

การศึกษาสมบัติทางกลและพฤติกรรมทางด้านเชื้อแบคทีเรีย  
ของวัสดุเชิงประกอบเอบีเอส/ไทเทเนียมไดออกไซด์

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES AND ANTIBACTERIAL  
BEHAVIOR OF ABS/TIO<sub>2</sub> COMPOSITE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-217-107

การศึกษาสมบัติทางกลและพฤติกรรมการต้านเชื้อแบคทีเรีย  
ของวัสดุเชิงประกอบเอบีเอส/ไทเทเนียมไดออกไซด์

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES AND ANTIBACTERIAL  
BEHAVIOR OF ABS/TiO<sub>2</sub> COMPOSITE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2562  
KMITL-2019-EN-M-217-107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES AND ANTIBACTERIAL  
BEHAVIOR OF ABS/TiO<sub>2</sub> COMPOSITE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2019

KMITL-2019-EN-M-217-107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2019**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาสมบัติทางกลและพฤติกรรมการต้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบเอบีเอส/ไทเทเนียมไดออกไซด์

Thesis Title Study of Mechanical Properties and Antibacterial Behavior of ABS/TiO<sub>2</sub> Composite

นักศึกษา นางสาวภิญญาพัชญ์ เพ็งบุบผา

รหัสประจำตัว 58601234

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วิญ ศรีสืบสาย

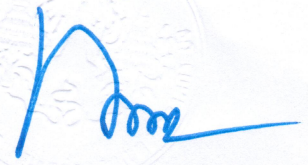
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2019-EN-M-217-107

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จินตวัฒน์	ไชยชนวงค์	
รศ.ดร.กรรณชัย	กัลยาศิริ	
ผศ.ดร.สุรัตน์	อารีรัตน์	
ดร.เพชรพล	ต้นทวิรุพท์	
ผศ.ดร.วิญ	ศรีสืบสาย	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 เวลา 09.30-11.30 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 3 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสมบัติทางกลและพฤติกรรมการต้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบเอปียเอส/ไทเทเนียมไดออกไซด์
นักศึกษา	นางสาวภิญญาพัชญ์ เพ็งบุบผา
รหัสนักศึกษา	58601234
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.วิภู ศรีสืบสาย

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน หรือพลาสติก ABS เสริมแรงด้วย  $TiO_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมมาประยุกต์ใช้ในการหาระดับอัตราส่วนที่เหมาะสมได้แก่ ปัจจัย A (พลาสติก ABS), ปัจจัย B ( $TiO_2$ ) และปัจจัย C (สารคู่ควบปฏิกิริยา APTES) กำหนดเงื่อนไขปัจจัยเท่ากับ  $99.4 \leq ABS \leq 99.8$ ,  $0.1 \leq TiO_2 \leq 0.5$  และ  $0.1 \leq APTES \leq 0.5$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สร้างชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปสำหรับทดสอบสมบัติทางกลตามมาตรฐาน ASTM D638 และสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียตามมาตรฐาน JIS Z 2801:2010 ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงโดยใช้แบคทีเรียอีโคไลเป็นแบคทีเรียต้นแบบ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่า  $TiO_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบและได้ตัวแบบสมการถดถอยของผลตอบสนองการทดสอบแรงดึงเท่ากับ  $\hat{Y}_1 = 0.006A + 0.508B + 1.241C + 4.816(10^5)AABC - 0.057ABCC$ ,  $\hat{Y}_2 = 0.007A + 2.866B + 1.375C - 0.003AABC + 0.624ABCC$  และ  $\hat{Y}_3 = 0.008A + 1.868B - 0.737C - 0.002AABC + 0.510ABCC$  ตามลำดับ ได้ค่าทำนายความแข็งแรงดึงเท่ากับ 20.69 MPa, ค่าทำนายมอดูลัสแรงดึงเท่ากับ 1.51 GPa และค่าทำนายระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาดเท่ากับ 1.29 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับอัตราส่วนผสมพลาสติก ABS 99.4,  $TiO_2$  0.19 และสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES 0.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ยืนยันผลการทดสอบที่ระดับอัตราส่วนผสมดังกล่าวด้วยการทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยของผลตอบสนอง  $\hat{Y}_1$ ,  $\hat{Y}_2$ , และ  $\hat{Y}_3$  พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ผลการทดสอบทางกายภาพ  $TiO_2$  ก่อนและหลังทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ด้วยเทคนิค XRD และ SEM พบว่ายังคงเป็นเฟสอะนาเทส ส่วนสัญญาณวิทยา  $TiO_2$  จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ลดลงเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิว ทำการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันเทคนิค FT-IR พบพีคแสดงการยืดของพันธะ Ti-O-Ti stretching ของหมู่  $TiO_2$  เหมือนกัน ไม่พบพีคที่ไม่ปรากฏบางส่วนหลังจากทำการปรับปรุงพื้นผิวคือพันธะ N-H bending ของหมู่ Amino group กับ O-H bending ของหมู่  $H_2O$  ภายในโมเลกุล สำหรับผลทดสอบสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้สูงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบคทีเรียอีโคไลที่ร้อยละ 81 ภายใต้การรับแสงยูวีที่เวลา 30 นาที

Thesis Title	Study of mechanical properties and antibacterial behavior of ABS/TiO <sub>2</sub> composite
Student	Miss Pinyapat Pengbubpha
Student ID.	58601234
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Wipoo SriSeubsai

## ABSTRACT

This research aims to study the mechanical properties of plastic composite Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS plastic) reinforcements with TiO<sub>2</sub> used APTES silane coupling agents as a surface improvement. The mixture design was applied to study the Influence of three factors, namely factor A (ABS plastic), factor B (TiO<sub>2</sub>) and factor C (APTES silane coupling agent). The condition of those factors were  $99.4 \leq \text{ABS} \leq 99.8$ ,  $0.1 \leq \text{TiO}_2 \leq 0.5$  and  $0.1 \leq \text{APTES} \leq 0.5$  wt%. The specimens were prepared with compression molding to test the mechanical properties according to ASTM D638 standard. The antibacterial properties were investigated according to JIS Z 2801:2010 standard by Photocatalytic activity using *E. coli* bacteria. The results showed that TiO<sub>2</sub> using APTES silane coupling agent as a surface improvement influenced in the mechanical property of composite materials. The special quartic regression models of tensile testing are  $\hat{Y}_1 = 0.006A + 0.508B + 1.241C + 4.816(10^5)AABC - 0.057ABCC$ ,  $\hat{Y}_2 = 0.007A + 2.866B + 1.375C - 0.003AABC + 0.624ABCC$  and  $\hat{Y}_3 = 0.008A + 1.868B - 0.737C - 0.002AABC + 0.510ABCC$  respectively. The response optimizer of tensile strength was 20.69 MPa, Young's modulus was 1.51 GPa and Elongation at break was 1.29% in the values 99.4 wt% of ABS, 0.19 wt% of TiO<sub>2</sub> and 0.41 wt% of APTES silane coupling agent. The confirmation experiment was done by hypothesis testing on the mean of responses  $\hat{Y}_1$ ,  $\hat{Y}_2$  and  $\hat{Y}_3$ . The results showed that no difference statistic of 0.05 as a significance level. The XRD pattern showed that the surface improvements of TiO<sub>2</sub> with APTES silane coupling agent were symmetric with anatase phase. The clumping decreases in TiO<sub>2</sub> used APTES silane coupling agent as a surface improvement. The FTIR spectra showed peak for the Ti-O-Ti bonds. But not showed peak amino group and hydroxyl groups. Antibacterial efficiency test of composite materials was increased under UV light irradiation 30 minutes and the bacteria was reduced approximately 81%

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีซึ่งได้รับการสนับสนุนและความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผศ.ดร. วิภู ศรีสืบสาย อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และ ผศ.ดร. กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้แนวคิดและคำแนะนำตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้ อีกทั้งได้เสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาในทุกๆ ด้านเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกด้านสถานที่, เครื่องมืออุปกรณ์และให้การสนับสนุนแบบที่เรียวยโคโลสำหรับการทำวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่อาคารปฏิบัติการพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, ศูนย์เครื่องมือเพื่อการวิจัยทางวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และห้องปฏิบัติการวิชาวัสดุศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ นายฤทธิชัย สังฆทิพย์ นักศึกษาปริญญาเอก ที่ให้คำปรึกษาและคำชี้แนะในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้งานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน และหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ในด้านการศึกษาและใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับผู้สนใจไม่มากนัก

ภิญญาพัชญ์ เพ็งบุบผา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X

บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย .....	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1.1 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture design).....	5
2.1.2 การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไซเลน.....	6
2.1.3 สมบัติทางกล.....	7
2.1.4 สมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย.....	8
2.2 บทสรุปการศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.3 อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (acrylonitrile-butadiene-styrene).....	10
2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide).....	11
2.5 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis).....	12
2.4 พลังงานคลื่นแสง .....	10
2.6 สารควบคู่ปฏิกิริยา (Coupling Agents).....	10
2.6 สารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไซเลน (Silane Coupling Agent).....	14
2.7 วัสดุผสมหรือวัสดุเชิงประกอบ.....	14
2.8 สารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไซเลน (Silane Coupling Agent).....	15
2.9 วัสดุผสมหรือวัสดุเชิงประกอบ.....	16
2.10 กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก .....	18
2.10.1 กระบวนการกดอัดขึ้นรูป (Compression molding).....	18
2.10.2 การประยุกต์ใช้งาน.....	19
2.10.3 ข้อดีของกระบวนการกดอัดขึ้นรูป.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10.4 ข้อเสียของกระบวนการกดอัดขึ้นรูป.....	19
2.11 กระบวนการผสมสารเติมแต่งในพลาสติก.....	20
2.11.1 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer).....	20
2.12 การทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical Properties Testing).....	20
2.12.1 ความเค้นและความเครียด.....	21
2.12.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	24
2.12.3 สมบัติที่ได้จากการทดสอบแรงดึง.....	25
2.13 การทดสอบสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธีตรวจนับจุลินทรีย์ (Total viable count).....	27
2.14 แบคทีเรียอีโคไล.....	28
2.15 การตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบ.....	28
2.15.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	28
2.15.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน.....	29
2.15.3 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา.....	29
2.16 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments).....	30
2.16.1 ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง.....	30
2.16.2 ข้อเสนอแนะในการออกแบบการทดลอง.....	31
2.16.3 ประเภทของการทดลอง.....	32
2.17 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม.....	32
2.18 การทดสอบสมมติฐาน.....	36
2.18.1 สมมติฐานสถิติ (Statistical Hypothesis).....	36
2.18.2 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานของพารามิเตอร์.....	37
2.18.3 ค่า p - value.....	38
2.19 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	38
2.19.1 Completely Randomized Design หรือ CRD.....	39
2.19.2 Completely Randomized Block Design หรือ CRRD.....	41
2.19.3 เงื่อนไขการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Model Checking).....	43
2.20 การถดถอยเชิงเส้นและสหพันธ์.....	43
2.20.1 การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression).....	44
2.20.2 การทดสอบความเหมาะสมของ Model.....	46
2.20.3 สหสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear Correlation).....	47
2.21 ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function).....	48
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	51
3.1 การออกแบบการทดลองโดยอาศัยวิธีทางสถิติวิศวกรรม.....	51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบ .....	53
3.3 การปรับปรุงพื้นผิว TiO <sub>2</sub> ด้วย APTES .....	54
3.3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	54
3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	54
3.3.3 ขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิว .....	55
3.4 เตรียมชิ้นงานทดสอบ .....	55
3.4.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	55
3.4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	56
3.4.3 ขั้นตอนการผสมพลาสติก .....	60
3.4.4 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน .....	61
3.5 การศึกษาสมบัติทางกล.....	63
3.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing).....	63
3.6 การตรวจสอบวัสดุเชิงประกอบ.....	64
3.6.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุ.....	64
3.6.2 วิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานของวัสดุ.....	65
3.6.3 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา.....	65
3.7 การศึกษาสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย.....	66
3.7.1 วัสดุและสารที่ใช้ในงานวิจัย.....	66
3.7.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	66
3.7.3 วิธีเตรียมสารละลาย .....	67
3.7.4 ขั้นตอนการลงเชื้ออีโคไลบนชิ้นงาน .....	69
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล .....	72
4.1 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วย SEM .....	73
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสด้วย XRD.....	74
4.3 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR.....	75
4.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงหรือผลตอบสนอง $Y_1$ .....	77
4.4.1 ตรวจสอบความเหมาะสมและวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ของตัวแบบจำลอง.....	77
4.4.2 รูปแบบสมการการถดถอยของผลตอบสนองความแข็งแรงดึง ( $Y_1$ ).....	80
4.4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง.....	81
4.5 ผลการทดสอบมอดูลัสแรงดึงหรือผลตอบสนอง $Y_2$ .....	82
4.5.1 ตรวจสอบความเหมาะสมและวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ของตัวแบบจำลอง.....	82
4.5.2 รูปแบบสมการการถดถอยของผลตอบสนองมอดูลัสแรงดึง ( $Y_2$ ).....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.3 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง.....	86
4.6 ผลการทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาดหรือผลตอบสนอง $Y_3$ .....	87
4.6.1 ตรวจสอบความเหมาะสมและวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ของตัวแบบจำลอง.....	87
4.6.2 รูปแบบสมการการถดถอยของผลตอบสนองระยะยืดตัวสูงสุด ที่จุดขาด ( $Y_3$ ).....	90
4.6.3 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง.....	91
4.7 การหาระดับอัตราส่วนที่เหมาะสมของการทดสอบแรงดึง.....	92
4.8 การยืนยันผลการทดสอบ.....	94
4.9 ผลทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบ.....	98
4.9.1 ผลทดสอบแรงดึง.....	98
4.9.2 ผลสัมฤทธิ์ทางกลของวัสดุเชิงประกอบ.....	99
4.10 ผลการศึกษาสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบ.....	101
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	105
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	105
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	106
เอกสารอ้างอิง.....	107
ภาคผนวก.....	113
ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	114
ภาคผนวก ข. เอกสารรับรองข้อมูลความปลอดภัยพลาสติก, สารเคมีและอุปกรณ์ ที่ใช้ในงานวิจัย.....	121
ภาคผนวก ค. มาตรฐานการทดสอบสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย JIS Z 2801:2010.....	148
ภาคผนวก ง. ผลการทดสอบเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD).....	167
ภาคผนวก จ. ค่าการทดสอบสมบัติทางกลของผลตอบสนอง $Y_1$ , $Y_2$ และ $Y_3$ .....	174
ภาคผนวก ฉ. ผลการ Run ของผลตอบสนอง $Y_1$ , $Y_2$ และ $Y_3$ ด้วยโปรแกรม สำเร็จรูป Minitab.....	178
ภาคผนวก ช. ผลการ Run ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab การทดสอบ Response optimization.....	182
ภาคผนวก ซ. ผลการ Run ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab การทดสอบสมมติฐาน.....	184
ภาคผนวก ฅ. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ พลาสติก ABS.....	186

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ เชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วนผสมจากการออกแบบการทดลอง .....	188
ภาคผนวก ก. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ เชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม .....	196
ภาคผนวก ก. การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรียอีโคไล ภายใต้การรับแสงยูวี .....	199
ประวัติผู้เขียน .....	201



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> ).....	12
2.2 คุณสมบัติพื้นฐานเพิ่มเติมของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> ) .....	15
2.3 คุณสมบัติของ APTES .....	15
2.4 การตั้งสมมติฐานหลักและสมมติฐานทางเลือกของพารามิเตอร์ $\mu, \sigma^2$ และ $\rho$ .....	37
2.5 ลักษณะข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน .....	39
2.6 ตาราง ANOVA ในกรณีที่ขนาดตัวอย่างเท่ากัน .....	41
2.7 ลักษณะข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน .....	42
2.8 ตาราง ANOVA วิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองแบบ CRBD .....	43
2.9 ตาราง ANOVA ของการทดสอบสมมติฐานของพารามิเตอร์ความชัน $\beta_1$ .....	45
3.1 แสดงปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง .....	51
3.2 ตัวอย่างตารางแบบสุ่มสำหรับการทดลอง .....	52
3.3 สมบัติพื้นฐานของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> ) ที่ใช้ในงานวิจัย .....	57
3.4 สมบัติพื้นฐานของ 3 – อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน หรือ APTES.....	57
3.5 คุณสมบัติพื้นฐานของพลาสติก ABS.....	58
4.1 ผลทางสถิติตัวแบบจำลองของผลทดสอบความแข็งแรงดึง .....	79
4.2 ผลวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของผลทดสอบความแข็งแรงดึง .....	79
4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของผลตอบสนองความแข็งแรงดึง ( $\hat{Y}_1$ ) .....	80
4.4 ผลทางสถิติตัวแบบจำลองของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง .....	84
4.5 ผลวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง .....	84
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของผลตอบสนองมอดูลัสดึง ( $\hat{Y}_2$ ).....	85
4.7 ผลทางสถิติตัวแบบจำลองของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด .....	89
4.8 ผลวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด .....	89
4.9 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของผลตอบสนองระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด ( $\hat{Y}_3$ ).....	90
4.10 Response optimization ของการทดสอบแรงดึง.....	92
4.11 ผลการทดสอบแรงดึงที่สภาวะเหมาะสม .....	94
4.12 ผลการวิเคราะห์ One-Sample T-test ของผลทดสอบความแข็งแรงดึง.....	94
4.13 ผลการวิเคราะห์ One-Sample T-test ของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง .....	95
4.14 ผลการวิเคราะห์ One-Sample T-test ของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด .....	96
4.15 จำนวนแบคทีเรียที่นับได้ของพลาสติกชนิด ABS ภายใต้การรับแสงยูวีที่เวลา 0, 5, 15 และ 30 นาที.....	103
4.16 จำนวนแบคทีเรียที่นับได้ของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วนผสม ABS 99.4 : TiO <sub>2</sub> 0.19 : APTES 0.41 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้การรับแสงยูวีที่เวลา 0, 5, 15 และ 30 นาที.....	104

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 มอนอเมอร์ของพลาสติก ABS.....	11
2.2 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> ) โดยที่ (a) รูไทล์, (b) อะนาเทส และ (c) บรูคไคต์.....	11
2.3 กลไกการเกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลซิสของ TiO <sub>2</sub> .....	14
2.4 ลักษณะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์กับฟิลเลอร์ โดยที่ (a) Reactive Coupling Agents, (b) Non-reactive Coupling Agents .....	15
2.5 โครงสร้างของ 3 – Aminopropyltriethoxysilane.....	15
2.6 ส่วนประกอบของเครื่องกดอัด.....	19
2.7 ส่วนประกอบต่างๆ ของชุดผสม.....	20
2.8 สมบัติทางกลที่แสดงออกมาเมื่อวัสดุถูกแรงภายนอกกระทำ.....	21
2.9 (a) วัสดุรับแรงดึงเกิดความเค้นแรงดึงขึ้นและยืดออกเป็นเส้นตรง, (b) วัสดุรับแรงอัดเกิดความเค้นอัดและหดตัวเป็นเส้นตรง และ (c) วัสดุรับแรงเฉือน .....	22
2.10 กราฟ Stress – Strain ของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง.....	23
2.11 อุปกรณ์และการติดตั้งชิ้นงานทดสอบบนเครื่องทดสอบแรงดึง.....	25
2.12 ลักษณะการเกิด Necking ของชิ้นงานทดสอบ ณ จุดความเค้นแรงดึงสูงสุด.....	26
2.13 ลักษณะแบคทีเรียที่เติบโตบนจานเพาะเชื้อ.....	27
2.14 ลักษณะรูปร่างของแบคทีเรียอีโคไล.....	28
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในระบบที่สนใจ.....	30
2.16 ระบบพิกัดจุดการออกแบบการทดลอง Mixture design (Trilinear coordinates).....	33
2.17 แผนการทดลองแบบ Simplex – Centroid.....	33
2.18 ตัวอย่างการทดลองที่มี 3 และ 4 องค์ประกอบแบบ Simplex – Centroid .....	33
2.19 แผนการทดลองแบบ Simplex – Lattice.....	34
2.20 ตัวอย่างสิ่งทดลองที่มี 3 และ 4 องค์ประกอบของแผนการทดลอง Simplex – Lattice.....	35
2.21 จุดของสิ่งทดลองด้วยวิธีการออกแบบ D - Optimal .....	35
2.22 การทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียวหรือสองทางของการแจกแจง Z, t และ X <sup>2</sup> .....	37
2.23 กราฟ Residuals กับค่า $\hat{y}_i$ .....	46
2.24 กราฟตัวอย่างการตรวจสอบ Lack – Fit Test.....	46
2.25 ลักษณะตัวอย่างของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) .....	48
2.26 ค่าน้ำหนัก $W_i$ จะมีผลต่อรูปร่างกราฟยิ่งมากยิ่งดี .....	48
2.27 ค่าน้ำหนัก $W_i$ จะมีผลต่อรูปร่างกราฟยิ่งน้อยยิ่งดี.....	49
2.28 ค่าน้ำหนัก $W_i$ จะมีผลต่อรูปร่างกราฟค่ากลางคือค่าที่ดีที่สุด .....	50
3.1 แบบจำลอง Mixture Design.....	53
3.2 แสดงองค์ประกอบการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ .....	53
3.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> ) เกรดอุตสาหกรรม.....	54
3.4 3 – อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน 98% (APTES).....	54

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 เตาเผาอุณหภูมิสูง .....	55
3.6 เม็ดพลาสติก ABS.....	56
3.7 TiO <sub>2</sub> ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES .....	56
3.8 สรุปขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบและวิธีการทดสอบ .....	59
3.9 เครื่องผสมพลาสติก Internal Mixture .....	60
3.10 เครื่องบดพลาสติก.....	60
3.11 เครื่องกดอัดพลาสติก (Compression Molding Machine).....	61
3.12 ชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติทางกล.....	62
3.13 ชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย .....	62
3.14 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine).....	63
3.15 การติดตั้งชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ.....	64
3.16 เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD).....	64
3.17 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer หรือ FTIR .....	65
3.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	65
3.19 เครื่องนับจำนวนแบคทีเรีย .....	67
3.20 กล้องทึบแสงสำหรับรับแสงยูวีพร้อมฝาโดยติดหลอดยูวีบนฝากล้อง .....	67
3.21 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายเชื้อแบคทีเรียอีโคไลสำหรับหยดลงบนชิ้นงาน .....	68
3.22 สารละลายแบคทีเรียอีโคไลสำหรับหยดลงบนชิ้นงาน .....	68
3.23 ชิ้นงานขนาด 5 × 5 เซนติเมตร สำหรับทดสอบสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย .....	69
3.24 ขั้นตอนการลงเชื้อแบคทีเรียอีโคไลบนชิ้นงาน .....	70
3.25 หม้อนึ่งความดันไอ (Autoclave).....	71
3.26 ตู้ Biohazard laminar flow.....	71
4.1 สัณฐานวิทยาของ TiO <sub>2</sub> ที่กำลังขยาย 20000 เท่า .....	73
4.2 สัณฐานวิทยาของ TiO <sub>2</sub> ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกริยา APTES ที่กำลังขยาย 20000 เท่า .....	73
4.3 XRD pattern ของ TiO <sub>2</sub> และ TiO <sub>2</sub> ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกริยา APTES .....	74
4.4 FT-IR spectra ของ TiO <sub>2</sub> .....	75
4.5 FT-IR spectra ของ TiO <sub>2</sub> ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES.....	75
4.6 FT-IR spectra ของพลาสติกชนิด ABS ผสม TiO <sub>2</sub> ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES .....	76
4.7 Normal probability plot ของผลทดสอบความแข็งแรงดึง .....	77
4.8 Versus fits ของผลทดสอบความแข็งแรงดึง .....	77
4.9 Versus order ของผลทดสอบความแข็งแรงดึง .....	78
4.10 Mixture contour plot ของผลทดสอบความแข็งแรงดึง .....	81
4.11 Normal probability plot ของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง .....	82
4.12 Versus fits ของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง .....	82

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 Versus order ของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง.....	83
4.14 Mixture contour plot ของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง .....	86
4.15 Normal probability plot ของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด.....	87
4.16 Versus fits ของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด.....	87
4.17 Versus order ของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด .....	88
4.18 Mixture contour plot ของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด.....	91
4.19 Optimization plot ของผลทดสอบแรงดึง .....	93
4.20 กราฟ Box-plot ของผลทดสอบความแข็งแรงดึง .....	95
4.21 กราฟ Box-plot ของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง.....	96
4.22 กราฟ Box-plot ของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด .....	97
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพลาสติก ABS .....	98
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบ ที่ระดับอัตราส่วนผสม ABS 99.4 : TiO <sub>2</sub> 0.19 : APTES 0.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก .....	98
4.25 สันฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกชนิด ABS เสริมแรงด้วย TiO <sub>2</sub> ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES กำลังขยาย 2000 เท่า .....	99
4.26 สันฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกชนิด ABS เสริมแรงด้วย TiO <sub>2</sub> ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES กำลังขยาย 5000 เท่า.....	100
4.27 สันฐานวิทยาของวัสดุที่ใช้ทดสอบสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียผ่านกระบวนการ เร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ที่กำลังขยาย 2500 เท่า.....	101
4.28 เปอร์เซ็นต์แบคทีเรียอีโคไลที่ลดลงของพลาสติก ABS กับวัสดุเชิงประกอบที่ระดับ อัตราส่วนผสม ABS 99.4 : TiO <sub>2</sub> 0.19 : APTES 0.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้การรับแสงยูวีที่ระยะเวลาต่างๆ .....	102

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุเชิงประกอบประเภทพลาสติก (Polymer Composites) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตลอดจนในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สามารถนำไปสังเคราะห์หรือผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย น้ำหนักเบาและราคาถูก [1] โดยวัสดุเชิงประกอบ ประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 องค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ เฟสเนื้อพื้น (Matrix) ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักให้กับวัสดุและเฟสกระจายหรือเฟสกระจาย (Reinforcement) ทำหน้าที่เพิ่มสมบัติให้กับเฟสเนื้อพื้นเพื่อให้ได้วัสดุชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุชนิดเดิม [2] เช่น การเพิ่มสมบัติทางกลให้ดีขึ้น เพื่อให้วัสดุมีความแข็งแรง ความทนทานหรือความสามารถในการยืดหยุ่นไปในทิศทางที่ดีขึ้นหรือการเพิ่มสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียให้แก่วัสดุ อาจใช้เส้นใยนาโนหรือวัสดุนาโนเป็นส่วนเสริมแรงในลักษณะการกระจายตัวให้กับเฟสเนื้อพื้นของวัสดุ เมื่ออากาศหรือของเหลวที่เป็นมลพิษสัมผัสกับพื้นผิวของผลิตภัณฑ์หรือวัสดุ โดยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำมาสะอาดพื้นผิวด้วยตัวเอง (Self-cleaning) หรือฆ่าเชื้อโรคได้ [3] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม พลาสติกชนิดที่นิยมใช้เป็นเฟสเนื้อพื้นให้คุณสมบัติเด่นในเรื่องของความแข็งแรง มีความเหนียวสูง ทนทานต่อการรับแรงได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ให้ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานมีความมันเงา ทำความสะอาดง่ายและเสถียรภาพทางความร้อนในสภาวะแสงหรือที่อุณหภูมิสูง [2,4] ซึ่งเป็นคุณสมบัติของพลาสติกชนิดอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีนหรือพลาสติก ABS เป็นพลาสติกวิศวกรรมประเภทเทอร์โมพลาสติกประกอบด้วยมอนอเมอร์ต่างกัน 3 ชนิด (terpolymer) ที่มีคุณสมบัติเด่นเฉพาะถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตวัสดุในรูปของผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ในด้านการพัฒนาสมบัติทางกลของพลาสติกชนิดนี้สามารถทำได้หลายวิธี โดยเริ่มตั้งแต่การสังเคราะห์วัสดุขึ้นมาใหม่ การใช้สารเติมแต่ง (Additives) หรือเฟสเสริมแรงโดยใช้วัสดุที่เป็นอนุภาคหรือเป็นเม็ดผง ตลอดจนการนำวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปผสมรวมกัน ซึ่งล้วนเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพสมบัติโดยนำคุณสมบัติเด่นของสารที่ใช้เติมแต่งให้กับวัสดุเพื่อให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นกว่าเดิม [5]

ปัจจุบัน  $TiO_2$  ถูกใช้เป็นเฟสเสริมแรงหรือสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมพลาสติกที่ช่วยเพิ่มสมบัติทางกล เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เสถียรภาพทางเคมีสูง, ต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดี ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูงและใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการย่อยสลายสารอินทรีย์และแบคทีเรีย เฟสเสริมแรง  $TiO_2$  นี้จึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจสำหรับการใช้งานในด้านสมบัติทางกลและสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย [6,7]  $TiO_2$  จึงถูกนำมาใช้ศึกษาในงานวิจัยอย่างกว้างขวางในด้านการย่อยสลายแบคทีเรียหรือเชื้อโรคที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของวัสดุโดยผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของ  $TiO_2$  เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง [3]  $TiO_2$  ยังมีคุณสมบัติให้การยึดเกาะและความเข้ากันได้ดีระหว่างเฟสเนื้อพื้นกับเฟสเสริมแรงซึ่งถือเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบแต่เนื่องจาก  $TiO_2$  เป็นเฟสเสริมแรงที่มีพื้นที่ผิวและความเป็นขั้วสูงจำเป็นต้องมีการเติมด้วยสาร coupling agent หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารคู่ควบปฏิกิริยาเพื่อปรับสภาพพื้นผิวและสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสเนื้อพื้นกับเฟสเสริมแรงไว้ [8,9] และพบว่า สารคู่ควบปฏิกิริยาชนิด APTES หรือ 3-aminopropyltriethoxysilane เป็นสารปรับปรุงพื้นผิวชนิดที่สามารถลดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อน (clumping) ของเฟสเสริมแรงให้กับเฟสเนื้อพื้นและใช้เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงในยางและพลาสติกเพื่อเพิ่มแรงต้านทานการดึง, ความทนทานต่อการสึกกร่อนและสามารถปรับปรุงพฤติกรรมการไหลได้ [10]

จากลำดับความสำคัญของปัญหาข้างต้นจึงเป็นที่มาในการศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกชนิดอะครีโลไโรไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน หรือพลาสติก ABS โดยผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES สำหรับการเลือกใช้วัสดุเชิงประกอบเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีตามที่ต้องการต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญหลายประการ เช่น ปริมาณวัสดุที่ใช้ในเฟสเนื้อพื้นและในเฟสกระจายรวมถึงวิธีในกระบวนการผลิต จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การหาค่าความเหมาะสมของปริมาณส่วนผสมวัสดุเชิงประกอบสามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) เป็นวิธีที่นิยมไม่มีความยุ่งยากซับซ้อนและสามารถปฏิบัติได้จริง อีกทั้งยังสามารถกำหนดระดับของปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองได้ ดังนั้นผู้วิจัยได้พิจารณาทำการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมหรือ Mixture Design ซึ่งเป็นการทดลองค่าของผลลัพธ์แบบฟังก์ชันที่เป็นเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมเพื่อต้องการหาระดับอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงประมาณเพื่อนำไปสู่การหาค่าสถานะที่เหมาะสม โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดปัจจัยหรือตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ พลาสติกชนิด ABS, ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) และสารคู่ควบปฏิกิริยาประเภทไฮเลน APTES นอกจากนี้ยังทำการศึกษาศักยภาพด้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) รวมทั้งศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิว  $\text{TiO}_2$  ด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบซึ่งประกอบด้วยพลาสติกชนิด ABS,  $\text{TiO}_2$  และ APTES โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture design) ต่อสมบัติทางกลและสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย
2. เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิว  $\text{TiO}_2$  ด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยาประเภทไฮเลน APTES ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย
3. เพื่อศึกษาการเพิ่มสมบัติทางกลและสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียของพลาสติกเชิงประกอบชนิดอะครีโลไโรไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน หรือพลาสติก ABS เป็นเฟสเนื้อพื้นโดยมี  $\text{TiO}_2$  ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยาประเภทไฮเลน APTES เป็นเฟสเสริมแรง

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. อัตราส่วนผสมที่ได้จากการออกแบบการทดลองมีผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย
2. อัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบในส่วนเฟสเนื้อพื้นและเฟสเสริมแรงในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มสมบัติทางกลของวัสดุให้ดีขึ้น
3. การปรับปรุงพื้นผิว  $\text{TiO}_2$  ด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยาประเภทไซเลน APTES จะส่งผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบที่ดียิ่งขึ้น

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 3 ปัจจัย ประกอบด้วย พลาสติก ABS, ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) และสารคู่ควบปฏิกิริยาประเภทไซเลน APTES โดยกำหนดเงื่อนไขปัจจัยที่ทำการศึกษามีไม่เกิน 0.5 ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. ก่อนทำการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบนำพลาสติกไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. อุณหภูมิที่ใช้ผสมอยู่ที่ 180 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบผสมที่ 60 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องผสมพลาสติก (Internal Mixer)
4. ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องกดอัด (Compression Molding) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอัด 10 นาที ตั้งพารามิเตอร์ที่เครื่องกดอัดโดยให้ความร้อนก่อนอัด (Preheat) ที่เวลา 2 นาที, เวลาในการอัดร้อน (Pressing) ที่เวลา 3 นาที และอัดเย็น (Cooling Time) ที่เวลา 5 นาที
5. ศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength), ค่ามอดูลัสแรงดึง (Young's modulus) และค่าระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด (Elongation at Break) ตามมาตรฐานการทดสอบ
6. ศึกษาสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียตามมาตรฐาน JIS Z 2801:2010 ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity)

### 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาข้อมูลบทความงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องพร้อมทั้งทำการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixed design) แบบ Extreme vertices ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab
2. ศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบโดยแบ่งองค์ประกอบของวัสดุเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วยเฟสเนื้อพื้นและเฟสกระจาย รวมถึงศึกษาวิธีการทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียตามมาตรฐานการทดสอบ
3. เตรียมองค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบโดยใช้พลาสติก ABS เป็นเฟสเนื้อพื้นและ  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยาประเภทไซเลน APTES เป็นเฟสกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผสมองค์ประกอบของวัสดุเข้าด้วยกันระหว่างเฟสเนื้อพื้นและเฟสเสริมแรงด้วยเครื่องผสมพลาสติกแบบปิดและทำการย่อยวัสดุให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดพลาสติก
5. เตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบด้วยเครื่องกดอัดรูปทรง Dumbbells สำหรับศึกษาสมบัติทางกลและเตรียมชิ้นงานขนาด  $5 \times 5$  เซนติเมตร สำหรับศึกษาสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียตามมาตรฐานการทดสอบ
6. ทดสอบวัสดุเชิงประกอบด้วยการทดสอบแรงดึง (Tensile Testing) ตามมาตรฐาน เก็บข้อมูลผลการทดสอบและนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาค่าสถานะที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชัน Response optimizer
7. ทำการทดลองอีกครั้งเพื่อยืนยันค่าสถานะที่เหมาะสมโดยทำการปรับแก้ค่าของปัจจัยและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test)
8. ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึก, หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญและลักษณะสัณฐานวิทยาของ  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES และวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้
9. ทดสอบสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) โดยใช้แบคทีเรียอีโคไลเป็นแบคทีเรียต้นแบบ
10. สรุปผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากงานวิจัยและข้อเสนอแนะ พร้อมทั้งนำเสนอแนวทางในการแก้ไข

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกชนิด ABS โดยเสริมแรงด้วย  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab
2. ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาหรือปัจจัยเชิงปริมาณกับสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบ โดยพิจารณาบริเวณพื้นผิวส่วนแตกหักของชิ้นงานจากผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา
3. เป็นความรู้พื้นฐานในการศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกชนิด ABS โดยผสม  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES เป็นส่วนเพิ่มคุณสมบัติในด้านการเสริมแรงให้แก่วัสดุพลาสติกชนิด ABS ที่ใช้เป็นโครงสร้างหลัก
4. ทำให้ทราบกลไกและประสิทธิภาพในการศึกษาสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียโดยใช้แบคทีเรียอีโคไลเป็นแบคทีเรียต้นแบบผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity)
5. เกิดความเชื่อมโยงแนวคิดและเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบเพื่อเป็นประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ

## บทที่ 2

# งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1.1 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture design)

งานวิจัยของ Y. Rostamiyan และคณะ [11] ทำการศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของนาโนไฮบริดคอมโพสิตที่มีผลต่อสมบัติทางกลโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองวิธี Mixture design แบบ Simplex-centroid กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง  $X_1$  (พลาสติก HIPS) กระแทกสูง,  $X_2$  ( $SiO_2$  หรือซิลิกา) และ  $X_3$  (Epoxy resin) โดยมีผลตอบสนองของการทดลอง ได้แก่ แรงต้านทานการดึง (Tensile strength), ความทนต่อแรงดัด (Flexural strength), ความต้านทานแรงอัด (Compression strength) และความต้านแรงกระแทก (Impact strength) สร้างขึ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 (ทดสอบ Tensile strength), มาตรฐาน ASTM D790 (ทดสอบ Flexural strength), มาตรฐาน ASTM D695 (ทดสอบ Compression strength) และมาตรฐาน ASTM D256 (ทดสอบ Compression strength) จากผลการทดสอบพบว่า เกิดอิทธิพลปัจจัยร่วม 2 ปัจจัยระหว่างปัจจัยซิลิกากับปัจจัย Epoxy resin ซึ่งมีผลต่อแรงต้านทานการดึง ส่วนปัจจัยพลาสติก HIPS กับปัจจัย Epoxy resin มีผลต่อความทนต่อแรงดัด, ความต้านทานแรงอัดและความต้านแรงกระแทก ผลการวิเคราะห์ระดับสัดส่วนผสมที่ดีที่สุดของปัจจัยทั้งหมดที่ทำให้ค่าการทดสอบสมบัติทางกลของนาโนไฮบริดคอมโพสิตมีค่าสูงสุด (Maximum) คือ ปัจจัย  $X_1$  (HIPS) เท่ากับ 2.67 wt.% ปัจจัย  $X_2$  ( $SiO_2$ ) เท่ากับ 4.01 wt.% และปัจจัย  $X_3$  (Hardener) เท่ากับ 28 phr

งานวิจัยของ Amani Khaskhoussi และคณะ [12] ทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Mixture design โดยใช้สมการจากแบบจำลองวิเคราะห์สมบัติทางกลวัสดุเซรามิกเชิงประกอบ  $Al_2O_3-ZrO_2-TiO_2$  เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม กำหนดเงื่อนไขการทดลองของปัจจัย  $X_1$  ( $TiO_2$ ) เท่ากับ  $0.0027 \leq X_1 \leq 0.1$ , ปัจจัย  $X_2$  ( $Al_2O_3$ ) เท่ากับ  $0 \leq X_2 \leq 0.9973$  และปัจจัย  $X_3$  ( $ZrO_2$ ) เท่ากับ  $0 \leq X_3 \leq 0.9973$  โดยมีผลตอบสนองคือ ค่าการทดสอบความแข็ง ( $Y_1$ ), ค่าการทดสอบแรงดึง ( $Y_2$ ) และค่าการทดสอบมอดูลัสยืดหยุ่น ( $Y_3$ ) จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบความแข็ง พบว่า  $X_1$  ( $TiO_2$ ) มีผลต่อการทดสอบเนื่องจากปริมาณ  $TiO_2$  ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งของวัสดุลดลงขณะที่ปัจจัยอื่นๆ  $X_2$  และ  $X_3$  มีผลต่อความแข็งเพียงเล็กน้อย ในส่วนการทดสอบแรงดึงพบว่า ปัจจัย  $X_1$  ( $TiO_2$ ) มีผลต่อการทดสอบและเกิดอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย คือ  $X_1, X_2$  และ  $X_1, X_3$  ในขณะที่การทดสอบมอดูลัสยืดหยุ่นปัจจัย  $X_1$  ( $TiO_2$ ) มีผลต่อมอดูลัสยืดหยุ่นสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 3 %wt

งานวิจัยของ Oscar Valerio และคณะ [13] ศึกษาความเป็นไปได้ของการผสมพลาสติก 3 ชนิด ได้แก่ PGsMA, PLA และ PBS ใช้หลักการออกแบบการทดลองวิธี Mixture design และทำนายผลการทดลองจากสมการ Regression model ของตัวแบบจำลอง โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองของปัจจัยเท่ากับ  $0.3 < PGsMA < 0.5$ ,  $0.3 < PLA < 0.5$  และ  $0.1 < PBS < 0.3$  ได้ผลการทดลองทั้งหมด 26 การทดลอง (runs) โดยมีค่าการทดสอบแรงดึงและค่าการทดสอบแรงกระแทกเป็นผลตอบสนองของการทดลอง จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มปริมาณของปัจจัย PLA มีผลต่อแรงดึงและมอดูลัสยืดหยุ่น ขณะที่การเพิ่มปริมาณของปัจจัยร่วม 2 ปัจจัยระหว่างปัจจัย PGsMA และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัย PBS มีผลให้มอดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุลดลง และได้ค่าการทำนายค่าของปัจจัย PGSMA/PLA/PBS ที่ 35/40/25 wt% จะทำให้ค่าการทดสอบแรงดึงและทดสอบแรงกระแทกมีค่าสูงสุด (Maximum) ที่ค่าการทดสอบ Tensile strength เท่ากับ 33.8 MPa, Tensile modulus เท่ากับ 1.47 GPa และ Izod impact เท่ากับ 159 J/m ตามลำดับ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม หรือ Mixture design พบว่า เป็นหนึ่งในเทคนิคของการออกแบบการทดลองที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาอัตราส่วนและกำหนดระดับปัจจัยขององค์ประกอบที่ทำการศึกษได้อย่างเหมาะสม

### 2.1.2 การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไฮเลน

งานวิจัยของ Emi Ukaji และคณะ [14] ทำการปรับปรุงพื้นผิว  $\text{TiO}_2$  ด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไฮเลน 2 ชนิด ได้แก่ APTES และ PTES เตรียมตัวอย่างในอัตราส่วน  $\text{TiO}_2$  1.5 กรัม ต่อความเข้มข้น APTES และ PTES ที่ 0.0027 ถึง 0.1 โมลต่อลิตร ทดสอบโดยนำตัวอย่างไปปรับแสง UV เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า สารควบคู่ปฏิกิริยา APTES ให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและความสามารถในการป้องกันรังสี UV ที่สูงกว่า

งานวิจัยของ Shadpour Mallakpour และคณะ [8] ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ผสมด้วยสารอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไฮเลน APTES ในปริมาตรร้อยละที่ 10 wt.% ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการปรับปรุงพื้นผิวของสารอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของพลาสติก PVA ลดลง ส่วนผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิค FTIR สรุปว่า โมเลกุลของสารควบคู่ปฏิกิริยาถูกดูดซับบริเวณพื้นผิวของอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  ด้วยหมู่ไฮดรอกซิลและสร้างพันธะโควาเลนต์ ส่วนโมเลกุลอื่นๆ ของสารควบคู่ปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นและสร้างพันธะไฮโดรเจน

งานวิจัยของ Ivan Brnardić และคณะ [15] ทำการปรับปรุงพื้นผิวสารอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  ด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไฮเลน APTES ผ่านกระบวนการโซลเจล ปริมาตร 30, 60 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงและทำให้แห้งในสุญญากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิค FTIR วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะสัญญาณวิทยาที่เกิดขึ้น พบว่า เกิดพันธะร่วมระหว่างอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  และ APTES (Ti-O-Si) บนพื้นผิวของ  $\text{TiO}_2$

งานวิจัยของ Fei Cheng และคณะ [16] ทำการดัดแปลงพื้นผิวอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  (เกรด P25) ด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไฮเลน APTES ทดสอบโดยการจุ่มเคลือบกับกระดาษ (Dip-coating) พบว่า กระดาษที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิว  $\text{TiO}_2$  ด้วย APTES เกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิว  $\text{TiO}_2$  กับ APTES สำหรับโครงสร้างของ APTES ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน  $\text{NH}_2$ ,  $\text{Si}(\text{OR})_3$  รวมทั้งเกิดพันธะ Ti-O-Si ที่เกิดจากการรวมตัวกันระหว่างหมู่ Silanol group ของ APTES และเกิดหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนพื้นผิวของ  $\text{TiO}_2$

งานวิจัยของพินิจ เอี่ยมสะอาด [17] ทำการสังเคราะห์  $\text{TiO}_2$  ด้วยกระบวนการโซลเจล หลังจากนั้นนำ  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมได้ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไฮเลน APTES ที่ระดับความเข้มข้น 1, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติม APTES 0.5, 1.5, 2.5 และ 5 มิลลิลิตร ในตัวทำละลาย Isopropyl alcohol คนสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นอบสารที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารด้วยเทคนิค FT-IR Spectroscopy พบว่า การยึดและหดตัวของพันธะ Ti-O ของ TiO<sub>2</sub> ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES มีการยึดและหดพันธะ Ti-O-Si และพันธะ N-H

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไฮเลนพบว่า ในขั้นตอนการเตรียมสารปรับปรุงพื้นผิวส่วนมากนิยมใช้วิธีการเตรียมสารผ่านกระบวนการโซลเจล ซึ่งมีขั้นตอนในการเตรียมสารที่ค่อนข้างซับซ้อนและใช้เวลานาน เพื่อเป็นการลดขั้นตอนในการเตรียมสารจึงมีการพัฒนาวิธีการปรับปรุงพื้นผิวโดยไม่ผ่านกระบวนการโซลเจลขึ้นมาใหม่ และพบว่า ระดับการผสมของ TiO<sub>2</sub> ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวในอัตราส่วนที่มากเกินไปมีผลต่อหมู่ฟังก์ชันของเมทริกซ์หรือวัสดุเนื้อพื้น

### 2.1.3 สมบัติทางกล

งานวิจัยของ Masami Hashimoto และคณะ [18] ทำการปรับปรุงพื้นผิว TiO<sub>2</sub> (Anatase) ด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยาไฮเลนชนิด  $\gamma$ -(methacryloxy)propyl trimethoxysilane หรือ  $\gamma$ -MPS ที่ระดับปริมาตร 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต่อสมบัติทางกลและลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ผลการศึกษาพบว่า วัสดุเชิงประกอบ HDPE/TiO<sub>2</sub> ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย  $\gamma$ -MPS ให้ผลการทดสอบสมบัติทางกลเพิ่มขึ้น โดยให้ค่าการทดสอบความต้านทานแรงดึงสูงถึง 65 MPa ขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวให้ค่าต้านทานแรงดึงที่ 49 MPa สำหรับค่าการทดสอบมอดูลัสแรงดึงให้ค่าการทดสอบที่ 10 GPa (ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว) และที่ 7.5 GPa (ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว) และจากผลการศึกษา ลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง FE-SEM พบว่า เกิด bridging effect ระหว่างเฟสเนื้อพื้น HDPE กับ TiO<sub>2</sub> ด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยาไฮเลน

งานวิจัยของ Vu Giang Nguyen และคณะ [19] ทำการศึกษาสมบัติทางกลของพลาสติกเชิงประกอบชนิด LDPE (Low-density polyethylene) เสริมแรงด้วย TiO<sub>2</sub> (เฟส Anatase) ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยาไฮเลนชนิด VTMS (Vinyltrimethoxysilane) ปริมาณ 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สร้างชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติทางกลตามมาตรฐาน ASTM D 638 ผลการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงดึงของพลาสติกเชิงประกอบชนิดนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณตั้งแต่ 0 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และค่าการทดสอบมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่ปริมาณที่ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

งานวิจัยของ Jayapalan Sudeepan และคณะ [20] ทำการศึกษาผลของพอลิเมอร์เชิงประกอบ ABS/TiO<sub>2</sub> ต่อสมบัติทางกลและพฤติกรรมการเสียดทานระหว่างพื้นผิวที่ระดับปริมาณผสม ABS ต่อ TiO<sub>2</sub> 0, 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปชิ้นงานรูปร่าง Dumbbell shape ขนาด 100 × 12 × 8 mm<sup>3</sup> ตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วยเครื่อง Extruder แบบสกรูเดี่ยว ผลการทดสอบพบว่า ค่าการทดสอบมอดูลัสแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ TiO<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้น สำหรับค่าการทดสอบแรงดึงให้ค่าแรงดึงสูงสุดที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ได้อธิบายแนวโน้มค่าการทดสอบแรงดึงที่ลดลงเนื่องจากเกิดอันตรกิริยาอย่างอ่อน (weak interaction) ระหว่างเฟสเสริมแรงและเฟสพอลิเมอร์เนื้อพื้น ซึ่งวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานแบบอัดรีดมีผลต่อการกระจายตัวของเฟสเนื้อพื้นพลาสติก ABS เข้ากับเฟส

เสริมแรงเป็นสิ่งที่ยากและง่ายต่อการจับตัวเป็นก้อน (clumping) มีแนวโน้มเกิด de-bond จากเฟสพลาสติกเนื้อพื้นทำให้ความต้านทานแรงดึงลดลง

งานวิจัยของ Angel R. Torrado และคณะ [21] ทำการศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่ง  $\text{TiO}_2$  ต่อสมบัติทางกลของพลาสติก ABS ในอัตราส่วนที่ 95:5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบในทิศทางที่แตกต่างกันคือ แนวนอน (XYZ) และแนวตั้ง (ZXY) ด้วยเครื่อง 3D Printing กำหนดขนาดชิ้นงานตามมาตรฐานการทดสอบสมบัติทางกล ASTM D638 Type V ผลการทดสอบสมบัติทางกลพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปในแนว XYZ ให้ค่าทางสมบัติทางกลสูงกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปในแนว ZXY ที่ค่าแรงดึง  $32.90 \pm 1.43$  MPa และค่าการยึดตัว ณ จุดขาดที่  $3.77 \pm 1.93$  MPa เนื่องจากลักษณะการกระจายตัวของ  $\text{TiO}_2$  แบบ agglomerated สามารถลดผลตอบแทนต่อแรงดึงและพฤติกรรมกรเสียรูปทรงของวัสดุ

งานวิจัยของ Matthew R. Skorski และคณะ [22] ทำการศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุนาโนเชิงประกอบ  $\text{TiO}_2$ -ABS ที่ระดับปริมาณผสม  $\text{TiO}_2$  ต่อ ABS 0, 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแบบ Dumbbell shape ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 ด้วยเครื่อง 3D Printer ผลจากการทดสอบสมบัติทางกลพบว่า ปริมาณผสม  $\text{TiO}_2$ -ABS ที่ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าทดสอบแรงดึงและแรงดัดที่เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ได้ผสม  $\text{TiO}_2$  ในขณะที่ปริมาณผสม  $\text{TiO}_2$ -ABS ที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าการทดสอบแรงดึงและแรงดัดต่ำสุดเนื่องจากเปอร์เซ็นต์การจับตัวกันเป็นก้อนของ  $\text{TiO}_2$  ที่เหมาะสมในพลาสติกเนื้อพื้นมีผลต่อความสามารถการเพิ่มสมบัติทางกลของวัสดุ

งานวิจัยของธีรพงศ์ และคณะ [23] ทำการศึกษาประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพลาสติกชนิดอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) กับ  $\text{TiO}_2$  ต่อสมบัติทางกลวิเคราะห์ค่าทดสอบความแข็งแรงดึงและมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระดับปริมาณผสม 0, 0.5, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผสมองค์ประกอบเข้าด้วยกันด้วยเครื่อง Internal mixture และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบรูปร่าง Dumbbell ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 ด้วยเครื่องอัดพลาสติก Compression molding จากผลการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระดับปริมาณผสม 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าการทดสอบสูงและมีแนวโน้มลดลงตามระดับปริมาณผสมของ  $\text{TiO}_2$  โดยให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ 18 MPa และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ 679.39 GPa

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพบว่า ระดับปริมาณผสมของสารเติมแต่งหรือสารเสริมแรง  $\text{TiO}_2$  ที่มีต่อสมบัติทางกลของพลาสติก ABS ที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มสมบัติและประสิทธิภาพดังกล่าวให้ดียิ่งขึ้นและพบว่า เมื่อนำสารเติมแต่ง  $\text{TiO}_2$  ไปผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยาในปริมาณที่ไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักก่อนทำการผสมในพลาสติกจะช่วยเพิ่มสมบัติและประสิทธิภาพดังกล่าวให้ดียิ่งขึ้นเช่นกัน

#### 2.1.4 สมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย

งานวิจัยของเสาวลักษณ์ บุญยอด [24] ทำการศึกษาพฤติกรรมฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มบาง  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการได้ปด้วยไนโตรเจนด้วยวิธีโซลเจล จากนั้นนำมาเคลือบบนแผ่นอะครีลิกสำหรับใช้เป็นวัสดุฐานด้วยการจุ่มเคลือบ โดยทำการจุ่มเคลือบทั้งหมดสามครั้ง ที่ระดับสัดส่วนที่ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ นำตัวอย่างทั้งหมดไปปรับแสงยูวีเพื่อศึกษาพฤติกรรมฆ่าเชื้อแบคทีเรียผ่าน

ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก จากผลการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ฟิล์ม  $\text{TiO}_2$  ทุกระดับสัดส่วนให้ประสิทธิภาพฆ่าเชื้อแบคทีเรียดังกล่าวได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้การรับแสงยูวีเป็นเวลา 120 นาที

งานวิจัยของ Yage Xing และคณะ [3] ทำการศึกษาผลของอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  ต่อสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มโพลีเอทิลีน (PE) เตรียมฟิล์มด้วยวิธีอัดรีดแบบสกรูเดียวในอัตราส่วน PE (200 g) :  $\text{TiO}_2$  (2 wt%) จากการทดสอบสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียโดยใช้แบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* และ *S. aureus* ผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 30 และ 60 นาที ผลการศึกษาสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียพบว่า ฟิล์มโพลีเอทิลีนที่เคลือบด้วย  $\text{TiO}_2$  ให้ประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียที่ดีตามเวลาฉายแสงที่เพิ่มขึ้น สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* และ *S. aureus* ได้สูงที่ร้อยละ 89.3 และ 95.2 ตามลำดับ

