

การเตรียมและสมบัติด้านแบคทีเรียของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิต



นายมนชัย ชาติศรีศักดิ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF TITANIUM-ZEOLITE A-  
POLYPROPYLENE COMPOSITES

Mr. Monchai Chartsrisak



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science  
Faculty of Science  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2015  
Copyright of Chulalongkorn University



มนชัย ชาติศรีศักดิ์ : การเตรียมและสมบัติด้านแบคทีเรียของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิต (PREPARATION AND ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF TITANIUM-ZEOLITE A-POLYPROPYLENE COMPOSITES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
หลัก: อ. ดร. ดวงกมล ตุงคะสมิต, 68 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการเตรียมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตฟิล์มที่มีสมบัติด้านแบคทีเรีย โดยศึกษาการเตรียมสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอด้วยวิธีการเคลือบฝังที่มีความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ในซีโอไลต์เอ 250, 500, 1,000, 2,000 และ 5000 ส่วนในล้านส่วน จากนั้นนำไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอที่ได้ มาพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ดิฟฟิวสิวเฟลกแทนซ์อัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด อินดักทีฟลีคอปเปิลพลาสมา-ออปติคอลลิมิส์ซันสเปคโตรเมตรี และตรวจสอบผลการต้านแบคทีเรีย พบว่าที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 2000 ส่วนในล้านส่วน ให้ผลการต้านแบคทีเรียดีที่สุด จากนั้นนำสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอไปผสมกับผงพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 1, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องฉีดแบบชนิดสกรูคู่ นำเม็ดพอลิเมอร์ที่ได้ไปเป่าขึ้นรูปฟิล์ม นำฟิล์มที่ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบการต้านแบคทีเรีย ทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ ตรวจสอบสมบัติเชิงกล (ความทนแรงดึง และ ความทนแรงกระแทก) ทดสอบสมบัติด้านการมองเห็น (ความขุ่น และความมันเงา) และตรวจสอบสมบัติทางความร้อน (ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี และเทอร์โมกราวิเมตรี) ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์พบว่าเมื่อผสมสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอกับพอลิโพรพิลีนทำให้การต้านแบคทีเรียชนิดแกรมบวกและแกรมลบดีขึ้น เช่นเดียวกับการซึมผ่านของก๊าซเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงด้านความร้อนพบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ โดยอัตราส่วนการผสมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในฟิล์มพอลิโพรพิลีนเป็นส่วนที่เหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาการใช้งานบรรจุภัณฑ์ต่อไป

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์      ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

# # 5472413123 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: ZEOLITE A / IMPREGNATION METHOD / ANTIBACTERIAL ACTIVITY / GAS PERMEATION

MONCHAI CHARTSRISAK: PREPARATION AND ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF TITANIUM-ZEOLITE A-POLYPROPYLENE COMPOSITES. ADVISOR: DUANGAMOL TUNGASMITA, Ph.D., 68 pp.

This research studied the preparation of titanium-zeolite A polypropylene composite with antibacterial properties. Titanium-zeolite A compounding was prepared by impregnation method. The prepared materials were 250, 500, 1000, 2000 and 5000 ppm of titanium dioxide. All composites were characterized the physical properties by X-ray Diffraction, Diffuse Reflectance UV-Visible spectrophotometry, Scanning Electron Microscope, Inductively Coupled Plasma-Optical Emission spectrometry and antibacterial testing. The results showed that 2000 ppm titanium-zeolite A provided the best antibacterial activity. Therefore, this composite was chosen to blend with polypropylene powder using twin screw injection machine with 1, 3, 5 and 10 %w/w of titanium-zeolite A. After that, the prepared materials were blown film to produce composite film. All produced films were investigated by X-ray Diffraction, Scanning Electron Microscope, antibacterial testing, gas permeation, mechanical testing (tensile strength and dart impact strength), Optical properties (Haze and Gloss) and thermal properties (Differential Scanning Calorimeter and Thermogravimetric analysis). The titanium-zeolite A polypropylene exhibited better gas permeation property and antibacterial activity for both gram positive and negative bacteria than pure polypropylene. The result of thermal behavior decreased slightly compared with pure polypropylene. The appropriate mixing of titanium-zeolite A at 5 %w/w in polypropylene film is suitable for film packaging development.

Field of Study: Petrochemistry and  
Polymer Science

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการจัดทำได้สำเร็จลุล่วงได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เนื่องจากการสนับสนุนและความเอื้อเฟื้อในด้านวัสดุดิบ สารเคมี เครื่องมือ และสถานที่จัดทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งความช่วยเหลือและคำแนะนำทางวิชาการอย่างดียิ่งจาก ผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งและขอขอบคุณบุคคลตลอดจนหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังรายนาม ต่อไปนี้

อาจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ การแก้ไขปัญหา การสนับสนุนทุนในการวิจัย รวมทั้งการจัดทำ วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ผศ.ดร.วรินทร์ ชวศิริ ประธานคณะกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลรัตน์ ตระการพุกษ์ กรรมการสอบ ดร.สัณญา ปราศศิริอรุณ กรรมการสอบภายนอกมหาวิทยาลัย และ ดร.พัชณี ฉำมิ่งขวัญ กรรมการสอบภายนอกมหาวิทยาลัย (รอบการนำเสนอโครงงานวิจัย) จากฝ่ายปฏิบัติการวิจัยและพัฒนา บริษัทไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ที่ให้คำแนะนำที่เป็น ประโยชน์สำหรับการดำเนินงานวิจัย ดร.ดวงกมล จิราโรจน์ และสมาชิกในแล็บ MATCAT ทุก ท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกด้านต่างๆ ระหว่างดำเนินการวิจัย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บริษัทไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัย ด้านวัสดุ อุปกรณ์ และอำนวยความสะดวกในการใช้ เครื่องมือทดสอบต่างๆ ระหว่างดำเนินการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง และครอบครัว ตลอดจนถึงเพื่อนๆ นักศึกษาที่ให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ ลุล่วงด้วยดี

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฏ
บทที่ 1      บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2      ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ซีโอไลต์ (Zeolite).....	5
2.1.1 การทำงานของซีโอไลต์.....	7
2.1.2 โครงสร้างของซีโอไลต์.....	7
2.2 ซีโอไลต์เอ (Zeolite A).....	11
2.2.1 สมบัติทางกายภาพของซีโอไลต์เอ.....	12
2.3 สารประกอบพอลิเมอร์.....	13
2.4 การประยุกต์ของสารประกอบไทเทเนียม.....	15
2.4.1 สมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	16
2.4.2 สมบัติการต้านแบคทีเรีย.....	17
2.5 การทำพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยการหลอมผสม.....	18

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	19
บทที่ 3      วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	24
3.1 สารเคมี.....	24
3.2 การจัดเตรียมวัตถุดิบ .....	25
3.2.1 การเตรียมสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ.....	25
3.3 การประยุกต์การใช้งานของพอลิเมอร์.....	25
3.3.1 การเตรียมผงไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีน.....	25
3.3.2 การเตรียมเม็ดพลาสติกไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิต .....	27
3.3.3 การเตรียมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตฟิล์ม.....	28
3.4 เทคนิคการพิสูจน์เอกลักษณ์สาร .....	29
3.4.1 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน.....	29
3.4.2 ดิฟฟิวสิวีเฟลกแทนซ์อัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิล .....	30
3.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	30
3.4.4 การต้านแบคทีเรีย .....	30
3.4.5 อินดักทีฟลีคอปเปิลพลาสติกมา-ออปติคอลลิมิส์ชั้นสเปคโตรเมตรี.....	31
3.4.6 สมบัติด้านเชิงกล .....	31
3.4.6.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength) .....	31
3.4.6.2 ความทนต่อแรงกระแทก (Dart impact strength) .....	32
3.4.7 สมบัติด้านการมองเห็น .....	33
3.4.7.1 ความมันเงา (Gloss).....	33
3.4.7.2 ความขุ่น (Haze) .....	34
3.4.8 สมบัติด้านความร้อน .....	35



3.4.8.1	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี.....	35
3.4.8.2	เทอร์โมกราวิเมตรี.....	37
3.4.9	การซึมผ่านของก๊าซ.....	38
บทที่ 4	ผลการทดลอง และการวิจารณ์ผล.....	39
4.1	การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ.....	39
4.1.1	เอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน.....	39
4.1.2	ดิฟฟิวสิวีเฟลกแทนซ์อัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปคโตรเมตรี.....	40
4.1.3	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	42
4.1.4	การต้านแบคทีเรีย.....	43
4.1.5	อินดิกทีฟลึคอปเปิลพลาสมา-ออปติคอลอิมิตชันสเปคโตรเมตรี.....	46
4.2	การพิสูจน์เอกลักษณ์ของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิต.....	46
4.2.1	เอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน.....	48
4.2.2	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	49
4.2.3	การต้านแบคทีเรีย.....	50
4.2.4	สมบัติเชิงกล.....	51
4.2.4.1	ความทนแรงดึง (Tensile strength).....	51
4.2.4.2	ความทนต่อแรงกระแทก (Dart impact strength).....	53
4.2.5	สมบัติด้านการมองเห็น.....	53
4.2.5.1	ความขุ่น (Haze).....	54
4.2.5.2	ความมันเงา (Gloss).....	54
4.2.6	สมบัติด้านความร้อน.....	54
4.2.6.1	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี.....	54

4.2.6.2	เทอร์โมกราวิเมตรี.....	55
4.2.7	การซึมผ่านของก๊าซ.....	56
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	58
5.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานที่จะทำต่อไป.....	59
	รายการอ้างอิง.....	60
	ภาคผนวก.....	65
	ภาคผนวก ก.....	66
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	68



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของซีโอไลต์ .....	5
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการทำงานของซีโอไลต์.....	7
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างปฐมภูมิของหนึ่งหน่วยซีโอไลต์ .....	8
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างปฐมภูมิ $TO_4$ ( $SiO_4$ และ $AlO_4^-$ ) และ T-O-T .....	8
รูปที่ 2.5 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary building units หรือ SBUs) ของซีโอไลต์ ....	9
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างโพรงเปิด สามรูปแบบ ที่มีขนาดโพรงที่ต่างกันไปตามจำนวนของ โครงสร้างเตตระฮีดรอล $TO_4$ โดย (ก) วงที่ประกอบด้วย T จำนวน 8 หน่วย (8T) (รู พรุนขนาดเล็ก), (ข) วงที่ประกอบด้วย T จำนวน 10 หน่วย (10T) (รูพรุนขนาดกลาง) และ (ค) วงที่ประกอบด้วย T จำนวน 12 หน่วย (12T) (รูพรุนขนาดใหญ่) .....	10
รูปที่ 2.7 การเกิดซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ .....	11
รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างซีโอไลต์เอ (LTA-type structure).....	12
รูปที่ 2.9 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพอลิโพรพิลีนที่มีซีกเลอร์-แนตตาเป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา .....	14
รูปที่ 2.10 ลักษณะการจัดเรียงของหมู่แทนที่ในพอลิโพรพิลีน (PP).....	15
รูปที่ 2.11 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	16
รูปที่ 2.12 การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ (ซ่าย) เทียบกับการ สังเคราะห์แสง(ขวา) .....	17
รูปที่ 2.13 กลไกการต้านแบคทีเรีย .....	17
รูปที่ 2.14 (ก) เครื่องอัดรีด (ข) ลักษณะของสกรูในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (ค) ลักษณะ ของ สกรูในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	19
รูปที่ 3.1 เครื่องผสมแบบถังหมุน(Tumbler mixer).....	26
รูปที่ 3.2 เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) .....	27

รูปที่ 3.3 (ก) เครื่องตัดเม็ด (Pelletizer) (ข) เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) .....	28
รูปที่ 3.4 เครื่องเป่าฟิล์ม (Film Blowing Machine, A.R. Product Ltd. Part) .....	29
รูปที่ 3.5 เครื่อง Universal tensile testing machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 4465.....	32
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงกระแทก (Dart Impact tester).....	33
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความมันเงา (Gloss meter) .....	34
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความขุ่น (Haze meter).....	35
รูปที่ 3.9 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC).....	36
รูปที่ 3.10 เทอร์โมแกรมแสดงค่าอุณหภูมิการหลอม ( $T_m$ ) และอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) จากเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	37
รูปที่ 4.1 ดิฟแฟรกโตแกรมของซีโอไลต์เอไทเทเนียมไดออกไซด์ และ สารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอที่ความเข้มข้นต่างๆ .....	40
รูปที่ 4.2 ดิฟฟิวสิวีเฟลกแทนซ์อัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปคโตรแกรม ของซีโอไลต์เอไทเทเนียมไดออกไซด์ สารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ (Ti-1, Ti-2, Ti-3, Ti-4 และ Ti-5) .....	42
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5000 เท่าของสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ (ก) , (ข) .....	43
รูปที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย <i>เอสเคอริเคีย โคไล</i> จากการทดสอบการต้านเชื้อที่เวลา 1 - 3 ชั่วโมงของการสัมผัส .....	44
รูปที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย <i>สเตฟิโลค็อกคัส ออเรียส</i> จากการทดสอบการต้านเชื้อ ที่เวลา 1 - 3 ชั่วโมงของการสัมผัส .....	45
รูปที่ 4.6 จำนวนแบคทีเรียบนตัวอย่างทดสอบ “ที่เวลา 3 ชั่วโมงของการสัมผัส” โดยการอบจานทดสอบเชื้อ <i>เอสเคอริเคีย โคไล</i> ที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	45
รูปที่ 4.7 จำนวนแบคทีเรียบนตัวอย่างทดสอบ “ที่เวลา 3 ชั่วโมงของการสัมผัส” โดยการอบจานทดสอบเชื้อ <i>สเตฟิโลค็อกคัส ออเรียส</i> ที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง .....	45

รูปที่ 4.8 ลักษณะของเม็ดสูตร 1 – สูตร 5..... 48

รูปที่ 4.9 ลักษณะของฟิล์มที่ได้จากการเป่าเม็ดสูตร 1 – สูตร 5..... 48

รูปที่ 4.10 เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตแกรม ของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมพอสิต  
ฟิล์มที่ปริมาณของฟิล์มพอลิโพรพิลีน (PP pure) และฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่เติม  
ไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ 1, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก..... 49

รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ  
พอลิโพรพิลีนคอมพอสิต ที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ ไทเทเนียม-ซี  
โอไลต์เอ..... 49

รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ เอสเคอริเคีย โคไล ที่ 3 ชั่วโมงของการสัมผัส..... 51

รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ สเตฟฟีโลคอกคัส ออเรียส ที่ 3 ชั่วโมงของการสัมผัส.. 51



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของซีโอไลต์ตามขนาดรูพรุน.....	10
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนการผสมสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เข้ากับสารอื่นๆ.....	26
ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย.....	44
ตารางที่ 4.2 ปริมาณของธาตุไทเทเนียมจากการทดสอบด้วยเทคนิคอินดักทีฟฟลูออโรเมตรี พลาสมา-ออปติคอลลิมิเนสเซนส์สเปคโตรเมตรี.....	46
ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนการผสมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ กับ ผงพอลิโพรพิลีน.....	47
ตารางที่ 4.4 ผลการต้านแบคทีเรีย ที่เวลา 3 ชั่วโมงของการสัมผัส.....	50
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความทนแรงดึง ในทิศทางขนานกับการดึงฟิล์ม.....	52
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความทนแรงดึง ในทิศตั้งฉากกับการดึงฟิล์ม.....	52
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก.....	53
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบสมบัติด้านการมองเห็น.....	54
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบสมบัติด้านความร้อน.....	55
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบสมบัติด้านความร้อนเทอร์โมกราวิเมตริก.....	56
ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์.....	57
ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	57

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการใช้งานพลาสติกชนิดต่างๆ มากมาย โดยพบว่าผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์สังเคราะห์นี้มีการใช้งานมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่มาจากธรรมชาติเช่น ไม้ เหล็ก เซรามิค ซึ่งในปัจจุบันพบว่าในหลายๆ อุตสาหกรรมก็เลือกใช้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ที่ใช้ผลิตส่วนประกอบต่างๆ แต่ที่พบเห็นและใกล้ตัวที่สุดได้แก่ อุตสาหกรรมขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ใช้สำหรับชีวิตประจำวัน ทั้งนี้เนื่องจากความง่ายในการขึ้นรูป สามารถปรับปรุงสมบัติได้มากและตอบสนองความต้องการในการใช้งานได้ดีมากกว่า 30 ปี ความต้องการใช้งานก็ยิ่งสูงขึ้นๆ โดยในปี ค.ศ.2014 พบว่ามีปริมาณการผลิตพลาสติกทั่วโลกประมาณ 250 ล้านตัน โดยพบว่าประมาณครึ่งหนึ่งถูกใช้ในแถบทวีปเอเชีย [1] และคาดว่าจะมีอัตราการเติบโตในปีถัดไปสูงเพิ่มขึ้น โดยคาดว่าจะมีความต้องการเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 4 % ทั่วทั้งโลก พบว่าทั่วโลกมีความต้องการพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนรวมกับพอลิโพรพิลีนสูงถึง 50 % ของความต้องการทั้งหมด ในปี 2013ความต้องการพอลิโพรพิลีนทั่วโลก 75 ล้านตัน ส่วนพอลิเอทิลีน 60 ล้านตัน และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นเป็น 130 ล้านตันในปี 2017 โดยคาดว่าความต้องการพอลิโพรพิลีนจะมากกว่าพอลิเอทิลีน [2,3] ในปัจจุบันมีความต้องการใช้งานพลาสติกในงานด้านบรรจุภัณฑ์มากกว่าชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะในประเทศแถบยุโรปที่มีความต้องการใช้สูงถึง 40 เปอร์เซ็นต์ของการใช้งานพลาสติกทุกชนิด และยังพบว่ามีการใช้งานพอลิโพรพิลีนมากกว่าพอลิเอทิลีน บรรจุภัณฑ์หลากหลายวัตถุประสงค์เช่น การบรรจุสิ่งของ การห่อหุ้มสิ่งของซึ่งสามารถป้องกันไม่ให้สิ่งของภายในสัมผัสกับอากาศ การใช้เป็นสติกปิดภายนอก (Label) หรือจะเป็นฟิล์มเคลือบภายในหีบห่อบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งมักจะสัมผัสโดยตรงกับสิ่งของภายในบรรจุภัณฑ์นั้น การพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ผ่านมามีแนวโน้มในด้านสมบัติเชิงกล ความใส ความบางหรือแม้จะเป็นการย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ แต่การพัฒนาล่าสุดที่สำคัญจะเป็นการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ภายในไม่ให้เน่าเสียหรือมีคุณภาพที่ต่ำลงจากเดิมนับตั้งแต่วันที่เริ่มผลิต ซึ่งสาเหตุหลักที่พบคือการใช้ผลิตภัณฑ์ซึ่งที่เห็นได้ชัดคือผลิตผลทางการเกษตรหรือแม้กระทั่งอาหารสดต่างๆ เหล่านี้สัมผัสโดยตรงกับเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศเช่นแบคทีเรีย จากสาเหตุนี้ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อตัวผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร หรืออาหารสดที่ต้องเน่าเสีย และส่งผลเสียต่อ

เศรษฐกิจจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศเกษตรกรรมเช่นประเทศไทย เป็นต้น ทำให้มีการคิดค้นหาวิธียืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรหรืออาหารสดต่างๆ ให้นานขึ้นและเกิดการพัฒนามาบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติด้านแบคทีเรีย ชนิด *สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส* และ *เอสเคอริเคีย โคไล* หรือจะเพิ่มเติมชนิดอื่นๆตามที่ต้องการ [4] โดยที่ผ่านมาพบว่ามี การศึกษาถึงประสิทธิภาพของการต้านแบคทีเรียของอนุภาคโลหะหลายชนิด [5] และได้มีการศึกษาผสมอนุภาคของธาตุโลหะในเนื้อฟิล์มเช่น เงิน (Silver) ทองแดง (Copper) สังกะสี (Zinc) ไทเทเนียม(Titanium) พอลิเมอร์/โลหะคอมโพสิตที่เป็นที่สนใจในการทำงานด้านตัวเร่งปฏิกิริยาและงานต้านแบคทีเรียที่ผ่านมา เช่นพอลิโพรพิลีน-ไทเทเนียมไดออกไซด์(PP/TiO<sub>2</sub>) คอมโพสิต [6] พอลิเอทิลีน-ซิลเวอร์(PE/Ag) คอมโพสิต [7]

โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการการสังเคราะห์สารประกอบที่มีอนุภาคของโลหะชนิดไทเทเนียม ขึ้นมาก่อน โดยเติมอนุภาคของโลหะไทเทเนียม(The post-synthetic impregnation method) [8,9] ลงในสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับชนิดอะลูมินา ซีโอไลต์ซึ่งได้แก่ ซีโอไลต์เอ แล้วจึงนำตัวรองรับที่มีอนุภาคโลหะหรือสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอไปผสมกับผงพลาสติกชนิด พอลิโพรพิลีนโดยการหลอมผสมในเครื่องฉีดแบบสกรูคู่ แล้วตัดเม็ด นำเม็ดที่มีส่วนผสมของอนุภาคโลหะไปเป่าขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม [5] ทั้งนี้เพื่อเตรียมฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีสมบัติต้านแบคทีเรีย และศึกษาสมบัติสามารถให้ก๊าซซึมผ่านของฟิล์มคอมโพสิต เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรหรือ อาหารสดได้นานยิ่งขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงได้นำเสนอเป็นแนวทาง ข้อมูลหรือทางเลือกในการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มพอลิโพรพิลีน เพื่อเป็นการคงมูลค่าของผลิตผลทางการเกษตรหรืออาหารสดให้มีอายุยาวนานขึ้น และลดการสูญเสียทางเศรษฐกิจจากการเน่าเสียของผลิตผลต่างๆ โดยสามารถส่งถึงมือผู้บริโภคได้ทันในเวลาที่ต้องการ ผลสำเร็จของงานวิจัยนี้ จะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์พลาสติกฟิล์มที่มีสมบัติต้านแบคทีเรีย และสามารถใช้เก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรหรือ อาหารสดได้นานยิ่งขึ้น ตลอดจนยังมีสมบัติเชิงกลเช่นความใส และความแข็งแรงอยู่ในระดับที่ต้องการ อีกทั้งยังมีสมบัติทางความร้อนเหมาะสมกับการใช้งานอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนฟิล์ม ให้มีสมบัติต้านแบคทีเรีย
2. ศึกษาผลของไทเทเนียม ที่มีผลต่อการต้านเชื้อแบคทีเรียและศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ



3. ศึกษาผลของไทเทเนียม ที่มีผลต่อการต้านเชื้อแบคทีเรียของ ไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตฟิล์ม และศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติการซึมผ่านของ ก๊าซ และสมบัติเชิงกล

