

การศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียบนวัสดุผสมอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอินสไตรีน
และซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน
ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก



กัลยรัตน์ วินยางค์กุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียบนวัสดุผสมอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอินสไตรีน

และซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHOTOCATALYTIC BACTERIAL INACTIVATION BY ABS/ZnO WITH SILANE



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT

FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้นั้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

การศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียบนวัสดุผสมอะครีโลไนไตรล์-
บิวตะไดอินสไตรีนและซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย
สารคู่ควบไซเลนด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

โดย

นางสาวกัลยรัตน์ วินยางค์กุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์)


.....กรรมการ
(ผศ.รุ่งฤดี เบญจางคประเสริฐ)


.....กรรมการ
(ดร.ณัฐนันท์ ไพบูลย์ศิลป์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียบนวัสดุผสมอะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีนสไตรีนกับซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย สารคู่ควบไซเลนด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก
โดย	นางสาวกัลยรัตน์ วินยางค์กุล
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไล (*Escherichia coli*, *E.coli*) ของพลาสติกอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) ด้วยการผสมซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน โดยออกแบบการทดลองตามการทดลองแบบผสม (Mixture design) เตรียมวัสดุผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด และขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นงานเป็นแผ่น พบว่าการกระจายตัวของซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนบนพื้นผิววัสดุผสมเอปียเอสมีการกระจายตัวที่ดี ลดการจับกลุ่มก้อนของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียบนวัสดุผสมเอปียเอสด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก ตามมาตรฐาน JIS Z 2801 : 2010 พบว่าอัตราส่วนผสมของซิงค์ออกไซด์และสารคู่ควบไซเลนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสูงขึ้น แต่หากปริมาณซิงค์ออกไซด์มากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง อีกทั้งถ้าเวลาในการฉายแสงยูวีเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจะมากขึ้นด้วย ส่วนการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุผสมเอปียเอส ตามมาตรฐาน ASTM D638 หลังจากปรับปรุงพื้นผิวซิงค์ออกไซด์ด้วยสารคู่ควบไซเลนจะทำให้การต้านทานแรงดึงและมอดุลัสของยังของวัสดุผสมเอปียเอสเพิ่มขึ้นมากกว่าการผสมซิงค์ออกไซด์ปกติ โดยอัตราส่วนผสมของพลาสติกเอปียเอสซิงค์ออกไซด์ และสารคู่ควบไซเลน ที่ร้อยละ 99.58 0.33 และ 0.08 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียผ่านกระบวนการโฟโตแคตะไลติกเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่นซึ่งสามารถลดเชื้อแบคทีเรียได้สูงสุดถึงร้อยละ 70 ในระยะเวลา 30 นาที และสอดคล้องกับสมบัติทางกลที่มีการต้านทานแรงดึงและมอดุลัสของยังสูงที่สุดอีกด้วย ซึ่งเพิ่มขึ้นจากพลาสติกเอปียเอสปกติ ร้อยละ 43.25 และร้อยละ 13.97 ตามลำดับ

Report Title	Photocatalytic Bacterial Inactivation by ABS/ZnO with Silane
By	Miss Kanyarat Winyangkool
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Advisor	Asst.Prof.Dr. Kunlanan Kiatkittipong

ABSTRACT

The purpose of this research is to enhance antibacterial performance in Acrylonitrile-Butadiene-Styrene plastic (ABS) by mixing zinc oxide (ZnO). The surface of ZnO/ABS was modified with silane coupling agent. The mixing ratio of the experiment was designed by Mixture design. The silane-ZnO/ABS composite was prepared via an internal mixer and molded by a compression method. The distribution of modified ZnO well distributed and reduced the accumulation on the surface of ABS composite. The antibacterial testing using *Escherichia coli* (*E. coli*) as a model of the composites by photocatalytic process according to JIS Z 2801: 2010 was investigated. The increased concentration of ZnO and silane coupling agent increased the efficiency of bacterial inhibition. However, an excessive amount of ZnO reduced the performance of bacterial inhibition. In addition, when the time of UV irradiation increased, the antibacterial performance increased. For the mechanical testing of composites according to ASTM D638, the addition of modified ZnO to ABS matrix caused an increase not only in the tensile strength but also in Young's modulus of the ABS composite. It is greater than tensile strength and Young's modulus of ZnO/ABS composite. The ratio 99.58: 0.33: 0.08 (wt%) of ABS/ZnO/Silane achieves maximum antibacterial activity up to 70% by photocatalytic process for 30 minutes. It has the highest tensile strength and Young's modulus that increases 43.25% and 13.97%, respectively, when compares to pure ABS.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียบนวัสดุผสมอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน-สไตรีนและซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก” สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือของบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ขอขอบคุณคณาจารย์และหน่วยงานที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ดังนี้

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์ อาจารย์สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.วิภู ศรีสืบสาย อาจารย์สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาตลอดคำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเป็นอย่างดีระหว่างการทำปริญญานิพนธ์นี้ จนเสร็จสมบูรณ์ และขอบพระคุณคณาจารย์คณะกรรมการทุกท่านที่สละเวลาเพื่อเป็นคณะกรรมการการ สอบปริญญานิพนธ์ ตรวจสอบและให้คำแนะนำรวมถึงแนวคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณ นายฤทธิชัย สังฆทิพย์ และ นางสาวภิญญาพัชญ์ เพ็งบุบผา ที่ได้ให้คำปรึกษา และคำชี้แนะในการแก้ไขข้อผิดพลาด

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ประพันธ์ ปิ่นศิโรตม์ คณบดี รศ.ดร.อดิศร เสวตวิวัฒน์ อาจารย์ประจำ สาขาวิชาเทคโนโลยีการหมัก และ นางอัสณี วิจิตรระกะ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด ตลอดจนเอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการสำหรับทำปริญญานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ที่ไม่ได้กล่าวนามตลอดจนเพื่อนๆ ทุกคนที่ คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจรวมทั้งเป็นแรงจูงใจให้ผู้จัดทำสามารถทำปริญญานิพนธ์จนเสร็จ สมบูรณ์

กัลยรัตน์ วินยางค์กุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงานปริญญานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กระบวนการโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic Process).....	5
2.2 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO).....	9
2.3 พลาสติก.....	10
2.4 พลาสติกอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอีนสไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS).....	15
2.5 วัสดุผสม (Composite Materials).....	16
2.6 สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent).....	17
2.7 แบคทีเรีย.....	21
2.8 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction, XRD).....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)	24
2.10 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer-Emmett-Teller, BET)	25
2.11 การทดสอบสมบัติทางกล	26
2.12 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment).....	28
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	33
3.1 การออกแบบอัตราส่วนผสม	34
3.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว	35
3.3 การปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์	35
3.4 การเตรียมชิ้นงานและขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผสมเอปียเอส.....	36
3.5 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมเอปียเอส	37
3.6 การทดสอบสมบัติทางกล	37
3.7 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	37
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	41
4.1 สมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว	41
4.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมเอปียเอส.....	44
4.3 สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย.....	46
4.4 สมบัติทางกล	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก.....	57



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานปริญญาโท 3	3
ตารางที่ 2.1 ข้อดีข้อเสียของความแตกต่างของตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยา 8	8
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเชิงคอลลอยด์ 10	10
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติและการนำไปใช้งานของพลาสติกแต่ละประเภท 12	12
ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุผสม 17	17
ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของสารคู่ควบไซเลนและการนำไปใช้งานกับพลาสติกชนิดต่างๆ 18	18
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของวัสดุผสมเอปียเอส 34	34
ตารางที่ ก.1 จำนวนเชื้อแบคทีเรียอีโคไลที่รอดชีวิตเมื่อผ่านการฉายแสง เป็นเวลา 0 5 15 และ 30 นาที 58	58
ตารางที่ ก.2 อัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรียอีโคไลเมื่อผ่านการฉายแสง เป็นเวลา 0 5 15 และ 30 นาที 59	59
ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบการต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมเอปียเอสที่อัตราส่วนผสมต่างๆ 60	60
ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบมอดูลัสของยังของวัสดุผสมเอปียเอสที่อัตราส่วนผสมต่างๆ 61	61

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 อัตราส่วนผสมของวัสดุผสมเอปียีส	2
รูปที่ 2.1 กระบวนการโฟโตแคตะไลติก	2
รูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์	13
รูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบเวอร์ตไซด์	30
รูปที่ 2.4 แผนภูมิการแบ่งโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์	31
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก	37
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตพลาสติก	37
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของพลาสติกอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอินสไตรีน	46
รูปที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของโมโนเมอร์	49
รูปที่ 2.9 ชนิดของสารคู่ควบไซเลน	49
รูปที่ 2.10 โครงสร้าง 3-อะมิโนโพรพิลไดรอีทอกซีไซเลน	50
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบและแบคทีเรียแกรมบวก	51
รูปที่ 2.12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	51
รูปที่ 2.13 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	53
รูปที่ 2.14 พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง	54
รูปที่ 2.15 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการผลิต	55
รูปที่ 2.16 ช่องว่างที่ถูกจำกัดของปัจจัยของส่วนผสมที่มี 3 ส่วนผสม	57
รูปที่ 2.17 ระบบโคออร์ดิเนทแกนสามเส้น	59
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานปริญญาโท	59
รูปที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของวัสดุผสมเอปียีส	60
รูปที่ 4.1 ดิฟแฟรกโทแกรมของซิงค์ออกไซด์	64
รูปที่ 4.2 ดิฟแฟรกโทแกรมของซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน	65
รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของซิงค์ออกไซด์	55
รูปที่ 4.4 โครงสร้างทางจุลภาคของซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.5 โครงสร้างทางจุลภาคของพลาสติกเอบีเอส.....	59
รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของพลาสติกเอบีเอสที่ผสมซิงค์ออกไซด์	59
รูปที่ 4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของพลาสติกเอบีเอสที่ผสมซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ด้วยสารคู่ควบไซเลน	60
รูปที่ 4.8 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไลของวัสดุผสมเอบีเอส โดยผ่านกระบวนการโฟโตแคตะไลติก	64
รูปที่ 4.9 การต้านทานแรงดึง	65
รูปที่ 4.10 มอดูลัสของยัง	59



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลาสติกมีบทบาทอย่างยิ่งในชีวิตประจำวัน สามารถพบเห็นพลาสติกในรูปของผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น ขวดน้ำ ถูพลาสติก เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์สุขภัณฑ์ เครื่องมือแพทย์ และพบว่าแนวโน้มปริมาณการใช้งานและการผลิตพลาสติกของโลกเพิ่มมากขึ้นทุกปี [1] เนื่องจากมีคุณสมบัติที่แข็งแรง ทนการสึกกร่อน ทึบแสง ทำเป็นสีต่าง ๆ ได้ เป็นฉนวนไฟฟ้า เบา ลอยน้ำได้ ไม่เป็นสนิม [2] ซึ่งโดดเด่นกว่าวัสดุอื่น เช่น จำพวกโลหะ นอกจากนี้พลาสติกแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 2.3 จากตารางแสดงให้เห็นว่าพลาสติกอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอินสไตรีน หรือ เอบีเอส (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) มีคุณสมบัติทนทานต่อสภาพอากาศ ยืดหยุ่น และแข็งแรงทนทาน ทำให้สามารถขึ้นรูปง่าย จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุที่มีราคา

อย่างไรก็ตามการใช้งานในที่สาธารณะ การใช้ซ้ำ ที่หรืออุปกรณ์ที่ต้องปลอดเชื้อ อาจเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภคและบริโภค เชื้อแบคทีเรียอีโคไล (*Escherichia coli*, *E.coli*) ซึ่งก่อให้เกิดโรคท้องร่วง และส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินอาหาร ซึ่งโดยทั่วไปการกำจัดเชื้อแบคทีเรียถูกทำโดยการใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติในการทำลายเชื้อแบคทีเรีย เช่น เอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 70 ด่างทับทิม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่อย่างไรก็ตามการใช้สารเคมีส่วนมากไม่มีผลในการทำลายเชื้อได้ทั้งหมด ถึงแม้จะใช้ความเข้มข้นตามกำหนดมาตรฐานก็ตาม

กระบวนการโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic Process) จึงเป็นแนวทางสำคัญในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีค่าใช้จ่ายต่ำ โดยเป็นวิธีการที่จะสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียด้วยการใช้แสงกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำให้เกิดเรดิคัลที่สามารถไปยับยั้งการทำงานของเชื้อแบคทีเรีย จนเชื้อแบคทีเรียตายในที่สุด ซึ่งนิยมนำซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจาก ไม่เป็นพิษ มีความเสถียรที่อุณหภูมิและความดันสูง ราคาถูก

แต่จากงานวิจัยของ ซูโค [3] และคณะ อีกทั้ง หลุน และคณะ [4] พบว่า การกระจายตัวซิงค์ออกไซด์ไม่ทั่วถึง จับกลุ่มก้อนในวัสดุผสม ทำให้พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาลดลง ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการจำกัดประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงพื้นผิวซิงค์ออกไซด์ด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ซึ่งเป็นสารเติมแต่งที่มีคุณสมบัติในการปรับปรุงพื้นผิวของสารเติมแต่งให้สามารถเกิดการเชื่อมระหว่างเฟสของพอลิเมอร์และเฟสของสารเติมแต่งได้ดีขึ้น

ดังนั้นปริญญานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับวัสดุที่สามารถยับยั้งหรือทำลายเชื้อแบคทีเรียได้ โดยนำพลาสติกเอบีเอสผสมกับซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนเพื่อช่วยเพิ่มการกระจายตัวของซิงค์ออกไซด์ในพลาสติกเอบีเอสได้ และส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียผ่านกระบวนการโฟโตแคตะไลติกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้วัสดุผสมเอบีเอสถูกศึกษาสมบัติทางกลเพื่อเป็นแนวทางในการขึ้นรูปและการใช้งานของผลิตภัณฑ์

1.2 วัตถุประสงค์

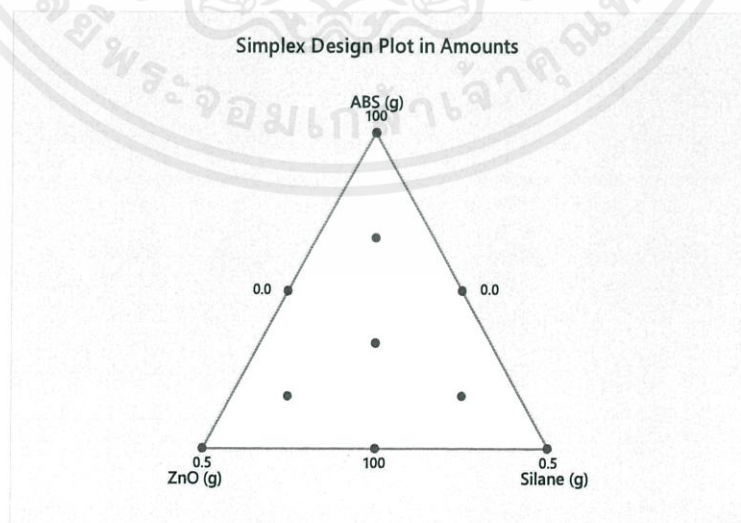
1.2.1 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไลของพลาสติกเอบีเอสที่มีการผสมซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

1.2.2 เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของพลาสติกเอบีเอส ซิงค์ออกไซด์ และสารคู่ควบไซเลน ที่เหมาะสมต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสูงสุดผ่านกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของพลาสติกเอบีเอสที่มีการผสมซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ทำการผสมพลาสติกเอบีเอส ซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน ตามการทดลองแบบผสม (Mixture design) ในรูปที่ 1.1 ซึ่งมีช่วงอัตราส่วนของพลาสติกเอบีเอส ซิงค์ออกไซด์ และสารคู่ควบไซเลน เป็น 99.5 ถึง 100 กรัม 0 ถึง 0.05 กรัม และ 0 ถึง 0.05 กรัม ตามลำดับ



รูปที่ 1.1 อัตราส่วนผสมของวัสดุผสมเอบีเอส

1.3.2 ศึกษาโครงสร้างผลึก โครงสร้างทางจุลภาค และพื้นที่ผิวจำเพาะ ของซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction, XRD) เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer-Emmett-Teller, BET) ตามลำดับ

1.3.3 ทดสอบความสามารถการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไลของวัสดุผสมเอปียีส ด้วยกระบวนการโพโตแคตะไลติก ตามมาตรฐาน JIS Z 2801: 2010

1.3.4 ทดสอบการต้านทานแรงดึง (Tensile test) ของวัสดุผสมเอปียีส ตามมาตรฐาน ASTM D638

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้พลาสติกเอปียีสที่มีการผสมซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน เป็นวัสดุต้นแบบที่มีคุณสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

1.4.2 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานปริญญานิพนธ์นี้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆต่อไป เช่น อุตสาหกรรมการแพทย์ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมสุขภัณฑ์ เป็นต้น

1.4.3 เกิดแนวคิดเชื่อมโยงกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง และสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพิ่มองค์ความรู้ ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป

1.5 แผนการดำเนินงานปริญญานิพนธ์

ระยะเวลาโครงการ ประมาณ 9 เดือน (สิงหาคม 2559 – เมษายน 2560)

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานปริญญานิพนธ์

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา 9 เดือน								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1.ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัย	↔								
2.เตรียมชิ้นงานวัสดุผสมเอปียีส		↔							
3.ทดลองขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติก				↔					

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) แผนการดำเนินงานปริญญาโท

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา 9 เดือน								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
4.ทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน						←→			
5.ทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน						←→			
6.ทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของชิ้นงาน						←→			
7.สรุปผลและปรับปรุงการทดลอง									←→
8.จัดทำรูปเล่มปริญญาโท									←→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

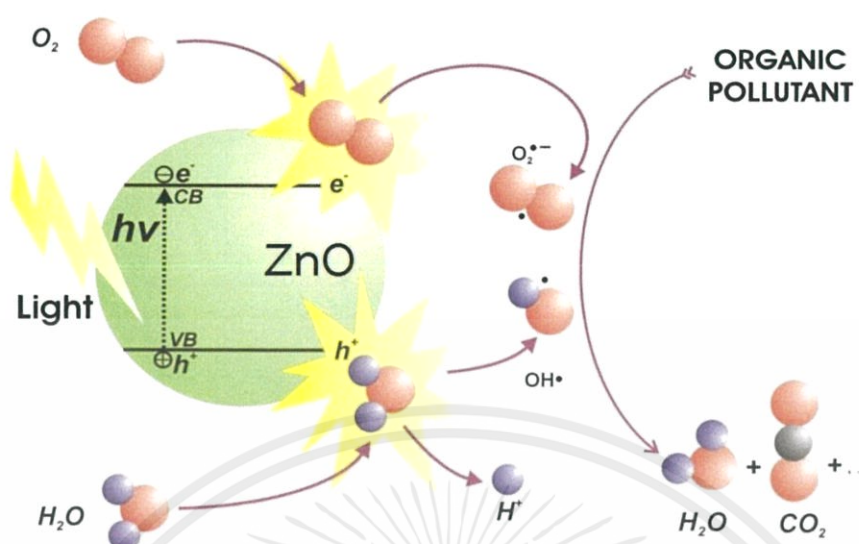
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic Process) [5]