งานวิจัยของ Mirigul Altan และคณะ [25] ทำการศึกษาผลต้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบ Polypropylene/ $\text{TiO}_2$  ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยสไตรีน-เอทิลีน-บิวทิลีน-สไตรีนชนิดที่ต่อแขนงกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (SEBS-g-MA) และสารคู่ควบปฏิกิริยาประเภทไฮเลน VTMS โดยผสมอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  ที่ระดับความเข้มข้น 1, 3 และ 5 wt% ตามลำดับ เตรียมวัสดุด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และสร้างชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องฉีดพลาสติก ใช้แบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* เป็นแบคทีเรียในการทดสอบหลังจากนั้นนำชิ้นงานไปรับแสงยูวีเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและนับจำนวนจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตจากการรับแสงยูวีตามมาตรฐานการทดสอบ JIS Z 2801 จากผลการศึกษาพบว่า ผลการต้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบแปรผันตามการกระจายตัวและความเข้มของอนุภาคนาโน โดยวัสดุเชิงประกอบ PP/ $\text{TiO}_2$ /SEBS-g-MA/silane ที่ระดับความเข้มข้นการปรับปรุงพื้นผิวด้วย  $\text{TiO}_2$  ที่ 1 wt% ให้ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ดีและให้การกระจายตัวที่ดีให้กับเฟสเนื้อพื้น เนื่องจากอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยาประเภทไฮเลน มีแนวโน้มเกิดการรวมกันเป็นก้อนส่งผลให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่ในเฟสเนื้อพื้นและมีความไวต่อการรับแสงขณะสัมผัสกับรังสียูวี

งานวิจัยของ Carmen Fonseca และคณะ [26] ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบชนิดพอลิแลคติกแอซิด (PLA) โดยผสมอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  เตรียมวัสดุเชิงประกอบด้วยเครื่องผสมแบบลูกกลิ้ง โดยผสม  $\text{TiO}_2$  ในอัตราส่วนที่ 1, 3, 5 และ 8 wt% ตามลำดับ ทดสอบโดยใช้แบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* และเชื้อราชนิด *A. fumigatus* นำวัสดุที่เตรียมได้ไปรับแสง White light และยูวีเอ (UVA) เพื่อศึกษาสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต เช่น แบคทีเรียหรือเชื้อรา จากผลการศึกษาพบว่า พฤติกรรมการกระจายตัว  $\text{TiO}_2$  ในพลาสติกเนื้อพื้น PLA ที่อัตราส่วนผสม 8 wt% ให้ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและเชื้อราสูงคิดเป็นร้อยละที่ประมาณ 94.3 และ 99.9 ตามลำดับ ภายใต้การรับแสงยูวี

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการศึกษาสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุหรือชิ้นงานก่อนทำการศึกษาศักยภาพดังกล่าวโดยนำชิ้นงานไปรับแสงยูวีในเวลาต่างๆ พบว่า ลักษณะการกระจายตัวและระดับการผสมในอัตราส่วนต่างๆ ของ  $\text{TiO}_2$  ให้ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่แตกต่างกัน

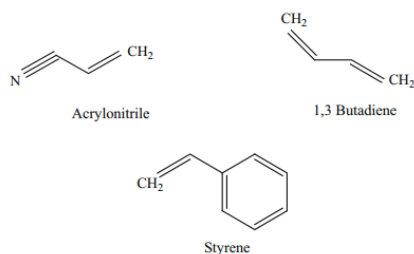
## 2.2 บทสรุปการศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นทำให้ทราบถึงแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพสมบัติทางกลและสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียให้กับพลาสติกชนิด ABS หรือวัสดุเนื้อพื้นซึ่งเป็นพลาสติกวิศวกรรมประเภทเทอร์โมพลาสติกที่ให้ความสมดุลในเรื่องความแข็งและความเหนียวสูง ดังนั้นการเพิ่มสมบัติทางกลและสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียให้กับวัสดุเนื้อพื้นจำเป็นต้องมีการเติมหรือผสมวัสดุเสริมแรงที่ให้สมบัติตรงกับคุณสมบัติทั้งหมดที่ต้องการศึกษา จากการศึกษาวิจัยพบว่า วัสดุเสริมแรง  $TiO_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ซึ่งสารคู่ควบปฏิกิริยาชนิดนี้สามารถให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและป้องกันรังสีช่วงยูวีได้ดี จึงถูกนำมาศึกษาในด้านสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียอย่างกว้างขวาง การเตรียมวัสดุในขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิว  $TiO_2$  ด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ในปริมาณที่เหมาะสมถือปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มสมบัติดังกล่าวได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะนำเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture design) มาประยุกต์ใช้ในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมและกำหนดระดับปริมาณของปัจจัยที่ใช้ในการผสมวัสดุไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบที่ทำการศึกษาตามมาตรฐานทดสอบแรงดึง ASTM D638 และสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียตามมาตรฐาน IS Z 2801:2010 ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity)

## 2.3 อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอิน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)

เป็นพลาสติกวิศวกรรมประเภทเทอร์โมพลาสติกที่สามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้ ซึ่งพลาสติกทั่วไปจะมีลักษณะแข็งแต่เปราะแตกหักง่ายแต่พลาสติก ABS แตกต่างจากพลาสติกทั่วไป คือ เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติเด่นที่ให้ความสมดุลในเรื่องความแข็งและความเหนียวสูง คงสภาพรูปร่างได้ดี ทำให้มีสมบัติทนทานต่อการรับแรงกระแทก ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนต่อสภาพแวดล้อม มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวความร้อนต่ำ อีกทั้งยังมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี มีช่วงอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้กว้างคือ -20 ถึง 80 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลวสูงอยู่ที่ 200 - 250 องศาเซลเซียส นิยมใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์และใช้ทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, เครื่องใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า เนื่องจากมีความทนต่อการขีดข่วนและทำความสะอาดง่าย [27,28]

โครงสร้างของพลาสติก ABS ได้มาจากการทำปฏิกิริยาของโมโนเมอร์ 3 ชนิด คือ สไตรีน (Styrene), อะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) และโพลิบิวทาไดอิน (Polybutadiene) ซึ่งโมโนเมอร์ทั้ง 3 ชนิดล้วนส่งผลต่อคุณสมบัติของพลาสติก โดยโมโนเมอร์อะคริโลไนไตรล์จะช่วยให้มีความทนความร้อนและสารเคมี, โมโนเมอร์บิวทาไดอินช่วยให้มีความทนทานต่อแรงกระแทก ส่วนโมโนเมอร์สไตรีนช่วยให้เนื้อพลาสติกมีพื้นผิวที่มันเงาและสามารถตัดแต่งรูปทรงได้ง่าย การเพิ่มสมบัติรับแรงกระแทกของพลาสติก ABS สามารถทำได้โดยทำการควบคุมขนาดของอนุภาคยาง, การกระจายและโครงสร้างจุลภาค อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนของโมโนเมอร์ทั้ง 3 ชนิดให้พลาสติกมีคุณสมบัติตามที่ต้องการได้

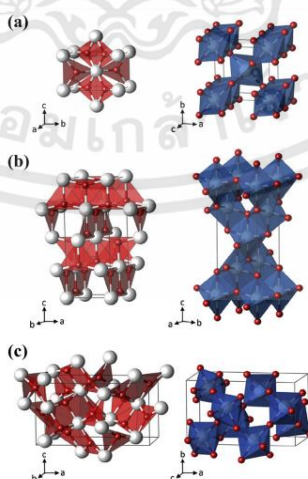


รูปที่ 2.1 มอนอเมอร์ของพลาสติก ABS [27]

## 2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)

มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{TiO}_2$  เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ถูกนำมาประยุกต์ใช้ใน งานอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เนื่องจากไม่เป็นพิษ ราคาถูกและมีเสถียรภาพทางเคมีสูงและมีคุณสมบัติ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type Semiconductor) เนื่องจากในโครงสร้างผลึกของ  $\text{TiO}_2$  มีแถบ ช่องว่างของ  $\text{O}_2$  ซึ่งมีโครงสร้างทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่ รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal พบมากที่สุดในธรรมชาติ มีความคงทนและมีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ สูง, อะนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal พบในธรรมชาติปานกลาง หากให้ความ ร้อนที่อุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์ (Rutile) และบรูคไซด์ (Brookite) มี โครงสร้างผลึกแบบ Orthorhombic พบได้น้อยในธรรมชาติ มีความเสถียรต่ออุณหภูมิต่ำ การที่  $\text{TiO}_2$  มีโครงสร้างผลึกและคุณสมบัติที่แตกต่างกันนั้น ส่งผลให้มีศักยภาพในการใช้เป็นตัวเร่งสำหรับการใช้ งานด้านสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน

ปัจจุบันนิยมใช้โครงสร้าง  $\text{TiO}_2$  แบบอะนาเทส มาศึกษากันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีค่า พลังงานช่องว่างสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ จึงมีความไวในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่า อีกทั้งยัง มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกสูง (Photocatalytic activity) ภายใต้การฉาย รังสี UV มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ไม่เป็นพิษ มีความเสถียรทางเคมีโดยใช้แสงสูงและราคาถูก [29-33]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) โดยที่ (a) รูไทล์, (b) อะนาเทส และ (c) บรูคไซด์ [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) [35]

Properties	Anatase
Crystal structure	Tetragonal
Band gap energy (eV)	3.2
Hardness (Mohs)	5.5 – 6.0
Density (g/cm <sup>3</sup> )	3.894
Gibbs free energy (kcal/mole)	-211.4
Lattice constant, a (Å)	3.784
Lattice constant, b (Å)	3.784
Lattice constant, c (Å)	9.515
Melting point (°C)	Change to rutile at high temp. 800 °C

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติพื้นฐานเพิ่มเติมของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) [30]

TiO <sub>2</sub>	Phase	Crystallinity (%)	BET surface area (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	Absorption edge wavelength (nm)	Band gap energy (eV)
Amorphous TiO <sub>2</sub>	Amorphous	-	499.00	381	3.25
Degussa P25	A, R	80 (A), 20 (R)*	54.50	396	3.13
Anatase	A	100 (A)	10.72	383	3.24

A: anatase, R: rutile

## 2.5 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) [36]

กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำโฟโตคะตะลิสต์ถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวี (UV) แล้วเกิดการเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้น สารกึ่งตัวนำโฟโตคะตะลิสต์ (S) ได้แก่ TiO<sub>2</sub>, ZnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, WO<sub>3</sub>, AgPO<sub>4</sub>, CdS และ ZnS เป็นต้น สารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานอยู่ 2 แถบ คือ แถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) โดยแถบพลังงาน 2 แถบนี้มีแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) กั้นอยู่ ซึ่งรายละเอียดและหลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส มีดังนี้

1. สารกึ่งตัวนำโฟโตคะตะลิสต์จะดูดซับแสงที่ตกกระทบด้วยพลังงานแสงมากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่าง ทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นไปสู่แถบการนำที่อยู่ในสภาวะการกระตุ้น ซึ่งเรียกว่า  $e_{cb}^-$  ทำให้เกิดเป็นช่องว่างหรือหลุมอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ ที่เรียกว่า  $h_{rb}^+$



2. อิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนจะปล่อยพลังงานความร้อนออกมาโดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปสู่ตำแหน่งพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำและหลุมอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปสู่ตำแหน่งบนสุดของแถบวาเลนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การรวมกัน (Recombination) ของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นในแถบการนำและหลุมอิเล็กตรอนสามารถเกิดการรวมตัวและคายพลังงานความร้อนออกมา ดังสมการ

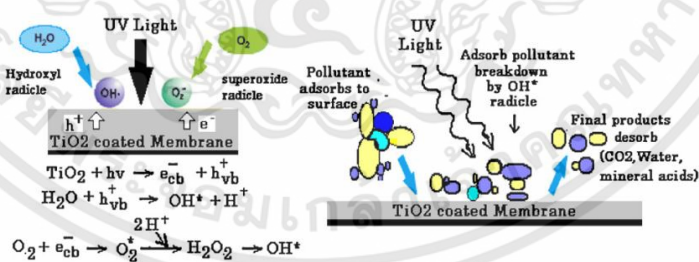


4. การเคลื่อนที่ของประจุ (Charge transport) อิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นและหลุมอิเล็กตรอน จะเคลื่อนที่ไปสู่ขั้วแคโทดและแอโนด ตามลำดับ สำหรับสารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่เกิดการสะสมของอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดหรือแอโนดเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกต่อไป ส่วนสารกึ่งตัวนำขนาดเล็กการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะแตกต่างกับสารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่ สาเหตุอาจเกิดจาก เช่น โครงสร้างระดับนาโน และความไม่เป็นระเบียบโครงสร้างของสาร เป็นต้น

5. การดูดซับน้ำบนผิวอนุภาค ส่วนใหญ่สารโฟโตแคตะไลสต์มีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิกภายใต้การรับแสง ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิส ถ้าผิวอนุภาคมีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างหลุมอิเล็กตรอนและน้ำหรือความชื้นสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายทำให้เกิดอนุมูลอิสระ  $OH^\cdot$  ดังสมการ



6. การเกิดอนุมูลอิสระ (Free radicals formation) อิเล็กตรอนเกิดการถ่ายเทจากโมเลกุลน้ำไปสู่โฟโตแคตะไลสต์ (หลุมอิเล็กตรอนจะดึงคู่อิเล็กตรอนจากน้ำ) ในสมการ 2.3 เกิดอนุมูลอิสระ  $OH^\cdot$  จากนั้นอิเล็กตรอนจะถ่ายเทจากโฟโตแคตะไลสต์ไปสู่ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำทำให้เกิดอนุมูลอิสระ  $O_2^\cdot^-$  ดังสมการ



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลซิสของ TiO<sub>2</sub>

จากรูปที่ 2.3 TiO<sub>2</sub> มีแถบช่องว่างที่กว้าง ประมาณ 3.0 – 3.2 eV ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีประสิทธิภาพเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวี จะเห็นว่าออกซิเจนและน้ำมีส่วนทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชันของ TiO<sub>2</sub> โดยทั่วไป TiO<sub>2</sub> ที่นิยมใช้เป็นเม็ดสี (Pigment) คือ เฟสรูไทล์ ซึ่งมีขนาดอนุภาคหลายร้อยนาโนเมตรหรือมีขนาดใหญ่กว่าเฟสอะนาเทส เฟสของ TiO<sub>2</sub> ที่ให้สมบัติความเป็นโฟโตแคตะไลสต์ที่ดี คือ เฟสอะนาเทส ซึ่งมีขนาดผลึกขนาด 20 นาโนเมตร มีความ

โปร่งใสมากกว่าเฟสรูโพล์ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาและมุ่งเน้นศึกษา  $\text{TiO}_2$  ให้มีความเป็นโฟโตแคตะลิสต์มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและสามารถกระตุ้นด้วยแสงที่มองเห็นได้โดยใช้พลังงานที่น้อยลง

สำหรับกลไกการเกิดอนุมูลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิสมีขั้นตอนที่สำคัญทั้งหมด 5 ขั้นตอน ได้แก่

1. การแพร่ของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงและหลุมอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาจากสมการที่ 2.1
2. การดูดซับตัวทำปฏิกิริยาบนพื้นผิว ได้แก่ การดูดซับความชื้นหรือโมเลกุลของน้ำ
3. การเกิดปฏิกิริยาบนผิว ในสมการที่ 2.3 และ 2.4
4. การปลดปล่อยอนุมูลอิสระของปฏิกิริยาออกจากพื้นผิว ได้แก่  $\text{OH}^-$  และ  $\text{O}_2^-$
5. การแพร่อนุมูลอิสระออกจากพื้นผิว

## 2.6 พลังงานคลื่นแสง [35]

คลื่นแสงที่พบในแสงอาทิตย์ประกอบด้วยพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ดังนี้

2.4.1 UVC มีช่วงความยาวคลื่น 100 – 290 นาโนเมตร คลื่นแสงช่วงนี้ ส่วนใหญ่ถูกดูดซับด้วยก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศ ดังนั้นแสงยูวีหรือแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ส่องถึงโลกความยาวคลื่นจะอยู่ช่วง 290 – 400 นาโนเมตร

2.4.2 UVB มีช่วงความยาวคลื่น 290 – 320 นาโนเมตร คลื่นแสงช่วงนี้มีผลต่อผิวหนังทำให้ผิวคล้ำเกิดการกระตุ้นในการสร้างเมลานิน

2.4.3 Visible light มีช่วงความยาวคลื่น 400 – 800 นาโนเมตร

2.4.4 Infrared light มีช่วงความยาวคลื่น 800 – 1,700 นาโนเมตร

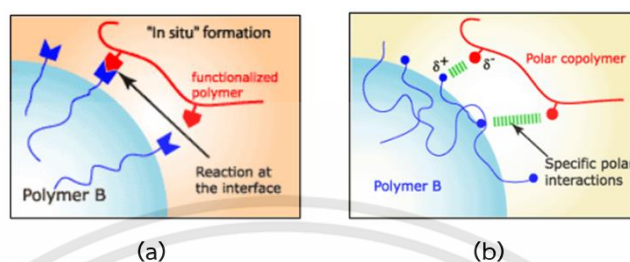
## 2.7 สารควบคู่ปฏิกิริยา (Coupling Agents)

เป็นสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน นิยมใช้เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์และฟิลเลอร์ ทำหน้าที่เชื่อมการยึดเหนี่ยวระหว่างสองโมเลกุลไว้ รวมไปถึงการสร้างความสามารถในการยึดเกาะและการกระจายตัวให้กับวัสดุ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเคลือบพื้นผิวหรือใช้เป็นสารปรับปรุงพื้นผิวได้อีกด้วย ประสิทธิภาพในการยึดเกาะของสารควบคู่ไซเลนนั้น สารควบคู่ไซเลนจะทำปฏิกิริยากันเองและยึดเกาะกันหลายชั้น เกิดการจัดเรียงตัวกันแบบชั้นเดียวโดยลักษณะการยึดเกาะจะเปลี่ยนไปตามประเภทของสาร (ขึ้นอยู่กับประเภทของสารที่เติม) เกิดเป็นสายโซ่ตาข่ายลักษณะที่พันกัน (Inter-penetrating network หรือ IPN) สารควบคู่ปฏิกิริยา สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. Reactive Coupling Agents เป็นการปรับปรุงในส่วนของพื้นผิวฟิลเลอร์ จะใช้สารที่ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์และฟิลเลอร์ ทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างสองเฟส โมเลกุลของสารควบคู่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาเคมีประกอบด้วยหมู่ที่ว่องไว เช่น หมู่อีพอกซี, หมู่คาร์บอกซิลิก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

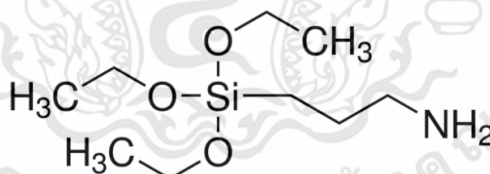
2. Non-reactive Coupling Agents เป็นการปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์และฟิลเลอร์ โดยทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวหรือเปลี่ยนลักษณะพื้นผิวของฟิลเลอร์ให้เป็นไฮโดรโฟบิก (ไม่ชอบน้ำ) ให้เกิดการยึดเหนี่ยวโดยการสร้างแรงดึงดูดแบบแวนเดอร์วาลส์หรือเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์กับฟิลเลอร์ โดยที่ (a) Reactive coupling agents, (b) Non-reactive coupling agents [37]

## 2.8 สารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไซเลน (Silane Coupling Agent)

ประกอบไปด้วยโมเลกุลของไซเลน นิยมนำมาใช้กับพลาสติกได้หลายชนิดมีโครงสร้างหลักคือ  $X_3-Si-R-Y$  โดยที่ X หรือ Alkoxy group คือ ส่วนที่เกิดปฏิกิริยากับพื้นผิวของฟิลเลอร์ ส่วน R หรือ Alkyl group คือ ส่วนที่เชื่อมกับ Si และ Y หรือ Organofunctional group คือ ส่วนที่เกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ [37-39] สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไซเลน (Silane Coupling Agent) คือ 3 - Aminopropyltriethoxysilane หรือ APTES โดยแสดงลักษณะโครงสร้างและสมบัติเพิ่มเติมเบื้องต้น ดังรูปที่ 2.5 และในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ 3 - Aminopropyltriethoxysilane [40]

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของ APTES [41,42]

Compound	Formula	Properties
3 - aminopropyltriethoxysilane	$H_2N(CH_2)_3Si(OC_2H_5)_3$	Molecular weight: 221.37 Boiling temp. (°C): 217 Density (g/cm <sup>3</sup> ): 0.94 Refraction coefficient: $n_{D25} - 1.42$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 วัสดุผสมหรือวัสดุเชิงประกอบ [43]

วัสดุผสมหรือวัสดุเชิงประกอบ คือ การรวมกันของวัสดุที่มากกว่า 2 ชนิด โดยมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกันมาผสมหรือมารวมกันเกิดเป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติแตกต่างไปจากวัสดุเดิม การรวมกันของวัสดุ 2 ชนิดมีตั้งแต่ระดับนาโนคอมโพสิต (Nano composite) ขึ้นไป การทำวัสดุเชิงประกอบขึ้นมาใหม่ก็เพื่อสร้างหรือปรับปรุงสมบัติบางอย่างที่วัสดุเดิมมีขีดจำกัดอยู่ เช่น ความแข็งแรง ความแข็งแกร่ง ความต้านทานการกัดกร่อน ความแข็งและการนำไฟฟ้า เป็นต้น วัสดุที่ผสมขึ้นมาจะเป็นวัสดุที่รวมสมบัติเด่นของแต่ละวัสดุเข้าด้วยกัน เช่น วัสดุประเภทพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยจะมีสมบัติทางความแข็งแรงที่ดี มีน้ำหนักเบา ทนการกัดกร่อนและใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า โดยองค์ประกอบที่สำคัญของวัสดุเชิงประกอบประกอบด้วย

1. เฟสเนื้อพื้น (Matrix) ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งที่กำหนด โดยจะปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียหายจากอุณหภูมิหรือความชื้น ให้ความแข็งแรงและมอดูลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง เฟสเนื้อพื้นเป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้ไปสู่ยังส่วนเสริมแรง เฟสเนื้อพื้นที่นิยมใช้ ได้แก่

1.1 พอลิเมอร์ (Polymer) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นเฟสเนื้อพื้นทั้งกลุ่มที่เป็นเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตติง เรียกวัสดุผสมชนิดนี้ว่า วัสดุผสมเมทริกซ์พอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composite) วัสดุผสมที่นิยมใช้พอลิเมอร์เป็นเฟสเนื้อพื้นมากที่สุด คือ วัสดุเส้นใยแก้วเสริมแรง ข้อจำกัดของวัสดุเส้นใยแก้วเสริมแรง คือใช้งานได้ดีในอุณหภูมิต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเฟสเนื้อพื้นที่เป็นโลหะและเซรามิก

1.2 โลหะ (Metal) ประกอบด้วย อะลูมิเนียม, แมกนีเซียม, ทองแดง, นิกเกิลและโลหะผสมประเภทสารประกอบใช้เสริมแรงร่วมกับเส้นใยที่เป็นโลหะและเซรามิก นิยมใช้กับชิ้นส่วนยานอวกาศและชิ้นส่วนยานยนต์ เรียกวัสดุผสมชนิดนี้ว่า วัสดุผสมเมทริกซ์โลหะ (Metal Matrix Composite) หรือ MMC คุณสมบัติเด่นของ MMC คือใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมเมทริกซ์พอลิเมอร์

1.3 เซรามิก (Ceramic) วัสดุผสมกลุ่มนี้เรียกว่า วัสดุผสมเมทริกซ์พอลิเมอร์ (Ceramic Matrix Composite) หรือ CMC เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่ใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิสูง และมีน้ำหนักเบากว่าเมทริกซ์ กลุ่มโลหะ แต่ข้อจำกัดของเซรามิก คือมีความเปราะ

2. เฟสกระจายหรือส่วนเสริมแรง (Reinforcement) คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดูลัสสูง ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงที่สำคัญได้แก่ เส้นใยชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว, เส้นใยคาร์บอน, เส้นใยเคฟลาร์ เป็นต้น เส้นใยอาจเป็นเส้นใยเดี่ยวยาว หรือเส้นใยสั้น นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ และมีการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงแบบต่างๆ โดยส่วนเสริมแรงจะทำหน้าที่เป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุผสม โดยวัสดุผสมสามารถจำแนกตามลักษณะรูปร่างของวัสดุที่นำมาผสมได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

### 2.1 วัสดุผสมที่เสริมแรงโดยอนุภาคและวัสดุที่เป็นเม็ดผง

วัสดุผสมที่เสริมแรงโดยอนุภาคหรือวัสดุเป็นเม็ดผง จำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรก คือกลุ่มที่เพิ่มความแข็งแรงโดยการกระจายอนุภาค และกลุ่มที่ 2 คือวัสดุผสมรูปร่างเป็นเม็ดผง วัสดุผสมทั้ง 2 กลุ่มจะมีความแตกต่างตรงกลไกการทำให้เกิดความแข็งแรง โดยกลุ่มแรกจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการเพิ่มความแข็งแรงในระดับอะตอมหรือขนาดของอนุภาคจะเล็กมาก ส่วนที่ 2 วัสดุผสมจะเป็นเม็ดขนาดใหญ่ การเพิ่มความแข็งแรงจะอาศัยการถ่ายเทความเค้นระหว่างเม็ดของวัสดุผสมกับเมทริกซ์ (Matrix)

## 2.2 วัสดุผสมที่เพิ่มความแข็งแรงโดยการกระจายอนุภาค

วัสดุผสมที่เพิ่มความแข็งแรงโดยการกระจายอนุภาคนี้ อนุภาคจะมีขนาดเล็กมาก โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางจะอยู่ระหว่าง 10 – 250 นาโนเมตร อนุภาคที่เพิ่มความแข็งแรงส่วนใหญ่จะเป็นโลหะออกไซด์ (Metallic oxide) ที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ (Matrix) หรือเฟสของวัสดุหลัก โดยอนุภาคที่กระจายตัวจะไม่มีการยึดเหนี่ยวหรือเชื่อมโยงกับเมทริกซ์แต่อย่างใด อนุภาคที่กระจายตัวอยู่จะทำหน้าที่ในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) ซึ่งจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น

## 2.3 วัสดุผสมรูปร่างเป็นเม็ดผง

วัสดุผสมที่เป็นเม็ดผงจะประกอบไปด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ที่ไม่มีผลต่อการเกิด Dislocation หรือการเลื่อนผ่าน (Slip) เหมือนกลุ่มแรกแต่จะมีการเพิ่มหรือทำให้เกิดสมบัติใหม่ขึ้น โดยอาศัยสมบัติร่วมระหว่างวัสดุที่มาผสมกันทำให้เกิดความแข็งแรงหรือสมบัติอื่นๆ ที่ต้องการ วิธีการทำวัสดุผสมประเภทนี้ทำได้โดยเพิ่มเม็ดผงของวัสดุหรืออนุภาคของวัสดุที่มีความแข็งแรงผสมเข้ากับเมทริกซ์ ทำให้ได้สมบัติทั้งสองอย่างขึ้นมา วัสดุผสมกลุ่มนี้ได้แก่ ซีเมนต์คาร์ไบด์ เป็นต้น วัสดุผสมที่ใช้เป็นเม็ดผงในการเสริมความแข็งแรงหรือสมบัติอื่นๆ มีหลายชนิด ซึ่งได้แก่

1. ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cement carbide) หรือเซอร์เมต (Cermets) เป็นวัสดุผสมที่ประกอบไปด้วยอนุภาคหรือเม็ดของเซรามิกชนิดแข็งกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ที่เป็นโลหะ ตัวอย่างของวัสดุผสมกลุ่มนี้ได้แก่ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ใช้ทำเครื่องมือในงานตัด ซึ่งมีคุณสมบัติที่แข็งและจุดหลอมเหลวสูง และหากต้องการเพิ่มความเหนียวให้กับทั้งสแตนคาร์ไบด์จะใช้วิธีการนำผงของทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมกับผงโคบอลต์และอัดด้วยแรงดันสูงให้เป็นรูปทรงที่ต้องการ จากนั้นให้ความร้อนจนโคบอลต์หลอมละลายกลายเป็นเมทริกซ์ที่ยึดเหนี่ยวเม็ดของทั้งสแตนคาร์ไบด์และเมื่อปล่อยให้แข็งตัว โคบอลต์จะช่วยให้มีคุณสมบัติต้านทานแรงกระแทกได้ดีขึ้น

2. หน้าสัมผัสทางไฟฟ้า (Electrical contact) วัสดุที่ใช้เป็นหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าจะต้องมีสมบัติที่ีระหว่างความต้านทานการเสียดสีและการนำไฟฟ้าเพื่อป้องกันการสึกกร่อน วัสดุผสมที่ประกอบไปด้วยทั้งสแตนที่มีความแข็งแรงและมีซิลเวอร์ (เงิน) เป็นวัสดุผสมที่ให้สมบัติของวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ดี โดยกระบวนการผลิตจะใช้ผงทั้งสแตน

3. พอลิเมอร์ (Polymers) ตัวอย่างของวัสดุผสมที่เป็นอนุภาคผสมกับพอลิเมอร์ เช่น ผงคาร์บอนในยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ผลิตรถยนต์ ผงคาร์บอนที่ใช้จะมีลักษณะกลมและเล็กเพียง 5-500 นาโนเมตร เติมนลงไปเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง, ทักษะ, ความแข็ง, ความต้านทานการเสียดสี. ต้านทานต่อการเสื่อมเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต และทนต่อความร้อนสูง

4. ผงโลหะผสมหล่อ อะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น ลูกสูบ เป็นวัสดุผสมที่ผลิตจากกรรมวิธีพิเศษโดยเติมผงของ SiC ลงไปในอะลูมิเนียมหลอมเหลว โดย SiC จะไม่เกิดการหลอมละลายและกระจายตัวอยู่ในเนื้อของอะลูมิเนียม ซึ่งผงของ SiC จะมีความแข็งแรงกระจายตัวในเมทริกซ์

## 2.10 กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก [44]

พลาสติกจัดเป็นวัสดุที่มีสมบัติในการขึ้นรูปที่ดีมาก ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตและสามารถนำมาใช้งานได้นั้นต้องผ่านกระบวนการผลิตหลายขั้นตอน โดยผลิตภัณฑ์ของพลาสติกแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

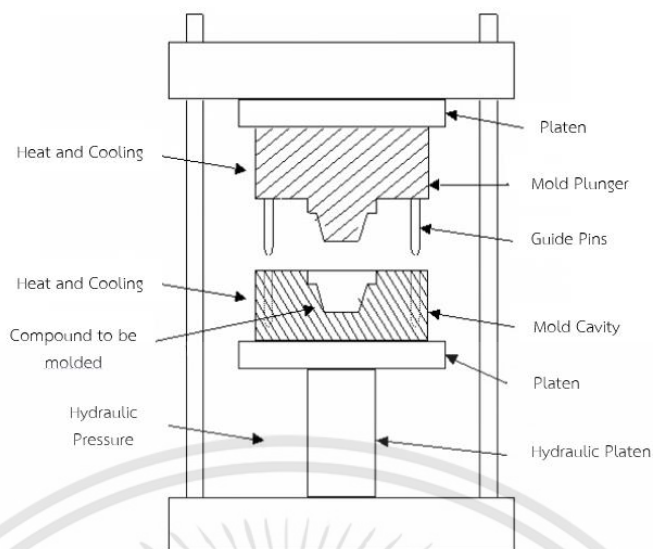
1. งานขึ้นรูป 1 มิติ ได้แก่ เส้นใย, แท่งพลาสติก (Rod) เป็นต้น
2. งานขึ้นรูป 2 มิติ ได้แก่ แผ่นฟิล์ม, แผ่นพลาสติก เป็นต้น
3. งานขึ้นรูป 3 มิติ เป็นงานขึ้นรูปทุกประเภทรวมกัน

โดยส่วนใหญ่วัสดุพลาสติกจะอยู่ในรูปของผง (Power) หรือเม็ด (Pellet) และนิยมขึ้นรูปผ่านกระบวนการ 3 วิธีหลัก คือ การฉีดขึ้นรูป (Injection molding), การอัดไหลขึ้นรูป (Extrusion) และการอัดขึ้นรูป (Pressing) สำหรับพลาสติกแบบชนิดแผ่นสามารถขึ้นรูปแบบ 3 มิติได้ด้วยกระบวนการกดอัดขึ้นรูป (Pressing), การกดอัดความร้อน (Thermal Pressing) และการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (Vacuum molding) วัสดุที่อยู่ในสภาพหลอมเหลวจะขึ้นรูปแบบ 3 มิติ โดยใช้วิธีการที่เรียกว่า Reaction injection molding (RIM) และ Liquid injection molding (LIM)

### 2.10.1 กระบวนการกดอัดขึ้นรูป (Compression molding) [45]

เป็นเทคนิคการแปรรูปพลาสติกที่ไม่มีความซับซ้อน สามารถแปรรูปพลาสติกได้ทั้งประเภทเทอร์โมเซตติงพลาสติกและเทอร์โมพลาสติก ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องกดอัด คือ แผ่นเหล็กสำหรับอัด จำนวน 2 ชุด โดยแผ่นเหล็กชุดแรกสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ ส่วนอีกแผ่นจะถูกยึดติดกับที่ และยังมีส่วนประกอบอื่นๆ ที่สำคัญ เช่น ระบบการขับเคลื่อน ใช้ระบบการทำงานโดยแรงขับจากระบบไฮดรอลิก ซึ่งทำหน้าที่เป็นแรงเคลื่อนให้แผ่นเหล็กอัดเคลื่อนที่ในทิศทางขึ้นลงได้และให้ความดันในการอัดขึ้นงานขึ้นรูป และระบบให้ความร้อนและหล่อเย็น ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนเข้าสู่แม่พิมพ์ เพื่อให้พลาสติกไหลได้ดีขึ้นและลดความดันที่ใช้ในการกดอัดขึ้นงาน

สำหรับหลักการทำงานของกระบวนการกดอัดเริ่มจากการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ และนำเม็ดพลาสติกอัดลงในแม่พิมพ์ในปริมาณที่เหมาะสมกับขนาดของขึ้นงาน จากนั้นเคลื่อนแผ่นเหล็กอัดลงด้วยความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม (ขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก) พลาสติกจะเกิดการหลอมเหลวและสามารถไหลเข้าสู่ Cavity ได้ ความดันภายในแม่พิมพ์จะลดลงในขณะที่ทำการหล่อเย็น หลังจากนั้นเคลื่อนแผ่นอัดขึ้นและเปิดแผ่นเหล็กออก ทำการปลดขึ้นงานออกจากแม่พิมพ์ สำหรับการปลดขึ้นงานออกนั้นตัวขึ้นงานต้องแข็งตัวเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของเครื่องกดอัด [45]

### 2.10.2 การประยุกต์ใช้งาน

1. สามารถใช้งานได้ทั้งพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตติงพลาสติก
2. ประโยชน์การนำไปใช้กว้างมาก ไม่ว่าจะเป็นของใช้ในครัวไปจนถึงรถยนต์, ของเล่น, อุปกรณ์ไฟฟ้า และชิ้นส่วนของเครื่องบิน
3. ผลิตภัณฑ์ทั่วไป ได้แก่ แผ่นควบคุมของรถยนต์, หลังคารถ, ถาดรองแบตเตอรี่ และกันชนรถยนต์ เป็นต้น

### 2.10.3 ข้อดีของกระบวนการกดอัดขึ้นรูป

1. เป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกที่ใช้ต้นทุนถูกกว่ากระบวนการอื่นๆ
2. เกิดเส้นรอยเชื่อมบนชิ้นงานน้อยมาก ซึ่งเป็นจุดบกพร่องส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแตกหักได้ง่าย
3. ให้ความยืดหยุ่นที่ดีในการออกแบบชิ้นส่วน
4. ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ
5. เกิดความเค้นตกค้างในแม่พิมพ์น้อย
6. แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานราคาถูกและผลิตได้ง่าย
7. เกิดการสูญเสียวัสดุน้อย

### 2.10.4 ข้อเสียของกระบวนการกดอัดขึ้นรูป

1. กำล้างการผลิตค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเวลารอบการผลิตชิ้นงานค่อนข้างใช้เวลานาน
2. ไม่เหมาะสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อน
3. มีข้อจำกัดในเรื่องของความหนาและความลึกของแม่พิมพ์
4. การขึ้นรูปวิธีนี้เหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานในปริมาณมาก ไม่เหมาะสำหรับผลิตชิ้นส่วนเล็กๆ

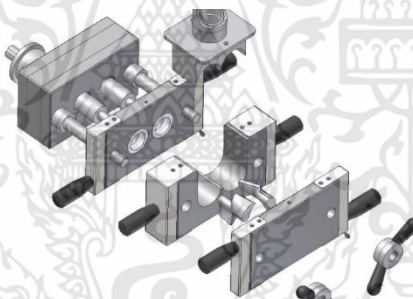
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 กระบวนการผสมสารเติมแต่งในพลาสติก

สำหรับกระบวนการผสมสารเติมแต่งในพลาสติกที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีผสมแบบ Batch เป็นวิธีการผสมองค์ประกอบเพียงครั้งเดียว และวิธีผสมแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยเครื่องผสมที่ใช้สำหรับการผสมแบบแบช ได้แก่ เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) และเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two rolls mill) ส่วนเครื่องผสมที่ใช้สำหรับผสมแบบต่อเนื่อง ได้แก่ เครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) และเครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) โดยส่วนผสมต่างๆ จะถูกส่งไปยังเครื่องผสม

### 2.11.1 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)

เป็นเครื่องที่เหมาะสมสำหรับการผสมสารเคมีกับวัสดุประเภทพอลิเมอร์ทั้งที่เป็นยางและพลาสติก เครื่องผสมแบบปิดประกอบด้วยชุดผสม (Mixer) และตู้ไฟควบคุมการทำงาน (Electrical control panel) โดยระบบควบคุมการทำงานของเครื่องผสม ประกอบด้วย อุปกรณ์ตัดกระแสอัตโนมัติ (Overload) และอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์หลัก ซึ่งชุดผสมผลิตจากเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งให้มีความแข็ง มีความทนทานต่อการสึกหรอและทนต่อการกัดกร่อนต่อสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือเบส มีช่องสำหรับลดอุณหภูมิลงได้ด้วยระบบหล่อเย็นและสามารถตั้งอุณหภูมิได้ถึง 300 องศาเซลเซียส



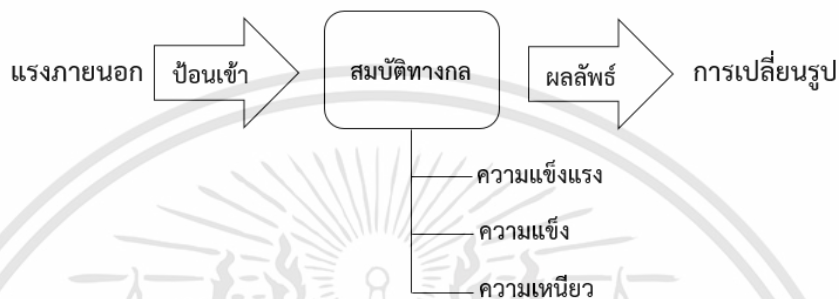
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่างๆ ของชุดผสม [46]

## 2.12 การทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical Properties Testing)

สมบัติทางกล (Mechanical properties) หมายถึง พฤติกรรมที่วัสดุแสดงออกมาเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ แสดงดังรูปที่ 2.8 จะเห็นว่า เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปและแสดงพฤติกรรมออกมา ได้แก่ ความแข็งแรง, ความแข็งหรือความเหนียว เป็นต้น การเลือกใช้วัสดุในงานวิศวกรรมนั้น สมบัติอย่างแรกที่พิจารณา คือ สมบัติทางกล โดยวัสดุที่นำมาใช้งานนั้น จำเป็นต้องมีความแข็งแรง หรือมีความเหนียวเพียงพอ สำหรับการทดสอบสมบัติทางกล แบ่งตามลักษณะของแรงที่ใช้ในการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดของแรง ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แรงสถิต (Static load) หมายถึง แรงกระทำต่อวัสดุขณะวัสดุอยู่นิ่ง เช่น การทดสอบแรงดึง
2. แรงสลับ (Cyclic load) หมายถึง แรงกระทำต่อวัสดุที่มีขนาดแตกต่างกัน และทำซ้ำๆ เช่น การทดสอบความล้า
3. แรงกระแทก (Dynamic หรือ Impact load) หมายถึง แรงกระทำต่อวัสดุอย่างรวดเร็วในพื้นที่ทันใด เช่น การทดสอบแรงกระแทก



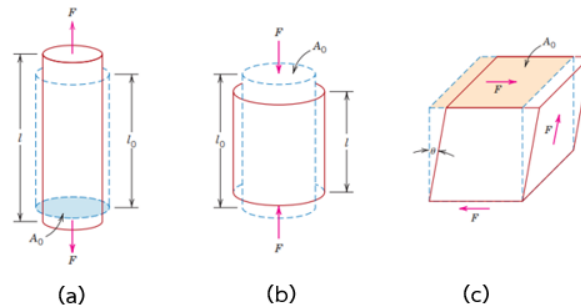
รูปที่ 2.8 สมบัติทางกลที่แสดงออกมาเมื่อวัสดุถูกแรงภายนอกกระทำ

การเปลี่ยนรูปของวัสดุ เมื่อวัสดุถูกแรงภายนอกกระทำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปหรือเสียรูปขึ้น ซึ่งแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ การเปลี่ยนรูปอย่างยืดหยุ่นและการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร

1. การเปลี่ยนรูปอย่างยืดหยุ่น (Elastic deformation) เกิดขึ้นกับวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำแล้ววัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปหรือขนาด เมื่อปล่อยแรงกระทำออกวัสดุจะกลับสู่สภาพเดิมหรือกลับสู่ขนาดปกติ เช่น การดึงหนังยางให้ยืดออกแล้วปล่อยแรง หนังยางจะกลับสู่สภาพปกติ
2. การเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) เกิดขึ้นกับวัสดุรับแรงแล้วเกิดการเปลี่ยนรูปหรือเปลี่ยนขนาดไปจากเดิม และเมื่อปล่อยแรงกระทำออกแล้ว วัสดุจะไม่กลับสู่สภาพเดิมหรือกลับสู่สภาพเดิมไม่ครบ 100% เช่น การงอหรือดัดลวดโลหะเป็นรูปร่างต่างๆ

### 2.12.1 ความเค้นและความเครียด

ความเค้น (Stress) คือ แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำ เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนรูปไปจากเดิม แรงที่มากระทำจะถูกกระจายไปอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ สามารถแบ่งตามลักษณะของแรงที่กระทำกับวัสดุแล้ว ส่งผลให้เกิดความเค้นขึ้น 3 แบบ ได้แก่ ความเค้นดึง (Tensile stress), ความเค้นอัด (Compressive stress) และความเค้นเฉือน (Shear stress) แสดงดังรูปที่ 2.9 ความเค้นดึงและความเค้นอัดจะรับแรงที่มากระทำในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด ส่วนความเค้นเฉือน แรงที่มากระทำจะขนานกับพื้นที่หน้าตัด



รูปที่ 2.9 (a) วัสดุรับแรงดึงเกิดความเค้นแรงดึงขึ้นและยืดออกเป็นเส้นตรง, (b) วัสดุรับแรงอัดเกิดความเค้นอัดและหดตัวเป็นเส้นตรง และ (c) วัสดุรับแรงเฉือนเกิดความเค้นเฉือนและเปลี่ยนรูปเป็นมุมบิด [47]

จากลักษณะของแรงกระทำที่เป็นแรงดึงและแรงอัด สามารถหาความเค้นที่เกิดขึ้นได้โดยคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด ดังสมการ

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\sigma$  = ความเค้นทางวิศวกรรม (lb/in<sup>2</sup>, N/m<sup>2</sup>)  
 $F$  = แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด (lb, N)  
 $A_0$  = พื้นที่หน้าตัดขวางที่ถูกแรงกระทำ (in<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>)

กรณีที่ได้รับแรงเฉือน ความเค้นที่เกิดขึ้นหาได้จากแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดที่ขนาดกับความยาว ดังสมการ

$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\tau$  = ความเค้นเฉือน (lb/in<sup>2</sup>, N/m<sup>2</sup>)  
 $F$  = แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด (lb, N)  
 $A_0$  = พื้นที่หน้าตัดขวางที่ถูกแรงกระทำ (in<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) ของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ โดยแบ่งเป็นความเครียดยืดหยุ่น (Elastic strain) และความเครียดถาวร (Plastic strain) สำหรับความเครียดยืดหยุ่นเป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะเมื่อลดแรงกระทำแล้ววัสดุจะกลับสู่รูปเดิมก่อนการรับแรง ส่วนความเครียดแบบถาวรการเปลี่ยนรูปเป็นลักษณะเมื่อปล่อยแรงแล้ววัสดุจะกลับไปสู่ขนาดเดิม

การหาความเครียดทางวิศวกรรมหาได้จากอัตราส่วนของขนาดที่เปลี่ยนไปต่อขนาดเดิม โดยแบ่งตามลักษณะแรงที่กระทำได้ 2 แบบ คือ ความเครียดเชิงเส้น (linear strain) และความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉือน (Shear strain) ความเครียดเชิงเส้นเกิดขึ้นเมื่อวัสดุรับแรงดึงหรือแรงกด ส่วนความเครียดเฉือนจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับแรงเฉือน โดยความเครียดเชิงเส้นหาได้จากดั่งสมการ

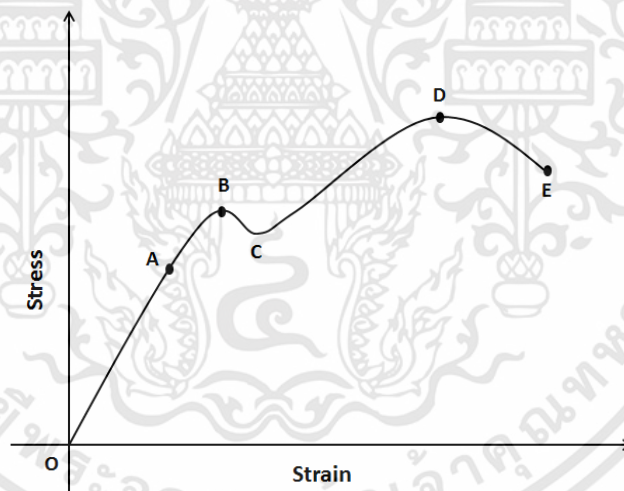
$$\varepsilon = \frac{I - I_0}{I_0} = \frac{\Delta I}{I_0} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\varepsilon$  = ความเครียดเชิงเส้น  
 $I$  = ความยาวเมื่อได้รับแรงกระทำ  
 $I_0$  = ความยาวเกจ (Gage length)  
 $\Delta I$  = ความยาวที่เปลี่ยนไป

ความเครียดเฉือนหาได้จาก ดั่งสมการ

$$\gamma = \tan \theta \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\gamma$  = ความเครียดเฉือน  
 $\theta$  = มุมที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 2.10 กราฟ Stress – Strain ของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง [48]

จากรูปที่ 2.10 กราฟ Stress – Strain ของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึงจะเกิดจุดตำแหน่งต่างๆ ที่สำคัญ ซึ่งประกอบไปด้วย

จุด A คือ ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) เป็นจุดที่มีความเค้นสูงสุด ซึ่งต่ำกว่าความเค้น ณ จุดครากที่ทำให้วัสดุยังไม่เปลี่ยนรูปถาวร ตำแหน่งนี้เมื่อปล่อยแรงออก วัสดุจะกลับสู่สภาพเดิม

จุด B คือ จุดครากบน (Yield stress point หรือ Upper yield stress point) เป็นตำแหน่งที่ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ในกรณีเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและคาร์บอนปานกลาง ชิ้นงานทดสอบเกิดการยืดตัวออกหรือเกิดความเครียดที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความเค้นลดลง

จุด C คือ จุดครากล่าง (Lower yield stress point) เป็นตำแหน่งที่ชิ้นงานทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยความเค้นที่ลดลงและคงที่ในช่วงเวลาสั้นๆ

จุด D คือ จุดความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) เป็นตำแหน่งที่ชิ้นงานมีความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถทนทานได้ หรือเรียกสั้นๆ ว่า ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)

จุด E คือ จุดแตกหัก (Breaking point) เป็นจุดที่วัสดุเกิดการฉีกขาดหรือแตกหักออกจากกัน

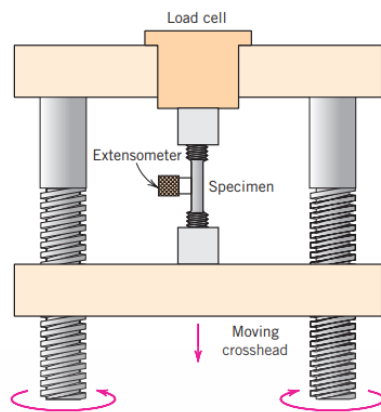
วัสดุแต่ละชนิดจะให้ลักษณะของกราฟความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ยังขึ้นกับปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุนั้นๆ หรือกระบวนการอบชุบ เป็นต้น

## 2.12.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

### วิธีการทดสอบแรงดึง

สำหรับการทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบการวัดความต้านทานของวัสดุ โดยให้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นแก่วัสดุอย่างสม่ำเสมอ (Static load) จนกระทั่งวัสดุขาดออกจากกัน ชิ้นงานทดสอบแรงดึงมีได้หลายลักษณะ แสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องทดสอบ หัวจับ ชิ้นงานและขนาดของแรงที่ดึง โดยทั่วไปชิ้นงานทดสอบแรงดึงส่วนใหญ่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นทรงกลม ชิ้นงานทดสอบแรงดึงจะมีการกำหนดขนาดต่างๆ ไว้เป็นมาตรฐาน ไม่ว่าจะเป็ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, ความยาวของชิ้นงานทดสอบ และรัศมีของความโค้งบริเวณบ่าลอคเพื่อจับดึง ขนาดของชิ้นงาน โดยชิ้นงานทดสอบที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมจะมีสัดส่วนของความยาวเกจ (Gage length;  $L_0$ ) ต่อพื้นที่หน้าตัด (A) เป็นค่าความสัมพันธ์คงที่และเรียกสัดส่วนนี้ว่า สัดส่วนของชิ้นงานทดสอบ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับการทดสอบคุณสมบัติวัสดุประเภทพลาสติกชนิดที่ผสมสารเสริมแรงและไม่ผสม มาตรฐานการทดสอบนี้สามารถวัดค่าสมบัติแรงดึงของวัสดุได้หลากหลาย

ขั้นตอนในการทดสอบแรงดึงเมื่อทำการวางชิ้นงานทดสอบบนเครื่องทดสอบแล้วจะมีการให้แรงดึง (F) หรือเรียกว่า แรงกระทำ (Load) และมีเครื่องมือวัดการยืดตัว (Strain gage หรือ Extensometer) ติดอยู่บนชิ้นงานทดสอบ เพื่อวัดความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงความยาวเกจ จากนั้นทำการบันทึกค่าของแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอและความยาวของชิ้นงานทดสอบที่ยืดออกในช่วงของแรงต่างๆ จนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน [49]



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์และการติดตั้งชิ้นงานทดสอบบนเครื่องทดสอบแรงดึง [49]

### 2.12.3 สมบัติที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

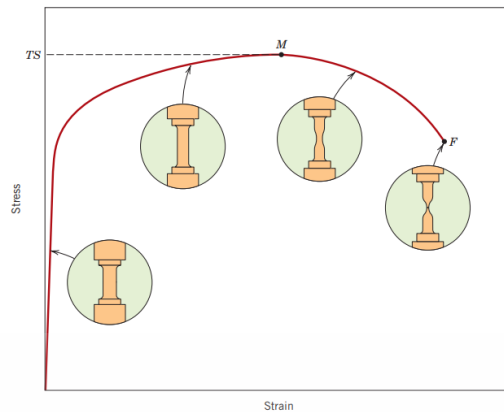
สมบัติต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงนั้นประกอบไปด้วย ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength), ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength), สมบัติในสภาวะยืดหยุ่น (Elastic properties) และความเหนียว (Ductility) เป็นต้น

#### ความแข็งแรง ณ จุดคราก

ความแข็งแรง ณ จุดคราก หรือ Yield strength หมายถึง จุดที่วัสดุมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร เมื่อให้แรงกระทำกับวัสดุเกินจุดครากนี้ไป วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปและไม่กลับสู่สภาพเดิม 100% ในส่วนของระดับโครงสร้างผลึกของวัสดุ จุดคราก คือจุดที่โครงสร้างผลึกเกิดการเลื่อน (Slip) ของระนาบผลึก ดังนั้นจุดคราก คือค่าความแข็งแรงที่เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างอย่างยืดหยุ่น (Elastic deformation) และการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic deformation)

#### ความต้านทานแรงดึง

ความต้านทานแรงดึง หรือ Tensile strength คือค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุรับได้ โดยดูจากกราฟความเค้นกับความเครียดในจุดที่มีความเค้นสูงสุด คือจุด M แสดงดังรูปที่ 2.12 จากรูป ณ จุดนี้ ชิ้นงานทดสอบเริ่มเกิดคอคอด (Necking) ขึ้นที่บริเวณความยาวเกจและเมื่อผ่านจุดนี้ไป วัสดุจะมีพื้นที่หน้าตัดลดลงเรื่อยๆ จนเกิดการแตกหัก ซึ่งบางครั้งเรียกความเค้นแรงดึงนี้ว่า ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength)



รูปที่ 2.12 ลักษณะการเกิด Necking ของชิ้นงานทดสอบ ณ จุดความเค้นแรงดึงสูงสุด [47]

### มอดูลัสของความยืดหยุ่น

มอดูลัสของความยืดหยุ่น หรือ Modulus of elasticity คือ การเปลี่ยนรูปของวัสดุในสภาวะการเปลี่ยนรูปที่ไม่ถาวร โดยมีค่าที่สำคัญเรียกว่า มอดูลัสของความยืดหยุ่น หรือ มอดูลัสของยัง (Young's modulus) ใช้  $E$  เป็นสัญลักษณ์ ค่าของ  $E$  นั้นเป็นค่าความชันของกราฟความเค้นและความเครียดในช่วงสภาวะยืดหยุ่น ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's law) คือการเปลี่ยนแปลงขนาดและความเค้นของวัสดุในช่วงที่มีสภาวะยืดหยุ่นจะมีอัตราส่วนหรือสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ดังสมการ

$$E = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.9)$$

กรณีที่วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงเฉือนจึงเรียกมอดูลัสของการเปลี่ยนรูปว่ามอดูลัสของการเฉือน (Modulus of rigidity) และใช้  $G$  เป็นสัญลักษณ์ โดยค่าของ  $G$  สามารถหาได้จาก ดังสมการ