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอด้วยวิธีเคลือบฝัง และศึกษาสมบัติต่างๆ ดังนี้
  - 2.1 ลักษณะเฉพาะโครงสร้างผลึก (Crystallographic characterization) ด้วยเทคนิค เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน
  - 2.2 ชนิดของไทเทเนียมที่อยู่ในโครงข่ายซีโอไลต์เอ ด้วยดิฟฟิวสิวรีเฟลกแทนซ์อัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล
  - 2.3 ปริมาณของไทเทเนียมด้วยเทคนิคอินดักทีฟลีคอปเปิลพลาสมา-ออบติคอลลิมิส์ชันสเปคโทรเมตรี
  - 2.4 สมบัติการต้านทานแบคทีเรียที่ได้
  - 2.5 ศึกษาพื้นฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมด้วยเทคนิค กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
3. เตรียมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตฟิล์ม
4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่ได้ ด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้
  - 4.1 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันเพื่อตรวจสอบโครงสร้างความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา
  - 4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
  - 4.3 การต้านแบคทีเรีย
  - 4.4 ตรวจสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้ ด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้
    - 4.4.1 ความทนแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D638 เพื่อตรวจสอบความสามารถทนต่อแรงดึง
    - 4.4.2 ความทนต่อแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D1709 เพื่อตรวจสอบความสามารถของฟิล์มต่อแรงที่ได้รับ
  - 4.5 ตรวจสอบการมองเห็น ด้วยความขุ่น และความมันเงา

4.6 ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ และเทอร์โมกราวิเมตริก

4.7 การซึมผ่านของก๊าซตามมาตรฐาน ASTM D1424

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ฟิล์มไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่มีสมบัติด้านแบคทีเรีย

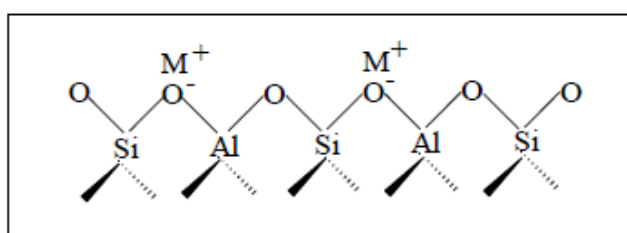


## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) ซึ่งในหน่วยย่อยของซีโอไลต์จะประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม ( $\text{SiO}_4$  หรือ  $\text{AlO}_4$ ) ซึ่งสร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) [10] โดยพบว่าอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง และถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุลดังรูปที่ 2. ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูปพรุนและช่องว่างหรือโพรงขนาดใหญ่ที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ มีขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ  $1 \times 10^{-10}$  เมตร) ดังนั้นจึงสามารถเกิดกระบวนการดูดซับและคายซับโมเลกุลสารอินทรีย์จากขนาดเล็กจนถึงขนาด 1 นาโนเมตรได้ นอกจากซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก สามารถต้มให้เดือดระเหยออกไปได้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของซีโอไลต์

จากโครงสร้างที่เฉพาะตัวของซีโอไลต์ ซึ่งแต่เดิมมักจะถูกนำไปใช้ในด้านการบำบัดการเป็นสารดูดความชื้น (molecular sieve) ในปัจจุบันพบว่าได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายอย่างในหลายๆอุตสาหกรรม เช่นการแลกเปลี่ยนไอออน การแยก และโดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

โครงสร้างผลึกมีผลโดยตรงต่อการควบคุมสมบัติของซีโอไลต์ โดยพบว่า โครงสร้างที่มีการแทนที่ตำแหน่งของซิลิกอนอะตอม ด้วยอะตอมของอะลูมิเนียม หรือธาตุอื่นๆ ซึ่งทำให้ ซีโอไลต์ มีสมบัติเป็นกรด ลักษณะและขนาดของโพรงและช่องว่างต่างๆ ที่มีอยู่ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในโพรงซีโอไลต์ มีความจำเพาะต่อรูปร่าง มีความจำเพาะเจาะจง (selectivity) สูง มีความเสถียร ส่งผลให้สมบัติในการเร่งปฏิกิริยาของซีโอไลต์มีความเฉพาะตัวและเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่ง

ในปัจจุบันพบว่าได้มีการนำเอาซีโอไลต์มาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม โดยสามารถลดต้นทุนในการผลิตและการกำจัดของเสียได้ เนื่องจากสมบัติที่เพิ่มความจำเพาะต่อการเร่งปฏิกิริยา โดยลดการเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สมบัติการเร่งปฏิกิริยาที่มีความจำเพาะของซีโอไลต์นี้ เกิดจากความสามารถในการยึดจับสิ่งที่เข้ามา และการถ่ายถอดโปรตอน บวกกับความสามารถในการแพร่ของโมเลกุลต่างๆ ในโพรงซีโอไลต์ อีกด้วย

นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังมีการแลกเปลี่ยนโปรตอนด้วยอิออนของโลหะ ซึ่งจะทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติการเร่งปฏิกิริยาพิเศษมากขึ้น อิออนของโลหะที่ใส่เข้าไปจะเป็นชนิดเดียวหรือหลายชนิดที่เรียกว่า co-cation ก็ได้

ซีโอไลต์นั้นได้ถูกค้นพบเมื่อประมาณ 250 ปีที่ผ่านมา โดยเป็นการค้นพบซีโอไลต์ในรูปแบบแร่ธาตุ ซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยผู้เชี่ยวชาญด้านแร่ชาวสวีเดน ซีโอไลต์นั้นจัดเป็นกลุ่มของแร่ที่เรียกว่า ไฮเดรตอะลูมิโนซิลิเกต (hydrated aluminosilicates) หากพิจารณาคำว่า “ซีโอไลต์” จะพบว่ามาจากภาษากรีกโดยคำว่า “ซีโอ (zeo)” แปลว่า “เดือด” และคำว่า “ลิโธส (lithos)” แปลว่า “หิน” ซีโอไลต์มีความสามารถในการปลดปล่อยน้ำ เมื่อได้รับความร้อน ออกมา และซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำกลับคืนได้ง่าย กล่าวคือ เป็นกระบวนการผันกลับได้ [11]

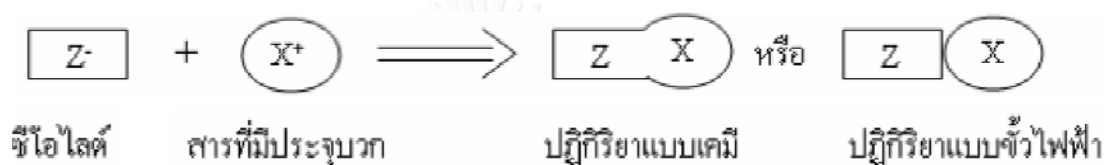
มีการทำเป็นเหมืองซีโอไลต์ในพื้นที่หลายแห่งของโลก หรืออาจสังเคราะห์ขึ้นได้โดยกระบวนการทางเคมี โดยสามารถควบคุมขนาดและโครงสร้างที่ต้องการจากการควบคุมกระบวนการสังเคราะห์ เพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีสมบัติจำเพาะซึ่งจะเป็นประโยชน์ทางการค้า

ซีโอไลต์โดยทั่วไปนั้นมีมากกว่า 600 ชนิด แต่สามารถแบ่งกลุ่มตามลักษณะของโครงสร้างได้ประมาณ 40 ชนิด โครงสร้างที่ต่างกันนี้ส่งผลให้ซีโอไลต์มีสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น โครงสร้างของผลึก ความหนาแน่น ขนาดของโพรง ความแข็งแรงของพันธะ เป็นต้น ชนิดของซีโอไลต์นั้นมักถูก

จำแนกตามขนาดและรูปร่างของโพรงซีโอไลต์เป็นหลัก ซึ่งแต่ละชนิดของซีโอไลต์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานที่หลากหลายได้ในปัจจุบัน

### 2.1.1 การทำงานของซีโอไลต์

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการทำงานของซีโอไลต์ จะเป็นลักษณะของการแลกเปลี่ยนไอออน หรือปฏิกิริยาแบบขั้วไฟฟ้า เมื่อใส่ซีโอไลต์ลงในน้ำ ซีโอไลต์จะแสดงตัวเป็นประจุลบหรือขั้วลบ Z จากนั้นจะไปจับกับสารพวกที่มีประจุบวกหรือขั้วบวก  $X^+$  ที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น แอมโมเนียม และซัลเฟต หรือโลหะหนัก เป็นต้น ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการทำงานของซีโอไลต์

### 2.1.2 โครงสร้างของซีโอไลต์

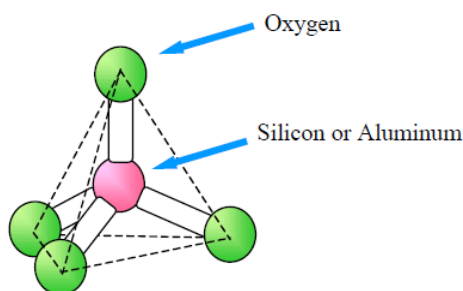
โครงสร้างของซีโอไลต์มักจะประกอบด้วยอะลูมิเนียม ซิลิคอน และออกซิเจนในโครงสร้างซึ่งมีประจุเป็นลบโดยจะมีการดุลย์ประจุกับสารพวกที่มีประจุบวกที่ละลายอยู่ในน้ำซึ่งอยู่โพรงของโครงสร้าง สูตรโครงสร้างของการซีโอไลต์สำหรับหนึ่งหน่วยของ crystallographic สามารถแสดงได้ดังนี้



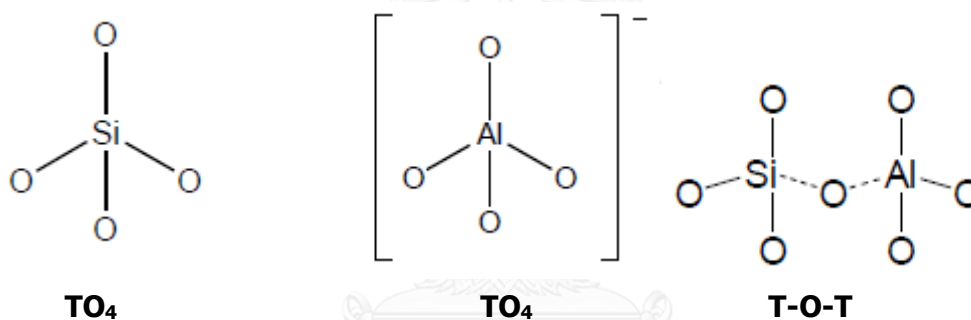
- โดย
- n คือประจุของไอออนบวกของโลหะ
  - x+y คือจำนวนหน่วยเตทระฮีดรอลต่อหน่วยเซลล์
  - y/x คืออัตราส่วน Si/Al แปรผันได้จาก 1 ถึง  $\infty$
  - W คือจำนวนโมเลกุลของน้ำในโพรงของซีโอไลต์

องค์ประกอบของซีโอไลต์ ประกอบด้วยโครงสร้างหน่วยปฐมภูมิเตทระฮีดรอล

(tetrahedral structure) ของ  $\text{TO}_4$  เมื่อ  $\text{TO}_4$  แทน  $\text{SiO}_4$  และ/หรือ  $\text{AlO}_4^-$  หากมาเชื่อมกันด้วยอะตอมของออกซิเจน จะเขียนแทนด้วย T-O-T และเมื่อ  $\text{TO}_4$  มาจัดเรียงตัวต่อกันเป็นหน่วยซ้ำๆ จะทำให้เกิดเป็นผลึกของพอลิเมอร์ (polymeric crystalline) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4 [12,13]



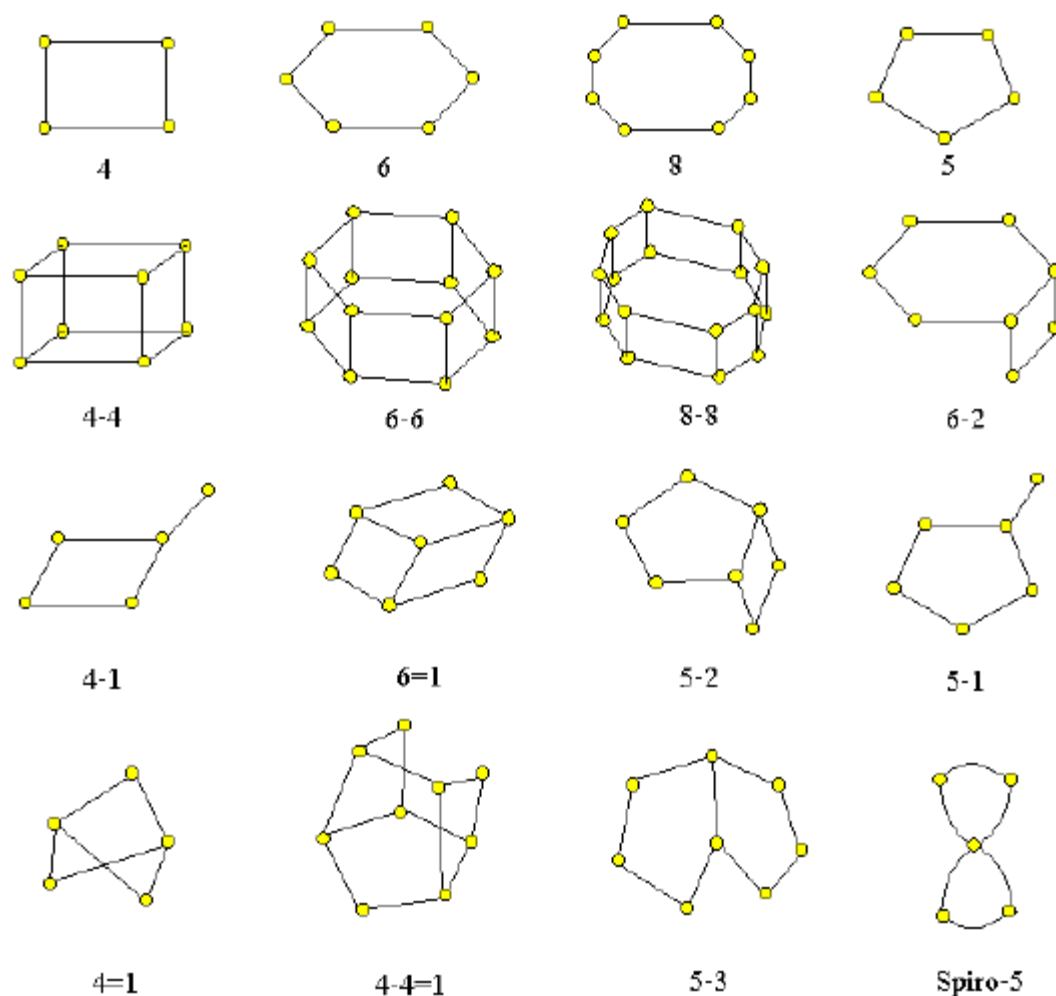
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างปฐมภูมิของหนึ่งหน่วยซีโอไลต์



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างปฐมภูมิ  $\text{TO}_4$  ( $\text{SiO}_4$  และ  $\text{AlO}_4^-$ ) และ T-O-T

กระบวนการก่อตัวของโครงสร้างจะเริ่มจาก  $\text{TO}_4$  ก่อตัวเป็นหน่วยย่อย (subunit) และขยายโครงสร้างใหญ่ขึ้นเป็นแลตทิซ (lattice) ที่เป็นหน่วยซ้ำๆของหน่วยที่เล็กที่สุด (ซึ่งหมายถึงหน่วยเซลล์หรือ unit cell) ได้เป็นผลึกที่สมบูรณ์ ที่มีโครงสร้างเป็นแบบสองมิติหรือสามมิติ [14, 15]

ในแต่ละหน่วยย่อย (subunit) จะประกอบด้วยรูพรุนและช่องว่างภายในโครงสร้าง ซึ่งจะเรียกหน่วยย่อยนั้นๆ ว่าหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary building units หรือ SBUs) ตามรูปที่



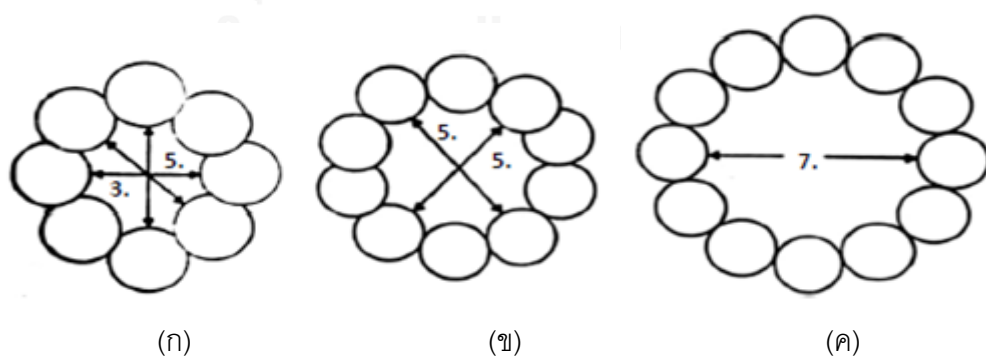
รูปที่ 2.5 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary building units หรือ SBUs) ของซีโอไลต์

การจัดประเภทซีโอไลต์ กำหนดจากลักษณะองค์ประกอบของโพรงและช่องว่างเหล่านั้น ซึ่งขนาดโพรงหรือรูพรุนของซีโอไลต์จะหาได้จากการพิจารณาโพรงเปิด (aperture) ที่เกิดจากการเชื่อมต่อของโครงสร้างเททระฮีดรอล  $\text{TO}_4$  โดยพบว่าขนาดโพรงเปิดที่เล็กที่สุดที่สารสามารถแพร่ผ่านได้ ต้องประกอบด้วย T จำนวน 8 หน่วย (8T) หรือเรียกว่า 8-membered ring (8MR) โดยโครงสร้างซีโอไลต์สามารถจำแนกตามขนาดรูพรุน ได้เป็น 3 ชนิด ตามตารางที่ 2.1 และพบว่าซีโอไลต์จะมีขนาดของวง (ring) ที่แตกต่างกันตามแต่ชนิด ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.6

ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของซีโอไลต์ตามขนาดรูพรุน

Small pore zeolites	Middle pore zeolites	Large pore zeolites
8-membered ring	10-membered ring	12-membered ring
3.0-4.5 Å	4.5-6.0 Å	6.0-8.0 Å
Zeolite A	Zeolite ZSM-5	Zeolite L
Erionite	ZSM-11	Faujasite (X, Y)
Chabazite	Ferriete	Mordenite
Gismonite	Stibite	ZSM-12
Phillipsite	ZSM-23	Zeolite Beta

นอกจากซีโอไลต์ทั้งสามขนาดแล้ว ยังพบว่ามีซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่พิเศษ (ultralarge pore zeolites) ตัวอย่างเช่น Cloverite (20MR) ขนาดโพรงเปิด 0.60 × 1.32 นาโนเมตร VPI-5 (18MR) ขนาดโพรงเปิด 1.27 นาโนเมตร  $\text{AlPO}_4\text{-8}$  (14MR) ขนาดโพรงเปิด 0.79 × 0.87 นาโนเมตร โดยพบว่าโมเลกุลจะสามารถแพร่ผ่านรูพรุนของซีโอไลต์ได้ดีเพียงใดขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุนนั้นๆ โดยคุณสมบัติที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของโมเลกุลที่แพร่ผ่านและช่วยเปิดปากโพรงของซีโอไลต์ให้ง่ายต่อการแพร่ยิ่งขึ้น

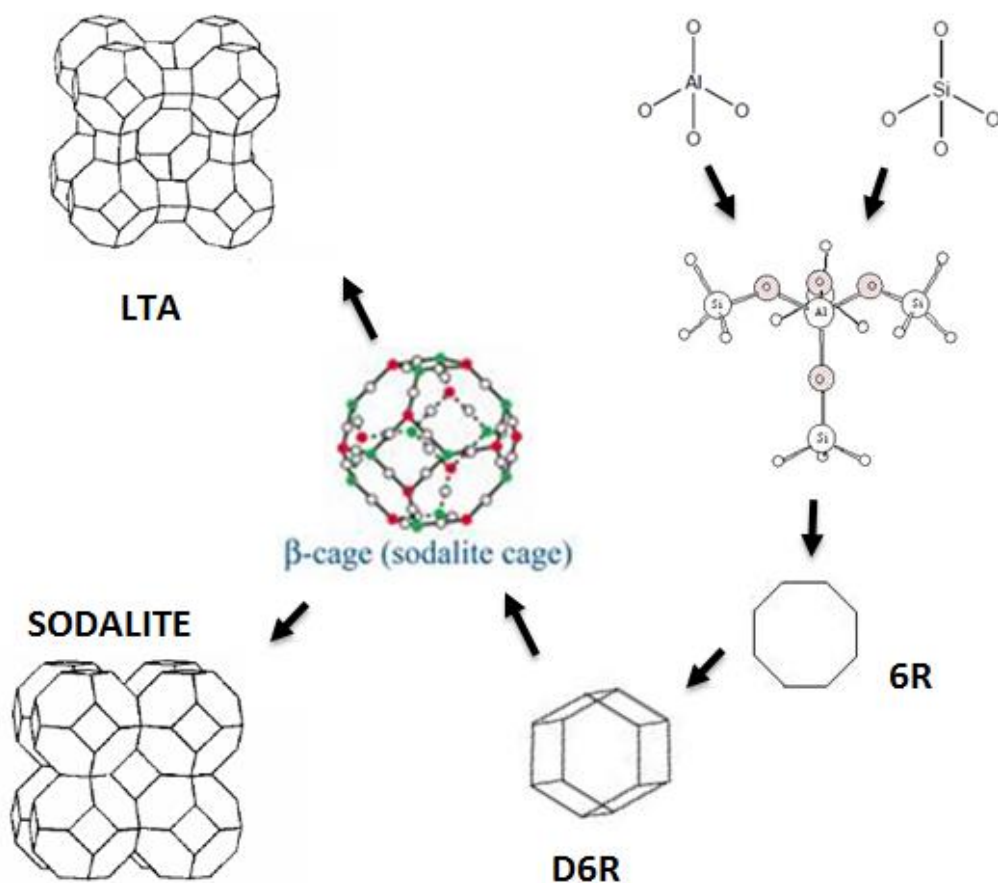


รูปที่ 2.6 ตัวอย่างโพรงเปิด สามรูปแบบ ที่มีขนาดโพรงที่ต่างกันไปตามจำนวนของโครงสร้างเททระอีตรอล  $\text{TO}_4$  โดย (ก) วงที่ประกอบด้วย T จำนวน 8 หน่วย (8T) (รูพรุนขนาดเล็ก), (ข) วงที่ประกอบด้วย T จำนวน 10 หน่วย (10T) (รูพรุนขนาดกลาง) และ (ค) วงที่ประกอบด้วย T จำนวน 12 หน่วย (12T) (รูพรุนขนาดใหญ่)