กระบวนการโฟโตแคตะไลติกเป็นกระบวนการที่เกิดจากการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยาจะดูดซับโฟตอนที่มีพลังงานในการกระตุ้นซึ่งขึ้นกับแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ส่งผลให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band, VB) ถูกกระตุ้นขึ้นไปยังแถบคอนดักชัน (Conduction band, CB) อิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ทำให้แถบวาเลนซ์เกิดสภาวะการขาดอิเล็กตรอน ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เกิดช่องว่างอิเล็กตรอนหรือโฮล (e^-/h^+ pair) ซึ่งมีประจุเป็นบวกและสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เมื่อโฮลสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำหรือออกซิเจน (O_2) จะก่อให้เกิดเรดิคัล (Radical) ที่มีความว่องไวสูง โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกออกซิไดซ์ด้วยโฮลเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการ (2.2) ส่วนอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันจะรีดิวซ์โมเลกุลของออกซิเจนในน้ำก่อให้เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน (O_2^-) ดังสมการ (2.3)



ทั้งนี้ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของสาร เรียกกระบวนการนี้ว่า โฟโตออกซิเดชัน (Photooxidation) ในขณะที่ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออนเป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงสามารถทำปฏิกิริยาโฟตรีดักชัน (Photoreduction) จากสองกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นจึงเรียกกระบวนการโดยรวมว่า กระบวนการโฟโตแคตะไลติก ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการโฟโตแคตะไลติก

ที่มา: <http://www.mdpi.com>

ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชันจะต้องอาศัยพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับค่าช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นๆ ดังนั้นการคำนวณหาค่าพลังงานดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.4)

$$E = h\nu = hc / \lambda \quad (2.4)$$

เมื่อ	E	คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy) หน่วย จูล
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) = 6.625×10^{-34} จูล·วินาที
	v	คือ ความถี่ของคลื่นแสง หน่วย เฮิรตซ์ หรือ วินาที ⁻¹
	λ	คือ ความยาวคลื่นแสง หน่วย นาโนเมตร
	c	คือ ความเร็วของคลื่นแสง = 2.997×10^8 เมตร/วินาที

2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก [6]

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติกมีหลายปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ความเข้มของแสง (Light intensity) และความยาวคลื่นแสง (Wavelength)

ความเข้มของแสงและความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกจะมีความสัมพันธ์กับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล ความเข้มแสงที่เหมาะสมในการกระตุ้นอาจอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตหรือช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible) ขึ้นกับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา

2. ความเข้มข้นของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ (ZnO Dosage)

การเกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติกจะเกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นมีโอกาสเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลมากขึ้น ซึ่งทำให้มีปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลมากตามด้วย ส่งผลให้อัตราการเกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติกของสารอินทรีย์มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้ามีปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่มากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการกระบวนการโฟโตแคตะไลติกลดลง เนื่องจากอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ที่มากเกินไปจะไปบดบังแสงซึ่งกันและกันทำให้คู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ผิวซิงค์ออกไซด์ลดลง ซึ่งทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลงตามไปด้วย

3. อุณหภูมิของปฏิกิริยา (Reaction temperature)

อัตราการเกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้น รวมถึงมีการลดลงของพลังงานกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยังทำให้อัตราการทำปฏิกิริยาของคู่อิเล็กตรอนและโฮลกับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล

4. ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen)

อัตราการเกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติกเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในสารละลายเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิสเพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ยึดจับอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงและสามารถทำให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ได้

5. ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชมีผลต่อการเปลี่ยนค่าประจุบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งค่าประจุบนพื้นผิวมีผลต่อการดูดซับ (Adsorption) สารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถเพิ่มหรือลดปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่พื้นผิวซึ่งมีผลต่อการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล นอกจากนั้นแล้วค่าพีเอชยังมีอิทธิพลต่อค่าความเสถียรในการกระจายตัวของสารละลายผสมระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและสารประกอบอินทรีย์ (Dispersion stability)

6. ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (Type of catalyst)

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคตะไลติก ได้แก่

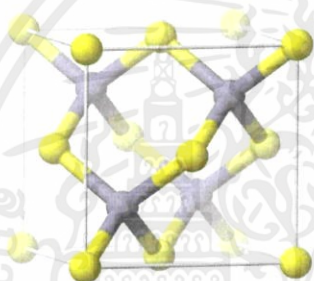
1. โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง โคโรเมียม นิกเกิล เป็นต้น และ 2. สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ซิงค์ออกไซด์ ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เป็นต้น ซึ่งความแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตะไลติก เนื่องจากคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ระดับพลังงานของแถบช่องว่างพลังงาน ระดับพลังงานของแถบคอนดักชันแบนด์ ระดับพลังงานของแถบวาเลนส์แบนด์ โครงสร้างผลึก พื้นที่ผิวจำเพาะ ที่แตกต่างกันไปตามแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 ข้อดีข้อเสียของความแตกต่างของตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยา

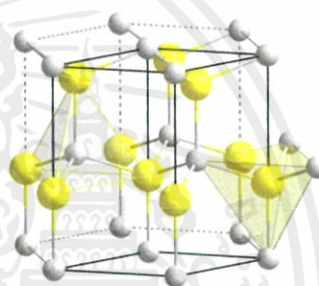
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ข้อดี	ข้อเสีย
ซิงค์ออกไซด์	<ol style="list-style-type: none"> 1. แถบช่องว่างพลังงานสูงกว่าไททาเนียม ป้องกันการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล (Recombination) 2. ราคาถูก 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้พลังงานกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า 2. พื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าไททาเนียมไดออกไซด์
ไททาเนียมไดออกไซด์	<ol style="list-style-type: none"> 1. พื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าซิงค์ออกไซด์ 2. ใช้พลังงานกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า 	<ol style="list-style-type: none"> 1. แถบช่องว่างพลังงานต่ำกว่าซิงค์ออกไซด์ อาจเกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลได้ง่ายกว่า 2. ราคาสูง

2.2 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) [7-9]

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) เป็นสารประกอบอนินทรีย์มีสูตรโมเลกุลคือ ZnO ลักษณะเป็นผงสีขาว มีสมบัติเป็นแอมโฟเทอริก (Amphoteric) ละลายน้ำได้น้อยมากแต่สามารถละลายได้ดีทั้งในกรดและเบส มีจุดหลอมเหลว 1,975 องศาเซลเซียส และมีจุดเดือด 2,360 องศาเซลเซียส โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์มี 2 แบบ คือ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc-blend structure) อะตอมมีการจัดเรียงตัวกันในรูปแบบสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (Cubic) แสดงดังรูปที่ 2.2 และโครงสร้างแบบเวอร์ตไซต์ (Wurtzite structure) อะตอมมีการจัดเรียงตัวแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์แบบเวอร์ตไซต์พบได้มากกว่าโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ เนื่องจากโครงสร้างแบบเวอร์ตไซต์มีความเสถียรมากที่สุดในสภาวะแวดล้อม และโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์พบได้ที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์



รูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบเวอร์ตไซต์

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide ที่มา: <http://www.chemexplore.net>

ซิงค์ออกไซด์มีแถบช่องว่างพลังงาน 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งมีความกว้างมาก และมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) สูง 60 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ (meV) และเมื่อนำซิงค์ออกไซด์ไปศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟค (Hall effect) พบว่าพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอน (Electron) ดังนั้นซิงค์ออกไซด์จึงมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) จากสมบัติดังกล่าวของซิงค์ออกไซด์จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับงานหลากหลาย เช่น เซรามิก (Ceramic) เซนเซอร์ทางเคมี (Chemical sensor) สารยับยั้งแบคทีเรีย (Anti-bacteria) สารป้องกันแสงยูวี (Ultraviolet หรือ UV) โฟโตแคตตาลิสต์ (Photocatalyst) และตัวดูดกลืนรังสีไมโครเวฟ (Microwave absorber) เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันนี้การประยุกต์ใช้ซิงค์ออกไซด์ในด้านโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เช่น การคายแสงยูวี ทรานซิปาเรนต์อิเล็กทรอนิกส์ (Transparent electronics) พลังงานสูงวัสดุที่ใช้เป็นกระจกสำหรับหน้าจอสอลาเซลล์ (Solar cell) เป็นต้น

ซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์ ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติซิงค์ออกไซด์

ชื่อตามระบบ IUPAC	Zinc oxide หรือ Oxozinc
CAS number	1314-13-2
สูตรโมเลกุล	ZnO
ลักษณะและสี	ผงสีขาวหรือขาวเหลือง
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	81.389
ความหนาแน่น	5.600 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm ³)
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิห้อง	5.642 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm ³)
จุดหลอมเหลว (melting point)	1,975 องศาเซลเซียส
จุดเดือด (boilingpoint)	2,360 องศาเซลเซียส
ดัชนีหักเหแสง (n_D)	2.0041

2.3 พลาสติก [10-11]

พลาสติกหรือพอลิเมอร์เป็นสารสังเคราะห์ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีของสารอินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) เป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบของออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) และมีพลาสติกบางชนิดที่มีส่วนประกอบของกำมะถัน (S) คลอรีน (Cl) ฟลูออรีน (F) และซิลิกอน (Si) อยู่ด้วย

2.3.1 สารตั้งต้นในการสังเคราะห์พลาสติก

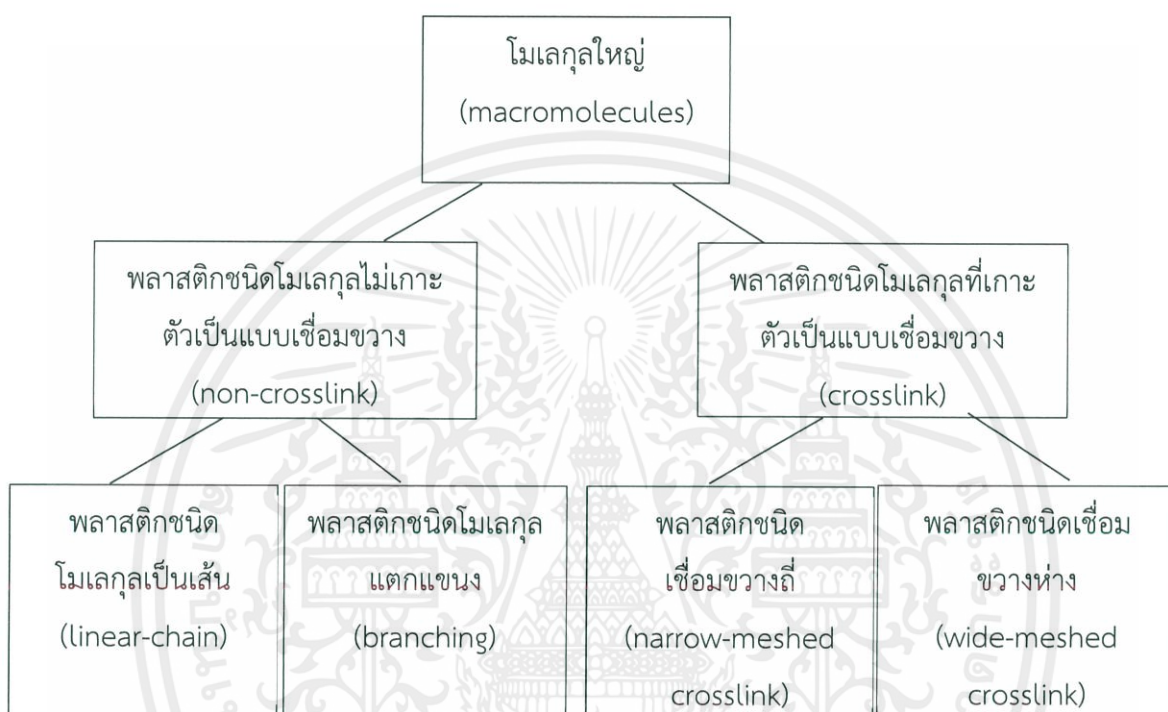
สารตั้งต้นในการสังเคราะห์พลาสติกหรือพอลิเมอร์จะเป็นมอนอเมอร์ (Monomer) ส่วนใหญ่จะได้มาจากน้ำมันดิบ แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน ตัวอย่างสารตั้งต้นที่ใช้กันมากได้แก่ เอทิลีน (Ethylene: C₂H₄) ไวนิลคลอไรด์ (Vinylchloride: C₂H₃Cl) และสไตรีน (Styrene: C₂H₃-C₆H₅) เป็นต้น

2.3.2 ปฏิกิริยาเชิงซ้อน (Polyreactions)

เป็นการนำเอามอนอเมอร์ (Monomer) จำนวนมากมาทำปฏิกิริยาเชิงซ้อนรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ (Macromolecules) ซึ่งเรียกว่า พอลิเมอร์หรือพลาสติก ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลอยู่ 2 ลักษณะ คือ เกาะกันแบบเชื่อมขวาง (Crosslink) และไม่มีการเกาะตัวระหว่างโมเลกุลใหญ่ (Non-crosslink)

พลาสติกมีโครงสร้างเป็นแบบเชื่อมขวาง (Crosslink) แยกออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบเชื่อมขวางแคบ (Narrow-meshed crosslink) กับแบบเชื่อมขวางห่าง (Wide-meshed crosslink)

พลาสติกที่มีโครงสร้างที่ไม่มีการเกาะตัวระหว่างโมเลกุลใหญ่ (Non-crosslink) แยกเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบเป็นเส้น (Linear) และแบบแตกแขนง (Branching) ดังรูปที่ 2.4

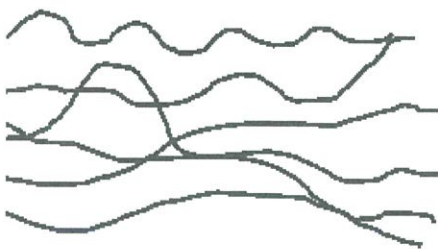


รูปที่ 2.4 แผนภูมิการแบ่งโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์
ที่มา: นริศรา จิระตระกูลชัย (2549)

2.3.3 ประเภทของพลาสติก [12]

หากแบ่งประเภทของพลาสติกตามสมบัติทางความร้อน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermo plastics) พอลิเมอร์ประเภทนี้มีโครงสร้างเป็นแบบเส้นหรือแบบกิ่งสั้นๆ เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการอ่อนตัวและหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด (Viscous Liquid) และเมื่อเย็นตัวลงก็จะแข็งตัวได้อีก (Reharden) พลาสติกประเภทนี้สามารถนำกลับมารีไซเคิล (Recycle) ได้ง่าย ซึ่งจะไม่ทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพเกิดการเปลี่ยนแปลงไป พลาสติกประเภทนี้มีข้อจำกัดคือไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ เพราะจะทำให้บิดเบี้ยวหรือเสียรูปทรงได้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก

ที่มา : <http://www.thaigoodview.com/files/u5613/5.gif>

2. เทอร์โมเซตพลาสติก (Thermoset Plastics) พอลิเมอร์ประเภทนี้จะหลอมเหลวในขั้นตอนแรกเท่านั้น และเมื่อเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลจนได้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเชื่อมโยงหรือร่างแห ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีเสถียรภาพสูงจะไม่สามารถหลอมเหลวได้อีกเมื่อได้รับความร้อน แต่หากได้รับความร้อนสูงเกินไปจะทำให้พันธะระหว่างอะตอมภายในโมเลกุลเกิดการแตกออก การสลายตัวจึงเกิดขึ้นทำให้พอลิเมอร์ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ พลาสติกประเภทนี้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกเพราะจะไม่อ่อนตัวหรือบิดเบี้ยวเมื่อได้รับความร้อน



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตพลาสติก

ที่มา : <http://www.thaigoodview.com/files/u5613/5.gif>

2.3.4 คุณสมบัติและการนำไปใช้งานของพลาสติก [13]

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติและการนำไปใช้งานของพลาสติกแต่ละประเภท

ประเภทพลาสติก	ชนิด	คุณสมบัติและการนำไปใช้งาน
เทอร์โมพลาสติก	พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE)	เป็นพลาสติกที่มีไอน้ำผ่านได้เล็กน้อย แต่อากาศสามารถผ่านเข้าออกได้ มีลักษณะขุ่นและทนความร้อนได้ดี เป็นพลาสติกที่นำมาใช้งานมากที่สุดในอุตสาหกรรม เช่น ท่อน้ำ ถัง ถุง ขวด แท่นรองรับสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) คุณสมบัติและการนำไปใช้งานของพลาสติกแต่ละประเภท

ประเภทพลาสติก	ชนิด	คุณสมบัติและการนำไปใช้งาน
เทอร์โมพลาสติก	พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)	เป็นพลาสติกที่มีไอน้ำผ่านได้เล็กน้อย มีลักษณะแข็งกว่าพอลิเอทิลีนทนต่อสารไขมันและความร้อนสูง สามารถใช้ทำแผ่นพลาสติก ถังบรรจุอาหารที่ทนร้อน และหลอดดูดพลาสติก เป็นต้น
	สไตรีนอะคริโลไนไตรล์ (Styrene-acrylonitrile, SAN)	มีลักษณะโปร่งใส นิยมใช้ผลิตชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น
	อะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอีนสไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS)	มีคุณสมบัติคล้ายกับพอลิสไตรีน แต่ทนสารเคมีและความร้อนดีกว่า เหนียวกว่า ยืดหยุ่น โปร่งแสง นิยมนำมาผลิตถ้วยพลาสติก ถาดพลาสติก เป็นต้น
	พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC)	ไอน้ำและอากาศสามารถซึมผ่านได้พอสมควร และสามารถป้องกันไขมันได้ดี มีลักษณะใส นิยมนำมาใช้เป็นขวดบรรจุน้ำมันและขวดปรุงอาหาร ขวดบรรจุเครื่องดื่ม ใช้ทำเป็นแผ่นพลาสติก ทำแผ่นแลมินเนตชั้นในของถุงพลาสติก เป็นต้น
	ไนลอน (Nylon)	เป็นพลาสติกที่มีความเหนียวมาก ทนต่อการเพิ่มอุณหภูมิ ใช้สำหรับทำถุงพลาสติกบรรจุอาหารแบบสุญญากาศ
	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET)	มีลักษณะเหนียว โปร่งใส ราคาแพง ใช้ทำเป็นแผ่นฟิล์มบางๆบรรจุเครื่องดื่มและอาหาร
	พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC)	มีลักษณะโปร่งใส แข็งแรง ทนแรงยึดและแรงกระแทกได้ดี สามารถทนความร้อนสูง ทนกรดแต่ไม่ทนด่าง ไม่เป็นรอยง่าย นิยมทำเป็นถ้วย จาน ชาม ขวดนมเด็ก และขวดบรรจุอาหารสำหรับเด็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) คุณสมบัติและการนำไปใช้งานของพลาสติกแต่ละประเภท