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\tau$  คือ ความเค้นเฉือน มีหน่วยเป็น  $\text{N/m}^2$

$\gamma$  คือ ความเครียดเฉือน มีหน่วยเป็น  $\text{N/m}^2$

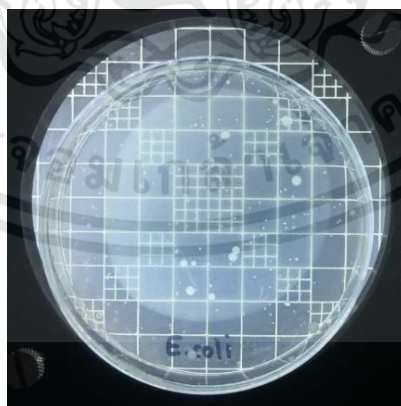
## 2.13 การทดสอบสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธีตรวจนับจุลินทรีย์ (Total viable count) [50]

เทคนิคการตรวจสอบแบคทีเรียด้วยวิธีการนับจุลินทรีย์ นิยมใช้ตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์จำพวกอาหาร น้ำนมดิบ หรือผลิตภัณฑ์ภาชนะที่ต้องสัมผัสกับอาหาร สำหรับการทดสอบด้วยเทคนิคนี้จะนับจำนวนโคโลนี (Colony) ที่เจริญเติบโตบนอาหารเลี้ยงเชื้อหลังจากทำการทดสอบตามขั้นตอนวิธีมาตรฐาน โดยโคโลนี (Colony) ได้แก่ จุลินทรีย์, รา (Mold), ยีสต์ (Yeast) และแบคทีเรีย (Bacteria) โคโลนีนั้นสามารถเจริญเติบโตเป็นเซลล์ขนาดใหญ่ได้ จึงสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือมองเห็นจากการย้อมสี มีหน่วยเป็น Colony forming unit หรือ CFU การนับจำนวนโคโลนีจะจำนวนเซลล์ที่อยู่บนอาหารเลี้ยงเชื้อและต้องอยู่ในช่วงระหว่าง 30 – 300 เซลล์ ต่อจานอาหารเลี้ยงเชื้อ

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้มาตรฐานการทดสอบ JIS Z 2801: 2010 ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียบนพื้นผิววัสดุ เทคนิคนี้สามารถนำไปทดสอบกับวัสดุได้ทุกประเภท เช่น พลาสติก, โลหะหรือเซรามิก [49] มีสูตรในการคำนวณหาจำนวนเชื้อแบคทีเรียที่เติบโต ดังสมการ

$$N = \frac{C \times D \times V}{A} \quad (2.11)$$

- เมื่อ
- N = จำนวนแบคทีเรียที่มีชีวิตต่อ 1 cm<sup>2</sup> ชิ้นงาน
  - C = จำนวนโคโลนีที่นับได้เฉลี่ย
  - D = ค่า Dilution
  - V = ปริมาตรของน้ำ DI (10 ml)
  - A = พื้นที่ของแผ่นฟิล์มที่ปิดอยู่ มีขนาด (4 × 4 cm<sup>2</sup>)



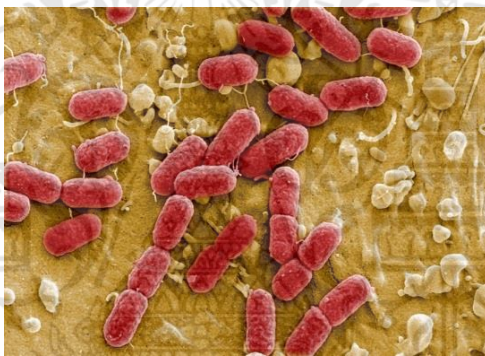
รูปที่ 2.13 ลักษณะแบคทีเรียที่เติบโตบนจานเพาะเชื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.14 แบคทีเรียอีโคไล [52,53]

แบคทีเรียอีโคไล หรือ *E. coli* (*Escherichia coli*) เป็นแบคทีเรียแกรมลบ มีลักษณะรูปร่างเป็นท่อน อาศัยอยู่ในลำไส้ของคนและสัตว์ พบเป็นจำนวนมากในอุจจาระ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญในการตรวจหาแบคทีเรียเพื่อควบคุมคุณภาพอาหารหรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยใช้เป็นตัวบ่งชี้ในการอธิบายว่าผลิตภัณฑ์นั้นๆ มีการปนเปื้อนจากแบคทีเรียหรือไม่ ซึ่งในสภาวะร่างกายปกติแบคทีเรียอีโคไลไม่ก่อให้เกิดโรคแต่จะเกิดโรคได้ในกรณีที่ภูมิคุ้มกันบกพร่องหรืออยู่ในสภาวะที่ร่างกายอ่อนแอ โดยแบคทีเรียอีโคไลจะเข้าเกาะผนังเซลล์อวัยวะส่วนต่างๆ เช่น ไต, กระเพาะและปัสสาวะ หลังจากนั้นแบคทีเรียจะสร้างสารต่างๆ เกิดการยึดเกาะกับอวัยวะนั้นๆ และทำลายเซลล์อวัยวะนั้นในที่สุด

เมื่อเชื้อแบคทีเรียเข้าสู่ร่างกายและส่งผลให้เกิดโรคติดเชื้อขึ้น ลักษณะอาการรุนแรงจะเพิ่มขึ้น โดยขึ้นอยู่กับสภาพร่างกายของแต่ละคนที่ได้รับอาการก่อให้เกิดกลุ่มอาการที่สำคัญ เช่น เกิดการติดเชื้อที่ทางเดินปัสสาวะ, เยื่อหุ้มสมองอักเสบในทารกและเกิดอาการท้องร่วง เป็นต้น



รูปที่ 2.13 ลักษณะรูปร่างของแบคทีเรียอีโคไล [54]

## 2.15 การตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบ

### 2.15.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

X - Ray Diffraction หรือ XRD เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ, จำแนกลักษณะ, ความสมบูรณ์โครงสร้างผลึกของสารประกอบ, สารเคมีหรือแร่ว่ามีรายละเอียดโครงสร้างผลึกแบบใด สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งที่เป็นของแข็ง (Solid) หรือเป็นผง (Power) เทคนิคนี้จะใช้เครื่อง X - ray Diffractometer เป็นเครื่องมือในการตรวจวัดโดยหลักการทำการตรวจวัดตัวอย่างด้วยเทคนิคนี้ จะอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ตกกระทบไปยังตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ภายในเครื่องจะมีตัวตรวจวัด (Detector) ซึ่งทำหน้าที่รับความเข้มจากรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการหักเหและเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ โดยองศา ( $2\theta$ ) การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ ข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเทคนิคนี้จึงมีรูปแบบ (Pattern) ของตัวอย่างที่แตกต่างกัน [55]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.15.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

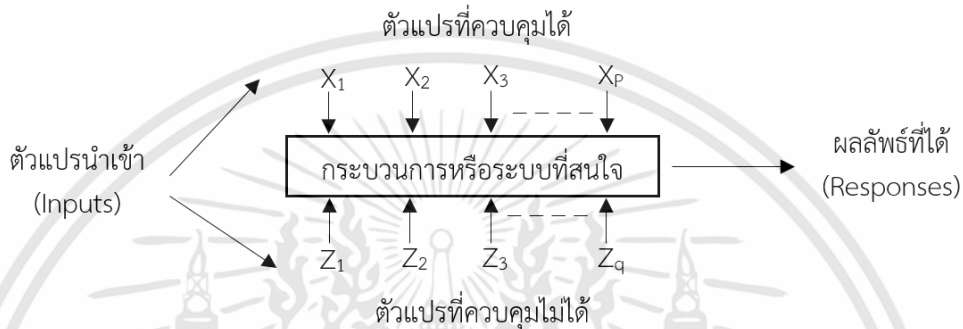
Fourier Transform Infrared Spectrometer หรือ FTIR เป็นเทคนิคสำหรับหาหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างโมเลกุลของสารตัวอย่าง วิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ สามารถตรวจวัดสารตัวอย่างได้ทั้งที่เป็นของแข็ง, ของเหลวและก๊าซ โดยอาศัยหลักการโมเลกุลของสารตัวอย่างถูกดูดกลืนจากรังสีในช่วงอินฟราเรด ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและหมุน แปรผลข้อมูลเป็นสเปกตรัม ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความเฉพาะเจาะจงจึงให้สเปกตรัมที่ต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) ซึ่งข้อดีของการตรวจวัดด้วยเทคนิคนี้ คือ ให้ข้อมูลทางเคมีที่สมบูรณ์และสามารถตรวจสอบสารหรือวัสดุต่างๆ ได้นิยมใช้สำหรับตรวจสอบสารเชิงคุณภาพเพื่อยืนยันโครงสร้างของสารตัวอย่าง [56]

### 2.15.3 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา

Scanning Electron Microscope หรือ SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้สำหรับศึกษาลักษณะโครงสร้างของวัสดุ ลักษณะพื้นผิว และรูปร่างอนุภาคของตัวอย่างที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครหรือระดับนาโนได้ มีระดับกำลังขยายสูงถึง 1,000,000 เท่า โดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) สำหรับหลักการแปรสัญญาณภาพของ SEM เกิดจากลำแสงอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบไปยังชิ้นงานและหลุดออกจากพื้นผิวของชิ้นงาน ความเร็วของลำแสงอิเล็กตรอนถูกประมวลผลเป็นเป็นสัญญาณภาพที่ใช้แปรข้อมูลของลักษณะพื้นผิวบนชิ้นงาน (Morphology) หรือวัสดุที่ทำการตรวจวัด [57] สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของ TiO<sub>2</sub> (เกรดอุตสาหกรรม) ก่อนและหลังที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES, ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบบริเวณรอยแตกหักหลังจากที่ทำการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 และลักษณะสัณฐานวิทยาชิ้นงานขนาด 5 × 5 เซนติเมตร ที่ใช้ทดสอบสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย

## 2.16 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) [58]

เป็นการทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่องโดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษาเพื่อสามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Responses) จากกระบวนการที่กำลังศึกษาโดยตัวแปรนำเข้า (Input variables) แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวแปรที่ควบคุมได้ (Controllable variables) และตัวแปรที่รับกวน (Uncontrollable variables)



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในระบบที่สนใจ

การกำหนดตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบ ในส่วนตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวรบกวน มักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม, ฝุ่น, ละออง, ความชื้นสัมพัทธ์, อุณหภูมิภายนอก หรือส่วนของอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุม เพราะต้องใช้ความระมัดระวังสูงในการควบคุม ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น ที่มาของวัตถุดิบ, เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต, พนักงานควบคุม, อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น สำหรับการออกแบบการทดลองหรือผลิตภัณฑ์ (Process or Product design) แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. การออกแบบระบบ (System design) คือ วิธีการนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการ เพื่อทำการออกแบบตัวแบบเริ่มต้น โดยตัวแบบนี้ถูกกำหนดโดยการกำหนดค่าเริ่มต้นของคุณภาพที่ต้องการของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ
2. การออกแบบพารามิเตอร์ (Parameter design) คือ วิธีการศึกษาเพื่อกำหนดและระบุค่าที่ดีที่สุดภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมให้กับกระบวนการ เช่น การตั้งพารามิเตอร์ในการขับรถ เพื่อให้เครื่องยนต์กินน้ำมันน้อยที่สุด, การตัดบานกระຈກให้มีขนาดพอดีกับที่ต้องการ เป็นต้น
3. การออกแบบค่าพิกัดเผื่อ (Tolerance design) คือ วิธีการกำหนดช่วงหรือพิกัดเผื่อที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตที่จะทำให้คุณภาพการผลิตสูง และค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำสุด

### 2.16.1 ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลอง มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. กำหนดตัวแปรที่ควบคุมได้ (X) ที่มีอิทธิพลสูงสุด ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนอง (Y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กำหนดค่าของปัจจัยที่ควบคุมได้ (X) ที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง (Y) เพื่อให้ผลของค่าของตัวแปรตอบสนองมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ต้องการมากที่สุด
3. กำหนดค่าของปัจจัยที่ควบคุมได้ (X) ที่มีผลต่อค่าของตัวแปรตอบสนอง (Y) โดยให้ค่าความแปรปรวนของ Y มีค่าน้อยที่สุด
4. กำหนดค่าของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (X) ที่มีผลต่อค่าของตัวแปรตอบสนอง (Y) เพื่อให้ผลกระทบของตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Z) มีค่าน้อยที่สุด

### 2.16.2 ข้อแนะนำในการออกแบบการทดลอง

สำหรับข้อแนะนำหรือกลยุทธ์ในการออกแบบการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความถูกต้องของการทดลอง มีคำศัพท์พื้นฐานที่ต้องทำความเข้าใจ ดังต่อไปนี้

**ตัวแปรตอบสนอง (Responses)** คือ ตัวแปรผลลัพธ์ (Outputs) หรือลักษณะทางคุณภาพที่ต้องการควบคุมให้เป็นไปตามมาตรฐานที่ต้องการศึกษาหรือสนใจ

**ปัจจัย (Factors)** คือ ตัวแปรนำเข้า (Inputs) ที่ใช้ในระบบ โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้ และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

**ระดับปัจจัย (Levels of factors)** คือ จำนวนค่าของปัจจัยที่เปลี่ยนไปในการทดลองหนึ่ง เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 100 °C, 500 °C และ 900 °C ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยอุณหภูมิที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 3 ระดับ

**วิธีปฏิบัติ (Treatment)** คือ ข้อกำหนดสำหรับทุกปัจจัยที่ทำการศึกษาในการทดลองหนึ่งๆ เช่น ในการทดลองที่ศึกษา มีปัจจัย A และปัจจัย B ที่ 2 และ 3 ระดับจะมีวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้แตกต่างกัน จะได้ว่า  $2 \times 3 = 6$  วิธีการทดลอง นั่นคือ จำนวนวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้ จะเท่ากับ ผลคูณของระดับของปัจจัยในการทดลอง

**การทดลองซ้ำ (Replicate)** คือ การเพิ่มจำนวนการทดลองซ้ำๆ ตำแหน่งของการทดลอง เพื่อประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลอง (Random error) ซึ่งโดยทั่วไปผลที่ได้จากการทดลองที่ตำแหน่งเดียวกันควรมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ถ้าผลที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างกันมากนั้นแสดงว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นสูง ต้องพิจารณาองค์ประกอบของการทดลองใหม่ เนื่องจากอาจมีผลกระทบจากสิ่งรบกวน (Noise) ที่ไม่ได้พิจารณาส่งผลกระทบต่อทดลอง

**บล็อกกิ้ง (Blocking)** คือ การแบ่งการทดลองออกเป็นส่วนๆ เพื่อป้องกันผลกระทบจากวัตถุดิบที่มีความแตกต่าง โดยจะใช้สำหรับกรณีที่มีข้อจำกัดของวัตถุดิบ เมื่อมีความจำเป็นต้องใช้วัตถุดิบมากกว่าหนึ่งล็อตสำหรับการออกแบบการทดลอง สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกรณีอื่นๆ ได้ เช่น เวลา, พนักงาน หรือเครื่องจักร เป็นต้น

**การทำแบบสุ่ม (Randomization)** คือ การออกแบบการทดลองที่ทำให้ลำดับการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) หรือการกระจายตัวแบบเป็นอิสระเพื่อลดความลำเอียงของผู้ทดลอง

**การทดลองที่ตำแหน่งกลาง (Center points)** เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบว่าสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการออกแบบการทดลองมีความเหมาะสม หรือการวิเคราะห์ต้องการสมการเส้นโค้งที่มีเทอมกำลังสอง (Second order) หรือไม่

### 2.16.3 ประเภทของการทดลอง

สามารถจำแนกประเภทของการทดลองได้ 5 ประเภท ตามข้อมูลที่ทราบเกี่ยวกับระบบวัตถุประสงค์ของการทดลอง ดังนี้ คือ

**1. การทดลองเดี่ยวหรือการทดลองเพียงครั้งเดียว (Single experiment)** คือ การทดลองในกรณีที่ผู้ทดลองมีความเข้าใจในกระบวนการที่ต้องการศึกษา และทราบถึงปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการทดลองเบื้องต้น แต่ต้องรู้สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย

**2. การทดลองอย่างต่อเนื่อง (Continuous experiment)** คือ การทดลองเพื่อลดค่าการเปลี่ยนแปลง (Variation) ในกระบวนการทดลอง โดยมีเป้าหมายในการปรับปรุงกระบวนการที่ชัดเจน

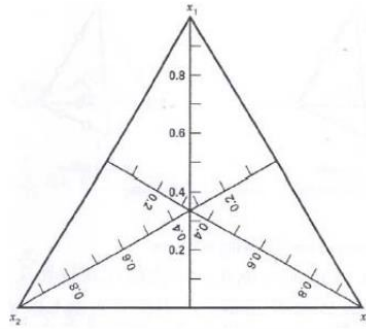
**3. การทดลองแบบคัดทิ้ง (Screening experiment)** คือ การทดลองสำหรับศึกษากระบวนการใหม่ที่เพิ่งพัฒนาขึ้นมาใหม่ เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและผู้ทดลองมีความเข้าใจในกระบวนการน้อย สำหรับวัตถุประสงค์ของการทดลองนี้ คือ พยายามปรับหรือลดรายละเอียดของตัวแปรหรือปัจจัยในกระบวนการเพื่อให้ได้จำนวนปัจจัยที่เหมาะสม และสามารถทำการทดลองได้จริงในการทดลอง เพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในกระบวนการที่ศึกษาต่อไป

**4. การทดลองแบบเจาะจง (Focusing experiment)** คือ การทดลองที่ทำขึ้น โดยมีเป้าหมายกำหนดความต้องการในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น มีการกำหนดค่าที่เหมาะสมให้กับปัจจัยที่ต้องการศึกษา

**5. การทดลองเชิงลำดับ (Sequential experiment)** คือ การทดลองที่ทำขึ้นจากกระบวนการที่สนใจศึกษา สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหรือกระบวนการย่อยๆ ได้ ทำให้มีปัจจัยที่ศึกษาในภาพรวมในแต่ละขั้นตอนมากกว่าการทดลองแบบอื่นๆ จึงจำเป็นต้องแบ่งกระบวนการออกเป็น ส่วนๆ และทำการทดลองกำหนดปัจจัย จากนั้นจึงนำมารวมเป็นข้อกำหนดของกระบวนการในภาพรวมเพื่อให้สามารถทำการศึกษากิจกรรมหรือระบบที่มีขนาดใหญ่มากได้จริงในทางปฏิบัติ

### 2.17 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม

Mixture design เป็นการทดลองวิเคราะห์ค่าของผลลัพธ์ที่เป็นฟังก์ชันที่เป็นเปอร์เซ็นต์ของส่วนประกอบ (Components) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงปริมาณ ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยผลรวมปริมาณของปัจจัยทั้งหมดจะต้องเป็น 1.0 ส่วน หรือ 100 เปอร์เซ็นต์ ในการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมนี้เป็นการออกแบบพื้นผิวตอบสนองประเภทมีข้อจำกัด คือ ระดับของปัจจัยไม่เป็นอิสระต่อกัน เมื่อปัจจัยหนึ่งๆ ในการทดลองมีปริมาณสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปัจจัยอื่นๆ มีปริมาณสัดส่วนลดลงซึ่งมีความแตกต่างจากการทดลองแบบอื่นโดยตัวแปรจะเป็นอิสระต่อกัน

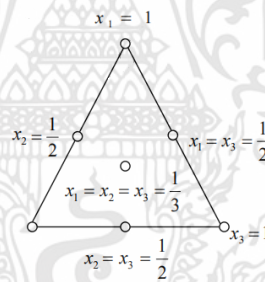


รูปที่ 2.16 ระบบพิกัดจุดการออกแบบการทดลอง Mixture design (Trilinear coordinates) [59]

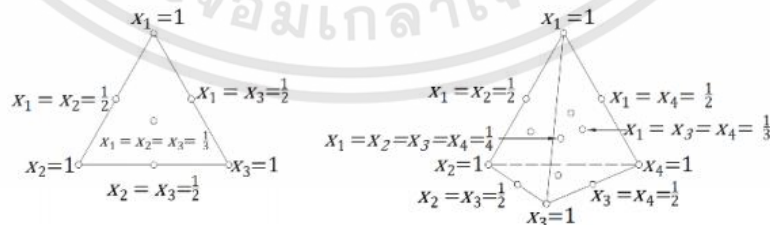
สำหรับประเภทของแผนการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมหรือ Mixture design มีดังนี้

**1. แผนการทดลองแบบ Simplex – Centroid**

เป็นการทดลองที่มีสัดส่วนของปัจจัยเท่ากันทุกปัจจัย และมีสิ่งทดลองเท่ากับ  $2^n - 1$  ซึ่งสิ่งทดลองประกอบไปด้วยจุดที่เป็นส่วนผสมเดี่ยว (Pure component) ต่างๆ สัดส่วนของสิ่งทดลองจะอยู่บริเวณเส้นขอบเป็นหลัก แผนการทดลองนี้มีข้อจำกัดในการออกแบบ โดยสัดส่วนของสิ่งทดลองจะอยู่ในช่วงเดียวกัน (ระหว่าง 0 กับ 1) [60]



รูปที่ 2.17 แผนการทดลองแบบ Simplex – Centroid



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างการทดลองที่มี 3 และ 4 องค์ประกอบแบบ Simplex – Centroid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการทดลองแบบส่วนผสม ตัวแปรของการทดลองรวมกันได้เป็น 1.0 ส่วน หรือ 100 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนการวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ มีดังนี้

รูปแบบการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i$$

รูปแบบการถดถอยกำลังสอง (Quadratic Regression Model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j$$

รูปแบบการถดถอยกำลังสามแบบเต็ม (Full Cubic Regression Model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum \sum_{i<j}^q \delta_{ij} x_i x_j (x_i + x_j) + \sum \sum_{i<j<k}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k$$

รูปแบบการถดถอยกำลังสามแบบพิเศษ (Special Cubic Regression Model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum \sum_{i<j<k}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k$$

## 2. แผนการทดลองแบบ Simplex - Lattice

เป็นการทดลองโดยมีพิกัด (Coordinate) เขียนแทนด้วย A {q,m} เป็นส่วนประกอบต่างๆ ของการทดลอง โดยสามารถคำนวณระดับของแต่ละตัวแปร ได้จากสมการ

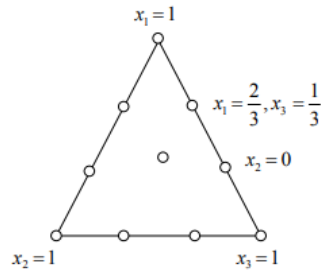
$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, \frac{m-1}{m}, 1 \quad (2.12)$$

เมื่อ  $i = 1, 2, 3, \dots, q$

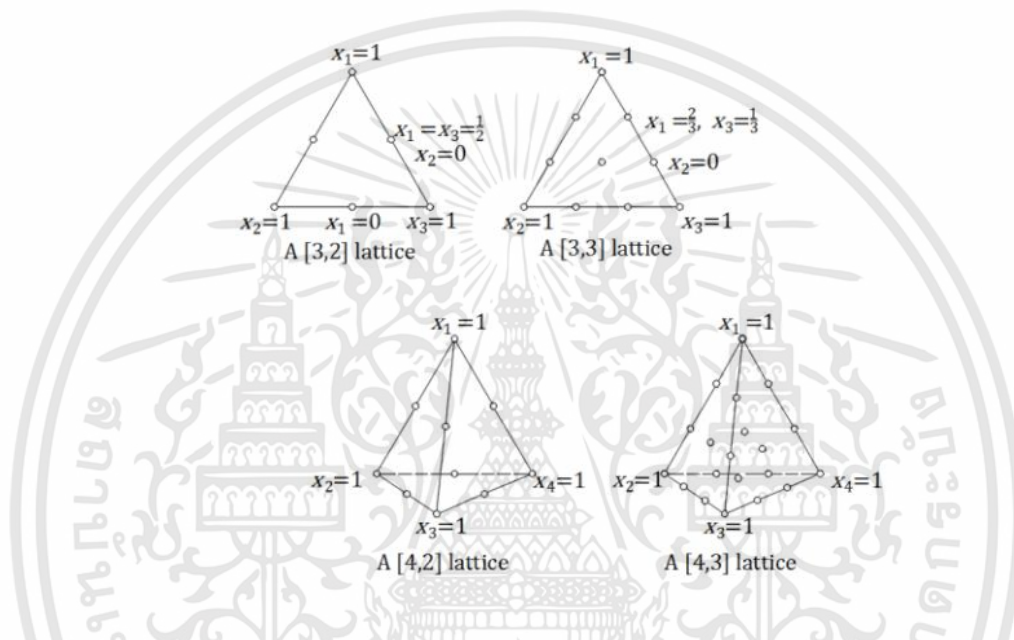
$m =$  สัดส่วนแต่ละปัจจัยจาก 0 - 1 หรือ 0 - 100 เปอร์เซ็นต์

ยกตัวอย่างในกรณีการทดลองที่มี 3 ปัจจัย ( $m = 3$ ) พิกัด (Coordinate) ที่ได้เป็นส่วนประกอบของ  $X_1, X_2$  และ  $X_3$  ดังนั้น พิกัดที่ได้จะเป็น  $0, \frac{1}{3}$  และ  $\frac{2}{3}$  ตามลำดับ โดยจำนวนจุดในการทดลองทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$N = \frac{(q+m-1)!}{m!(q-1)!} = \frac{(q+1)\dots(q+m-1)}{(1)(2)\dots(m)} = \frac{(4)(5)}{(1)(2)(3)} = 10$$



รูปที่ 2.19 แผนการทดลองแบบ Simplex – Lattice



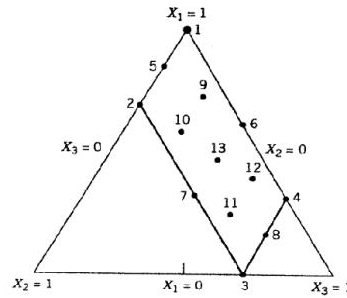
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างทดลองที่มี 3 และ 4 องค์ประกอบของแผนการทดลอง Simplex – Lattice

### 3. แผนการทดลองแบบ Extreme Vertices

เป็นการทดลองที่มีข้อจำกัดแบบสัดส่วนหรือมีข้อจำกัด ซึ่งหมายความว่า ระดับของแต่ละปัจจัยไม่จำเป็นต้องเป็น 0 – 100% เสมอไป อาจเป็น 30 – 40% หรือ 15 – 25% เป็นต้น ได้มีการประยุกต์การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมไปใช้ในงานวิจัยเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของการทดลอง ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยผู้ทดลองสามารถกำหนดอัตราส่วนผสมของแต่ละปัจจัยในการทดลองได้

กรณีที่ส่วนประกอบบางตัวหรือทุกตัวของสิ่งทดลองมีทั้งขอบบนและขอบล่าง เมื่อทำการตีกรอบบริเวณที่เป็นไปได้ แบบจำลองจากการออกแบบจะไม่เป็นรูปสามเหลี่ยม แต่เกิดเป็นรูปหลายเหลี่ยมของการออกแบบการทดลองแบบ Simplex แทน ซึ่งไม่สามารถทำการทดลองได้ ดังนั้น จึงได้มีการใช้วิธีการออกแบบ D-Optimal แทน เพื่อคัดกรองจุดของสิ่งทดลองที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัด โดยจะคัดกรองจากจุดทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่สามารถระบุพิกัดได้ โดยจุดที่ถูกเลือกมาทดลองต้องประกอบไปด้วย ได้แก่ จุดยอดมุมของรูปหลายเหลี่ยม (Extreme Vertices), จุดกึ่งกลางด้าน (Edge Center), จุดกึ่งกลางรูปสามเหลี่ยม (Overall Centroid) และจุดบนแกนของเส้นทแยงมุมหรือแกนสมมาตรของรูปสามเหลี่ยม (Axial Point) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 จุดของสิ่งทดลองด้วยวิธีการออกแบบ D-Optimal

## 2.18 การทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) เป็นวิธีการหนึ่งของสถิติเชิงอนุมาน จะใช้กลุ่มตัวอย่างโดยการสุ่มมาตรวจสอบว่าค่าพารามิเตอร์ของประชากร (เช่น  $\mu, \sigma^2$ ) เป็นไปตามที่ตั้งข้อสงสัยไว้หรือไม่ ข้อสงสัยหรือข้อความต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับประชากรซึ่งอาจเป็นจริงหรือเป็นเท็จ แล้วต้องการตรวจสอบนั้นจึงจะเรียกว่า สมมติฐาน (Hypothesis)

### 2.18.1 สมมติฐานสถิติ (Statistical Hypothesis)

หมายถึง ข้อสงสัยหรือข้อความที่เกี่ยวข้องกับประชากรหนึ่งชุดหรือมากกว่า ซึ่งอาจเป็นจริงหรือไม่ก็ได้ การหาคำตอบหรือข้อสรุปว่าสิ่งที่สงสัยเป็นจริงหรือไม่สามารถทำได้โดยการสำรวจจากประชากรทั้งหมด ซึ่งในทางปฏิบัติทำได้ยากเนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของบุคลากร, เวลา และงบประมาณ จึงมักสรุปผลจากกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มมาจากประชากรที่ศึกษาและใช้หลักการทดสอบสมมติฐานมาช่วยในการวิเคราะห์หาคำตอบ โดยข้อสรุปจะมี 2 แบบ คือ ปฏิเสธสมมติฐาน และยอมรับสมมติฐาน ถ้าหากหลักฐานที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างไม่ตรงกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ จะสรุปได้ว่า ปฏิเสธสมมติฐาน (Reject Hypothesis) และถ้าหากหลักฐานที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างตรงกับสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือสอดคล้อง จะสรุปได้ว่ายอมรับสมมติฐาน หรืออาจกล่าวได้ว่าไม่หลักฐานพอที่จะเชื่อถือเป็นอย่างอื่น (Fail to Reject Hypothesis) ซึ่งสมมติฐานที่ตั้งไว้สำหรับการทดสอบมีอยู่ 2 ส่วน คือ

1. **สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis:  $H_0$ )** เป็นข้อสมมติฐานที่ตั้งขึ้นเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของประชากรหนึ่งชุดหรือมากกว่า แสดงให้เห็นถึงสภาพที่เป็นอยู่ในปัจจุบันและยังไม่มี การเปลี่ยนแปลงใดๆ เครื่องหมายที่ระบุในสมมติฐานหลักมักจะใช้ = (เท่ากับ) แสดงถึงสภาพดั้งเดิม หรือข้อมูลคงเดิม

2. **สมมติฐานทางเลือก (Alternative Hypothesis:  $H_1$ )** เป็นข้อสมมติฐานที่ตั้งขึ้นเพื่อแสดงให้เห็นถึงสภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเป็นสิ่งที่สงสัยแล้วต้องการตรวจสอบ เครื่องหมายที่ระบุในสมมติฐานทางเลือกมักจะใช้ > (มากกว่า), < (น้อยกว่า) หรือ  $\neq$  (ไม่เท่ากับ) เพื่อแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นซึ่งจะเลือกใช้เครื่องหมายใดนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดสอบว่าต้องการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใด [58]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 การตั้งสมมติฐานหลักและสมมติฐานทางเลือกของพารามิเตอร์  $\mu, \sigma^2$  และ  $\rho$

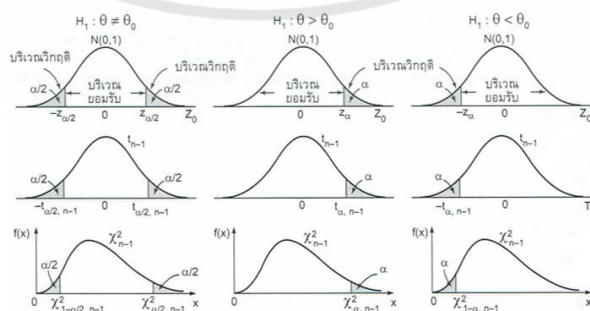
พารามิเตอร์	กรณีประชากร 1 ชุด		กรณีประชากร 2 ชุด	
	สมมติฐานหลัก ( $H_0$ )	สมมติฐาน ทางเลือก ( $H_1$ )	สมมติฐานหลัก ( $H_0$ )	สมมติฐานทางเลือก ( $H_1$ )
ค่าเฉลี่ย ( $\mu$ )	$H_0 : \mu = \mu_0$	$H_1 : \mu \neq \mu_0$ $H_1 : \mu > \mu_0$ $H_1 : \mu < \mu_0$	$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = d_0$	$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq d_0$ $H_1 : \mu_1 - \mu_2 > d_0$ $H_1 : \mu_1 - \mu_2 < d_0$
ความแปรปรวน ( $\sigma^2$ )	$H_0 : \sigma^2 = \sigma_0^2$	$H_1 : \sigma^2 \neq \sigma_0^2$ $H_1 : \sigma^2 > \sigma_0^2$ $H_1 : \sigma^2 < \sigma_0^2$	$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$	$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ $H_1 : \sigma_1^2 > \sigma_2^2$ $H_1 : \sigma_1^2 < \sigma_2^2$
สัดส่วน ( $\rho$ )	$H_0 : \rho = \rho_0$	$H_1 : \rho \neq \rho_0$ $H_1 : \rho > \rho_0$ $H_1 : \rho < \rho_0$	$H_0 : \rho_1 - \rho_2 = d_0$	$H_1 : \rho_1 - \rho_2 \neq d_0$ $H_1 : \rho_1 - \rho_2 > d_0$ $H_1 : \rho_1 - \rho_2 < d_0$

2.18.2 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานของพารามิเตอร์

การทดสอบสมมติฐานของพารามิเตอร์ที่พบบ่อยๆ ในการทดสอบ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ( $\mu$ ), ความแปรปรวน ( $\sigma^2$ ) และสัดส่วน ( $\rho$ ) ซึ่งประกอบไปด้วย 6 ขั้นตอน ดังนี้

1. การกำหนดสมมติฐานหลัก  $H_0$
2. การกำหนดสมมติฐานทางเลือก  $H_1$
3. การเลือกระดับนัยสำคัญ  $\alpha$
4. การกำหนดบริเวณวิกฤต (Critical Region) ตามระดับนัยสำคัญและการตั้งสมมติฐานทางเลือก  $H_1$  (สมมติฐานแบบทางเดียวหรือสองทาง)
5. การสุ่มตัวอย่างขนาด  $n$  และคำนวณค่าสถิติที่ใช้ทดสอบ
6. การนำค่าสถิติที่ได้จากการคำนวณในข้อ 5. เปรียบเทียบกับบริเวณวิกฤตตามข้อ 4. แล้วนำมาสรุปผลดังนี้

- 6.1 ถ้าอยู่ในบริเวณวิกฤต จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก  $H_0$
- 6.2 ถ้าอยู่นอกบริเวณวิกฤต จะยอมรับสมมติฐานหลัก  $H_0$



รูปที่ 2.22 การทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียวหรือสองทางของการแจกแจง Z, t และ  $X^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.22 แสดงการทดสอบสมมติฐานแบบสองทาง (เช่น  $H_1 : \mu \neq \mu_0$ ) พบว่าบริเวณวิกฤติแบ่งออกเป็น 2 ส่วน แต่ละส่วนมีพื้นที่ใต้กราฟ  $\alpha/2$  ส่วนบริเวณในการยอมรับจะมีพื้นที่ใต้กราฟ  $1 - \alpha$  ในขณะที่การทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียวด้านบน (เช่น  $H_1 : \mu > \mu_0$ ) หรือแบบทางเดียวด้านล่าง (เช่น  $H_1 : \mu < \mu_0$ ) พบว่าบริเวณวิกฤติมีเพียงด้านเดียวนั้นคือด้านบน (Upper) หรือด้านล่าง (Lower) ด้วยพื้นที่ใต้กราฟเท่ากับ  $\alpha$  ส่วนบริเวณการยอมรับจะมีพื้นที่ใต้กราฟ  $1 - \alpha$

### 2.18.3 ค่า p - value

ในขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานของพารามิเตอร์ในการสรุปผล จะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก  $H_0$  นั้น จะพิจารณาจากค่าสถิติที่คำนวณจากกลุ่มตัวอย่างมาเปรียบเทียบกับค่าวิกฤติ ถ้าค่าสถิติมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าสัมบูรณ์ของค่าวิกฤติ (ตกอยู่ในบริเวณวิกฤติ) จะปฏิเสธ  $H_0$  แต่ถ้าค่าสถิติมีค่าน้อยกว่าค่าสัมบูรณ์ของค่าวิกฤติ (ตกอยู่ในบริเวณยอมรับ) จะยอมรับ  $H_0$  ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบสมมติฐานแบบสองทางของการแจกแจง  $Z$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Z_0 \geq |z_{\alpha/2}| & \text{สรุปว่า ปฏิเสธ } H_0 \\ Z_0 \leq -|z_{\alpha/2}| & \text{สรุปว่า ยอมรับ } H_0 \end{aligned}$$

อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการสรุปผล จะพิจารณาจากค่า p - value ที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างมาเปรียบเทียบกับระดับนัยสำคัญ  $\alpha$  ค่า p - value เป็นค่าความน่าจะเป็นน้อยที่สุดที่ทำให้ปฏิเสธสมมติฐานหลัก  $H_0$  ได้ ซึ่งจะเป็นความน่าจะเป็นที่สอดคล้องกับค่าสถิติที่คำนวณจากกลุ่มตัวอย่าง สำหรับโปรแกรมในการวิเคราะห์ทางสถิติส่วนใหญ่จะแสดงผลการวิเคราะห์ทั้งค่าสถิติและค่า p - value การเทียบค่า p - value กับ  $\alpha$  จะสะดวกต่อการสรุปผลมากกว่า เพราะไม่ต้องเปิดตารางเพื่อหาค่าวิกฤติมาเปรียบเทียบ

ถ้าค่า p - value มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับระดับนัยสำคัญ  $\alpha$  จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก  $H_0$   
ถ้าค่า p - value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha$  จะยอมรับสมมติฐานหลัก  $H_0$

## 2.19 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ANOVA (Analysis of variance) เป็นวิธีการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงที่อาจจะเกิดขึ้นสำหรับกลุ่มประชากรที่ศึกษาตั้งแต่ 3 ชุดขึ้นไป โดยให้ความสำคัญกับการศึกษาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของประชากร ( $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_a$ ) ซึ่งมีความเหมือนหรือต่างกันในแต่ละกลุ่ม มีสาเหตุมาจากความแปรปรวนหรือความผันแปรในข้อมูลที่เกิดจาก 2 แหล่งคือ

1. **ปัจจัยศึกษา (Treatment)** เป็นปัจจัยที่สนใจศึกษา สามารถควบคุมหรือกำหนดว่าจะทดสอบปัจจัยนี้ในลักษณะใด สามารถเปลี่ยนรูปการทดลองของปัจจัยนี้ได้ เพื่อใช้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยว่ามีผลต่อค่าสังเกต (Observation) ที่เก็บรวบรวมอยู่

2. **ปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ (Error)** เป็นปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่อยู่ในสิ่งที่สนใจศึกษา ไม่สามารถควบคุมปัจจัยเหล่านี้ได้ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลกระทบต่อค่าสังเกตที่เก็บรวบรวมด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเฉพาะปัจจัยที่ต้องการศึกษาเพียงปัจจัยเดียว (One Factor) จะเรียกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Classification ANOVA Model) ถ้า 1 ปัจจัยมี  $a$  ระดับ ( $a$  Levels) หรือมี  $a$  Treatments แต่ละระดับมีการสุ่มตัวอย่างมาเพื่อวัดค่าสังเกต ลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง (Randomization) จะเรียกว่า Completely Randomized Design หรือ CRD แต่ในการทดลองที่มีการกำหนดปัจจัยควบคุม (Blocks) เพื่อช่วยกำจัดแหล่งของความผันแปร (Source of Variability) จะเรียกว่า Completely Randomized Block Design หรือ CRBD

### 2.19.1 Completely Randomized Design หรือ CRD

การทดลองแบบ CRD เป็นการทดลองสุ่มตัวอย่างประชากรที่ศึกษา เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัย 1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสังเกตหรือข้อมูลที่ศึกษา  $y_{ij}$  โดยแต่ละกลุ่มประกอบด้วยตัวอย่างขนาด  $n_j$  เมื่อ  $i$  แทนจำนวนระดับของปัจจัยที่ศึกษา (Treatment No.) เท่ากับ  $1, 2, \dots, a$  และ  $j$  แทนจำนวนครั้งของการทดลองในแต่ละระดับ (Sample No.) เท่ากับ  $1, 2, \dots, n_j$  ในส่วนการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองแบบ CRD เริ่มต้นจากการศึกษาความผันแปรที่เกิดขึ้นในข้อมูล โดยข้อมูลแต่ละตัวจะไม่เท่ากัน สาเหตุมาจากความแตกต่างของปัจจัยที่กำลังศึกษา (Treatment) หรือความแตกต่างของปัจจัยอื่นๆ ที่นอกเหนือขอบเขตของการศึกษา (Error)

ตารางที่ 2.5 ลักษณะข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ปัจจัยที่ศึกษา	ค่าสังเกต ( $y_{ij}$ )	ผลรวม ( $y_{i.}$ )	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{y}_{i.}$ )
1	$y_{11} y_{12} \dots y_{1n}$	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	$y_{21} y_{22} \dots y_{2n}$	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$a$	$y_{a1} y_{a2} \dots y_{an}$	$y_{a.}$	$\bar{y}_{a.}$
		$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

ความแตกต่างของ 2 สาเหตุที่ส่งผลให้ข้อมูลแต่ละตัวไม่เท่ากัน เมื่อทำการพิจารณาองค์ประกอบของข้อมูลแต่ละตัว จะพบว่าประกอบไปด้วย 3 ส่วน ได้แก่

1. ค่าเฉลี่ยทั้งหมด ( $\mu$ )
2. ผลกระทบจากปัจจัยที่ศึกษา ( $\tau_i$ )
3. ผลกระทบจากปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ( $\varepsilon_{ij}$ )

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, a$  และ  $j = 1, 2, \dots, n$  (กรณีของประชากร)

หรือ  $y_{ij} = \bar{y}_{..} + (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..}) + (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i.})$  (กรณีของตัวอย่าง)

โดยที่  $y_{ij}$  = ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของปัจจัยศึกษาตัวที่  $i$  ในการทดลองครั้งที่  $j$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\mu$  = พารามิเตอร์ร่วมสำหรับทุกค่าของปัจจัยที่ศึกษา  
 $\tau_i$  = พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายปัจจัยศึกษาตัวที่  $i$   
 $\varepsilon_{ij}$  = พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ของปัจจัยศึกษาตัวที่  $i$  ในการทดลองครั้งที่  $j$

สูตรการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและผลรวมของค่าเบี่ยงเบนยกกำลังสอง (Sum of Square) หรือ SS มีสูตรในการคำนวณ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน} &= \text{ค่าเบี่ยงเบนจากปัจจัยศึกษา} + \text{ค่าเบี่ยงเบนจากปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ} \\ &= (\bar{y}_i - \bar{y}_{..}) + (y_{ij} - \bar{y}_i) = y_{ij} - \bar{y}_{..} \end{aligned}$$

ผลรวมของค่าเบี่ยงเบนยกกำลังสอง เรียกว่า Sum of Square (SS)

$$\text{ดังนั้น Total Sum of Squares (SS}_T) = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$$

$$\text{Treatment Sum of Squares (SS}_{Tr}) = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_i - \bar{y}_{..})^2 = n_i \sum_{i=1}^a (y_i - \bar{y}_{..})^2$$

$$\text{Error Sum of Squares (SS}_E) = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ว่า } SST = SStr + SSE \quad (2.14)$$

สำหรับการหาค่าเฉลี่ยของผลรวมค่ากำลังสอง (Sum of Squares) จะเรียกว่า ค่าเฉลี่ยของกำลังสอง หรือ Mean Square (MS) หาได้จาก

$$\text{Mean Square} = \frac{\text{Sum of Square}}{\text{Degrees of Freedom}}$$

$$\text{Treatment Mean Squares (MS}_{Tr}) = \frac{SS_{Tr}}{df_{Tr}} = \frac{n_i \sum_{i=1}^a (y_i - \bar{y}_{..})^2}{a-1}$$

$$\text{Error Mean Squares (MS}_E) = \frac{SS_E}{df_E} = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{a(n-1)}$$

ในขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) จะประกอบ 6 ขั้นตอนที่สำคัญ ได้แก่

1. การกำหนดสมมติฐานหลัก  $H_0$
2. การกำหนดสมมติฐานทางเลือก  $H_1$
3. การเลือกระดับนัยสำคัญ  $\alpha$
4. การกำหนดบริเวณวิกฤตการแจกแจงแบบ  $F$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การคำนวณค่าสถิติ  $F_0$  จากตาราง ANOVA

ตารางที่ 2.6 ตาราง ANOVA ในกรณีที่มีขนาดตัวอย่างเท่ากัน

แหล่งของความผันแปร	ผลรวมของค่ากำลังสอง	องศาอิสระ	กำลังสองเฉลี่ย	ค่าสถิติ ( $F_0$ )
ปัจจัยศึกษา	$\sum_{i=1}^a \frac{\bar{y}_i^2}{n} - \frac{y^2}{an}$	$a - 1$	$\frac{SS_{tr}}{a - 1}$	$\frac{MS_{tr}}{MS_E}$
ปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ	$SS_T - SS_{tr}$	$a(n - 1)$	$\frac{SS_E}{a(n - 1)}$	
ผลรวม	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y^2}{an}$	$an - 1$		

## 6. การสรุปผลการทดสอบสมมติฐาน

ถ้า  $F_0 \leq F_{\alpha, a-1, N-a}$  จึงสรุปว่า ยอมรับสมมติฐานหลัก  $H_0$  ซึ่งแสดงว่า

1. ปัจจัยที่ศึกษาไม่มีผลต่อค่าสังเกต  $y_{ij}$  หรือ
2. สาเหตุจากความผันแปรในข้อมูลการทดลองมาจากปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ
3. ค่าเฉลี่ยของประชากรแต่ละกลุ่มไม่แตกต่างกัน

ถ้า  $F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$  จึงสรุปว่า ปฏิเสธสมมติฐานหลัก  $H_0$  ซึ่งแสดงว่า

1. ปัจจัยที่ศึกษามีผลต่อค่าสังเกต  $y_{ij}$  หรือ
2. สาเหตุจากความผันแปรจากปัจจัยที่ศึกษาและปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ
3. ค่าเฉลี่ยของประชากรแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกัน

## 2.19.2 Completely Randomized Block Design หรือ CRRD

เป็นการทดลองที่มีการควบคุม (บล็อก) ตัวแปรบางตัวที่ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง โดยปัจจัยที่ศึกษา (Treatment) จำนวน  $a$  ปัจจัย และมีปัจจัยควบคุม (Block) จำนวน  $b$  บล็อก ในขั้นตอนแรกจะศึกษาค่าสังเกต 1 ค่า จากการสุ่มตัวอย่างจากแต่ละปัจจัยในแต่ละบล็อก โดยภาพรวมการวิเคราะห์ความแปรปรวนประเภทนี้ดูเหมือนมี 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยศึกษาและปัจจัยควบคุม ซึ่งเรียกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two – Way Classification ANOVA Model) สัญลักษณ์ต่างๆ ที่แทนค่าสังเกตและค่าเฉลี่ย แสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ลักษณะข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ปัจจัยศึกษา	ปัจจัยควบคุม						ค่าเฉลี่ย
	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	...	B <sub>j</sub>	...	B <sub>b</sub>	
1	y <sub>11</sub>	y <sub>12</sub>		y <sub>1j</sub>		y <sub>1b</sub>	$\bar{y}_{1.}$
2	y <sub>21</sub>	y <sub>22</sub>	...	y <sub>2j</sub>	...	y <sub>2b</sub>	$\bar{y}_{2.}$
⋮		⋮		⋮			⋮
i	y <sub>i1</sub>	y <sub>i2</sub>	...	y <sub>ij</sub>	...	y <sub>ib</sub>	$\bar{y}_{i.}$
⋮		⋮		⋮			⋮
a	y <sub>a1</sub>	y <sub>a2</sub>		y <sub>aj</sub>		y <sub>ab</sub>	$\bar{y}_{a.}$
ค่าเฉลี่ย ( $\bar{y}_{.j}$ )	$\bar{y}_{.1}$	$\bar{y}_{.2}$	...	$\bar{y}_{.j}$	...	$\bar{y}_{.b}$	$\bar{y}_{..}$

องค์ประกอบข้อมูลแต่ละตัวประกอบของการทดลองแบบ CRBD มีทั้งหมด 4 ส่วน คือ

1. ค่าเฉลี่ยทั้งหมด ( $\mu$ )
2. ผลกระทบจากปัจจัยศึกษา ( $\tau_i$ )
3. ผลกระทบจากปัจจัยควบคุมแวดล้อม ( $\beta_j$ )
4. ผลกระทบจากปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ( $\varepsilon_{ij}$ )

ดังนั้นจะได้ว่า 
$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, a$  และ  $j = 1, 2, \dots, b$  (กรณีของประชากร)

หรือ  $y_{ij} = \bar{y}_{..} + (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..}) + (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..}) + (y_{ij} - \bar{y}_{i.})$  (กรณีของตัวอย่าง)

การทดลองแบบ CRBD แตกต่างจากการทดลองแบบ CRD ตรงที่มีผลกระทบจากปัจจัยควบคุมเข้ามาเพิ่ม โดยที่

$\beta_j$  = พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายปัจจัยควบคุมตัวที่  $j$  (หรือ Block Effects ที่  $j$ )

ค่าเบี่ยงเบนทั้งหมด = ค่าเบี่ยงเบนเนื่องจากปัจจัยศึกษา + ค่าเบี่ยงเบนเนื่องจากปัจจัยควบคุม + ค่าเบี่ยงเบนเนื่องจากปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ

จะได้ว่า  $y_{ij} - \bar{y}_{..} = (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..}) + (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..}) + (y_{ij} - \bar{y}_{i.})$

ดังนั้น 
$$SS_T = SS_{tr} + SS_{bl} + SS_E \quad (2.16)$$

หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองแบบ CRBD มีความคล้ายคลึงกับการทดลองแบบ CRD จะต่างกันตาราง ANOVA โดยมีการเพิ่มความผันแปรจากปัจจัยควบคุมเข้ามา เพื่อตรวจสอบดูว่าปัจจัยที่ศึกษาหรือปัจจัยควบคุมมีผลต่อค่าสังเกต ( $y_{ij}$ ) หรือไม่

ตารางที่ 2.8 ตาราง ANOVA วิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองแบบ CRBD

แหล่งของความผันแปร	ผลรวมของค่ากำลังสอง	องศาอิสระ	กำลังสองเฉลี่ย	ค่าสถิติ (F <sub>0</sub> )
ปัจจัยศึกษา	$\sum_{i=1}^a \frac{y^2_{i.}}{b} - \frac{y^2_{..}}{ab}$	a - 1	$\frac{SS_{tr}}{a - 1}$	$\frac{MS_{tr}}{MS_E}$
ปัจจัยควบคุม	$\sum_{j=1}^b \frac{y^2_{.j}}{a} - \frac{y^2_{..}}{ab}$	b - 1	$\frac{SS_{bl}}{b - 1}$	$\frac{MS_{bl}}{MS_E}$
ปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ	$SS_T - SS_{tr} - SS_{bl}$	(a - 1)(b - 1)	$\frac{SS_E}{(a - 1)(b - 1)}$	
ผลรวม	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y^2_{ij} - \frac{y^2_{..}}{ab}$	ab - 1		

### 2.19.3 เงื่อนไขการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Model Checking)

ในการทดสอบสมมติฐานการเท่ากันของค่าเฉลี่ยประชากรตั้งแต่ 3 ประชากรขึ้นไป หรือการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถทำได้นั้น ต้องมีเงื่อนไขสำหรับการตรวจสอบก่อน เงื่อนไขในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้แก่

1. ประชากรทั้ง a กลุ่ม มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)
2. ค่าความแปรปรวนของแต่ละประชากรต้องเท่ากัน คือ  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_a^2$

3. การสุ่มตัวอย่างแต่ละชุดจากประชากรต้องเป็นอิสระต่อกัน  
ในการทดสอบค่าเงื่อนไขการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น เป็นจริงหรือเป็นเท็จนั้น มีวิธีการตรวจสอบดังนี้

1. กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot)
2. กราฟระหว่างค่า Residuals กับระดับปัจจัยและเปรียบเทียบการกระจายของค่า Residuals
3. กราฟระหว่างค่า Residuals กับลำดับการทดลอง (Time or Run order)

## 2.20 การถดถอยเชิงเส้นและสหพันธ์

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหรือปัจจัยตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปจากการสร้างตัวแบบในการทำนายค่าของตัวแปรจะใช้เทคนิคทางสถิติ คือ การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ในการคาดการณ์นั้นจะต้องอาศัยตัวแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Dependent Variable) กับตัวแปรอิสระ (Independent Variables) ที่อาจมีมากกว่า 1 ตัวแปร

ถ้ากำหนดให้ Y เป็นตัวแปรตาม และ  $X_1, X_2, \dots, X_k$  เป็นตัวแปรอิสระ โดยที่ k เป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปร Y อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้ด้วยสมการถดถอย

(Regression Equation)  $Y = \phi(X_1, X_2, \dots, X_k)$  ซึ่งนอกจากจะทำให้ทราบรูปแบบของความสัมพันธ์แล้ว ยังสามารถใช้ทำนายค่าของตัวแปรตาม  $Y$  เมื่อทราบค่าของตัวแปรอิสระ  $X$

### 2.20.1 การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression)

เป็นวิธีการอธิบายความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปรเพียง 2 ตัว คือ ตัวแปรอิสระ  $X$  กับตัวแปรตาม  $Y$  ถ้า  $(x_1, y_1)$   $(x_2, y_2)$  ...  $(x_n, y_n)$  เป็นข้อมูลจำนวน  $n$  คู่ที่ได้จากการทดลอง ตัวแปร  $X$  จะสามารถกำหนดหรือควบคุมค่าที่ต้องการ โดยขณะที่ตัวแปร  $Y$  เป็นผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายเป็นการเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์หาสมการถดถอยสำหรับสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายจะอยู่ในรูป