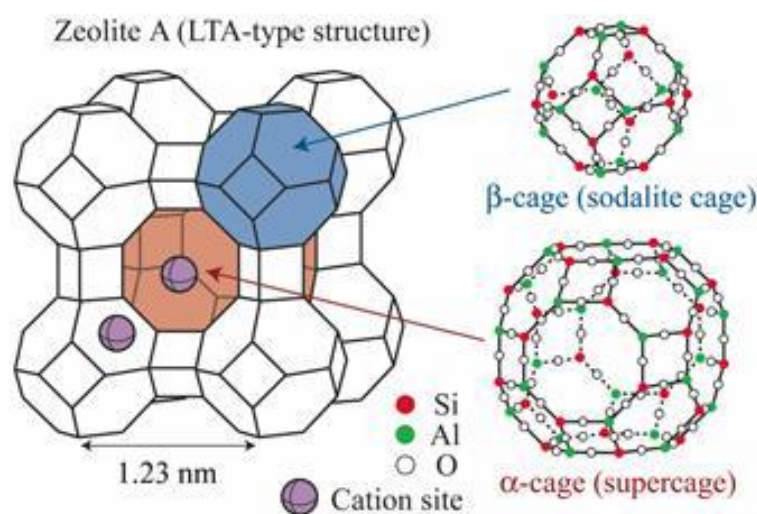


## 2.2 ซีโอไลต์เอ (Zeolite A)

ซีโอไลต์เอเป็นซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ มีชื่อเรียกว่า Linde type A หรือ LTA มีรูปร่างผลึกเป็นทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสที่มี รูเปิดขนาดเล็ก (microporous) เพียง  $4^{\circ}\text{A}$  มีสูตรโครงสร้างอย่างง่าย คือ  $\text{Na}_{12}[\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{12}\text{O}_{48}]\cdot 27\text{H}_2\text{O}$  โครงสร้างของซีโอไลต์เอ เกิดจากการเชื่อมต่อกันด้วยออกซิเจนของ sodalite cage โดยมี D4R เป็นรูปสี่เหลี่ยมคี่นอยู่ระหว่างแต่ละ sodalite cage ดังรูปที่ 2.7 [14] การใช้ประโยชน์ของซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ คือ ใช้ในการคัดกรองโมเลกุลน้ำออกจากส่วนผสมของน้ำและเอทานอล ที่เป็นของผสมอะซีโอโทรป (azeotropic mixture) โดยผ่านเยื่อแผ่นของซีโอไลต์ เอบนตัวรองรับอะลูมินา ใช้ในการแลกเปลี่ยน  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  กับ  $\text{Na}^+$  ในน้ำกระด้าง เพื่อทำให้ผงซักฟอกเกิดประสิทธิภาพที่ดีในการทำงานและอื่น ๆ [14]



รูปที่ 2.7 การเกิดซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างซีโอไลต์เอ (LTA-type structure)

### 2.2.1 สมบัติทางกายภาพของซีโอไลต์เอ

ด้วยโครงสร้างที่มีรูพรุน ช่องเปิด และมีสารที่มีประจุบวก จึงทำให้ซีโอไลต์มีลักษณะทางกายภาพเด่นที่น่าสนใจหลายอย่างเช่น

- (ก) สมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- (ข) มีความหนาแน่นต่ำและมีขนาดของช่องเปิดขนาดใหญ่หลังจากการไล่น้ำ
- (ค) มีโครงสร้างผลึกที่มีความเสถียร
- (ง) มีสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนที่ดี
- (จ) มีลักษณะของขนาดโมเลกุลที่ไม่ต่างกัน
- (ฉ) มีพื้นที่ผิวมาก
- (ช) สามารถดูดซับก๊าซและไอระเหยได้

เนื่องจากสมบัติที่มีลักษณะเฉพาะและพิเศษซึ่งเหมาะสมกับหลายปฏิกิริยาเคมี ซีโอไลต์จึงถูกนำไปใช้งานได้หลากหลายเช่น ใช้เป็นผงซักฟอก เป็นสารดูดซับและแยกสาร เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน ได้

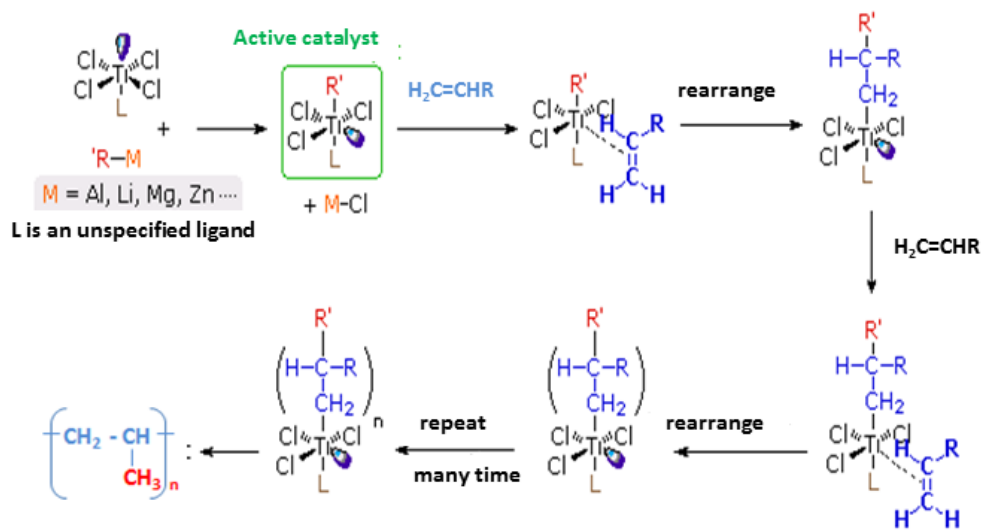
## 2.3 สารประกอบพอลิเมอร์

พอลิโพรไพลีน (polypropylene) เป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นวัสดุสำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร นอกเหนือจากงานด้านอื่นเช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ เชือก แห อวน ถังน้ำมัน

พอลิโพรไพลีนมีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ โดยทั่วไปมีความหนาแน่น 0.90-0.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 160-170 องศาเซลเซียส

พอลิโพรไพลีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก ที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ไม่มีสี มีทั้งโปร่งใสและโปร่งแสง ผิวเป็นมันเงาใส (โดยทั่วไปจะโปร่งแสงมากกว่า HDPE) ทนต่อความร้อนและสารเคมี ป้องกันการผ่านของความชื้นได้ดี ป้องกันการผ่านของอากาศได้ดี ไม่ทนต่อความเย็นจึงไม่เหมาะสำหรับอาหารแช่เยือกแข็ง มักใช้ผลิตถุงทนความร้อนที่มักเรียกว่า ถุงร้อนแบบใส พิล์มใส พิล์มห่อหุ้ม และมักใช้สำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อการแปรรูปอาหารด้วยความร้อน (thermal processing) ทั้งประเภท in-container pasteurization และ in-container sterilization เพราะทนความร้อนได้สูง และสามารถบรรจุผลิตภัณฑ์อาหารขณะที่ร้อนได้ โดยการบรรจุด้วยวิธีแบบร้อนได้ (hot filled: 100-121 องศาเซลเซียส) ใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารในครัวเรือน เช่น จาน ชาม ถ้วย retort pouch และ flexible packaging ฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท (retort) ได้ อีกทั้งบรรจุภัณฑ์ยังสามารถเข้าไมโครเวฟได้ ใช้ผลิตถ้วยหรือชาม สำหรับผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป เช่น บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป ไข่กึ่งสำเร็จรูป ซึ่งคืนรูปด้วยการเติมน้ำร้อนจัด หรือเติมน้ำ เข้าไมโครเวฟก็ได้

พอลิโพรไพลีนเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน [16] แบบโคออร์ดิเนชัน (Co-ordination polymerization) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ซีเกลอร์-แนตตา (Ziegler-Natta Catalyst) เกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนโครงสร้างโมเลกุลสายโซ่ตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 PP มีสูตรทางเคมีคือ  $C_nH_{2n}$  ซึ่งโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีหมู่เมทิล (Methyl Group) เป็นหมู่แทนที่ หมู่เมทิลนี้จะเชื่อมกับอะตอมคาร์บอนหลักบนสายโซ่โมเลกุลโดยมีลักษณะการเรียงตัวของหมู่เมทิลได้หลายแบบ (Stereoisomer) [17, 18]



รูปที่ 2.9 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพอลิโพรพิลีนที่มีซีกเลอร์-นัตตาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของพอลิโพรพิลีน

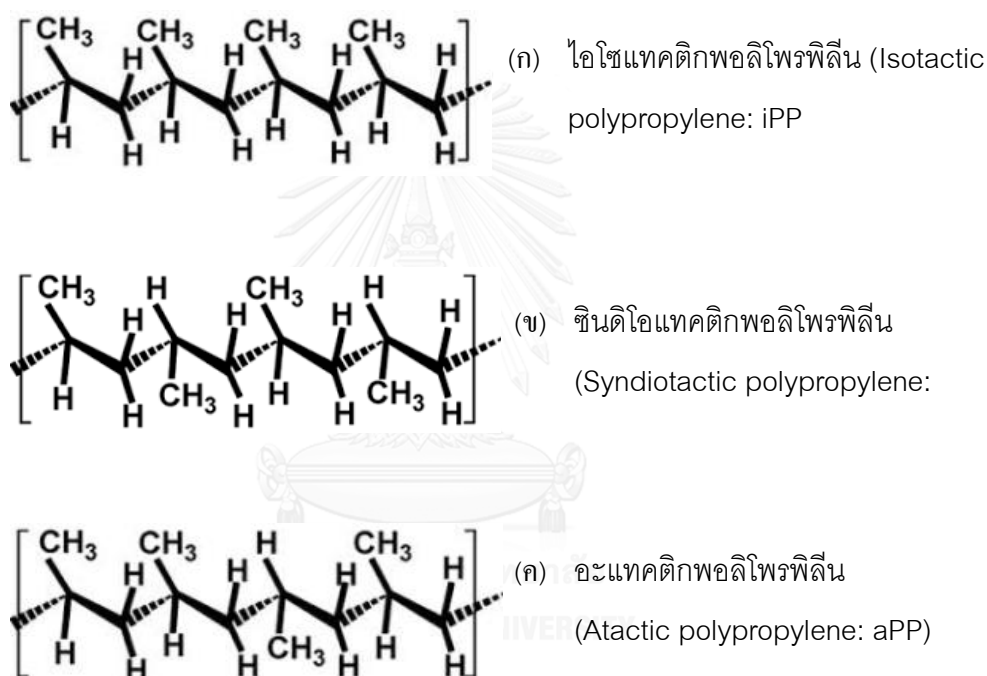
สามารถจัดแบ่งชนิดตามตำแหน่งของหมู่แทนที่ได้สามแบบดังนี้

(ก) ไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน (Isotactic Polypropylene: iPP) คือ พอลิโพรพิลีนที่มีตำแหน่งของหมู่เมทิลอยู่ในตำแหน่งและทิศทางเดียวกันเสมอในทุก ๆ หน่วยซ้ำของสายโซ่ของพอลิโพรพิลีนดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) ส่งผลให้พอลิโพรพิลีนชนิดนี้มีความเป็นผลึกและมีความแข็งเป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid) สูง มีอุณหภูมิหลอมผลึกอยู่ที่ประมาณ 165 องศาเซลเซียส ซึ่งค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ที่มีสมบัติใกล้เคียงกัน ความหนาแน่นโดยทั่วไปของ iPP ประมาณ  $0.92\text{-}0.94 \text{ g/cm}^3$  [19] และมีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยปริมาตร (Number average molecular weight:  $M_n$ ) ระหว่าง 35,000 ถึง 60,000 ดาลตัน และมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Weight average molecular weight:  $M_w$ ) ในช่วง 220,000 ถึง 700,000 ดาลตัน [20]

(ข) ซินดีโอแทคติกพอลิโพรพิลีน (Syndiotactic polypropylene: sPP) คือ พอลิโพรพิลีนที่มีตำแหน่งและทิศทางของหมู่เมทิลเรียงสลับกันไปมาในหน่วยซ้ำของสายโซ่ของพอลิโพรพิลีนดังแสดงใน รูปที่ 2.10 (ข) โครงสร้างแบบซินดีโอแทคติกมีการจัดเรียงผลึกอย่างสม่ำเสมอส่งผลให้มีสมบัติต่าง ๆ เช่น ความเป็นผลึก ความแข็งเกร็ง ความหนาแน่นโดยทั่วไปของ sPP ประมาณ

0.89-0.91 g/cm<sup>3</sup> ซึ่งใกล้เคียงกับ iPP แต่มีอุณหภูมิหลอมผลึกที่ต่ำกว่าคืออยู่ที่ประมาณ 135 องศาเซลเซียส [19]

(ค) อะแทคติกพอลิโพรพิลีน (Atactic polypropylene: aPP) คือ พอลิโพรพิลีนที่มีตำแหน่งและทิศทางของหมู่เมทิลเรียงตัวอยู่ในทิศทางที่ไม่แน่นอนในหน่วยซ้ำของสายโซ่ของพอลิโพรพิลีน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ค) มีสมบัติด้านต่าง ๆ เช่น ความแข็งแรง อุณหภูมิการหลอมผลึกขึ้นอยู่กับระดับของความเป็นอะแทคติกในสายโซ่โมเลกุลและต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนสองแบบข้างต้น



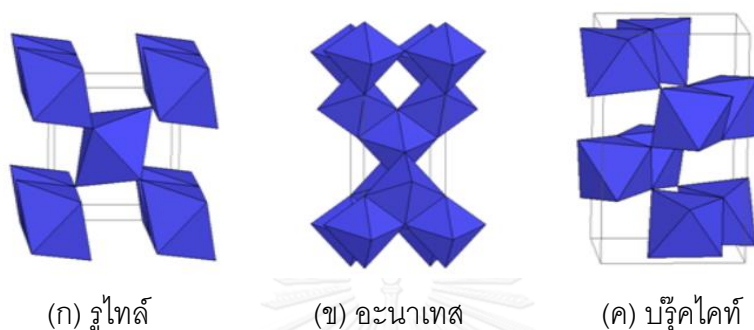
รูปที่ 2.10 ลักษณะการจัดเรียงของหมู่แทนที่ในพอลิโพรพิลีน (PP)

## 2.4 การประยุกต์ของสารประกอบไทเทเนียม

ไทเทเนียมพบได้ในธรรมชาติ ซึ่งมีกระจายอยู่ทั่วไปในเปลือกโลก ทั้งในส่วนที่เป็นดิน หิน และน้ำ ไทเทเนียมเป็นโลหะที่มีความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อนของคลอรีนและน้ำทะเล มีน้ำหนักเบา เมื่อนำมาผสมกับเหล็กและอะลูมิเนียมจะได้โลหะผสม (alloy) สี่เงินที่เบาและแข็งแรง ทนต่อการผุกร่อน สารประกอบของไทเทเนียมที่เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป คือ สารประกอบไทเทเนียมได

ออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) หรือเรียกว่า ไทเทเนียม (IV) ออกไซด์ หรือ ไทเทเนีย (titania) ซึ่งมีโครงสร้างผลึก 3 รูปแบบคือ รูไทล์ (rutile) แอนนาเทส (anatase) และบรูคไคท์ดังรูปที่ 2.11 [21,22]

ส่วนรูปสารประกอบอื่น ได้แก่ ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ( $\text{TiCl}_4$ ) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของหมอกควันและตัวเร่งปฏิกิริยา และไทเทเนียมไตรคลอไรด์ ( $\text{TiCl}_3$ ) ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตโพลิโพรพิลีน



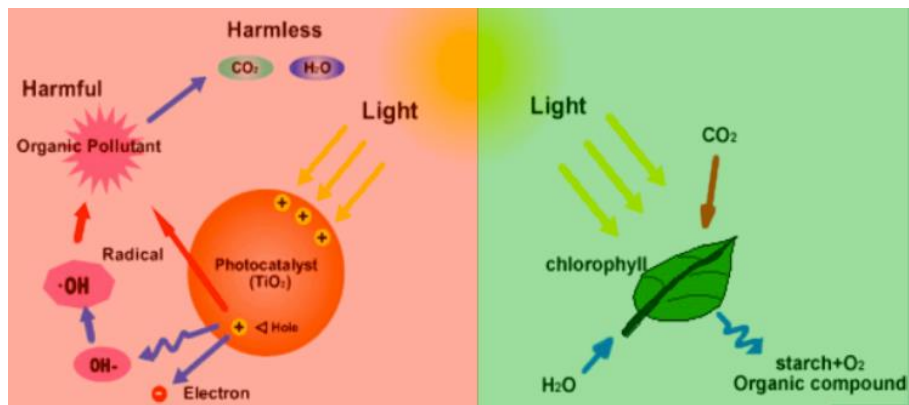
รูปที่ 2.11 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์

ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ในปัจจุบันมีหลากหลายตัวอย่าง เช่น

#### 2.4.1 สมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์

การทำงานของไททาเนียมไดออกไซด์เกิดในลักษณะตรงกันข้ามกับปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงในปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงนั้นคลอโรฟิลล์ ทำหน้าที่เปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ให้กลายเป็นออกซิเจน และกลูโคส แต่ไททาเนียมไดออกไซด์จะทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ [23, 24]

เนื่องจากกระบวนการปฏิกิริยาทางแสงในไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำให้เกิดอนุมูลอิสระ ( $\text{OH}^{\cdot}$  และ  $\text{O}_2^{\cdot}$ ) ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้สามารถสลายสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ รวมทั้งเชื้อโรคบางชนิดได้ ดังนั้นกระบวนการนี้ยมนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการบำบัดของเสียในตัวกลางที่เป็นได้ทั้ง น้ำ อากาศ หรือ ในดิน รวมทั้งใช้ในการกำจัดเชื้อโรคบางสายพันธุ์



รูปที่ 2.12 การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ (ซ่าย) เทียบกับการสังเคราะห์แสง(ขวา)

#### 2.4.2 สมบัติการต้านแบคทีเรีย

เมื่อแบคทีเรียแพร่กระจายไปบนพื้นผิว สารพิษที่เกิดจากการตายเซลล์ก็จะถูกทำลายจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ [25-27] ไทเทเนียมไดออกไซด์ จะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรียทำให้มีประสิทธิผลการใช้งานที่ยาวนาน โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพด้านยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อ มีความสามารถมากกว่า คลอรีน 3 เท่า และมากกว่า ไอโชน 1.5 เท่า



รูปที่ 2.13 กลไกการต้านแบคทีเรีย

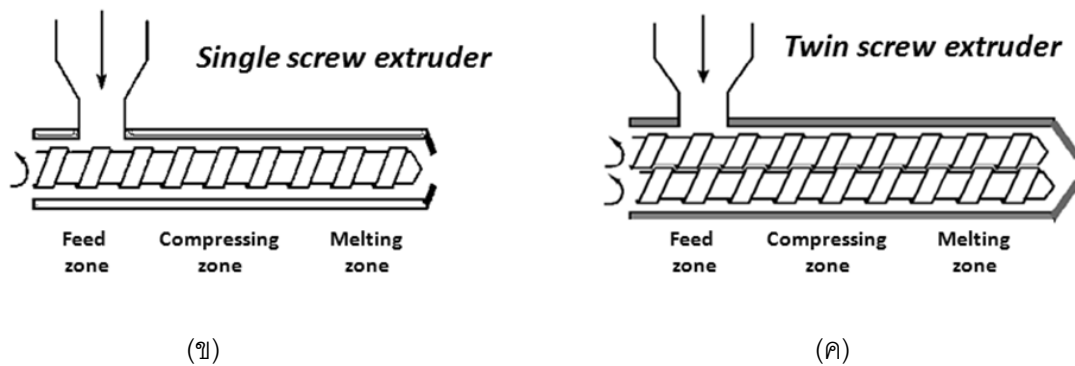
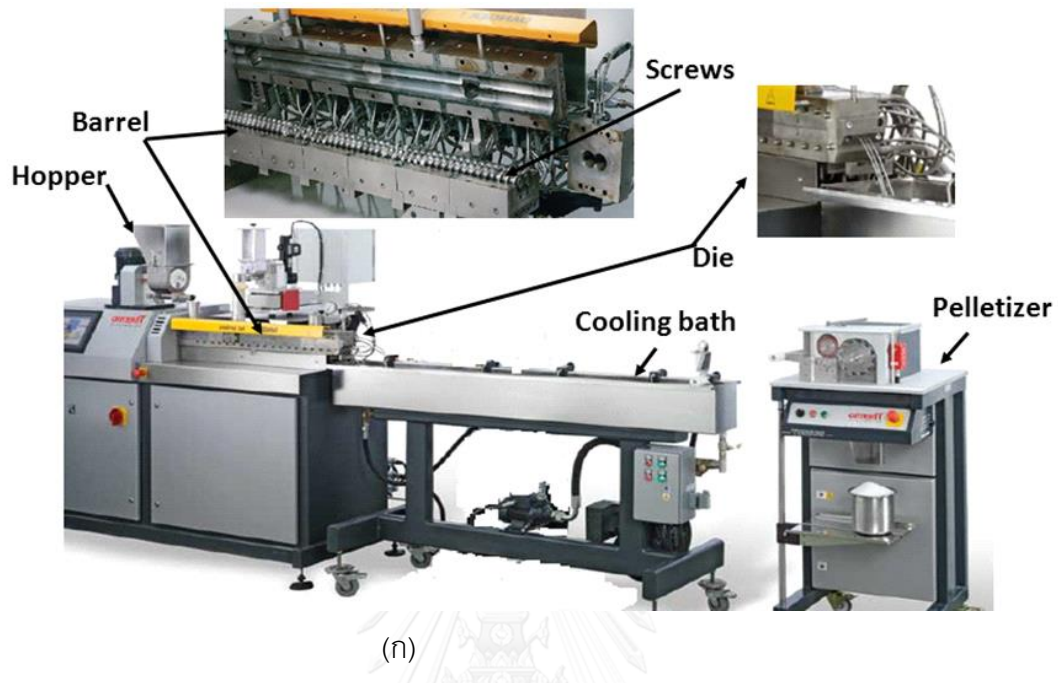
## 2.5 การทำพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยการหลอมผสม

การทำพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ นั้นจะต้องผ่านกระบวนการหลอมผสมแล้วรีดอัดด้วยสกรู โดยทั่วไปนิยมใช้สกรูแบบ สกรูคู่ โดยให้หมุนไปในทิศเดียวกัน ซึ่งวิธีนี้จะไม่ทำให้สารได้รับแรงเฉือนมากเกินไปจนอาจทำให้สมบัติเปลี่ยนไปได้ เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมทั้งในงานวิจัยหรือแม้แต่งานทดสอบในห้องปฏิบัติการหรืองานที่ต้องการความแม่นยำสูง [28-31] ทั้งนี้โดยมีวัตถุประสงค์ คือต้องการให้สารผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดี ประสิทธิภาพของกระบวนการหลอมผสมเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของพอลิเมอร์คอมพอสิต ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องอัดรีดจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องควบคุม โดยทั่วไปการอัดรีดจะเริ่มจากการป้อนผงหรือเม็ดพอลิเมอร์เข้าสู่กรวยป้อน (Hopper) จากนั้นสารจะถูกลำเลียงเข้าสู่เครื่องอัดรีดโดยสกรู (Screw) ซึ่งอยู่ในเรือนทรงกระบอก (Barrel) พอลิเมอร์ในกระบอกสกรูจะได้รับความร้อน แรงดัน และแรงเฉือนที่แตกต่างกันเมื่อมีการบดอัดรีดผ่านช่วงต่างๆของสกรูที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยจะสูงสุดเมื่อถึงปลายสกรู กระบวนการ ป้อน อัด และหลอมเหลว [32, 33] จะขึ้นกับลักษณะการออกแบบกระบอก และสกรูที่แตกต่างกันทำให้เกิดกระบวนการหลอมเหลวและการผสมระหว่างเนื้อพอลิเมอร์และสารไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ เมื่อสกรูหมุนขับให้พอลิเมอร์ไหลอย่างต่อเนื่องสู่ทางออกที่มี Die (แม่แบบ ซึ่งหมายถึงส่วนปลายของชุดฉีดในเครื่องฉีดขึ้นรูป) ซึ่งจะทำหน้าที่กำหนดลักษณะของผลิตภัณฑ์ของพอลิเมอร์หลอมเหลวให้มีลักษณะเป็นเส้นไหลแบบต่อเนื่อง [33] จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการลดอุณหภูมิโดยการหล่อเย็นซึ่งแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของพอลิเมอร์จนกลายเป็นพอลิเมอร์เส้นแข็งเพื่อให้เครื่องตัดสามารถกำหนดขนาดความยาวของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ก)