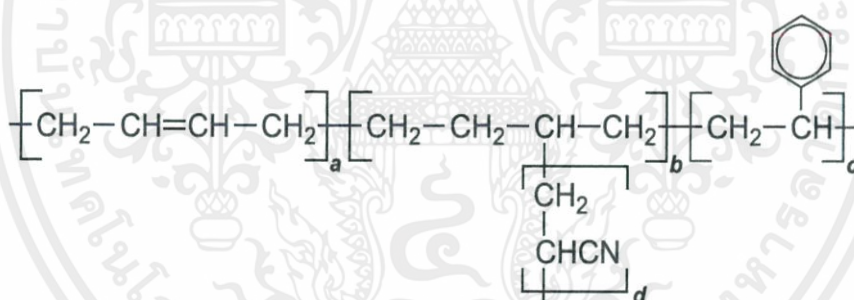
ประเภทพลาสติก	ชนิด	คุณสมบัติและการนำไปใช้งาน
เทอร์โมเซตพลาสติก	เมลามีน ฟอร์มาลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde, MF)	พลาสติกใสและแข็ง เป็นพลาสติกที่ทนความร้อนได้มาก กันรอยขีดข่วน จึงนิยมมาผลิตเป็นเครื่องครัว ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องเรือน ไม้อัดเคลือบ และติดชั้นของไม้ให้กลายเป็นไม้อัด
	ฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ หรือ ฟีนอลิกส์ (Phenol- Formaldehyde)	มีความแข็งแรง ค่าใช้จ่ายในการผลิตไม่มาก มีความ ต้านทานไฟฟ้าได้ดีและต้านทานตัวทำสารละลายเกลือ และน้ำมันได้ นิยมนำมาผลิตเป็นฝาจุขวด กระจก สวิตช์ไฟฟ้า แผ่นทำความร้อน ที่จับเตารีด โครมวิทยุและ โทรทัศน์
	อีพอกซี (Epoxy, EP)	อีพอกซีมีคุณสมบัติ ที่เหนียว ทนต่อการสึกกร่อนมาก และไม่หดตัวระหว่างที่แห้งตัว นำมาใช้เคลือบผิวของ อุปกรณ์ในบ้านเรือน และท่อเก็บแก๊ส ใช้ในการเชื่อม ส่วนประกอบโลหะ แก้ว และเซรามิก ใช้การหล่อ อุปกรณ์ที่ทำจากโลหะ และเคลือบผิวอุปกรณ์ไฟฟ้า
	พอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester, UP)	หากนำไปโคพอลิเมอร์กับสไตรีนและผสมกับเส้นใย แก้ว จะมีน้ำหนักเบา เหนียว ไม่เปราะง่ายและแข็งแรง กว่าโลหะ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักต่อน้ำหนัก ใช้เป็น ฉนวนไฟฟ้าได้ สามารถทนการกัดกร่อนของสารเคมีได้ ไม่เป็นสนิม นิยมนำมาผลิตเป็นเก้าอี้ โต๊ะไฟเบอร์ วัสดุทำหลังคาและส่วนประกอบรถยนต์อื่นๆ
พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU)	มีคุณสมบัติด้านความเหนียว ความแข็ง และความ หนาแน่น เช่น โฟมอ่อนและโฟมแข็ง โฟมอ่อนจะใช้ใน การทำเบาะ พูก และหีบห่อ ส่วนโฟมแข็งจะใช้เป็น ฉนวนในตู้เย็น เครื่องแช่แข็ง กันชนรถยนต์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 พลาสติกอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอินส์ไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) [14]

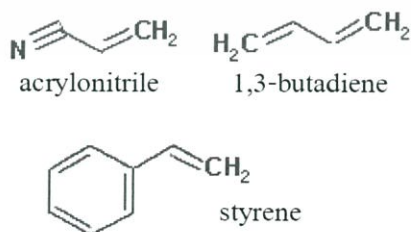
พลาสติกอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอินส์ไตรีน หรือ เอบีเอส (ABS) เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกที่สามารถนำมาหลอมซ้ำได้ด้วยความร้อนซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด มีโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 2.7 ได้มาจากการทำปฏิกิริยาของโมโนเมอร์ 3 ชนิดคือ สไตรีน (Styrene) อะครีโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) และพอลิบิวตะไดอิน (Polybutadiene) โดยแสดงโครงสร้างของแต่ละโมโนเมอร์แต่ละชนิดดังรูปที่ 2.8 ซึ่งโมโนเมอร์ทั้ง 3 ชนิดล้วนส่งผลต่อคุณสมบัติของพลาสติกเอบีเอส โดยสไตรีนช่วยให้เนื้อพลาสติกมีพื้นผิวเป็นมันเงาสวยงาม และสามารถตัดแต่งรูปทรงได้ง่าย อะครีโลไนไตรล์ช่วยให้ทนความร้อนและสารเคมี บิวทาไดอินส์ช่วยให้มีความทนทานต่อแรงกระแทก

ดังนั้นพลาสติกเอบีเอสเป็นพลาสติกที่มีความสมดุลทั้งในเรื่องความแข็งและความเหนียวสามารถคงสภาพรูปร่างได้ดี ทำให้มีคุณสมบัติทนทานต่อแรงกระแทกได้ดี ยืดหยุ่น และยังทนต่อแรงเสียดสี ความร้อน และสารเคมีได้ดีกว่าพลาสติกธรรมดาทั่วไป ช่วงอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้กว้างคือ -20 ถึง 80 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลวสูง 200 ถึง 250 องศาเซลเซียส ทำให้สามารถใช้งานในสภาพที่ร้อนกว่าได้ และอีกทั้งยังมีพื้นผิวเป็นมันเงาสวยงาม สามารถตัดแต่งรูปทรงได้ง่าย



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของพลาสติกอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอินส์ไตรีน

ที่มา: <http://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene>



รูปที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของโมโนเมอร์

ที่มา: <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge>

จากสมบัติต่างๆ ของพลาสติกเอปียเอสจึงส่งผลให้มีการใช้พลาสติกเอปียเอสในปริมาณมาก มีการใช้ทั้งการตกแต่งภายในและภายนอก โดยผลิตภัณฑ์สำหรับตกแต่งภายในที่มีการขึ้นรูปโดยวิธีฉีดเข้าแม่พิมพ์จะมีปริมาณมากที่สุด และยังได้มีการพัฒนาพลาสติกเอปียเอสที่สามารถทนความร้อนได้สูงไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ภายนอกและภายในรถยนต์ ยกตัวอย่างเช่น แผงควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ตะแกรงหม้อน้ำรถยนต์ แผงหน้าปัดรถบรรทุก ซึ่งขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดและอัดร้อน ส่วนผลิตภัณฑ์ภายในบ้าน ได้แก่ เครื่องดูดฝุ่นสูญญากาศ ไม้เท้าผสม เครื่องเย็บผ้า โทรศัพท์ เครื่องพิมพ์เอกสาร กรอบคอมพิวเตอร์ ของเล่น ถึงสำหรับขนส่งของเหลวเครื่องเรือนและอุปกรณ์ภายในห้องน้ำ ลิ้นชักที่ใช้เก็บผักในตู้เย็นและอุปกรณ์อื่นๆ เป็นต้น

2.5 วัสดุผสม (Composite Materials) [15]

วัสดุผสม คือ วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบอย่างน้อย 2 ส่วนซึ่งแต่ละส่วนเป็นองค์ประกอบที่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้การพิจารณาวัสดุผสมอาศัยหลัก 3 ประการดังนี้

1. ส่วนผสมของทั้งคู่ต้องอยู่ในสัดส่วนที่พอเหมาะและมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 5
2. ส่วนผสมต้องมีสมบัติแตกต่างกันดังนั้นวัสดุผสมจึงมีสมบัติที่แตกต่างจากสมบัติของส่วนผสม เช่น ในกรณีพลาสติก แม้ว่าในกระบวนการผลิตจะมีการเติมสารเติมแต่งลงไปมากมายเพื่อช่วยในการขึ้นรูปและเหตุผลทางการค้า แต่พลาสติกดังกล่าวไม่ถูกเรียกว่าเป็นวัสดุเสริมแรง
3. ส่วนผสมต้องไม่กลืนกันเป็นเนื้อเดียวสามารถแบ่งเฟสอย่างชัดเจน

องค์ประกอบหลัก 2 ส่วนที่กล่าวถึงคือ ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) และส่วนของเมทริกซ์ (Matrix)

2.5.1 องค์ประกอบหลักของวัสดุผสม

1. ส่วนเสริมแรง (reinforcement)

ส่วนเสริมแรงเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับวัสดุผสมซึ่งเป็นส่วนที่มีความแข็งแรงและมีค่ามอดุลัสสูงจึงเป็นส่วนที่คอยรับแรงหลักของวัสดุผสม ลักษณะของส่วนเสริมแรงมีหลายแบบ ตัวอย่างเช่น ส่วนเสริมแรงแบบแผ่น แบบเป็นก้อน หรือผงที่มีขนาดเล็ก แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ส่วนเสริมแรงแบบเส้นใย (Fiber) ชนิดต่างๆ

2. ส่วนเมทริกซ์ (Matrix)

ส่วนเมทริกซ์เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน เพื่อให้ส่วนเสริมแรงอยู่ในตำแหน่งและมีการจัดเรียงตัวตามที่กำหนด โดยส่วนนี้อยู่ล้อมรอบและคอยปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียหายเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้น แสงแดด และอากาศ เป็นต้น ส่วนนี้จะมีความแข็งแรงและ

มีค่ามอดูลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์เป็นส่วนที่มีความต่อเนื่องทำให้สามารถถ่ายเทแรงที่ได้รับไปสู่ส่วนเสริมแรงได้ง่าย เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิกส์ เป็นต้น

2.5.2 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุผสม

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุผสม

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ	1. วัสดุดิบและเครื่องมือในการขึ้นรูปคอมโพสิตมีราคาสูง
2. มีสมบัติต่อน้ำหนักสูง เช่น ความแข็งแรงต่อน้ำหนัก	2. มีสมบัติในแนวขวางของการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงต่ำ
3. สามารถทำให้มีสมบัติแข็งแรงเฉพาะในทิศทางที่ต้องการได้	3. มีสมบัติด้านความเหนียวต่ำ
4. มีอายุการใช้งานนาน ด้านทานการสึกกร่อน	4. มีผลเสียกับสิ่งแวดล้อม เมื่อส่วนที่เป็นเมทริกซ์เกิดการเสียดสี
5. สามารถเพิ่มหรือลดสมบัติการนำความร้อนและการนำไฟฟ้า	5. ยากในการต่อ (Attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น
	6. ยากในการตรวจวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิต

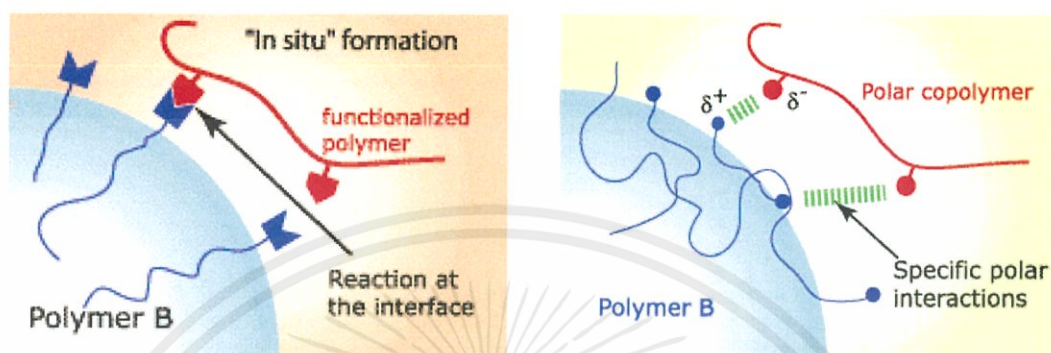
2.6 สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) [16]

สารคู่ควบไซเลน คือ สารที่ช่วยปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์และฟิลเลอร์หรือสารเสริมแรง ทำหน้าที่เหมือนเป็นสะพานเชื่อมระหว่างทั้งสองโมเลกุลไว้ โดยส่วนหนึ่งของโมเลกุลเป็นส่วนที่จะเกิดปฏิกิริยากับฟิลเลอร์ และอีกส่วนหนึ่งของโมเลกุลเป็นส่วนที่จะเกิดการรวมตัวหรือทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี เมื่อพื้นผิวฟิลเลอร์ได้รับการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนจะช่วยลดแรงดึงผิวของฟิลเลอร์หรือเปลี่ยนลักษณะพื้นผิวของฟิลเลอร์ที่มีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) เป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ทำให้สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ ซึ่งไม่เพียงช่วยให้การผสมเกิดได้ดีขึ้น แต่ยังช่วยปรับปรุงสมบัติโดยรวมของวัสดุผสมอีกด้วย โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. สารคู่ควบไซเลนที่เกิดปฏิกิริยา (Reactive Coupling Agents) เป็นการปรับปรุงพื้นผิวฟิลเลอร์โดยใช้สารที่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมระหว่างสองเฟส ซึ่งช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์และฟิลเลอร์โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น โมเลกุลของสารคู่ควบไซเลนจะประกอบด้วยหมู่ที่ว่องไว เช่น หมู่คาร์บอกซิลิกหรือหมู่อีพอกซี ดังรูปที่ 2.9 ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สารคู่ควบไซเลนที่ไม่เกิดปฏิกิริยา (Non-reactive Coupling Agents) เป็นการปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์และฟิลเลอร์โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวเพื่อให้เกิดการยึดเหนี่ยวโดยการสร้างแรงดึงดูดแบบแวนเดอร์วาลส์หรือเกิดพันธะไฮโดรเจน ดังรูปที่ 2.9 ข



ก. สารคู่ควบไซเลนที่ไม่เกิดปฏิกิริยา

ข. สารคู่ควบไซเลนที่ไม่เกิดปฏิกิริยา

รูปที่ 2.9 ชนิดของสารคู่ควบไซเลน

ที่มา : นิลบล เผือกบัวขาว (2550)

2.6.1 โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลน [17]

โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลนโดยทั่วไป คือ $X_3-Si-R-Y$ โดยที่ X คือ ตำแหน่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysable groups หรือ Alkoxy groups) โดย X เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำเกิดเป็นสารซิลานอล (Silanol) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของซิงค์ออกไซด์หรือฟิลเลอร์ได้ และสามารถทำปฏิกิริยาควบแน่นกันเองได้ (Self-condensation) และ Y คือ หมู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาหรือสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ (Organofunctional group)

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของสารคู่ควบไซเลนและการนำไปใช้งานกับพลาสติกชนิดต่างๆ

สารคู่ควบประเภทไซเลน	ชนิดของพลาสติกที่นำไปใช้
1. ไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน (Vinyl-triethoxy silane)	พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว พอลิโอเลฟิน
2. ไวนิลทริส-2-เมทอกซีเอทอกซีไซเลน (Vinyl-tris (2-methoxy) ethoxysilane)	พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิสไตรีน เอบีเอส
3. 3-อะคริลอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-acryloxypropyl trimethoxy Silane)	เอสเอเอ็น และพอลิเมทิลเมทาไครเลต

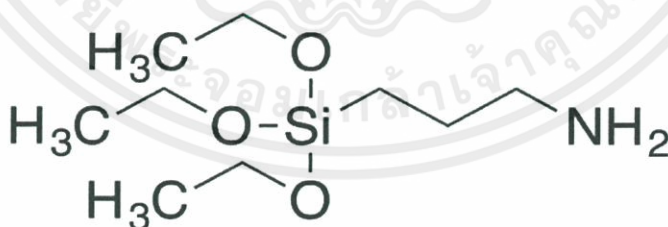
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) ตัวอย่างของสารคู่ควบไซเลนและการนำไปใช้งานกับพลาสติกชนิดต่างๆ

สารคู่ควบประเภทไซเลน	ชนิดของพลาสติกที่นำไปใช้
4. 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyltriethoxysilane)	เอบีเอส อีพอกซี พอลิเอไมด์ พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีน พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิคาร์บอเนต ฟีนอลิก และเมลามีนเรซิน
5. 3-ไกลซิโดอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane)	อีพอกซี พอลิเอสเทอร์ พอลิยูรีเทน พอลิคาร์บอเนต พอลิสไตรีน เอบีเอส เอสเอเอ็น พอลิเอไมด์ พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีน พอลิซัลไฟด์ ฟีนอลิก และเมลามีนเรซิน
6. 3-เมอร์แคปโทโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-Mercaptopropyltrimethoxysilane)	พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิสไตรีน พอลิซัลโฟน พอลิซัลไฟด์ ฟีนอลิก และเมลามีนเรซิน

สารคู่ควบไซเลนที่ผลิตออกทางการค้าจะมีหมู่ฟังก์ชัน (ตำแหน่ง Y) ที่แตกต่างกันออกไป เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานกับพอลิเมอร์แต่ละชนิด เช่น สารคู่ควบไซเลนที่ประกอบด้วยหมู่ไวนิล โดยนำไปใช้งานกับพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ในขณะที่สารคู่ควบไซเลนที่ประกอบด้วยหมู่อีพอกซี หรือหมู่อะมิโนจะนำไปใช้งานกับพอลิเอไมด์อีพอกซีเรซินหรือพอลิยูรีเทนชนิดเทอร์โมเซตพลาสติก เป็นต้น

2.6.2 โครงสร้างของ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน [18]



รูปที่ 2.10 โครงสร้าง 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน

ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/\(3-Aminopropyl\)triethoxysilane](https://en.wikipedia.org/wiki/(3-Aminopropyl)triethoxysilane)

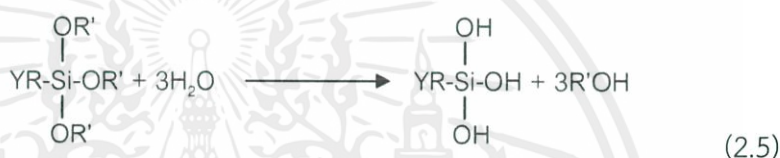
3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyltriethoxysilane, APTES) เป็นสารคู่ควบไซเลนที่มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีสูตรเคมี $C_9H_{23}NO_3Si$ มวลโมเลกุล 221.37 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 0.946 กรัมต่อมิลลิลิตร จุดหลอมเหลว -70 องศาเซลเซียส จุดเดือด 217

องศาเซลเซียส สามารถละลายในน้ำได้อย่างฉับพลัน และยังสามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์ อะโรมาติก และอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน นำมาใช้เป็นสารคู่ควบไซเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันเอไมด์ (Aminofunctional silane coupling agent) ที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุอินทรีย์และอนินทรีย์ จากโครงสร้างจะเห็นว่าโมเลกุลของซิลิคอนอยู่ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงช่วยยึดเกาะกับพื้นผิววัสดุ และมีหมู่ของเอไมด์ (Amine) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาได้กับวัสดุเทอร์โมเซตพลาสติก เทอร์โมพลาสติก และอีลาสโตเมอร์

2.6.3 กลไกการสร้างพันธะ [19]