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad (2.17)$$

โดยที่  $\beta_0$  = ระยะเวลาตัดแกน  $Y$   
 $\beta_1$  = ค่าความชัน (Slope)  
 $\varepsilon_i$  = ค่าความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม (Random Error)

จากสมการพารามิเตอร์  $\beta_0$  และ  $\beta_1$  เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า จึงจำเป็นต้องประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยตัวประมาณค่า  $\hat{\beta}_0$  และ  $\hat{\beta}_1$  จากค่าผลต่างกำลังสองระหว่างค่าสังเกต  $y_i$  และค่าที่ได้จากสมการถดถอย  $y_i$  สำหรับ  $\varepsilon_i$  จากสมการถดถอย เรียกว่า Residual คือ เป็นระยะห่างจากจุด  $(x_i, y_i)$  ไปยังเส้นตรง  $\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$  ซึ่งเรียกว่า เส้นตรงถดถอย (Regression Line)

การหาผลรวมกำลังสอง (Sum of Squares) และผลรวมของผลคูณระหว่างตัวแปร (Sum of Cross - Products) มีสัญลักษณ์ของผลต่างๆ ดังนี้

$$\text{ผลรวมกำลังสองของตัวแปรอิสระ } X = S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2$$

$$\text{ผลรวมกำลังสองของตัวแปรอิสระ } Y = S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2$$

$$\text{ผลรวมของผลคูณระหว่างตัวแปร } X, Y = S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

การทดสอบสมมติฐานของพารามิเตอร์ความชัน  $\beta_1$  ทำได้ 2 วิธี โดยใช้สถิติทดสอบ  $t$  หรือสถิติทดสอบ  $F$  (ตาราง ANOVA)

#### วิธีที่ 1. ใช้สถิติทดสอบ $t$

ขั้นตอนการตั้งสมมติฐานทั้ง 6 ขั้นตอน ประกอบด้วย

1.  $H_0 : \beta_1 = 0$  (ตัวแปร  $X$  และ  $Y$  ไม่มีความสัมพันธ์กัน)
2.  $H_0 : \beta_1 \neq 0$  (ตัวแปร  $X$  และ  $Y$  มีความสัมพันธ์กัน)
3. กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ  $\alpha$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. บริเวณวิกฤต  $t > t_{\frac{\alpha}{2}, n-2}$  และ  $t < -t_{\frac{\alpha}{2}, n-2}$
5. ค่าสถิติ  $t_0 = \frac{\hat{\beta}_1}{\sqrt{MS_E/S_{xx}}}$
6. สรุปผล ถ้า  $|t_0| \leq t_{\frac{\alpha}{2}, n-2}$  จะยอมรับสมมติฐานหลัก  $H_0$   
ถ้า  $|t_0| > t_{\frac{\alpha}{2}, n-2}$  จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก  $H_0$

### วิธีที่ 2. ใช้สถิติทดสอบ F (ตาราง ANOVA)

ขั้นตอนการตั้งสมมติฐานทั้ง 6 ขั้นตอน ประกอบด้วย

1.  $H_0 = \beta_1 = 0$  (ตัวแปร  $X$  และ  $Y$  ไม่มีความสัมพันธ์กัน)
2.  $H_1 : \beta_1 \neq 0$  (ตัวแปร  $X$  และ  $Y$  มีความสัมพันธ์กัน)
3. กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ  $\alpha$
4. บริเวณค่าวิกฤต  $F > F_{\alpha, 1, n-2}$
5. ค่าสถิติใช้ตาราง ANOVA วิเคราะห์หาค่าสถิติ  $F_0$  แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ตาราง ANOVA ของการทดสอบสมมติฐานของพารามิเตอร์ความชัน  $\beta_1$

แหล่งของความผันแปร	ผลรวมของค่ากำลังสอง	องศาอิสระ	กำลังสองเฉลี่ย	ค่าสถิติ ( $F_0$ )
การถดถอย (Regression)	$SS_R = \hat{\beta}_1^2 \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n} \right)$	1	$MS_R = \frac{SS_R}{1}$	$\frac{MS_R}{MS_E}$
ความคลาดเคลื่อนจากปัจจัยอื่นๆ (Error)	$SS_E = SS_T - SS_R$	$n - 2$	$MS_E = \frac{SS_E}{n - 2}$	
ผลรวม	$SS_T = S_{yy} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2$	$n - 1$		

6. สรุปผล ถ้า  $F_0 \leq F_{\alpha, 1, n-2}$  จะยอมรับสมมติฐานหลัก  $H_0$   
ถ้า  $F_0 > F_{\alpha, 1, n-2}$  จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก  $H_0$

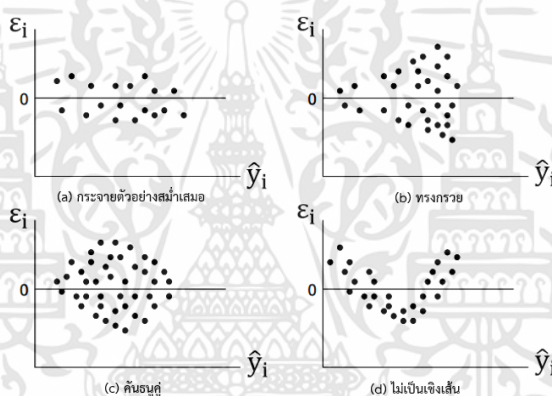
ในการวิเคราะห์ตาราง ANOVA สาเหตุของความแปรปรวนในการทำนายมาจาก 2 สาเหตุ คือ จากการถดถอย (Regression) และจากปัจจัยอื่นๆ ที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน (Error) ผลรวมของผลต่างกำลังสองระหว่างค่าทำนาย  $\hat{y}_i$  รอบๆ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม  $Y$  (หรือ  $\bar{y}$ ) เรียกว่า  $SS_R$  (Regression Sum of Squares) และผลรวมของผลต่างกำลังสองระหว่างข้อมูล  $y_i$  รอบๆ ค่าทำนาย  $\hat{y}_i$  เรียกว่า  $SS_E$  (Error Sum of Squares) และผลรวมทั้งหมด เรียกว่า  $SS_T$  (Total Sum of Squares) ซึ่งเท่ากับ  $SS_R + SS_E$

## 2.20.2 การทดสอบความเหมาะสมของ Model

ในวิธีการทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย (Regression Model) แบ่งการวิเคราะห์ ได้ดังนี้

### 1. การวิเคราะห์ค่า Residuals

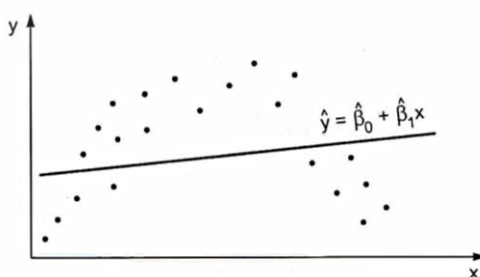
ค่า Residuals  $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$  เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, n$  โดยที่ค่า  $y_i$  เป็นค่าสังเกต และ  $\hat{y}_i$  เป็นค่าประมาณที่ได้จากสมการถดถอย การวิเคราะห์ค่า Residuals จะใช้ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ความคลาดเคลื่อน (Errors) มีการแจกแจงแบบ  $NID(0, \sigma^2)$  หรือไม่ กราฟ Residuals กับค่า  $\hat{y}_i$  แสดงดังรูปที่ 2.24 อาจแสดงให้เห็นเป็น 4 รูปแบบ คือ รูป (a) กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (Satisfactory) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการแจกแจงแบบปกติ (Normality) ขณะที่รูป (b) ทรงกรวย (Funnel), รูป (c) คั่นธนูคู่ (Double Bow) และรูป (d) ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่ปกติ มีลักษณะเป็นรูปแบบ (Pattern)



รูปที่ 2.23 กราฟ Residuals กับค่า  $\hat{y}_i$

### 2. Lack – Fit Test

เป็นการตรวจสอบตัวแบบการถดถอย (Regression Model) มีลักษณะของความสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ยกตัวอย่างกรณีแสดงในรูปที่ 2.24 ข้อมูลกับ Regression Model ไม่มีความเหมาะสมกัน มีแนวโน้มที่ไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูล ซึ่งมีความขัดแย้งกับสมการถดถอยเชิงเส้นตรง



รูปที่ 2.24 กราฟตัวอย่างการตรวจสอบ Lack – Fit Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. Coefficient of Determination

Coefficient of Determination หรือ  $r^2$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ถูกใช้ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการตัดสินใจของสมการถดถอย (Regression Model) ว่ามีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $r^2$ ) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และใช้เป็นตัวชี้วัดความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปร  $X$  และ  $Y$  มีสูตรการคำนวณ ดังนี้

$$r^2 = \frac{SS_T - SS_E}{SS_T} = \frac{SS_R}{SS_T} \quad (2.18)$$

#### 2.20.3 สหสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear Correlation)

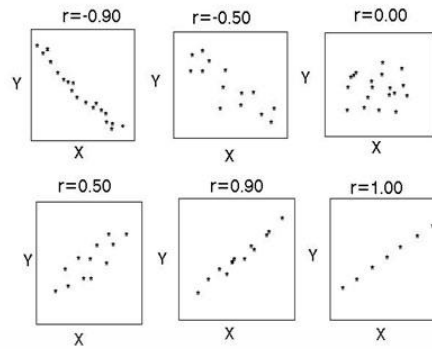
สหสัมพันธ์คือ ตัวชี้วัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปว่ามีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อยเพียงใด สัมประสิทธิ์ที่ใช้วัดความสัมพันธ์มากหรือน้อยระหว่างตัวแปร เรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) หรือ  $\rho$  สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\rho = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.19)$$

สำหรับค่าประมาณของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $\rho$ ) คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ตัวอย่าง (Sample Correlation) หรือ  $r$  สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\begin{aligned} r &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \\ &= \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_{xx}s_{yy}}} = \beta_1 \sqrt{\frac{s_{xx}}{s_{yy}}} = \sqrt{\frac{SS_R}{SS_T}} \end{aligned} \quad (2.20)$$

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ตัวอย่าง หรือ  $r$  มีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1 ( $-1 \leq r \leq 1$ ) ถ้า  $r = 0$  หรือ -1 หมายความว่าเส้นถดถอยผ่านทุกๆ จุดหรือไม่มีความคลาดเคลื่อนเลย เครื่องหมายบวก (+) แสดงถึงค่าของตัวแปรทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน ส่วนเครื่องหมายลบ (-) เป็นการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางผกผันกัน ถ้าค่า  $r$  เข้าใกล้ 1 มาก หมายความว่ามีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นที่ดี แต่ถ้าใกล้ค่า 0 หมายความว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นน้อยและถ้า  $r = 0$  หมายความว่าไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นต่อกัน



รูปที่ 2.25 ลักษณะตัวอย่างของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ )

## 2.21 ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) [61]

Desirability Function เป็นฟังก์ชันสำหรับการพิจารณาสถานะที่เหมาะสม (Optimization) ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ค่าความพึงพอใจหรือค่า  $d$  นี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 สำหรับค่า  $d$  ที่เป็นศูนย์ หมายถึงผลตอบสนองของการทดสอบอยู่นอกเหนือขอบเขตของการยอมรับ สำหรับค่า  $d$  มากกว่า ศูนย์ หมายถึงผลตอบสนองของการทดสอบอยู่ในขอบเขตของการยอมรับได้ และถ้าค่า  $d$  มีค่าเท่ากับ หนึ่ง หมายถึงผลตอบสนองของการทดสอบอยู่ในขอบเขตการยอมรับอย่างสมบูรณ์ ฟังก์ชันความพึงพอใจถูกแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบคือ

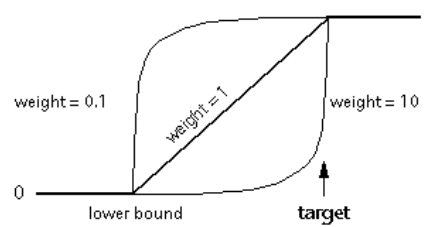
1. ยิ่งมากยิ่งขึ้นดี (The larger, the better) สำหรับต้องการให้ค่าตัวแปรผลตอบสนองมีค่ามากที่สุด (Maximization) ฟังก์ชัน  $d_i(y_i)$  ถูกนิยามดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 d_i(y_i) &= 0 & y_i &\leq L_i \\
 d_i(y_i) &= \left(\frac{y_i - L_i}{U_i - L_i}\right)^{x_i} & L_i &\leq y_i \leq U_i \\
 d_i(y_i) &= 1 & y_i &\geq U_i
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

เมื่อ  $L_i$  คือ ขอบเขตล่างสำหรับ  $y_i$

$U_i$  คือ ขอบเขตบนสำหรับ  $y_i$

$W_i$  คือ น้ำหนักสำหรับ  $y_i$



รูปที่ 2.26 ค่าน้ำหนัก  $W_i$  จะมีผลต่อรูปร่างกราฟยิ่งมากยิ่งดี

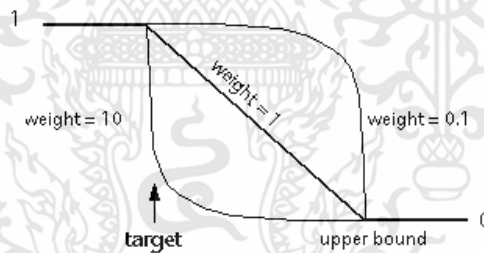
2. ยิ่งน้อยยิ่งดี (The smaller, the better) สำหรับต้องการให้ค่าตัวแปรผลตอบสนองมีค่าน้อยที่สุด (Minimization) โดยที่ฟังก์ชัน  $d_i(y_i)$  ถูกนิยามดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 d_i(y_i) &= 1 & y_i &\leq L_i \\
 d_i(y_i) &= \left(\frac{y_i - L_i}{U_i - L_i}\right)^{x_i} & L_i &\leq y_i \leq U_i \\
 d_i(y_i) &= 0 & y_i &\geq U_i
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

เมื่อ  $L_i$  คือ ขอบเขตล่างสำหรับ  $y_i$

$U_i$  คือ ขอบเขตบนสำหรับ  $y_i$

$W_i$  คือ น้ำหนักสำหรับ  $y_i$



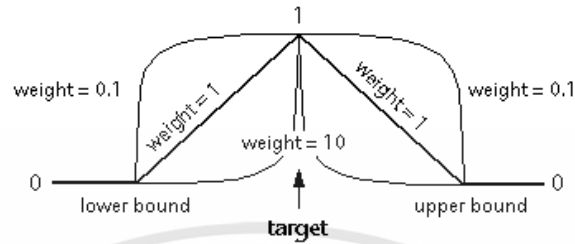
รูปที่ 2.27 ค่าน้ำหนัก  $W_i$  จะมีผลต่อรูปร่างกราฟยิ่งน้อยยิ่งดี

3. ค่ากลางคือค่าที่ดีที่สุด (Nominal the best) สำหรับในกรณีกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) ของค่าตัวแปรผลตอบสนองให้มีค่าสูงสุด โดยที่ฟังก์ชัน  $d_i(y_i)$  ถูกนิยามดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 d_i(y_i) &= 0 & y_i &\leq L_i \\
 d_i(y_i) &= \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - L_i}\right)^{x_i} & L_i &\leq y_i \leq T_i \\
 d_i(y_i) &= \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - U_i}\right)^{x_i} & L_i &\leq y_i \leq U_i \\
 d_i(y_i) &= 0 & y_i &= U_i
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $L_i$  คือ ขอบเขตล่างสำหรับ  $y_i$   
 $U_i$  คือ ขอบเขตบนสำหรับ  $y_i$   
 $W_i$  คือ น้ำหนักสำหรับ  $y_i$



รูปที่ 2.28 ค่าน้ำหนัก  $W_i$  จะมีผลต่อรูปร่างกราฟค่ากลางคือค่าที่ดีที่สุด

4. แบบมีข้อจำกัด (Constraint) สำหรับในกรณีค่าตัวแปรผลตอบสนองอยู่ภายใต้ข้อจำกัด  $L_i \leq y_i \leq U_i$  โดยที่ฟังก์ชัน  $d_i(y_i)$  ถูกนิยามดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 d_i(y_i) &= 0 & y_i &\leq L_i \\
 d_i(y_i) &= 1 & y_i &\leq L_i \leq U_i \\
 d_i(y_i) &= 0 & y_i &\geq U_i
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

เมื่อ  $L_i$  คือ ขอบเขตล่างสำหรับ  $y_i$   
 $U_i$  คือ ขอบเขตบนสำหรับ  $y_i$   
 $W_i$  คือ น้ำหนักสำหรับ  $y_i$

### บทที่ 3

## ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยโดยเริ่มจากศึกษาข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หลังจากนั้นทำการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture design) ของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกชนิดอะครีโลไโรไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน หรือพลาสติก ABS โดยผสม  $TiO_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab หลังจากนั้นผสมองค์ประกอบของวัสดุเข้าด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วยเฟสเนื้อพื้นและเฟสเสริมแรงด้วยเครื่องผสมพลาสติกแบบปิด (Internal Mixer) หลังจากนั้นย่อยองค์ประกอบวัสดุด้วยเครื่องบดพลาสติกและสร้างชิ้นงานสำหรับทดสอบด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding) เพื่อศึกษาทดสอบสมบัติทางกลและทดสอบสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) โดยใช้แบคทีเรียอีโคไลเป็นแบคทีเรียต้นแบบ รวมทั้งตรวจสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาของเฟสเสริมแรง จำแนกประเภทของสารและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเชิงประกอบ

### 3.1 การออกแบบการทดลองโดยอาศัยวิธีทางสถิติวิศวกรรม

งานวิจัยนี้ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture design) แบบมีข้อจำกัดหรือแบบ Extreme vertices เพื่อศึกษาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพลาสติก ABS เสริมแรงด้วย  $TiO_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES กำหนดปัจจัยที่ใช้สำหรับการทดลองทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัย A (พลาสติก ABS), ปัจจัย B ( $TiO_2$ ) และปัจจัย C (สารคู่ควบปฏิกิริยา APTES) ส่วนผลตอบสนองหรือค่า Y ในการทดลองคือ การทดสอบแรงดึง ได้แก่  $Y_1$  คือค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength, MPa),  $Y_2$  คือค่ามอดูลัสแรงดึง (Young's modulus, GPa) และ  $Y_3$  คือค่าระยะยืดสูงสุดที่จุดขาด (Elongation at Break, %) กำหนดเงื่อนไขปัจจัยไม่เกิน 0.5 ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

ปัจจัย (Factors)	ระดับปัจจัย (Factors levels)	
	ระดับต่ำ (Low level)	ระดับสูง (High level)
A : พลาสติก ABS (กรัม)	99.4	99.8
B : $TiO_2$ (กรัม)	0.1	0.5
C : สารคู่ควบปฏิกิริยา APTES (มิลลิลิตร)	0.1	0.5

ผลออกแบบการทดลองตามเงื่อนไขข้างต้นได้อัตราส่วนผสมทั้งหมด 7 การทดลอง (runs) ทำการทดลองซ้ำ (Replicate) ทั้งหมด 3 ครั้ง ต่อเงื่อนไขการทดลอง แสดงในตารางที่ 3.2 และแบบจำลอง Mixture Design แสดงดังรูปที่ 3.1 ในการทดลองจะเลือกรูปแบบการทดลองแบบสุ่ม (Random) หลังจากนั้นทำการเก็บข้อมูลนำไปประมวลผลทางสถิติเพื่อวิเคราะห์พื้นผิวดตอบสนองและหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

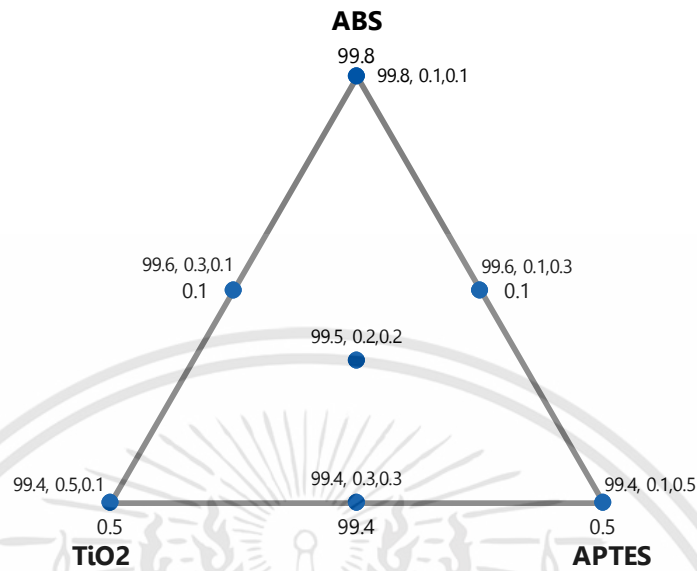
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างตารางแบบสุ่มสำหรับการทดลอง

RunOrder	Factors			Tensile Testing
	A : ABS	B : TiO <sub>2</sub>	C : APTES	
1	99.4	0.1	0.5	
2	99.8	0.1	0.1	
3	99.4	0.5	0.1	
4	99.4	0.3	0.3	
5	99.6	0.1	0.3	
6	99.6	0.3	0.1	
7	99.5	0.2	0.2	
8	99.4	0.1	0.5	
9	99.8	0.1	0.1	
10	99.4	0.5	0.1	
11	99.4	0.3	0.3	
12	99.6	0.1	0.3	
13	99.6	0.3	0.1	
14	99.5	0.2	0.2	
15	99.4	0.1	0.5	
16	99.8	0.1	0.1	
17	99.4	0.5	0.1	
18	99.4	0.3	0.3	
19	99.6	0.1	0.3	
20	99.6	0.3	0.1	
21	99.5	0.2	0.2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

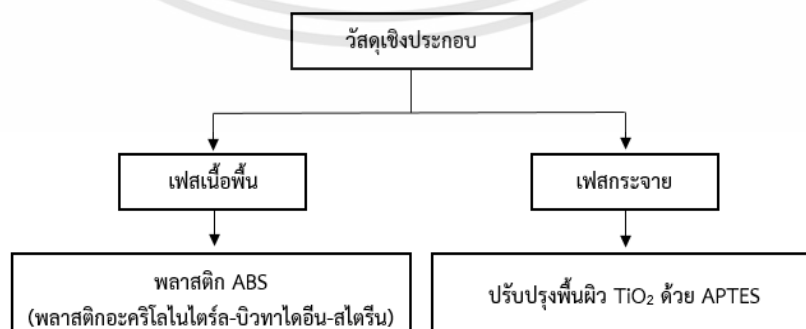
### Simplex Design Plot in Tensile Testing



รูปที่ 3.1 แบบจำลอง Mixture Design

### 3.2 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบ

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบ ABS โดยผสม TiO<sub>2</sub> ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารควบคุมปฏิกิริยา APTES ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งองค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบเป็น 2 ส่วน คือ เฟสเนื้อพื้น (Matrix) และเฟสกระจายหรือเฟสเสริมแรง (Reinforcement) แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture design) การเตรียมชิ้นงานทดสอบในส่วนเสริมแรงทำการปรับปรุงพื้นผิว TiO<sub>2</sub> ด้วยสารควบคุมปฏิกิริยา APTES และในส่วนเฟสเนื้อพื้นนำพลาสติก ABS ไปอบไล่ความชื้นก่อนทำการผสม อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ คือ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำองค์ประกอบต่างๆ ผสมเข้าด้วยกันด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixture) เพื่อให้ในส่วนเฟสกระจายสามารถกระจายตัวเข้ากับเฟสเนื้อพื้นได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมเฟสเนื้อพื้นและเฟสกระจาย รวมถึงขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและวิธีการทดสอบจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.2 แสดงองค์ประกอบการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การปรับปรุงพื้นผิว $\text{TiO}_2$ ด้วย APTES

#### 3.3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เกรดอุตสาหกรรม (จากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอปโปเรชั่น จำกัด)
2. 3 - อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน 98% (3 - Aminopropyltriethoxysilane) (จากบริษัท S.M. CHEMICAL SUPPLIES CO., LTD.)
3. เอทานอล 99% (จากบริษัท ไทยสงวนวัฒน์เคมีภัณฑ์ จำกัด)

#### 3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก
2. เตาเผาอุณหภูมิสูง
3. บีกเกอร์ ขนาด 600 มิลลิลิตร
4. เครื่องชั่งสารเคมีอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง
5. ถ้วยระเหยสาร และช้อนตักสาร



รูปที่ 3.3 ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เกรดอุตสาหกรรม



รูปที่ 3.4 3 - อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน 98% (APTES)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 ขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิว

1. ชั่ง  $\text{TiO}_2$  ตามปริมาณอัตราส่วนในตารางการออกแบบการทดลอง ตารางที่ 3.1 ปรับปริมาตรด้วยตัวทำละลายเอทานอล กวนสารละลายให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารละลายแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 10 นาที

2. เติมสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES (3 - อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน) อย่างช้าๆ ตามปริมาณอัตราส่วนในตารางการออกแบบการทดลอง พร้อมกับปั่นกวนสารละลายต่อเนื่องให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที

3. นำสารในข้อ 2. ทำการอบให้แห้งโดยนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.5 เตาเผาอุณหภูมิสูง

### 3.4 เตรียมชิ้นงานทดสอบ

ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ สร้างชิ้นงานทดสอบสำหรับทดสอบสมบัติทางกล โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 และศึกษาสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ JIS Z 2801:2010 ทำการผสมพลาสติก ABS และ  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES เข้าด้วยกันตามอัตราส่วนผสมจากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมตามตารางที่ 3.1 ซึ่งวัสดุและสารเคมีและขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานในงานวิจัย มีดังนี้

#### 3.4.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

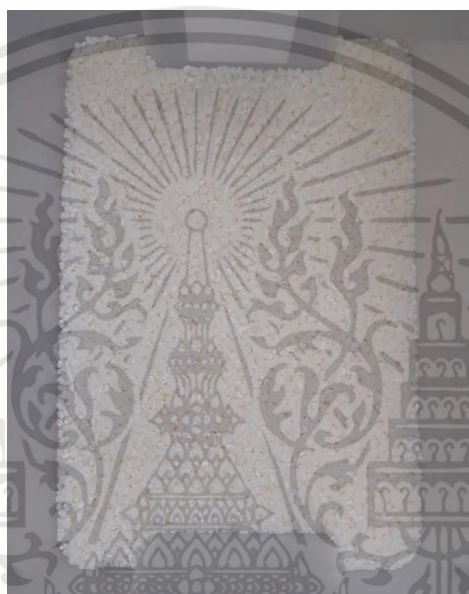
1. เม็ดพลาสติก ABS เกรด PA - 717C (ของ บริษัท CHI MEI CORPORATION ประเทศไต้หวัน)

2.  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องผสมเม็ดพลาสติก Internal Mixer รุ่น MX500-D75L90 (ของบริษัท CHAREON TUT CO., LTD.)
2. เครื่องบดพลาสติก
3. เครื่องกดอัดพลาสติก (Compression molding)
4. เครื่องบดเม็ดพลาสติก
5. เครื่องชั่งสารเคมี 2 ตำแหน่ง
6. ภาชนะสำหรับชั่งเม็ดพลาสติก



รูปที่ 3.6 เม็ดพลาสติก ABS



รูปที่ 3.7  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สมบัติพื้นฐานของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) ที่ใช้ในงานวิจัย

Items	Specification	Test Results
Purity	More than 98%	98.75%
Whiteness color compare with standard	Not lower than standard	Conformed
Tinting strength compare with standard %	More than 100	122.0
Matter volatile at 105 C% m/m	Less than 0.5	0.3
PH of suspension, aqueous solution retained %	6.5 – 8.0	7.1
Oil absorption g/100 g	Less than 26	22
Residue on sieve 45 um %m/m	Less than 0.1	0.06
Solvent suspension content in water % m/m	Less than 0.5	0.04

ตารางที่ 3.4 สมบัติพื้นฐานของ 3 – อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน หรือ APTES

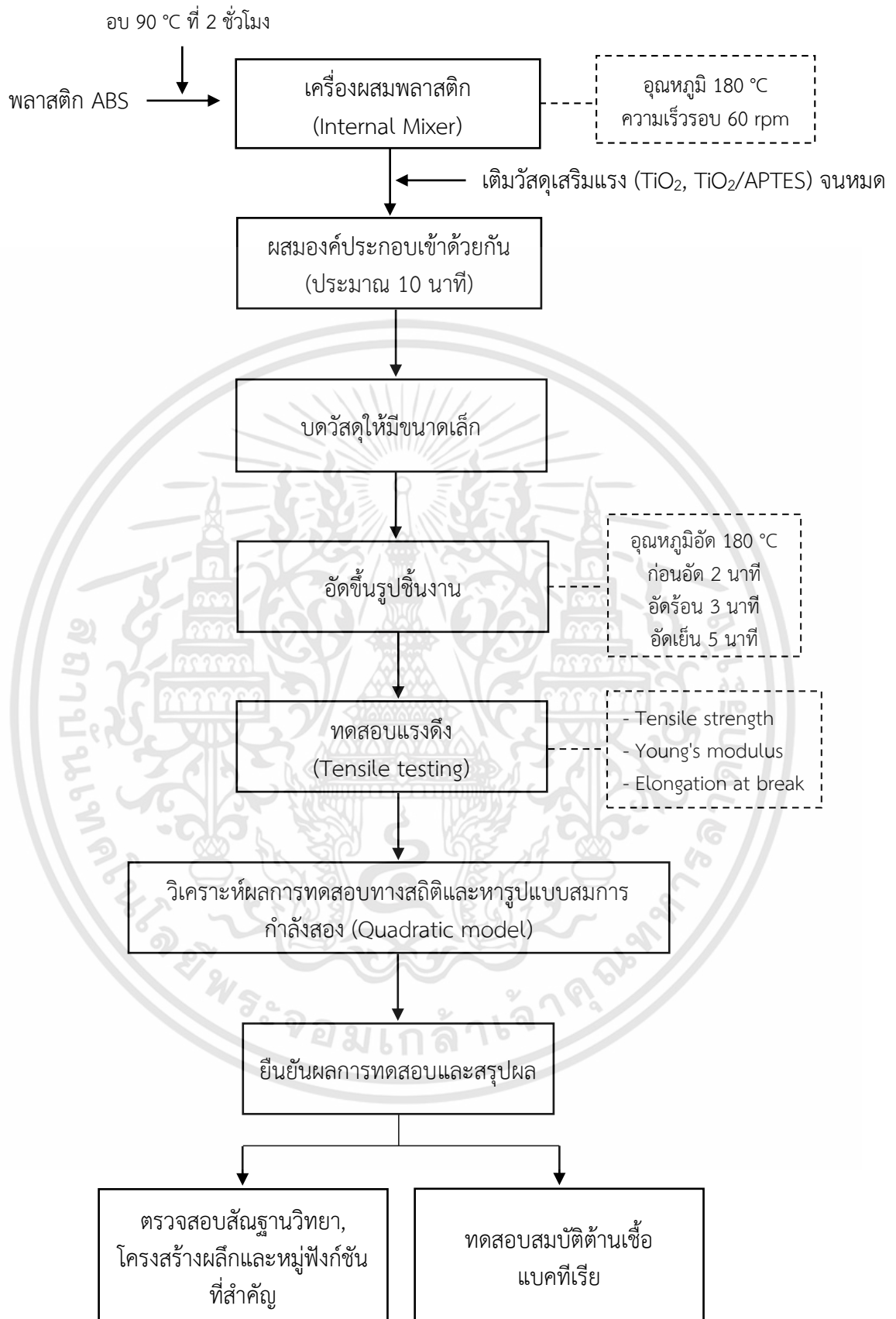
Test	Specification
Appearance (Color)	Colorless
Appearance (Form)	Liquid
Infrared Spectrum	Conforms to Structure
Titration with HCl	98.0 – 102.0 %
Color Test	≥ 25 APHA
Purity (GC)	≥ 98.0 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติพื้นฐานของพลาสติก ABS

Properties	ISO Test Method	Test Condition	Unit	PA – 717C
Melt Flow Index	1133	220 °C × 10 Kg	ML/10 min	16
Mass Density	1183	23 °C	g/cm <sup>3</sup>	1.06
Tensile Strength	527	50 mm/min, yield	MPa	44
		50 mm/min, break	MPa	33
Tensile Elongation	527	50 mm/min	%	30
Flexural Strength		2 mm/min	MPa	69
Flexural Modulus	178	2 mm/min	GPa	1.9
Izod Impact Strength	180/1A	23 °C Notched	KJ/m <sup>2</sup>	25
		-30 °C Notched	KJ/m <sup>2</sup>	12
Charpy Impact Strength	179	23 °C Notched	KJ/m <sup>2</sup>	27
		-30 °C Notched	KJ/m <sup>2</sup>	13
Vicat Softening Temp.	306	1 Kg, 50 °C/hr	°C	103
		5 Kg, 50 °C/hr	°C	98
Heat Distortion Temp.	75/A	1.8 MPa	°C	82
		Unannealed		
		1.8 MPa Annealed	°C	97
Coefficient of Linear Thermal Expansion	11359	-	-	8.8 × 10 <sup>-5</sup>
Flammability	-	UL-94	-	1.5 mm HB
Mold Shrinkage	294-4	-	%	0.4 ~ 0.7
Symbol	1043	-	-	> ABS <

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 สรุปขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบและวิธีการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 ขั้นตอนการผสมพลาสติก

1. นำเม็ดพลาสติก ABS ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. ชั่งเม็ดพลาสติก ABS และ  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES ตามตารางการออกแบบการทดลองตารางที่ 2. ผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixture) อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมอยู่ที่ 180 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการผสมอยู่ที่ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
3. หลังจากนั้นนำพลาสติก ABS และ  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES นำไปบดด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก
4. ทำการทดลองเช่นเดิมในข้อ 1. – 3. โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสมที่ได้ออกแบบการทดลองตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.9 เครื่องผสมพลาสติก Internal Mixture



รูปที่ 3.10 เครื่องบดพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

1. เปิดสวิตช์ที่ Breaker, Main Switch ที่ตัวเครื่อง และวาล์วน้ำสำหรับขั้นตอนในการหล่อเย็น (Cooling)

2. เลือกโหมดการทำงานเครื่องอัด โดยเลือกโหมดพลาสติก ตั้งอุณหภูมิสำหรับสร้างชิ้นงานที่ 180 องศาเซลเซียส ตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องโดยให้ความร้อนก่อนอัดขึ้นรูป (Preheat) ที่ 2 นาที, เวลาในการอัดขึ้นรูป (Pressing) ที่ 3 นาที และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Cooling time) ด้วยแท่นหล่อเย็นที่เวลา 5 นาที

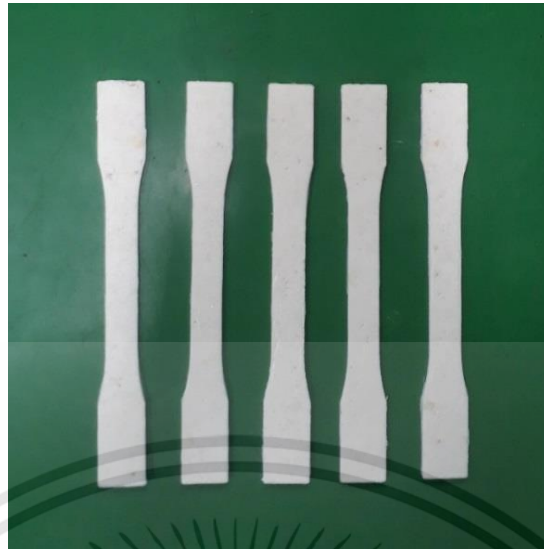
3. ระหว่างรออุณหภูมิ วางแม่พิมพ์ไว้บน Plate โดยขนาดของแม่พิมพ์สำหรับสร้างชิ้นงานมีขนาด 165 × 20 × 5 มิลลิเมตร เตรียมพลาสติกที่ผ่านการอบปริมาณ 6 กรัม เกลี่ยลงในแม่พิมพ์ต่อ 1 หลุม ประกอบ Plate อีกแผ่นบนแม่พิมพ์นำไปวางในแท่นอัดเข้าและกดปุ่ม Up ที่ตัวเครื่องเพื่ออัดขึ้นงาน

4. จะได้ชิ้นงานรูปทรง Dumbbell สำหรับทดสอบสมบัติทางกล ส่วนชิ้นงานที่ใช้ทดสอบสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5 × 5 เซนติเมตร

5. ทำซ้ำในข้อที่ 3. โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของวัสดุที่ได้จากการออกแบบการทดลอง



รูปที่ 3.11 เครื่องกดอัดพลาสติก (Compression Molding Machine)



รูปที่ 3.12 ชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติทางกล



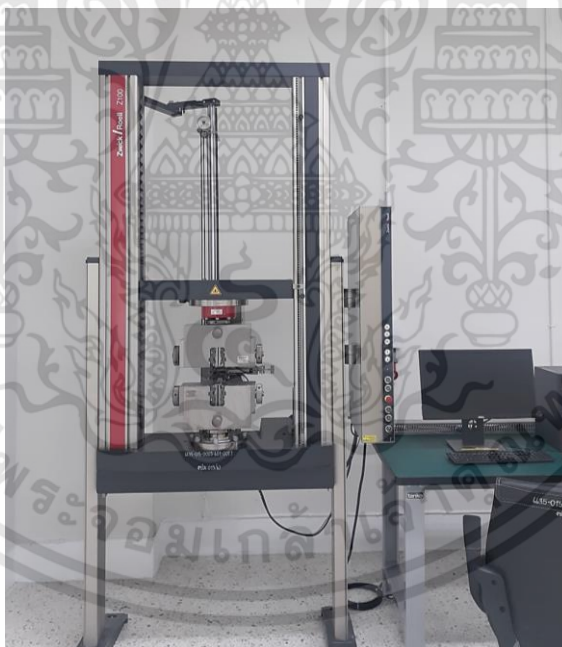
รูปที่ 3.13 ชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การศึกษาสมบัติทางกล

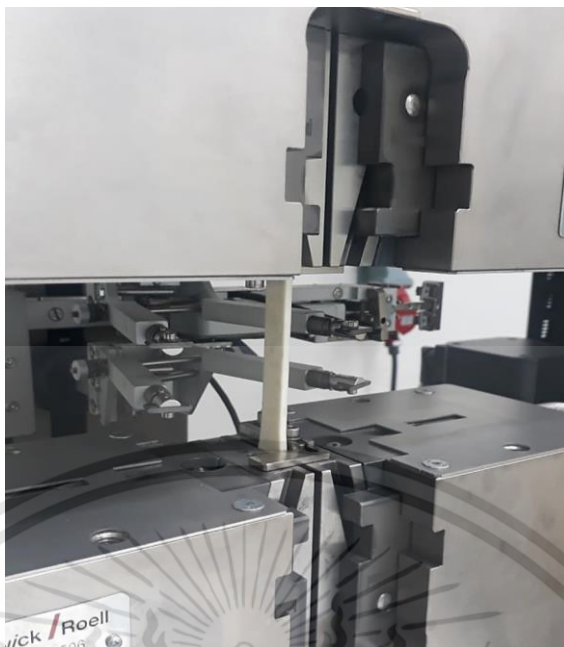
#### 3.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)

หลังจากเตรียมชิ้นงานรูปทรง Dumbbell สำหรับทดสอบสมบัติทางกล หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบจากเครื่อง Static Materials Testing Machines (Zwick/Roell) Type 8506 อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D368 ทดสอบชิ้นงานจำนวน 3 ครั้ง ต่อ 1 เงื่อนไขการทดลอง สำหรับการทดสอบนี้กำหนดอัตราเร็วในการดึงที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะจับของชิ้นงานที่ 50 มิลลิเมตร เพื่อวัดความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงความยาวเกจ ก่อนทำการทดสอบจับชิ้นงานที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่แล้วทำการดึงยึดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่กำหนดจากเครื่องทดสอบ หลังจากนั้นทำการบันทึกค่าของแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอและความยาวของชิ้นงานที่ยึดออกในช่วงของแรงต่างๆ จนกระทั่งชิ้นงานขาด ผลการทดสอบที่ต้องการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าบอกถึงความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้, ค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile Modulus) เป็นค่าการวัดความแข็งแรงของวัสดุและความสามารถในการคงรูปร่างเมื่อวัสดุได้รับแรง โดยมอดูลัสแรงดึงนี้เป็นค่าของความชันระหว่างความเค้นและความเครียดที่พลอตจากกราฟ (Stress-Strain Curve) และค่าระยะยืดสูงสุดที่จุดขาด (Elongation at Break) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเหนียวของวัสดุ



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 การติดตั้งชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ

### 3.6 การตรวจสอบวัสดุเชิงประกอบ

#### 3.6.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุ

ทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของวัสดุที่เตรียมได้ ได้แก่  $\text{TiO}_2$  (เกรดอุตสาหกรรม),  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES และวัสดุเชิงประกอบพลาสติก ABS ผสม  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ยี่ห้อ SHIMADZU/Japan รุ่น XRD – 6100 แสดงดังรูปที่ 3.12 เพื่อศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างผลึกของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้น พร้อมบันทึกภาพและสรุปผลการทดสอบ

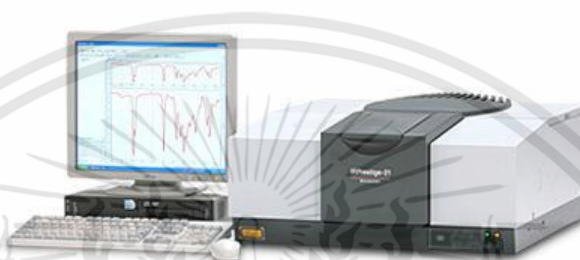


รูปที่ 3.16 เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) [64]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2 วิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานของวัสดุ

ทำการจำแนกประเภทของสารในวัสดุเชิงประกอบโดยวิเคราะห์ลักษณะการยึดติดกันของหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ระหว่างพลาสติกเนื้อพื้น ABS กับเฟสเสริมแรง  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES อาศัยหลักการดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรดด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer หรือ FTIR เพื่อศึกษาโครงสร้างเคมีพื้นฐานของวัสดุ รวมทั้งพิจารณาพิกัดที่สำคัญของวัสดุเชิงประกอบระหว่างเฟสเนื้อพื้นและเฟสเสริมแรงในอัตราส่วนต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบการทดลอง หลังจากนั้นทำการบันทึกภาพและสรุปผลการวิเคราะห์



รูปที่ 3.17 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer หรือ FTIR [65]

### 3.6.3 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา

ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) หรือ SEM แสดงดังรูปที่ 3.18 โดยแบ่งลักษณะศึกษาเป็นสองส่วน ส่วนแรกศึกษาลักษณะอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ในเฟสเนื้อพื้นและส่วนที่สองศึกษาลักษณะพื้นผิวรอยแตกหักของวัสดุที่ผ่านการทดสอบเพื่อดูว่าลักษณะพื้นผิวบริเวณรอยต่อของวัสดุมีลักษณะเป็นอย่างไร หลังจากนั้นทำการบันทึกภาพและสรุปผลการวิเคราะห์



รูปที่ 3.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [66]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 การศึกษาสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย

แบคทีเรียที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้คือ แบคทีเรีย *Escherichia coli* หรือ อีโคไล (ได้รับการอนุเคราะห์จากคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง) เป็นแบคทีเรียที่มีรูปร่างเป็นท่อน มีขนาดเล็กและไม่สร้างสปอร์และไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า มีเซลล์เดี่ยวและมีลักษณะโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน เจริญได้ดีในสภาพที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ JIS Z 2801: 2010 (มาตรฐานการทดสอบประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียบนพื้นผิววัสดุ) ทำการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างละ 3 ชิ้น ต่อ 1 เงื่อนไขการทดลอง โดยหยดเชื้อแบคทีเรียอีโคไลลงบนชิ้นงานขนาด 5 × 5 เซนติเมตร ศึกษาสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) ซึ่งวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย และขั้นตอนในการเตรียมสารและทดสอบ มีดังนี้

#### 3.7.1 วัสดุและสารที่ใช้ในงานวิจัย

1. แบคทีเรียอีโคไลชนิด AIKL 1070
2. อาหารเลี้ยงเชื้อ PCA (Plate count agar)
3. อาหารเลี้ยงเชื้อ TSB (Tryptic soy broth)
4. Beef extract
5. Peptone
6. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
7. น้ำกลั่น (Distilled water)

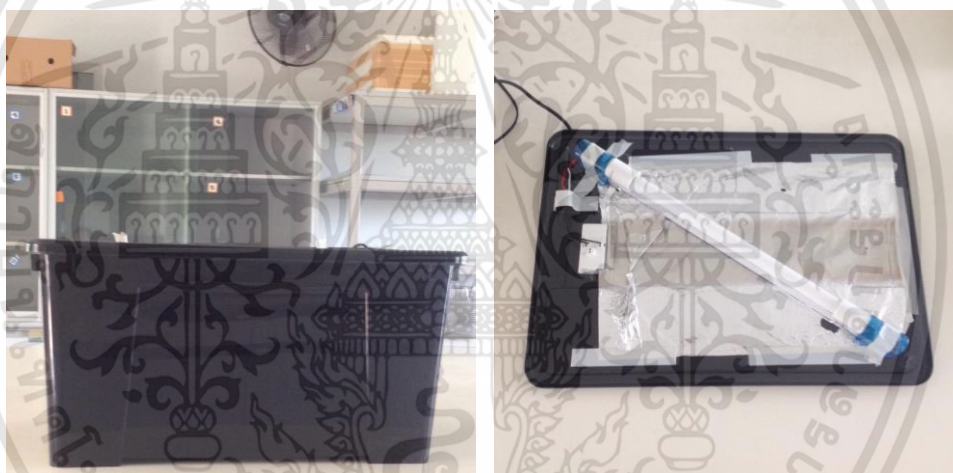
#### 3.7.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กล้องทึบแสงสำหรับรับแสงยูวี ขนาด 74×50×45 ซม. และติดหลอดไฟบนฝากล้อง
2. หลอด UV-B ขนาด 18W (โดยบริษัท ซีซีเอส ซัคเซสโปรดักส์ จำกัด)
3. ตู้ Biohazard laminar flow รุ่น HUB 120 S Boss Tech
4. หม้อนึ่งความดันไอ (Autoclave) รุ่น Tommy
5. ตู้บ่มเพาะเชื้อ
6. เครื่องนับจำนวนแบคทีเรีย
7. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง
8. ตะเกียงแอลกอฮอล์
9. ไมโครปิเปต
10. หลอดทดลองพร้อมฝา ขนาด 16 × 125 มิลลิเมตร
11. จานเพาะเชื้อ (Petri dish)
12. หลูป้ายเชื้อ
13. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 125 มิลลิลิตร
14. บีกเกอร์ ขนาด 250, 600 และ 1000 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 เครื่องนับจำนวนแบคทีเรีย



รูปที่ 3.20 กล่องที่บแสงสำหรับรับแสงยูวีพร้อมฝาโดยติดหลอดยูวีบนฝากล่อง

### 3.7.3 วิธีเตรียมสารละลาย

1. เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ PCA โดยชั่ง PCA 22.5 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนและกวนอาหารให้เข้ากัน
2. เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB โดยชั่ง TSB 15 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร
3. เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient agar (NA) โดยชั่ง Beef extract 1.25 กรัม, Peptone 2.5 กรัม, NaCl 1.25 กรัม และ PCA 15 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนและกวนอาหารให้เข้ากัน ถ้วยใส่หลอดทดลองหลอดละ 10 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เตรียมสารละลาย PBS (Phosphate buffer solution) โดยชั่ง NaCl 8.5 กรัม และดูดสารละลายจาก Stock Phosphate buffer solution 1.25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ถ่ายใส่หลอดทดลองหลอดละ 9 มิลลิลิตร

สำหรับเชื้อแบคทีเรียอีโคไลที่ใช้ทดสอบ ความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียอยู่ประมาณ  $10^5$  CFU/ml ขั้นตอนการเตรียมสารละลายแบคทีเรียอีโคไลสำหรับทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.21

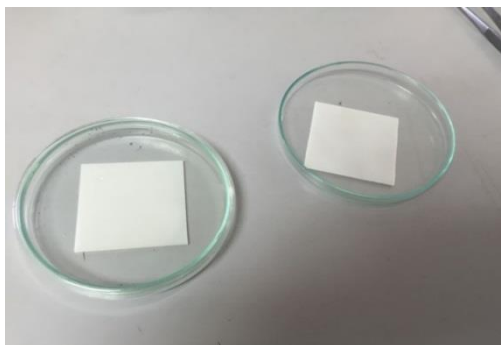


รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายเชื้อแบคทีเรียอีโคไลสำหรับหยดลงบนชิ้นงาน



รูปที่ 3.22 สารละลายแบคทีเรียอีโคไลสำหรับหยดลงบนชิ้นงาน

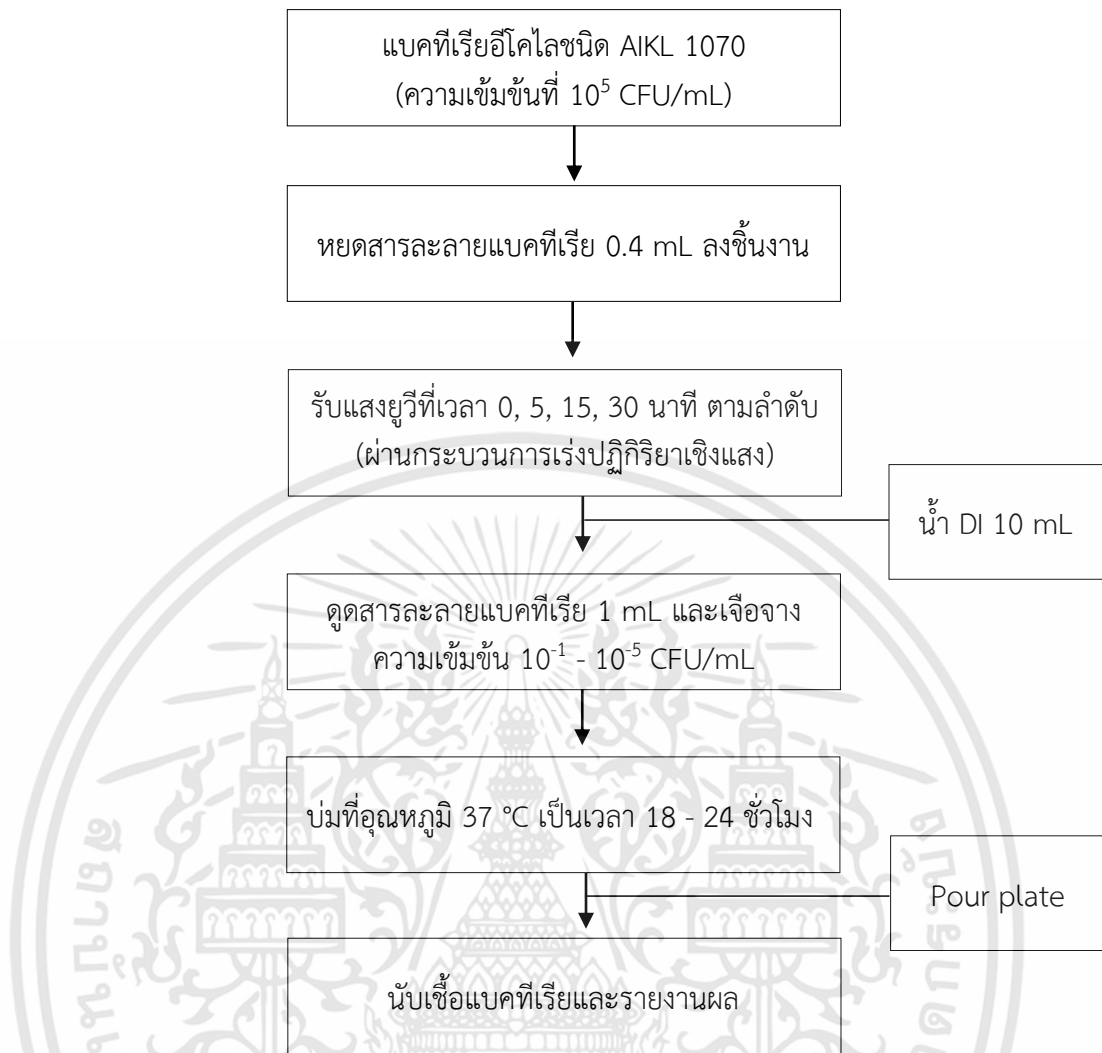
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 ชิ้นงานขนาด 5 × 5 เซนติเมตร สำหรับทดสอบสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย

### 3.7.4 ขั้นตอนการลงเชื้ออีโคไลบนชิ้นงาน

1. สับเชื้ออีโคไลด้วยลูบเขี่ยเชื้อลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient agar และนำไปป่มในตู้ป่มเชื้อที่อุณหภูมิ  $32 \pm 0.5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. เขี่ยเชื้อในข้อ 1. ลงในสารละลาย TSB และนำไปป่มในตู้ป่มเชื้อที่อุณหภูมิ  $32 \pm 0.5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ทำความสะอาดชิ้นงานโดยนำชิ้นงานจุ่มแอลกอฮอล์ 2 – 3 ครั้ง และวางชิ้นงานลงในจานเพาะเชื้อ
4. ดูดสารละลายแบคทีเรียอีโคไลในข้อ 2. ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร ลงบนชิ้นงานและวางแผ่นใส PET ขนาด 4 × 4 เซนติเมตร ประกอบบนชิ้นงานและนำไปรับแสงแสงยูวีเป็นเวลา 0, 5, 15 และ 30 นาที ตามลำดับ
5. หลังจากนั้นเปิดน้ำ DI ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในจานเพาะเชื้อ ปิดฝาและเขย่าจานเพาะเชื้อให้แบคทีเรียอีโคไลบนชิ้นงานผสมกับน้ำ DI
6. เจือจางสารละลายแบคทีเรียอีโคไลที่ความเข้มข้น 0.1 0.01 0.001 และ 0.0001 ตามลำดับ โดยดูดสารละลาย PBS ปริมาตร 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันจะได้ตัวอย่างสารละลายแบคทีเรียอีโคไลที่เข้มข้น 0.1 เท่า และดูดสารละลายแบคทีเรียอีโคไล ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในสารละลาย PBS เขย่าให้เข้ากันจะได้ตัวอย่าง *E.coli* ที่เข้มข้น 0.01 เท่า และทำการเจือจางตามลำดับ
7. เปิดสารละลายแบคทีเรียอีโคไลในข้อ 6. ที่ความเจือจาง  $10^{-4}$  ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในจานเพาะเชื้อ เทอาหารเลี้ยงเชื้อ PCA และ pour plate ร่องจนกระทั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ PCA แข็ง นำไปป่มที่อุณหภูมิ  $32 \pm 0.5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และรายงานผล



รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการลงเชื้อแบคทีเรียอีโคไลบนชิ้นงาน



รูปที่ 3.25 หม้อนึ่งความดันไอ (Autoclave)



รูปที่ 3.26 ตู้ Biohazard laminar flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

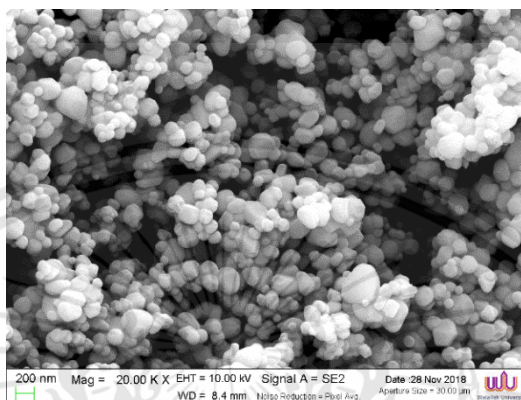
### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการวางแผนการทดลองโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมหรือ Mixture design ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab โดยกำหนดปัจจัยเชิงปริมาณที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัย A (พลาสติกชนิด ABS), ปัจจัย B ( $\text{TiO}_2$ ) และปัจจัย C (สารคู่ควบปฏิกิริยา APTES) เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ส่งผลให้ค่าการทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength), ค่ามอดูลัสแรงดึง (Young's modulus) และค่าระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด (Elongation at break) มีค่าที่ดีที่สุด จากนั้นเตรียมองค์ประกอบของวัสดุเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานทดสอบ ในขั้นตอนการเตรียมองค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบสำหรับงานวิจัยนี้ใช้พลาสติก ABS เป็นเฟสเนื้อพื้นและ  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยาประเภทไฮเลน APTES เป็นเฟสเสริมแรง ทำการผสมองค์ประกอบเข้าด้วยกันด้วยเครื่อง Internal mixer อุณหภูมิที่ใช้ผสมองค์ประกอบเข้าด้วยกันอยู่ที่ 180 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่อง Compression molding เพื่อใช้ทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียตามมาตรฐานการทดสอบ กำหนดพารามิเตอร์สำหรับสร้างชิ้นงานโดยให้ความร้อนก่อนอัดขึ้นรูปชิ้นงาน (Preheat) ที่ 2 นาที, เวลาในการอัด (Pressing) ที่ 3 นาที และเวลาหล่อเย็นชิ้นงาน (Cooling Time) ที่ 5 นาที ตามลำดับ

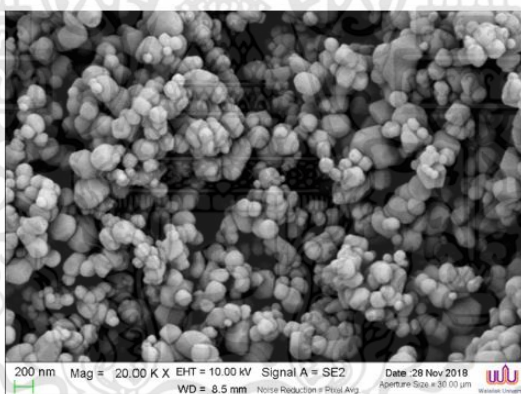
สำหรับหัวข้อการศึกษาในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ในหัวข้อแรกเป็นการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเฟสเสริมแรงของ  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES, โครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้นรวมทั้งวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของวัสดุที่ใช้เสริมแรงดังกล่าวที่เตรียมได้ ในหัวข้อที่สองเป็นการทดสอบสมบัติทางกลตามมาตรฐาน ASTM D638 ที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติและหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของปัจจัยกับค่าการทดสอบสมบัติทางกลด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมหรือปัจจัยของวัสดุเชิงประกอบกับผลตอบสนองเพื่อนำไปสู่การหาสภาวะของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าการทดสอบสมบัติทางกลมีค่าที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งทำการยืนยันผลการทดสอบอีกครั้งที่ได้จากการวิเคราะห์และหัวข้อสุดท้ายเป็นการศึกษาสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) ตามมาตรฐาน JIS Z 2801:2010

#### 4.1 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วย SEM

นำตัวอย่าง  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ไปตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) หรือ FE - SEM พิจารณาจากรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาของ  $\text{TiO}_2$  ที่กำลังขยาย 20000 เท่า



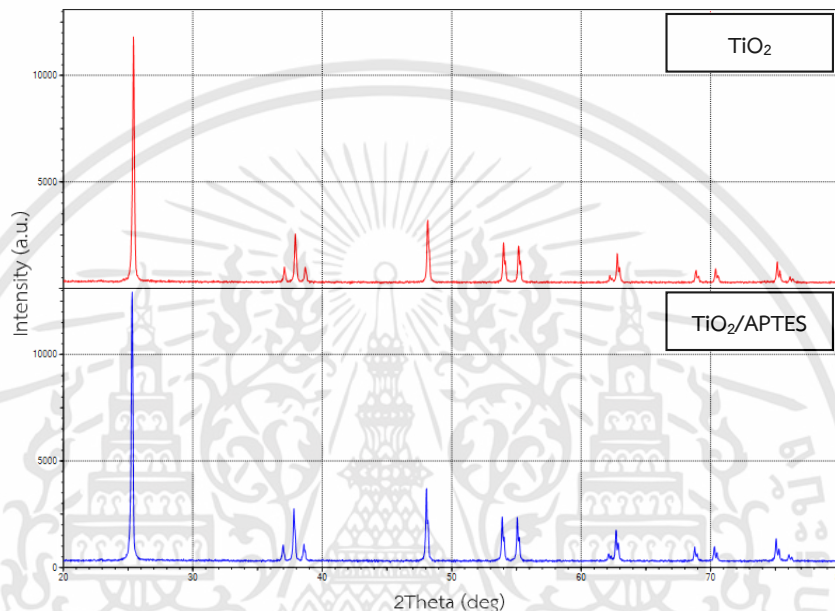
รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของ  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ที่กำลังขยาย 20000 เท่า

ผลการวิเคราะห์พบว่า ลักษณะสัณฐานวิทยา  $\text{TiO}_2$  ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES มีลักษณะรูปร่างที่ค่อนข้างกลมมีการกระจายตัวและยึดเกาะกันค่อนข้างหนาแน่นรวมทั้งลักษณะอนุภาคเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนเนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้  $\text{TiO}_2$  ชนิดเกรดอุตสาหกรรมหรือเกรดทั่วไป สำหรับลักษณะสัณฐานวิทยา  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES และพิจารณาสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.2 พบว่า ลักษณะอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ค่อนข้างกลมและมีเกิดการยึดเกาะที่หนาแน่นเพิ่มขึ้น มีลักษณะยึดเกาะกันค่อนข้างหนาและเกิดการจับตัวเป็นก้อนที่ลดลงจากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสด้วย XRD

นำ  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer หรือ XRD เปรียบเทียบโครงสร้างเฟสของ  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES แสดงดังรูปที่ 4.3

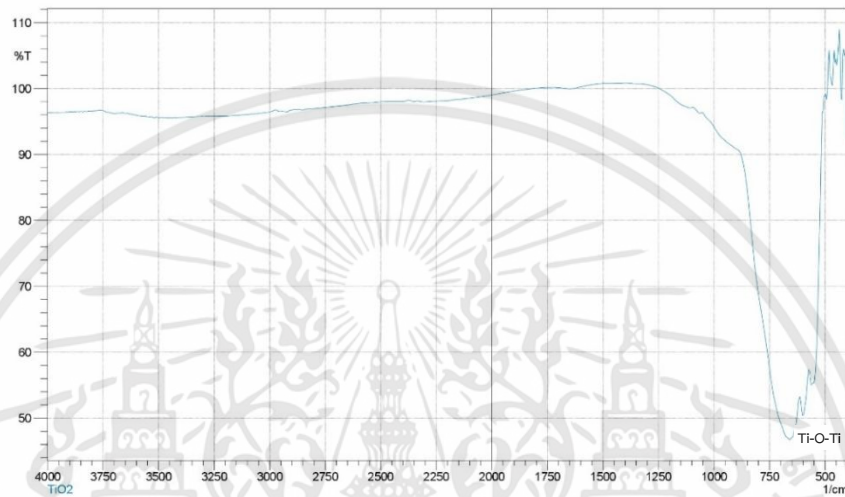


รูปที่ 4.3 XRD pattern ของ  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES

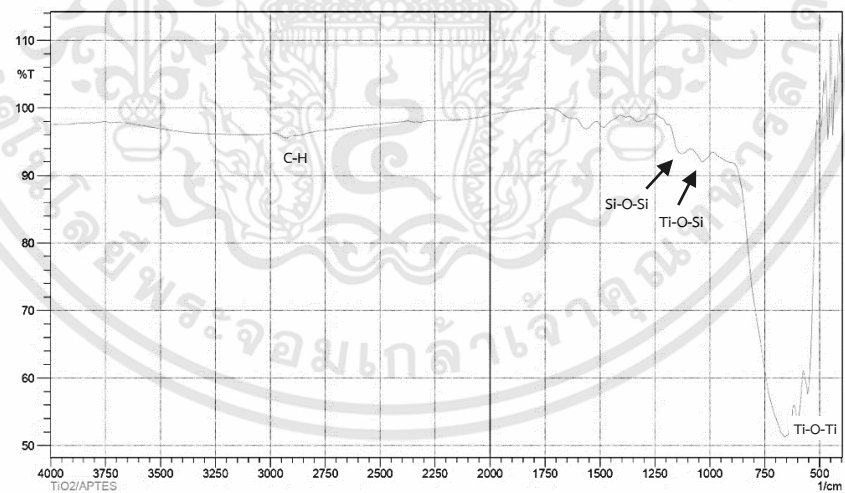
ผลการวิเคราะห์พบพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES เกิดเฟสอะนาเทสที่มุม  $2\theta$  (2 $\theta$ ) เท่ากับ  $25.45^\circ$  และ  $25.35^\circ$  ตรงกับระนาบผลึก (101) สำหรับโครงสร้างเฟสของ  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ยังคงเป็นเฟสอะนาเทส (Anatase) เมื่อพิจารณาจากตำแหน่งพีคของกราฟทั้ง 2 กราฟตามแนวแกนที่  $2\theta$  (deg) มีความใกล้เคียงหรือสมมาตรกับโครงสร้างเฟส  $\text{TiO}_2$  ตั้งต้นที่นำมาใช้ ทั้งนี้จะเห็นว่า  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ไม่ได้ส่งผลต่อโครงสร้างเฟสตั้งต้นที่นำมาใช้

### 4.3 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR

เตรียม  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES และพลาสติก ABS ผสม  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีหรือ FTIR เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของวัสดุที่เตรียมได้ โดยแสดงข้อมูลเลขคลื่นหรือ Wavenumber ( $\text{cm}^{-1}$ ) และการยืดของพันธะในโมเลกุลในรูปที่ 4.4 - 4.6



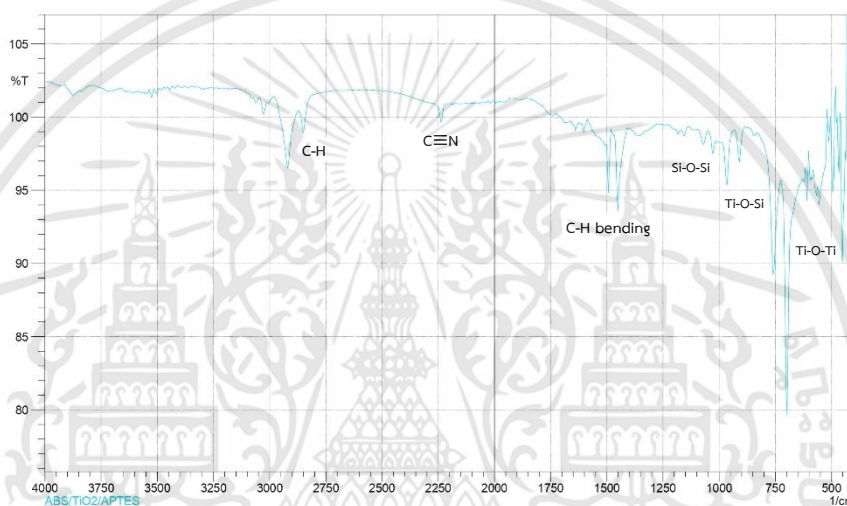
รูปที่ 4.4 FT-IR spectra ของ  $\text{TiO}_2$



รูปที่ 4.5 FT-IR spectra ของ  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของ  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ให้ผลการวิเคราะห์เหมือนกันคือ พบพีกแสดงการยืดพันธะที่เหมือนกันคือ Ti-O-Ti stretching ของหมู่  $\text{TiO}_2$  ภายในโมเลกุล ปรากฏ Wavenumber ที่ช่วง  $500 - 800 \text{ cm}^{-1}$  สำหรับหมู่ฟังก์ชันของ  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES พบพีกแสดงการยืดพันธะ Ti-O-Si stretching ของหมู่ Si-OH, พันธะ Si-O-Si stretching ของหมู่  $\text{SiO}_2$  และพันธะ C-H stretching ของหมู่  $\text{CH}_3$  แต่ไม่พบพีกแสดงการยืดพันธะ N-H bending ของหมู่ Amino group กับ O-H bending ของหมู่  $\text{H}_2\text{O}$  หรือถูกบดบังภายในโมเลกุล อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวและต้องนำสารเข้าเตาเผาเพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวให้เป็นของแข็งใช้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะของสารที่สูงเกินไป พีดดังกล่าวจึงไม่ปรากฏภายในโมเลกุล



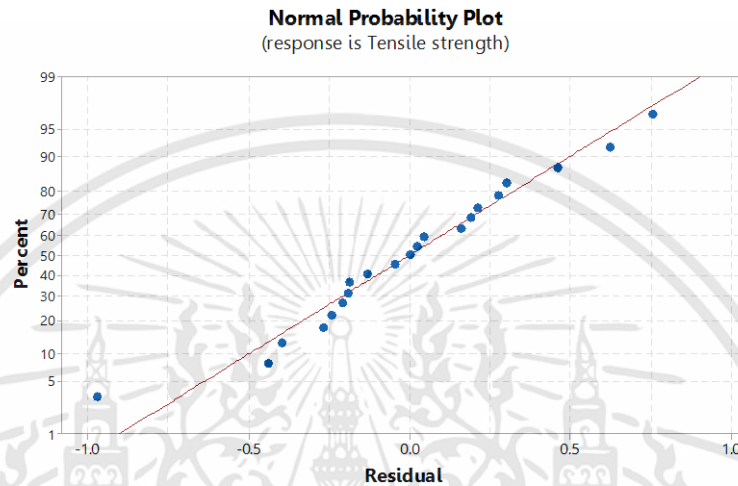
รูปที่ 4.6 FT-IR spectra ของพลาสติก ABS ผสม  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่พบของพลาสติก ABS ผสม  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES พบพีกแสดงการยืดพันธะ Ti-O-Ti stretching ของหมู่  $\text{TiO}_2$ , พันธะ Ti-O-Si stretching ของหมู่ Si-OH, พันธะ Si-O-Si stretching ของหมู่  $\text{SiO}_2$ , พันธะ C-H stretching ของหมู่  $\text{CH}_3$ , พันธะ C-H bending ของหมู่  $\text{C}_2\text{H}_5$  และพันธะ  $\text{C}\equiv\text{N}$  stretching ของหมู่ nitrile ภายในโมเลกุล และไม่พบพีกแสดงการยืดพันธะ N-H bending ของหมู่ Amino group กับ O-H bending ของหมู่  $\text{H}_2\text{O}$  เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ของ  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES

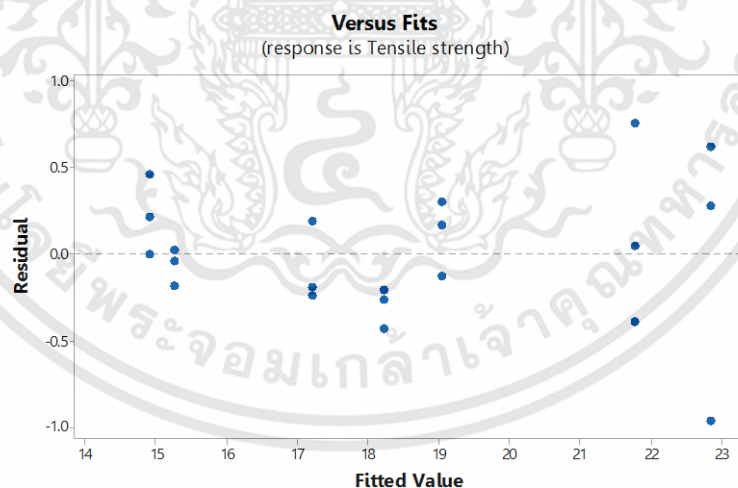
#### 4.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงหรือผลตอบสนอง $\hat{Y}_1$

##### 4.4.1 ตรวจสอบความเหมาะสมและวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแบบจำลอง

ผลตรวจสอบค่าความผิดพลาดของตัวแบบจำลองจาก Residual plot ค่าการทดสอบความแข็งแรงดึง แสดงดังรูปที่ 4.7 – 4.9

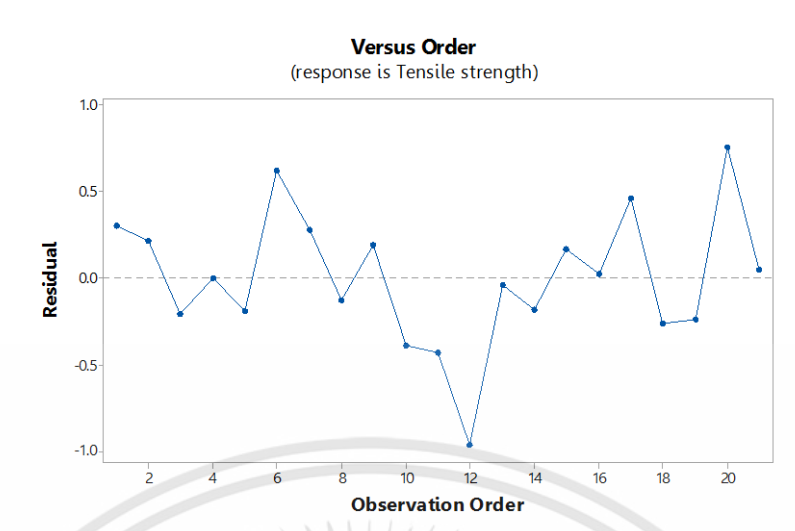


รูปที่ 4.7 Normal probability plot ของผลทดสอบความแข็งแรงดึง



รูปที่ 4.8 Versus fits ของผลทดสอบความแข็งแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 Versus order ของผลทดสอบความแข็งแรงดึง

พิจารณา Residual plot ของผลทดสอบความแข็งแรงดึง จากรูปที่ 4.7 Normal probability plot เป็นการตรวจสอบความปกติของข้อมูล (Normal distribution) พบว่า ผลการทดลองทุกการทดลองกระจายตัวเข้าใกล้เส้น Regression จากรูปที่ 4.8 Versus fits เป็นการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน ไม่พบลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่ค่อยๆ ลดลงหรือเพิ่มขึ้น จึงสรุปว่า ค่าความผิดพลาดของข้อมูลมีความแปรปรวนคงที่และจากรูปที่ 4.9 Versus Order เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าความผิดพลาดของข้อมูล ไม่พบมีรูปแบบของค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น จึงสรุปว่า Residual ของผลทดสอบความแข็งแรงดึงนี้มีความเป็นอิสระต่อกัน กล่าวโดยสรุปคือ ไม่พบความผิดปกติของข้อมูลสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้วิเคราะห์ได้

เมื่อทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองด้วย Residual plot จากนั้น จะทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมของรูปแบบจำลองทางสถิติของผลตอบสนองความแข็งแรงดึงหรือ  $Y_1$  ในตัวแบบจำลองสมการถดถอย Special Quartic Regression Model โดยสมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบสำหรับรูปแบบจำลองมีดังนี้

สมมติฐานสมการถดถอย Special Quartic Regression Model

$$H_0 : \beta_i \beta_j \beta_{ij} \beta_i^2 \beta_j^2, \beta_i^2 \beta_j^2 = 0$$

$$H_1 : \beta_i \beta_j \beta_{ij} \beta_i^2 \beta_j^2, \beta_i^2 \beta_j^2 \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

โดยที่  $i$  คือ ปัจจัย A,B และ C

การทดสอบค่า Lack-of-Fit ของตัวแบบจำลองเป็นการตรวจสอบและยืนยันว่าตัวแบบจำลองที่ทำการทดสอบนี้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยสมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบสำหรับตัวแบบจำลองมีดังนี้

$H_0$  : ตัวแบบจำลองเหมาะสมกับข้อมูล

$H_1$  : ตัวแบบจำลองไม่เหมาะสมกับข้อมูล

ตารางที่ 4.1 ผลทางสถิติตัวแบบจำลองของผลทดสอบความแข็งแรงดึง

Source	Std. Dev.	R-Square	Adjusted R-Square	Predicted R-Square
Special Quartic	0.43	0.9822	0.9777	0.9671

จากตารางที่ 4.1 ผลทางสถิติของตัวแบบจำลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจทำนาย (Predicted  $R^2$ ) ของผลการทดสอบความแข็งแรงดึงมีค่าสูงและให้ค่าที่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวแบบจำลองนี้เป็นตัวแบบจำลองที่เหมาะสม สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ (Adjusted  $R^2$ ) มีค่าสูงเช่นกันแสดงว่าตัวแบบจำลองสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ทำการศึกษากับผลตอบสนองความแข็งแรงดึงได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของผลทดสอบความแข็งแรงดึง

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Regression	4	164.66	41.17	220.65	<0.001
Linear	2	153.00	17.05	91.40	<0.001
Special Cubic	2	11.66	5.83	31.26	<0.001
ABS*ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES	1	6.44	1.49	8.00	0.012
ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES*APTES	1	5.22	5.22	28.00	<0.001
Residual Error	16	2.99	0.19		
Lack-of-Fit	2	0.55	0.28	1.58	0.240
Pure Error	14	2.43	0.18		
Total	20	167.65			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนตัวแบบจำลองด้วย Analysis of variance (ANOVA) แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า รูปแบบทางสถิติของผลตอบสนองความแข็งแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบมีความเหมาะสมในตัวแบบจำลอง โดยพิจารณาจากค่า p-value ของตัวแบบจำลองที่ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) 0.05 ค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ  $H_0$  หรือสมมติฐานหลัก แสดงว่า ปัจจัย A (พลาสติก ABS), ปัจจัย B (TiO<sub>2</sub>) และปัจจัย C (สารคู่ควบปฏิกิริยา APTES) มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองความแข็งแรงดึงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ผลการวิเคราะห์ค่า p-value ของ Lack-of-Fit พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) 0.05 ค่า p-value มีค่ามากกว่า 0.05 จึงไม่ปฏิเสธ  $H_0$  หรือสมมติฐานหลักแสดงว่ามีตัวแปรหรือปัจจัยอย่างน้อยหนึ่งตัวมีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองและตัวแบบจำลองนี้ที่ประมาณได้มีประโยชน์ต่อการทำนายผลตอบสนองความแข็งแรงดึง

#### 4.4.2 รูปแบบสมการการถดถอยของผลตอบสนองความแข็งแรงดึง ( $\hat{Y}_1$ )

ผลวิเคราะห์การหารูปแบบสมการการถดถอยของผลตอบสนองความแข็งแรงดึง สำหรับตัวแบบจำลองกำลังสองแบบพิเศษของวัสดุเชิงประกอบนี้ ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมปัจจัยทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของผลตอบสนองความแข็งแรงดึง ( $\hat{Y}_1$ )

Term	Coefficient estimate
A : ABS	0.006
B : TiO <sub>2</sub>	0.508
C : APTES	1.241
A*A*B*C : ABS*ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES	4.816*10 <sup>5</sup>
A*B*C*C : ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES*APTES	-0.057

นำค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมปัจจัยต่างๆ จากตารางที่ 4.3 มาเขียนเป็นสมการถดถอยเพื่อทำนายค่าผลตอบสนองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงหรือ  $\hat{Y}_1$  กับปัจจัย A, B, C และเทอมของปัจจัยรวมทั้งหมด แสดงดังสมการที่ 4.1

$$\hat{Y}_1 = 0.006A + 0.508B + 1.241C + 4.816(10^5)AABC - 0.057ABCC \quad (4.1)$$

โดยที่

A = พลาสติกชนิด ABS

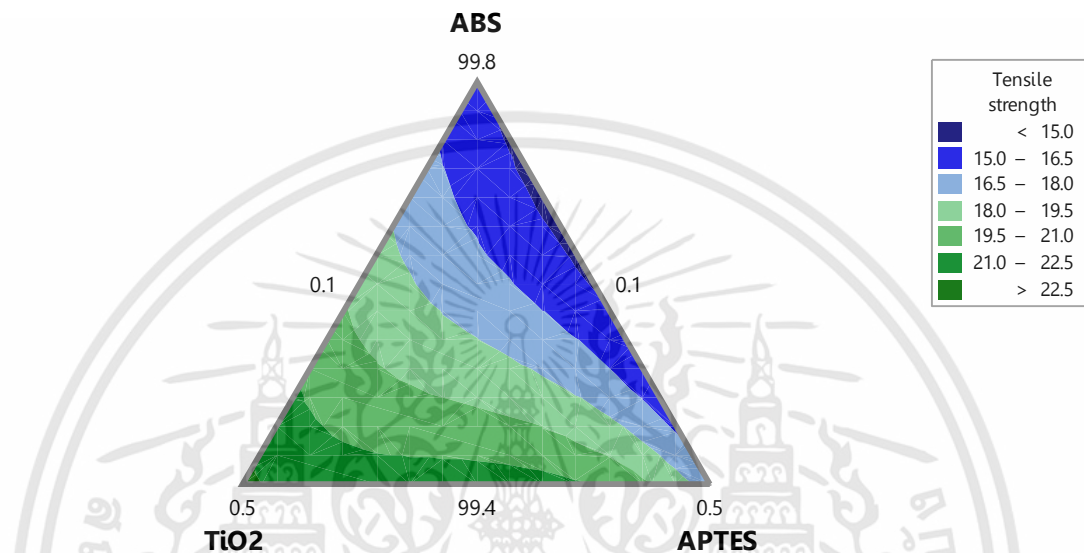
B = TiO<sub>2</sub>

C = สารคู่ควบปฏิกิริยา APTES

#### 4.4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

นำสมการ Mixture regression ของผลตอบสนองความแข็งแรงดึงหรือ  $F_1$  ที่ได้มาใช้ ในการทำ Mixture contour plot แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.10

**Mixture Contour Plot of Tensile strength**  
(component amounts)



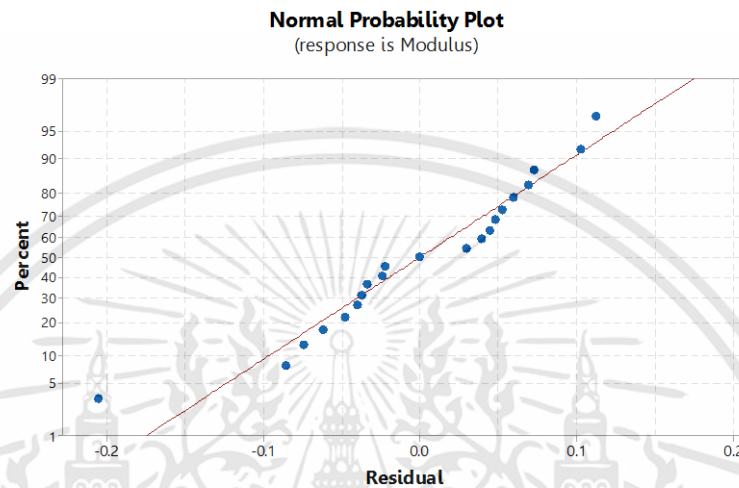
รูปที่ 4.10 Mixture contour plot ของผลทดสอบความแข็งแรงดึง

พิจารณาจาก Contour Plot ของพื้นที่ผิวตอบสนองจะเห็นว่ามีส่วนที่สีเขียวแก่ซึ่งบ่งบอกสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของสมบัติทางกลให้ค่าการทดสอบที่มากกว่า 22.5 MPa จากนั้นจะวิเคราะห์ Response Optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เพื่อหาระดับสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยได้แก่ ปัจจัย A: พลาสติก ABS, ปัจจัย B: TiO<sub>2</sub> และปัจจัย C: สารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ที่ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงมากกว่า 22.5 MPa

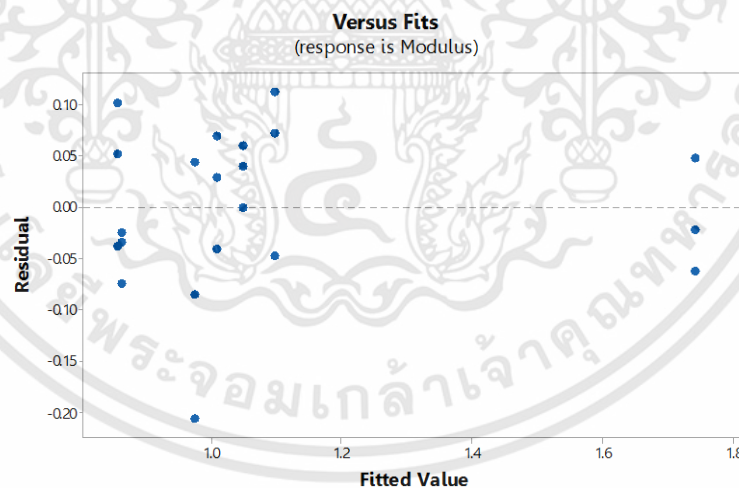
## 4.5 ผลการทดสอบมอดูลัสแรงดึงหรือผลตอบสนอง $\bar{Y}_2$

### 4.5.1 ตรวจสอบความเหมาะสมและวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแบบจำลอง

ผลตรวจสอบค่าความผิดพลาดของตัวแบบจำลองจาก Residual plot ค่าการทดสอบมอดูลัสแรงดึง แสดงดังรูปที่ 4.11 – 4.13

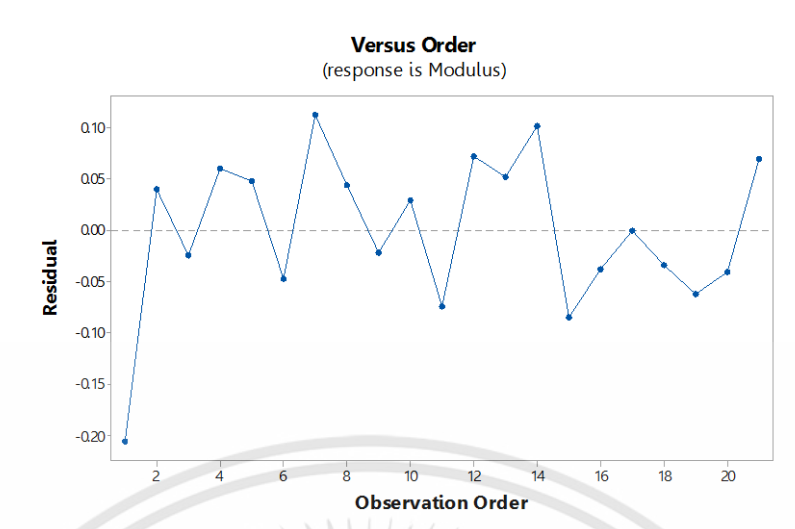


รูปที่ 4.11 Normal probability plot ของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง



รูปที่ 4.12 Versus fits ของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 Versus order ของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง

พิจารณา Residual plot ของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง จากรูปที่ 4.11 Normal probability plot เป็นการตรวจสอบความปกติของข้อมูล (Normal distribution) พบว่า ผลการทดลองทุกการทดลองกระจายตัวเข้าใกล้เส้น Regression จากรูปที่ 4.12 Versus fits เป็นการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน ไม่พบลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่ค่อยๆ ลดลงหรือเพิ่มขึ้น จึงสรุปว่า ค่าความผิดพลาดของข้อมูลมีความแปรปรวนคงที่และจากรูปที่ 4.13 Versus Order เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าความผิดพลาดของข้อมูล ไม่พบมีรูปแบบของค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น จึงสรุปว่า Residual ของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึงนี้มีความเป็นอิสระต่อกัน กล่าวโดยสรุปคือ ไม่พบความผิดปกติของข้อมูลสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้วิเคราะห์ได้

เมื่อทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองด้วย Residual plot จากนั้น จะทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมของรูปแบบจำลองทางสถิติของผลตอบสนองมอดูลัสแรงดึงหรือ  $Y_2$  ในตัวแบบจำลองสมการถดถอย Special Quartic Regression Model โดยสมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบสำหรับรูปแบบจำลองมีดังนี้

สมมติฐานสมการถดถอย Special Quartic Regression Model

$$H_0 : \beta_i \beta_j \beta_{ij} \beta_i^2 \beta_j^2, \beta_i^2 \beta_j^2 = 0$$

$$H_1 : \beta_i \beta_j \beta_{ij} \beta_i^2 \beta_j^2, \beta_i^2 \beta_j^2 \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

โดยที่  $i$  คือ ปัจจัย A,B และ C

การทดสอบค่า Lack-of-Fit ของตัวแบบจำลองเป็นการตรวจสอบและยืนยันว่าตัวแบบจำลองที่ทำการทดสอบนี้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยสมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบสำหรับตัวแบบจำลองมีดังนี้

$H_0$  : ตัวแบบจำลองเหมาะสมกับข้อมูล

$H_1$  : ตัวแบบจำลองไม่เหมาะสมกับข้อมูล

ตารางที่ 4.4 ผลทางสถิติตัวแบบจำลองของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง

Source	Std. Dev.	R-Square	Adjusted R-Square	Predicted R-Square
Special Quartic	0.08	0.9362	0.9202	0.8982

จากตารางที่ 4.4 ผลทางสถิติของแบบจำลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจทำนาย (Predicted  $R^2$ ) ของผลการทดสอบความแข็งแรงดึงมีค่าสูงและให้ค่าที่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวแบบจำลองนี้เป็นตัวแบบจำลองที่เหมาะสม สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ (Adjusted  $R^2$ ) มีค่าสูงเช่นกันแสดงว่าตัวแบบจำลองสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ทำการศึกษากับผลตอบสนองมอดูลัสแรงดึงได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 4.5 ผลวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Regression	4	1.65	0.41	58.67	<0.001
Linear	2	1.06	0.37	52.87	<0.001
Special Cubic	2	0.59	0.30	42.02	<0.001
ABS*ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES	1	0.41	0.39	56.03	<0.001
ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES*APTES	1	0.18	0.18	25.87	<0.001
Residual Error	16	0.11	0.01		
Lack-of-Fit	2	0.42	0.02	4.13	0.390
Pure Error	14	0.07	0.01		
Total	20	1.77			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนตัวแบบจำลองด้วย Analysis of variance (ANOVA) แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่า รูปแบบทางสถิติของผลตอบสนองมอดูลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบมีความเหมาะสมในตัวแบบจำลอง โดยพิจารณาจากค่า p-value ของตัวแบบจำลองที่ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) 0.05 ค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ  $H_0$  หรือสมมติฐานหลัก แสดงว่า ปัจจัย A (พลาสติก ABS), ปัจจัย B (TiO<sub>2</sub>) และปัจจัย C (สารคู่ควบปฏิกิริยา APTES) มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองมอดูลัสดึงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ค่า p-value ของ Lack-of-Fit พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) 0.05 ค่า p-value มีค่ามากกว่า 0.05 จึงไม่ปฏิเสธ  $H_0$  หรือสมมติฐานหลักแสดงว่ามีตัวแปรหรือปัจจัยอย่างน้อยหนึ่งตัวมีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองและตัวแบบจำลองนี้ที่ประมาณได้มีประโยชน์ต่อการทำนายผลตอบสนองมอดูลัสแรงดึง

#### 4.5.2 รูปแบบสมการการถดถอยของผลตอบสนองมอดูลัสแรงดึง ( $\hat{Y}_2$ )

ผลวิเคราะห์การหารูปแบบสมการการถดถอยของผลตอบสนองมอดูลัสแรงดึงสำหรับตัวแบบจำลองกำลังสองแบบพิเศษของวัสดุเชิงประกอบนี้ ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมปัจจัยทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของผลตอบสนองมอดูลัสแรงดึง ( $\hat{Y}_2$ )

Term	Coefficient estimate
A : ABS	0.007
B : TiO <sub>2</sub>	2.866
C : APTES	1.375
A*A*B*C : ABS*ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES	-0.003
A*B*C*C : ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES*APTES	0.624

นำค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมปัจจัยต่างๆ จากตารางที่ 4.6 มาเขียนเป็นสมการถดถอยเพื่อทำนายค่าผลตอบสนองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสแรงดึงหรือ  $\hat{Y}_2$  กับปัจจัย A, B, C และเทอมของปัจจัยร่วมทั้งหมด แสดงดังสมการที่ 4.2

$$\hat{Y}_2 = 0.007A + 2.866B + 1.375C - 0.003AABC + 0.624ABCC \quad (4.2)$$

โดยที่

A = พลาสติกชนิด ABS

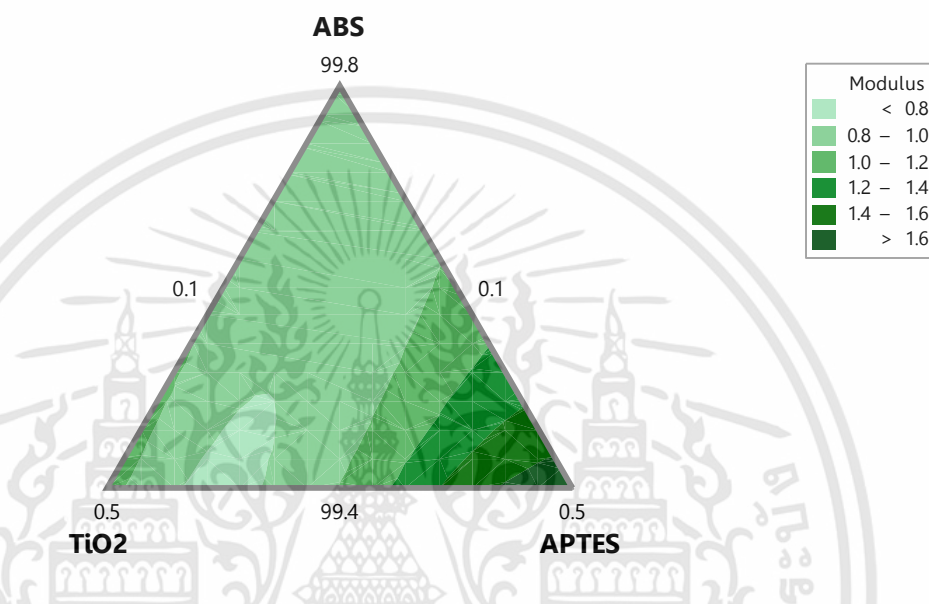
B = TiO<sub>2</sub>

C = สารคู่ควบปฏิกิริยา APTES

### 4.5.3 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

นำสมการ Mixture regression ของผลตอบสนองมอดูลัสแรงดึงหรือ  $Y_2$  มาใช้ในการหา Mixture contour plot แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.14

**Mixture Contour Plot of Modulus**  
(component amounts)



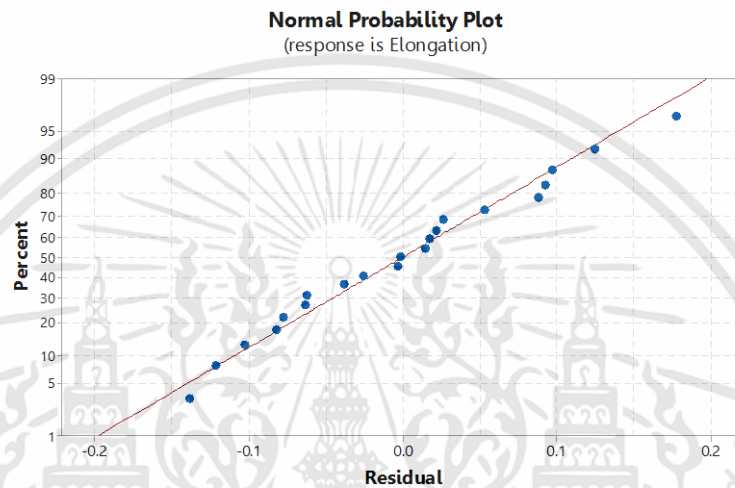
รูปที่ 4.14 Mixture contour plot ของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง

พิจารณาจาก Contour Plot ของพื้นที่ผิวตอบสนองจะเห็นว่ามีส่วนที่สีเขียวแก่ซึ่งบอกระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ค่ามอดูลัสแรงดึงของสมบัติทางกลให้ค่าการทดสอบที่มากกว่า 1.6 GPa จากนั้นจะวิเคราะห์ Response Optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยได้แก่ ปัจจัย A: พลาสติก ABS, ปัจจัย B: TiO<sub>2</sub> และปัจจัย C: สารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ที่ทำให้ได้ค่ามอดูลัสแรงดึงมากกว่า 1.6 GPa

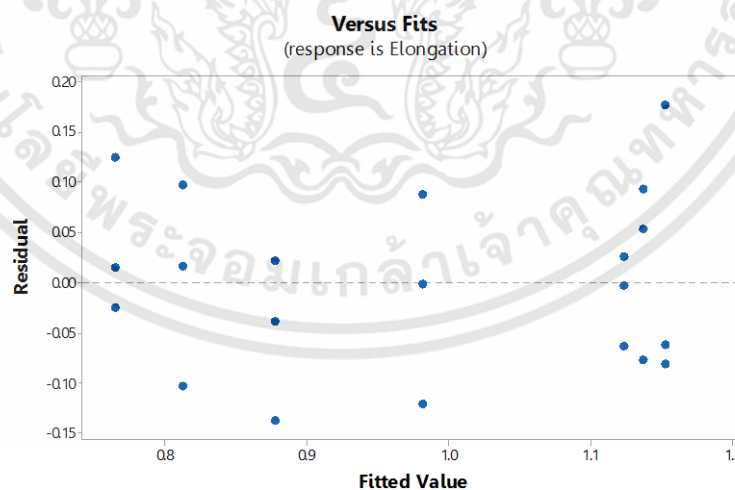
## 4.6 การทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาดหรือผลตอบสนอง $\bar{Y}_3$

### 4.6.1 ตรวจสอบความเหมาะสมและวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแบบจำลอง

ผลตรวจสอบค่าความผิดพลาดของตัวแบบจำลองจาก Residual Plot การทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด แสดงดังรูปที่ 4.15 – 4.17

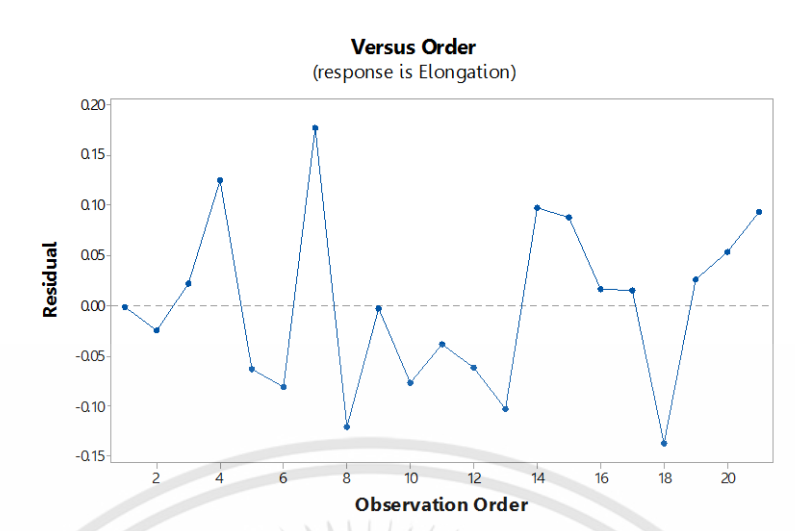


รูปที่ 4.15 Normal probability plot ของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด



รูปที่ 4.16 Versus fits ของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 Versus order ของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด

พิจารณา Residual plot ของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด จากรูปที่ 4.15 Normal probability plot เป็นการตรวจสอบความปกติของข้อมูล (Normal distribution) พบว่า ผลการทดลองทุกการทดลองกระจายตัวเข้าใกล้เส้น Regression จากรูปที่ 4.16 Versus fits เป็นการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน ไม่พบลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่ค่อยๆ ลดลงหรือเพิ่มขึ้น จึงสรุปว่า ค่าความผิดพลาดของข้อมูลมีความแปรปรวนคงที่และจากรูปที่ 4.17 Versus Order เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าความผิดพลาดของข้อมูล ไม่พบมีรูปแบบของค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น จึงสรุปว่า Residual ของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาดนี้มีความเป็นอิสระต่อกัน กล่าวโดยสรุปคือ ไม่พบความผิดปกติของข้อมูลสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้วิเคราะห์ได้

เมื่อทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองด้วย Residual plot จากนั้น จะทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมของรูปแบบจำลองทางสถิติของผลตอบสนองระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาดหรือ  $Y_3$  ในตัวแบบจำลองสมการถดถอย Special Quartic Regression Model โดยสมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบสำหรับรูปแบบจำลองมีดังนี้

สมมติฐานสมการถดถอย Special Quartic Regression Model

$$H_0 : \beta_i \beta_j \beta_{ij} \beta_i^2 \beta_j^2, \beta_i^2 \beta_j^2 = 0$$

$$H_1 : \beta_i \beta_j \beta_{ij} \beta_i^2 \beta_j^2, \beta_i^2 \beta_j^2 \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

โดยที่  $i$  คือ ปัจจัย A,B และ C

การทดสอบค่า Lack-of-Fit ของตัวแบบจำลองเป็นการตรวจสอบและยืนยันว่าตัวแบบจำลองที่ทำการทดสอบนี้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยสมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบสำหรับตัวแบบจำลองมีดังนี้

$H_0$  : ตัวแบบจำลองเหมาะสมกับข้อมูล

$H_1$  : ตัวแบบจำลองไม่เหมาะสมกับข้อมูล

ตารางที่ 4.7 ผลทางสถิติตัวแบบจำลองของผลทดสอบระยะยึดตัวสูงสุดที่จุดขาด

Source	Std. Dev.	R-Square	Adjusted R-Square	Predicted R-Square
Special Quartic	0.10	0.7676	0.7095	0.5974

จากตารางที่ 4.7 ผลทางสถิติของแบบจำลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจทำนาย (Predicted  $R^2$ ) ของผลการทดสอบระยะยึดตัวสูงสุดที่จุดขาดมีค่าสูงและให้ค่าที่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวแบบจำลองนี้เป็นตัวแบบจำลองที่เหมาะสม สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ (Adjusted  $R^2$ ) มีค่าสูงเช่นกันแสดงว่าตัวแบบจำลองสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ทำการศึกษากับผลตอบสนองระยะยึดตัวสูงสุดที่จุดขาดได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 4.8 ผลวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของผลทดสอบระยะยึดตัวสูงสุดที่จุดขาด

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Regression	4	0.48	0.12	13.21	<0.001
Linear	2	0.36	0.13	14.36	<0.001
Special Cubic	2	0.12	0.07	6.74	0.008
ABS*ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES	1	0.00	0.11	12.15	0.003
ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES*APTES	1	0.12	0.12	13.44	0.002
Residual Error	16	0.15	0.01		
Lack-of-Fit	2	0.02	0.01	0.82	0.459
Pure Error	14	0.13	0.01		
Total	20	0.62			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนตัวแบบจำลองด้วย Analysis of variance (ANOVA) แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่า รูปแบบทางสถิติของผลตอบสนองระยะยึดตัวสูงสุดที่จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบมีความเหมาะสมในตัวแบบจำลอง โดยพิจารณาจากค่า p-value ของตัวแบบจำลองที่ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) 0.05 ค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ  $H_0$  หรือสมมติฐานหลัก แสดงว่าปัจจัย A (พลาสติก ABS), ปัจจัย B (TiO<sub>2</sub>) และปัจจัย C (สารคู่ควบปฏิกิริยา APTES) มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองระยะยึดตัวสูงสุดที่จุดขาดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ผลการวิเคราะห์ค่า p-value ของ Lack-of-Fit พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) 0.05 ค่า p-value มีค่ามากกว่า 0.05 จึงไม่ปฏิเสธ  $H_0$  หรือสมมติฐานหลักแสดงว่ามีตัวแปรหรือปัจจัยอย่างน้อยหนึ่งตัวมีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองและตัวแบบจำลองนี้ที่ประมาณได้มีประโยชน์ต่อการทำนายผลตอบสนองระยะยึดตัวสูงสุดที่จุดขาด

#### 4.6.2 รูปแบบสมการการถดถอยของผลตอบสนองระยะยึดตัวสูงสุดที่จุดขาด ( $\hat{Y}_3$ )

ผลวิเคราะห์การหารูปแบบสมการการถดถอยของผลตอบสนองระยะยึดตัวสูงสุดที่จุดขาดสำหรับตัวแบบจำลองกำลังสองแบบพิเศษของวัสดุเชิงประกอบนี้ ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมปัจจัยทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของผลตอบสนองระยะยึดตัวสูงสุดที่จุดขาด ( $\hat{Y}_3$ )

Term	Coefficient estimate
A : ABS	0.008
B : TiO <sub>2</sub>	1.868
C : APTES	-0.737
A*A*B*C : ABS*ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES	-0.002
A*B*C*C : ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES*APTES	0.510

นำค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมปัจจัยต่างๆ จากตารางที่ 4.9 มาเขียนเป็นสมการถดถอยเพื่อทำนายค่าผลตอบสนองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยึดตัวสูงสุดที่จุดขาดหรือ  $\hat{Y}_3$  กับปัจจัย A, B, C และเทอมของปัจจัยร่วมทั้งหมด แสดงดังสมการที่ 4.3

$$\hat{Y}_3 = 0.008A + 1.868B - 0.737C - 0.002AABC + 0.510ABCC \quad (4.3)$$

โดยที่

A = พลาสติกชนิด ABS

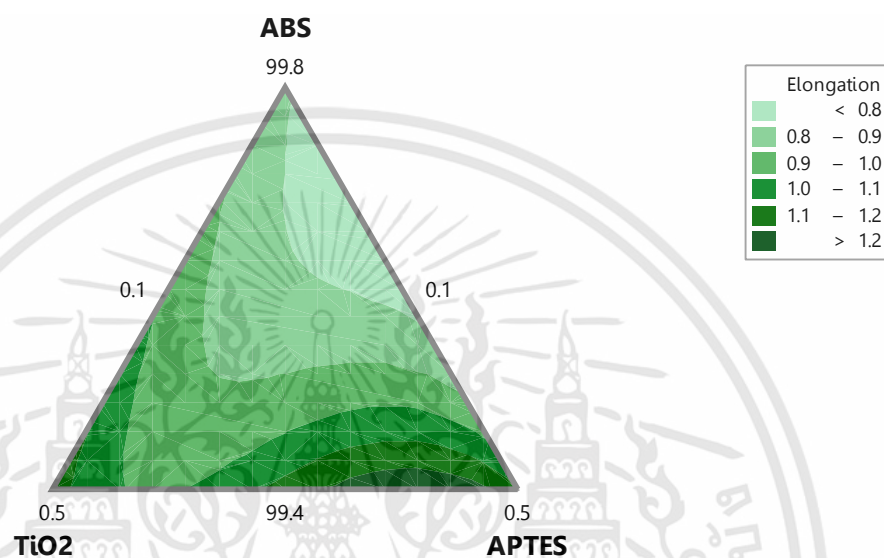
B = TiO<sub>2</sub>

C = สารคู่ควบปฏิกิริยา APTES

#### 4.4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

นำสมการ Mixture regression ของผลตอบสนองระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาดหรือ  $Y_3$  มาใช้ในการหา Mixture contour plot แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.18

**Mixture Contour Plot of Elongation**  
(component amounts)



รูปที่ 4.18 Mixture contour plot ของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด

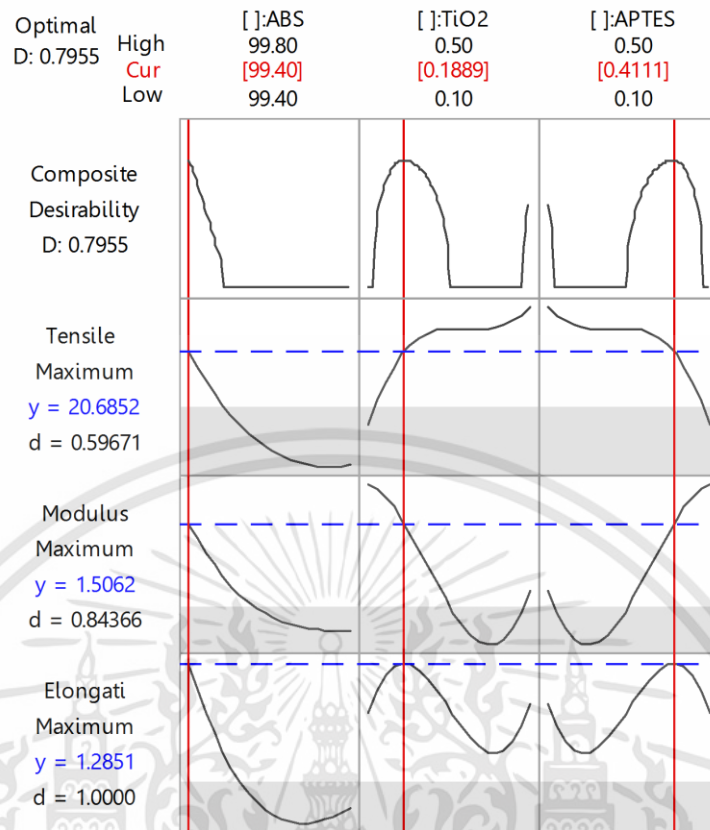
พิจารณาจาก Contour Plot ของพื้นที่ผิวตอบสนองจะเห็นว่ามีส่วนที่สีเขียวแก่ซึ่งบอกรัฐวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ค่าระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาดของสมบัติทางกลให้ค่าการทดสอบที่มากกว่า 1.2 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจะวิเคราะห์ Response Optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เพื่อหาระดับสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยได้แก่ ปัจจัย A: พลาสติก ABS, ปัจจัย B: TiO<sub>2</sub> และปัจจัย C: สารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ที่ทำให้ได้ค่าระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาดมากกว่า 1.2 เปอร์เซ็นต์

