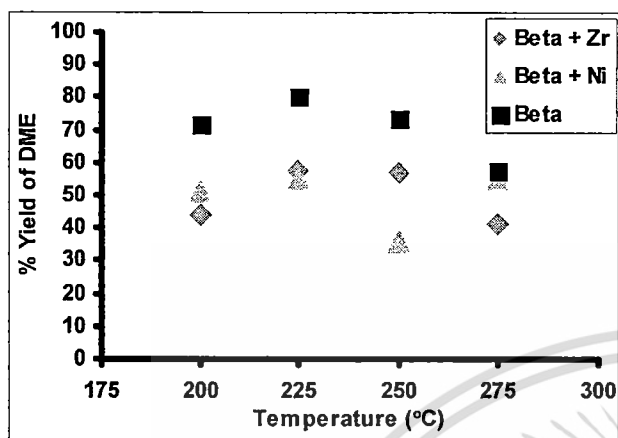
รูปที่ 4 ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละการแปลงผันของเมทานอล

สำหรับค่าการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์พิจารณาที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 225 องศาเซลเซียส พบว่าซีโอไลต์บีต้ามีค่าร้อยละการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์สูงสุดเท่ากับ 88.2 และเมื่อทำการปรับปรุงซีโอไลต์บีต้าด้วย Zr- และ Ni- พบว่ามีค่าร้อยละการเลือกเกิดสูงสุดเท่ากับ 86.0 และ 88.8 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์

สำหรับค่าร้อยละผลได้ของไดเมทิลอีเทอร์ แสดงดังรูปที่ 6 พบว่ามีค่าร้อยละผลได้ของไดเมทิลอีเทอร์สูงสุด ที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 225 องศาเซลเซียส โดยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์ได้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 80.5 และซีโอไลต์บีต้าที่ถูกปรับปรุงด้วย Zr- และ Ni- มีค่าร้อยละผลได้สูงสุดเท่ากับ 57.2 และ 55.2 ตามลำดับ



รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละผลได้ของไดเมทิลอีเทอร์

เมื่อพิจารณาจากค่าร้อยละผลได้ของไดเมทิลอีเทอร์ที่ลดลงของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น คาดว่าเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาอันเนื่องมาจากการเกิดโค้ก ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละการแปลงผันของเมทานอลที่ลดลง

4. สรุปผลการทดลอง (Conclusion)

ซีโอไลต์ชนิดบีต้าสามารถสังเคราะห์ได้จากซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอยของชานอ้อยโดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล และใช้เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TEAOH) เป็นสารเคมีกำหนดโครงสร้าง และมีการปรับปรุงด้วย Zr- และ Ni- โดยใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่สังเคราะห์ได้ในงานเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์ ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 200 225 250 และ 275 องศาเซลเซียส พบว่าซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์ โดยพบว่ามีค่าร้อยละผลได้สูงที่สุดที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 225 องศาเซลเซียส เท่ากับ 80.5 และซีโอไลต์ที่ถูกปรับปรุงด้วย Zr- และ Ni- มีค่าร้อยละผลได้สูงที่สุดที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 225 องศาเซลเซียส เท่ากับ 57.2 และ 55.2 ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] Hagen J., Industrial catalysis, Wiley-VCH: A practical approach, 1999.

[2] U. Kalapathy a, A. Proctor a, J. Shultz, "A simple method for production of pure silica from rice hull ash", Bioresource Technology, Vol. 73, 2000, pp.257-262.

[3] Prasetyoko D., Ramli Z., Endud S., Hamdan H. and Sulikowski B, "Conversion of rice husk ash to zeolite beta", Waste Management, Vol. 26, 2006, pp.1173-1179.

[4] Sittichai Kulawong, "Synthesis of zeolite beta from rice husk silica and utilization as catalytic support for platinum", Institute of Science, Suranaree University of Technology.

[5] จุฬามาศ อินตะศรี, "การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดบีต้าจากเถ้าลอยของชานอ้อย", โครงการพิเศษวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.

[6] Yisheng Tan, Hongjuan Xie, Haitao Cui, Yizhuo Han, Bing Zhong, "Modification of Cu-based methanol synthesis catalyst for dimethyl ether synthesis from syngas in slurry phase", Catalysis Today, Vol. 104, 2005, pp.25-29.

[7] Dingfeng Jin, Bing Zhu, Zhaoyin Hou, Jinhua Fei, Hui Lou, Xiaoming Zheng, "Dimethyl ether synthesis via methanol and syngas over rare earth metals modified zeolite Y and dual Cu-Mn-Zn catalysts", Fuel, Vol. 86, 2007, pp.2707-2713.

[8] A.M. Arkharov, S.D. Glukhov, L.V. Grekhov, A.A. Zherdev, N.A. Ivashchenko, D.N. Kalinin, A.V. Sharaburin, A.A. Aleksandrov, "Use of dimethyl ether as a motor fuel and a refrigerant.", Chem. Petro.Eng., Vol. 39, 2003, pp.330.

[9] Qing Suna, Yuchuan Fua, Haixia Yang, Aline Auroux, Jianyi Shen, "Dehydration of methanol to dimethyl ether over Nb₂O₅ and NbOPO₄ catalysts: Microcalorimetric and FT-IR studies", Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, Vol. 275, 2007, pp.183-193.

[10] Yuchuan Fua, Tao Honga, Jieping Chena, Aline Aurouxb, Jianyi Shena, "Surface acidity and the dehydration of methanol to dimethyl ether", Thermochimica Acta, Vol. 434, 2005, pp.22-26.

[11] V.Siva Kumar, A.H. Padmasri, et al, "Nature and mode of addition of phosphate precursor in the synthesis of aluminum phosphate and its influence on methanol dehydration to dimethyl ether", Catalysis Communications, Vol. 7, 2006, pp.745-751

[12] F.S. Ramos, A.M. Duarte de Farias, L.E.P. Borges, J.L. Monteiro, M.A.Fraga, E.F. Sousa-Aguiar, L.G. Appel, Catal. Today, Vol. 101, 2005, pp.39.

[13] Jinhua Fei, Zhaoyin Hou, Bing Zhu, Hui Lou, Xiaoming Zheng, "Synthesis of dimethyl ether (DME) on modified HY zeolite and modified HY zeolite-supported Cu-Mn-Zn catalysts", Applied Catalysis A: General, Vol. 304, 2006, pp.49-54.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้