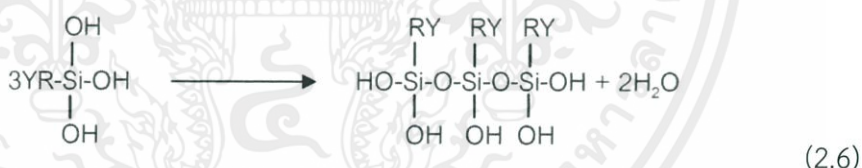
กลไกโดยทั่วไปของสารไซเลนที่มีหมู่เอทอกซี (Ethoxy groups) ในการสร้างพันธะกับพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล เป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำ



จากสมการ (2.5) แสดงปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารไซเลนกับน้ำ โดยทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของหมู่เอทอกซี (X หรือ OR') เกิดเป็นสารไซลานอลซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโครงสร้าง ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย

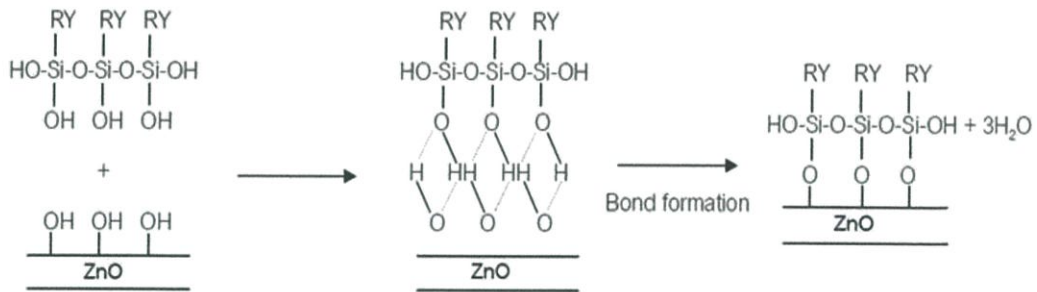
ขั้นตอนที่ 2: การเกิดปฏิกิริยาควบแน่น



จากสมการ (2.6) แสดงปฏิกิริยาการควบแน่นกันเองของสารไซลานอล ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาอาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย โดยทั่วไปแล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเดียวกับของกรณีการเกิดไฮโดรไลซิส

ขั้นตอนที่ 3: การสร้างพันธะระหว่างสารไซลานอลและซิงค์ออกไซด์

จากสมการ (2.7) แสดงการสร้างพันธะระหว่างสารไซลานอลและซิงค์ออกไซด์ โดยการสร้างพันธะอาจเกิดขึ้นภายใต้สภาวะกรดหรือเบสเพื่อเร่งให้กลไกการสร้างพันธะเกิดได้เร็วขึ้น นอกจากการทำปฏิกิริยาของไซลานอลกับหมู่ไฮดรอกซิลของซิงค์ออกไซด์แล้วยังมีการสร้างพอลิไซลอกเซนเกิดขึ้นด้วย



(2.7)

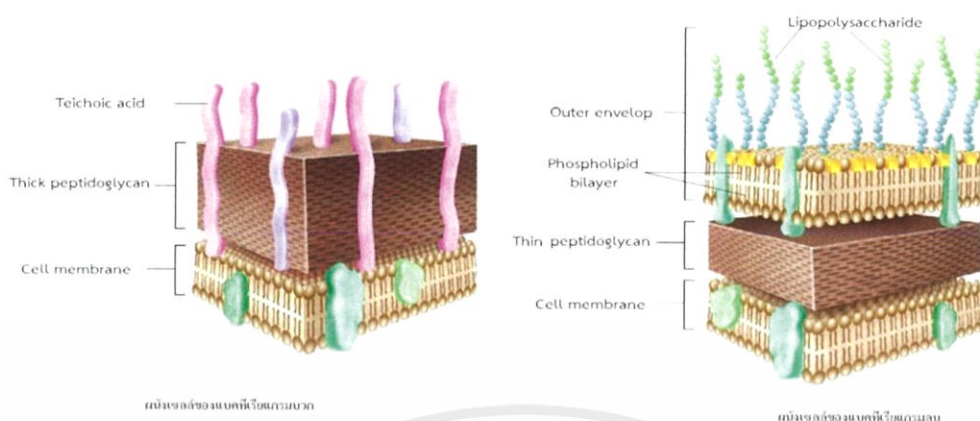
ขั้นตอนที่ 4: การเกิดแรงกระทำระหว่างกันของพอลิเมอร์และสารไซเลน

ในขั้นตอนนี้พอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์สามารถเข้ากับซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารไซเลนได้มากขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงผิวด้วยสารไซเลนมีผลทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของซิงค์ออกไซด์ลดลง และสารไซเลน ณ ตำแหน่ง Y ซึ่งเป็นหมู่ที่สามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์หรือมีความสามารถในการเข้ากันกับพอลิเมอร์ได้ ทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดีขึ้น

2.7 แบคทีเรีย [20]

แบคทีเรียเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็ก ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยส่วนใหญ่มีเซลล์เดียวสามารถพบได้ทั่วไป เช่น อากาศ ดิน แหล่งน้ำ ตามร่างกายของมนุษย์ จนกระทั่งเครื่องอุปโภคบริโภคต่างๆ ซึ่งแบคทีเรียบางชนิดสามารถก่อให้เกิดโรคในสิ่งมีชีวิตได้ในคน สัตว์ หรือพืช โดยอาศัยกลไกทางชีวเคมี โรคที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงมากน้อยต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนของแบคทีเรานั้นๆ

ในทางชีววิทยาแบคทีเรียสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามสภาพการติดสีที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียคือแบคทีเรียแกรมลบซึ่งสามารถย้อมติดด้วยสีแดง ในทางตรงกันข้ามคือแบคทีเรียแกรมบวกสามารถย้อมติดด้วยสีม่วง ทั้งนี้เนื่องจากเพราะผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกมีความสามารถในการที่จะรับสารพวยกย้อมสีม่วงได้ดีกว่า อีกทั้งในแบคทีเรียแกรมลบมีชั้นเพปทิโดไกลแคน (Peptidoglycan) ที่บางกว่าแต่จะเพิ่มขึ้นของลิโปโปรตีน (Lipoprotein) ฟอสโฟลิพิด (Phospholipid) และสารพอลิเมอร์เสริมเข้ามาอยู่ติดกับชั้นเพปทิโดไกลแคน โดยโครงสร้างของเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบและแบคทีเรียแกรมบวกแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบและแบคทีเรียแกรมบวก
ที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com>

2.7.1 แบคทีเรียอีโคไล (*Escherichia coli*, *E.coli*) [21]

แบคทีเรียอีโคไลเป็นแบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์ม กลุ่มของแบคทีเรียในตระกูลเอนเทอโรแบคทีเรียซีอี (Enterobacteriaceae) ที่มีรูปร่างท่อนสั้น ติดสีแกรมลบไม่สร้างสปอร์และมีขนาดเล็กมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ส่วนใหญ่มีเซลล์เดี่ยวและมีโครงสร้างเซลล์ที่ไม่ซับซ้อนมาก โดยมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30 ถึง 37 องศาเซลเซียส สามารถเจริญได้ดีในทั้งสภาพที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน สามารถเจริญเติบโตในช่วงอุณหภูมิของร่างกายได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมบวก มีอยู่ตามธรรมชาติในลำไส้ใหญ่ของสัตว์และมนุษย์ เป็นสาเหตุของโรคที่เกิดขึ้นในคนได้มากกว่า 1 โรค เช่น โรคท้องร่วง ไตอักเสบ โลหิตเป็นพิษ กระเพาะปัสสาวะอักเสบ ปอดอักเสบ และเยื่อหุ้มสมองอักเสบ เป็นต้น

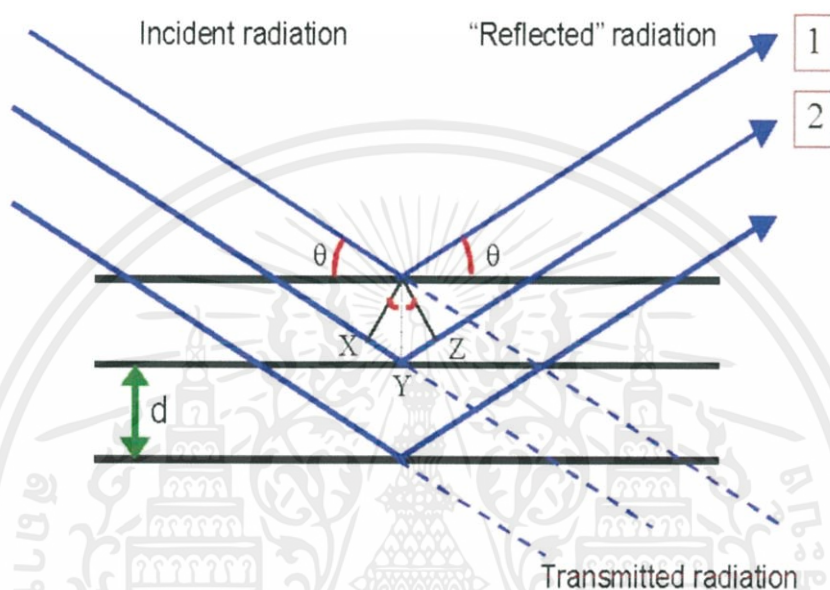
2.8 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction, XRD) [22]

เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน เป็นเครื่องมือวิเคราะห์พื้นฐานชนิดการวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย (Non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (Crystal structure) การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์รวมถึงความรู้เกี่ยวกับระบบผลึก

เมื่อรังสีเอ็กซ์กระทบผิวหน้าของผลึกโดยทำมุม θ รังสีเอ็กซ์บางส่วนจะเกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้าและอีกส่วนหนึ่งจะผ่านไปยังชั้นถัดไปของอะตอมซึ่งบางส่วนก็จะเกิดการกระเจิงเมื่ออะตอมในผลึกมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบจะมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่าๆกัน รังสีเอ็กซ์ที่

ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นลำขนานกัน ซึ่งสิ่งสำคัญในการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ขึ้นอยู่กับสภาวะ 2 ประการคือ

1. รังสีตกกระทบ รังสีเลี้ยวเบน และเส้นตั้งฉากกับผิวหน้าจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน
2. ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมควรมีระยะใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 2.12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ที่มา: <http://www.slri.or.th>

จากรูปที่ 2.12 เมื่อรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นแน่นอน λ ตกกระทบผลึกทำมุม θ กับระนาบอะตอมจะมีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ถ้าคลื่นเลี้ยวเบนของรังสีมีเฟสเสริมกันจะได้ระยะที่ลำของรังสีเส้นที่ 2 เคลื่อนไปมากกว่าลำของรังสีเส้นที่ 1 เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสี ซึ่งจะสอดคล้องกับกฎการเลี้ยวเบนของแบร็ก (Bragg's law)

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.8)$$

เมื่อ n คือ ค่าที่เป็นจำนวนเต็ม

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม

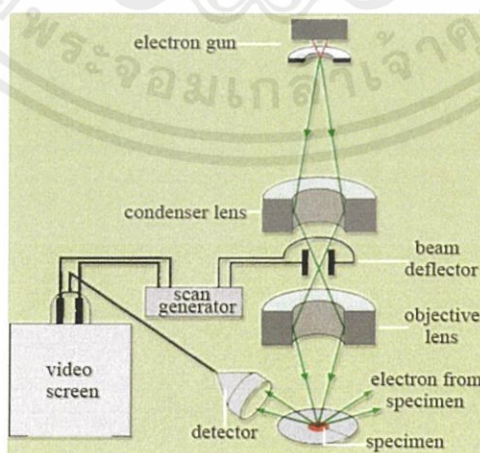
θ คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบและระนาบของผลึก

สำหรับการสะท้อนของรังสีอื่นๆที่ไม่สอดคล้องกับกฎการเลี้ยวเบนของแบร็กจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน

2.9 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) [23]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาพื้นผิวของตัวอย่าง โดยเฉพาะศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาเช่น ลักษณะรูปร่าง ลวดลายเป็นผิวตัวอย่างตลอดจนขนาดของตัวอย่าง โดยใช้กำลังขยายสูงและเทคนิคส่องลำอิเล็กตรอนกราดไปบนผิวหน้าของตัวอย่าง ทำให้เกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอน (Scattered electron) และเกิดสัญญาณเพื่อใช้ในการสร้างภาพที่สามารถเห็นความลึกเกิดเป็นภาพสามมิติ สามารถศึกษาทั้งตัวอย่างทางชีวภาพและวัสดุศาสตร์ การประยุกต์ใช้เทคนิคนี้มีหลากหลาย เช่น ใช้ศึกษาการกระจายของเม็ดสีที่แขวนลอยอยู่ในสี โครงสร้างของรูพรุนในพอลิเมอร์ประเภทโฟม การพองหรือการแตกออกของวัสดุที่ใช้เคลือบผิว การแยกเฟสในพอลิเมอร์ผสม และลักษณะการแตกของผิวหน้าระหว่างวัสดุและสารที่ใช้อยึดติด เป็นต้น

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตทัศน์ได้เลย



รูปที่ 2.13 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>

2.10 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer-Emmett-Teller, BET) [24]

พื้นที่ผิวของสารเป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อนำวัสดุไปใช้งาน โดยการวัดพื้นผิวสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ใช้ในการดำเนินงานปริญญานิพนธ์นี้จะอาศัยการวัดจากปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารแล้วมาคำนวณเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area)

แก๊สไนโตรเจนบนผิวของวัสดุที่อยู่ในสถานะของแข็งที่มีลักษณะเป็นโมเลกุลหลายชั้น (Multilayer) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน พบว่าแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว ซึ่งจากผลการศึกษาสามารถเขียนเป็นสมการที่เรียกว่า “สมการของ BET”

$$\frac{P}{V(P_0-P)} = \frac{1}{V_m C} + \left[\frac{(C-1)}{V_m C} \right] \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (2.9)$$

เมื่อ P คือ ความดันของแก๊สที่เป็นตัวถูกดูดซับ

P_0 คือ ความดันอิ่มตัวของแก๊สที่เป็นตัวถูกดูดซับ

V คือ ปริมาตรของแก๊สที่เป็นตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ความดัน P

V_m คือ ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิวของวัสดุด้วยความหนา 1 ชั้นโมเลกุลเต็ม

พอดี

C คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานในการดูดซับ

จากสมการของ BET สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุได้โดยการนำค่าปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิวของสาร (V_m) ไปคำนวณหาจำนวนโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับในสภาพ 1 ชั้นโมเลกุล แล้วนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้สมการ (2.10)

$$S_{sp} = \frac{N_A \cdot a_{max} \cdot S_0}{W} \quad (2.10)$$

เมื่อ S_{sp} คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ

N_A คือ เลขอาโวกาโดร = 6.02×10^{23}

a_{max} คือ จำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับใน 1 ชั้นโมเลกุล = $V_m / 22414$

S_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ = 16.2×10^{-20}

W คือ น้ำหนักของวัสดุหรือตัวดูดซับ

2.11 การทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical Properties Testing) [25-26]

สมบัติทางกล คือ พฤติกรรมอย่างหนึ่งของวัสดุที่แสดงออกมา เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำโดยแรงภายในของวัสดุที่เกิดขึ้นเพื่อต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำ เรียกว่า ความเค้น (Stress) วัดเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ แสดงดังสมการ (2.11) และส่วนอัตราส่วนระหว่างความยาวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากวัสดุนั้นรับแรงไว้ไม่ไหวต่อความยาวเดิม เรียกว่า ความเครียด (Strain) ซึ่งความเครียดนิยมบอกเป็น เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ (Elongation) แสดงดังสมการ (2.12)

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_0} \quad (2.11)$$

เมื่อ F_1 คือ แรงที่ใช้ในการดึง (N)

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน (m^2)

σ_1 คือ ความเค้นเนื่องจากการดึงชิ้นงานตัวอย่าง (Nm^{-2}, Pa)

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad (2.12)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของชิ้นงาน ณ จุดที่เกิดการแตกหัก

L_0 คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน

ϵ คือ การยืดตัวของชิ้นงาน ณ จุดขาด หน่วย เปอร์เซ็นต์

ทั้งความเค้นและความเครียดนี้ เป็นสิ่งที่น่าสนใจนำมาใช้พิจารณาถึงสมบัติทางกลของวัสดุ เช่น ความเปราะ (Brittleness) ความเหนียว (Toughness) ความแข็งแรงแรง (Stiffness) และความแข็งแรง (Strength)

2.11.1 การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile Testing) [27-29]

ในการออกแบบส่วนใหญ่ จะใช้ค่าซึ่งได้จากการทดสอบนี้ไปใช้ในการคำนวณเพื่อกำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน โดยทำการดึงชิ้นงานทดสอบจนขาดออกจากกัน ในขณะเดียวกันจะบันทึกแรงที่ใช้ในการดึง และระยะยืดของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องบันทึก การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง ถ้าทำการดึงชิ้นงานที่มีสมบัติแข็งเปราะอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งวัสดุเกิดการแตกหัก ผลจากการวัดแรงที่มากระทำต่อวัสดุ ณ ตำแหน่งที่เกิดการแตกหักเรียกว่า ความเค้นสูงสุดเนื่องจากแรงดึง (Ultimate Tensile Stress) หรือ ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)

ตามกฎของฮุก (Hook's law) สำหรับวัสดุอุดมคติที่มีสมบัติยืดหยุ่น ความเค้นเป็นสัดส่วนกับความเครียด อัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดนี้เป็นค่าคงที่ เรียกว่า มอดูลัส (Modulus, E)

สำหรับการให้ความเค้นใดๆกับวัสดุที่มีมอดูลัสต่ำ วัสดุนั้นจะแสดงค่าความเครียดหรือระยะยืดหรือการสูญเสียรูปร่างของชิ้นงานได้สูงกว่าวัสดุที่มีมอดูลัสสูง ดังนั้น มอดูลัสของวัสดุจึงหมายถึงความสามารถในการต้านทานต่อการสูญเสียรูปร่างของชิ้นงานนั่นเอง ในความเป็นจริงพลาสติกและอีลาสโตเมอร์ส่วนใหญ่จะประพฤติตัวตามแบบฮุกเกียน (Hookean's Behavior) เฉพาะเมื่อทำการทดสอบด้วยอัตราเร็วในการยืดตัวต่ำ บางครั้งเรียกมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นว่า อีลาสติกมอดูลัส (Elastic Modulus) หรือ มอดูลัสของยังส์ (Young's Modulus) การวัดมอดูลัสนี้ทำได้โดยการสร้างเส้นตรงสัมผัสกับช่วงต้นของเส้นโค้งความเค้นและความเครียด จากนั้นคำนวณค่าความชันของเส้นสัมผัส ดังสมการ (2.13)