#### 4.7 การหาระดับอัตราส่วนที่เหมาะสมของการทดสอบแรงดึง

การหาระดับอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพลาสติก ABS เสริมแรงด้วย  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ทำการวิเคราะห์ด้วย Response optimizer โดยกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบสนอง  $Y_1$ ,  $Y_2$  และ  $Y_3$  (Goal) เป็นค่ามากที่สุด (Maximum) เนื่องจากต้องการให้ค่าการทดสอบแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบมีค่าสูงสุด สำหรับผลตอบสนองความแข็งแรงดึงจะพิจารณาค่าการทดสอบในช่วง 18-22.5 MPa, ผลตอบสนองมอดูลัสแรงดึงจะพิจารณาค่าการทดสอบในช่วง 1.0-1.6 GPa และผลตอบสนองระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาดจะพิจารณาค่าการทดสอบในช่วง 0.9-1.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ได้ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าการทดสอบแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 Response optimization ของการทดสอบแรงดึง

Response optimization						
Parameters	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Tensile	Maximum	18.0	22.5	22.5	1	1
Modulus	Maximum	1.0	1.6	1.6	1	1
Elongation	Maximum	0.9	1.2	1.2	1	1
Global Solution						
Components						
ABS	=	99.4				
$\text{TiO}_2$	=	0.19				
APTES	=	0.41				
Predicted Responses						
Tensile	=	20.69	, desirability	=	0.596711	
Modulus	=	1.51	, desirability	=	0.843662	
Elongation	=	1.29	, desirability	=	1.000000	
Composite Desirability = 0.795507						



รูปที่ 4.19 Optimization plot ของผลทดสอบแรงดึง

ผลการหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วย Response optimizer จากรูปที่ 4.19 แสดง Optimization plot ของผลทดสอบแรงดึงวัสดุเชิงประกอบพลาสติก ABS เสริมแรงด้วย TiO<sub>2</sub> ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES แสดงค่าระดับปัจจัยจากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab พบว่า ระดับอัตราส่วนผสมของปัจจัย ABS ที่ 99.4, ปัจจัย TiO<sub>2</sub> ที่ 0.19 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปัจจัยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ที่ 0.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระดับอัตราส่วนผสมดังกล่าวให้ค่าทำนายของผลตอบสนองความแข็งแรงดึง ( $\hat{Y}_1$ ) เท่ากับ 20.69 MPa, ค่าทำนายของผลตอบสนองมอดูลัสแรงดึง ( $\hat{Y}_2$ ) เท่ากับ 1.51 GPa และค่าทำนายของผลตอบสนองระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด ( $\hat{Y}_3$ ) เท่ากับ 1.29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีค่า Composite desirability หรือค่าความพึงพอใจโดยรวม (D) มีค่าเท่ากับ 0.8 ซึ่งแสดงว่า ผลตอบสนองการทดสอบแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบนี้ได้อยู่ในขอบเขตการยอมรับในระดับความพึงพอใจที่ยังไม่สมบูรณ์

#### 4.8 การยืนยันผลทดสอบ

เมื่อได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากวิธีการหาระดับอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมด้วย Response optimizer จำเป็นต้องทำการทดลองเพื่อยืนยันอีกครั้งซึ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของระดับอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบพลาสติก ABS เสริมแรงด้วย  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES มีสมบัติทางกลตรงตามที่ทำการวิเคราะห์ไว้หรือไม่ โดยทำการปรับแก้ค่าปัจจัยและทดสอบแรงดึงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 ทำการทดลองซ้ำต่อเนื่องไขการทดลองจำนวน 5 ครั้ง (5 Replicates) พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการทดลองจริงและผลการทดลองที่ได้จากค่าทำนายด้วยฟังก์ชัน Response optimizer เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าได้ค่าการทดสอบแรงดึง (Tensile Testing) มีความแตกต่างจากผลการวิเคราะห์ค่าทำนายจาก Optimization plot หรือไม่ โดยใช้วิธีการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test) ด้วยวิธี One-Sample T-test ในการตรวจสอบสำหรับค่าการทดสอบของผลตอบสนอง  $\bar{Y}_1$ ,  $\bar{Y}_2$  และ  $\bar{Y}_3$  แสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบแรงดึงที่สภาวะเหมาะสม

Run	Responses		
	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation at break (%)
1	23.29	1.50	1.16
2	21.91	1.53	1.10
3	23.03	1.47	1.35
4	19.23	1.39	1.26
5	21.20	1.44	1.21
$\bar{X}$	21.73	1.47	1.22

นำผลการทดสอบในตารางที่ 4.11 หาค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วย Summary report ในโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab จากนั้นทำการทดสอบสมมติฐานด้วยวิธี One-Sample T-test สำหรับสมมติฐานที่ใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยการทดสอบผลตอบสนองความแข็งแรงดึงแสดงดังต่อไปนี้

$$H_0 : \mu = 20.69$$

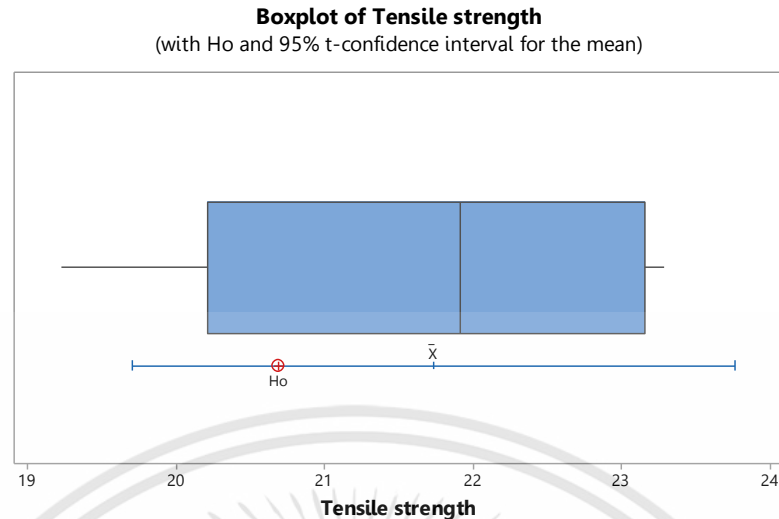
$$H_1 : \mu \neq 20.69$$

โดยที่  $\mu$  คือค่าเฉลี่ยการทดสอบความแข็งแรงดึง

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ One-Sample T-test ของผลทดสอบความแข็งแรงดึง

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Tensile strength	5	21.732	1.635	0.731	(19.702, 23.762)	1.43	0.227

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟ Box-plot ของผลทดสอบความแข็งแรงดึง

ผลวิเคราะห์ One-Sample T-test ในตารางที่ 4.12 จากการทดสอบสมมติฐาน เมื่อพิจารณาค่า p-value สรุปว่า ผลตอบสนอง  $Y_1$  คือความแข็งแรงดึง ให้ค่า p-value มากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงไม่ปฏิเสธ  $H_0$  หรือสมมติฐานหลัก สามารถสรุปได้ว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงและพิจารณาจากรูปที่ 4.20 กราฟ Box-plot จากการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง ให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าทำนายจากการวิเคราะห์ด้วย Response optimizer เท่ากับ 20.69 MPa

สมมติฐานที่ใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองมอดูลัสแรงดึงแสดงได้ดังต่อไปนี้

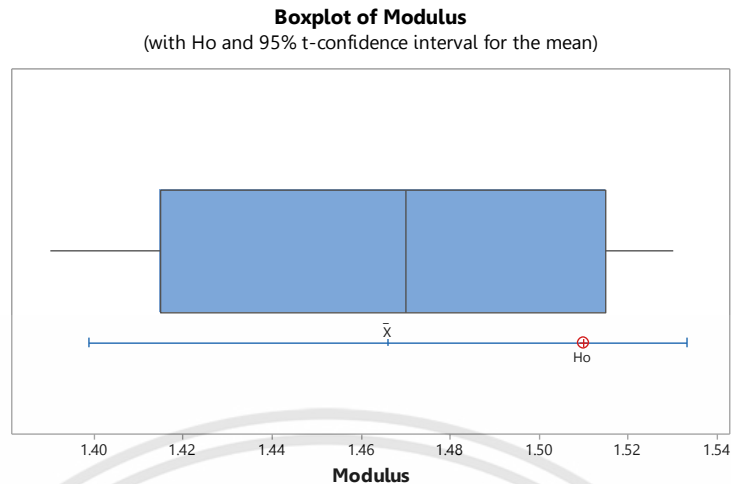
$$H_0 : \mu = 1.51$$

$$H_1 : \mu \neq 1.51$$

โดยที่  $\mu$  คือค่าเฉลี่ยการทดสอบมอดูลัสแรงดึง

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ One-Sample T-test ของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Young's modulus	5	1.466	0.0541	0.0242	(1.3988, 1.5322)	-1.82	0.143



รูปที่ 4.21 กราฟ Box-plot ของผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง

ผลวิเคราะห์ One-Sample T-test ในตารางที่ 4.13 จากการทดสอบสมมติฐาน เมื่อพิจารณาค่า p-value สรุปว่า ผลตอบสนอง  $Y_2$  คือมอดูลัสแรงดึง ให้ค่า p-value มากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงไม่ปฏิเสธ  $H_0$  หรือสมมติฐานหลัก สามารถสรุปได้ว่าไม่มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยมอดูลัสแรงดึงและพิจารณาจากรูปที่ 4.21 กราฟ Box-plot จากการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง ให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าทำนายจากการวิเคราะห์ด้วย Response optimizer เท่ากับ 1.51 GPa

สมมติฐานที่ใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด หรือ  $Y_3$  แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$H_0 : \mu = 1.29$$

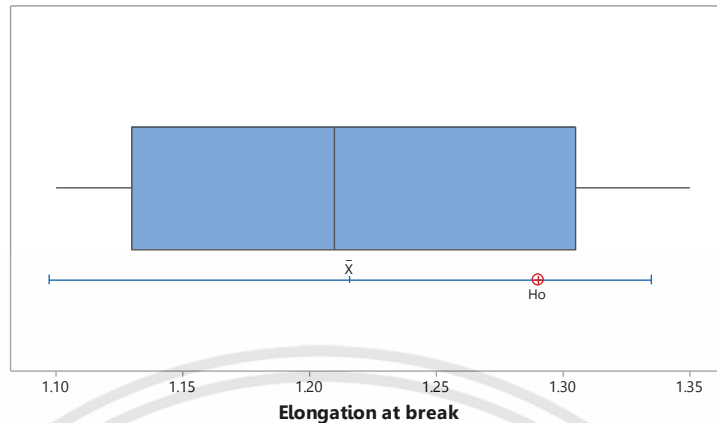
$$H_1 : \mu \neq 1.29$$

โดยที่  $\mu$  คือค่าเฉลี่ยการทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ One-Sample T-test ของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Elongation at break	5	1.216	0.0956	0.0427	(1.0974, 1.3346)	-1.73	0.158

**Boxplot of Elongation at break**  
(with  $H_0$  and 95% t-confidence interval for the mean)



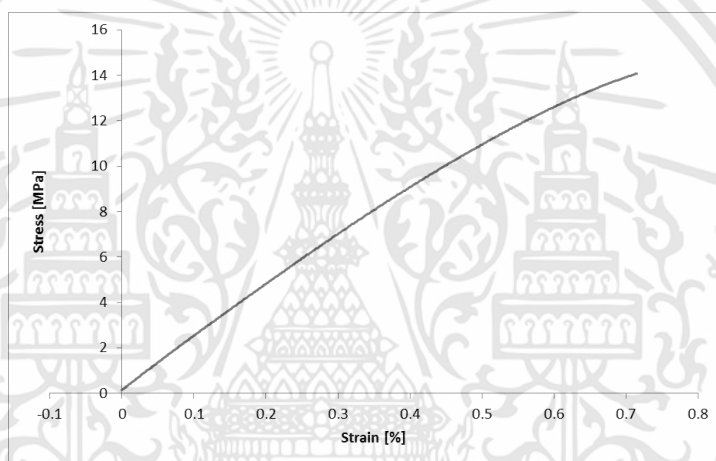
รูปที่ 4.22 กราฟ Box-plot ของผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด

ผลวิเคราะห์ One-Sample T-test ในตารางที่ 4.14 จากการทดสอบสมมติฐาน เมื่อพิจารณาค่า p-value สรุปว่า ผลตอบสนอง  $Y_3$  คือระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด ให้ค่า p-value มากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงไม่ปฏิเสธ  $H_0$  หรือสมมติฐานหลัก สามารถสรุปได้ว่าไม่มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาดและพิจารณาจากรูปที่ 4.22 กราฟ Box-plot จากการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง ให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าทำนายจากการวิเคราะห์ด้วย Response optimizer เท่ากับ 1.29 เปอร์เซนต์

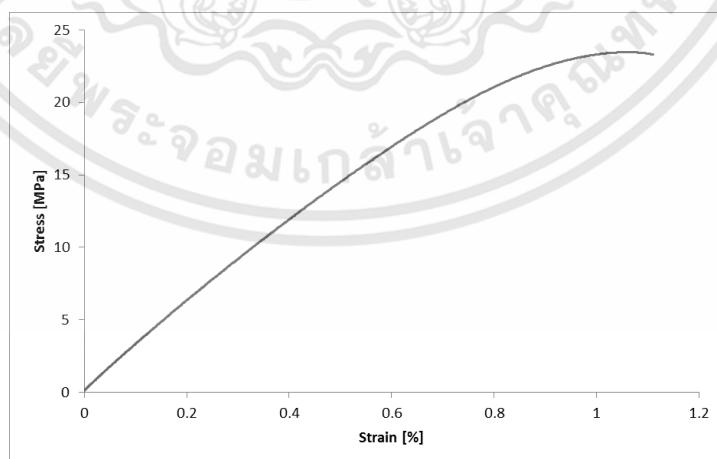
## 4.9 ผลทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบ

### 4.9.1 ผลทดสอบแรงดึง

ในการทดสอบสมบัติทางกลตามมาตรฐาน ASTM D638 ของพลาสติก ABS ที่ไม่ผ่านการผสมเฟสเสริมแรง แสดงดังรูปที่ 4.23 ให้ค่าการทดสอบความแข็งแรงดึงที่น้อยกว่า โดยวัดค่าการทดสอบได้เท่ากับ 14.12 MPa และเมื่อผสมเฟสเสริมแรง  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ลงในเฟสเนื้อพื้นพบว่า ให้ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงที่สูงขึ้นโดยวัดค่าการทดสอบได้เท่ากับ 23.29 MPa แสดงดังรูปที่ 4.24 ทั้งนี้เป็นผลจากการผสมเฟสเสริมแรง  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ในอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่ระดับอัตราส่วนพลาสติก ABS 99.4,  $\text{TiO}_2$  0.19 และสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES 0.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลทำให้สามารถเพิ่มสมบัติทางกลของพลาสติกชนิดนี้ได้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพลาสติก ABS



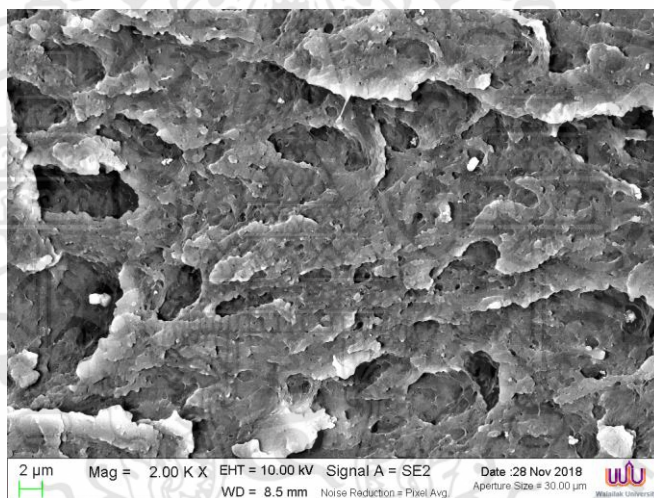
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วนผสม ABS 99.4 :  $\text{TiO}_2$  0.19 : APTES 0.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

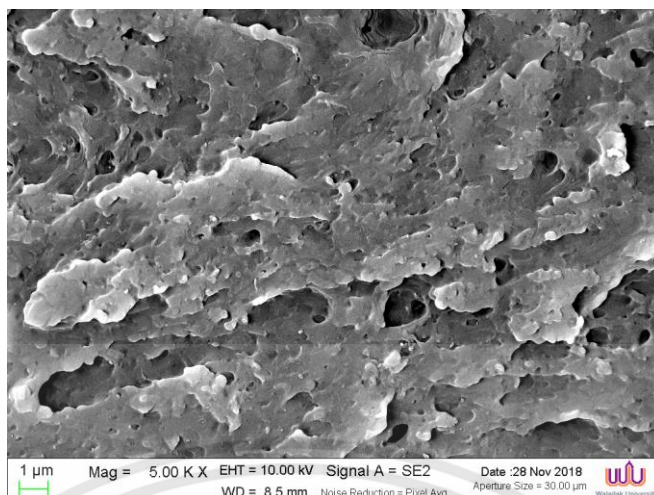
#### 4.9.2 ผลสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึงไปตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักที่ผ่านการทดสอบที่อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ด้วย Response optimizer ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 2000 และ 5000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.26

พบลักษณะของเฟสที่แสดงความต่อเนื่องระหว่างเฟสเนื้อกับพื้นเฟสเสริมแรงในลักษณะที่ชัดเจนเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเฟสกระจาย  $\text{TiO}_2$  ด้วย APTES โดยเฟสเสริมแรงถูกปกคลุมด้วยเฟสเนื้อพื้นเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่อพิจารณาจากรูปบริเวณรอยแตกหักของวัสดุพบลักษณะสัณฐาน  $\text{TiO}_2$  ที่ปรากฏในเฟสเนื้อพื้นเป็นลักษณะสีขาวจับตัวเป็นก้อนบางส่วน จึงเป็นไปได้ว่าการกระจายตัวของเฟสเสริมแรงเข้ากับเฟสเนื้อพื้นพลาสติก ABS เป็นเรื่องที่ยากและมีโอกาสเกิด de-bond ระหว่างเฟส [20] ด้วยเหตุนี้เฟสเสริมแรงจึงกระจายตัวในเนื้อพลาสติก ABS ได้ไม่ดีในระดับโมเลกุล อีกหนึ่งสาเหตุอาจมาจากในขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวใช้อุณหภูมิในการเตรียมสารที่สูงเกินไปจึงมีผลต่อหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญที่ทำหน้าที่สร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสเนื้อพื้นกับเฟสเสริมแรง ฟังก์ชันที่สำคัญจึงไม่ปรากฏในโมเลกุล



รูปที่ 4.25 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของวัสดุเชิงประกอบพลาสติก ABS เสริมแรงด้วย  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



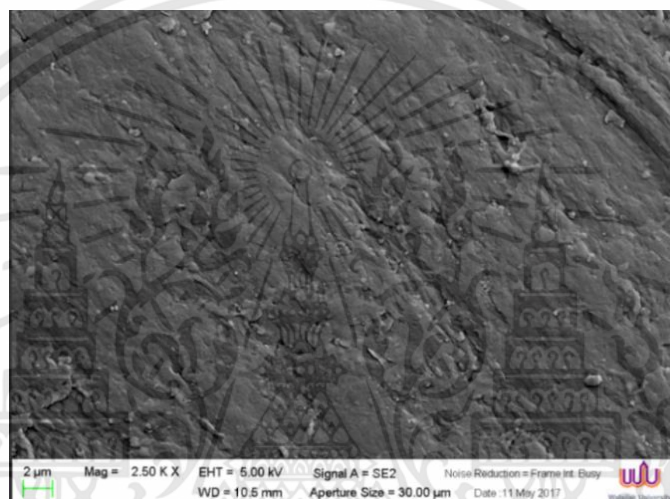
รูปที่ 4.26 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของวัสดุเชิงประกอบพลาสติก ABS เสริมแรงด้วย  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

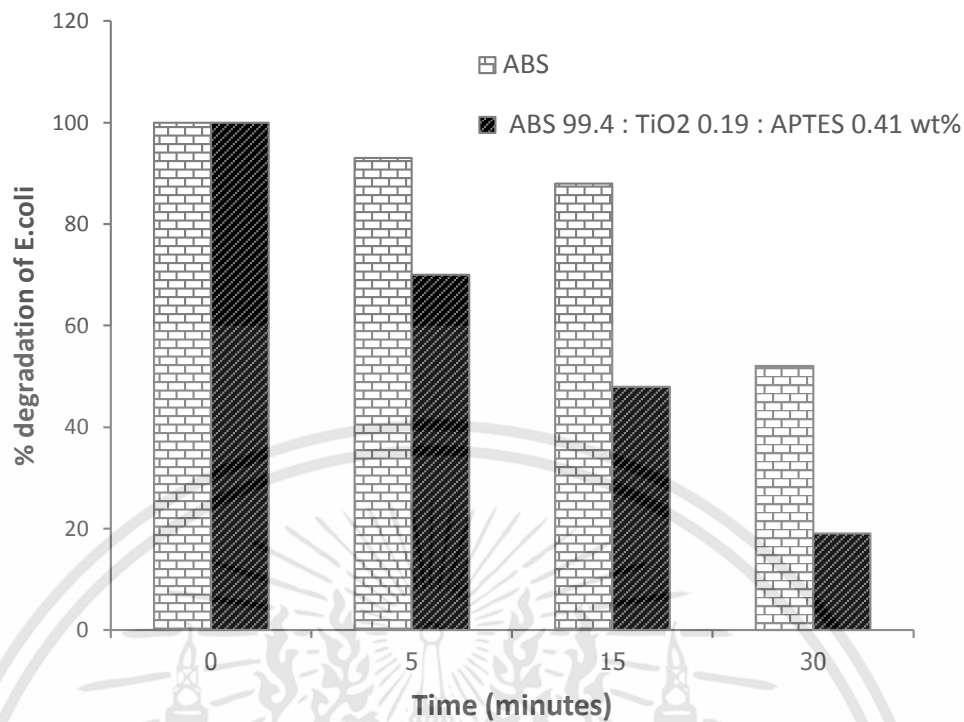
#### 4.10 ผลการศึกษาสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบ

ในหัวข้อการศึกษาสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย สร้างชิ้นงานทดสอบโดยผสมวัสดุในอัตราส่วนผสมที่ระดับอัตราส่วนผสมพลาสติก ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.19 : APTES 0.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ทางสถิติขนาด 5 × 5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน JIS Z 2801:2010 เพื่อศึกษาสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) โดยใช้แบคทีเรียอีโคไลเป็นแบคทีเรียต้นแบบ ในการทดสอบนำสารละลายเชื้อแบคทีเรียอีโคไลหยดลงบนชิ้นงานหลังจากนั้นนำชิ้นงานไปรับแสงยูวีที่เวลา 0, 5, 15 และ 30 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 สันฐานวิทยาของวัสดุที่ใช้ทดสอบสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ที่กำลังขยาย 2500 เท่า

ผลทดสอบสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียอีโคไลของพลาสติก ABS เปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วนผสม ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.19 : APTES 0.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทดลองที่สภาวะแสงช่วง UVB พบว่า จำนวนแบคทีเรียลดลงภายใต้การรับแสงยูวีที่เพิ่มขึ้น และภายใต้การรับแสงยูวีที่เวลา 30 นาที วัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วนผสมดังกล่าว สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรียสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้สูงถึง 81 เปอร์เซ็นต์ พิจารณาจากรูปที่ 4.28 แสดงเปอร์เซ็นต์ของแบคทีเรียอีโคไลจะเห็นว่าพลาสติก ABS ให้ประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีการผสมเพสเสริมแรงจึงทำให้ประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียอีโคไลลดลง



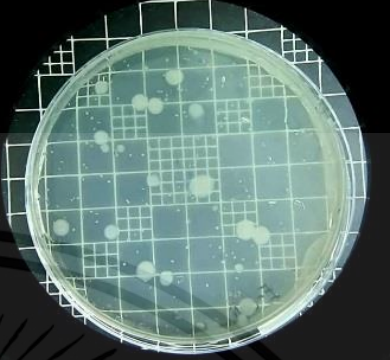
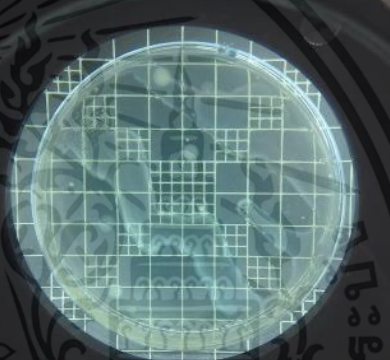
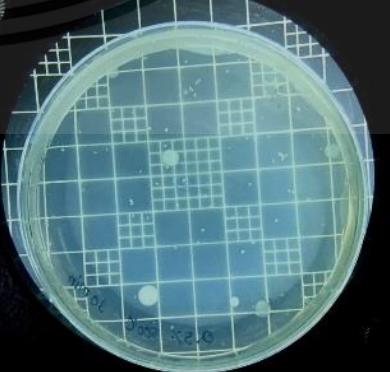
รูปที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์แบคทีเรียอีโคไลที่ลดลงของพลาสติก ABS กับวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วนผสม ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.19 : APTES 0.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้การรับแสงยูวีที่ระยะเวลาต่างๆ

ตารางที่ 4.15 จำนวนแบคทีเรียที่นับได้ของพลาสติก ABS ภายใต้การรับแสงยูวีที่เวลา 0, 5, 15 และ 30 นาที

เวลาในการรับแสง	แบคทีเรียที่เติบโตบนจานเพาะเชื้อที่เวลาต่างๆ
0 นาที	
5 นาที	
15 นาที	
30 นาที	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 จำนวนแบคทีเรียที่นับได้ของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วนผสม ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.19 : APTES 0.41 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้การรับแสงยูวีที่เวลา 0, 5, 15 และ 30 นาที

เวลาในการรับแสง	แบคทีเรียที่เติบโตบนจานเพาะเชื้อที่เวลาต่างๆ
0 นาที	
5 นาที	
15 นาที	
30 นาที	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ ABS เสริมแรงด้วย  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมมาประยุกต์ใช้ในการหาระดับอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบโดยพิจารณาจากอิทธิพลของปัจจัยที่ทำการศึกษาและการวิเคราะห์ด้วย Response optimizer และทดสอบสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียตามมาตรฐาน JIS Z 2801:2010 ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยใช้แบคทีเรียอีโคไลเป็นแบคทีเรียต้นแบบ นอกจากนี้ยังศึกษาหมู่ฟังก์ชันของ  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES รวมทั้งโครงสร้างเฟสและลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. วัสดุเชิงประกอบพลาสติก ABS เสริมแรงด้วย  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES สามารถเพิ่มสมบัติทางกลได้ เมื่อพิจารณาจากค่าการทดสอบของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกชนิด ABS ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารคู่ควบปฏิกิริยาที่ใช้

2.  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองหรือการทดสอบสมบัติทางกลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ ความแข็งแรงดึง, โมดูลัสแรงดึงและระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด

3. ผลการวิเคราะห์หาระดับอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพลาสติก ABS เสริมแรงด้วย  $\text{TiO}_2$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ได้ค่าทำนายผลตอบสนองความแข็งแรงดึง เท่ากับ 20.69 MPa, ค่าทำนายผลตอบสนองโมดูลัสแรงดึง เท่ากับ 1.51 GPa และค่าทำนายผลตอบสนองระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด เท่ากับ 1.29 % ที่ระดับอัตราส่วนผสมพลาสติก ABS ที่ 99.4, ระดับอัตราส่วนผสม  $\text{TiO}_2$  ที่ 0.19 และระดับอัตราส่วนผสมสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ที่ 0.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการยืนยันผลทดสอบที่สภาวะระดับอัตราส่วนผสมดังกล่าวและทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยของการทดสอบแรงดึง ได้แก่ ความแข็งแรงดึง, โมดูลัสแรงดึงและระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด พบว่า ผลการทดสอบจริงไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยการทดสอบแรงดึง โดยพิจารณาจากค่า p-value ที่มากกว่า 0.05 จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลักคือ ค่าเฉลี่ยของการทดสอบแรงดึง ดังนั้นจึงสรุปว่าผลการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4. การศึกษาโครงสร้างเฟสและสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค XRD และ SEM ของ  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังทำการปรับปรุงพื้นผิวยังคงเป็นเฟสอะนาไทส (Anatase) จึงสรุปว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES ไม่ได้ส่งผลต่อโครงสร้างเฟส  $\text{TiO}_2$  ตั้งต้นที่นำมาใช้ ส่วนลักษณะสัณฐานวิทยาของ  $\text{TiO}_2$  หลังทำการปรับปรุงพื้นผิว  $\text{TiO}_2$  จับตัวเป็นกลุ่มก้อนที่ลดลง

5. การศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญด้วยเทคนิค FTIR ของ  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES พบพีกแสดงการยืดของพันธะ Ti-O-Ti stretching ของหมู่  $\text{TiO}_2$  เหมือนกัน แต่หลังจากทำการปรับปรุงพื้นผิวไม่พบพีกที่ไม่ปรากฏบางส่วนคือพันธะ N-H bending ของหมู่ Amino group กับ O-H bending ของหมู่  $\text{H}_2\text{O}$  ถูกบดบังภายในโมเลกุลหลังจากทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา APTES

6. สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึงถูกตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM พบลักษณะสัณฐาน  $\text{TiO}_2$  ที่ปรากฏในเฟสเนื้อพื้นที่เป็นลักษณะสีขาวจับตัวเป็นกลุ่มก้อนบางส่วน การกระจายตัวของเฟสเสริมแรงเข้ากับเฟสเนื้อพื้นพลาสติก ABS จึงเป็นเรื่องที่ยาก เฟสเสริมแรงจึงกระจายตัวในเนื้อพลาสติก ABS ได้ไม่ดีในระดับโมเลกุลและมีโอกาสเกิด de-bond ระหว่างเฟส

7. การศึกษาสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียอีโคไลของวัสดุเชิงประกอบผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) มีแนวโน้มที่ลดลงตามเวลาการรับแสงยูวีที่เพิ่มขึ้น สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้สูงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรียที่ 81 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้การรับแสงยูวีที่เวลา 30 นาที

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวและต้องนำสารเข้าเตาเผาเพื่อเปลี่ยนสถานะของเหลวให้เป็นของแข็งควรใช้อุณหภูมิที่ไม่สูงเกินไปหรือไม่เกิน 110 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีผลต่อการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญด้วยเทคนิค FTIR และลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

2. ในการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้การหาระดับอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบที่ 99.4 : 0.19 : 0.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาดังนั้นควรมีการศึกษาในเรื่องอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น การศึกษาสภาพพื้นผิวชิ้นงานโดยวัดจากค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ที่เกิดขึ้น

3. ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับของวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES โดยใช้เทคนิค BET Method เพื่อเป็นประโยชน์ในการไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ในส่วนของการศึกษาสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) ยังคงมีข้อจำกัดของพลังงานแสงเนื่องจากในการทดสอบใช้หลอด UVB เป็นพลังงานแสง ในด้านการนำไปใช้งานได้จริงควรพัฒนาให้สามารถเกิดในช่วงแสงขาวหรือ Visible light ได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Magallón-Cacho, J.J. Pérez-Bueno, Y. Meas-Vong, G. Stremmsdoerfer and F.J. Espinoza-Beltrán. “Surface modification of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) with heterogeneous photocatalysis (TiO<sub>2</sub>) for the substitution of the etching stage in the electroless process.” **Surface & Coatings Technology.**, vol. 206, 2011. pp. 1410-1415
- [2] B. Difallah, M. Kharrat, M. Dammak and G. Monteil. “Mechanical and tribological response of ABS polymer matrix filled with graphite powder.” **Materials and Design.**, vol. 34, 2012 pp. 782-787
- [3] Yage Xing, Xihong Li, Li Zhang, Qinglian Xua, Zhenming Chea, Weili Li, Yumin Bai and Ke Li. “Effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the antibacterial and physical properties of polyethylene-based film.” **Progress in Organic Coatings.**, vol. 73, 2012. pp. 219-224
- [4] Jayapalan Sudeepan, Kaushik Kumar, Tapan Kumar Barman and Prasanta Sahoo. “Mechanical and Tribological Behavior of ABS/TiO<sub>2</sub> Polymer Composites and Optimization of Tribological Properties Using Grey Relational Analysis.” **J. Inst. Eng. India Ser. C.**, vol. 97 (1), 2015. pp. 41-53
- [5] Lei Lei Wang, Li Qun Zhang and Ming Tian. “Mechanical and tribological properties of acrylonitrile-butadiene rubber filled with graphite and carbon black.” **Materials and Design.**, vol.39, 2012. pp.450-457
- [6] Li Chang, Zhong Zhang, Lin Ye and Klaus Friedrich. “Tribological properties of high temperature resistant polymer composites with fine particles.” **Tribology International.**, vol. 40, 2007. pp. 1170-1178
- [7] Maria Styliidi, Dimitris I. Kondarides and Xenophon E. Verykios. “Visible light-induced photocatalytic degradation of Acid Orange 7 in aqueous TiO<sub>2</sub> suspensions.” **Applied Catalysis B: Environmental.**, vol. 47, 2004. pp. 189-201
- [8] Shadpour Mallakpour and Abdolvahid Barati. “Efficient preparation of hybrid nanocomposite coatings based on poly (vinyl alcohol) and silane coupling agent modified TiO<sub>2</sub> nanoparticles.” **Progress in Organic Coatings.**, vol. 71, 2011. pp. 391-398
- [9] U. Hashim, Sh. Nadzirah, N. Azizah and M. Safwan Azmi. “Silanization using APTES in different solvents on titanium dioxide nanoparticles.” **International Conference on Biomedical Engineering (ICoBE).**, March, 2015.
- [10] Bing Qiao, Ting-Jie Wang, Han Gao and Yong Jin. “High density silanization of nano-silica particles using  $\gamma$  - aminopropyltriethoxysilane (APTES).” **Applied Surface Science.**, vol. 351, 2015. pp. 646-654

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] Y. Rostamiyan, A. Hamed Mashhadzadeh and A. SalmanKhani. “Optimization of mechanical properties of epoxy-based hybrid nanocomposite: Effect of using nano silica and high-impact polystyrene by mixture design approach.” **Materials and Design.**, vol.56, 2014. pp. 1068-1077
- [12] Amani Khaskhoussi, Luigi Calabrese, Hazem Bouhamed, Amel Kamoun, Edoardo Proverbio and Jamel Bouaziz. “Mixture design approach to optimize the performance of TiO<sub>2</sub> modified zirconia/alumina sintered ceramics.” **Materials and Design.**, vol. 137, 2018. pp. 1-8
- [13] Oscar Valerio, Manjusri Misra and Amar K. Mohanty. “Statistical design of sustainable thermoplastic blends of poly(glycerolsuccinate-co-maleate) (PGSMA), poly(lactic acid) (PLA) and poly(butylene succinate) (PBS).” **Polymer Testing.**, vol.65, 2018. pp. 420-428
- [14] Emi Ukaji, Takeshi Furusawa, Masahide Sato and Noboru Suzuki. “The effect of surface modification with silane coupling agent on suppressing the photocatalytic activity of fine TiO<sub>2</sub> particles as inorganic UV filter.” **Applied Surface Science.**, vol. 254, 2007. pp. 563-569
- [15] Ivan Brnardić, Miroslav Huskić, Polona Umek and Tamara Holjevac Grgurić. “Sol-gel functionalization of sodium TiO<sub>2</sub> nanotubes and nanoribbons with aminosilane molecules.” **Ceramics Internationa.**, vol. 39, 2013. pp. 9459-9464
- [16] Fei Cheng, Seyed Mani Sajedin, Stephen M. Kelly, Adam F. Lee and Andreas Kornherr. “UV-stable paper coated with APTES-modified P25 TiO<sub>2</sub> nanoparticles.” **Carbohydrate Polymers.**, vol. 114, 2014. pp. 246-252
- [17] พินิจ เอี่ยมสะอาด. “การปรับปรุงพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ออกไซด์มาตรฐานเพื่อรักษาความคงทนแสงของผงสีธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษาภาควิชาเคมี, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2559.
- [18] Masami Hashimoto, Hiroaki Takadama, Mineo Mizuno and Tadashi Kokubo. “Enhancement of mechanical strength of TiO<sub>2</sub>/high-density polyethylene composites for bone repair with silane-coupling treatment.” **Materials Research Bulletin.**, vol.41, 2006. pp. 515-524
- [19] Vu Giang Nguyen, Hoang Thai, Duc Huynh Mai, Huu Trung Tran, Dai Lam Tran and Manh Tuan Vu. “Effect of titanium dioxide on the properties of polyethylene/TiO<sub>2</sub> nanocomposites.” **Composites: Part B.**, vol. 45, 2013. pp. 1192-1198

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [20] Jayapalan Sudeepan, Kaushik Kumar, Tapan Kumar Barman and Prasanta Sahoo. “Mechanical and Tribological Behavior of ABS/TiO<sub>2</sub> Polymer Composites and Optimization of Tribological Properties Using Grey Relational Analysis.” **J. Inst. Eng. India Ser. C.**, vol. 97 (1), 2015. pp. 41-53
- [21] Angel R. Torrado, Corey M. Shemelya, Joel D. English, Yirong Lin, Ryan B. Wicker and David A. Roberson. “Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing.” **Additive Manufacturing.**, vol. 6, 2015. pp. 16-29
- [22] Matthew R. Skorski, Jake M. Esenther, Zeeshan Ahmed, Abigail E. Miller and Matthew R. Hartings. “The chemical, mechanical, and physical properties of 3D printed materials composed of TiO<sub>2</sub>-ABS nanocomposites.” **Science and Technology of Advanced Materials.**, vol. 17 (1), 2016. pp. 89-97
- [23] อีรพงศ์ แพร์หลาย และอุษา สาริมา. “การศึกษาความแข็งแรงดึงและการต้านเชื้อแบคทีเรียของพลาสติกชนิดอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอิน-สไตรีน ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์.” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558.
- [24] เสาวลักษณ์ บุญยอด. “ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกและพฤติกรรมการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอร์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2553.
- [25] Mirigul Altan and Huseyin Yildirim. “Mechanical and Antibacterial Properties of Injection Molded Polypropylene/TiO<sub>2</sub> Nano-Composites: Effects of Surface Modification.” **J. Mater. Sci. Technol.**, vol. 28 (8), 2014. pp. 686-692
- [26] Carmen Fonseca, Almudena Ochoa, Maria Teresa Ulloa, Eduardo Alvarez, Daniel Canales and Paula A. Zapata. “Poly (lactic acid)/TiO<sub>2</sub> nanocomposites as alternative biocidal and antifungal materials.” **Materials Science and Engineering C.**, vol. 57, 2015. pp. 314-320
- [27] Sharon Olivera., Handanahally Basavarajaiah Muralidhara., and Krishna Venkatesh. “Plating on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) plastic: a review.” **J Master Sci.**, vol. 55, 2016. pp. 3657-3674
- [28] Special Chem. “**Acrylonitrile Butadiene Styrene.**” [Online]. Available : <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-plastic>. 2016
- [29] M. Malekshahi Byranvand., A. Nematı Kharat., L. Fatholahi and Z. Malekshahi Beiranvand. “A Review on Synthesis of Nano-TiO<sub>2</sub> via Different Methods.” **Journal of NANOSTRUCTURES.**, vol. 3, 2013. pp. 1-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [30] Miki Kanna., Sumpun Wongnawa., Supat Buddee., Ketsarin Dilokkhunakul and Peerathat Pinpithak. “Amorphous titanium dioxide: a recyclable dye remover for water treatment.” *J Sol-Gel Sci Technol.*, vol. 53, 2010. pp. 162-170
- [31] S. Sankar., K.G. Gopchandran., P. Kuppusami and S. Murugesan. “Spontaneously ordered TiO<sub>2</sub> nanostructures.” *Ceramics International.*, vol. 37, 2011. pp. 3307-3315
- [32] M. Khan, S.A. Ansari, D. Pradhan, M.O. Ansari, D.H. Han, J. Lee and M.H. Cho. “Band gap engineered TiO<sub>2</sub> nanoparticles for visible light induced photoelectrochemical and Photocatalytic studies.” *Journal of Materials Chemistry A.*, vol. 3, 2014. pp. 637-644
- [33] LI Yan, HOU YanBing, JIN Hui, SHI QuanMin, WANG Yan and FENG ZhiHui. “Photovoltaic properties of MEH-PPV/TiO<sub>2</sub> nanocomposites.” *SCIENCE IN CHINA PRESS.*, vol. 53 (18), 2008. pp. 2743-2747
- [34] Landmann M., Rauls E. and Schmidt WG. “The electronic structure and optical response of rutile, anatase and brookite TiO<sub>2</sub>.” *J Phys Condens Matter.*, vol. 24 (19), 2012. pp. 1-6
- [35] ชวิศร์ ทรัพย์เมธากุล. “การปรับแต่งผิวหน้าของไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2549.
- [36] เล็ก สีคง. ไทเทเนียมไดออกไซด์ โฟโตแคตะลิสต์. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2560.
- [37] นิลุบล เผือกบัวขาว. “สมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2550.
- [38] อิทธิพล แจ่มชัด. สารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling Agent). ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (KMITL).
- [39] อนุพงศ์ สอรัรักษา. “การเพิ่มการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียมโดยใช้สารคู่ควบไซเลน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [40] “APTES.” [Online]. Available : <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/440140?lang=en&region=TH>. 2018

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [41] Xing Su and Baoli Shi. “Effect of silane coupling agents with different non-hydrolytic groups on tensile modulus of composite PDMS crosslinked membranes.” **Reactive and Functional Polymers.**, vol. 98, 2016. pp. 1-8
- [42] Teofil Jesionowski and Andrzej Krysztafkiewicz. “Influence of silane coupling agents on surface properties of precipitated silicas.” **Applied Surface Science.**, vol. 172, 2001. pp. 18-32
- [43] Callister, Jr. William D. **Materials Science and Engineering an Introduction.** 6th Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2003.
- [44] เรื่องศักดิ์ แก้วธรรมชัย. **เทคนิคการขึ้นรูปวัสดุและแม่พิมพ์: ต้นกำเนิดของแม่พิมพ์.** Editing committee of Sokezaï technology guidebook. 2550.
- [45] ดร.รชนี พัทธวรกร. **เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ (Polymer Processing Technology).** ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [46] “Internal Mixer.” [Online]. Available : [http://www.scamex.fr/uk/two\\_roll\\_mill\\_compounders/internal\\_mixer.html](http://www.scamex.fr/uk/two_roll_mill_compounders/internal_mixer.html). 2018.
- [47] Callister Jr. William D. **Material Science and Engineering an Introduction 6<sup>th</sup> Edition.** John Wiley and Sons, Inc. USA. 2003.
- [48] “Stress Strain Curve.” [Online]. Available : <http://www.mechanicalbooster.com/2016/09/stress-strain-curve-relationship-diagram-explanation.html>. 2018
- [49] Mangonon, Pat L. **The Principles of Materials Selection for Engineering Design.** Prentice-Hall Inc. USA. 1999.
- [50] ASTM International. **Tensile Testing.** Second Edition. 2004
- [51] Japanese Industrial Standard. **JIS Z 2801: 2010 (SIAA/JSA) Antibacterial products – Test for antibacterial activity and efficacy.** First Edition. 2011
- [52] จุลชีววิทยา ภาควิชาจุลชีววิทยา. แบคทีเรีย *E.coli*. คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพฯ. 2536.
- [53] ฝ่ายแบคทีเรียลำไส้ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข. *Escherichia coli*. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข, นนทบุรี. 2557.
- [54] “*E.coli* bacteria.” [Online]. Available : <http://www.pbs.org/newshour/rundown/newshour/rundown/new-clues-to-deadly-strength-of-germany-e-coli-strain>. 2017.
- [55] สุกัญญา มากุล. “การวิเคราะห์ดินด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD) เพื่อประยุกต์ใช้ทางนิติวิทยาศาสตร์.” **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.** 2557.
- [56] วรจกณา อนุชิตโอฬาร. “FTIR Imaging.” **ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.** 67-70.
- [57] “Scanning Electron Microscope.” [Online]. Available : <http://thep-center.org/src2/files/eq/fesem.pdf>. 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [58] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง **Design and Analysis of Experiments**. สำนักพิมพ์ท็อป. 2551.
- [59] Amani Khaskhoussi, Luigi Calabrese, Hazem Bouhamed, Amel Kamoun, Edoardo Proverbio and Jamel Bouaziz. “Mixture design approach to optimize the performance of TiO<sub>2</sub> modified zirconia/alumina sintered ceramics.” **Materials and Design.**, vol. 137, 2018. pp. 1-8
- [60] นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ. สถิติวิศวกรรม (**Engineering Statistics**). ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2554
- [61] “**Desirability Function.**” [Online]. Available : [http://www.pinzhi.org/Minitab/DOE/DOE\\_Resp\\_Opti/Setting\\_the\\_weight\\_for\\_the\\_desirability\\_function.html](http://www.pinzhi.org/Minitab/DOE/DOE_Resp_Opti/Setting_the_weight_for_the_desirability_function.html). 2018.

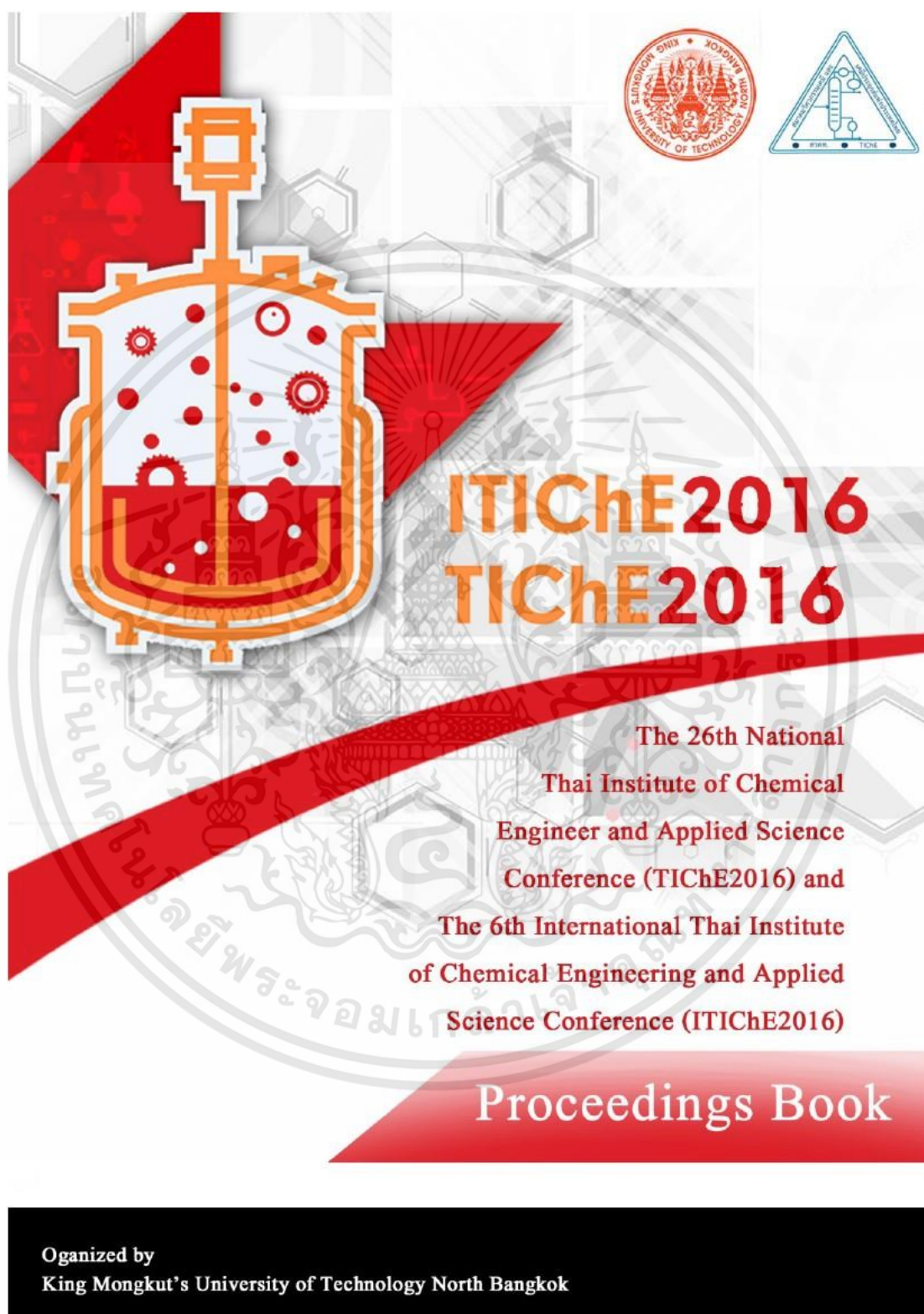




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
 "Innovative Technology toward Sustainable Development"  
 กรุงเทพฯ 26-28 ตุลาคม 2559



## การศึกษาสมบัติทางกลและพฤติกรรมการต้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบ อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน/ไทเทเนียมไดออกไซด์

### Study of mechanical properties and antibacterial behavior of ABS/TiO<sub>2</sub> composites

ภิญญาพัชญ์ เพ็งบุบผา<sup>1</sup>, วิภู ศรีสืบสาย<sup>2</sup>, กุลนันทน์ เกียรติกิตติพงษ์<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

<sup>1</sup>pinyapat\_pengbubpha@hotmail.com

**บทคัดย่อ:** งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติทางกลและพฤติกรรมต้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน หรือพลาสติก ABS โดยผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixture) ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที และสร้างชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการกดอัด (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D 638 ผลการศึกษาสมบัติทางกลให้ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) 18 Mpa และมอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus) 679.39 Mpa ซึ่งสูงกว่า ABS ที่ไม่ได้ผสม TiO<sub>2</sub> นอกจากนี้การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียของ ABS/TiO<sub>2</sub> ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิสตามมาตรฐาน JIS Z 2801: 2010 ABS/TiO<sub>2</sub> สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้สูงถึงร้อยละ 53 ที่เวลาในการรับแสงยูวี 30 นาที

**คำสำคัญ:** อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน, ไทเทเนียมไดออกไซด์, ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิส, อีโคไล

**Abstract:** This research aims to study of mechanical properties and antibacterial behavior of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) composites by mixing Titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) with internal mixture at 245 °C for 6 min and prepared the workpieces with compression molding at 245 °C were investigated according to ASTM D 368 standard. The result of mechanical properties of tensile strength

is 18 Mpa and modulus is 679.39 Mpa are higher than ABS Plastics that not mixing with TiO<sub>2</sub>. In addition, The antibacterial of ABS/TiO<sub>2</sub> composites with Photocatalysis reaction were investigated according to JIS Z 2801: 2010 standard and successfully provided the best Photo-antibacterial with an approximately 53% decreased in *E.coli* for 30 minutes.