เครื่องอัดรีดสามารถจำแนกได้ตามลักษณะสกรูภายในเรือนทรงกระบอกคือ เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ข) และเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) ซึ่งมีสกรู 2 ตัวอยู่ในเรือนทรงกระบอกเดียวกัน ดังนั้นจึงมักวางตำแหน่งของสันสกรูในลักษณะที่สันเกลียวของสกรูแทรกอยู่ในร่องเกลียวของสกรูข้างเคียง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.14 (ค) นอกจากนี้ประสิทธิภาพของเครื่องอัดรีดยังขึ้นอยู่กับภาวะและปัจจัยต่างๆ เช่น ทิศทางการหมุนของสกรูแบบคู่ ความเร็วในการหมุนของสกรู อัตราการป้อนสาร ระดับช่วงอุณหภูมิ การ



ออกแบบขนาดความลึก ความยาวของสกรูและอุปกรณ์ช่วยอื่น ๆ เช่น ชุดหล่อเย็น เครื่องดึงและเครื่องตัด เป็นต้น [32, 33]



รูปที่ 2.14 (ก) เครื่องอัดรีด (ข) ลักษณะของสกรูในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (ค) ลักษณะของ สกรูในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี ค.ศ.2006 Kimura และคณะ [34] ได้ทำการสังเคราะห์สารประกอบ ไทเทเนียม-คานีไมท์ (Ti-kanemite) โดยผสมเททระอีทอกซีไฮเลน (Tetraethoxysilane, TEOS) หรือ water glass กับไทเทเนียมบิวทอกไซด์ (Ti(OBu)<sub>4</sub>) แล้วจึงค่อยๆ เติมนลงในสารละลายไฮดรอกไซด์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราส่วนการทดลองซิลิกอนต่อไทเทเนียม 100, 200, 300, 400,

500 คนให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง อบที่อุณหภูมิการทดลอง 675, 700, 725, 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง การตรวจสอบทางกายภาพด้วยเทคนิค เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน พบลักษณะโครงสร้างของคานีไมต์ซึ่งได้จากพอร์มเบต้าไดไฮเดียมไดซิลิเกต ( $\beta\text{-Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ) ที่อุณหภูมิ 675 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นพบมีการปนเปื้อนของอัลฟาไดไฮเดียมไดซิลิเกต ( $\alpha\text{-Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ); UV-Vis spectrum ให้อุดมพิคของสัญญาณที่ 210-220 นาโนเมตร ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีไทเทเนียมในรูปแบบเตตระฮีดรอน(Tetrahedral) ซึ่งมีโครงสร้างแบบปิรามิดฐานสามเหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านสามเหลี่ยมสี่ด้านโดยในกรณีนี้ไทเทเนียมจะอยู่ใจกลางของปิรามิด ในโครงข่ายของคานีไมต์ ซึ่งสามารถมองเห็นได้ในทุกอัตราส่วนซิลิกาต่อไทเทเนียม นอกจากนี้ยังพบการเพิ่มขึ้นของสัญญาณที่ 280 นาโนเมตรซึ่งบ่งบอกว่ามีไทเทเนียมไอออนในรูปแบบห้าเหลี่ยมและแปดเหลี่ยม (Pentahedral and Octahedral coordination) หรือบางส่วนอยู่ในรูปแบบหกเหลี่ยม (Hexahedral coordination) ซึ่งไทเทเนียมกลุ่มนี้จะไม่อยู่ในโครงข่ายของซิลิเกตและจะพบเห็นได้มากขึ้นเมื่ออัตราส่วนซิลิกอนต่อไทเทเนียมน้อยกว่า 300 อย่างไรก็ตามไม่มีการเกิดของพันธะไทเทเนียม-ออกซิเจน-ไทเทเนียม (Ti-O-Ti) เนื่องจากไม่เห็นสัญญาณของพันธะนี้ที่ 330 นาโนเมตรในทุกตัวอย่าง

ปี ค.ศ.2005 Mohamed และคณะ [9] ศึกษาการเตรียมสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์-แซดเอ็ลเอ็ม-5 ( $\text{TiO}_2\text{-ZSM-5}$ ) ซีโอไลต์ ด้วยวิธีการเคลือบฝัง โดยเติมแซดเอ็ลเอ็ม-5ซีโอไลต์ในสารละลายเอทานอลที่มีไทเทเนียมเททระคลอไรด์ ( $\text{TiCl}_4$ ) เพื่อให้ได้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ตามปริมาณที่ใส่ 2, 4, 6.5 และ 8.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปอบให้แห้งเป็นเวลา 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และศึกษาการเตรียมแบบวิธีอันตรกิริยาของแข็ง-ของแข็ง (solid-solid interaction) ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน พบสัญญาณของไทเทเนียมไดออกไซด์อะนาเทสที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณที่ผสม เช่นเดียวกับสัญญาณของไทเทเนียมซิลิเกต โดยพบได้จากทั้งสองวิธี และยังพบว่าที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice parameter:  $(a, b, c)$ ), ค่าปริมาตรของหน่วยเซลล์ (Unit cell volume) ของไทเทเนียม/แซดเอ็ลเอ็ม-5 ค่าของสัญญาณของ UV-vis ที่ 220 นาโนเมตร ซึ่งหมายถึงไทเทเนียม

ไอออนที่มีรูปแบบสี่เหลี่ยม และ FT-IR ที่  $960\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งหมายถึงไทเทเนียมที่อยู่ในโครงข่ายซีโอไลต์ มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างแซตเฮ็ดเอ็ม-5 โดยวิธีเคลือบฝังให้ค่าสูงกว่า แต่แนวโน้มของทั้งสองวิธีมีค่าลดลงเมื่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการปิดกั้นในบางช่องรูพรุนของแซตเฮ็ดเอ็ม-5 สรุปคือ ปริมาณของไทเทเนียมที่อยู่ในโครงสร้างของแซตเฮ็ดเอ็ม-5 ซีโอไลต์ ที่ได้จากการเตรียมแบบเติมด้วยวิธีการเคลือบฝังมีมากกว่าแบบวิธีอันตรกิริยาของแข็ง-ของแข็ง

ปี ค.ศ.2008 Zhang และคณะ [8] ศึกษาผลที่เกิดกับโครงสร้างของซิลิกาบริสุทธิ์ที่มีรูพรุนขนาดกลางชนิดเอ็มซีเอ็ม-41(MCM-41) จากการให้อิออนไทเทเนียม(Ti-doping)ด้วยวิธีที่ต่างกัน โดยทดลองให้ไทเทเนียม 2 วิธีคือ การสังเคราะห์แบบทางตรง (direct synthesis method) ซึ่งเกิดการแทนที่ของไทเทเนียมในเอ็มซีเอ็ม-41(Ti-MCM-41) ที่สังเคราะห์จากการเติมโซเดียมซิลิเกตและเทตระเมทิลออกไซด์ไทเทเนียม(tetramethyloxytitanium,  $\text{Ti}(\text{OEt})_4$  ใน Si-MCM-41 อีกหนึ่งวิธีเป็นการสังเคราะห์ด้วยวิธีเคลือบฝังซึ่งเป็นการเติมไทเทเนียมในเอ็มซีเอ็ม-41(Ti-loaded MCM-41) เรียกเป็น Ti/MCM-41 โดยเริ่มการสังเคราะห์จากการละลายสารเทตระเมทิลออกไซด์ไทเทเนียม ( $\text{Ti}(\text{OEt})_4$ ) ในโทลูอีนแล้วผสมกับ Si-MCM-41 ทำการทดลองทั้งสองวิธีที่อัตราส่วนของซิลิกาต่อไทเทเนียม 25, 50, 100 ผลตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน พบว่าวิธีเคลือบฝังให้โครงสร้างที่เป็นระเบียบมากกว่าเนื่องจากให้สัญญาณที่เข้มคมมากกว่า FT-IR พบสัญญาณที่  $960\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งหมายถึงไทเทเนียมที่อยู่ในโครงข่ายซีโอไลต์และมากขึ้นตามปริมาณของไทเทเนียมที่เติมลงไป XAFS(X-ray absorption fine structure) พบยอดสัญญาณซึ่งบอกระยะของพันธะไทเทเนียมกับออกซิเจนซึ่งผลจากวิธีเคลือบฝังให้ค่าที่สูงกว่า BET analysis ซึ่งเห็นว่าความสม่ำเสมอของขนาดรูพรุนของผลที่ได้จากวิธีเคลือบฝังมีมากกว่า แต่ทั้งสองวิธีให้ผลน้อยกว่าผลจากการสังเคราะห์ซิลิกอน-เอ็มซีเอ็ม-41 ขนาดเฉลี่ยของรูพรุนที่ได้จากแบบทางตรงมีขนาดมากกว่าจากวิธีเคลือบฝัง และมากกว่าซิลิกา-เอ็มซีเอ็ม-41 เพราะขนาดรัศมีไทเทเนียมไอออนมากกว่าของซิลิกอนไอออน

ปี ค.ศ.2012 Altan และ Yildirim [11] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการต้านแบคทีเรีย โดยการเตรียมสารประกอบพอลิไพโรฟิลีน/ไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคการหลอม

ผสม (melt compounding) โดยการเติมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในพอลิโพรพิลีน ในเครื่องฉีดแบบชนิดสกรูคู่ (twin screw extruder) และศึกษาผลของการเติมและไม่เติมสาร maleic anhydride grafted styrene ethylene-butylene-styrene(SEBS-g-MA) ซึ่งมี silane ผสมอยู่ในสารประกอบ นำชิ้นงานที่ได้จากการเครื่องฉีดไปตรวจสอบสมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง (Tensile Strength), ความแข็งแกร่งของวัสดุ (elastic modulus) ความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) ผลพบว่าสารประกอบที่มี SEBS-g-MA ให้สมบัติเชิงกลด้านความแข็งแกร่งดีกว่าสารประกอบที่ไม่เติม SEBS-g-MA แต่สมบัติด้านการยืดหยุ่นต่ำลง ส่วนผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ พบว่าทุกสูตรทั้งที่เติม/ไม่เติม SEBS-g-MA มีค่าอุณหภูมิความเป็นผลึก และองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ต่ำลง เนื่องจากผลของตัวหน่วงการเกิดปฏิกิริยา (Retardant effect) ที่เกิดจากไทเทเนียมไดออกไซด์บนผลึกพอลิโพรพิลีน และ ผลจากการบดบัง (Physical hindrance effect) ที่เกิดจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์ FT-IR spectra พบยอดสัญญาณที่  $1795\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการมีพันธะ C=O ของมาลิกแอนไฮไดรด์ และที่  $2924\text{ cm}^{-1}$  หมายถึงพันธะ  $\text{CH}_3$  Stretching ของไซเลน จึงเป็นการยืนยันได้ว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกเคลือบด้วย SEBS-g-MA/silane กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชี้ให้เห็นการกระจายตัวที่ดีเมื่อมี SEBS-g-MA จากตัวอย่างของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วย SEBS-g-MA/silane; ผลตรวจสอบสมบัติการต้านแบคทีเรีย โดยทดสอบความสามารถในการฆ่าเชื้อ *เอสเคอริเคีย โคไล* โดยใช้เทคนิค ตามมาตรฐาน JIS Z 2801 พบว่าที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์สูงสุดกลับมีค่าต่ำ เนื่องจากการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่น้อยลง

ปี ค.ศ.2012 Lucia และคณะ [7] ศึกษาสมบัติการต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่เติมสารประกอบซิลเวอร์และซีโอไลต์วายเป็น โดยการเตรียมฟิล์มของพอลิเมอร์ชนิดแอลดีพีอีซึ่งผสมกับสารประกอบซิลเวอร์-ซีโอไลต์วายเป็นด้วยวิธี wet casting method โดยใช้ซิลเวอร์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของซีโอไลต์วายเป็นและใช้ซีโอไลต์วายเป็น 1-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของพอลิเมอร์ นำฟิล์มที่ได้ไปศึกษาสมบัติการต้านแบคทีเรียด้วยวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นที่น้อยที่สุดที่สามารถต้าน *เอสเคอริเคีย โคไล* ผลพบว่าสามารถต้านเชื้อ *เอสเคอริเคีย โคไล* ได้ที่ความเข้มข้นของตั้งแต่  $0.025\text{ mg Ag-zeolite/mL}$  และผลจากการตรวจสอบทางกายภาพด้วยเทคนิคเอกซเรย์

ดิฟแฟรกชัน และ nitrogen adsorption พบว่า รูปผลึกของซีโอไลต์วายเป็นเปลี่ยนแปลง แต่ปริมาณความเป็นผลึกน้อยลงเล็กน้อย อาจเนื่องจากการถูกทำลายหรืออาจเนื่องมาจากการที่อนุภาคซิลเวอร์เข้าไปเกาะในโพรงของของซีโอไลต์ ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ชี้ให้เห็นว่าการเคลือบฝังของซีโอไลต์ไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมไหล และอุณหภูมิการเกิดผลึก เนื่องจากให้สัญญาณที่เดียวกับกรณีที่ไม่มีการเคลือบฝังซีโอไลต์

จากงานวิจัยที่กล่าวมาแล้ว สรุปได้ว่าการเตรียมพอลิไพร์พอลิโนไมด์กับอนุภาคโลหะเช่นซิลเวอร์หรือไทเทเนียมและซีโอไลต์ สามารถทำได้และมีสมบัติด้านแบคทีเรีย [7,11] วิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอซึ่งเติมอนุภาคไทเทเนียมเข้าไปในโครงข่ายของซีโอไลต์ก็สามารถทำได้จากแบบเคลือบฝัง ซึ่งสามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ได้ด้วยเทคนิค เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดิฟฟิวสิฟเฟลกแทนซ์อัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรเมตรี จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมา [8, 9, 23] โดยตามเอกสารอ้างอิงยังไม่เคยรายงานสมบัติการซึมผ่านของก๊าซในตัวอย่างซีโอไลต์เอ-พอลิไพร์พอลิโนไมด์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาการเตรียมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิไพร์พอลิโนไมด์ เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มและศึกษาสมบัติด้านแบคทีเรีย สมบัติการซึมผ่านของก๊าซและสมบัติเชิงกล โดยคาดหวังว่าจะได้ผลิตภัณฑ์พลาสติกพอลิไพร์พอลิโนไมด์ที่เป็นประโยชน์ด้านบรรจุภัณฑ์สามารถนำไปใช้งานด้านเวชภัณฑ์ อาหาร ที่ต้องการความปลอดภัยหรือด้านเกษตรกรรมที่สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิต

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

3.1.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide,  $TiO_2$  ชื่อการค้า Titanium (IV) oxide), analytical grade จากบริษัท Sigma-Aldrich (Germany) มีมวลโมลกุลตามที่แสดงคือ 78.87 มีลักษณะเป็นผงสีขาว

3.1.2 ซีโอไลต์เอ (Zeolite A, NaA) commercial grade, sodium aluminosilicate ชื่อการค้า ADVERA 401, จากบริษัท PQ Chemicals (Thailand) Limited. องค์ประกอบของสารตามที่แสดงคือ  $Na_2O$  17%  $Al_2O_3$  28%,  $SiO_2$  33%,  $H_2O$  22% มีลักษณะผงสีขาว

3.1.3 ไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน (iPP) ได้จาก ห้องปฏิบัติการทดสอบเพื่อควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ของ บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด(มหาชน), มีลักษณะเป็นผง (Powder) สีขาว มีค่าสมบัติดัชนีการไหล (Melt Mass-Flow Rate, MFR)อยู่ที่ประมาณ 10-11 g/10 min

3.1.4 Phenolic Antioxidant ชื่อการค้า IRGANOX 1010, ชื่อทางเคมี (chemical name) คือ Pentaerythritol Tetrakis (3-(3, 5-di-tert-butyl-4-hydroxyphenyl) propionate) จากบริษัท CIBA SPECIALTY CHEMICAL, SWITZERLAND มีลักษณะเป็นผงสีขาว ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ที่ 20 องศาเซลเซียสเท่ากับ 1.15 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.1.5 Blend antioxidant ชื่อการค้า IRGANOX B215 จากบริษัท CIBA SPECIALTY CHEMICAL, SWITZERLAND เป็นสารผสมระหว่างสารประกอบฟอสไฟต์ (phosphite) และ ฟีนอลิก (Phenolic) ในอัตราส่วน 1:2 ชื่อทางเคมีคือ 67 % IRGAFOS 168 ; 33 % IRGANOX 1010 มีลักษณะเป็นผงสีขาว ค่าความหนาแน่นรวม (bulk density) เท่ากับ 550-630 กรัมต่อลิตร

3.1.6 Calcium stearate จากบริษัท SAKAI CHEMICAL INDUSTRY มีลักษณะเป็นผงสีขาว ค่าความหนาแน่นรวม (bulk density) เท่ากับ 0.19 กรัมต่อมิลลิลิตร

## 3.2 การจัดเตรียมวัสดุดิบ

### 3.2.1 การเตรียมสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ

ผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำปราศจากไอออน ปริมาณ 50 มิลลิลิตรในปิกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร ให้ได้ความเข้มข้น 250 ส่วนในล้านส่วน ที่อุณหภูมิห้อง พร้อมทั้งคนให้เข้ากัน ด้วยแท่งแม่เหล็ก เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นค่อยๆ เติมซีโอไลต์เอ ปริมาณ 5 กรัม จากนั้นคน ต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 70 องศาเซลเซียส คนไปเรื่อยๆ จนกระทั่ง สารละลายแห้งเป็นผงนำไปอบที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำไปตั้งให้เย็นใน ตู้ดูด ความชื้น (desiccator) นำไปเผา (Calcine) ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยจะต้องเริ่มให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้อง แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปด้วยอัตรา 1 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 100 องศาเซลเซียส ให้ค้างอุณหภูมิไว้เพื่อเผาสาร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปด้วยอัตรา 1 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ให้ค้างอุณหภูมิไว้เพื่อเผาสารเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จนครบเวลา แล้วปล่อยให้ อุณหภูมิลดลงจนถึง 50 องศาเซลเซียส [9] จึงนำสารออกมาจากเตาเผา เพื่อทิ้งให้เย็นใน ตู้ดูด ความชื้น (desiccator) จะได้ไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ ซึ่งมีความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 250 ส่วนในล้านส่วน ที่พร้อมนำไปใช้งานเพื่อผสมกับผงพอลิโพรพิลีนต่อไป

เตรียมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ด้วยวิธีข้างต้น จะได้สารประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์ในซีโอไลต์เอที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 250, 500, 1000, 2000, 5000 ส่วนใน ล้านส่วน ตามลำดับ จนได้ปริมาณตามที่ต้องการ ซึ่งให้ชื่อย่อเพื่อดำเนินการวิจัยคือ Ti-1, Ti-2, Ti-3, Ti-4 และ Ti-5 ตามลำดับ

## 3.3 การประยุกต์การใช้งานของพอลิเมอร์

### 3.3.1 การเตรียมผงไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีน

นำสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอที่เตรียมได้ในข้อ 3.2 ซึ่งมีปริมาณเพียงพอกับการ ผสมกับผงพอลิโพรพิลีนมาดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

3.3.1.1 นำผงพอลิโพรพิลีนที่เตรียมไว้ทั้งหมด (ประมาณ 30 กิโลกรัม) มาผสมให้เป็นเนื้อ เดียวกัน (Homogeneity) ก่อน ด้วยเครื่องผสมแบบถังหมุน (Tumbler mixer) เป็นเวลา 15 นาที

ตัวเครื่องซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกปลายล่างรูปกรวย (V-shape mixer) ดังรูปที่ 3.1 ทำการคว่ำถั่วไปมา เพื่อทำให้เกิดการผสมของผงพอลิโพรพิลีนเข้ากันอย่างดี โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงและการหมุนเหวี่ยงของถังหมุนจากแรงขับของมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งแรงเหล่านี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของสารต่างๆ เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และไม่ทำให้เกิดการหลอมอันเนื่องจากความร้อนเลย จึงทำให้สารที่นำมาผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันและสมบัติของสารไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.1 เครื่องผสมแบบถังหมุน(Tumbler mixer)

3.3.1.2 นำผงพอลิโพรพิลีนที่เป็นเนื้อเดียวกันแล้ว มาผสมกับ สารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ และ สารเติมแต่ง (Additive) ตามปริมาณในในแต่ละสูตร ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนการผสมสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอกับสารอื่นๆ

รายละเอียด	หน่วย	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
ปริมาณของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอที่ใช้ผสมกับผงพอลิโพรพิลีน	เปอร์เซ็นต์					
	โดยน้ำหนัก	0	1	3	5	10
	กรัม	0.00	50.00	147.00	245.00	490.00.
ปริมาณของผงพอลิโพรพิลีน	กรัม	5,000	4,950	4,753	4,655	4,410
Phenolic A.O. (0.04 phr)	กรัม	2.00	2.00	1.96	1.96	1.96
Blend A.O. (0.06 phr)	กรัม	3.00	3.00	2.94	2.94	2.94
Calcium stearate (0.11 phr)	กรัม	5.50	5.50	5.39	5.39	5.39



3.3.1.3 นำสารทั้งหมดที่ต้องการผสมของแต่ละสูตรใส่ในเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) ดังรูปที่ 3.2 ตั้งความเร็วในการผสมที่ความเร็วในการหมุนของใบพัดกวนที่ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ใบกวนด้านล่างซึ่งมีลักษณะเป็นใบพาย 4 ก้าน จะกวนผสมสารจนเป็นเนื้อเดียวกันอย่างดี เนื่องจากปริมาณของสารที่ในแต่ละสูตรเพียง 5-10 กิโลกรัม ทำให้การผสมในถังขนาด 50 ลิตร ไม่เกิดความร้อนจากหมุนของใบพัดมากนัก เนื่องจากสารในถังยังสามารถเคลื่อนตัวได้อิสระ และส่งผลให้การผสมของสารเข้ากันได้ดี

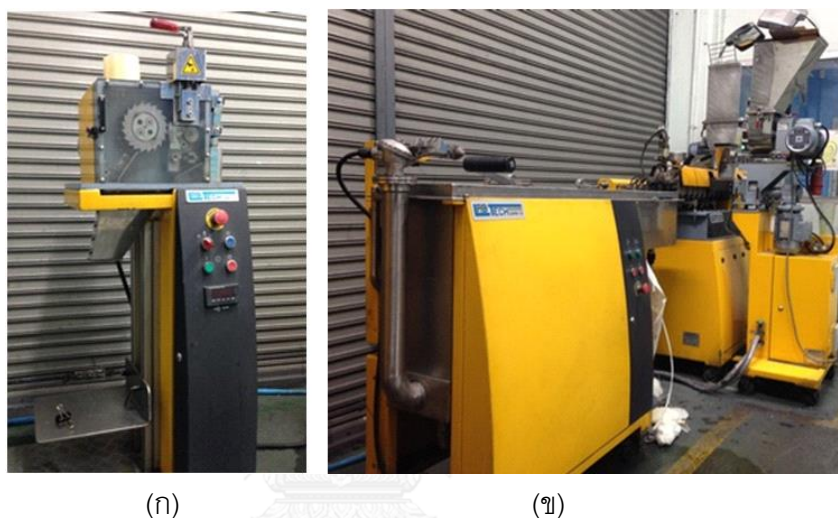


รูปที่ 3.2 เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer)