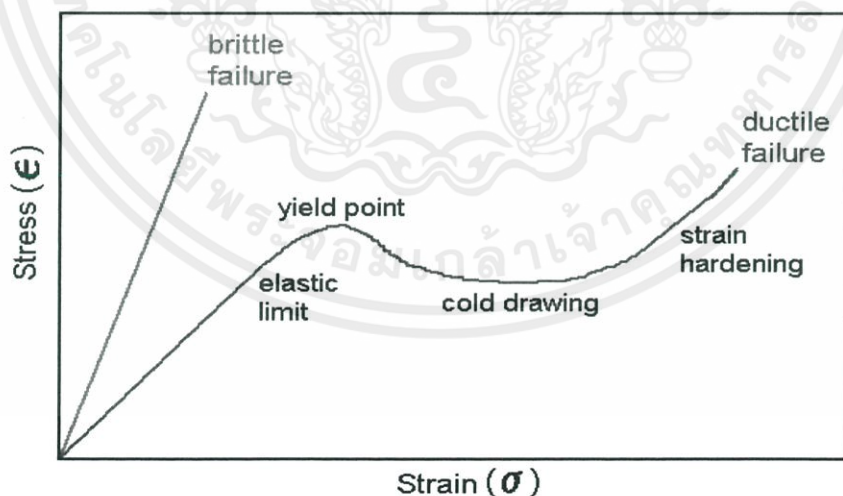
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (2.13)$$

เมื่อ E คือ มอดูลัส หน่วย ปาสคาล

$\Delta\sigma$ คือ ความแตกต่างของความเค้นระหว่างสองตำแหน่งบนเส้นตรง

$\Delta\epsilon$ คือ ความแตกต่างของความเครียดระหว่างสองตำแหน่งบนเส้นตรง

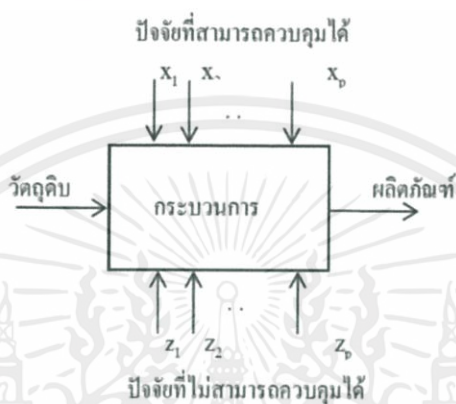
การเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับแรงดึงของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ไม่ว่าจะเป็นเทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตพลาสติก พอลิเมอร์ผสม พอลิเมอร์คอมโพสิต และอีลาสโตเมอร์ จะแตกต่างกันตามลักษณะการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ สมบัติด้านความเป็นผลึก และความแข็งแรงในการยึดติดกันระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดกับวัสดุผสม (Adhesive Strength of Interface) ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างจากกราฟความเค้นและความเครียด ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง
ที่มา: <http://classes.mst.edu>

2.12 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) [30]

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ตามวัตถุประสงค์ของการทดลองซึ่งนั่นคือเพื่อศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการผลิต

ที่มา: คมสัน สิทธิยอง (2555)

จากรูปที่ 2.15 กระบวนการคือการนำเอาทรัพยากรทั้งหลายที่เป็นปัจจัยของการผลิตได้แก่ คน เครื่องจักร วัตถุดิบ และวิธีการ มาเปลี่ยนให้เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งตัวแปรในกระบวนการผลิตบางชนิดเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้แต่บางตัวก็เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้

โดยหลักการและขั้นตอนในการออกแบบการทดลองและการใช้วิธีเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองมีขั้นตอนในการดำเนินการดังต่อไปนี้

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา โดยการศึกษาและทำความเข้าใจในกระบวนการ เพื่อกำหนดปัญหาและวัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง
2. เลือกปัจจัยและกำหนดค่าของปัจจัยที่ทำการทดลอง โดยตรวจสอบดูว่าปัจจัยใดมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของผลการทดลอง
3. เลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการวัดผลของกระบวนการ โดยจะเลือกตัวแปรตอบสนองที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่ทำการทดลองอยู่
4. เลือกวิธีการออกแบบการทดลอง ในการเลือกวิธีการออกแบบการทดลองจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองเสมอ เนื่องจากการออกแบบการทดลองมีมากมายหลายรูปแบบล้วนแต่มีรูปแบบเฉพาะและมีความเหมาะสมกับการทดลองที่แตกต่างกันนอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงขนาดของตัวอย่าง จำนวนการทดลองซ้ำ และการบล็อกด้วย

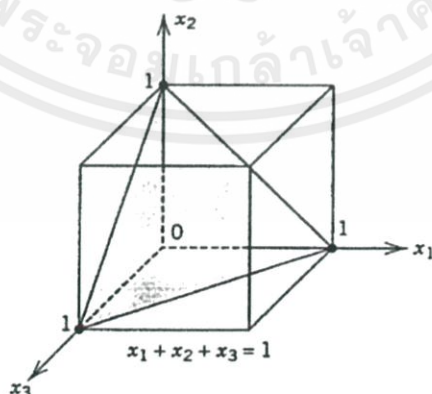
5. ทำการทดลองและติดตามดูการทำงานของกระบวนการอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกี่ยวกับการทดลองในขั้นนี้จะทำให้การทดลองนี้ใช้ไม่ได้

6. วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติ คือ การนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาข้อสรุปว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่

7. สรุปผลการทดลองและทำข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้

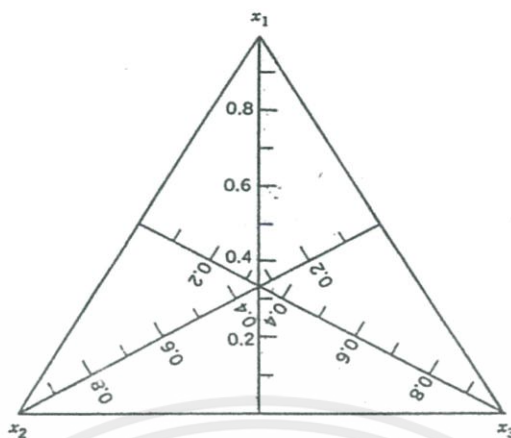
2.12.2 การทดลองแบบผสม (Mixture Experiment)

การออกแบบการทดลองแบบผสม คือ การทดลองวิเคราะห์ค่าผลตอบที่เป็นฟังก์ชันของเปอร์เซ็นต์ของส่วนประกอบ (Components) ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบความเหนียวของเส้นใยผ้าที่เป็นผลมาจากสัดส่วนของการผสมส่วนประกอบของการทอเส้นใยสามชนิดคือ ใยฝ้าย ใยสังเคราะห์ และใยลินิน เป็นต้น มีวัตถุประสงค์คือสำรวจผลตอบเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของแต่ละส่วนประกอบที่จะทำให้ผลตอบมีค่าที่ดีที่สุดหรือเป็นไปตามที่ผู้ทดลองต้องการ การทดลองแบบผสมเป็นการออกแบบพื้นผิวผลตอบประเภทหนึ่งที่มีข้อจำกัด คือ ระดับของปัจจัยหรือส่วนประกอบจะไม่เป็นอิสระต่อกัน ยกตัวอย่างเช่น ถ้าของผสมที่จะทำการทดลองประกอบไปด้วย 3 ส่วนผสม แล้วเป็นไปได้ว่าแต่ละส่วนผสมจะถูกใช้เป็นส่วนตั้งแต่ 0 เปอร์เซ็นต์จนถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และผลรวมของแต่ละส่วนผสมจะต้องเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์พอดีหรือคิดเป็น 1 ส่วน ข้อจำกัดนี้ถูกแสดงเป็นกราฟฟิก (Graphic) ดังรูปที่ 2.16 ช่องว่างระหว่างปัจจัย (ส่วนที่แรเงา) สำหรับการออกแบบจะรวมเอาค่าทั้งหมดของทั้งสามส่วนผสมที่อยู่บนส่วนของเส้นตรง $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ ซึ่งแต่ละส่วนผสมจะถูกจำกัดด้วยขอบเขต 0 และ 1 สำหรับแต่ละจุดยอดของสามเหลี่ยมเรียกว่าเป็น ส่วนผสมบริสุทธิ์ (Pure Blend) นั่นคือส่วนผสมที่มี 100 เปอร์เซ็นต์ของ ส่วนประกอบนั้นเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.16 ช่องว่างที่ถูกจำกัดของปัจจัยของส่วนผสมที่มี 3 ส่วนผสม

ที่มา: คมสัน สิทธิยอง (2555)



รูปที่ 2.17 ระบบโคออร์ดิเนตแกนสามเส้น

ที่มา: คมสัน สิทธิยอง (2555)

เมื่อมี 3 ส่วนผสมบริเวณของการทดลองที่ถูกจำกัดสามารถเขียนอยู่บนกราฟแกนสามเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.17 แต่ละด้านของทั้งสามด้านจะไม่มีส่วนผสมของทั้งสามส่วนประกอบนี้ และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆถึง 100 เปอร์เซ็นต์ (ชื่อของส่วนประกอบจะถูกเขียนอยู่ที่จุดยอดที่อยู่ตรงกันข้าม)

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชูไค และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลและการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นฟิล์มวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (เอชดีพีอี) กับนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวที่ความเข้มข้นของนาโนซิงค์ออกไซด์ต่ำด้วยสารคู่ควบไซเลน พบว่าความต้านทานแรงดึงและร้อยละการยืดของชิ้นทดสอบที่จุดขาด (Elongation at break) ของแผ่นฟิล์มเอชดีพีอีที่ผสมนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวดีขึ้น โดยมีความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดคือ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ส่วนการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นฟิล์มเอชดีพีอีที่ผสมนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว สามารถยับยั้งได้ทั้งแบคทีเรียชนิดอีโคไลและชนิดเอชออเรียส (*S. aureus*) สุดท้ายยังพบว่าการดูดกลืนแสงในช่วงของรังสียูวีของแผ่นฟิล์มเอชดีพีอีที่ใส่นาโนซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

หลุน และคณะ [4] พบว่าการผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับซิงค์ออกไซด์ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-อะมิโนโพรพิลไตรอโทกซีไซเลน ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์ยึดติดกันมากขึ้น ช่วยให้มีการกระจายตัวของซิงค์ออกไซด์มากขึ้นทำให้เสริมคุณสมบัติทางกลของวัสดุผสม

ปาร์ค และคณะ [31] ศึกษาผลของสารคู่ควบไซเลนต่อการเชื่อมโยง (Crosslink density) ของซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide, SiO₂) และความเสถียรทางความร้อนของวัสดุผสมยางกับซิลิกอนไดออกไซด์ พบว่าการเชื่อมโยงของซิลิกอนไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนจะมีปริมาณมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกอนไดออกไซด์ที่ยังไม่ได้ผ่านการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลน ซึ่งการเพิ่มปริมาณการเชื่อมโยงนี้มีผลทำให้สมบัติทางกลดีขึ้น ส่วนวัสดุผสมยางกับซิลิกอนไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงจะมีการเชื่อมโยงมากขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้ความเสถียรทางความร้อนและสมบัติทางกลที่ดีขึ้นตาม

ลิ และคณะ [32] ได้นำพอลิยูรีเทนมาทำการเคลือบด้วยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะทำให้แผ่นฟิล์มพอลิยูรีเทนมีค่ามอดูลัสของยังส์ ความต้านทานแรงดึง การทนทานต่อแสง (Ultravioletlight fastness) และการต้านทานต่อสภาวะ (Climate Resistance) สูงกว่าแผ่นฟิล์มพอลิยูรีเทนปกติ ส่วนการทดสอบคุณสมบัติในการยับยั้งแบคทีเรียโดยใช้วิธีอากาศไตลูลชัน (Agar dilution) ผลปรากฏว่าสามารถยับยั้งแบคทีเรียชนิดอีโคไลได้มากกว่าชนิดบาซิลลัส ซับทิลิส (B. subtilis)

ชี และคณะ [33] ศึกษาผลของสารคู่ควบไซเลน 2 ชนิด ที่มีผลต่อพฤติกรรมการทนแรงกระแทกของวัสดุผสมพอลิเอไมด์กับซิงค์ออกไซด์ โดยใช้สารคู่ควบไซเลน 3-อะมิโนโพรพิลไตรอโทกซีไซเลน และ 3-ไกลซิดอกซีโพรพิลไตรเมโทกซีไซเลน พบว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนต่างชนิดและปริมาณที่ต่างกันจะส่งผลให้มีปฏิริยาการตอบสนองระหว่างพื้นผิวสัมผัสพอลิเอไมด์กับซิงค์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน และปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนต้องเหมาะสมจึงจะสามารถพัฒนาสมบัติการทนแรงกระแทกได้

ณัฐวตล และคณะ [34] ทำการผสมแผ่นฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับซิงค์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2-10 โดยน้ำหนัก พบว่าการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิดอีโคไลและชนิดเอซอเรียสได้ต้องใช้ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ขั้นต่ำร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และการผสมซิงค์ออกไซด์จะทำให้แผ่นฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความทนต่อแรงดึงมากขึ้น แต่ความต้านทานต่อการฉีกขาดของวัสดุผสมแผ่นฟิล์มยังต่ำกว่าแผ่นฟิล์มปกติ

พัฒนิตา [35] การผสมพลาสติกเอปียเอสและอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ด้วยสารคู่ควบไซเลน พบว่าทำให้การกระจายตัวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในพลาสติกเอปียเอสดีขึ้น และยังส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลในด้านค่ามอดูลัสของยัง การทนต่อแรงดึงและความเค้น ณ จุดแตกหักจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย

3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนและออกทิลไตรเอทอกซีไซเลน ส่วนค่าการต้านทานต่อแรงกระทำจะลดลงเมื่อเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและยังไม่ปรับปรุงพื้นผิว

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าซิงค์ออกไซด์มีบทบาทสำคัญในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและสมบัติทางกลของวัสดุผสม แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีข้อจำกัดของประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียซึ่งจะมีการศึกษาพัฒนาต่อไปในปริญญานิพนธ์นี้

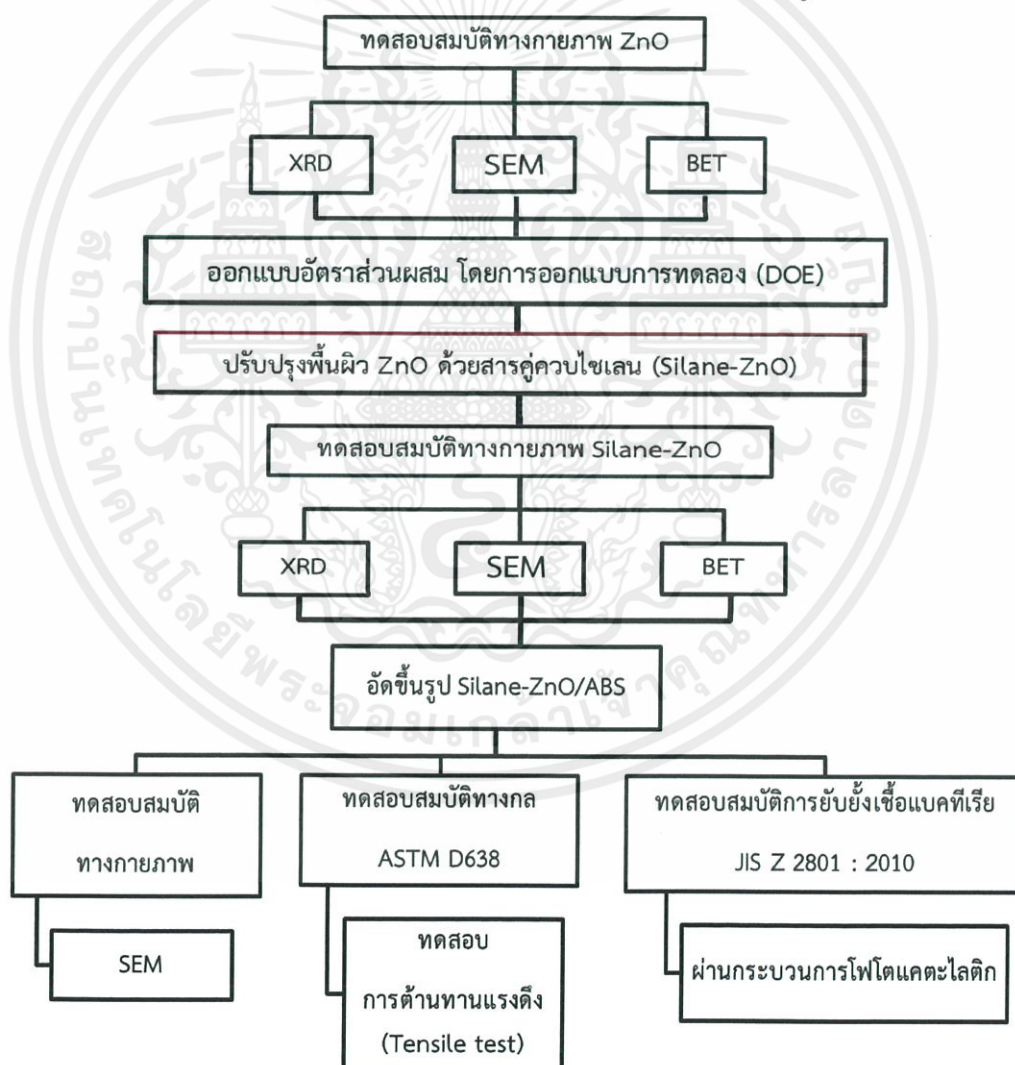


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

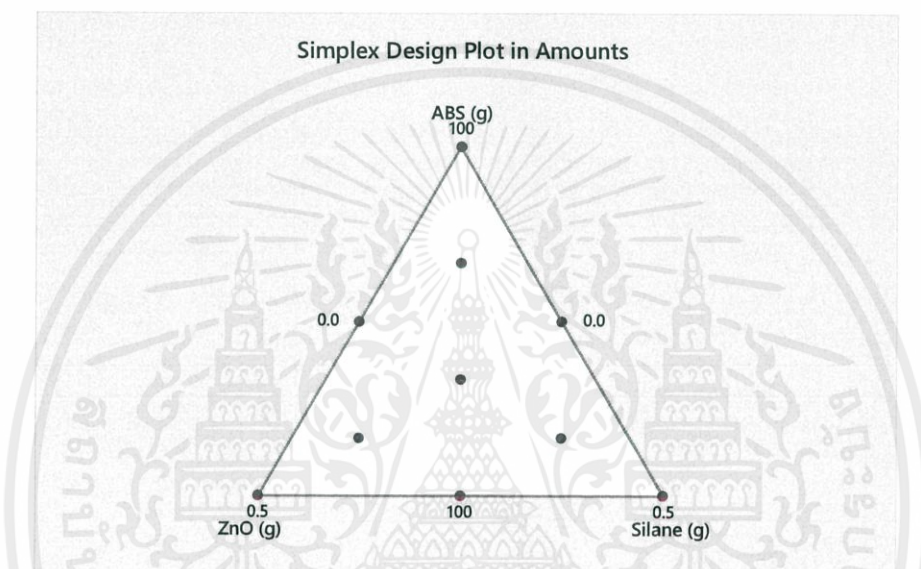
งานปริญญาานิพนธ์นี้ทำการศึกษามลของกระบวนการโฟโตแคตะไลติก ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เอสเชอริเชีย โคลิหรืออีโคไล (*Escherichia coli*, *E.coli*) ของพลาสติกอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอีน- สไตรีน หรือ เอบีเอส (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) ที่มีการผสมซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (3-Aminopropyltriethoxysilane, APTES) และศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของวัสดุผสมเอบีเอส โดยขั้นตอนการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานปริญญาานิพนธ์