**Keywords:** Acrylonitrile-butadiene-styrene, Titanium dioxide, Photocatalysis reaction, *E.coli*

#### บทนำ

ในยุคปัจจุบันนี้ ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของผลิตภัณฑ์พลาสติกเกิดขึ้นตลอดเวลา เป็นเพราะมนุษย์มีการคิดค้นและปรับปรุงผลิตภัณฑ์พลาสติกต่างๆ เพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิตและตอบสนองความต้องการให้ดียิ่งขึ้น ปัจจุบันได้มีการนำพลาสติกอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีนหรือพลาสติก ABS ซึ่งเป็นพลาสติกที่นิยมใช้ทำเป็นอุปกรณ์สุขภัณฑ์และเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ เป็นต้น เพราะพลาสติก ABS เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติเด่นในเรื่องความแข็งแรงและความเหนียว ทำให้พลาสติกมีสมบัติทนต่อแรงกระแทกได้ดี และยังมีคุณสมบัติอื่นๆ อีกหลายด้าน เช่น ทนต่อแรงเสียดสี คงสภาพรูปร่างได้ดี ทนความร้อนสภาพอากาศได้ดี ทนสารเคมีและสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายวิธี ในด้านความก้าวหน้าทางงานวิจัยได้มีการนำสารเคมี เช่น สารไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ

T-CRE17-0177

ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
"Innovative Technology toward Sustainable Development"  
กรุงเทพฯ 26-28 ตุลาคม 2559



(Semiconductor) เนื่องจากราคาถูก ไม่เป็นพิษ มีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่ดี มีความเสถียรทางเคมีสูง และหาซื้อได้ง่าย [1-4] ผสมกับตัวพลาสติกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเสริมคุณสมบัติในด้านต่างๆ อีกทั้ง TiO<sub>2</sub> ยังเป็นสารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีคุณสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงหรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิส (Photocatalysis reaction) สามารถทำลายหรือย่อยสลายสารอินทรีย์ (Organic compounds) และสารอนินทรีย์ (Inorganic compounds) ได้ ในปัจจุบัน TiO<sub>2</sub> ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มสมบัติทางกลให้แก่วัสดุและใช้ในปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิสจากการรับแสงยูวีที่เวลาต่างๆ [5] เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางด้านเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มบางบนพอลิเมอร์อย่างกว้างขวาง [6-7] แต่ในด้านการปรับปรุงและพัฒนาวัสดุเชิงประกอบด้านเชื้อแบคทีเรียยังคงถูกจำกัด จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในด้านการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติทางกลวัสดุเชิงประกอบของพลาสติก ABS ที่ผสม TiO<sub>2</sub> วิเคราะห์สมบัติจากมอดูลัสยืดหยุ่น (Tensile modulus) และความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) พบว่า สมบัติสภาพยืดหยุ่นของวัสดุจะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณผสมของ TiO<sub>2</sub> [8] และปริมาณของ TiO<sub>2</sub> ที่มากเกินไปส่งผลต่อชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดรอยร้าว [6] และพฤติกรรมทางด้านเชื้อแบคทีเรียอีกด้วย เพราะจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิสลดลง เนื่องจากอนุภาคของ TiO<sub>2</sub> จะไปขัดขวางหรือบดบังแสงบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานจากการรับแสงยูวี

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงนำมาสู่งานวิจัยที่จะมุ่งเน้นการเพิ่มสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบ โดยใช้พลาสติก ABS ผสมกับ TiO<sub>2</sub> ศึกษาพฤติกรรมด้านเชื้อแบคทีเรียด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิสตามมาตรฐาน JIS Z 2801: 2010 [9] ภายใต้การรับแสงยูวีที่เวลาต่างๆ และทดสอบสมบัติทางกลตามมาตรฐาน ASTM D 638 [10]

## วิธีการวิจัย

### วัสดุและสารเคมี

เม็ดพลาสติก ABS (อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน) เกรด PA - 717C (โดยบริษัท CHI MEI CORPORATION ประเทศไต้หวัน) และสารไทเทเนียมไดออกไซด์, TiO<sub>2</sub> (โดยบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด)

### การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบ

เม็ดพลาสติกถูกนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนทำการผสมพลาสติก ABS กับ TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่อง Internal mixture (เครื่องผสมแบบปิด) ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที หลังจากนั้นสร้างชิ้นงานที่จะทดสอบด้วยกระบวนการกดอัด (Compression molding) โดยตั้งอุณหภูมิสำหรับสร้างชิ้นงานอยู่ที่ 245 องศาเซลเซียส

### การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

วิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานโครงสร้างผลึกของ TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) วิเคราะห์คุณสมบัติพื้นผิวของ TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer (BET) และศึกษาลักษณะสัณฐานโครงสร้างของ TiO<sub>2</sub> รายละเอียดพื้นผิวชิ้นงานของ ABS/TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

### การทดสอบสมบัติทางกล

พลาสติก ABS ที่ผสม TiO<sub>2</sub> ชิ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการกดอัด ทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และมอดูลัสความยืดหยุ่นของชิ้นงาน (Modulus) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ซึ่งในขณะทดสอบเครื่องทดสอบแรงดึง ทำการจับชิ้นงานที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่แล้วทำการดึงยึดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่

### การทดสอบสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย

สมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียถูกทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z 2801: 2010 (ทดสอบประสิทธิภาพและการต้านเชื้อแบคทีเรียสำหรับพื้นผิวของวัสดุ) วิธีทดสอบเริ่มจากสับเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ลงในหลอดอาหารเลี้ยงเชื้อ (slant เอียง) นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเชื้อแบคทีเรียลงในสารละลาย TSB (Tryptic Soy Broth) และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนหยดสารละลายเชื้อแบคทีเรียลงบนชิ้นงาน ทำความสะอาดชิ้นงานก่อนโดยนำชิ้นงานไปจุ่มในแอลกอฮอล์ 95% 3 - 5 ครั้ง หลังจากนั้นดูสารละลายเชื้อ

T-CRE17-0177

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

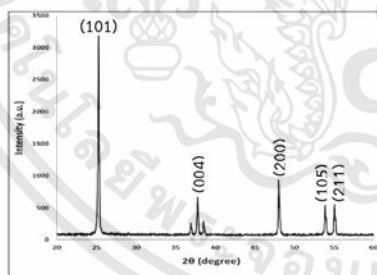
ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
"Innovative Technology toward Sustainable Development"  
กรุงเทพฯ 26-28 ตุลาคม 2559



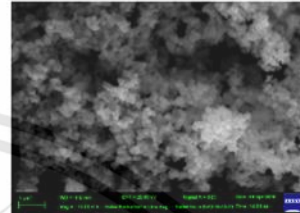
จำนวน 0.4 มิลลิลิตร หยดลงบนชิ้นงานขนาด  $5 \times 5$  เซนติเมตร และใช้แผ่นพลาสติกใส PET ขนาด  $4 \times 4$  เซนติเมตร วางลงบนชิ้นงานเพื่อให้เชื้อกระจายได้ทั่วบนชิ้นงานและปิดฝาจานเพาะเชื้อ นำชิ้นงานไปปรับแสงยูวีที่เวลา 0, 5, 15 และ 30 นาที ตามลำดับ เมื่อนำชิ้นงานไปปรับแสงยูวีตามเวลาที่กำหนด เติมน้ำ DI ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในจานเพาะเชื้อปิดฝาจานเพาะเชื้อและทำการ pour plate (เขย่าจานเพาะเชื้อ) หลังจากนั้นทำการเจือจางสารละลายเชื้อความเข้มข้นจาก  $10^1$  ถึง  $10^4$  คูณสารละลายจำนวน 1 มิลลิลิตรลงในจานเพาะเชื้อ เทอาหารแข็งเลี้ยงเชื้อ PCA (Plate count agar) และ pour plate รोजอนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง นำไปบ่มที่อุณหภูมิ  $32 \pm 0.5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

#### ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) พบว่าโครงสร้าง  $\text{TiO}_2$  ตั้งต้นที่นำมาใช้เป็นแบบอะนาทาส (Anatase) แสดงดังรูปที่ 1. การวิเคราะห์ลักษณะสัมพันธ์ของ  $\text{TiO}_2$  ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 2. พบว่า  $\text{TiO}_2$  มีลักษณะสัมพันธ์เป็นทรงกลมตันด้วยอนุภาคเล็กๆ มาเกาะกลุ่มกัน และผลการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวของ  $\text{TiO}_2$  เป็น 10 ตารางเมตรต่อกรัม

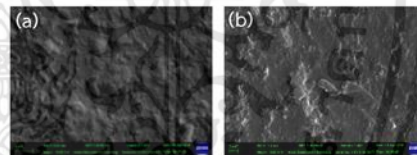


รูปที่ 1. ผลการทดสอบ XRD ของ  $\text{TiO}_2$



รูปที่ 2. ภาพถ่าย SEM ของ  $\text{TiO}_2$

รูปที่ 3. แสดงโครงสร้างพื้นผิวของพลาสติก ABS เทียบกับพลาสติก ABS ที่ผสมกับ  $\text{TiO}_2$  ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานและการกระจายตัวของ  $\text{TiO}_2$  ในเนื้อพลาสติก พบว่าอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่เป็นลักษณะสีขาวกระจายบนพื้นผิวและมีลักษณะการยึดเกาะระหว่างอนุภาค  $\text{TiO}_2$  กับตัวเนื้อพลาสติก ABS ความขรุขระของชิ้นงานอาจเกิดจากปริมาณที่ผสม  $\text{TiO}_2$  ทำให้พื้นผิวของชิ้นงานมีความขรุขระมากขึ้น และอาจจะเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้นตามปริมาณการผสม  $\text{TiO}_2$  ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3. ลักษณะสัมพันธ์ของวัสดุเชิงประกอบ (a) ABS, (b) ABS/ $\text{TiO}_2$

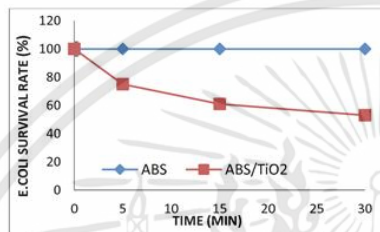
รูปที่ 4. แสดงผลการทดสอบพฤติกรรมด้านเชื้อแบคทีเรียของ พลาสติก ABS และพลาสติกวัสดุเชิงประกอบ ABS/ $\text{TiO}_2$  ด้วยปฏิกิริยาไฟโตแคตะไลติก เทียบกับเวลาในการฉายแสงยูวีตามมาตรฐาน JIS Z 2801 : 2010 (ทดสอบประสิทธิภาพและการต้านเชื้อแบคทีเรียสำหรับพื้นผิวของวัสดุ) พบว่าพลาสติก ABS ไม่สามารถยับยั้งแบคทีเรียเมื่อเวลาการฉายแสงผ่านไป 30 นาที เมื่อผสม  $\text{TiO}_2$  ลงในพลาสติก ABS ส่งผลให้ปริมาณแบคทีเรีย *E.coli* ลดลงร้อยละ 20 ภายใน 5 นาทีแรก และเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ปริมาณแบคทีเรีย *E.coli* ลดลงสูงถึงร้อยละ 53 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของ  $\text{TiO}_2$  ในการดูดซับเชื้อแบคทีเรียและประสิทธิภาพในการย่อยสลายเชื้อแบคทีเรีย [11] รูปที่

T-CRE17-0177

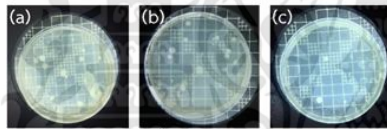
ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
 "Innovative Technology toward Sustainable Development"  
 กรุงเทพฯ 26-28 ตุลาคม 2559



5. แสดงผลการต้านเชื้อแบคทีเรียของ ABS/TiO<sub>2</sub> ภายใต้การรับแสงยูวีที่เวลา 5, 15 และ 30 นาที ตามลำดับ

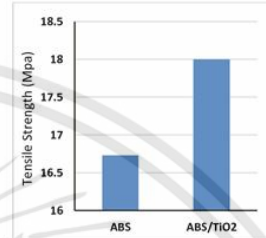


รูปที่ 4. กราฟอัตราการรอดชีวิตของแบคทีเรียภายใต้การรับแสงยูวีของ ABS/TiO<sub>2</sub> ที่เวลาต่างๆ

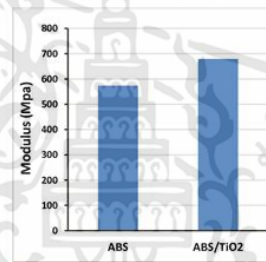


รูปที่ 5. ผลการต้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบ ABS/TiO<sub>2</sub> ภายใต้การรับแสงยูวีที่เวลา (a) 5 นาที, (b) 15 นาที และ (c) 30 นาที ตามลำดับ

รูปที่ 6. และรูปที่ 7. แสดงผลการทดสอบสมบัติทางกลวัสดุเชิงประกอบ ABS/TiO<sub>2</sub> ด้วยมาตรฐาน ASTM D 638 เมื่อพิจารณาชิ้นงานทดสอบให้ผลการทดสอบแบบเดียวกันคือ ชิ้นงานที่ผสม TiO<sub>2</sub> ให้ค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ที่ 18 Mpa ในขณะที่ชิ้นงานที่ไม่ได้ผสม TiO<sub>2</sub> ให้ค่าความต้านทานแรงดึง 16.73 Mpa ชิ้นงานที่ผสม TiO<sub>2</sub> ให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่ 679.39 Mpa และชิ้นงานที่ไม่ได้ผสม TiO<sub>2</sub> ให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 573.44 Mpa ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปริมาณของ TiO<sub>2</sub> เป็นตัวเพิ่มสมบัติให้แก่ชิ้นงานรวมถึงมีการกระจายตัวในโครงสร้างหลักของพลาสติก ABS



รูปที่ 6. กราฟแรงต้านทานการดึงของวัสดุเชิงประกอบ ABS/TiO<sub>2</sub>



รูปที่ 7. กราฟมอดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบ ABS/TiO<sub>2</sub>

#### สรุปผล

การผสม TiO<sub>2</sub> ของวัสดุเชิงประกอบถือเป็นปัจจัยที่สำคัญในด้านการเพิ่มสมบัติทางกลและสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย จากการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบ ABS/TiO<sub>2</sub> ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมีความขรุขระจากอนุภาค TiO<sub>2</sub> ที่เป็นลักษณะสีขาวเกาะกับตัวเนื้อพลาสติก อนุภาค TiO<sub>2</sub> บนชิ้นงานยังส่งผลต่อการลดลงของแบคทีเรียผ่านปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิส โดยจำนวนแบคทีเรียลดลงตามเวลาในการฉายแสงที่เพิ่มขึ้นและสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้สูงถึงร้อยละ 53 ที่เวลา 30 นาที

นอกจากนี้การผสมของ TiO<sub>2</sub> เป็นตัวเพิ่มสมบัติทางกลให้แก่วัสดุเชิงประกอบ จากผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงและมอดูลัสความยืดหยุ่นของงานวิจัยนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นร้อยละ 8 และร้อยละ 16 ตามลำดับ ซึ่งประโยชน์จากงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานสามารถนำไป

T-CRE17-0177

ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
 "Innovative Technology toward Sustainable Development"  
 กรุงเทพฯ 26-28 ตุลาคม 2559



ประยุกต์ใช้ในการผลิตชิ้นงานหรืออุปกรณ์ด้านสาธารณสุข  
 เช่น ชิ้นส่วนของเครื่องกรองน้ำ หรืออุปกรณ์ที่ต้องการด้าน  
 เชื้อแบคทีเรียได้

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาคารปฏิบัติการพอลิเมอร์ คณะ  
 วิทยาศาสตร์ ห้องปฏิบัติการ คณะอุตสาหกรรมเกษตร ศูนย์  
 เครื่องมือเพื่อการวิจัยทางวิศวกรรมภาควิศวกรรมเคมี  
 วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระ  
 จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสถาบันเทคโนโลยี  
 ปทุมวัน ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และให้ความอนุเคราะห์ในการ  
 ทำงานวิจัยนี้ล่วงไปดวยดี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Fujishima, K. Honda, Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode, *Nature* 238 (1972) 37-38.
- [2] A. Fujishima, T.N. Rao, D.A. Tryk, D.A. Titanium dioxide photocatalysis, *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev.* 1 (2000) 1-21.
- [3] S.M. Gupta, M. Tripathi, A review of TiO<sub>2</sub> nanoparticles, *Chin. Sci. Bull.* 56 (2011) 1639-1657.
- [4] M.P. Seabra, I.M. Miranda Salvado, J.A. Labrincha, Pure and (zinc or iron) doped titania powders prepared by sol-gel and used as photocatalyst, *Ceram. Int.* 37 (2011) 3317-3322.
- [5] Bonetta S, Motta S, Strini A, Carraro E. Photocatalytic bacterial inactivation by TiO<sub>2</sub>-coated surfaces. *AMB Express* 2013; 59: 1-8.
- [6] Jae-Hun Yang, Yang-Su Han and Jin-Ho Choy, TiO<sub>2</sub> thin-films on polymer substrates and their Photocatalytic activity. *Thin Solid Films* 495 (2006) 266-271.
- [7] Boonyod S., Photocatalytic Reaction and Antibacterial Behavior of Titanium Dioxide Thin Films on Polymer Substrate. (Thesis the Degrees of Master of Engineering in Materials Engineering, Prince of Songkla University 2554.
- [8] Sudeepan J., Kumar K., Barman T., Sahoo P., Mechanical and Tribological Behavior of ABS/TiO<sub>2</sub> Polymer Composites and Optimization of Tribological Properties Using Grey Relational Analysis. *Journal of The Institution of Engineers* (2016) 41-53.
- [9] Yukichi F. JIS Z 2801 (SIAA/JSA) Antibacterial products-Test for antibacterial activity and efficacy. Japan 2010.
- [10] ASTM International. ASTM D368 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. USA 2003; 46-58.
- [11] Amin S. (2009). Synthesis of TiO<sub>2</sub>-Ag nano composite with sol-gel method and investigation of its antibacterial activity against *E.Coli*. *Powder Technology*. 196: 241-245.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Produkte  
Products

<b>Prüfbericht - Nr.:</b> 0114084381b1 001 <i>Test Report No.:</i>		Seite 1 von 6 Page 1 of 6	
<b>Auftraggeber:</b> <i>Client:</i>		Chi Mei Corporation No.59-1, Sanjiazi, Rende Dist., Tainan City 71702, Taiwan, R.O.C.	
<b>Gegenstand der Prüfung:</b> ACRYLONITRILE-BUTADIENE-STYRENE COPOLYMER <i>Test Item:</i>			
<b>Bezeichnung:</b> <i>Identification:</i>		POLYLAC® PA-717C	
<b>Anlieferungszustand:</b> <i>Delivery condition:</i>		<b>Eingangsdatum:</b> 2018-11-29 <i>Date of Receipt:</i>	
<b>Prüfart:</b> <i>Testing location:</i>		TÜV Rheinland (Shanghai) Co. Ltd.	
<b>Prüfgrundlage:</b> <i>Test specification:</i>		According to RoHS (recast): Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, 2011/65/EU last amended by (EU) 2015/863: Total Content of Lead, Cadmium, Mercury, Chromium VI, Polybrominated Biphenyls, Polybrominated Diphenyl Ethers; and Benzylbutyl phthalate (BBP), Dibutyl phthalate (DBP), Bis(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP), Diisobutyl phthalate (DIBP) and Halogen (Fluorine, Chlorine, Bromine, Iodine)	
<b>Prüfergebnis:</b> <i>Test result:</i>		The test results are the measurements, stated in the test report.	
<b>geprüft: tested by:</b>		<b>kontrolliert: checked by:</b>	
 2019-01-02 Fanny Lin /Project Coordinator		 2019-01-02 Tammy Wang /Assistant Manager	
<b>Datum</b> <i>Date</i>	<b>Name/Stellung</b> <i>Name/Position</i>	<b>Unterschrift</b> <i>Signature</i>	<b>Unterschrift</b> <i>Signature</i>
<b>Sonstiges/ Other Aspects:</b> Test period: 2018-11-29 – 2019-01-02			
<b>Abkürzungen:</b> ok / P = entspricht Prüfgrundlage fail / F = entspricht nicht Prüfgrundlage n.a. / N = nicht anwendbar		<b>Abbreviations:</b> ok / P = passed fail / F = failed n.a. / N = not applicable	
Dieser Prüfbericht bezieht sich nur auf das o.g. Prüfmuster und darf ohne Genehmigung der Prüfstelle nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Dieser Bericht berechtigt nicht zur Verwendung eines Prüfzeichens. <i>This test report relates to the a. m. test sample. Without permission of the test center this test report is not permitted to be duplicated in extracts. This test report does not entitle to carry any safety mark on this or similar products.</i>			

TÜV Rheinland Taiwan Ltd. Softlines  
4F., No.758, Sec. 4, Bade Rd., Songshan Dist., Taipei 105, Taiwan, R.O.C.  
Tel.:+886 2 2172-7000 Fax: +886 2 2528-0018  
Mail: service-gc@tuv.com · Web: www.twn.tuv.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Produkte**  
Products

Test Report No. : 0114084381b1 001 2019-01-02  
 Customer : Chi Mei Corporation  
 Test Method : Total Cadmium, Lead, Mercury, Chromium  
 - Ref. to IEC 62321-4:2013 and IEC 62321-5:2013  
 Chromium (VI)  
 - For Metal material - Ref. to IEC 62321-7-1:2015  
 - For Plastic or Electronic material - Ref. to IEC 62321-7-2:2017  
 - For Leather material - Ref. to EN ISO 17075-1:2017  
 PBBs, PBDEs - Ref. to IEC 62321-6:2015

Sample Material	LoD	POLYLAC® PA-717C plastic/off white TCL181129-12
Cadmium (Cd)	mg/kg	2
Lead (Pb)	mg/kg	2
Mercury (Hg)	mg/kg	2
Chromium VI (Cr VI)**	mg/kg	8*
<b>Sum of Polybrominated biphenyls (PBBs)</b>	mg/kg	-
Monobromobiphenyl	mg/kg	5
Dibromobiphenyl	mg/kg	5
Tribromobiphenyl	mg/kg	5
Tetrabromobiphenyl	mg/kg	5
Pentabromobiphenyl	mg/kg	5
Hexabromobiphenyl	mg/kg	5
Heptabromobiphenyl	mg/kg	5
Octabromobiphenyl	mg/kg	5
Nonabromobiphenyl	mg/kg	5
Decabromobiphenyl	mg/kg	5
<b>Sum of Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs)</b>	mg/kg	-
Monobromodiphenyl ether	mg/kg	5
Dibromodiphenyl ether	mg/kg	5
Tribromodiphenyl ether	mg/kg	5
Tetrabromodiphenyl ether	mg/kg	5
Pentabromodiphenyl ether	mg/kg	5
Hexabromodiphenyl ether	mg/kg	5
Heptabromodiphenyl ether	mg/kg	5
Octabromodiphenyl ether	mg/kg	5
Nonabromodiphenyl ether	mg/kg	5
Decabromodiphenyl ether	mg/kg	5

**Notes:**

- n.d. - not detected
- n.a. - not applicable
- LoD - Limit of Detection
- mg/kg is equal to ppm (parts per million)
- \* method detection limit according to IEC 62321-7-2
- \*\*Once the total Cr content in metal/ plastic or electronic sample is found to be exceeded the limit, the Cr (VI) content will be confirmed with reference to IEC 62321-7-1:2015/ IEC 62321-7-2:2017

	Cd	Cr(VI)	Pb	Hg	PBBs	PBDEs
<b>Maximum permissible Limit acc. to 2011/65/EU (mg/kg)</b>	100	1000	1000	1000	1000	1000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Produkte**  
*Products*

Test Report No. : 0114084381b1 001  
 Customer : Chi Mei Corporation  
 Test Method : BBP/DBP/DEHP/DIBP - Ref. to IEC 62321-8:2017  
 Halogen - Following EN 14582; determination by I.C.

2019-01-02

Sample Material Lab.-No.	LoD	POLYLAC® PA-717C plastic/off white TCL181129-12
Benzylbutylphthalate (BBP) mg/kg	50	n.d.
Dibutylphthalate (DBP) mg/kg	50	n.d.
Diethylhexylphthalate (DEHP) mg/kg	50	n.d.
Diisobutylphthalate (DIBP) mg/kg	50	n.d.

	BBP	DBP	DEHP	DIBP
Maximum permissible Limit acc. to (EU) 2015/863 (mg/kg)	1000	1000	1000	1000

Sample Material Lab.-No.	LoD	POLYLAC® PA-717C plastic/off white TCL181129-12	
<b>Halogen</b>	<b>Unit</b>	<b>LoD</b>	<b>Result</b>
Fluorine (F)	mg/kg	50	n.d.
Chlorine (Cl)	mg/kg	50	n.d.
Bromine (Br)	mg/kg	50	n.d.
Iodine (I)	mg/kg	50	n.d.

- n.d. - not detected
- n.a. - not applicable
- LoD - Limit of Detection
- mg/kg is equal to ppm (parts per million)

**Test Sample**

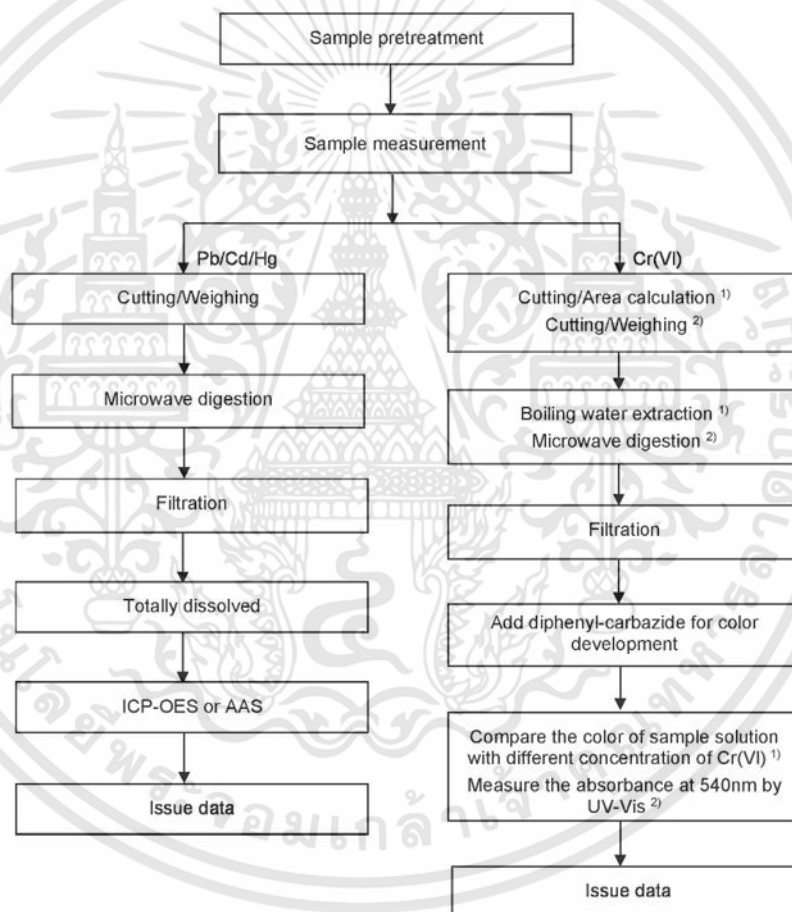
Produkte  
Products

Test Report No. : 0114084381b1 001  
Customer : Chi Mei Corporation

2019-01-02

**Testing procedure:**

RoHS (Pb, Cd, Hg, Cr(VI))



Notes: <sup>1)</sup> For metallic material

<sup>2)</sup> For non-metallic material



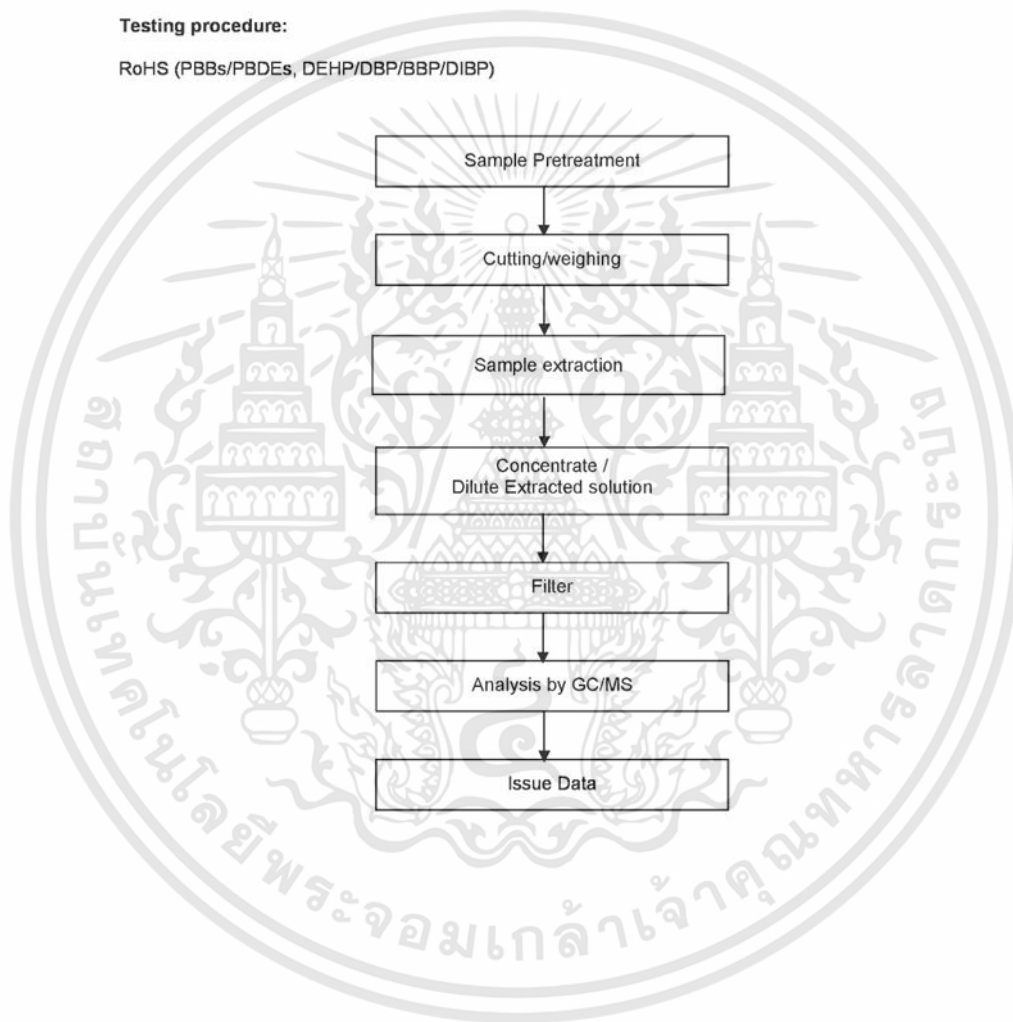
**Produkte**  
Products

Test Report No. : 0114084381b1 001  
Customer : Chi Mei Corporation

2019-01-02

**Testing procedure:**

RoHS (PBBs/PBDEs, DEHP/DBP/BBP/DIBP)



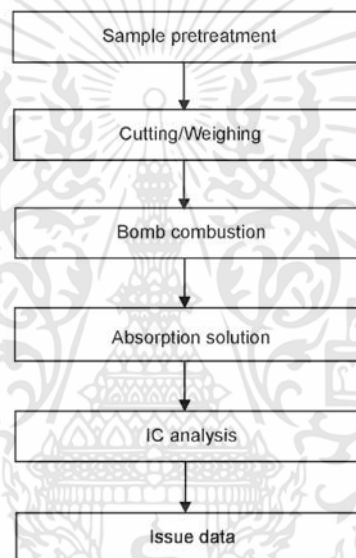
Produkte  
Products

Test Report No. : 0114084381b1 001  
Customer : Chi Mei Corporation

2019-01-02

**Testing procedure:**

Halogen



--- End of Test-Report ---



Product name: POLYLAC © ABS

Version 1

Revision Date: June 1, 2015  
Print Date: November 30, 2015

**Section 1. Identification of the substance/ mixture and of the company/ undertaking**

**1.1 Product identifier**

Product name: POLYLAC ©

This safety data sheet pertains to the following products:

PA-707, PA-709, PA-709A, PA-709N, PA-709P, PA-709S, PA-709K, PA-709H, PA-716, PA-717C, PA-726, PA-726M, PA-727, PA-737, PA-746, PA-746H, PA-747, PA-747F, PA-747H, PA-747R, PA-747S, PA-749, PA-749S, PA-756, PA-756S, PA-756H, PA-757, PA-757N, PA-757H, PA-757F

**1.2 Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against**

Relevant identified uses: Mixture used for the production of molded plastic articles

**1.3 Details of the supplier of the Safety Data Sheet**

Supplier: Chi Mei Corporation  
Address: 59-1, San Chia, Jen Te Village  
Tainan County  
Taiwan R.O.C.  
Telephone: +886 6 2663000 Ext.1347  
Email: service@mail.chimei.com.tw

**1.4 Emergency telephone number**

Emergency telephone : +886 6 2663000 Ext. 2501

**Section 2. Hazards identification**

**2.1 Classification of the substance or mixture**

Classification according to Directive 67/548/EEC or 1999/45/EC: Not classified as hazardous (polymeric state)

Classification according to Regulation (EC) N° 1272/2008 (CLP): Not classified as hazardous (polymeric state)

**2.2 Label elements**

Not labelled as hazardous

**2.3 Other hazards**

vPvB/PBT assessment: not available

**Section 3. Composition/information on ingredients**

**3.1 Composition of the substance/ preparation**

Substance or Preparation      Substance  
Content

CAS	Name	content
9003-56-9	Acrylonitrile-Butadiene-Styrene copolymer	> 98 %
-	Additives	≤ 2 %

Impurities Contributing to Hazard      None

Product name: POLYLAC © ABS

Version 1

Revision Date: June 1, 2015  
Print Date: November 30, 2015

**3.2 Additional information:**

Reach Info:

	Pre-registration No.	Registration No.
Acrylonitrile	05-2117149456-38-0000	01-2119474195-34-0045
Styrene	05-2117149462-45-0000	01-2119457861-32-0006 01-2119457861-32-0007 01-2119457861-32-0057 01-2119457861-32-0065 01-2119457861-32-0081
Buta-1,3-diene	05-2117149467-35-0000	01-2119471988-16-0044

**3.3 For full text of R- and H-phrases:** see section 16

**Section 4. First-aid measures**

**4.1 Description of first aid measures**

**General notes:** Remove affected persons from the danger area, at the same time ensuring your own safety. Remove all contaminated clothing immediately

**Following inhalation:** In case of gases evolving from melted resin, move subject to fresh air. Treat symptomatically

**Following skin contact:** In case of pellets or powder, wash with water. In case of smelt, wash affected skin area and clothing with plenty of (soap and) water. Seek medical advice

**Following eye contact:** In case of pellets or powder, flush with plenty of water for at least 15 minutes. Seek medical advice if any dust particles still remain.

In case of gases evolving from melted resin of high temperature, flush with plenty of water for at least 15 minutes. Seek medical advice if necessary

**Following ingestion:** Induce vomiting. Rinse mouth with water. Seek medical advice if necessary

**Self-protection of the first aider:** -

**4.2 Most important symptoms & effects both acute & delayed**

Dust: Skin irritation, eye irritations and redness

**4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed: -**

Treat symptomatically.  
(Decontamination, vital functions)

**Section 5. Fire-fighting measures**

**5.1 Extinguishing media**

**Suitable extinguishing agents:** Water, foam, dry chemical powder

**For safety reasons unsuitable extinguishing agents:** -

Product name: POLYLAC © ABS

Version 1

Revision Date: June 1,2015  
Print Date: November 30, 2015

**5.2 Special hazards arising from the substance or mixture: -**

**5.3 Advice for firefighters**

Protective equipment: Self-contained breathing apparatus

Further measures: -

**5.4 Additional information: -**

#### Section 6. Accidental release measures

**6.1 Personal precautions, protective equipment & emergency procedures**

Pellets or powder remained on ground may cause slipping

Wear protective equipment

Ensure adequate ventilation

Keep away from ignition sources

Keep unprotected persons away

**6.2 Environmental precautions**

Gather pellets and powder thoroughly to avoid birds or fishes taking from draining water.

Do not allow product to reach sewage system or water bodies. Inform respective authorities in case product reaches water, sewage system or soil

**6.3 Methods and material for containment and cleaning up**

Recovery if not contaminated or disposal

**6.4 Reference to other sections**

See Section 7 for information on safe handling. See Section 8 for information on personal protection equipment.

#### Section 7. Handling and storage

**7.1 Precautions for safe handling**


Protective measures: -

Measures to prevent fire: Prevent from fire around handling area

Measures to prevent aerosol and dust generation: maintain good housekeeping standards to prevent accumulation of dust. To avoid dust explosion resulting from the existence of powder, electrostatics eliminators and grounding should be fixed to such equipment as air transferring pipes, bag filters and hoppers. Use electrically conductive filters for bag filters.

Measures to protect the environment: -

Advice on general occupational hygiene: -

 <p><b>CHIMEI</b> 奇美實業股份有限公司 CHI MEI CORPORATION</p>	<p><b>Safety Data Sheet</b> according to EU 1907/2006 (REACH) and 1272/2008 (CLP)</p>	
Product name: <b>POLYLAC © ABS</b>	Version 1	Revision Date: June 1,2015 Print Date: November 30, 2015

**7.2 Conditions for safe storage, including any incompatibilities**

Technical measures and storage conditions: Keep the material at a cool dry place. Protect from direct sunlight, rain and violent temperature fluctuation. Fire is inhibited around storage area.

Requirements for storage rooms and vessels: -

Suitable materials and coating: -

Unsuitable materials or coatings: -

Further information on storage conditions: -

**7.3 Specific end use(s)**

Recommendations: -

---

**Section 8. Exposure controls/personal protection**

**8.1 Control parameters**

Exposure Limits: None established

**8.2 Exposure control**

Appropriate engineering controls: Install eyes washer and shower in the place of operation. Provide local exhaust ventilation system. Ensure compliance with applicable exposure limits

Personal protection:

- Respiratory protection: Wear masks for cleaning molding machines
- Hand protection: Heat-insulating gloves when handling molten form
- Eye protection: Wear safety glasses for general purpose. Wear chemical goggles for cleaning molding machines
- Skin and body protection: Gloves necessary for handling melted resin
- Hygiene measures: Wash hands after handling

**8.3 Environmental exposure controls**

Product related measures to prevent exposure: None specific  
 Instruction measures to prevent exposure: None specific  
 Organizational measures to prevent exposure: None specific  
 Technical measures to prevent exposure: None specific  
 Environmental exposure controls: Do not allow product to reach sewage system or water bodies

Page 4 of 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Product name: POLYLAC ® ABS

Version 1

Revision Date: June 1,2015  
Print Date: November 30, 2015

### Section 9. Physical and chemical properties

#### 9.1 Information on basic physical and chemical properties

Appearance	Physical state: solid, granulate
Odour	Odourless or negligible
Colour	Natural or off-white
Odour threshold	None
pH	Not applicable
Melting point / freezing point	not determined
Initial boiling point and boiling range	Not applicable
Flash point	404 °C
Evaporation rate	Not applicable
Flammability (solid, gas)	Not available
Upper/lower flammability or explosive limits	45 g/m <sup>3</sup> (open cup, powder)
Vapour pressure	Not applicable
Vapour density	Not applicable
Relative density (H <sub>2</sub> O=1)	1.03 -1.10 g/cm <sup>3</sup>
Bulk density	Not available
Solubility(ies)	Not soluble
Partition coefficient (n-octanol/water)	Not available
Auto-ignition temperature	466 °C
Decomposition temperature	> 300 °C
Viscosity	Not applicable
Explosive properties	Not explosive
Oxidizing properties	Not oxidizing

#### 9.2 Other safety information: -

### Section 10. Stability and reactivity

10.1 **Reactivity:** Non-reactive under normal handling and storage conditions

10.2 **Chemical stability:** Stable under normal handling and storage conditions

10.3 **Possible hazardous reaction:** -

10.4 **Conditions to avoid:** Avoid excessive heat, flames and all sources of ignition

10.5 **Incompatible materials:** not applicable

10.6 **Hazardous decomposition products:** not applicable

Product name: POLYLAC © ABS

Version 1

Revision Date: June 1,2015  
Print Date: November 30, 2015

#### Section 11. Toxicological information

##### 11.1 Information on toxicological effects

###### Toxicological effects:

- Acute toxicity (oral): Lack of data.
- Acute toxicity (dermal): Lack of data.
- Acute toxicity (inhalative): Lack of data.
- Skin corrosion/irritation: Lack of data. May cause irritations.
- Eye damage/irritation: Lack of data. May cause irritations.
- Sensitisation to the respiratory tract: Lack of data. Not to be expected
- Skin sensitisation: Lack of data. Not to be expected
- Germ cell mutagenicity/Genotoxicity: Lack of data. Not to be expected
- Carcinogenicity: Lack of data. Not to be expected
- Reproductive toxicity: Lack of data. Not to be expected
- Effects on or via lactation: Lack of data.
- Specific target organ toxicity (single exposure): Lack of data.
- Dusts: Irritating to eyes, respiratory system and skin.
- Specific target organ toxicity (repeated exposure): Lack of data.

###### Other information

###### Styrene:

- Harmful if inhaled. Causes damage to organs through prolonged or repeated exposure.
- lung damages
- May be fatal if swallowed and enters airways.
- Causes serious eye irritation. Causes skin irritation.

###### Acrylonitrile:

- Toxic by inhalation, in contact with skin and if swallowed.
- May cause cancer. Suspected of damaging the unborn child.
- Causes skin irritation. May cause an allergic skin reaction. Causes serious eye damage.

###### 1,3-Butadiene:

- May cause cancer. May cause genetic defects.

###### Symptoms

- Dust: Can cause skin, eye and respiratory tract irritation.
- The melted product can cause severe burns.
- Thermal treatment, Processing:
- Irritating to eyes, respiratory system and skin.
- In case of ingestion: Swallowing may cause gastrointestinal irritation and pain of guts.

Product name: POLYLAC © ABS

Version 1

Revision Date: June 1,2015  
Print Date: November 30, 2015

## Section 12. Ecological information

### 12.1 Toxicity

Method	Results	Reference
<b>Short-term aquatic toxicity</b>		
Based on available data on the constituents the classification criteria are not met		
LC(50) <sub>mixture</sub> = 5.78 mg/l (additivity and summation method, toxicity information available for 92,5 % of the mixture)		
<b>Long-term aquatic toxicity</b>		
Based on available data on the constituents the classification criteria are met and the mixture is therefore classified as Aquatic Chronic 1		
NOEC <sub>mixture</sub> = 0.0079 mg/l (additivity and summation method, toxicity information available for 78 % of the mixture)		

### 12.2 Persistence and degradability

#### Further details:

- Biodegradation: Product is not readily biodegradable.
- The product is likely to persist in the environment.

#### Effects in sewage plants:

- In sewage treatment plants it may be separated mechanically.

### 12.3 Bioaccumulative potential

To avoid bioaccumulation plastics should not be disposed in the sea or in other water environments.

### 12.4 Mobility in soil

no data available

### 12.5 Results PBT & vPvB assessment

According to the revised Annex XIII of regulation (EC) 1907/2006 and (EC) 253/2011: No information available on the product as such

### 12.5 Other adverse effects:

General information: Do not allow to enter into ground-water, surface water or drains.

### 12.7 Additional information: -

## Section 13. Disposal considerations

### 13.1 Waste treatment methods

Product / Packaging disposal: Dispose in accordance with the current local regulations.

Waste codes according to European Waste Catalogue: -

Waste treatment-relevant information: Inadequate incineration may generate toxic gases such as CO, HCN, AN and SM

Sewage disposal-relevant information: -

Other disposal recommendations: -

Product name: POLYLAC © ABS

Version 1

Revision Date: June 1,2015  
Print Date: November 30, 2015

**Section 14. Transport information**

**ADR/RID**

**14.1 UN number**

Not applicable

**14.2 UN proper shipping name**

Proper Shipping Name: NOT REGULATED

**14.3 Transport hazard class(es)**

Not applicable

**14.4 Packing Group**

Not applicable

**14.5 Environmental hazards**

Not considered environmentally hazardous based on available data

**14.6 Special precautions for user**

Special Provisions: no data available

Hazard identification No: no data available

**ADNR / ADN**

**14.1 UN number**

Not applicable

**14.2 UN proper shipping name**

Proper Shipping Name: NOT REGULATED

**14.3 Transport hazard class(es)**

Not applicable

**14.4 Packing Group**

Not applicable

**14.5 Environmental hazards**

Not considered environmentally hazardous based on available data

**14.6 Special precautions for user**

no data available

**IMDG**

**14.1 UN number**

Not applicable

**14.2 UN proper shipping name**

Proper Shipping Name: NOT REGULATED

**14.3 Transport hazard class(es)**

Not applicable

**14.4 Packing Group**

Not applicable

**14.5 Environmental hazards**

Not considered environmentally hazardous based on available data

**14.6 Special precautions for user**

EMS Number: Not applicable

**14.7 Transport in bulk according to Annex II of MARPOL 73/78 and the IBC Code**

Not applicable

**ICAO/IATA**

**14.1 UN number**

Not applicable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Product name: POLYLAC ® ABS

Version 1

Revision Date: June 1, 2015  
Print Date: November 30, 2015

**14.2 UN proper shipping name**

Proper Shipping Name: NOT REGULATED

**14.3 Transport hazard class(es)**

Not applicable

**14.4 Packing Group**

Not applicable

**14.5 Environmental hazards**

Not considered environmentally hazardous based on available data

**14.6 Special precautions for user**

no data available

**Section 15. Regulatory information**

**15.1 Safety, health and environmental regulations /legislation specific for the substance or mixture**

Authorization and / or restrictions on use: None

Other EU regulations: The following substances are under European Seveso regulation:

Substance	Seveso category	Other Seveso categories	Seveso concentrations	Categories
Acrylonitrile	2	9ii 7b	10 % ≤ C < 20 %	2
Buta-1,3-diene	0	8		
Styrene	6	-	C ≥ 12,5 %	

Other national regulations: -

**15.2 Chemical Safety Assessment**

For this substance a chemical safety assessment is not yet required.

**Section 16. Other information**

**16.1 Indication of changes**

Version 1: First issue according to Regulations (EC) 1907/2006 (REACH) & 1272/2008 (CLP)

**16.2 Abbreviations and acronyms**

AGS	Ausschuss für Gefahrstoffe	LoW	List of Waste
AF	Assessment Factor	MARPOL	MARine POLution
BCF	BioConcentration Factor	MIE	Minimum Ignition Energy
CAS	Chemical Abstract Service	N°EC	European Commission number
CMR	Carcinogenic, Mutagenic and Reprotoxic	NFPA	National Fire Protection Association
CSR	Chemical Safety Report	NIOSH	National Institute of Occupational Safety and Health
DFG	German Research Foundation	NOEC	No Observed Effect Concentration
DNEL	Derived No Effect Level	NOELR	No Observed Effect Loading Rate
EC	European Commission	OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
EC50	Effective Concentration (required to induce a 50% effect)	OEL	Occupational Exposure Limit
EEC	European Economic Community	OSHA	Occupational Safety and Health Administration
EWC	European Waste Catalogue Code	PBT	Persistent Bioaccumulable Toxic
IDLH	Immediately Dangerous to Life or Health	PNEC	Previsible Non Effect Concentration
IBC	International Bulk Chemical	QSAR	Quantitative Structure-Activity Relationship

Product name: POLYLAC © ABS

Version 1

Revision Date: June 1, 2015  
Print Date: November 30, 2015

Koc	Soil/Water Partition Coefficient	STOT	Specific Target Organ Toxicity
Kow	Octanol/Water Partition Coefficient	TCLo	Toxic Concentration Low
LC50	Lethal Concentration 50	TDLo	Toxic Dose Low
LD50	Lethal Dose 50	UN	United Nations
LEL	Lower Explosive Limit	UVCB	Unknown or Variable Composition Complex Reaction Products, or Biological Materials
LL100	Lethal Loading	vPvB	very Persistent, very Bioaccumulative
LOEC	Lowest Observed Effect Concentration		

### 16.3 Key literature references and sources for data

<http://esis.jrc.ec.europa.eu/>  
<http://echa.europa.eu/>  
<http://gestis-en.itrust.de>

### 16.4 Relevant R-phrases and/or H-statements (number and full text):

H220	Extremely flammable gas	R10	Flammable
H225	Highly flammable liquid and vapour	R11	Highly flammable
H226	Flammable liquid and vapour	R12	Extremely flammable
H301	Toxic if swallowed	R20	Harmful by inhalation
H311	Toxic in contact with skin	R23/24/25	Toxic by inhalation, in contact with skin and if swallowed
H315	Causes skin irritation	R36	Irritating to eyes
H317	May cause an allergic skin reaction	R37	Irritating to respiratory system
H318	Causes serious eye damage	R38	Irritating to skin
H319	Causes serious eye irritation	R40	Limited evidence of a carcinogenic effect
H331	Toxic if inhaled	R41	Risk of serious damage to eyes
H332	Harmful if inhaled	R43	May cause sensitisation by skin contact
H335	May cause respiratory irritation	R45	May cause cancer
H340	May cause genetic defects	R46	May cause inheritable genetic damage
H350	May cause cancer	R50/53	Very toxic to aquatic organisms, may cause long-term adverse effects in the aquatic environment
H351	Suspected of causing cancer	R51/53	Toxic to aquatic organisms, may cause long-term adverse effects in the aquatic environment
H400	Very toxic to aquatic life		
H411	Toxic to aquatic life with long lasting effects		

### 16.5 Training advice: -

**16.6 Further information:** According to the guidance version 2.0 for monomers and polymers from the European Chemicals Agency dated as of April 2012, the classification of the polymer takes into account the classification of all its constituents, such as unreacted monomers. These constituents in fact should be taken into account for classification of the polymer. This means that the same classification methods as for mixture should be applied to polymer substances.

In order to determine a classification for the studies about the water soluble fraction as well as the absorption should be performed on the polymer as such.

*To the best of our knowledge and belief, the information contained herein is accurate and obtained from sources believed to be reliable. No representation is made that the information is complete or the material is suitable for all purposes. The final determination as to the suitability of the user's intended use of the material is the sole responsibility of the user. All materials may present unknown hazards even when used in common applications and accordingly, it is the sole responsibility of the user to understand and address all potential hazards, including those identified herein. The information set forth in Sections 11 and 12 reflects data available as of the date hereof. It is anticipated that such data will be updated.*

## General ABS POLYLAC® Characteristics PA-717C

特性 PROPERTIES	測試方法 ASTM TEST METHOD	測試條件 TEST CONDITION	單位 UNIT	通用級 GENERAL
				PA-717C
熔融指數 Melt Flow Index	D1238	200 °C, 5 Kg	g/10 min	1.3
		220 °C, 10 Kg		-
比重 Mass Density	D792	23 °C	-	1.04
硬度 Hardness	D785	-	R Scale	115
拉伸強度 (屈服) Tensile Strength (Yield)	D638	6 mm/min	Kg/cm <sup>2</sup>	430
			lb/in <sup>2</sup>	6100
延伸率 Tensile Elongation	D638	6 mm/min	%	30
彎曲強度 Flexural Strength	D790	2.8 mm/min	Kg/cm <sup>2</sup>	720
			lb/in <sup>2</sup>	10200
彎曲彈性模數 Flexural Modulus	D790	2.8 mm/min	10 <sup>4</sup> Kg/cm <sup>2</sup>	2.5
			10 <sup>5</sup> lb/in <sup>2</sup>	3.5
IZOD 衝擊強度 Izod Impact Strength	D256 (Notched)	6.4 mm, 23°C	Kg-cm/cm	25
			ft-lb/in	4.6
		3.2 mm, 23°C	Kg-cm/cm	29
			ft-lb/in	5.4
維氏軟化溫度 Vicat Softening Temp.	D1525	1 Kg, 50 °C/hr	°C	104
			°F	219
熱變形溫度 Heat Distortion Temp.	D648	1.8 MPa Annealed	°C	95
			°F	203
		1.8 MPa Unannealed	°C	85
			°F	186
UL 燃燒等級 UL Flammability	UL 94	-	-	1.5 mm HB

April 21, 2014

Notes : These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

The above statement is based on our current level of knowledge and covers the above products directly manufactured and supplied by CHI MEI CORPORATION at the date of issue. CHI MEI CORPORATION makes no warranties, whether express or implied, and assumes no liability in connection with any use of above information. Notwithstanding the foregoing, CHI MEI CORPORATION shall in no event be held obligated or liable for any claims due to or arising from (i) any customer provided, consigned, materials and/or parts, which are incorporated or adopted in the products; (ii) any combination of the products with material not provided or authorized by our company; (iii) any modifications to the products which are made or directed by customer; (iv) our compliance with the specifications, instructions, and/or designs provided by customer; (v) any anti-trust, unfair competition and/or other unlawful actions effected by customer; or (vi) any defects, infringement, breach and/or violation which are arising out of customer's faults or otherwise not solely and directly attributable to CHI MEI CORPORATION. In no event will CHI MEI CORPORATION be liable for any indirect, special, exemplary, punitive, or consequential damages (including lost profits) of any nature whatsoever whether arising out of the purchase, shipment, unloading, handling, or use of any product or otherwise.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**CERTIFICATE OF ANALYSIS and SPECIFICATION**

# TITANIUM DIOXIDE

## Product Identification


### Handling and Storage

Keep in a tightly closed container, stored in a cool, dry, ventilated area. Protect against physical damage. Containers of this material may be hazardous when empty since they retain product residues (dust).

Synonyms: Titanium (IV) Oxide; C.I. 77891  
CAS No.: 13463-67-7  
Molecular Weight: 79.87  
Chemical Formula: TiO<sub>2</sub>

**WILLSON** 

**WILLSON Hangzhou Import & Export Co., Ltd.**  
Hangzhou, Zhejiang, China

BATCH NO: 20140801 MFG DATE: 01 AUGUST 2014 EXP DATE: 01 AUGUST 2018		
ITEMS	SPECIFICATION	TEST RESULTS
Purity	More than 98%	98.75 %
Whiteness color compare with standard	Not lower than standard	Conformed
Tinting strength compare with standard %	More than 100	122.00
Matter volatile at 105 C% m/m	Less than 0.50	0.30
PH of suspension, aqueous solution retained %	6.50 – 8.00	7.10
Oil absorption g/100 g	Less than 26	22
Residue on sieve 45 um% m/m	Less than 0.1	0.060
Solvent suspension content In water % m/m	Less than 0.5	0.040
THIS PRODUCT IS CONFORMED TO THE SPECIFICATION		APPROVED BY MR. YANG 

## NET WEIGHT: 25 KGs

<b>Other Information</b>	<b>Transport Information</b>
NFPA Ratings: Health: 1 Flammability: 0 Reactivity: 0	Not regulated.
<b>Accidental Release Measures</b>	
Ventilate area of leak or spill. Wear appropriate personal protective equipment as specified in Section 8. Spills: Sweep up and containerize for reclamation or disposal. Vacuuming or wet sweeping may be used to avoid dust dispersal.	

### First Aid Measures

#### Inhalation:

Remove to fresh air. Get medical attention for any breathing difficulty.

#### Ingestion:

Not expected to require first aid measures. If large amounts were swallowed, give water to drink and get medical advice.

#### Skin Contact:

Immediately flush skin with plenty of soap and water for at least 15 minutes. Remove contaminated clothing and shoes. Wash clothing before reuse. Thoroughly clean shoes before reuse. Get medical attention if irritation develops.

#### Eye Contact:

Immediately flush eyes with plenty of water for at least 15 minutes, lifting upper and lower eyelids occasionally. Get medical attention if irritation persists.



**CHEMIPANT**  
CHEMIPAN.COM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SIGMA-ALDRICH®**

sigma-aldrich.com

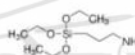
3050 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA

Website: [www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com)Email USA: [techserv@sial.com](mailto:techserv@sial.com)Outside USA: [eurtechserv@sial.com](mailto:eurtechserv@sial.com)**Product Specification**

Product Name:  
(3-Aminopropyl)triethoxysilane - ≥98.0%

Product Number: **741442**  
CAS Number: **919-30-2**

Formula: **C<sub>9</sub>H<sub>23</sub>NO<sub>3</sub>Si**  
Formula Weight: **221.37 g/mol**



TEST	Specification
Appearance (Color)	Colorless
Appearance (Form)	Liquid
Infrared Spectrum	Conforms to Structure
Titration with HCl	98.0 - 102.0 %
Color Test	≥ 25 APHA
Purity (GC)	≥ 98.0 %

Specification: PRD.1.ZQ5.1000020462

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at Sigma-Aldrich.com. For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

1 of 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SIGMA-ALDRICH**

sigma-aldrich.com

**Material Safety Data Sheet**Version 4.0  
Revision Date 03/12/2010  
Print Date 10/04/2011**1. PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION**

Product name : (3-Aminopropyl)triethoxysilane  
 Product Number : 440140  
 Brand : Aldrich  
 Company : Sigma-Aldrich  
 3050 Spruce Street  
 SAINT LOUIS MO 63103  
 USA  
 Telephone : +1 800-325-5832  
 Fax : +1 800-325-5052  
 Emergency Phone # : (314) 776-6555

**2. HAZARDS IDENTIFICATION****Emergency Overview**

**OSHA Hazards**  
 Target Organ Effect, Harmful by ingestion., Corrosive

**Target Organs**

Nerves., Liver, Kidney

**GHS Label elements, including precautionary statements**

Pictogram



Signal word : Danger

Hazard statement(s)

H302 : Harmful if swallowed.  
 H313 : May be harmful in contact with skin.  
 H315 : Causes skin irritation.  
 H318 : Causes serious eye damage.

Precautionary statement(s)

P280 : Wear protective gloves/eye protection/face protection.  
 P305 + P351 + P338 : IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.