### 3.3.2 การเตรียมเม็ดพลาสติกไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิต

นำผงของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิต-พอลิโพรพิลีนทั้ง 5 สูตร ไปทำการตัดเม็ด โดยใช้ตัวอย่างเริ่มจากหมายเลข 1 ไปจนถึงหมายเลข 5 ตามลำดับด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder, LTE 22-32, LAB TECH Engineering, THAILAND) ซึ่งสกรูทั้งสองภายในกระบอก (Cylinder) จะถูกทำให้หมุนด้วยความเร็ว 90 รอบต่อนาที โดยหมุนในทิศทางเดียวกัน (Co-rotating screw) ตัวสกรูมีลักษณะที่ขบกันสนิท (Closely Intermeshing) และเมื่อหมุนในขณะใช้สกรูด้านซ้าย และด้านขวาจะช่วยทำความสะอาดซึ่งกันและกัน (Self Wiping) เส้นผ่านศูนย์กลางสกรู 20 มิลลิเมตร อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L:D Ratio) 32:1 อุณหภูมิที่ใช้ของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ เริ่มจาก Hopper ถึง die แบ่งเป็น 5 ช่วงอุณหภูมิคือ 175, 180, 180, 190 และ 200 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.2 (ข) เพื่อทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันอีกครั้ง

ในกระบวนการของเครื่องอัดรีดด้วยแรงหมุนขับของสกรู แล้วจะทำการรีดพอลิเมอร์เหลวผ่านออกทางปากDie ไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตเหลวจะถูกขับทิ้งก่อนเพื่อเป็นการขับสารตัวอย่างเก่าก่อนนำทิ้ง ใช้เวลาในการขับพอลิเมอร์เหลวทิ้งประมาณ 15-20 นาที จากนั้นพอลิเมอร์เหลว จะถูกดึงเป็นเส้นสาย เพื่อเข้าสู่อ่างน้ำ (water bath)ที่มีการหมุนเวียนน้ำผ่านเข้าออกตลอดเวลาที่อุณหภูมิห้อง ทำให้เย็นทันทีและแข็งตัว จากนั้นเส้นไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่แข็งตัวแล้ว จะนำเข้าสู่เครื่องตัดเม็ด (Pelletizer) ดังรูปที่ 3.3 (ก)



รูปที่ 3.3 (ก) เครื่องตัดเม็ด (Pelletizer) (ข) เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 3.3.3 การเตรียมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตฟิล์ม

3.3.3.1 นำเม็ดพลาสติกไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมโพสิต จากข้อ 3.3.2 มาเป่าขึ้นรูปฟิล์ม โดยใช้ตัวอย่างเริ่มจากหมายเลข 1 ไปจนถึงหมายเลข 5 ตามลำดับ ด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม (Film Blowing Machine, A.R. Product Ltd. Part) ดังรูปที่ 3.4 อุณหภูมิที่ใช้ของเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม เริ่มจาก Hopper ถึง die แบ่งเป็น 5 ช่วงอุณหภูมิคือ 200, 215, 220, 220, 225 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์เหลวเมื่อถูกขับออกจากหน้าปาก Die จะถูกเป่าลมเข้าไปภายในเพื่อแบ่งให้ขยายพร้อมๆกับทำให้เย็นด้วยลมจากเครื่องเป่าลมเย็น (ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 องศาเซลเซียส) ต่อจากนั้นฟิล์มจะถูกทำให้เย็นทันทีด้วยน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียสโดยการควบคุมอุณหภูมิน้ำจากเครื่องทำความเย็น (chiller) โดยน้ำจะหล่อเย็นด้านนอกผิวฟิล์มพร้อมกับ

ถูกดึงให้ตึงด้วยลูกกลิ้งปรับความตึงของฟิล์ม (Take of Roller) ซึ่งควบคุมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า และถูกทำให้แห้งด้วยลมเย็นอีกครั้งก่อนเก็บฟิล์มโดยม้วนเข้าลูกกลิ้งที่เตรียมไว้ ฟิล์มจะถูกควบคุมโดยทำการเป่าฟิล์มให้มีความหนาประมาณ 25 - 30 ไมครอน ฟิล์มมีความกว้างเมื่อพับทบแล้ว 20 เซนติเมตร เพื่อให้สามารถนำไปทดสอบสมบัติด้านเชิงกลตามมาตรฐานการทดสอบสากลได้



รูปที่ 3.4 เครื่องเป่าฟิล์ม (Film Blowing Machine, A.R. Product Ltd. Part)

### 3.4 เทคนิคการพิสูจน์เอกลักษณ์สาร

#### 3.4.1 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกใช้เครื่อง Rigaku D/MAX-2200 Ultima+ ใช้ในการพิสูจน์โครงสร้างของสารที่เตรียมโดยการหาโครงสร้างผลึกหรือระนาบของหน่วยผลึก ในการทดสอบจะใช้ความยาวคลื่นของทองแดง ( $\text{CuK}\alpha$ ) เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ 40 kV และ 30 mA และใช้โมโนโครเมเตอร์ (monochromator) เพื่อให้การแยก (resolution) ดีขึ้น มุมที่ใช้ในการศึกษาหาโครงสร้างของวัสดุ จะอยู่ในช่วง 5 – 50 องศา โดยมีการเพิ่มของมุมที่ 5 องศา ความกว้างของสลิต (slit) กำหนดไว้ที่ 0.5, 0.5 และ 0.3 มิลลิเมตร

### 3.4.2 ดิฟฟิวสิวีเฟลกแทนซ์อัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล

ใช้ทดสอบองค์ประกอบของสารที่สนใจและดูการจัดเรียงตัวของธาตุในสารนั้นๆ โดยในการวิจัยนี้ใช้เครื่อง Shimadzu รุ่น UV-2550 เพื่อยืนยันชนิดของไทเทเนียมในโครงสร้างแบบเทหระฮีดรอนที่ 220 นาโนเมตร ที่สัญญาณ 250-280 นาโนเมตร สำหรับรูปแบบที่ไม่ใช่เทหระฮีดรอน และที่บริเวณเหนือ 280 นาโนเมตร เพื่อยืนยันโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส

### 3.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้ศึกษาลักษณะของสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ โดยในการวิจัยนี้ใช้เครื่อง JEOL รุ่น 5800LV เครื่องจะทำการสร้างภาพโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้ นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้น จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมทั้งที่อยู่ในรูปของผงและฟิล์ม

### 3.4.4 การต้านแบคทีเรีย

เป็นการทดสอบการต้านแบคทีเรีย ตามมาตรฐาน ASTM E2149-10 เรื่อง Standard Test Method for Determining the Antimicrobial Activity of Immobilized Antimicrobial Agents Under Dynamic Contact Conditions [35] แบคทีเรียชนิด *สแตฟฟีโลคอคคัส ออเรียส* (*Staphylococcus aureus*, *S. aureus*, ATCC 6538) และ *เอสเคอริเคีย โคไล* (*Escherichia coli*, *E. coli*, ATCC 25922) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก และแบคทีเรียแกรมลบ ตามลำดับ โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพของคอมโพสิตในเวลาที่ 1, 2 และ 3 ชั่วโมงจากการสัมผัสกับแบคทีเรียข้างต้น อัตราส่วนของตัวอย่างต่อแบคทีเรียในของเหลว (ประมาณ  $1 \times 10^7$  โคโลนีหน่วยต่อมิลลิเมตร) เป็น 1 มิลลิกรัม ต่อ 10 มิลลิลิตร โดยใช้วิธีนับเชื้อจากจานที่ใช้ทดสอบ ผลการทดสอบจะทำการบันทึกเมื่อตัวอย่างทดสอบได้รับการบ่มหรือควบคุมสภาวะที่ 37 องศาเซลเซียส ตามจำนวนเวลาติดต่อก่อนทำการศึกษา การทดสอบทั้งหมดถูกทำซ้ำ 3 ครั้ง โดยทำการรายงานผลจากค่าเฉลี่ย  $\pm$  ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน นอกจากนี้ วัสดุและตัวอย่างทั้งหมดจะถูกทำให้ปราศจากเชื้อ (sterilized) ในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อโรค (autoclave) ด้วยก่อนการทดลอง

### 3.4.5 อินดักทีฟลิคอปเปิลพลาสมา-ออปติคอลลิมิซชันสเปคโตรเมตรี

ใช้เป็นเครื่องมือหาปริมาณธาตุในตัวอย่างชนิดต่างๆ ใช้เครื่อง ICP-OES spectro arcos FHS12 ทำการย่อยสลายตัวอย่างโดย ซึ่งตัวอย่าง 0.1 g ลงใน vessel เติม HF 48% m/m 3ml และ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5 ml ทิ้งไว้ 5 นาที ปิดภาชนะ และย่อยตัวอย่างในเตาอบไมโครเวฟด้วยกำลังไฟ 600 วัตต์ 2 ชั่วโมง จากนั้นถ่ายสารละลายลงในขวดแก้ววัดปริมาตร 50 ml เติมน้ำให้ถึงขีดปริมาตร และถ้าสารละลายมีตะกอนต้องกรองผ่านกระดาษกรอง สามารถวิเคราะห์ชนิดของธาตุได้ถึง 81 ชนิดในการวัดตัวอย่างหนึ่งครั้ง โดยปริมาณของธาตุในตัวอย่าง ควรอยู่ในช่วงความเข้มข้นระดับ ส่วนในล้านส่วน และมีปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ไม่เกิน 0.2 เปอร์เซ็นต์ ตัวเครื่องจะประกอบด้วย ส่วนของอินดักทีฟลิคอปเปิลพลาสมา

ตัวอย่างที่ถูกเตรียมเป็นสารละลายจะถูกนำเข้าสู่ Sample Introduction Systems ด้วยแก๊สอาร์กอน โดยให้กระแสไฟฟ้าและเหนี่ยวนำด้วยคลื่นวิทยุเพื่อให้เกิดพลาสมา ที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 4,000-8,000 องศาเซลเซียส ที่จุดนี้ตัวอย่างจะแตกตัวเป็นอะตอมอิสระที่อยู่ในสภาวะกระตุ้น เมื่ออะตอมดังกล่าวกลับสู่สภาวะปกติจะมีการคายพลังงานออกมาในรูปแสงซึ่งจะตรวจวัดด้วย Charge Coupled Device (CCD) โดยปริมาณแสงหรือพลังงานที่คายออกมาจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณธาตุที่สนใจในตัวอย่าง

### 3.4.6 สมบัติด้านเชิงกล

#### 3.4.6.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

เป็นการทดสอบการทนต่อแรงยืด และความสามารถในการยืดของพลาสติกฟิล์ม โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 เรื่อง Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting [36] ซึ่งตัวอย่างก่อนการทดสอบจะต้องทำการเก็บรักษาสภาพในห้องควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ 23 +/- 2 องศาเซลเซียส และ ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50 +/- 10 เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นเวลาอย่างน้อย 40 ชั่วโมง ตัวอย่างฟิล์มที่ได้จากการเป่า จะถูกนำมาตัดให้มีขนาด 2.5 x 10 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบ เลือกใช้เครื่อง Universal tensile

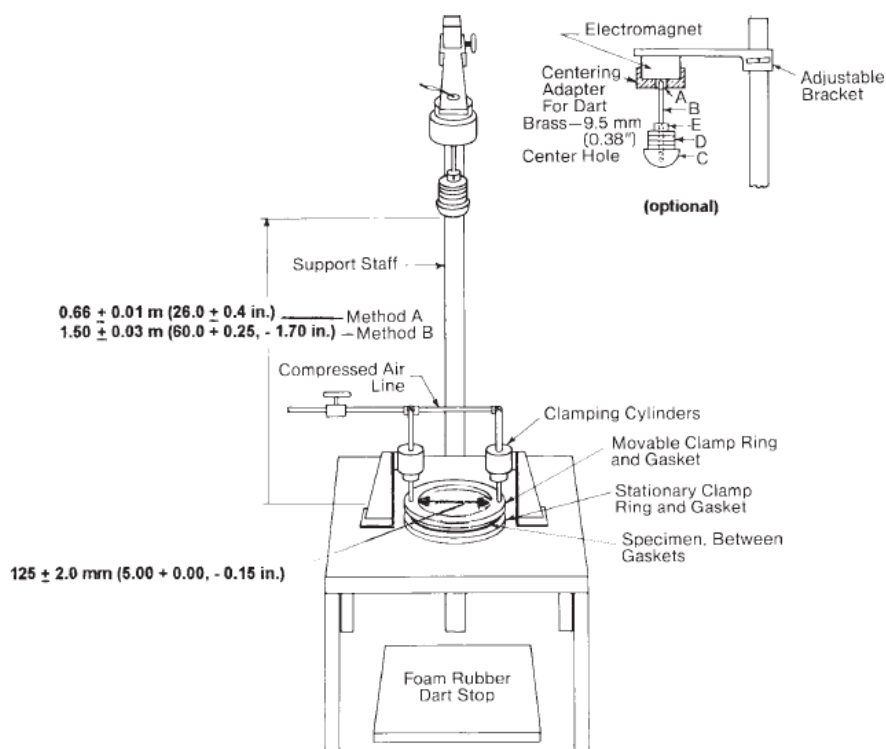
testing machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 4465 ตามรูปที่ 3.5 โดยทำการทดสอบ 5 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง โดยทำการทดสอบฟิล์มในแนวเดียวกับทิศการดึงฟิล์ม (MD) และทำการทดสอบฟิล์มในแนวตั้งฉากกับทิศการดึงฟิล์ม (TD) อย่างละ 5 ซ้ำ พิจารณาค่าที่ได้ จุดที่ขาด ทำการเฉลี่ย และรายงานผล



รูปที่ 3.5 เครื่อง Universal tensile testing machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 4465

#### 3.4.6.2 ความทนต่อแรงกระแทก (Dart impact strength)

เป็นการทดสอบหาความทนต่อแรงกระแทก โดยการโยนลูกน้ำหนักที่มีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมจากที่ระดับความสูงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1709 เรื่อง Impact Resistance of Plastic Film by the Free-Falling Dart Method [37] และทำการทดสอบตามวิธี A ฟิล์มจะถูกตัดให้มีขนาด 20 x 20 เซนติเมตร ซึ่งตัวอย่างก่อนการทดสอบจะต้องทำการเก็บรักษาสภาพในห้องควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ 23 +/- 2 องศาเซลเซียส และ ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50 +/- 10 เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นเวลาอย่างน้อย 40 ชั่วโมง วิธีการทดสอบโดยนำฟิล์มที่เตรียมไว้มาซึ่งให้ตั้งกับแบบของเครื่องทดสอบ ความทนต่อแรงกระแทก ตามรูปที่ 3.6 ทำการทดสอบจะพบว่า มีผลการแตกของแผ่นฟิล์มตัวอย่างครบ 10 ชิ้น โดยเริ่มต้นที่น้ำหนัก 30 กรัม แล้วเพิ่มขึ้นทีละ 5 หรือ 10 กรัม ตามความเหมาะสม คำนวณผลแล้วหาค่าเฉลี่ย ตามมาตรฐานการทดสอบนี้



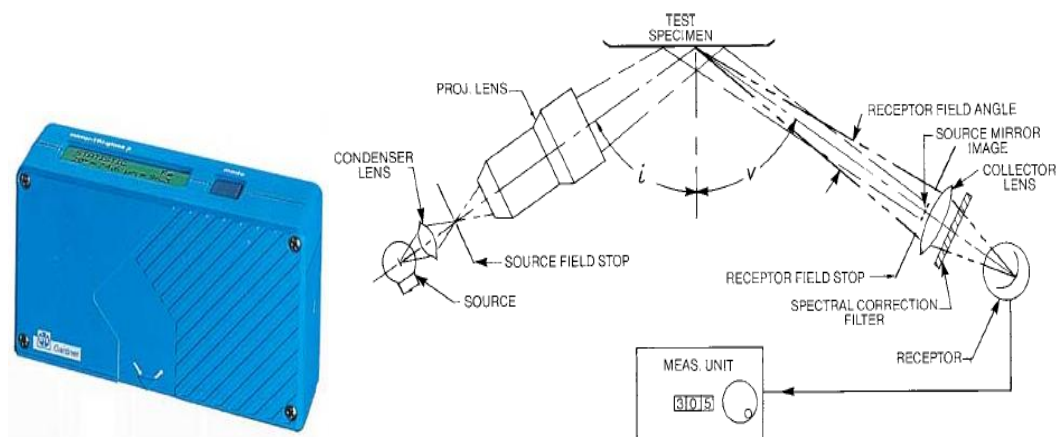
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงกระแทก (Dart Impact tester)

### 3.4.7 สมบัติด้านการมองเห็น

#### 3.4.7.1 ความมันเงา (Gloss)

เป็นการวัดสมบัติทาง optical ของตัวอย่าง โดยวัดความมันเงาของฟิล์ม โดยให้แสงผ่านตัวอย่างฟิล์มและมี refractometer เป็นตัววัดแสงที่สะท้อนจากฟิล์ม ในมุมที่เหมาะสม (ที่ 20 องศา) ที่สามารถวัดแสงสะท้อนได้มากที่สุด refractometer ที่วัดแสงสะท้อนของตัวอย่างนั้นได้มาก แสดงว่าตัวอย่างนั้นมี เปอร์เซ็นต์ ความมันเงา (Gloss) สูง วิธีการทดสอบนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2457 เรื่อง Standard Test Method for Specular Gloss of Plastic Films and Solid Plastics [38] การทดสอบเริ่มจากการเตรียมตัวอย่าง โดยฟิล์มจะถูกตัดให้มีขนาด 20x20 เซนติเมตร ซึ่งตัวอย่างก่อนการทดสอบจะต้องทำการเก็บรักษาสภาพในห้องควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ 23+/-2 องศาเซลเซียส และ ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50 +/- 10 เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นเวลาอย่างน้อย 40 ชั่วโมง นำฟิล์มที่เตรียมไว้ มาซึ่งให้ตั้งกับแบบของเครื่องทดสอบ Gloss meter ยี่ห้อ BYK

Gardner รุ่น 4434 ดังรูปที่ 3.7 ทำการทดสอบตัวอย่างละ 5 ซ้ำ พิจารณาค่าแล้วเฉลี่ย เพื่อรายงานผล



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความมันเงา (Gloss meter)

#### 3.4.7.2 ความขุ่น (Haze)

เป็นการวัดสมบัติของฟิล์มทางด้าน optical โดยการวัดการเบี่ยงเบนของแสงโดยให้ลำแสงผ่านตัวอย่าง และวัดการเบี่ยงเบนของแสง ที่เบี่ยงเบนไปจากแนวปกติของลำแสง ซึ่งลำแสงที่เบี่ยงเบนไปนี้ จะมี detector วัดออกมาเป็นค่า เปอร์เซ็นต์ ความขุ่น (Haze) หรือความขุ่นมากจะทำให้แสงเบี่ยงเบนไปมากการเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดสอบนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D1003 เรื่อง Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics [39] ฟิล์มจะถูกตัดให้มีขนาด 9 x 9 เซนติเมตร ซึ่งตัวอย่างก่อนการทดสอบจะต้องทำการเก็บรักษาสภาพในห้องควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ 23+/-2 องศาเซลเซียส และ ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50 +/- 10 เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นเวลาอย่างน้อย 40 ชั่วโมง นำฟิล์มที่เตรียมไว้ มาซึ่งให้ตั้งกับแบบของเครื่องทดสอบ Haze meter ยี่ห้อ BYK Gardner รุ่น haze-gard plus ดังรูปที่ 3.8 ทำการทดสอบตัวอย่างละ 5 ซ้ำ พิจารณาค่าแล้วเฉลี่ย เพื่อรายงานผล





รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความขุ่น (Haze meter)

### 3.4.8 สมบัติด้านความร้อน

#### 3.4.8.1 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี

การตรวจสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของ Heat Flow ของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน เทียบกับตัวอย่างอ้างอิง โดยมีช่วงอุณหภูมิของการทดสอบตั้งแต่ 25 - 200 องศาเซลเซียส โดยการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และทางเคมีของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดหรือคายความร้อน (endothermic or exothermic processes) หรือ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อน (heat capacity changes)

การทดสอบ จะใช้เครื่อง ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ยี่ห้อ METTLER TOLEDO, รุ่น DSC1, SWITZERLAND ดังรูปที่ 3.9 โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

ก) ให้ความร้อนในขั้นตอนแรก (1<sup>st</sup> heating) จากระดับอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นจนถึง 200 องศาเซลเซียส และคงระดับอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 3 นาที เพื่อทำการสลายพฤติกรรมจากกระบวนการขึ้นรูป (History behavior)

ข) ลดอุณหภูมิ (Cooling) จาก 200 องศาเซลเซียส ลงมาจนถึง 25 องศาเซลเซียส และคงระดับอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ตัวอย่างปรับสภาวะ

ค) ให้ความร้อนครั้งที่สอง ( $2^{\text{nd}}$  heating) จากระดับอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นจนถึง 200 องศาเซลเซียส

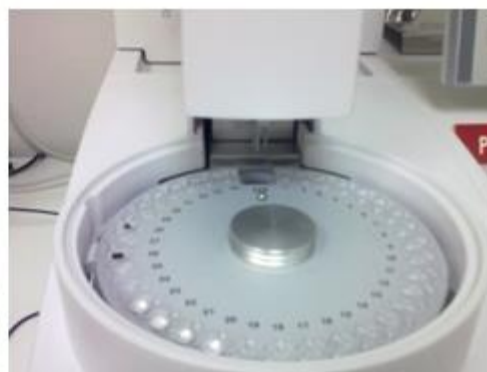
หมายเหตุ ทุกขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และทั้งหมดปฏิบัติภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการถ่ายเทเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที

การศึกษาค่าของอุณหภูมิ  $T_c$  กระทำโดยการศึกษาพีคของการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic peak) ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิเพื่อให้ตัวอย่างเกิดการสลายผลึกและเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง

ในขณะที่การศึกษาอุณหภูมิ  $T_m$  ทำโดยการศึกษาเทอร์โมแกรมของการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เกิดจากเปลี่ยนแปลงพลังงานแบบดูดความร้อน (Endothermic peak) ในขั้นตอนการให้ความร้อน  $2^{\text{nd}}$  heating เพื่อให้โครงสร้างผลึกของตัวอย่างเกิดการหลอมตัวและเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ดังรูปที่ 3.10

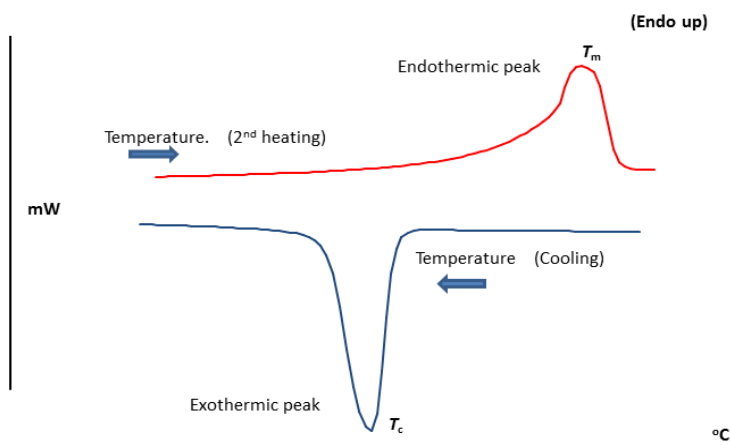


(ก)



(ข)

รูปที่ 3.9 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)



รูปที่ 3.10 เทอร์โมแกรมแสดงค่าอุณหภูมิการหลอม ( $T_m$ ) และอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) จากเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