3.1 การออกแบบอัตราส่วนผสม

การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมเอบีเอส ด้วยโปรแกรมมินิแทบ (Minitab) เลือกการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) โดยใช้การทดลองแบบผสม (Mixture design) จะได้อัตราส่วนผสมดังรูปที่ 3.2 หรือ ตารางที่ 3.1 โดยกำหนดช่วงอัตราส่วนของพลาสติกเอบีเอส ซิงค์ออกไซด์ และสารคู่ควบไซเลน เป็น 99.5 ถึง 100 กรัม 0 ถึง 0.05 กรัม และ 0 ถึง 0.05 กรัม ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของวัสดุผสมเอบีเอส

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของวัสดุผสมเอบีเอส

การทดลอง	เอบีเอส (กรัม)	ซิงค์ออกไซด์ (กรัม)	สารคู่ควบไซเลน (กรัม)
1	100.00	0.00	0.00
2	99.75	0.00	0.25
3	99.50	0.00	0.50
4	99.83	0.08	0.08
5	99.58	0.08	0.33
6	99.67	0.17	0.17
7	99.75	0.25	0.00
8	99.50	0.25	0.25
9	99.58	0.33	0.08
10	99.50	0.50	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (X-ray Diffractometer, XRD)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
3. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Brunauer-Emmett-Teller, BET)

3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

นำซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมาศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด และหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว

3.3 การปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์

3.3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

1. ซิงค์ออกไซด์
2. สารคู่ควบไซเลน (3-Aminopropyltriethoxysilane, APTES)
3. เอทานอล
4. เครื่องซั่ง 4 ตำแหน่ง
5. ซ้อนตักสาร
6. ปีกเกอร์
7. เครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer)
8. แท่งแม่เหล็กคนสาร (Magnetic Stirring bar)
9. ตู้อบ
10. ถ้วยระเหยสาร

3.3.2 ขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์

1. นำน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตรผสมเข้ากับเอทานอลปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร ทำการกวนผสมเป็นเวลา 10 นาที
2. ซั่งปริมาณซิงค์ออกไซด์และสารคู่ควบไซเลน ตามการทดลองแบบผสมที่ได้ออกแบบอัตราส่วนผสมไว้ดังตารางที่ 3.1

3. เมื่อครบ 10 นาที นำซิงค์ออกไซด์และสารคู่ควบไซเลนที่ซั่งตามอัตราส่วนผสมใส่ในสารละลายเอทานอลที่ได้เตรียมไว้แล้ว และทำการกวนผสมต่ออีก 45 นาที

4. นำสารที่ได้ไปอบอีก 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

3.4 การเตรียมชิ้นงานและขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผสมเอบีเอส

3.4.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

1. เม็ดพลาสติกเอบีเอส
2. ซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน
3. เครื่องผสมเม็ดพลาสติกแบบปิด (Internal Mixture)
4. เครื่องกดอัดพลาสติก (Compression Machine)
5. เครื่องบดเม็ดพลาสติก
6. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
7. ซ้อนตักสาร

3.4.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานวัสดุผสมเอบีเอส

1. นำเม็ดพลาสติกเอบีเอสไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. ชั่งน้ำหนักซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนและเม็ดพลาสติกเอบีเอสสำหรับผสม ตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1 ตามลำดับ
3. นำเม็ดพลาสติกเอบีเอสและซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนไปผสมในเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการผสม 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 นาที

4. นำวัสดุผสมเอบีเอสจากเครื่องผสมแบบปิดใส่ในเครื่องบดเม็ดพลาสติก

3.4.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผสมเอบีเอส

1. นำเม็ดวัสดุผสมเอบีเอสไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. ชั่งเม็ดวัสดุผสมเอบีเอส ปริมาณ 15 กรัม ใส่ลงในแม่พิมพ์ขึ้นงานทดสอบ โดยใช้แม่พิมพ์ตามมาตรฐาน ASTM D638 และ มาตรฐาน JIS Z 2801
3. ทำการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 125 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ให้ความร้อนก่อนอัดขึ้นรูป (Preheating) 5 นาที เวลาในการอัดขึ้นรูป (Pressing) 5 นาที และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Rapid Cooling) โดยแทนหล่อเย็นเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นรอให้ชิ้นงานเย็นตัวในอุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมเอปียเอส

3.5.1 วัสดุอุปกรณ์

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

3.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

นำชิ้นงานมาส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค และรายละเอียดลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างชิ้นงาน

3.6 การทดสอบสมบัติทางกล

3.6.1 ขั้นตอนการทดสอบ

ทดสอบการต้านทานแรงดึง (Tensile test) ตามมาตรฐาน ASTM D638

3.7 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

3.7.1 การเตรียมสารละลายสำหรับเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียอีโคไล

3.7.1.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

1. สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate Buffer Solution, PBS)
2. อาหารเหลวเลี้ยงเชื้อทริปติกชอย (Tryptic Soy Broth, TSB)
3. วัฒนธรรมเลี้ยงเชื้อเพลทเคาทอะการ์ (Plate Count Agar, PCA)
4. บีฟเอ็กซ์ แทรกต์ (Beef extract)
5. เพปโตน (Peptone)
6. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
7. น้ำกรอง
8. น้ำกลั่น
9. หลอดทดลองพร้อมฝาปิด
10. ขวดดูแรน
11. ขวดวัดปริมาตร 250 มิลลิลิตร
12. ขวดรูปخمพู่ 50 มิลลิลิตร
13. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
14. หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave)
15. เครื่องชั่ง

3.7.1.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายสำหรับเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียอีโคไล

1. เตรียมอาหารเหลวเลี้ยงเชื้อทริปติกชอยในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร โดยชั่งผงอาหารเหลวเลี้ยงเชื้อทริปติกชอย 30 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น และถ่ายใส่ขวดรูปชมพู่ขวดละ 250 มิลลิลิตร

2. เตรียมอาหารเหลวเลี้ยงเชื้อนูเทรียน (Nutrient Broth, NB) ในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร โดยชั่งบีฟอกซ์ แทรกต์ 0.015 กรัม เพปโทน 0.05 กรัม และโซเดียมคลอไรด์ 0.005 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น และถ่ายใส่ขวดดูแรน ขนาด 500 มิลลิลิตร

3. เตรียมสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ในขวดวัดปริมาตรขนาด 2000 มิลลิลิตร โดยชั่งโซเดียมคลอไรด์ 17.0 กรัม และดูตฟอสเฟตบัพเฟอร์ 2.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น และถ่ายใส่หลอดทดลอง หลอดละ 9 มิลลิลิตร

4. เตรียมวุ้นเลี้ยงเชื้อเพลทเคาทอะการ์ โดยชั่งผงวุ้นเลี้ยงเชื้อเพลทเคาทอะการ์ 22.5 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 1 ลิตร และนำไปให้ความร้อนพร้อมกับกวนสารละลายให้เข้ากัน

5. เตรียมน้ำกลั่นปริมาตร 250 มิลลิลิตร

6. นำสารละลายสำหรับเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียอีโคไลที่ได้จากข้อ 1. – 5. ไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

3.7.2 การยบยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไลบนชิ้นงาน

3.7.2.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

1. ชิ้นงานขนาด 5×5 เซนติเมตร
2. แบคทีเรียอีโคไล
3. แผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) ขนาด 4 × 4 เซนติเมตร
4. อาหารเหลวเลี้ยงเชื้อทริปติกชอย
5. อาหารเหลวเลี้ยงเชื้อนูเทรียน
6. สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์
7. วุ้นเลี้ยงเชื้อเพลทเคาทอะการ์
8. แอลกอฮอล์ 95% (Alc. 95%)
9. แอลกอฮอล์ 70% (Alc. 70%)
10. น้ำกลั่น
11. หลอดทดลองพร้อมฝาปิด
12. บีเปต 10 มิลลิลิตร

13. ตะเกียงแอลกอฮอล์
14. ไมโครปิเปต
15. ลูบเซียเชื้อ
16. จานเพาะเชื้อ
17. เครื่องชั่ง
18. ตู้บ่มเชื้อ
19. เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
20. หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ
21. ตู้ปลอดเชื้อ

3.7.2.2 ขั้นตอนการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไลบนชิ้นงาน

1. ใช้ลูบเซียเชื้อแบคทีเรียอีโคไลลงในอาหารเหลวเลี้ยงเชื้อทริปติกชอย แล้วปิดด้วยสำลีและกระดาษพอยล์ นำไปบ่มในตู้บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 32 ± 0.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. ปิเปตสารละลายแบคทีเรียอีโคไลที่ได้จากข้อ 1. ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และอาหารเหลวเลี้ยงเชื้อนูเทรียน ปริมาตร 9 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยกำหนดให้ค่าที่ได้ต้องอยู่ในช่วง 0.2-0.3 ซึ่งจะเป็นความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียอีโคไลที่ 2.5×10^8 ถึง 10×10^8 ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร
3. ปิเปตสารละลายแบคทีเรียอีโคไลที่ได้จากข้อ 2. ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร ลงบนชิ้นงานที่อยู่ในจานเพาะเชื้อ วางทับด้วยแผ่นพลาสติกใสลงบนชิ้นงาน และปิดฝาจานเพาะเชื้อ
4. นำจานเพาะเชื้อที่ได้จากข้อ 3. ไปฉายแสงยูวีที่เวลา 0 5 15 และ 30 นาทีตามลำดับ
5. หลังจากฉายแสงยูวี ปิเปตน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในจานเพาะเชื้อ และปิดฝาเขย่าจานเพาะเชื้อจนกว่าเชื้อแบคทีเรียอีโคไลบนชิ้นงานจะผสมเข้ากับน้ำกลั่น
6. ปิเปตสารละลายแบคทีเรียอีโคไลที่ได้จากข้อ 4. มาทำการเจือจางสารละลายแบคทีเรียอีโคไลที่ความเข้มข้น 0.1 0.01 0.001 และ 0.0001 เท่าของตอนเริ่มต้น ตามลำดับ โดยปิเปตสารละลายแบคทีเรียอีโคไลปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ปริมาตร 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายแบคทีเรียอีโคไลที่เข้มข้น 0.1 เท่าของตอนเริ่มต้น จากนั้นปิเปตสารละลายแบคทีเรียอีโคไลที่เข้มข้น 0.1 เท่าของตอนเริ่มต้น ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ปริมาตร 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายแบคทีเรียอีโคไลที่เข้มข้น 0.01 เท่าของตอนเริ่มต้น และทำการเจือจางตามลำดับจนได้สารละลายแบคทีเรียอีโคไลที่ความเข้มข้น 0.0001 เท่าของตอนเริ่มต้น

7. ปิเปตสารละลายแบคทีเรียอีโคไลที่ได้จากข้อ 5. ที่ความเข้มข้น 0.0001 เท่าของตอนเริ่มต้น ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในงานเพาะเชื้อ เทวุ้นเลี้ยงเชื้อเพลทเคาทอ์อะการ์ และทำการพอลเพลทรอจนกระทั่งวุ้นเลี้ยงเชื้อแข็ง จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 32 ± 0.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

8. นับจำนวนเชื้อและรายงานผล



บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

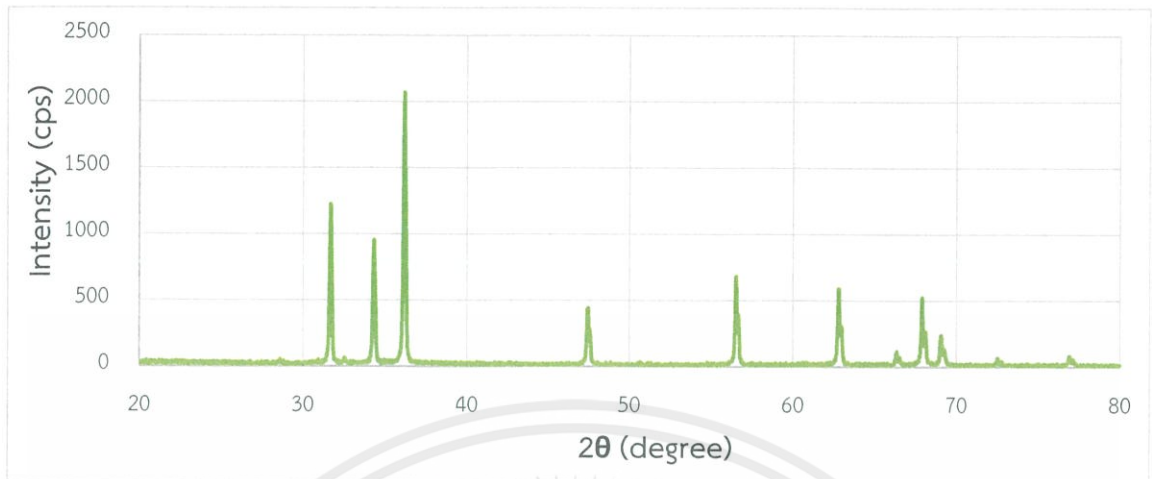
ปริญญานิพนธ์นี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไลของพลาสติกเอบีเอสด้วยการผสมซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลน รวมทั้งศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน ประกอบไปด้วย ส่วนที่ 1 ทดสอบสมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลน และวัสดุผสมเอบีเอส ส่วนที่ 2 ทดสอบความสามารถการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไลของวัสดุผสมเอบีเอส ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก ตามมาตรฐาน JIS Z 2801: 2010 และส่วนสุดท้าย ทดสอบการต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมเอบีเอส ตามมาตรฐาน ASTM D638

4.1 สมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

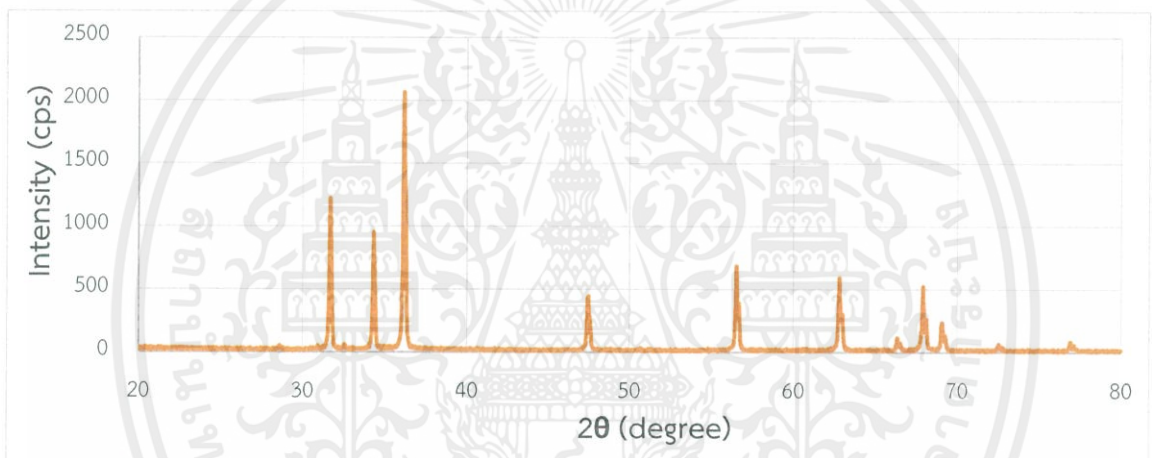
4.1.1 โครงสร้างผลึก

ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction, XRD) แสดงดังรูปที่ 4.1 ดิฟแฟรกโทแกรม (diffractogram) ของซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการตรวจวัดแบบสแกน 2θ จาก 20° ถึง 80° มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่มุมเท่ากับ 31.7537 34.4057 36.2351 47.5148 56.5706 62.8295 66.3444 67.9202 69.0587 76.9328 89.5846 95.2113 และ 98.5923 ซึ่งมีความสอดคล้องกับโครงสร้างแบบเวอร์ตไซด์ (Wurtzite structure) ของซิงค์ออกไซด์ ตามมาตรฐานขององค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) [36]

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับดิฟแฟรกโทแกรมของซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลนที่ได้จากการตรวจวัดแบบสแกน 2θ จาก 20° ถึง 75° แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า ตำแหน่งจุดยอดของดิฟแฟรกโทแกรมของซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวยังคงปรากฏเหมือนกับจุดยอดของดิฟแฟรกโทแกรมของซิงค์ออกไซด์ อาจเนื่องจากปริมาณสารคู่ควบไฮเลนที่ไม่มากพอทำให้เกิดจุดยอดของดิฟแฟรกโทแกรม ดังนั้นโครงสร้างของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวยังคงเป็นโครงสร้างแบบเวอร์ตไซด์ ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวซิงค์ออกไซด์ด้วยสารคู่ควบไฮเลนไม่ได้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์



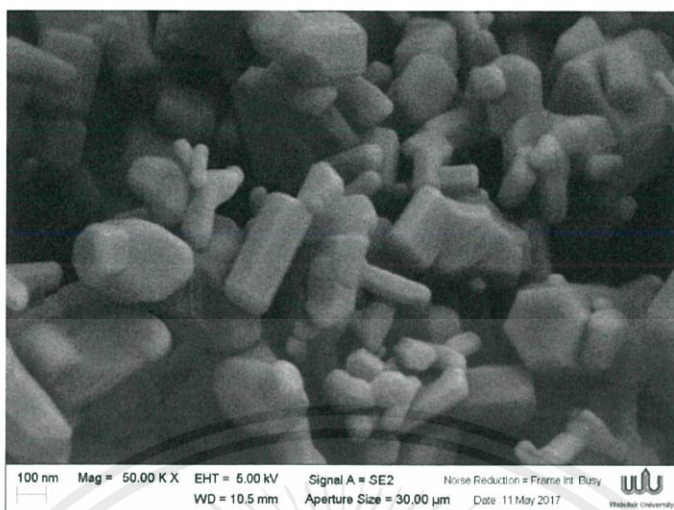
รูปที่ 4.1 ดิฟแฟรกโทแกรมของซิงค์ออกไซด์



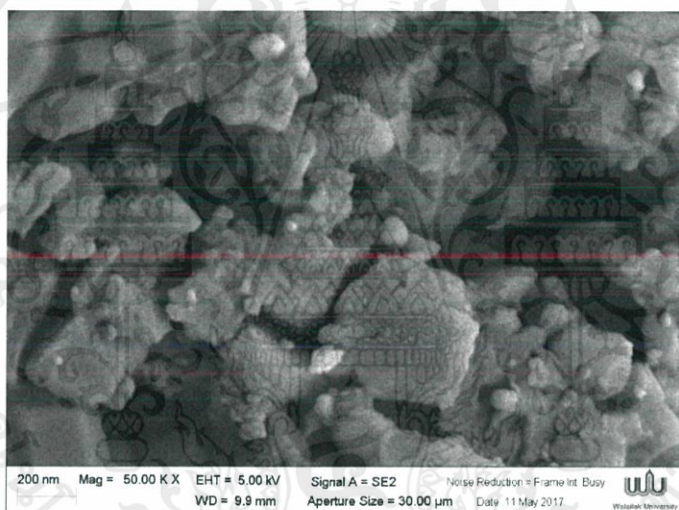
รูปที่ 4.2 ดิฟแฟรกโทแกรมของซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