### 3.4.8.2 เทอร์โมกราวิเมตรี

เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุตัวอย่างเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM E1131-08 Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry [40] วิธีนี้เหมาะสำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาพที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซ หรือระเหยของน้ำ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟส หรือ การแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) วิธีนี้สามารถวิเคราะห์ได้ ทั้งในสุญญากาศ และบรรยากาศต่างๆ เช่น ออกซิเจน หรือไนโตรเจน เป็นต้น การทำงานของเครื่องมือนี้ คือ เครื่องมือนี้จะมีตาชั่งที่มีความละเอียดมากๆ และมีความไว ต่อการเปลี่ยนแปลงสูง (สามารถอ่านค่าถึง 1 ไมโครกรัม) เมื่อใส่สารลงไปจะมีการบันทึกค่า และเมื่อให้ความร้อน เครื่องจะบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง และผู้ใช้ก็สามารถอ่านค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้น จากกราฟที่ได้การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ เป็นกลุ่มเทคนิคที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุต่าง ๆ เช่น พอลิเมอร์ สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ เซรามิก โลหะ และวัสดุทั่วไปอื่น ๆ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติ ทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา ผลการวิเคราะห์จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติทางความร้อน เสถียรภาพต่อความร้อน เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และลักษณะการผ่านกระบวนการทางความร้อน

ของวัสดุ โดยทาการศึกษาหน้าหน้าที่หายไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความร้อนที่วัสดุดูดหรือคาย เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลา และการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุ ขึ้นงานภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลา

#### 3.4.9 การซึมผ่านของก๊าซ

การทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$  Transmission,  $\text{CO}_2\text{TR}$ ) ด้วยเครื่อง PERMATRAN-C, model 4/41 Module MCT ตามมาตรฐาน ASTM, F2476-13 Standard Test Method for the Determination of Carbon Dioxide Gas Transmission Rate ( $\text{CO}_2\text{TR}$ ) Through Barrier Materials Using An Infrared Detector และทดสอบค่าอัตรา การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ( $\text{O}_2$  Transmission,  $\text{O}_2\text{TR}$ ) ด้วยเครื่อง OX-TRAN, model 4/41 Module MT ตามมาตรฐาน ASTM, D3985-05 (2010)e1 เรื่อง Standard Test Method for Oxygen Gas Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric Sensor โดยจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ลักษณะโดยทั่วไปของตัวเครื่องจะแยกเป็น 2 ห้อง (chamber) คือชั้นบนและชั้นล่าง ห้องชั้นบนจะเป็นชั้นอากาศปกติซึ่งจะสามารถรู้ถึงปริมาณความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ในขณะที่ ห้องชั้นล่างจะเป็นชั้นบรรยากาศซึ่งปราศจากก๊าซออกซิเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ทำการทดสอบ [41, 42]

เครื่องมือ solid-state oxide ceramic เซ็นเซอร์ จะตรวจวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนกับตัวอย่างที่ยึดติดอยู่กับห้อง โดยในการวัดการซึมผ่านการ์ดตัวอย่างของออกซิเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำการทดสอบนั้นจะพิจารณาจากความแตกต่างระหว่างการวัดความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนบนฟิล์มพลาสติกและฟอยล์ผ่านห้อง โดยทั่วไปจะวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพลาสติก ในหน่วยมิลลิลิตรต่อตารางเมตรต่อ 24 ชั่วโมง

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และการวิจารณ์ผล

#### 4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ

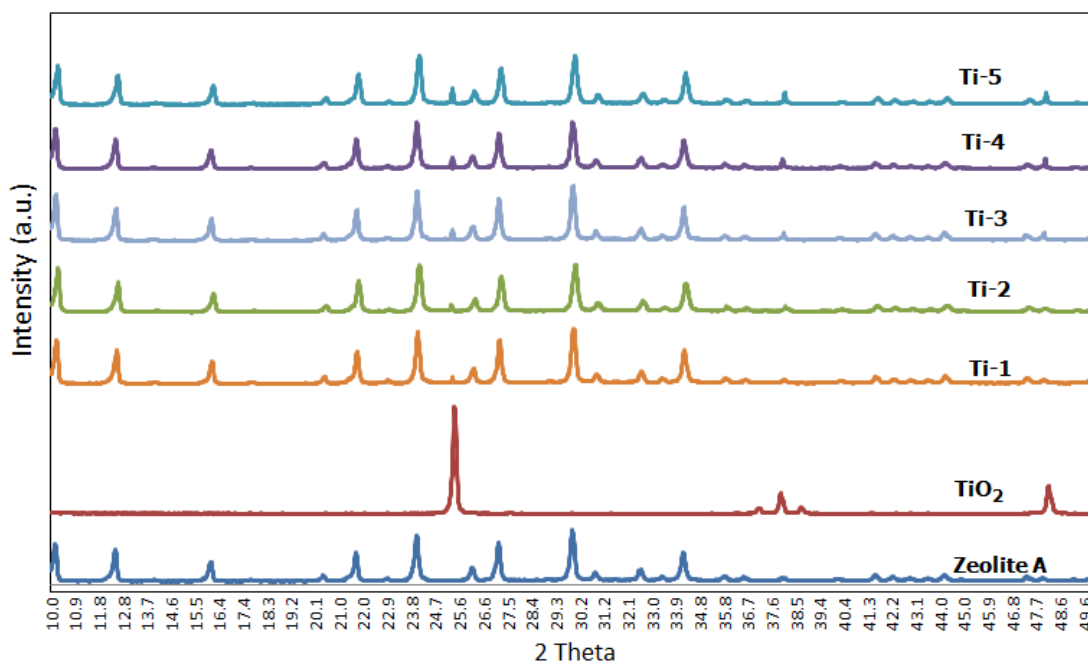
##### 4.1.1 เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

จากการเตรียมสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ โดยการเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนซีโอไลต์เอ ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวอย่าง Ti-1, Ti-2, Ti-3, Ti-4 และ Ti-5 ซึ่งมีการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในซีโอไลต์เอในปริมาณ 250 500 1000 2000 และ 5000 ส่วนในล้านส่วน

จากผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ ได้ผลดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่า

- (ก) สารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ตั้งแต่ 250 ถึง 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สารประกอบทุกตัว) ให้สัญญาณที่ตำแหน่งเดียวกันกับสัญญาณของซีโอไลต์เอ นั่นคือผลของการเติมของไทเทเนียมไดออกไซด์ในทุกความเข้มข้นของสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ ไม่มีผลกับโครงสร้างของการใช้ซีโอไลต์เอ
- (ข) โดยปกติไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอะนาเทส จะแสดงสัญญาณที่ตำแหน่ง  $2\theta = 25.3, 37.4$  และ  $48.2$  [9] ซึ่งหมายถึงการมีรูปแบบระนาบของผลึกดังนี้ (101) (004) และ (200) ตามลำดับ [43] จากดิฟแฟรกโตแกรม สารประกอบทุกความเข้มข้นพบสัญญาณที่  $2\theta = 25.3, 37.4$  และ  $48.2$  เช่นกัน ซึ่งชัดเจนที่สุดในตัวอย่าง Ti-5 ซึ่งมีความเข้มข้นของไทเทเนียมออกไซด์สูงที่สุด
- (ค) ความเข้มของสเปกตรัมของอะนาเทส มีความเข้มมากขึ้น สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ

จากผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ พบว่าสารประกอบยังคงเป็นโครงสร้างของซีโอไลต์เอ และมีไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในสารประกอบ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่มีผลต่อโครงสร้างของซีโอไลต์เอ



รูปที่ 4.1 ดิฟแฟรกโตแกรมของซีโอไลต์เอไทเทเนียมไดออกไซด์ และ สารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอที่ความเข้มข้นต่างๆ

#### 4.1.2 ดิฟฟิวส์รีเฟลกแทนซ์อัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรเมตรี

สำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค ดิฟฟิวส์รีเฟลกแทนซ์อัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล ของสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ โดยวิธีการเคลือบผิวนั้น เมื่อพิจารณา สเปกโตรแกรมพบสัญญาณที่บริเวณ 220 นาโนเมตร แสดงถึงไทเทเนียมที่ถูกแยกเดี่ยว (isolated titanium) และมีโครงสร้างแบบทระฮีดรอล สัญญาณที่บริเวณ 250-280 นาโนเมตร จะแสดงถึงไทเทเนียมชนิดที่เป็นออกตระฮีดรอลบนโครงสร้างซีโอไลต์เอ ขณะที่ตำแหน่งสัญญาณที่มากกว่า 280 นาโนเมตร แสดงถึงลักษณะของไทเทเนียมชนิดอะนาเทส [9] ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคดิฟฟิวส์รีเฟลกแทนซ์อัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล ตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า

(ก) ที่ตำแหน่ง 220 นาโนเมตร พบว่าสัญญาณของตัวอย่าง Ti-1 ซึ่งมีความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์น้อยที่สุด (250 ส่วนในล้านส่วน) มีความเข้มของสัญญาณสูงสุด ในขณะที่ Ti-5 ซึ่งมีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์สูงสุด (5,000 ส่วนในล้านส่วน) มีระดับสัญญาณสัญญาณน้อยกว่า ส่วน Ti-4, Ti-3 และ Ti-2 จะมีความเข้มของสัญญาณใกล้เคียงกัน นั่นหมายถึง

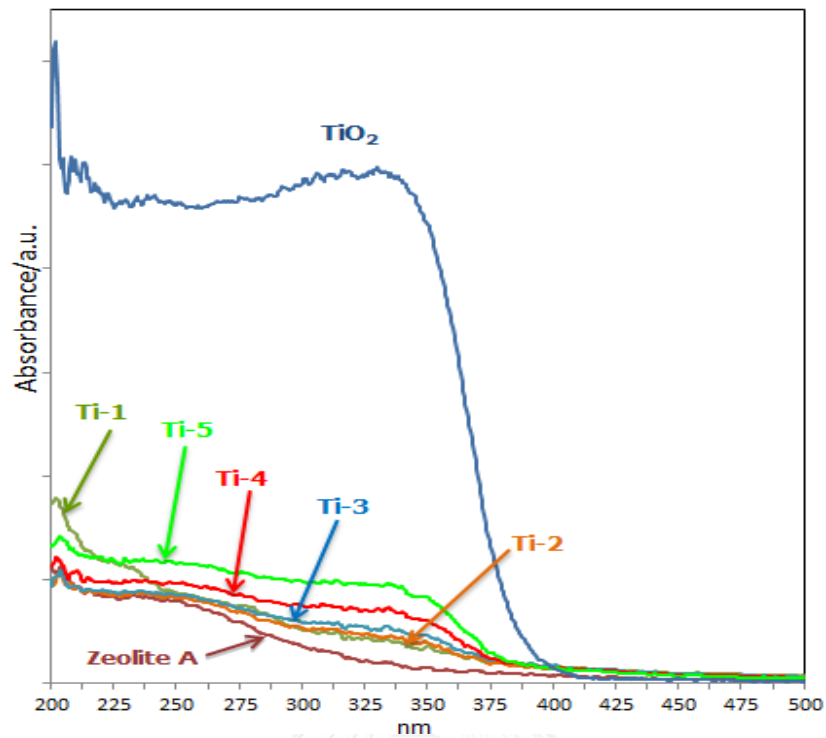
ตัวอย่าง Ti-1 อนุภาคไทเทเนียมส่วนใหญ่จะเป็นไทเทเนียมที่ถูกแยกเดี่ยว โดยมีโครงสร้างแบบทอระฮีดรอล ส่วน Ti-5, Ti-4, Ti-3 และ Ti-1 นั้นมีปริมาณที่น้อยกว่า(ตามลำดับ)

(ข) ที่ตำแหน่ง 250-280 นาโนเมตร พบสัญญาณของตัวอย่างทั้งหมด โดยระดับความเข้มของสัญญาณสอดคล้องกับปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติม แต่ความเข้มของสัญญาณน้อยกว่าที่ 220 นาโนเมตร แสดงว่าสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เเทกตัวมีบางส่วนที่เป็นไทเทเนียมที่ไม่ใช่ชนิดทอระฮีดรอลซึ่งเป็นไทเทเนียมที่ถูกแยกเดี่ยว

(ค) ที่ตำแหน่ง 350 นาโนเมตร พบสัญญาณของ Ti-1, Ti-2, Ti-3, Ti-4, Ti-5 จะมากขึ้นตามลำดับสอดคล้องกับปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงไป แสดงว่าสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์ทุกตัวมีอนุภาคไทเทเนียมบางส่วนที่เป็นอะนาเทส

เนื่องจากปริมาณของไทเทเนียมที่เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะความเป็นอะนาเทส จะส่งผลถึงประสิทธิภาพการต้านแบคทีเรียที่ดีขึ้น หากพิจารณาจากสเปคโตรแกรม พบว่าที่ตำแหน่ง 280 นาโนเมตร ไปจนถึงประมาณ 350 นาโนเมตร พบสัญญาณสูงสุดที่ตัวอย่าง Ti-5 รองลงมาเป็น Ti-4 และสุดท้ายเป็นสัญญาณของ Ti-3, Ti-2, Ti-1 ที่มีระดับสัญญาณใกล้เคียงกัน

ดังนั้นจึงเลือกตัวอย่าง Ti-4, Ti-5 และเลือกตัวอย่างซึ่งเป็นตัวแทนจากกลุ่มของตัวอย่าง Ti-3, Ti-2, Ti-1 โดยใช้ตัวอย่าง Ti-2 ซึ่งมีระดับความสูงของสัญญาณอยู่ระหว่าง Ti-1 และ Ti-3) ไปทดสอบการต้านแบคทีเรีย

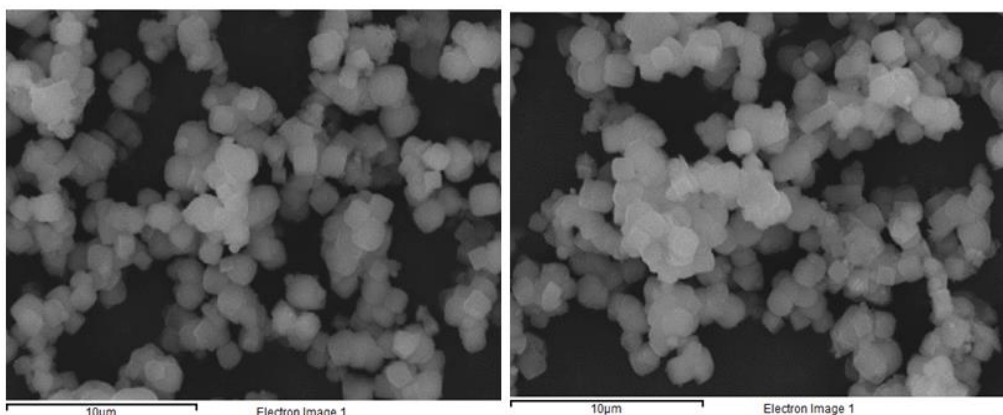


รูปที่ 4.2 ดิฟฟิวสิวีฟลักแทนซ์อัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปคโตรแกรม ของซีโอไลต์เอ โทเทเนียมไดออกไซด์ สารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ (Ti-1, Ti-2, Ti-3, Ti-4 และ Ti-5)

#### 4.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ศึกษาลักษณะรูปร่างของผลึกอนุภาคของสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ โดยมุ่งศึกษาเฉพาะสารที่มีไทเทเนียมสูงสุดสองอัตราส่วนคือ Ti-4 และ Ti-5 เนื่องจากมีโอกาสให้สมบัติการต้านแบคทีเรียสูงสุด ซึ่งจากรูปที่ 4.3 พบว่าทั้งสองอัตราส่วน มีรูปร่างและขนาดของอนุภาคเป็นทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ไม่ต่างกัน โดย Ti-4 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.915 ไมโครเมตร ส่วนโดย Ti-5 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.905 ไมโครเมตร





- (ก) สารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไซด์เอที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ 2,000 ส่วนในล้านส่วนในซีโอไซด์เอ (Ti-4)      (ข) สารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไซด์เอที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ 5,000 ส่วนในล้านส่วนในซีโอไซด์เอ (Ti-5)

**รูปที่ 4.3** ภาพถ่าย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5000 เท่าของสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไซด์เอ (ก) , (ข)

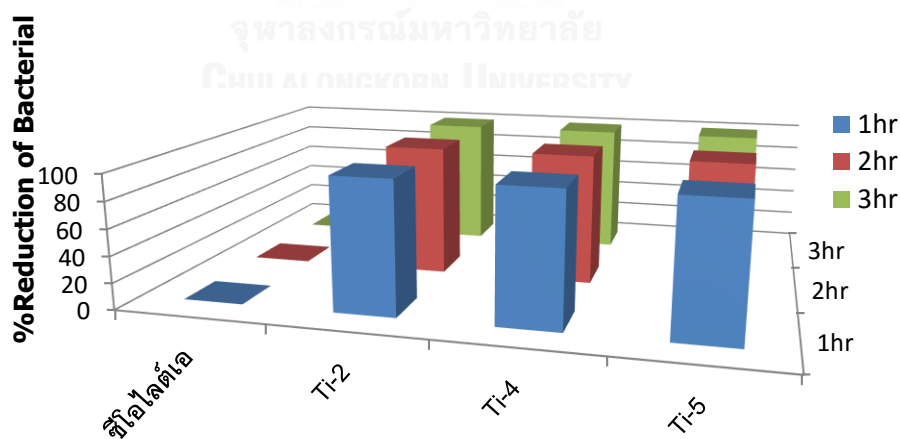
#### 4.1.4 การต้านแบคทีเรีย

ประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียของสารประกอบไทเทเนียมซีโอไซด์เอ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 เมื่อเริ่มต้นให้แบคทีเรียกับตัวอย่างทดสอบจนกระทั่งครบ 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิการทดสอบ 37 องศาเซลเซียส พบการอยู่รอดของแบคทีเรียตามการรายงานพบว่า การลดลงของแบคทีเรีย ซึ่งถูกคำนวณ โดยการใช้ความแตกต่างระหว่างเริ่มต้นการเพาะเชื้อและจำนวนแบคทีเรียที่รอดชีวิตหลังจากการนับจากงานทดสอบ [6] ภาพในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 แสดงงานทดสอบเมื่อเวลาหลังการทดสอบแล้ว 3 ชั่วโมง จะพบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียในงานทดสอบตัวอย่างของสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไซด์เอทุกตัว ให้ผลทดสอบการฆ่าเชื้อ *เอสเคอริเคีย โคไล* เป็น 99.99 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่กับการทดสอบกับเชื้อ *สแตฟีโลค็อกคัส ออเรียส* ให้ผลการลดลงของเชื้อ ที่สูงสุด 51.21 เปอร์เซ็นต์ จากผลของ Ti-5 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก (*สแตฟีโลค็อกคัส ออเรียส*) จะหนากว่าแบคทีเรียแกรมลบ (*เอสเคอริเคีย โคไล*) อันเนื่องมาจากชั้นผนังเซลล์ชื่อเพปติโดไกลแคน (peptidoglycan) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ ของ N-acetyl glucosamine ที่เป็นองค์ประกอบของไคติน (chitin) ซึ่งช่วยห่อหุ้มเซลล์ให้แข็งแรง รักษาความดันภายในเซลล์และป้องกันแรงกลจากภายนอก โดยทั่วไปของแบคทีเรียแกรม

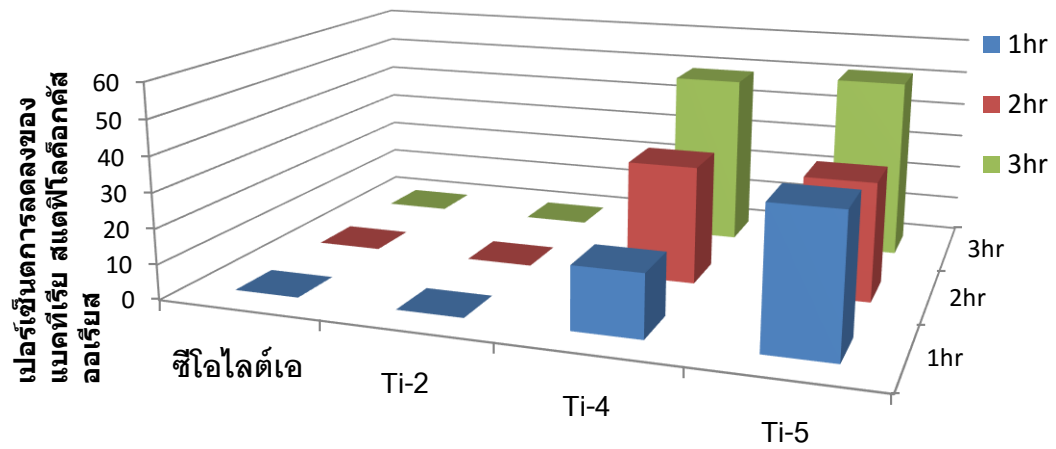
บวกรมีความหนาแน่นมากกว่าแบคทีเรียแกรมลบมาก จึงทำให้แบคทีเรียแกรมบวกทนต่อสภาพภายนอกได้ดีกว่า จากปริมาณของไทเทเนียมในสารประกอบที่มากพอกับการต้านเชื้อนี้ จึงทำให้เชื้อ เอสเคอริเคีย โคไล ลดลงถึง 99.99 เปอร์เซ็นต์ตั้งแต่ชั่วโมงแรกของการทดสอบ ในขณะที่เชื้อ สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส ค่อยๆลดลงจาก 17.74 ถึง 51.21 เปอร์เซ็นต์ [6, 44]

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย

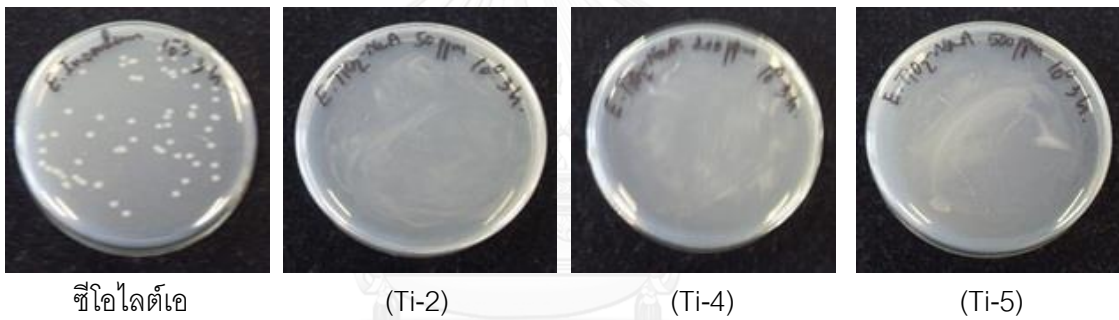
สาร	เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย					
	ที่เวลา 1 ชั่วโมง		ที่เวลา 2 ชั่วโมง		ที่เวลา 3 ชั่วโมง	
	สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส	เอสเคอริเคีย โคไล	สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส	เอสเคอริเคีย โคไล	สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส	เอสเคอริเคีย โคไล
ซีโอดีเอ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti-2	0.00	99.99	0.00	99.99	0.00	99.99
Ti-4	17.74	99.99	33.33	99.99	48.78	99.99
Ti-5	38.70	99.99	33.33	99.99	51.21	99.99



รูปที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย เอสเคอริเคีย โคไล จากการทดสอบการต้านเชื้อ ที่เวลา 1 - 3 ชั่วโมงของการสัมผัส