4.1.2 โครงสร้างทางจุลภาค

ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โครงสร้างทางจุลภาคของซิงค์ออกไซด์โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยม และมีขนาดประมาณ 198 นาโนเมตร ส่วนของโครงสร้างทางจุลภาคของซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน แสดงดังรูปที่ 4.4 จะเป็นทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยม และมีขนาดประมาณ 247 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงและมีแนวโน้มของขนาดที่ใหญ่ขึ้นเหมือนกับงานวิจัยของ พัฒนิตา [35] ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ปกติที่มีขนาด 150 นาโนเมตร ด้วยด้วยสารคู่ควบไซเลนทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 233 นาโนเมตร



รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 4.4 โครงสร้างทางจุลภาคของซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

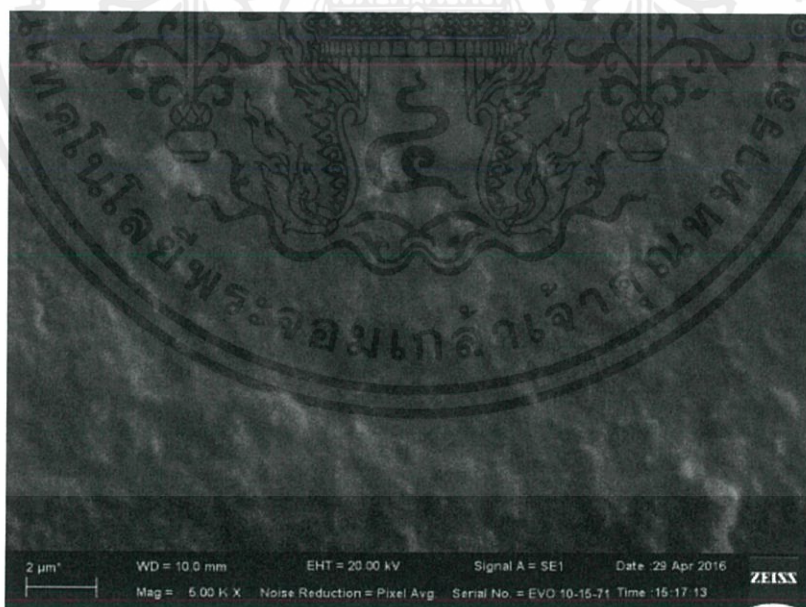
4.1.3 พื้นที่ผิวจำเพาะ

ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer-Emmett-Teller, BET) พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะของซิงค์ออกไซด์ 4.7681 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนรวม 0.013467 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน 11.297 นาโนเมตร

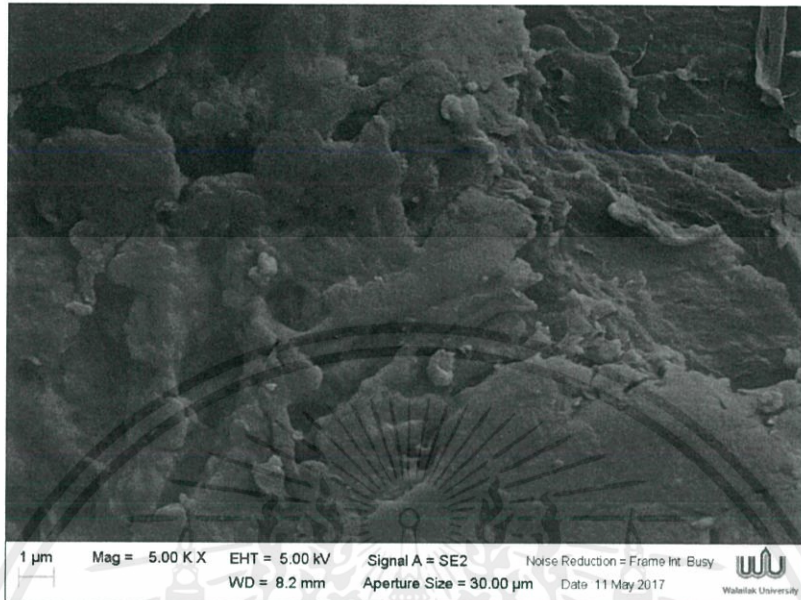
ส่วนซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 3.6205 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนรวม 0.00981 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน 9.860 นาโนเมตร ซึ่งค่าเหล่านี้ของซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีค่าน้อยกว่าซิงค์ออกไซด์ปกติ เนื่องจากการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนลดลง และสอดคล้องกับผลของการศึกษา โครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัย ของพัฒนา [35] ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ด้วยสารคู่ควบไซเลน ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะของ ซิงค์ออกไซด์ 5.861 ตารางเมตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวจำเพาะของซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ด้วยสารคู่ควบไซเลน 4.930 ตารางเมตรต่อกรัม โดยจะเห็นได้ว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะมีแนวโน้มที่ลดลง เหมือนกัน

4.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมเอปียเอส

ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของพลาสติกเอปียเอสที่ผสมซิงค์ออกไซด์โดยใช้เทคนิค จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เพื่อพิจารณาการกระจายตัวของซิงค์ออกไซด์ในเมทริกซ์เอปียเอส โดยวิเคราะห์จากภาพตัดขวางของ พลาสติกเอปียเอส



รูปที่ 4.5 โครงสร้างทางจุลภาคของพลาสติกเอปียเอส



รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของพลาสติกเอปียเอสที่ผสมซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของพลาสติกเอปียเอสที่ผสมซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

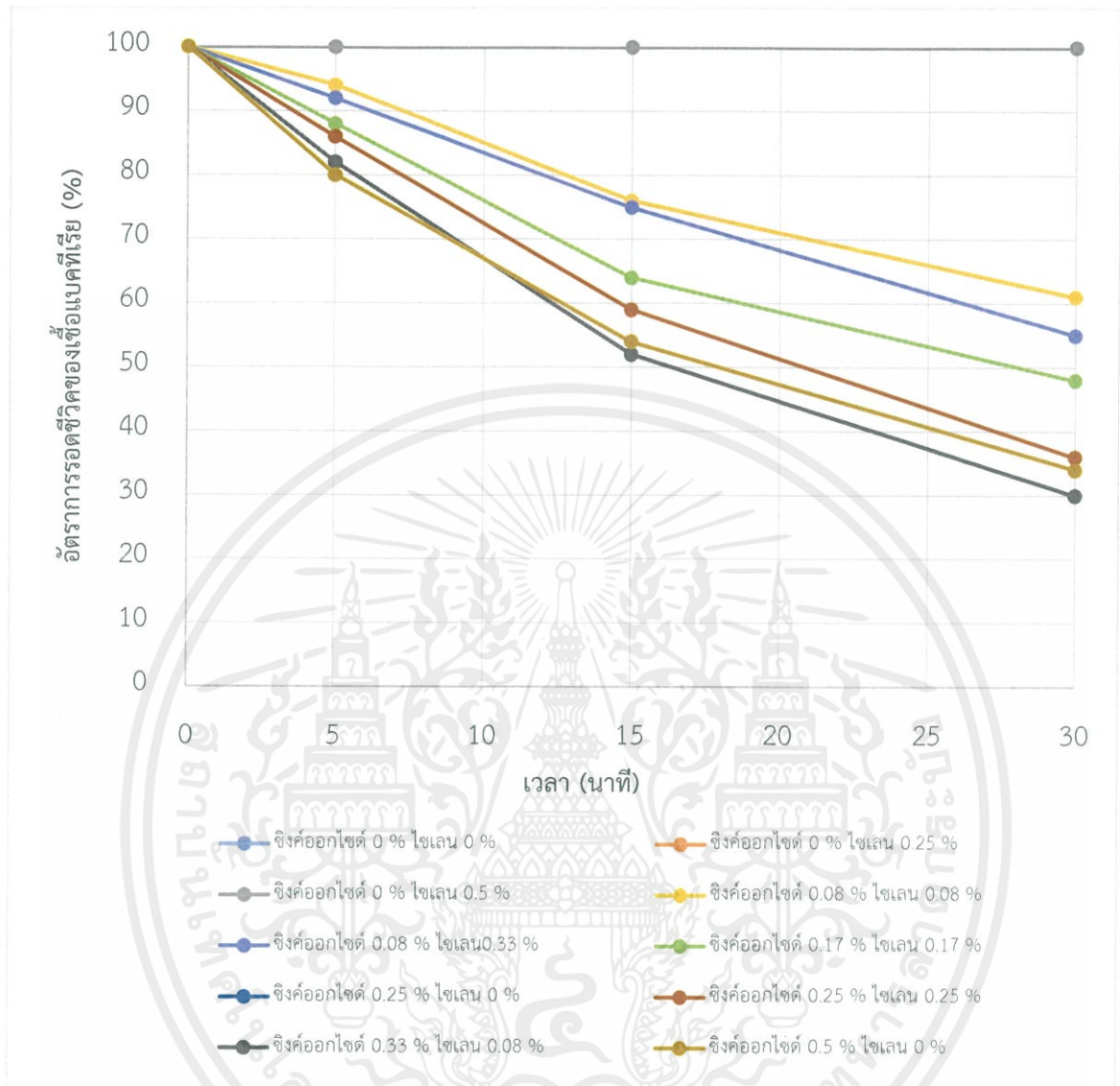
จากรูปโครงสร้างทางจุลภาคของพลาสติกเอปียเอสที่ผสมซิงค์ออกไซด์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปโครงสร้างทางจุลภาคของพลาสติกเอปียเอสแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าการกระจายตัวของซิงค์ออกไซด์ในเมทริกซ์เอปียเอสได้ไม่ดี เกิดการเกาะกลุ่มกัน เนื่องมาจากซิงค์ออกไซด์ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก มีความเป็นขั้ว [7] ในขณะที่พอลิเมอร์อย่างพลาสติกเอปียเอสไม่มีขั้ว [10] จากการที่มีสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วแตกต่างกันจึงทำให้อนุภาคซิงค์ออกไซด์มีโอกาสเกิดการเกาะกลุ่มกัน ทำให้การกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ไม่ดี แต่ในทางกลับกันการกระจายตัวของอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลนอนสามารถกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์เอปียเอสอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.7 เป็นเพราะสารคู่ควบไฮเลนอนสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่มีความเป็นขั้วและชอบน้ำ (Hydrophilic) ให้สามารถทำปฏิกิริยากับพลาสติกเอปียเอสที่มีความไม่เป็นขั้วและไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) อันเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันทั้งสองของสารคู่ควบไฮเลนอนที่หมู่อีพอกซีสามารถไปทำปฏิกิริยากับพลาสติกเอปียเอสได้ และส่วนหมู่แอมโมเนียมสามารถไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ที่อยู่บนอนุภาคซิงค์ออกไซด์ทำให้สามารถขจัดหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ออกไปได้และเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติซิงค์ออกไซด์ให้มีความไม่เป็นขั้วและไม่ชอบน้ำเหมือนพลาสติกเอปียเอส [3] ดังนั้นการปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ช่วยให้ลดการจับกลุ่มก้อนของอนุภาคซิงค์ออกไซด์และช่วยกระจายตัวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในพลาสติกเอปียเอส

4.3 สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไลบนวัสดุผสมเอปียเอส ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก ตามมาตรฐาน JIS Z 2801 : 2010 โดยนำเชื้อแบคทีเรียอีโคไลหยดลงบนวัสดุผสมเอปียเอส และนำไปฉายแสงยูวีที่เวลา 0 5 15 และ 30 นาที เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไลบนวัสดุผสมเอปียเอสที่อัตราส่วนผสมของพลาสติกเอปียเอส ซิงค์ออกไซด์ และสารคู่ควบไฮเลนอน แตกต่างกันไป ตามการทดลองแบบผสม



รูปที่ 4.8 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไลของวัสดุผสมเอบีเอส โดยผ่านกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

ผลการทดลองการยับยั้งแบคทีเรียอีโคไลบนวัสดุผสมเอบีเอส แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่า การผสมซิงค์ออกไซด์ในพลาสติกเอบีเอส ทำให้สามารถเพิ่มคุณสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้เมื่อเทียบกับพลาสติกเอบีเอสปกติ และเมื่อปริมาณของซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้นตาม อันเนื่องมาจากการกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ด้วยแสงทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นขึ้นไปยังแถบคอนดักชัน เกิดช่องว่างอิเล็กตรอนหรือโฮลขึ้นในแถบวาเลนซ์ซึ่งโฮลเมื่อสัมผัสกับน้ำในอากาศจะเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลขึ้น ส่วนอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนจะเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน ซึ่งเรดิคัลทั้งสองชนิดนั้นจะไปทำปฏิกิริยากับเซลล์ของแบคทีเรียจนสามารถยับยั้งการทำงานของเซลล์แบคทีเรียลงได้ แต่ถ้าเกิดการผสมซิงค์ออกไซด์มากถึง ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก จะทำให้ประสิทธิภาพในการกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

ลดลง เนื่องจากอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ที่มากเกินไปจะไปบดบังแสงซึ่งกันและกันทำให้คู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ผิวซิงค์ออกไซด์ลดลง ซึ่งทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลงตามไปด้วย [6]

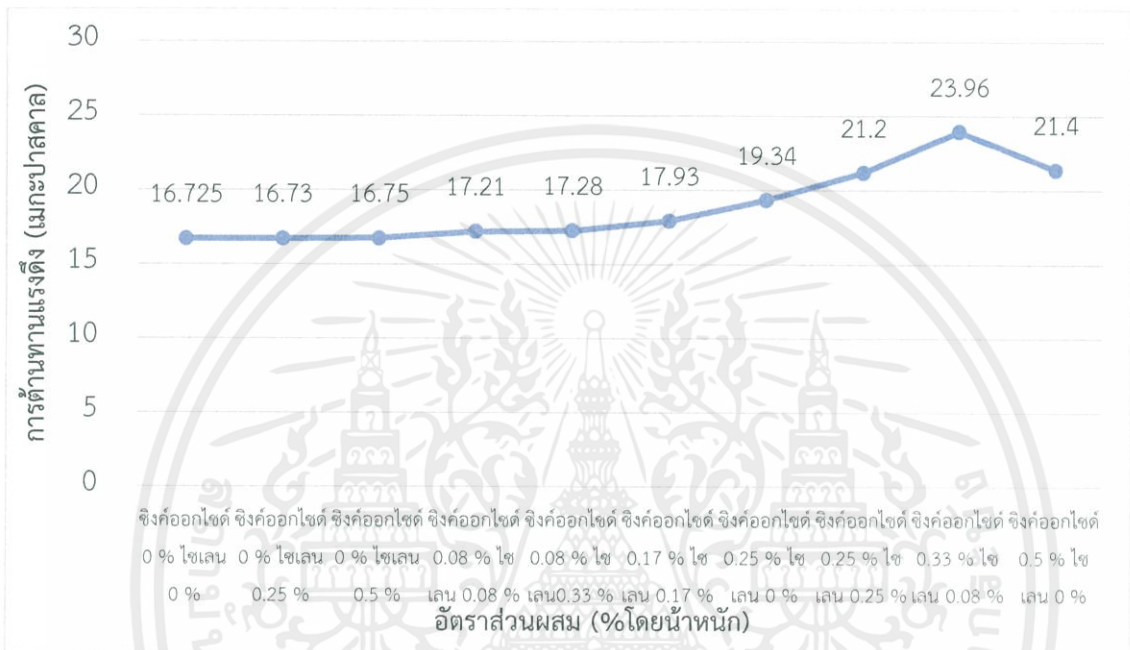
ส่วนเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการผสมซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไล อันเนื่องมาจากสารคู่ควบไซเลนช่วยกระจายตัวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในพลาสติกเอปียเอสให้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำให้ลดการจับกลุ่มก้อนของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ มีปริมาณพื้นที่ผิวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์มากขึ้นซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก จึงทำให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกมากขึ้น [6] มีผลทำให้เกิดการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสูงขึ้น

จากทุกอัตราส่วนเมื่อเวลาในการฉายแสงยูวีเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณแบคทีเรียอีโคไลลดลง โดยที่อัตราส่วนผสมของพลาสติกเอปียเอส ซิงค์ออกไซด์ และสารคู่ควบไซเลน ที่ร้อยละ 99.58 0.33 และ 0.08 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีการยับยั้งแบคทีเรียอีโคไลจากจำนวนแบคทีเรียอีโคไลเริ่มต้นที่ 267 โคโลนี เหลือ 80 โคโลนี หรือคิดเป็นร้อยละ 70 ภายใต้การฉายแสงยูวีนาน 30 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่นๆ

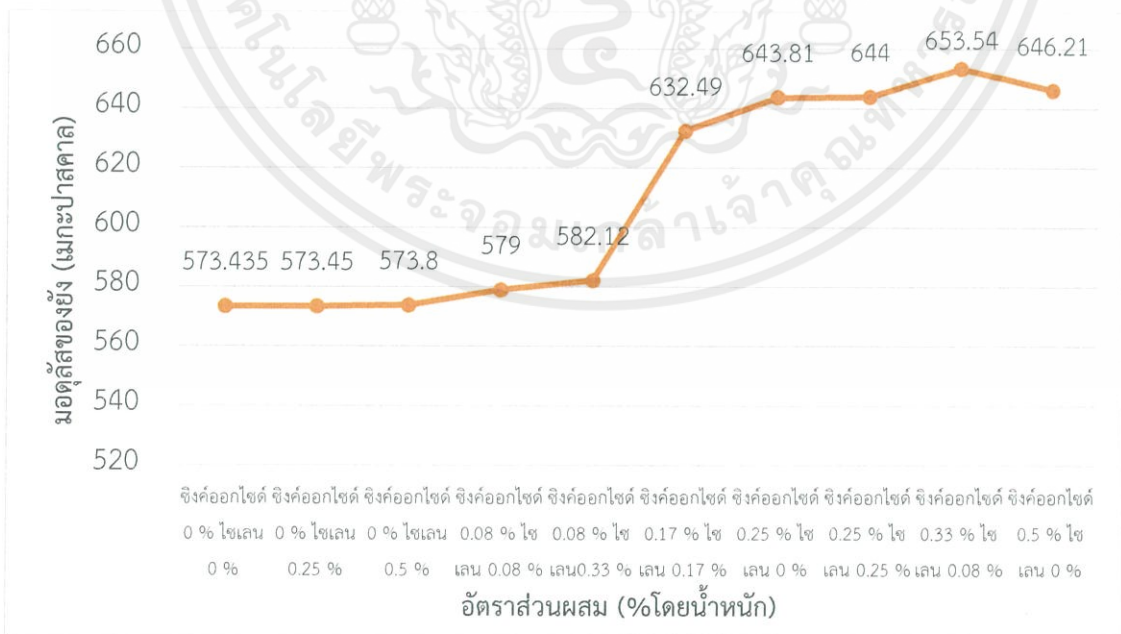
ผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียนี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับหลายงานวิจัยที่ผ่านมา โดยอาทิเช่นงานวิจัยของ ลี และคณะ [32] ที่ทำการศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นฟิล์มวัสดุผสมพอลิยูรีเทนที่เคลือบด้วยนาโนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณนาโนซิงค์ออกไซด์มากขึ้น อัตราการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้น โดยต้องเพิ่มถึงร้อยละ 4 ถึงสามารถเพิ่มการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้เกือบทั้งหมด อีกทั้งงานวิจัยของ ชูโคล และคณะ [3] ที่นำแผ่นฟิล์มวัสดุผสมเอซดีพีอีโดยผสมนาโนซิงค์ออกไซด์ลงไป ทำให้มีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียร้อยละ 60 แต่เมื่อเปลี่ยนไปผสมนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน มีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80 ส่วนงานวิจัยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น พบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกัน เช่น งานวิจัยของ กุลพร [38] ทำศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียบนพลาสติกเอปียเอสโดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของไททานเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผา 500 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมไททานเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้นด้วย