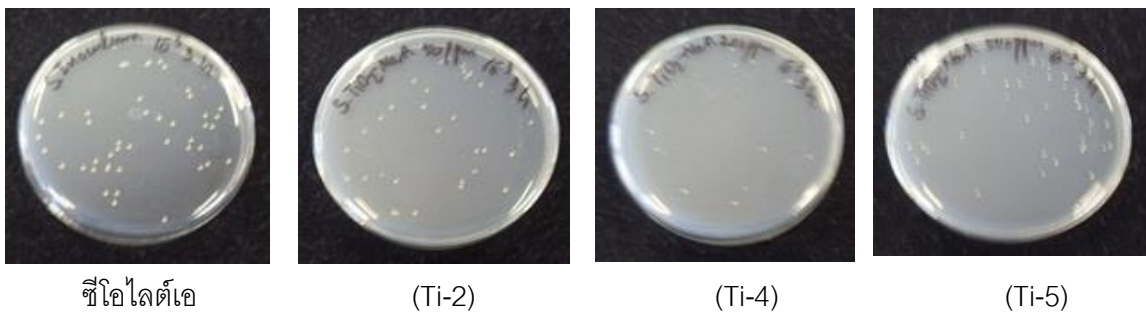


รูปที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส จากการทดสอบการต้านเชื้อ ที่เวลา 1 - 3 ชั่วโมงของการสัมผัส



ซีไอไลต์เอ (Ti-2) (Ti-4) (Ti-5)

รูปที่ 4.6 จำนวนแบคทีเรียบนตัวอย่างทดสอบ “ที่เวลา 3 ชั่วโมงของการสัมผัส” โดยการอบจานทดสอบเชื้อ เอสเคอริเคีย โคไล ที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ซีไอไลต์เอ (Ti-2) (Ti-4) (Ti-5)

รูปที่ 4.7 จำนวนแบคทีเรียบนตัวอย่างทดสอบ “ที่เวลา 3 ชั่วโมงของการสัมผัส” โดยการอบจานทดสอบเชื้อ สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส ที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

#### 4.1.5 อินดักทีฟลีดคอปเปิลพลาสติก-ออปติคอลลิมิซชันสเปคโตรเมตรี

จากการศึกษาการต้านแบคทีเรีย ของ Ti-2, Ti-4 และ Ti-5 นำตัวอย่างเดียวกันนี้มาศึกษาหาปริมาณของไทเทเนียมที่มีอยู่ในสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.2 จากผลดังกล่าวจะเห็นว่าปริมาณของไทเทเนียมที่วิเคราะห์ให้ได้มีปริมาณมากกว่าไทเทเนียมที่ใช้เตรียมตามทฤษฎี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณโซเดียมมีผลต่อการวิเคราะห์ [46]

**ตารางที่ 4.2** ปริมาณของธาตุไทเทเนียมจากการทดสอบด้วยเทคนิคอินดักทีฟลีดคอปเปิลพลาสติก-ออปติคอลลิมิซชันสเปคโตรเมตรี

สารประกอบ	Ti-2	Ti-4	Ti-5
ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในซีโอไลต์เอ (ตามทฤษฎี) (ส่วนในล้านส่วน)	500	2,000	5,000
ปริมาณไทเทเนียมในซีโอไลต์เอ จากการเตรียม (ส่วนในล้านส่วน)	336	1,235	3,045
ปริมาณไทเทเนียมในซีโอไลต์เอ ผลวิเคราะห์จากเครื่องอินดักทีฟลีดคอปเปิล พลาสติก-อะตอมมิคอลลิมิซชันสเปคโตร มิเตอร์ (ส่วนในล้านส่วน)	529	1,495	3,499

#### 4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิพรพิลีนคอมโพสิต

จากข้อ 4.1 ซึ่งได้ตรวจสอบลักษณะของสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอของทุกๆความเข้มข้นแล้วพบว่า สารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอที่ความเข้มข้น 2,000 ส่วนในล้านส่วน ให้ค่าการต้านแบคทีเรียที่ดีที่สุด จึงเลือกไปผสมกับผงพอลิเมอร์ ชนิดพอลิพรพิลีน จากนั้นจึงนำมาผสม

กับสารเติมแต่งและสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอใน ตามสูตรการผสมต่างๆ จำนวน 5 สูตร ด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) ดังตารางที่ 3.1 จากนั้นจึงนำไปตัดเม็ด ซึ่งจะได้ เม็ดไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมพอสิตจำนวน 5 สูตรดังตารางที่ 4.3

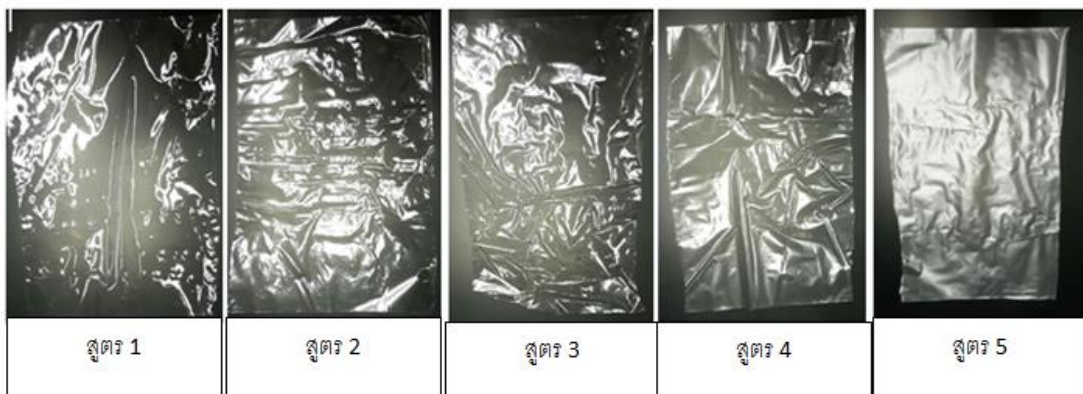
**ตารางที่ 4.3** อัตราส่วนการผสมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ กับ ผงพอลิโพรพิลีน

ส่วนผสม	อัตราส่วนการผสม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)				
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
ปริมาณของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ	0	1	3	5	10
สารเติมแต่ง calcium stearate	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antioxidant) ได้แก่ Phenolic acid	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antioxidant) ได้แก่ Blend A.O.	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
ผงพอลิโพรพิลีน	99.79	98.79	96.80	94.80	89.81

ลักษณะของเม็ดที่ได้ พบว่าเม็ดสูตรที่ 3, 4, 5 ซึ่งมีปริมาณของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอเพิ่มมากขึ้น จะมีสีขาวขุ่นมากขึ้นตามลำดับ โดยสูตรที่ 5 นั้นเม็ดจะสีออกเหลืองเล็กน้อย ส่วนลักษณะรูปร่างของเม็ดพบว่าไม่มีความแตกต่างกันดังรูปที่ 4.8 และเมื่อนำมาเป่าขึ้นรูปฟิล์มพบว่าในขณะเป่าขึ้นรูปของเม็ดสูตรที่ 1, 2 ไม่มีปัญหาใดๆ แต่เมื่อเป่าฟิล์มของเม็ดสูตรที่ 3, 4, 5 พบว่ามีปัญหาเรื่องการรั่วของลมที่ใช้เป่าฟิล์มขณะเป่า ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอซึ่งเป็นสารอินทรีย์ซึ่งไม่สามารถหลอมรวมกับเนื้อของพลาสติกพอลิโพรพิลีนได้ดีพอ เมื่อพิจารณาลักษณะของเนื้อฟิล์มพบว่า จะมีลักษณะขุ่นมากขึ้น ตามรูปที่ 4.9 ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลทดสอบด้านการมองเห็น



รูปที่ 4.8 ลักษณะของเม็ดสูตร 1 – สูตร 5

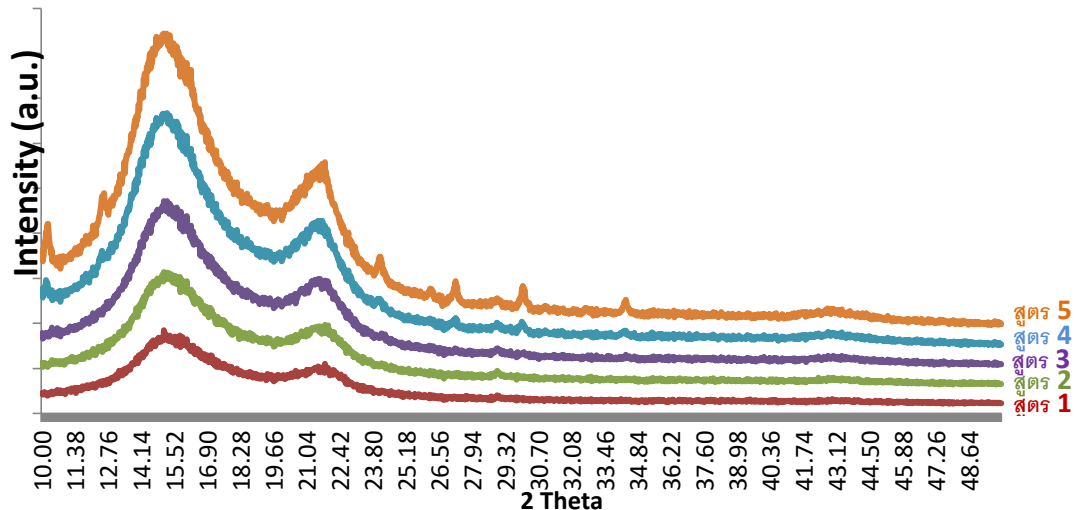


รูปที่ 4.9 ลักษณะของฟิล์มที่ได้จากการเป่าเม็ดสูตร 1 – สูตร 5

#### 4.2.1 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

จากผลการศึกษาสมบัติของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมพอสิตฟิล์ม ได้ผล ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งจะเห็นว่า ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการเติมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ ทุกตัว จะมีลักษณะ สัมบูรณ์คล้ายกับของฟิล์มพอลิเมอร์พอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์นั้นหมายถึง สมบัติของฟิล์ม โครงสร้าง ผลึกหรือการจัดเรียงตัวภายในพอลิเมอร์ยังเหมือนเดิม และจากผลยังพบว่าที่ปริมาณ 10

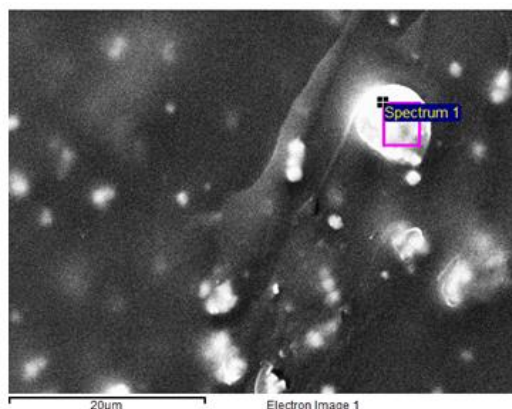
เปอร์เซ็นต์ของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ จะมีสัญญาณของฟีดซีโอไลต์เอให้เห็นชัดยิ่งขึ้น เมื่อเทียบกับ ลักษณะสัญญาณของซีโอไลต์เอในรูปที่ 4.10 โดยปริมาณความเข้มของสัญญาณสอดคล้องกับ ปริมาณของซีโอไลต์เอที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.10 เอกซเรย์ดิฟแฟรกโตแกรม ของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมพอสิตฟิล์มที่ ปริมาณของฟิล์มพอลิโพรพิลีน (PP pure) และฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่เติมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ 1, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

#### 4.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากภาพถ่ายพบมีการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอในฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ



กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต ที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ ไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ

#### 4.2.3 การต้านแบคทีเรีย

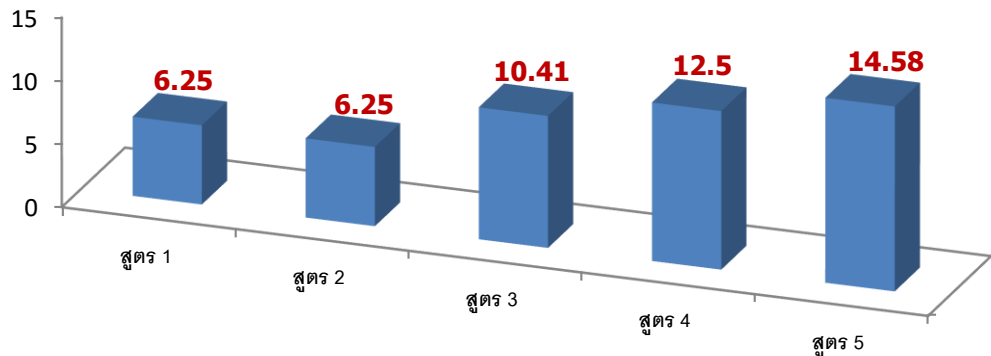
นำตัวอย่างฟิล์มทั้ง 5 สูตรทดสอบประสิทธิภาพการต้านแบคทีเรีย ตามมาตรฐาน ASTM 2149 ซึ่งจากผลในตารางที่ 4.4 จะพบว่า ฤทธิ์การต้านเชื้อแบคทีเรียของทั้งสองเชื้อไม่สูงมากแต่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของไทเทเนียมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของไทเทเนียมในเนื้อฟิล์มถูกผสมเพียงส่วนหนึ่งตามจำนวนอัตราส่วนที่ผสม เช่น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงทำให้ไทเทเนียมในสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอที่ผสมในพอลิเมอร์ถูกเจือจางเพิ่มขึ้น จึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพการต้านแบคทีเรียลดลงตามอัตราส่วนของไทเทเนียมที่ลดปริมาณลง เนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบ (*เอสเคอริเคีย โคไล*) จะสามารถอยู่ได้ในสภาพที่ขาดอาหารได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมบวก (*สแตฟฟีโลคอกคัส ออเรียส*) จากปริมาณของไทเทเนียมที่มีน้อย จึงทำให้มีเชื้อที่มีชีวิตรอดเหลือจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นซึ่งปริมาณสารอาหารลดน้อยลงและอาจไม่พอเพียง เช่นที่ 3 ชั่วโมง จึงทำให้แบคทีเรียแกรมบวก (*สแตฟฟีโลคอกคัส ออเรียส*) ขาดสารอาหารและตายลง 23.52 เปอร์เซ็นต์มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ (*เอสเคอริเคีย โคไล*) 14.58 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าปริมาณไทเทเนียมที่เติมแม้จะเป็นเพียงส่วนหนึ่งหรือถูกเจือจางลงเมื่อผสมกับผงพอลิโพรพิลีน แต่เมื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิโพรพิลีนแล้วยังสามารถต้านการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้ในทั้งสองแกรม ซึ่งหากต้องการประสิทธิภาพที่สูงขึ้นมีความเป็นไปได้ โดยการเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมในการผสมหรือในเนื้อฟิล์มให้มากขึ้น

ตารางที่ 4.4 ผลการต้านแบคทีเรีย ที่เวลา 3 ชั่วโมงของการสัมผัส

ชนิดของเชื้อแบคทีเรีย	เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียที่ 3 ชั่วโมงของการสัมผัส				
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
<i>เอสเคอริเคีย โคไล</i>	6.25	6.25	10.41	12.50	14.58
<i>สแตฟฟีโลคอกคัส ออเรียส</i>	5.88	11.76	14.70	20.58	23.52

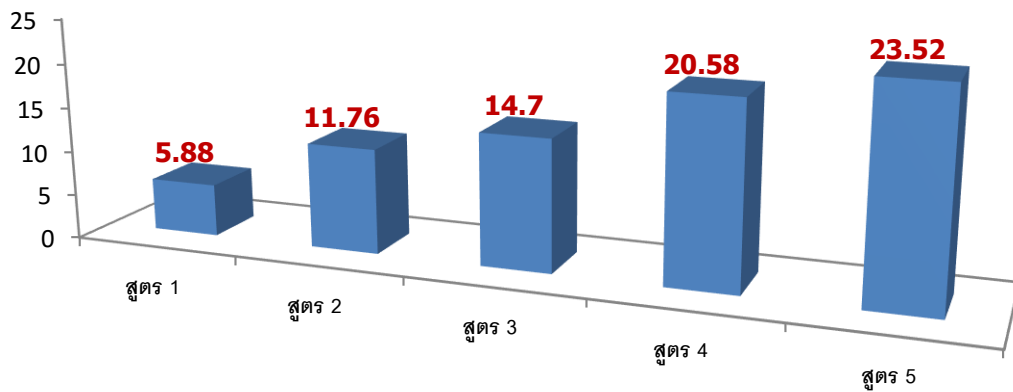


เปอร์เซ็นต์การลดลงของ เอสเคอริเคีย โคไล



รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ เอสเคอริเคีย โคไล ที่ 3 ชั่วโมงของการสัมผัส

เปอร์เซ็นต์การลดลงของ เอสเคอริเคีย โคไล



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ สแตฟฟีโลคอคคัส ออเรียส ที่ 3 ชั่วโมงของการสัมผัส

#### 4.2.4 สมบัติเชิงกล

##### 4.2.4.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

นำตัวอย่างฟิล์มมาตัดตามแบบขนาดกว้าง 2.50 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และทำการเก็บไว้ที่ห้องควบคุมสภาวะมาตรฐาน อุณหภูมิ 23 +/- 2 องศาเซลเซียส และ ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50 +/- 10 เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นเวลาอย่างน้อย 40 ชั่วโมง ตามเวลาที่กำหนด แล้วทำการทดสอบ พบว่าได้ผลดังตารางที่ 4.5, 4.6

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความทนแรงดึง ในทิศทางนกับการดึงฟิล์ม

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบความทนแรงดึง					
	หน่วย	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
ความทนแรงดึงที่จุดเปลี่ยนรูป	MPa	20.0 ± 0.3	19.9 ± 0.5	19.3 ± 1.0	17.6 ± 0.6	15.5 ± 0.8
ความทนแรงดึงที่จุดขาด	MPa	41.8 ± 1.9	32.5 ± 6.2	31.8 ± 5.2	28.6 ± 4.5	28.3 ± 1.9
ความยืดที่จุดเปลี่ยนรูป	เปอร์เซ็นต์	15.0 ± 3.0	11.8 ± 3.1	13.1 ± 2.2	10.3 ± 2.8	13.9 ± 3.8
ความยืดที่จุดขาด	เปอร์เซ็นต์	674 ± 31	540 ± 85	557 ± 85	536 ± 95	539 ± 55

จากผลการทดสอบจะสรุปได้ดังนี้

(ก) ความสามารถทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอมากขึ้น โดยฟิล์มมีความทนแรงดึง ณ จุดเปลี่ยนรูปลดลงน้อยกว่า ณ จุดขาด โดยพิจารณาจากสูตรที่ 5 เทียบกับสูตรที่ 1 อันเนื่องมาจากการแทรกตัวของอนุภาคไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอในโครงสร้างของพอลิโพรพิลีน ที่ทำให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะกันของสารโซ่พอลิเมอร์ลดลงจึงทำให้ความเหนียว (toughness) ลดลงด้วย [6]

(ข) แต่เมื่อพิจารณาผลของความสามารถในการดึงยึดทั้งสองแบบ จะเห็นว่า เมื่อเทียบกับปริมาณการเพิ่มขึ้นของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอตั้งแต่สูตรที่ 2 ถึง สูงสุดที่สูตร 5 พบว่าการเปลี่ยนแปลงไม่มีแนวโน้มชัดเจนนัก แต่การเปลี่ยนไปของค่า เมื่อเทียบกับสูตร 1 แล้ว พบว่าค่ามีแนวโน้มลดลง โดยเป็นผลจากเหตุผลเดียวกันกับความทนต่อแรงดึง [6]

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความทนแรงดึง ในทิศตั้งฉากกับการดึงฟิล์ม

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบความทนแรงดึง					
	หน่วย	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
ความทนแรงดึงที่จุดเปลี่ยนรูป	MPa	19.3 ± 0.3	19.6 ± 1.2	17.6 ± 0.6	15.9 ± 1.0	13.9 ± 0.5
ความทนแรงดึงที่จุดขาด	MPa	26.9 ± 1.2	16.6 ± 1.0	14.0 ± 0.5	13.9 ± 0.6	11.6 ± 0.2
ความยืดที่จุดเปลี่ยนรูป	เปอร์เซ็นต์	18.5 ± 0.5	9.9 ± 4.6	9.2 ± 3.6	12.7 ± 3.6	7.8 ± 2.3
ความยืดที่จุดขาด	เปอร์เซ็นต์	630 ± 9	29.9 ± 18	26.5 ± 16.4	26.2 ± 7.4	26.4 ± 8.4

จากผลการทดสอบจะสรุปได้ดังนี้

(ก) ผลทดสอบความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น โดยสูตร 5 ให้ค่าที่ลดลงสูงสุดถึง 50 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับสูตร 1

(ข) ความสามารถในการดัดพบว่า มีแนวโน้มลดลงมาอย่างชัดเจนโดยเฉพาะค่าที่จุดขาด ซึ่งพบว่า การเติมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ มีผลทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างฟิล์มในทิศตั้งฉากกับการดัดฟิล์ม สูญเสียไปเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์

ค่าที่ลดลงของทั้งสองกรณีนี้ เกิดจากความเหนียวของฟิล์มที่ลดลงอันเนื่องจากการแทรกตัวของอนุภาคไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ เช่นเดียวกับกรณีของการทดสอบในทิศขนานกับการดัดฟิล์ม

#### 4.2.4.2 ความทนต่อแรงกระแทก (Dart impact strength)

นำตัวอย่างฟิล์มมาตัดตามแบบ และทำการเก็บไว้ที่ห้องควบคุมสภาวะมาตรฐาน ตามเวลาที่กำหนด แล้วทำการทดสอบ พบว่าได้ผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก					
	หน่วย	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
ความทนต่อแรงกระแทก	กรัม	56.2	<30	<30	<30	<30

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อมีการเติมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ ลงไปในพอลิโพรพิลีน จะทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลความทนแรงดึง (Toughness) ซึ่งเป็นผลจากการแทรกตัวของอนุภาคไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ จึงทำให้ความเหนียว (toughness) ของฟิล์มลดลง [6]

#### 4.2.5 สมบัติด้านการมองเห็น

นำตัวอย่างฟิล์มมาตัดตามแบบ และทำการเก็บไว้ที่ห้องควบคุมสภาวะมาตรฐาน ตามเวลาที่กำหนด แล้วทำการทดสอบ พบว่าได้ผลดังตารางที่ 4.8

**ตารางที่ 4.8** ผลการทดสอบสมบัติด้านการมองเห็น

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบสมบัติด้านการมองเห็น					
	หน่วย	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
ความขุ่น	เปอร์เซ็นต์	0.9	2.7	3.3	18.4	54.4
ความมันเงา	เปอร์เซ็นต์	143	110.8	98	27.8	7.9

#### 4.2.5.1 ความขุ่น (Haze)

จากผลในตารางที่ 4.8 จะพบว่าความขุ่นของฟิล์มจะเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะสูตรที่ 5 ซึ่งผลชี้ให้เห็นว่า สามารถให้แสงผ่านได้เพียง 50 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่สูตรที่ 2 และ 3 ยังมีความใสของฟิล์มค่อนข้างมาก

#### 4.2.5.2 ความมันเงา (Gloss)

จากผลในตารางที่ 4.8 พบว่าความมันเงาของฟิล์มจะลดลงอย่างมากที่สูตร 4 และสูตร 5 ซึ่งทำให้ฟิล์มมีลักษณะด้าน ไม่มันเงาซึ่งสอดคล้องกับค่าความขุ่นของฟิล์ม แต่ในขณะที่ สูตร 2 และ 3 ยังมีความมันเงาสูง

ความขุ่นและความมันเงาที่เปลี่ยนแปลงไปนี้เกิดจากผลของการแทรกตัวของอนุภาคไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ ที่ทำให้การจัดเรียงตัวของผลึกพอลิโพรพิลีนเปลี่ยนไป [6]

#### 4.2.6 สมบัติด้านความร้อน

##### 4.2.6.1 ดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี

นำตัวอย่างฟิล์มทั้งหมดศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของการหลอมและการเกิดผลึกที่เป็นผลจากการให้ความร้อน พบว่าปริมาณของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอที่เติมลงไป แทบไม่มีผลทำให้อุณหภูมิการหลอม ( $T_m$ ) เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับสูตร 1 ซึ่งไม่มีการเติมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ [6] โดยต่างจากอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ที่มีแนวโน้มว่าการเกิดผลึกช้าลง ซึ่งเกิดจากการขัดขวางของอนินทรีย์สารที่เติมลงไปทำให้พฤติกรรมการเกิดผลึกเปลี่ยนไปโดยเกิดช้ากว่าปกติจึงทำให้ค่าอุณหภูมิการเกิดผลึกต่ำลง [6]

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบสมบัติด้านความร้อน

รายการทดสอบ	การทดสอบเปลี่ยนแปลงทางความร้อน					
	ครั้งที่	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
$T_m$ (องศาเซลเซียส)	1	164.1	163.1	163.1	162.9	163.4
	2	164.4	163.2	162.8	163.1	163.7
	เฉลี่ย	164.3	163.2	163.0	163.0	163.6
$T_c$ (องศาเซลเซียส)	1	121.0	115.9	116.3	116.5	118.4
	2	121.0	117.7	115.3	115.0	118.6
	เฉลี่ย	121.0	116.8	115.8	115.7	118.5

#### 4.2.6.2 เทอร์โมกราวิเมตรี

เมื่อนำตัวอย่างฟิล์มทั้ง 5 สูตรทำการทดสอบ เทอร์โมกราวิเมตริกเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่เกิดจากความร้อน โดยอุณหภูมิของตัวอย่างซึ่งอยู่ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จะถูกทำให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การสูญเสียน้ำหนักในช่วงแรกของการวิเคราะห์ หรือที่อุณหภูมิต่ำอาจเกิดจากการระเหยของน้ำหรือตัวทำละลาย แต่ที่อุณหภูมิสูงมักเกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงใช้ศึกษาปริมาณของสารที่สลายไปในพอลิเมอร์ซึ่งในที่นี้ได้แก่ ไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ และสารเติมแต่งได้แก่ calcium stearate และสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antioxidant) ได้แก่ Phenolic acid ซึ่งจากผลที่ได้ตารางที่ 4.10 พบว่าปริมาณของสารที่เหลือ (Residue) มีปริมาณสอดคล้องกับปริมาณของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอที่เติมลงไป

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบสมบัติด้านความร้อนเทอร์โมกราวิเมตริก

รายการทดสอบ	เทอร์โมกราวิเมตริก					
	หน่วย	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
ค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไป	เปอร์เซ็นต์	99.71	98.93	98.38	95.55	89.21
ค่าน้ำหนักที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์	0.28	1.07	1.66	4.47	8.97
ปริมาณของสารเติมแต่งที่เติม	เปอร์เซ็นต์	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
ปริมาณไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ	เปอร์เซ็นต์	0.0	1.0	3.0	5.0	10.0
รวมปริมาณสารอนินทรีย์ที่เติม	เปอร์เซ็นต์	0.2	1.2	3.2	5.2	10.2

หมายเหตุ จุดที่อ่านค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไปและที่เหลืออยู่ที่ 700 องศาเซลเซียส

#### 4.2.7 การซึมผ่านของก๊าซ

จากผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจนพบว่า อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณการเติมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอตั้งแต่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยสูงขึ้นจากฟิล์มสูตรที่ไม่ได้เติมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ ประมาณ 15-20 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนนั้นมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการเติมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์

รายการทดสอบ	การทดสอบการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์					
	ครั้งที่	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
ความหนาของฟิล์มทดสอบ (มิลลิเมตร)	1	0.0218	0.0218	0.0222	0.0250	0.0274
	2	0.0222	0.0236	0.0212	0.0290	0.0290
	เฉลี่ย	0.0220	0.0227	0.0217	0.0270	0.0282
อัตราการซึมผ่านของก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> TR) (cc/m <sup>2</sup> .day)	1	13,358.28	11,237.80	12,388.08	11,871.15	11,112.64
	2	12,876.89	13,007.09	12,877.22	12,140.56	10,952.00
	เฉลี่ย	13,117.6	12,122.4	12,632.7	12,005.9	11,032.3
PCO <sub>2</sub> (cc.mm/m <sup>2</sup> .day)	1	291.21	244.98	275.02	296.78	304.49
	2	285.87	306.97	273.00	352.08	317.61
	เฉลี่ย	288.5	276.0	274.0	324.4	311.1

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

รายการทดสอบ	การทดสอบคุณสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน					
	ครั้งที่	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
ความหนาของฟิล์มทดสอบ (มิลลิเมตร)	1	0.0232	0.024	0.0262	0.0282	0.033
	2	0.023	0.027	0.0254	0.028	0.031
	เฉลี่ย	0.0231	0.0255	0.0258	0.0281	0.0320
อัตราการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจน(OTR) (cc/m <sup>2</sup> .day)	1	3,386.07	3,295.63	31,56.17	3,103.34	2,938.64
	2	3,249.37	3,072.77	33,14.55	3,233.18	3,175.47
	เฉลี่ย	3,317.7	3,184.2	3,235.4	3,168.3	3,057.1
PO <sub>2</sub> (cc.mm/m <sup>2</sup> .day)	1	78.56	79.09	87.7	87.51	96.98
	2	74.73	82.96	84.2	90.53	98.44
	เฉลี่ย	76.65	81.03	85.95	89.02	97.71

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการเตรียมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมพอสิต ที่มีสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียเริ่มจากการเตรียมสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอที่มีฤทธิ์ด้านแบคทีเรีย แล้วนำไปผสมกับผงพอลิเมอร์พอลิโพรพิลีนในอัตราส่วน 1, 3, 5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและศึกษาคอมพอสิตที่ได้จากการเตรียม ผลจากการวิจัยโดยสรุปดังนี้ สารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอที่เตรียมจากไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเคลือบผงนั้น จากการทดสอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันพบว่าไทเทเนียมในสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอที่เตรียมขึ้นมาเป็นชนิดอะนาเทส ดังที่เห็นจากสัญญาณที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.3, 37.4 และ 48.2 และพบว่าสารประกอบที่เตรียมขึ้นมีโครงสร้างแบบเดิมของซีโอไลต์เอ และการวัดการดูดกลืนแสง ซึ่งให้เห็นว่าอนุภาคไทเทเนียมในสารประกอบนี้มีการโครงสร้างแบบทอระฮีดรอล และมีลักษณะผลึกแบบอะนาเทส

และเมื่อนำสารประกอบไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ 2000 ส่วนในล้านส่วน มาผสมกับพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วน 1, 3, 5, 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในเครื่องรีดอัดแบบสกรูคู่แล้วทำการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม พบว่าปริมาณของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เม็ดและฟิล์มที่ได้มีสีขาวขุ่นมากขึ้นเมื่อเทียบกับเม็ดหรือฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการเติม

สารประกอบดังกล่าว โดยเห็นได้ชัดเจนที่อัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการพิสูจน์เอกลักษณ์พบว่าฟิล์มที่ผสมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอยังมีโครงสร้างแบบเดิมของพอลิโพรพิลีน มีฤทธิ์การต้านเชื้อแบคทีเรียที่มากขึ้น เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ ไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนคอมพอสิตฟิล์มที่ได้นั้นมีสมบัติความทนแรงดึงและความยืดในทิศทางขนานกับการดึง

ฟิล์มมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งตรงกันข้ามกับผลความยืดในทิศทางตั้งฉากกับการดึงฟิล์มที่ลดลงมากเมื่ออัตราส่วนผสมมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการผสมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอนั้นได้มีส่วนในการขัดขวางการเกิดผลึกและมีส่วนทำให้การเกิดสายโซ่ของพอลิเมอร์ได้น้อยลง ส่งผลให้แรงยึดเกาะกันแบบเดิมของโมเลกุลโพรพิลีนลดลงรวมทั้งความยืดหยุ่นก็ลดลงเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากค่า



ความทนแรงดึง และค่าความยืดที่เปลี่ยนไป เช่นเดียวกับสมบัติด้านการมองเห็นที่ค่าความขุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และความมันเงามีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของการผสมมากขึ้นอันเนื่องจากการเกิดผลึกลดน้อยลง สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนสำหรับค่าอุณหภูมิการเกิดผลึกและการหลอมมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณการผสมมากขึ้น

จากผลการทดสอบสมบัติในทุกด้านของไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ-พอลิโพรพิลีนฟิล์ม สรุปได้ว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการเติมไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ คือที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีสมบัติด้านแบคทีเรียที่ดีขึ้น ในขณะที่สมบัติด้านเชิงกล สมบัติด้านความร้อน และสมบัติการมองเห็นลดลงเล็กน้อย

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานที่จะทำต่อไป

งานที่คาดว่าจะศึกษาต่อไปในอนาคต คือการเตรียมสารประกอบนาโนไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอ และศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของนาโนไทเทเนียม-ซีโอไลต์เอกับพอลิโพรพิลีน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์ที่ด้านแบคทีเรีย ทั้งนี้เนื่องจากนาโนไทเทเนียม จะมีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่าดังนั้นจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับแบคทีเรียได้มากกว่า จึงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการต้านเชื้อดีขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] *Compounding world. Global success story : analysing polymer demand trends.* 2014 [cited 2014 November]; Available from: [http://www.polysecure.eu/fileadmin/user\\_media/news-pdf-download/](http://www.polysecure.eu/fileadmin/user_media/news-pdf-download/)
- [2] *PlasticsEurope. Plastics – the Facts 2014/2015.* 2015 [cited 2015 January 22]; Available from: <http://www.plasticseurope.org/Document/plastics-the-facts-20142015.aspx/>
- [3] *Market outlook. Polymers world turned on its head. .* 2013 [cited 2013 October 25]; Available from: <http://www.icis.com/resources/news/2013/10/25/9718765/market-outlook-polymers-world-turned-on-its-head/>
- [4] Konagaya, S., Ohashi, H., Hamano, A., Seko, M., and Tanaka, M., *Antibacterial Composition And Antibacterial Aminate*, 2000. p. 1-38.
- [5] Yasuyuki, M., Kunihiro, K., Kurissery, S., Kanavillil, N., Sato, Y., and Kikuchi, Y., Antibacterial properties of nine pure metals: a laboratory study using *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Biofouling*, 2010. 26(7): p. 851-8.
- [6] Altan, M. and Uildirim, H., Mechanical and Antibacterial Properties of Injection Molded Polypropylene/TiO<sub>2</sub> Nano-Composites: Effects of Surface Modification. *J. Mater. Sci. Technol*, 2012. 28(8): p. 686-692.
- [7] Boschetto, D.L., Lerin, L., Cansian, R., Pergher, S.B.C., and Di Luccio, M., Preparation and antimicrobial activity of polyethylene composite films with silver exchanged zeolite-Y. *Chemical Engineering Journal*, 2012. 204–206: p. 210-216.
- [8] Zhang, A., Li, Z., Li, Z., Shen, Y., and Zhu, Y., Effects of different Ti-doping methods on the structure of pure-silica MCM-41 mesoporous materials. *Applied Surface Science*, 2008. 254(20): p. 6298-6304.
- [9] Mohamed, R.M., Ismail, A.A., Othman, I., and Ibrahim, I.A., Preparation of TiO<sub>2</sub>-ZSM-5 zeolite for photodegradation of EDTA. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2005. 238(1–2): p. 151-157.

- [10] Breck, D.W., Zeolite molecular sieves: structure, chemistry, and use. 1997: Wiley-Interscience Publication.
- [11] Bogdanov, B., Georgiev, D., Angelova, K., and Hristov, Y., Synthetic Zeolites and their Industrial And Environmental Applications. Proceedings International Science conference, 2009: p. 1-5.
- [12] วิทยาคุณ, จ. and กฤษฏานุกรักษ์, น., การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์. 1 ed., กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 146-149.
- [13] Loiha, S., Zeolite and Zeolite Technology. KKU Sci. J., 2013. 41: p. 56-66.
- [14] Ríos, C.A., Williams, C.D., and Fullen, M.A., Nucleation and growth history of zeolite LTA synthesized from kaolinite by two different methods. Applied Clay Science, 2009. 42(3–4): p. 446-454.
- [15] Barrer, V.R.M., Zeolites and clay minerals as sorbents and molecular sieves. 1978, London: Academic Press.
- [16] เชนวานิชย์, ช., เคมีโพลีเมอร์พื้นฐาน. 1984.
- [17] Billmeyer, F.W., Textbook of Polymer Science. 3 ed. 1984: John Wiley and Sons.
- [18] Schwartz, M.M., Composite Materials Handbook. 1992, New York: McGraw-Hill
- [19] Jordan, J., Jacob, K.I., Tannenbaum, R., Sharaf, M.A., and Jasiuk, I., Experimental trends in polymer nanocomposites—a review. Materials Science and Engineering: A, 2005. 393(1–2): p. 1-11.
- [20] Harper, C.A., Handbook of Plastics Technologies: The Complete Guide to Properties and Performance. 2006: McGraw-Hill.
- [21] *Titanium Dioxide*. 1999; Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Titanium\\_dioxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Titanium_dioxide).
- [22] Kedziora, A., Streck, W., Kepinski, L., Bugla-Ploskonska, G., and Doroszkiewicz, W., Synthesis and antibacterial activity of novel titanium dioxide doped with silver. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2012. 62(1): p. 79-86.
- [23] Hashimoto, K., Irie, H., and Fujishima, A., TiO<sub>2</sub> Photocatalysis: A Historical Overview and Future Prospects. Japanese Journal of Applied Physics, 2005. 4(12): p. 8269-8285.

- [24] Li, Q., Mahendra, S., Lyon, D.Y., Brunet, L., Liga, M.V., Li, D., and Alvarez, P.J.J., Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial control: Potential applications and implications. Water Research, 2008. 42(18): p. 4591-4602.
- [25] Foster, H., Ditta, I., Varghese, S., and Steele, A., Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011. 90(6): p. 1847-1868.
- [26] Du, X. and Wu, E., Porosity of microporous zeolites A, X and ZSM-5 studied by small angle X-ray scattering and nitrogen adsorption. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2007. 68(9): p. 1692-1699.
- [27] Dangji, G.P., Somani, M.K., Somani, R.S., and Bajaj, H.C., Adsorption selectivity of CO<sub>2</sub> over N<sub>2</sub> by cation exchanged Zeolite L: Experimental and simulation studies. Indian Journal of Chemistry, 2012. 51A: p. 1238-1251.
- [28] Han, Z. and Fina, A., Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review. Progress in Polymer Science, 2011. 36(7): p. 914-944.
- [29] Sahoo, N.G., Rana, S., Cho, J.W., Li, L., and Chan, S.H., Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes. Progress in Polymer Science, 2010. 35(7): p. 837-867.
- [30] Pavlidou, S. and Papaspyrides, C.D., A review on polymer-layered silicate nanocomposites. Progress in Polymer Science, 2008. 33(12): p. 1119-1198.
- [31] Goettler, L.A., Lee, K.Y., and Thakkar, H., Layered Silicate Reinforced Polymer Nanocomposites: Development and Applications. Polymer Reviews, 2007. 47(2): p. 291-317.
- [32] Gibson, R.F., Principles of Composite Material Mechanics. 3 ed. 2011: Taylor & Francis.
- [33] Brazel, C.S. and Rosen, S.L., Fundamental Principles of Polymeric Materials. 3 ed. 2012: Wiley.
- [34] Kimura, T., Suzuki, M., Ikeda, T., Kato, K., Maeda, M., and Tomura, S., Silica-based mesoporous materials derived from Ti containing layered polysilicate kanemite. Microporous and Mesoporous Materials, 2006. 95(1-3): p. 146-153.

- [35] ASTM E2149-10, in *Standard Test Method for Determining the Antimicrobial Activity of Immobilized Antimicrobial Agents Under Dynamic Contact Conditions* 2010, ASTM International: West Conshohocken, PA.
- [36] ASTM D882-02, in *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting* 2002, ASTM International: West Conshohocken, PA.
- [37] ASTM D1709-15, in *Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastic Film by the Free-Falling Dart Method* 2015, ASTM International: West Conshohocken, PA.
- [38] ASTM D2457-13, in *Standard Test Method for Specular Gloss of Plastic Films and Solid Plastics* 2013, ASTM International: West Conshohocken, PA.
- [39] ASTM D1003-13, in *Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics* 2013, ASTM International: West Conshohocken, PA.
- [40] ASTM E1131-08, in *Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry* 2008, ASTM International: West Conshohocken.
- [41] ASTM D3985-05(2010)e1, in *Standard Test Method for Oxygen Gas Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric Sensor* 2010, ASTM International: West Conshohocken, PA.
- [42] ASTM F2476-13, in *Standard Test Method for the Determination of Carbon Dioxide Gas Transmission Rate (CO<sub>2</sub>TR) Through Barrier Materials Using An Infrared Detector* 2013, ASTM International: West Conshohocken, PA.
- [43] Dai, S., Wu, Y., Sakai, T., Du, Z., Sakai, H., and Abe, M., Preparation of Highly Crystalline TiO<sub>2</sub> Nanostructures by Acid-assisted Hydrothermal Treatment of Hexagonal-structured Nanocrystalline Titania/Cetyltrimethylammonium Bromide Nanoskeleton. *Nanoscale Res Lett*, 2010. 5(11): p. 1829-1835.
- [44] Bahloul, W., Mélis, F., Bounor-Legaré, V., and Cassagnau, P., Structural characterisation and antibacterial activity of PP/TiO<sub>2</sub> nanocomposites prepared by an in situ sol-gel method. *Materials Chemistry and Physics*, 2012. 134(1): p. 399-406.

- [45] Ismail, A.A., Mohamed, R.M., Ibrahim, I.A., Kini, G., and Koopman, B., Synthesis, optimization and characterization of zeolite A and its ion-exchange properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2010. 366(1–3): p. 80-87.
- [46] เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, ส.ก., การวิเคราะห์ธาตุในสารมาตรฐานแร่เซอร์คอน แร่บอกไซต์ แร่แกรเซียมโครมี และหินบาชอลท์โดยวิธีอินดักทีฟลีคอปเปิลพลาสมา-ออปติคอลลีมีสชันสเปคโตรเมทรี, 2000.





## ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบความทนแรงดึงที่จุดเปลี่ยนรูป

รายการทดสอบ	ฟิล์มในทิศทางขนานกับการดึงฟิล์ม					ฟิล์มในทิศตั้งฉากกับการดึงฟิล์ม				
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
	20.2	19.7	18.7	17.9	15.8	19.8*	19.3	17.1	14.8	14.5
	20.4	19.7	21.0	18.4	15.2	19.6	17.8	17.7	15.0	13.5
	19.7	20.1	19.4	17.5	14.9	19.0	19.6	17.1	16.2	13.5
	19.6	19.5	18.3	17.8	16.6	19.2	20.3	18.4	17.0	13.7
	20.1	18.6*	19.0	16.6	14.7	21.7*	21.0	15.3*	16.6	14.4
ค่าเฉลี่ย	20.0	19.9	19.3	17.6	15.5	19.3	19.6	17.6	15.9	13.9
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.3	0.5	1.0	0.6	0.8	0.3	1.2	0.6	1.0	0.5

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบความทนแรงดึงที่จุดขาด

รายการทดสอบ	ฟิล์มในทิศทางขนานกับการดึงฟิล์ม					ฟิล์มในทิศตั้งฉากกับการดึงฟิล์ม				
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
	42.2	32.4	36.8	24.8	27.1	14.8	18.2	14.5	13.0	11.5
	38.6	33.5	35.4	32.7	26.7	26.4	16.1	13.4	13.6	11.7
	42.5	39.6	34.1	23.7	27.8	26.0	15.7	14.3	14.3	11.3
	43.6	24.5	24.8	28.0	31.6	28.2	16.0	14.0	14.5	11.5
	42.0	18.6*	27.9	33.7	27.4	19.1	16.8	12.6	14.1	11.8
ค่าเฉลี่ย	41.8	32.5	31.8	28.6	28.3	26.9	16.6	14.0	13.9	11.6
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.9	6.2	5.2	4.5	1.9	1.2	1.0	0.5	0.6	0.2

หมายเหตุ เครื่องหมายดอกจันเหนือค่าใดๆ แสดงถึง ค่านั้นไม่ถูกนำมาคำนวณร่วมสำหรับการคิดค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบของชิ้นงานนั้น ทั้งนี้ในการตัดค่านั้นทิ้งไปเนื่องจาก ชิ้นงานนั้นมีการยึดตัวที่ไม่สมบูรณ์



ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบความยืดที่จุดเปลี่ยนรูป

รายการทดสอบ	ฟิล์มในทิศขนานกับการดึงฟิล์ม					ฟิล์มในทิศตั้งฉากกับการดึงฟิล์ม				
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
	12.9	15.9	14.8	7.8	19.0	17.3	12.5	9.5	13.9	10.5
	12.4	9.1	9.8	9.2	12.0	18.6	6.8	14.0	9.4	9.6
	19.9	9.7	11.8	8.1	16.9	17.9	8.7	6.0	8.5	7.3
	15.7	12.6	14.4	14.2	10.0	18.9	16.6	7.0	17.2	6.7
	14.0	10.3*	14.9	12.4	11.5	13.0	5.2	12.2	14.4	4.8
ค่าเฉลี่ย	15.0	11.8	13.1	10.3	13.9	18.5	10.0	9.1	12.7	7.8
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.0	3.1	2.2	2.8	3.8	0.5	1.6	3.6	1.0	2.3

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบความยืดที่จุดขาด

รายการทดสอบ	ฟิล์มในทิศขนานกับการดึงฟิล์ม					ฟิล์มในทิศตั้งฉากกับการดึงฟิล์ม				
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
	673	531	660	451	476	147	18.7	18.9	31.8	31.1
	621	573	566	569	489	622	20.5	51.1	18.3	30.7
	683	629	614	446	607	627	17.5	17.8	19.7	35.1
	700	427	463	539	564	640	60.7	18.2	25.5	15.2
	692	10*	481	676	560	265	32.3	21.0	35.4	19.7
ค่าเฉลี่ย	674	540	557	536	539	630	29.3	26.5	26.2	26.4
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	31	85	84	95	55	9	18.2	16.4	7.4	8.4

หมายเหตุ เครื่องหมายดอกจันเหนือค่าใดๆ แสดงถึง ค่านั้นไม่ถูกนำมาคำนวณร่วมสำหรับการคิดค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบของชิ้นงานนั้น ทั้งนี้ในการตัดค่านั้นทิ้งไปเนื่องจาก ชิ้นงานนั้นมีการยึดตัวที่ไม่สมบูรณ์

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล : นายมนชัย ชาติศรีศักดิ์

วันเกิด : 16 พฤศจิกายน 2510

การศึกษาและการทำงาน

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนคณะราษฎรบำรุง 2529

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ในปีการศึกษา 2533

เข้าศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์ พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2554  
 เข้านำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 41 (วทท 41; The 41st Congress on Science and Technology of Thailand, STT41) ระหว่างวันที่ 6-8 พฤศจิกายน 2558 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด นครราชสีมา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปัจจุบันปฏิบัติงานในบริษัทไออาร์พีซี จำกัด มหาชน ตำแหน่ง นักเคมี อาวูโส