4.4 สมบัติทางกล

ผลการทดสอบสมบัติทางกลของการต้านทานแรงดึงและมอดุลัสของยังของวัสดุผสมเอปียีเอส ตามมาตรฐาน ASTM D638 เพื่อศึกษาความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของวัสดุในการทนทานต่อแรงดึงก่อนที่จะเกิดการเสียหายของวัสดุ



รูปที่ 4.9 การต้านทานแรงดึง



รูปที่ 4.10 มอดุลัสของยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบสมบัติทางกลของการต้านทานแรงดึงและมอดุลัสของยังของวัสดุผสมเอปียีสแสดงรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 พบว่าผลการทดสอบทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ผสมลงไป ซึ่งการผสมส่วนเสริมแรงอย่างซิงค์ออกไซด์ลงไปในเมทริกซ์ของพลาสติกเอปียีส จะทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างสองเฟสแล้วสามารถถ่ายเทแรงที่ได้รับไปสู่ส่วนเสริมแรง [15] ซึ่งจะช่วยในการเพิ่มการต้านทานแรงดึงและมอดุลัสของยังในวัสดุผสมเอปียีสได้เพิ่มมากขึ้นกว่าพลาสติกเอปียีสปกติ แต่อย่างไรก็ตามถ้าปริมาณของซิงค์ออกไซด์ที่มากเกินไปถึงร้อยละ 0.5 จะทำให้เกิดการต้านทานแรงดึงและมอดุลัสของยังของวัสดุผสมลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเกิดการจับกลุ่มก้อนของซิงค์ออกไซด์ทำให้พื้นที่ผิวในการถ่ายโอนความเครียดระหว่างอนุภาคซิงค์ออกไซด์และ เมทริกซ์ของพลาสติกเอปียีสลดลง [33]

ส่วนถ้ามีการปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ด้วยสารคู่ควบไซเลนซึ่งจะช่วยเพิ่มการต้านทานแรงดึงและมอดุลัสของยังได้ดีกว่าการไม่ปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ด้วยสารคู่ควบไซเลน หรือถ้ามีปริมาณของซิงค์ออกไซด์ที่เท่ากันแต่ปริมาณสารคู่ควบไซเลนเพิ่มขึ้น การต้านทานแรงดึงและมอดุลัสของยังเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่เพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากสารคู่ควบไซเลนช่วยกระจายตัวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในพลาสติกเอปียีสให้ดีขึ้น ลดการจับกลุ่มก้อนของอนุภาค ดังนั้นจึงแสดงได้ว่าสารคู่ควบไซเลนเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกล

เมื่อพิจารณาจากทุกอัตราส่วนผสม พบว่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกเอปียีส ซิงค์ออกไซด์ และสารคู่ควบไซเลน ที่ร้อยละ 99.58 0.33 และ 0.08 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เป็นอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่น โดยมีผลการต้านทานแรงดึง 23.96 เมกะปาสคาล มอดุลัสของยัง 653.54 เมกะปาสคาล ซึ่งสมบัติการต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 43.25 มอดุลัสของยังเพิ่มขึ้นร้อยละ 13.97 เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกเอปียีสปกติ และที่อัตราส่วนผสมนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่มีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสูงสุดอีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์นี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไลของพลาสติกเอบีเอสที่มีการผสมซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคูควบไซเลนลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และเพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของพลาสติกเอบีเอส ซิงค์ออกไซด์ และสารคูควบไซเลน ที่เหมาะสมต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสูงสุดผ่านกระบวนการโฟโตแคตะไลติกและยังคงไว้ซึ่งคุณสมบัติทางกลที่ดี โดยทำการผสมพลาสติกเอบีเอสและซิงค์ออกไซด์ในเครื่องผสมแบบปิดและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเป็นแผ่นชิ้นงานด้วยอัตราส่วนผสมของเอบีเอส ซิงค์ออกไซด์ และสารคูควบไซเลน ต่างๆตามการทดลองแบบผสม

การปรับปรุงพื้นผิวซิงค์ออกไซด์ด้วยสารคูควบไซเลน อนุภาคนั้นยังคงโครงสร้างแบบเวอร์ตไซต์เหมือนซิงค์ออกไซด์ปกติ มีลักษณะทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยม ขนาด 247 นาโนเมตร และพื้นที่ผิวจำเพาะ 3.6205 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเมื่อซิงค์ออกไซด์ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคูควบไซเลนแล้ว การกระจายตัวของซิงค์ออกไซด์บนพื้นผิววัสดุผสมเอบีเอสดีขึ้น ลดการจับกลุ่มของซิงค์ออกไซด์ จึงส่งผลดีต่อทั้งสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและสมบัติทางกล

ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไลผ่านกระบวนการโฟโตแคตะไลติกเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิงค์ออกไซด์และสารคูควบไซเลนที่เพิ่มขึ้น นั่นคือวัสดุผสมเอบีเอสที่ผสมซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับพื้นผิวด้วยสารคูควบไซเลนจะมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไลได้ดีกว่าวัสดุผสมเอบีเอสที่ผสมซิงค์ออกไซด์ปกติ แต่อย่างไรก็ตามถ้าปริมาณซิงค์ออกไซด์มากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีโคไลลดลง

ส่วนการทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมเอบีเอส พบว่า เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์ในพลาสติกเอบีเอสเพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลการทดสอบการต้านทานแรงดึงและมอดุลัสของยังของวัสดุผสมเอบีเอสพัฒนาขึ้นจากพลาสติกเอบีเอสปกติ แต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะทำให้สมบัติทางกลลดลง และเมื่อถ้ามีการปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ด้วยสารคูควบไซเลนจะทำให้สมบัติทางกลเพิ่มมากขึ้นกว่าเมื่อไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์

จากการทดลองที่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมทั้ง 10 สูตรนั้น พบว่าที่อัตราส่วนผสมของพลาสติกเอบีเอส ซิงค์ออกไซด์ และสารคูควบไซเลนที่ร้อยละ 99.58 0.33 และ 0.08 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียผ่านกระบวนการโฟโตแคตะไลติก สามารถลด

เชื้อแบคทีเรียอีโคไลได้สูงสุดถึงร้อยละ 70 ในระยะเวลา 30 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับที่อัตราส่วนผสมอื่น และอีกทั้งยังมีสมบัติการต้านทานแรงดึงและมอดูลัสสูงสุดอีกด้วย โดยการต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 43.25 และมอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นร้อยละ 13.97 เมื่อเทียบกับพลาสติกเอปีเอสปกติ ซึ่งจากการศึกษาในครั้งนี้ทำให้ได้ความสัมพันธ์และสภาวะที่เหมาะสมในการผสมวัสดุผสมที่มีสมบัติยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและสมบัติทางกล ทั้งยังสามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานปริญญานิพนธ์นี้ไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น เครื่องสุขภัณฑ์ ของเล่น เป็นต้น หรืออุปกรณ์ที่ต้องการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรพัฒนาซิงค์ออกไซด์โดยการเจือด้วยโลหะชนิดอื่น เช่น ทองแดง เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกให้สามารถเกิดยับยั้งเชื้อแบคทีเรียให้ช่วงแสงปกติ
2. ควรนำซิงค์ออกไซด์ไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ที่มีการใช้ในปัจจุบัน เช่น พอลิเอทิลีน-เทเรพทาเลต เป็นต้น เพื่อศึกษาความสามารถการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน
3. ควรมีการเติมสารคู่ควบไซเลนชนิดอื่นๆ ช่วยในการกระจายตัวของซิงค์ออกไซด์เพื่อหาสารช่วยกระจายตัวที่เหมาะสมที่ทำให้ซิงค์ออกไซด์มีการกระจายตัวที่ดีมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. (2558). “การศึกษาสถานภาพการประกอบธุรกิจของกลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องจักร อุตสาหกรรมยางและพลาสติก ประจำปีงบประมาณ 2558.” กรุงเทพมหานคร: สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย.
- [2] S.V. MOLD PLASTIC FACTORY. “คุณสมบัติของพลาสติก.” [Online] Available: <http://svmold.com/article/9081.html>
- [3] Shu-Cai Li, Ya-Na Li (2009). “Mechanical and Antibacterial Properties of Modified Nano-ZnO/High-Density Polyethylene Composite Films with a Low Doped Content of Nano-ZnO.” *Journal of Applied Polymer Science*. DOI 10.1002/app.31802.
- [4] Wen-Guang Liu, Xiu-Cheng Zhang, Hong-Yuan Li, Zhi Liu (2012). “Effect of surface modification with 3-aminopropyltriethoxysilane on mechanical and crystallization performances of ZnO/poly(butylsuccinate) composites.” *Composites: Part B*. 43: 2209- 2216.
- [5] Wikipedia. “Photocatalysis.” [Online] Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photocatalysis>
- [6] ฉลาด บรรเทา และชูสิทธิ์ ศรีสุทธิภมล. “กระบวนการ Photocatalytic.” 2548.
- [7] G. Leea, T. Kawazob, M. Ohtsub (2005). “Room temperature near-field photoluminescence of zinc-blend and wurtzite ZnO structures.” *Applied Surface Science*. 239: 394-397.
- [8] C. Hwang, T.Wu (2007). “Synthesis and characterization of nanocrystalline ZnO powders by a novel combustion synthesis method.” *Materials Science and Engineering B*. 111: 197-206.
- [9] Q. Xu, X. Zhang, W. Fan and S. Li and J. Xia (2008). “Electronic structures of wurtzite ZnO, Beo, MgO and p-type doping in $Zn_{1-x}Y_xO$ (Y=Mg, Be).” *Computtional Materials Science*. 44: 72-78,

- [10] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. “ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์.” [Online] Available: <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic8/ppproduct.html>
- [11] บรรณานุกรม. (2547). “เทคโนโลยีพลาสติก.” กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [12] National Metal and Materials Technology Center. “ประเภทและการใช้งานพลาสติก.” [Online] Available: http://www2.mtec.or.th/th/plastic/type_and_usage_plas.html
- [13] บริษัท มหาธานีอุตสาหกรรม จำกัด. “ประเภทและคุณสมบัติของพลาสติก.” [Online] Available: <http://www.great-pet.com/th/plastic/>
- [14] บุญรักษ์ กาญจนวรวณิษฐ์. “สารละลาย : วัสดุ : รู้จักกับ ABS.” [Online] Available: <https://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29/2013-49/78>
- [15] M. M. Schwartz . Composite Materials. Vol 1. New Jersey : Prentice Hall PTR. 1996.
- [16] อธิพัล แจ้งชัด. (2554). “เอกสารประกอบการสอนเรื่อง สารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling Agents).” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี.
- [17] นิลุบล เผือกบัวขาว. (2550). “สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. หน้า 20-22.
- [18] Wikipedia. “(3-Aminopropyl)triethoxysilane.” [Online] Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/\(3-Aminopropyl\)triethoxysilane](https://en.wikipedia.org/wiki/(3-Aminopropyl)triethoxysilane)
- [19] Shin-Etsu chemical Co., Ltd. “SilaneCouplingAgents.” [Online] Available: <https://www.shinetsusiliconeglobal.com/catalog/SilaneCouplingAgents>
- [20] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. “แบคทีเรีย.” [Online] Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0197/bacteria>
- [21] World Health Organization. “Enterohaemorrhagic Escherichia coli (EHEC).” [Online] Available: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs125/en/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] ศุภกาญจน์ กิจอำนาจสุข. “เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRD / XRF Techniques, X-ray).” [Online] Available: <https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/14-uncategorised/28-x-ray>
- [23] สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. “Scanning Electron Microscopy.” [Online] Available: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [24] Wikipedia. “Brunauer–Emmett–Teller (BET) theory.” [Online] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/BET_theory
- [25] R. P. Brown. Handbook of Plastic Test Method. New York : [n.p.], 1988 : 148-160.
- [26] ASTM DESIGNATION : D638, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. (2000).
- [27] ขจรศักดิ์ ศิริมัย. “การทดสอบแรงดึงของโลหะ.” [Online] Available: <https://www.mtec.or.th/mcu/phml/index.php/th/24-tensile-test-of-metal>
- [28] มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม. “การทดสอบแรงดึง (Tension Test).” [Online] Available: http://www.elecnet.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/tension_test
- [29] สมศักดิ์ เสนาใหญ่. “มอดูลัสของยัง (Young's modulus).” [Online] Available: <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1525-277>
- [30] ฉลอง สีแก้วสีว. “Design of Experiment คืออะไร.” [Online] Available: http://www.geocities.ws/chalong_sri/why_DOE.htm
- [31] Soo-Jin Park, Ki-Sook Cho (2003). “Filler-elastomer interactions: influence of silane coupling agent on crosslink density and thermal stability of silica/rubber composites.” *Journal of Colloid and Interface Science*. 267: 86-91.
- [32] J.H. Li, R.Y. Hong, M.Y. Li, H.Z. Li, Y. Zheng, J. Ding (2009). “Effects of ZnO nanoparticles on the mechanical and antibacterial properties of polyurethane coatings.” *Progress in Organic Coatings*. 64: 504–509.
- [33] Jing Shi, Yong Wang, Yao Gao, Hongwei Bai (2008). “Effects of coupling agents on the impact fracture behaviors of TZnOw/PA6 composites.” *Composites Science and Technology*. 68: 1338-1347.

- [34] Nawadon Petchwattana, Sirijutaratana Covavisaruch, Sasinee Wibooranawong, Phisut Naknaen (2016). "Antimicrobial food packaging prepared from poly(butylene succinate) and zinc oxide." *Measurement*. 93: 442–448.
- [35] พัฒนิตา กิจกอบชัย. (2555). "การปรับปรุงพื้นผิวซิงออกไซด์เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์." *วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยศิลปากร*.
- [36] International Centre for Diffraction Data. (2010). *Standard X-ray Diffraction Powder Patterns: Section 18 Data for 58 Substances*. Washington, DC.
- [37] F. Grassetta, N. Saitoa, D. Lia, D. Parka, I. Sakaguchia, N. Ohashia, H. Hanedaa, T. Roisnelc, S. Mornetd, E. Duguetd (2003). "Surface modification of zinc oxide nanoparticles by aminopropyltriethoxysilane." *Journal of Alloys and Compounds*. 360: 298–311.
- [38] กุลพร โชติกไกร. (2559). "การศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียบนวัสดุผสมอะครีโลไนไตรล์-บิวตะไดอินสไตรีนและไททานเนียมที่เผา 500 องศาเซลเซียสซึ่งผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก." *วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ก.1 ข้อมูลดิบผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

ตารางที่ ก.1 จำนวนเชื้อแบคทีเรียอีโคไลที่รอดชีวิต (โคโลนี) เมื่อผ่านการฉายแสงเป็นเวลา 0 5 15 และ 30 นาที

การทดลอง	อัตราส่วนผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			เวลา (นาที)			
	พลาสติกเอบีเอส	ซิงค์ออกไซด์	สารคู่ควบไซเลน	0	5	15	30
1	100	0	0	245	245	245	245
2	99.75	0	0.25	280	280	280	280
3	99.5	0	0.5	256	256	256	256
4	99.83	0.08	0.08	238	224	181	145
5	99.58	0.08	0.33	283	260	212	156
6	99.67	0.17	0.17	275	242	176	132
7	99.75	0.25	0	284	253	199	142
8	99.5	0.25	0.25	242	208	143	87
9	99.58	0.33	0.08	267	219	139	80
10	99.5	0.5	0	271	217	146	92

ก.2 อัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรีย

อัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรียอีโคไลเมื่อผ่านการฉายแสงเป็นเวลา 0 5 15 และ 30 นาที

โดยคำนวณจาก สมการ อัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรีย = $\frac{B-A}{A} \times 100$ เปอร์เซ็นต์

เมื่อ R คือ อัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรียอีโคไลที่เวลาใดๆ หน่วย เปอร์เซ็นต์

A คือ จำนวนเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นที่เวลาการฉายแสงเป็น 0 นาที หน่วย โคโลนี

B คือ จำนวนเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นที่เวลาการฉายใดๆ หน่วย โคโลนี

ตารางที่ ก.2 อัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรียอีโคไลเมื่อผ่านการฉายแสงเป็นเวลา 0 5 15 และ 30 นาที

การทดลอง	อัตราส่วนผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			เวลา (นาที)			
	พลาสติกเอบีเอส	ซิงค์ออกไซด์	สารคู่ควบไซเลน	0	5	15	30
1	100	0	0	100	100	100	100
2	99.75	0	0.25	100	80	54	34
3	99.50	0	0.50	100	100	100	100
4	99.83	0.08	0.08	100	89	70	50
5	99.58	0.08	0.33	100	100	100	100
6	99.67	0.17	0.17	100	86	59	36
7	99.75	0.25	0	100	88	64	48
8	99.5	0.25	0.25	100	94	76	61
9	99.58	0.33	0.08	100	82	52	30
10	99.50	0.50	0	100	92	75	55

ภาคผนวก ข.

ข.1 ข้อมูลดิบผลการทดสอบการต้านทานแรงดึง

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบการต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมเอปียเอสที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

การทดลอง	อัตราส่วนผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			การต้านทานแรงดึง (เมกะปาสคาล)
	พลาสติกเอปียเอส	ซิงค์ออกไซด์	สารคู่ควบไซเลน	
1	100	0	0	573.435
2	99.75	0	0.25	573.450
3	99.50	0	0.50	573.800
4	99.83	0.08	0.08	579.000
5	99.58	0.08	0.33	582.120
6	99.67	0.17	0.17	632.490
7	99.75	0.25	0	643.810
8	99.50	0.25	0.25	644.000
9	99.58	0.33	0.08	653.540
10	99.50	0.50	0	646.210

ข.2 ข้อมูลดิบผลการทดสอบมอดูลัสของยัง

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบมอดูลัสของยังของวัสดุผสมเอปียเอสที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

การทดลอง	อัตราส่วนผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			มอดูลัสของยัง (เมกะปาสคาล)
	พลาสติกเอปียเอส	ซิงค์ออกไซด์	สารคู่ควบไซเลน	
1	100	0	0	573.435
2	99.75	0	0.25	573.450
3	99.50	0	0.50	573.800
4	99.83	0.08	0.08	579.000
5	99.58	0.08	0.33	582.120
6	99.67	0.17	0.17	632.490
7	99.75	0.25	0	643.810
8	99.50	0.25	0.25	644.000
9	99.58	0.33	0.08	653.540
10	99.50	0.50	0	646.210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้