**HMIS Classification**

Health hazard: 3  
 Chronic Health Hazard: \*  
 Flammability: 1  
 Physical hazards: 1

**NFPA Rating**

Health hazard: 3  
 Fire: 1  
 Reactivity Hazard: 1

**Potential Health Effects**

**Inhalation** : May be harmful if inhaled. Material is extremely destructive to the tissue of the mucous membranes and upper respiratory tract.  
**Skin** : May be harmful if absorbed through skin. Causes skin burns.

**Eyes** Causes eye burns.  
**Ingestion** Harmful if swallowed. Causes burns.

### 3. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

**Synonyms** : 3-Triethoxysilylpropylamine  
 APTES  
 Dow Corning® product Z-6011

**Formula** :  $C_9H_{23}NO_3Si$   
**Molecular Weight** : 221.37 g/mol

CAS-No.	EC-No.	Index-No.	Concentration
<b>3-Aminopropyltriethoxysilane</b>			
919-30-2	213-048-4	612-108-00-0	-

### 4. FIRST AID MEASURES

**General advice**

Consult a physician. Show this safety data sheet to the doctor in attendance. Move out of dangerous area.

**If inhaled**

If breathed in, move person into fresh air. If not breathing give artificial respiration. Consult a physician.

**In case of skin contact**

Take off contaminated clothing and shoes immediately. Wash off with soap and plenty of water. Consult a physician.

**In case of eye contact**

Continue rinsing eyes during transport to hospital. Rinse thoroughly with plenty of water for at least 15 minutes and consult a physician.

**If swallowed**

Do NOT induce vomiting. Never give anything by mouth to an unconscious person. Rinse mouth with water. Consult a physician.

### 5. FIRE-FIGHTING MEASURES

**Suitable extinguishing media**

Use water spray, alcohol-resistant foam, dry chemical or carbon dioxide.

**Special protective equipment for fire-fighters**

Wear self contained breathing apparatus for fire fighting if necessary.

**Further information**

Under fire conditions, material may decompose to form flammable and/or explosive mixtures in air.

### 6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

**Personal precautions**

Use personal protective equipment. Avoid breathing vapors, mist or gas. Ensure adequate ventilation. Evacuate personnel to safe areas.

**Environmental precautions**

Do not let product enter drains.

**Methods and materials for containment and cleaning up**

Soak up with inert absorbent material and dispose of as hazardous waste. Keep in suitable, closed containers for disposal.

### 7. HANDLING AND STORAGE

**Precautions for safe handling**

Avoid inhalation of vapour or mist.  
 Normal measures for preventive fire protection.

**Conditions for safe storage**

Keep container tightly closed in a dry and well-ventilated place. Containers which are opened must be carefully resealed and kept upright to prevent leakage.

Moisture sensitive. Store under inert gas.

**8. EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION**

Contains no substances with occupational exposure limit values.

**Personal protective equipment****Respiratory protection**

Where risk assessment shows air-purifying respirators are appropriate use a full-face respirator with multi-purpose combination (US) or type ABEK (EN 14387) respirator cartridges as a backup to engineering controls. If the respirator is the sole means of protection, use a full-face supplied air respirator. Use respirators and components tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or CEN (EU).

**Hand protection**

Handle with gloves.

**Eye protection**

Tightly fitting safety goggles. Faceshield (8-inch minimum).

**Skin and body protection**

Choose body protection according to the amount and concentration of the dangerous substance at the work place.

**Hygiene measures**

Handle in accordance with good industrial hygiene and safety practice. Wash hands before breaks and at the end of workday.

**9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES****Appearance**

Form liquid, clear

Colour colourless

**Safety data**

pH no data available

Melting point no data available

Boiling point 217 °C (423 °F) at 1,013 hPa (760 mmHg) - lit.

Flash point 98 °C (208 °F) - closed cup

Ignition temperature no data available

Lower explosion limit 0.8 %(V)

Upper explosion limit 4.5 %(V)

Vapour pressure < 13 hPa (< 10 mmHg) at 100 °C (212 °F)  
133 hPa (100 mmHg) at 155 °C (311 °F)

Density 0.946 g/cm<sup>3</sup> at 25 °C (77 °F)

Water solubility no data available

Relative vapour density 7.64  
- (Air = 1.0)

**10. STABILITY AND REACTIVITY****Chemical stability**

May decompose on exposure to moist air or water. Stable under recommended storage conditions.

**Conditions to avoid**

no data available

**Materials to avoid**

Strong oxidizing agents, Acids

**Hazardous decomposition products**

Hazardous decomposition products formed under fire conditions. - Carbon oxides, nitrogen oxides (NOx), silicon oxides

**11. TOXICOLOGICAL INFORMATION****Acute toxicity**

LD50 Oral - rat - 1,780 mg/kg

LD50 Dermal - rabbit - 3.8 g/kg

**Skin corrosion/irritation**

Skin - rabbit - Severe skin irritation - 24 h

**Serious eye damage/eye irritation**

Eyes - rabbit - Severe eye irritation - 24 h

**Respiratory or skin sensitization**

no data available

**Germ cell mutagenicity**

no data available

**Carcinogenicity**

IARC: No component of this product present at levels greater than or equal to 0.1% is identified as probable, possible or confirmed human carcinogen by IARC.

ACGIH: No component of this product present at levels greater than or equal to 0.1% is identified as a carcinogen or potential carcinogen by ACGIH.

NTP: No component of this product present at levels greater than or equal to 0.1% is identified as a known or anticipated carcinogen by NTP.

OSHA: No component of this product present at levels greater than or equal to 0.1% is identified as a carcinogen or potential carcinogen by OSHA.

**Reproductive toxicity**

no data available

**Specific target organ toxicity - single exposure (GHS)**

no data available

**Specific target organ toxicity - repeated exposure (GHS)**

no data available

**Aspiration hazard**

no data available

**Potential health effects****Inhalation** May be harmful if inhaled. Material is extremely destructive to the tissue of the mucous membranes and upper respiratory tract.**Ingestion** Harmful if swallowed. Causes burns.**Skin** May be harmful if absorbed through skin. Causes skin burns.**Eyes** Causes eye burns.**Signs and Symptoms of Exposure**

Material is extremely destructive to tissue of the mucous membranes and upper respiratory tract, eyes, and skin., spasm, inflammation and edema of the bronchi, pneumonitis, pulmonary edema, burning sensation, Cough, wheezing, laryngitis, Shortness of breath, Headache, Nausea, Vomiting

**Additional Information**

RTECS: TX2100000

**12. ECOLOGICAL INFORMATION****Toxicity**

no data available

**Persistence and degradability**

no data available

**Bioaccumulative potential**

no data available

**Mobility in soil**

no data available

**PBT and vPvB assessment**

no data available

**Other adverse effects**

no data available

**13. DISPOSAL CONSIDERATIONS****Product**

Observe all federal, state, and local environmental regulations. Contact a licensed professional waste disposal service to dispose of this material. Dissolve or mix the material with a combustible solvent and burn in a chemical incinerator equipped with an afterburner and scrubber.

**Contaminated packaging**

Dispose of as unused product.

**14. TRANSPORT INFORMATION****DOT (US)**

UN-Number: 2735 Class: 8

Packing group: II

Proper shipping name: Amines, liquid, corrosive, n.o.s. (3-Aminopropyltriethoxysilane)

Marine pollutant: No

Poison Inhalation Hazard: No

**IMDG**

UN-Number: 2735 Class: 8

Packing group: II

EMS-No: F-A, S-B

Proper shipping name: AMINES, LIQUID, CORROSIVE, N.O.S. (3-Aminopropyltriethoxysilane)

Marine pollutant: No

**IATA**

UN-Number: 2735 Class: 8

Packing group: II

Proper shipping name: Amines, liquid, corrosive, n.o.s. (3-Aminopropyltriethoxysilane)

**15. REGULATORY INFORMATION****OSHA Hazards**

Target Organ Effect, Harmful by ingestion., Corrosive

**DSL Status**

All components of this product are on the Canadian DSL list.

**SARA 302 Components**

SARA 302: No chemicals in this material are subject to the reporting requirements of SARA Title III, Section 302.

**SARA 313 Components**

SARA 313: This material does not contain any chemical components with known CAS numbers that exceed the threshold (De Minimis) reporting levels established by SARA Title III, Section 313.

**SARA 311/312 Hazards**

Acute Health Hazard, Chronic Health Hazard

**Massachusetts Right To Know Components**

No Components Listed

**Pennsylvania Right To Know Components**

3-Aminopropyltriethoxysilane

CAS-No.  
919-30-2

Revision Date

**New Jersey Right To Know Components**

3-Aminopropyltriethoxysilane

CAS-No.  
919-30-2

Revision Date

**California Prop. 65 Components**

This product does not contain any chemicals known to State of California to cause cancer, birth defects, or any other reproductive harm.

**16. OTHER INFORMATION****Further information**

Copyright 2010 Sigma-Aldrich Co. License granted to make unlimited paper copies for internal use only. The above information is believed to be correct but does not purport to be all inclusive and shall be used only as a guide. The information in this document is based on the present state of our knowledge and is applicable to the product with regard to appropriate safety precautions. It does not represent any guarantee of the properties of the product. Sigma-Aldrich Co., shall not be held liable for any damage resulting from handling or from contact with the above product. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



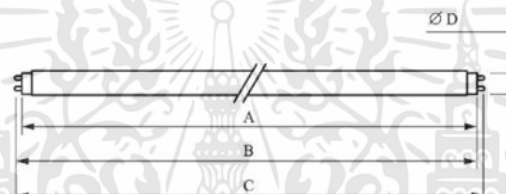
## บริษัท ซีซีเอส ซักเซสโปรดักส์ จำกัด

### SPECIL LAMP UVB

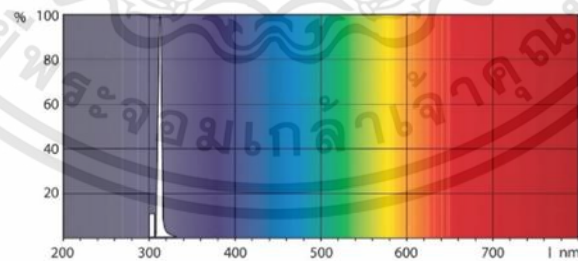
#### Product Features

UV-B radiation is harmful to human skin and eyes.

These lamps are therefore only available for medical and industrial applications.



type	Watts w	Cap/ base	A MAX.	B MAX.	C MAX.	D MAX.	Useful life h
UVB 10WT8	10	G13	331.5	338.6	345.7	28.0	2000
UVB 15WT8	15	G13	437.4	444.5	451.6	28.0	2000
UVB 18WT8	18	G13	589.8	596.9	604.0	28.0	2000
UVB 30WT18	30	G13	894.6	901.7	908.8	28.0	2000
UVB 36WT8	36	G13	1199.4	1206.5	1213.6	28.0	2000



305/152 ม.11 ต.บางพลีใหญ่ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540

Tel : 02-752-1878 Fax : 02-752-0261 E-mail : ccs\_success2010@hotmail.com

www.ccssuccessproducts.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# JIS

JAPANESE  
INDUSTRIAL  
STANDARD

Translated and Published by  
Japanese Standards Association

JIS Z 2801 : 2010

(SIAA/JSA)

**Antibacterial products — Test for  
antibacterial activity and efficacy**

ICS 07.100.10:11.100:83.080.01

Reference number : JIS Z 2801 : 2010 (E)

PROTECTED BY COPYRIGHT

13 S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Z 2801 : 2010



Date of Establishment: 2000-12-20

Date of Revision: 2010-12-20

Date of Public Notice in Official Gazette: 2010-12-20

Investigated by: Japanese Industrial Standards Committee

Standards Board

Technical Committee on Consumer Life Products

JIS Z 2801 : 2010, First English edition published in 2011-12

Translated and published by: Japanese Standards Association  
4-1-24, Akasaka, Minato-ku, Tokyo, 107-8440 JAPANIn the event of any doubts arising as to the contents,  
the original JIS is to be the final authority.

© JSA 2011

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

Printed in Japan

NH/TH

PROTECTED BY COPYRIGHT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Z 2801 : 2010

## Contents

	Page
Introduction .....	1
1 Scope .....	1
2 Normative references .....	1
3 Terms and definitions .....	2
4 Antibacterial effectiveness .....	2
5 Testing method .....	3
5.1 Bacteria to be used for test .....	3
5.2 Chemicals, materials, instruments and apparatuses .....	3
5.3 Method of sterilization .....	5
5.4 Culture medium, etc. ....	5
5.5 Preservation of bacteria .....	7
5.6 Test operation .....	8
5.7 Calculation of number of viable bacteria .....	12
5.8 Test results .....	12
6 Record of test results .....	13
Annex JA (informative) Comparison table between JIS and corresponding International Standard .....	15

(i)

PROTECTED BY COPYRIGHT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Z 2801 : 2010

### Foreword

This translation has been made based on the original Japanese Industrial Standard revised by the Minister of Economy, Trade and Industry through deliberations at the Japanese Industrial Standards Committee as the result of proposal for revision of Japanese Industrial Standard submitted by Society of Industrial technology for Antimicrobial Articles (SIAA)/Japanese Standards Association (JSA) with the draft being attached, based on the provision of Article 12 Clause 1 of the Industrial Standardization Law applicable to the case of revision by the provision of Article 14.

Consequently JIS Z 2801 : 2006 is replaced with this Standard.

This JIS document is protected by the Copyright Law.

Attention is drawn to the possibility that some parts of this Standard may conflict with a patent right, application for a patent after opening to the public or utility model right which have technical properties. The relevant Minister and the Japanese Industrial Standards Committee are not responsible for identifying the patent right, application for a patent after opening to the public or utility model right which have the said technical properties.

(ii)

PROTECTED BY COPYRIGHT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Antibacterial products — Test for antibacterial activity and efficacy

### Introduction

This Japanese Industrial Standard has been prepared based on the first edition of ISO 22196 published in 2007 with some modifications of the technical contents to meet technology trend, actual situation, etc. in Japan.

The portions given sidelines or dotted underlines are the matters in which the contents of the original International Standard have been modified. A list of modifications with the explanations is given in Annex JA.

### 1 Scope

This Standard specifies the test for antibacterial activity and efficacy to bacteria on the surface of antibacterial products (including intermediate products) of plastic products, metal products, ceramics products, etc. excluding the textile products and the photocatalyst products.

Secondary effects of antibacterial efficacy such as fungal resistance, odour prevention and biodegradation are not covered by this Standard.

NOTE 1 For the products so determined that the test method for textile products should be applied from their usage, shape, etc., clause 10 (Quantitative test) of JIS L 1902 may be applied.

NOTE 2 The International Standard corresponding to this Standard and the symbol of degree of correspondence are as follows.

ISO 22196 : 2007 *Plastics — Measurement of antibacterial activity on plastics surfaces* (MOD)

In addition, symbols which denote the degree of correspondence in the contents between the relevant International Standards and JIS are IDT (identical), MOD (modified), and NEQ (not equivalent) according to ISO/IEC Guide 21-1.

### 2 Normative references

The following standards contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this Standard. The most recent editions of the standards (including amendments) indicated below shall be applied.

JIS K 0050 *General rules for chemical analysis*

JIS K 0950 *Sterilized plastic petri dishes*

2  
Z 2801 : 2010

JIS K 0970 *Piston operated micro-volumetric apparatus*  
 JIS K 3800 *Class II biological safety cabinets*  
 JIS K 8101 *Ethanol (99.5) (Reagent)*  
 JIS K 8150 *Sodium chloride (Reagent)*  
 JIS K 8180 *Hydrochloric acid (Reagent)*  
 JIS K 8263 *Agar (Reagent)*  
 JIS K 8576 *Sodium hydroxide (Reagent)*  
 JIS K 9007 *Potassium dihydrogen phosphate (Reagent)*  
 JIS K 9017 *Dipotassium hydrogenphosphate (Reagent)*  
 JIS R 3505 *Volumetric glassware*  
 JIS Z 8802 *Methods for determination of pH of aqueous solutions*

### 3 Terms and definitions

For the purposes of this Standard, the following terms and definitions apply.

#### 3.1 antibacterial

a state where the growth of bacteria on the surfaces of products is inhibited

#### 3.2 antibacterial agent

agent that inhibits the growth of bacteria on the surfaces of products by using it directly or as a compounded agent

#### 3.3 antibacterial treatment

treatment for antibacterial purpose

#### 3.4 antibacterial product

product on which antibacterial treatment has been performed

#### 3.5 antibacterial activity

value which shows the difference in logarithmic values of number of viable bacteria between the antibacterial product and the untreated product after inoculation followed by incubation of bacteria

#### 3.6 antibacterial effectiveness

effectiveness of antibacterial product determined from the antibacterial activity

### 4 Antibacterial effectiveness

The antibacterial product is determined that it has the antibacterial effectiveness, when the antibacterial activity thereof obtained according to the testing method of this

PROTECTED BY COPYRIGHT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3  
Z 2801 : 2010

Standard is 2.0 or more.

In addition, the value of over 2.0 may be applicable to the determination of antibacterial effectiveness upon the agreement between the parties concerned with delivery.

## 5 Testing method

### 5.1 Bacteria to be used for test

The species of bacteria to be used for the test shall be as follows, and the test shall be carried out on respective bacteria.

- a) *Staphylococcus aureus*
- b) *Escherichia coli*

Examples of bacterial strain to be used for the test are shown in table 1. If the bacterial strain is contributed by the agency of culture collection other than that shown in table 1, it shall be obtained from member agencies of World Federation for Culture Collections (WFCC) or Japan Society for Culture Collections (JSCC), and it shall be the bacterial strain of the same series as that shown in table 1.

Table 1 Bacterial strain used for test

Type of bacteria	Preservation number of bacterial strain	Agency of culture collection
<i>Staphylococcus aureus</i>	ATCC 6538P	American Type Culture Collection
	FDA 209P	Food and Drug Administration
	NBRC 12732	Bioresource Information Center, Department of Biotechnology of National Institute of Technology and Evaluation
	CIP 53.156 DSM 346 NCIB 8625	Collection des Bacteries de l'Institut Pasteur Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen Gmbh National Collection of Industrial and Marine Bacteria Ltd.
<i>Escherichia coli</i>	ATCC 8739	American Type Culture Collection
	NBRC 3972	Bioresource Information Center, Department of Biotechnology of National Institute of Technology and Evaluation
	CIP 53.126 DSM 1576 NCIB 8545	Collection des Bacteries de l'Institut Pasteur Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen Gmbh National Collection of Industrial and Marine Bacteria Ltd.

### 5.2 Chemicals, materials, instruments and apparatuses

The chemicals, materials, instruments and apparatuses used in this Standard shall be as follows, unless otherwise designated.

PROTECTED BY COPYRIGHT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4  
Z 2801 : 2010

Ethanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	Guaranteed reagent specified in JIS K 8101 or superior
Beef extract	For microbial test
Peptone	For microbial test
Sodium chloride (NaCl)	Guaranteed reagent specified in JIS K 8150
Purified water	Conforming to the reference of the 15th revised Japanese Pharmacopocia
Agar	Guaranteed reagent specified in JIS K 8263 or superior
Yeast extract	For microbial test
Tryptone	For microbial test
Glucose	For microbial test
Casim peptone	For microbial test
Soybean peptone	For microbial test
Lecithin	For microbial test
Nonionic surfactant	Polyoxyethylene sorbitan monooleate [Polysorbate 80 (Tween80)]
Potassium dihydrogenphosphate (KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	Guaranteed reagent specified in JIS K 9007
Dipotassium hydrogenphosphate (K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> )	Guaranteed reagent specified in JIS K 9017
Sodium hydroxide (NaOH)	Guaranteed reagent specified in JIS K 8576
Hydrochloric acid (HCl)	Guaranteed reagent specified in JIS K 8180
Cotton stopper	OME cotton, or silicone stopper, metal stopper, merton stopper, etc.
Platinum loop	With a loop of about 4 mm at the point
Dry-heat sterilizer	Capable of keeping the temperature from 160 °C to 180 °C
Autoclave	Capable of keeping at 121 °C in temperature (corresponding to 103 kPa in pressure)
Safety cabinet	Having performance conforming to JIS K 3800 or equivalent
pH meter	Conforming to JIS Z 8802
Chemical balance	Having performance conforming to JIS K 0050 or equivalent
Clean bench	For microbial test
Measuring pipette	Having precision conforming to JIS K 0970 or Class A in

PROTECTED BY COPYRIGHT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5  
Z 2801 : 2010

	JIS R 3505, or equivalent
Incubator	Capable of keeping the temperature $\pm 1$ °C
Petri dish	Made of glass with about 90 mm of inside diameter, or conforming to No. 90A or No. 90B specified in JIS K 0950
Stomacher pouch	For microbial test
Stomacher	For microbial test
Film	Material such as polyethylene film not affecting microbial growth and that does not absorb water but with good adherence, the thickness of which is not specified

### 5.3 Method of sterilization

The glassware such as test tube and measuring pipette to be used shall be washed sufficiently with alkaline or neutral detergent, rinsed sufficiently with water, then dried and sterilized with dry-heat, or sterilized with high-pressure steam. The method of sterilization shall be in accordance with the following a) or b). The case where the platinum loop and the test tube are sterilized with flame shall be in accordance with the following c).

- Dry-heat sterilization** Objects to be sterilized shall be placed in a dry-heat sterilizer for 60 min or more in the case of the temperature of 170 °C or 120 min or more in the case of the temperature of 160 °C. After the completion of dry-heat sterilization, if the cotton stopper or the wrapping paper of objects to be sterilized is wetted with water, that instrument shall not be used.
- High pressure steam sterilization** Water is put in an autoclave, and the objects to be sterilized which are in a metal net basket shall be placed on a metal net shelf in the autoclave. The lid of autoclave is tightened, heated, and kept at temperature of 121 °C (corresponding to 103 kPa in pressure) for 15 min to 20 min. After heating is suspended followed by naturally cooling to 100 °C or under, the exhaust valve is opened to draw off the steam. The sterilized objects shall be taken out after opening the lid, and cooled on a clean bench or in a safety cabinet, if necessary. In order to keep the autoclave clean from contamination by culture medium or processing chemicals, it shall be washed with neutral detergent, if necessary, and rinsed sufficiently with water.
- Flame sterilization** The objects or parts to be sterilized shall be placed into a gas or alcohol flame. For a platinum loop, it shall be red heated sufficiently, and for a test tube, it shall be touched with the flame for 2 s or 3 s.

### 5.4 Culture medium, etc.

The culture medium, etc. of which the composition is as follows shall be used. A commercially available article may be used, if it is of the same composition.

- Nutrient broth [1/500 nutrient broth (1/500 NB)]** Prepared so that 3.0 g of beef extract, 10.0 g of peptone and 5.0 g of sodium chloride which are weighed out by the chemical balance shall be added to 1 000 ml of purified water or ion-exchanged

PROTECTED BY COPYRIGHT

6  
Z 2801 : 2010

water, then mixed and dissolved completely, and diluted 500 times with purified water. The pH thereof shall be adjusted to 6.8 to 7.2 (25 °C) with a sodium hydroxide solution or a hydrochloric acid solution by using the pH meter, and it shall be sterilized with high pressure steam. If it is not used immediately after preparation, it shall be preserved at a temperature of 5 °C to 10 °C. 1/500 NB that has been kept for one week or longer after preparation shall not be used.

- b) **Nutrient agar** Prepared so that 5.0 g of beef extract, 10.0 g of peptone and 5.0 g of sodium chloride shall be added to 1 000 ml of purified water or ion-exchanged water, and mixed. The pH thereof shall be adjusted to 7.0 to 7.2 (25 °C) with a sodium hydroxide solution or a hydrochloric acid solution. 15.0 g of powder agar shall be added and dissolved by heating, a cotton stopper shall be put, and it shall be sterilized with high pressure steam. If it is not used immediately after preparation, it shall be preserved at a temperature of 5 °C to 10 °C. The nutrient agar that has been kept for one month or longer after preparation shall not be used.
- c) **Plate count agar** Prepared so that 2.5 g of yeast extract, 5.0 g of tryptone and 1.0 g of glucose which are weighed out by the chemical balance shall be added to 1 000 ml of purified water or ion-exchanged water, and mixed. The pH thereof shall be adjusted to 7.0 to 7.2 (25 °C) with a sodium hydroxide solution or a hydrochloric acid solution by using the pH meter. 15.0 g of powder agar shall be added and dissolved by heating, and it shall be sterilized with high pressure steam. If it is not used immediately after preparation, it shall be preserved at a temperature of 5 °C to 10 °C. The plate count agar that has been kept for one month or longer after preparation shall not be used.
- d) **Slant culture medium** Prepared so that 6 ml to 10 ml of the nutrient agar of b) which has been preliminary warmed and dissolved shall be poured into a test tube, a cotton stopper shall be put, and it shall be sterilized with high pressure steam. After sterilization, the test tube shall be placed in a clean room at a slant of about 15° to the horizontal plane, and the content shall be solidified. If it is not used immediately after preparation, it shall be preserved at a temperature of 5 °C to 10 °C. If there is no condensed water, the content shall be dissolved and solidified again, then used. The slant culture medium that has been kept for one month or longer after preparation shall not be used.
- e) **SCDLP broth** Prepared so that 17.0 g of casein peptone, 3.0 g of soybean peptone, 5.0 g of sodium chloride, 2.5 g of disodium hydrogen phosphate, 2.5 g of glucose and 1.0 g of lecithin which are weighed out by the chemical balance shall be added to 1 000 ml of purified water or ion-exchanged water, then mixed and dissolved. Then, 7.0 g of nonionic surfactant shall be added and dissolved. The pH thereof shall be adjusted to 6.8 to 7.2 (25 °C) with a sodium hydroxide solution or a hydrochloric acid solution by using the pH meter, and it shall be sterilized with high pressure steam. If it is not used immediately after preparation, it shall be preserved at 5 °C to 10 °C. The SCDLP broth that has been kept for one month or longer after preparation shall not be used.
- f) **Phosphate buffer solution** Prepared so that 34.0 g of potassium dihydrogen phos-

PROTECTED BY COPYRIGHT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

phate which is weighed out by the chemical balance shall be added to 500 ml of purified water or ion-exchanged water, then mixed and dissolved. The pH thereof shall be adjusted to 6.8 to 7.2 (25 °C) with a sodium hydroxide solution or a hydrochloric acid solution by using the pH meter. Further, purified water or ion-exchanged water shall be added to make it 1 000 ml, and it shall be sterilized with high pressure steam. The phosphate buffer solution that has been kept for one month or longer after preparation shall not be used.

- g) **Phosphate-buffered physiological saline** The phosphate buffer solution of D (0.85 % sodium chloride solution) shall be diluted 800 times with physiological saline. If necessary, it shall be dispensed into test tubes or Erlenmeyer flasks, cotton stoppers shall be put, and it shall be sterilized with high-pressure steam. If it is not used immediately after preparation, it shall be preserved at 5 °C to 10 °C. The phosphate-buffered physiological saline that has been kept for one month or longer after preparation shall not be used.

#### 5.5 Preservation of bacteria

Bacteria shall be transferred aseptically. A safety cabinet shall be used, if necessary. Both the original strain and the slant culture medium (nutrient agar) of 5.4 d) to be transferred shall be held in one hand, the stem of the platinum loop shall be held in the other hand, and the cotton stopper shall be pulled out with this hand, then the mouth of the test tube shall be sterilized with flame. The platinum loop shall be sterilized with flame, the tip of the platinum loop shall be put in the condensed water part on the new slant culture medium to be cooled. The bacteria shall be scraped out from the part of original strain by using this platinum loop, and shall be streaked on a fresh slant culture medium.

The method thereof shall be such that, as shown in figure 1, the tip of the platinum loop shall be put in the condensed water to disperse the bacteria, and a straight line shall be drawn aslant to the upper part with the platinum loop, or the tip of the platinum loop shall be put in the condensed water again and a zigzag line shall be drawn aslant to the upper part with the platinum loop.

The mouth of the test tube shall be sterilized again with flame, and a cotton stopper shall be put as it was. The platinum loop used shall be sterilized with flame. The transferred slant culture medium shall be incubated at a temperature of 35 °C  $\pm$  1 °C for 24 h to 48 h in the incubator, then it shall be stored at 5 °C to 10 °C. Within one month of the transfer, the next transfer shall be carried out in a same way to be the passage culture. The number of passages shall be up to five times counted from the original strain obtained from the agency of culture collection. Furthermore, that kept for one month or more from the last transfer shall not be used for the following transfer.

For the bacterial strain obtained from the agency of culture collection which has been preserved by methods such as lyophilization and freezing for long life preservation, the number of passages cultured from the original strain to prepare the preserved bacterial strain shall be considered as the number of passages of the preserved bacte-

8  
Z 2801 : 2010

rial strain. If this preserved bacterial strain is used for the test, it shall be used up to times of the number which is obtained by subtracting the number of passages of the preserved bacterial strain from five.

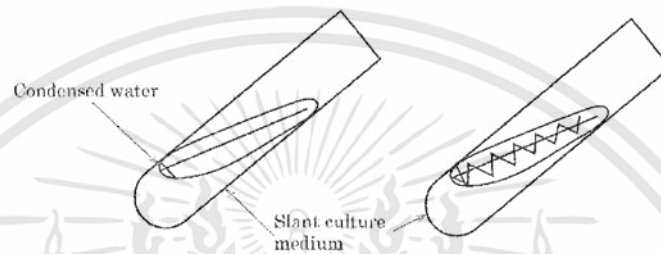


Figure 1 Transfer of bacteria

#### 5.6 Test operation

Bacteria shall be handled aseptically, and attention shall be paid to the contamination of testing personnel, instruments and working environment with bacteria as follows. A safety cabinet shall be used, if necessary.

- a) **Pre-incubation of test bacteria** One platinum loop of bacteria shall be transferred from the preserved bacterial strain of 5.5 to the slant culture medium of 5.4 d), and incubated at a temperature of  $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  for 16 h to 24 h in the incubator. Further, from this incubated bacteria, one platinum loop of bacteria shall be transferred to a fresh slant culture medium and incubated at a temperature of  $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  for 16 h to 20 h.
- b) **Preparation of test piece** The preparation of test piece shall be as follows.
  - 1) The flat part of the product shall be cut into a square of  $50\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$  (within 10 mm in thickness) and made as the test piece of standard size. If it is difficult or impossible to cut the product into this square, a test piece of shape and size other than specified may be used if it can be covered with a film of the surface area of  $400\text{ mm}^2$  to  $1\text{ }600\text{ mm}^2$ .
  - 2) Untreated test pieces shall be cut out from the antibacterial untreated product or the film. Among six untreated test pieces, three shall be used for the measurement of number of viable bacteria immediately after inoculation with test inoculum and another three shall be used for the measurement of number of viable bacteria after the incubation for 24 h.
  - 3) ~~If untreated test pieces cannot be prepared, the film of 5.2 may be used.~~ Attention shall be sufficiently paid to contamination with micro-organisms, mutual contamination between products and filth for the preparation of test pieces. It is desirable to sample the test pieces from the product itself, but if it is difficult to

PROTECTED BY COPYRIGHT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9  
Z 2801 : 2010

prepare the test pieces because of the shape of the product, test pieces may be prepared from the product separately processed to a plate shape with the same raw material and the processing method.

4) ~~If the prescribed number of untreated test pieces cannot be prepared and half the number (three pieces) can be prepared, the three untreated test pieces shall be used for the measurement of number of viable bacteria after incubation for 24 h and the film shall be alternatively used for the measurement of number of viable bacteria immediately after inoculation with test inoculum. When half the number (three pieces) cannot be prepared, the film shall be used for all.~~

c) ~~Cleaning of test piece The whole surface of test piece of b) shall be lightly wiped with pharmacopeia gauze or absorbent cotton immersed in ethanol two or three times, and dried completely.~~

If changes such as softening of test piece, dissolution of surface coating and elution of components occur after these treatments and it is considered that these treatments affect the test results, the test piece shall be cleaned by another appropriate method, or used as it is without cleaning.

d) ~~Preparation of test inoculum One platinum loop of bacteria of the test bacteria pre-incubated in a) shall be dispersed evenly in a small amount of 1/500 NB of 5.4 a), and the bacteria concentration shall be estimated with direct microscopic observation or other appropriate method. This inoculum shall be diluted with 1/500 NB appropriately and adjusted so that the bacteria concentration becomes  $2.5 \times 10^5$  to  $10 \times 10^5$  cells/ml, and this shall be used as the test inoculum. If the test inoculum is not used immediately, it shall be cooled on ice (0 °C) and shall be used within 2 h after storage.~~

e) ~~Inoculation with test inoculum The inoculation with test inoculum shall be as follows.~~

1) ~~Each test piece of c) shall be placed in a sterilized petri dish making the test surface up. The test surface shall be the surface of the product on which antibacterial treatment is performed. Even when the antibacterial treatment is processed to a depth, the cross section shall not be used as the test surface.~~

2) ~~Exactly 0.4 ml of test inoculum of d) shall be taken with a measuring pipette and instilled onto each test piece in the petri dish. The volume of inoculated inoculum on the test piece whose size is other than the standard size shall be proportionally divided by the ratio of the area of covering film. Even if the test piece is of the standard size, when the volume of inoculum based on the provision is inoculated on the test piece of very good wettability such as ceramics, tile, enamel and glass, the film may move at a small slant and the inoculum may escape from the edge of the film. In this case, the volume of inoculated inoculum may be reduced up to 1/4 of the specified volume. However, even when the volume of inoculated inoculum is reduced, the bacteria concentration inoculated on the test piece shall be  $6.2 \times 10^5$  to  $2.5 \times 10^4$  cells/cm<sup>2</sup>.~~

3) ~~The instilled test inoculum shall be covered with a film, the film shall be gently~~

PROTECTED BY COPYRIGHT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10  
Z 2801 : 2010

pressed so that the test inoculum spreads across the film while paying attention so that it does not spill over from the edge of film, and the lid of the petri dish shall be placed (see figure 2). The standard size of film shall be the square of  $40\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$ . If the test piece is not that of the standard size, the size shall be adjusted so that the film can be placed within  $2.5\text{ mm}$  to  $5.0\text{ mm}$  from four sides of the test piece, but the size of film shall not be reduced to less than  $400\text{ mm}^2$ . Further, if it is difficult to adhere the film closely since the shape of test piece is not flat, if the test inoculum spreads over the test piece without covering the film since the test piece is hydrophilic or water absorbent or the like, the process of covering the film may be omitted. When the covering process of film is omitted, the standard size of test piece which is prepared in 5.6 b) 1) shall be the square of  $40\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$  (within  $10\text{ mm}$  in thickness).

On the inoculation with test inoculum, if it is difficult to prevent the leakage beyond the edges of the film on the case where the surface of sample is very hydrophilic and the like, the volume of inoculum may be reduced up to  $0.1\text{ ml}$ . In this case, the concentration of bacteria cells in inoculum shall be increased to provide the same number of bacterial cells as that of inoculated inoculum of normal volume.

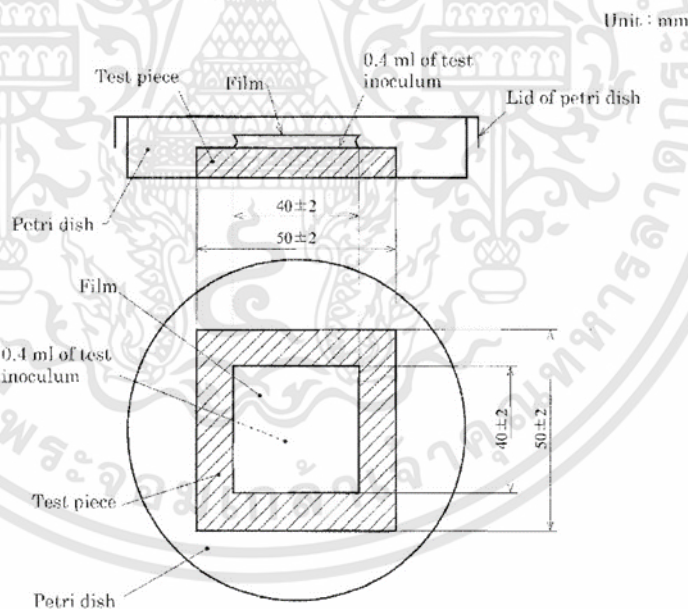


Figure 2 Instillation of inoculum on test piece and covering by film

PROTECTED BY COPYRIGHT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11  
Z 2801 : 2010

- f) **Incubation of inoculated test piece with test inoculum** The petri dish containing the inoculated test piece with the test inoculum (three untreated test pieces and three antibacterial test pieces) shall be incubated at a temperature of  $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  and a relative humidity of 90 % or more for  $24\text{ h} \pm 1\text{ h}$ .

NOTE : The antibacterial effectiveness of a product is evaluated from the antibacterial activity obtained from the test at the incubation temperature specified here; however the test at the temperature established considering the actual use of the antibacterial product (such as a room temperature) may be carried out together, if agreed upon all parties concerned with delivery.

- g) **Wash-out of test bacteria inoculated** The wash-out of test bacteria inoculated shall be as follows.
- 1) **Test piece immediately after inoculation with test inoculum** For three untreated test pieces immediately after inoculation with test inoculum, the covering film and the test piece shall be placed on another petri dish respectively with caution so that the inoculum does not spill. By adding 10 ml of SCDLP broth of 5.4 e), the inoculum on the untreated test piece shall be washed out with a measuring pipette at least four times, and this wash-out inoculum shall be recovered completely. The washings shall be immediately proceeded to the measurement of the number of viable bacteria.
  - 2) **Test piece after incubation** For the test piece after the incubation of f), the test bacteria shall be washed out in a similar way to 1). The washings shall be immediately proceeded to the measurement of the number of viable bacteria.
  - 3) For the wash-out of test bacteria, the method such that the covering film and the test piece are placed in a sterilized stomacher pouch by using sterilized tweezers with caution so that the inoculum does not spill, 10 ml of SCDLP broth in 5.4 e) is added with a measuring pipette and the test piece and the covering film are kneaded sufficiently with hands or an extractor (such as stomacher) for the microbial test is applicable. Or if other methods show a recovery rate equivalent to or superior to the method above, such methods may be used. If it is difficult to wash out the test bacteria with 10 ml of SCDLP broth because of the size and characteristics of the test piece, the volume may be increased.
- h) **Measurement of number of viable bacteria by agar plate culture method** Exactly 1 ml of the washings of g) shall be taken with a measuring pipette and added in a test tube containing 9.0 ml of phosphate-buffered physiological saline of 5.4 g), and sufficiently mixed. Then, 1 ml shall be taken from this test tube with a new measuring pipette and add in another test tube containing 9.0 ml of phosphate-buffered physiological saline, and sufficiently mixed. These procedures shall be repeated to prepare 10-fold serial dilutions. 1 ml each of the washings and each dilution shall be dispensed into two sterilized petri dishes. To each petri dish, 15 ml to 20 ml of the plate count agar of 5.4 c) warmed at  $46\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $48\text{ }^{\circ}\text{C}$  shall be added and sufficiently mixed. By placing the lids, the petri dishes shall be left as they are at a room temperature. After solidifying the culture medium, the petri dishes shall be

PROTECTED BY COPYRIGHT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12  
Z 2801 : 2010

turned over, and incubated in the incubator at a temperature of  $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  for 40 h to 48 h. After incubation, the number of colonies in a serially diluted petri dish in which 30 to 300 colonies appear shall be measured, as a rule. If the number of colonies is less than 30 in the agar plate dispensed with 1 ml of the washings, the number of colonies shall be measured for this plate. If there are not any colony formations in any agar plate, then "< 1" shall be recorded. Further, if the number of colonies is not inversely proportional to the dilution ratio, since it is considered that the formation of colonies is inhibited by the effects of the antibacterial agent, the number of viable bacteria shall be determined using a method which forms colonies without being affected by the antibacterial agent with the use of an inactivating agent or dilution.

NOTE : For the methods of adoption of the number of colonies other than specified above, refer to 1.2 Microorganism tests, 3) Viable cell count of bacteria, (1) Pour plating method of Standard Method of Analysis for Hygienic Chemists (2005) edited by the Pharmaceutical Society of Japan, or Chapter 2 Bacteria 2. Spoilage indicator bacteria, 1. Total bacterial count of Standard Methods of Analysis in Food Safety Regulation (2004) supervised by the Environmental Health Bureau of the Ministry of Health and Welfare, Japan.

#### 5.7 Calculation of number of viable bacteria

The number of viable bacteria shall be obtained by counts of colonies measured according to equation (1).

$$N = \frac{C \times D \times V}{A} \quad (1)$$

where,  $N$  : number of viable bacteria (per 1 cm<sup>2</sup> of test piece)  
 $C$  : count of colonies (average count of colonies of two petri dishes adopted)  
 $D$  : dilution factor (that of dilution dispensed into petri dishes adopted)  
 $V$  : volume of SCDLP broth used for wash-out (ml)  
 $A$  : surface area of covering film (cm<sup>2</sup>)

In the case where the covering film is omitted in 5.6 e) 3),  $A$  shall be the surface area (cm<sup>2</sup>) of the antibacterial test piece or the untreated test piece.

The number of viable bacteria shall be expressed with two significant figures by rounding off the third significant figure. When the count of colonies  $C$  is "< 1",  $C$  is taken as "1", and the number of viable bacteria shall be calculated corresponding to  $V$ ,  $A$ ,  $D$  at that time. For example, when  $V$  is 10 ml,  $A$  is 16 cm<sup>2</sup> and  $D$  is 1, it shall be expressed as "≤0.63".

#### 5.8 Test results

The test results shall be as follows.

- a) Determination of conditions of test validation When the following three test conditions are all satisfied, the test shall be determined to be valid. Unless all the con-

PROTECTED BY COPYRIGHT

13  
Z 2801 : 2010

ditions are satisfied, the test shall be determined to be not valid, and a retest shall be carried out.

- 1) The following equation (2) is established for the logarithmic value of the number of viable bacteria immediately after inoculation on untreated test piece.

$$\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{mean}}} \leq 0.2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

where,  $I_{\max}$  : maximum logarithm number of viable bacteria  
 $I_{\min}$  : minimum logarithm number of viable bacteria  
 $I_{\text{mean}}$  : average of logarithm numbers of viable bacteria of three test pieces

- 2) The average of the number of viable bacteria immediately after inoculation on the untreated test piece shall be within the range of  $6.2 \times 10^3$  to  $2.5 \times 10^4$  cells/cm<sup>2</sup>.  
 3) The number of viable bacteria on untreated test piece after 24 h shall be not less than 62 cells/cm<sup>2</sup> for all three test pieces. When a film is used for the untreated test piece, however, the number of viable cells of bacteria after 24 h shall be not less than  $6.2 \times 10^2$  cells/cm<sup>2</sup> for all three test pieces.

- b) Calculation of antibacterial activity When the test has been determined to be valid, the antibacterial activity shall be obtained according to equation (3). The value shall be recorded to the first decimal place by rounding the second decimal place down. When the number of viable bacteria is "<0.63", it shall be taken as "0.63" and the average of logarithm numbers shall be calculated.

$$R = (U_1 - U_0) - (A_1 - U_0) = U_1 - A_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

where,  $R$  : antibacterial activity  
 $U_0$  : average of logarithm numbers of viable bacteria immediately after inoculation on untreated test pieces  
 $U_1$  : average of logarithm numbers of viable bacteria after inoculation on untreated test pieces after 24 h  
 $A_1$  : average of logarithm numbers of viable bacteria after inoculation on antibacterial test piece after 24 h

#### 6 Record of test results

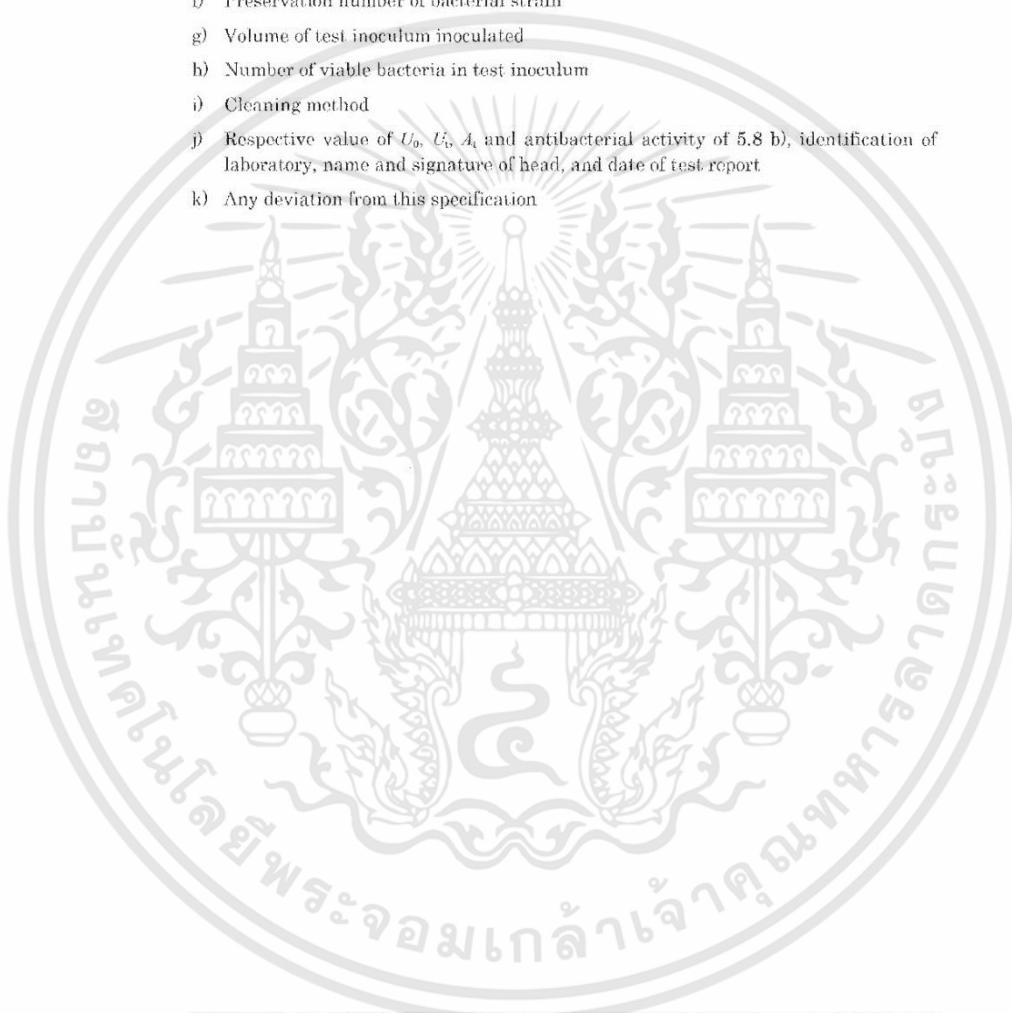
The following matters shall be listed in the test results of antibacterial products such as plastic products.

- a) Number or title of this Standard  
 b) Commencement date of test  
 c) Type, size, shape and thickness of antibacterial-treated test piece and untreated test piece  
 d) Type, size, shape and thickness of film

PROTECTED BY COPYRIGHT

14  
Z 2801 : 2010

- e) Type of test bacteria
- f) Preservation number of bacterial strain
- g) Volume of test inoculum inoculated
- h) Number of viable bacteria in test inoculum
- i) Cleaning method
- j) Respective value of  $U_0$ ,  $U_1$ ,  $A_1$  and antibacterial activity of 5.8 b), identification of laboratory, name and signature of head, and date of test report
- k) Any deviation from this specification



---

#### Bibliography

JIS L 1902 *Testing for antibacterial activity and efficacy on textile products*

PROTECTED BY COPYRIGHT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ง.1 ข้อมูลผลการทดสอบ  $\text{TiO}_2$  ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES ด้วยเทคนิค XRD

```

*** Basic Data Process ***

# Data Infomation
Group           : ChE-KMITL-2018
Data            : 20180328 1
Sample Nmae    : TiO2/APTES
Comment        : Sukanp
Date & Time    : 03-28-18 10:15:15

# Measurement Condition
X-ray tube
target         : Cu
voltage        : 40.0 (kV)
current        : 30.0 (mA)

Slits
Auto Slit      : not Used
divergence slit : 1.00000 (deg)
scatter slit   : 1.00000 (deg)
receiving slit : 0.15000 (mm)

Scanning
drive axis     : Theta-2Theta
scan range    : 20.0000 - 80.0000 (deg)
scan mode     : Continuous Scan
scan speed    : 2.0000 (deg/min)
sampling pitch : 0.0200 (deg)
preset time   : 0.60 (sec)

# Data Process Condition
Smoothing      [ AUTO ]
smoothing points : 11
B.G.Subtruction [ AUTO ]
sampling points : 11
repeat times   : 30
Ka1-a2 Separate [ MANUAL ]
Ka1 a2 ratio   : 50 (%)
Peak Search    [ AUTO ]
differential points : 9
FWHM threshold : 0.050 (deg)
intensity threshold : 30 (par mil)
FWHM ratio (n-1)/n : 2
System error Correction [ YES ]
Precise peak Correction [ NO ]

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ง.2 ข้อมูลผลการทดสอบ  $\text{TiO}_2$  ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES ด้วยเทคนิค XRD (ต่อ)

\*\*\* Basic Data Process \*\*\*

Group : ChE-KMITL-2018  
Data : 20180328\_1

# Strongest 3 peaks

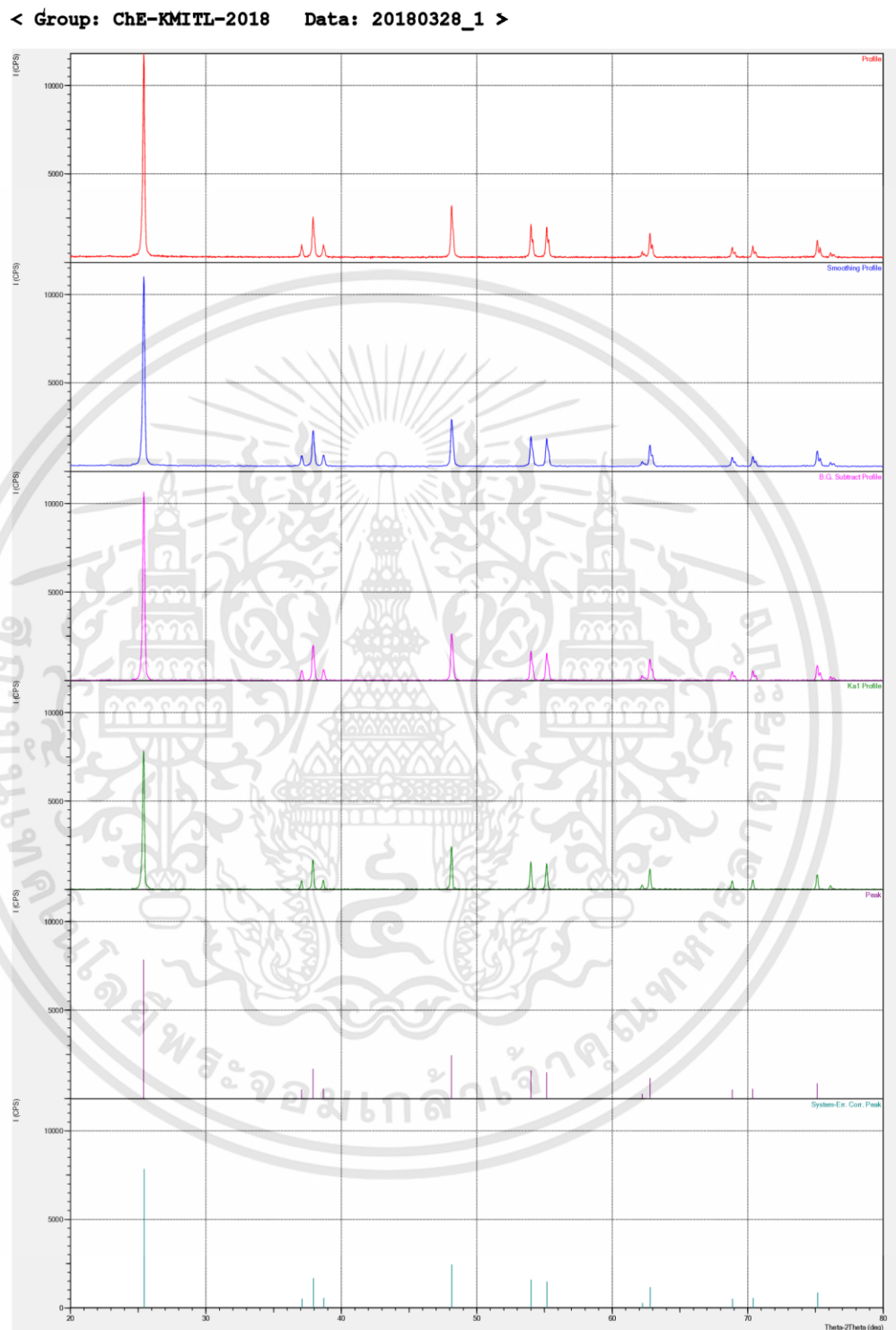
no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	1	25.4517	3.49681	100	0.15860	4693	44790
2	5	48.1673	1.88767	31	0.14840	1451	12407
3	3	37.9419	2.36951	21	0.15140	990	8797

# Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	25.4517	3.49681	100	0.15860	4693	44790
2	37.1026	2.42116	6	0.13840	287	2249
3	37.9419	2.36951	21	0.15140	990	8797
4	38.7136	2.32403	7	0.14590	316	2716
5	48.1673	1.88767	31	0.14840	1451	12407
6	54.0219	1.69610	20	0.14800	937	7923
7	55.1864	1.66303	19	0.15090	874	7637
8	62.2330	1.49058	3	0.15260	146	1508
9	62.8099	1.47827	15	0.15390	684	6236
10	68.8801	1.36205	6	0.15480	289	2667
11	70.3980	1.33636	7	0.15390	315	2759
12	75.1565	1.26311	11	0.15350	500	4380

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ง.3 ข้อมูลผลการทดสอบ  $\text{TiO}_2$  ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES ด้วยเทคนิค XRD (ต่อ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ง.4 ข้อมูลผลการทดสอบ  $\text{TiO}_2$  ด้วยเทคนิค XRD

```

*** Basic Data Process ***

# Data Infomation
Group           : ChE-KMITL-2018
Data           : 20180328_2
Sample Nmae    : TiO2
Comment        : Sukanp
Date & Time    : 03-28-18 10:49:37

# Measurement Condition
X-ray tube
target         : Cu
voltage        : 40.0 (kV)
current        : 30.0 (mA)

Slits
Auto Slit      : not Used
divergence slit : 1.00000 (deg)
scatter slit   : 1.00000 (deg)
receiving slit  : 0.15000 (mm)

Scanning
drive axis     : Theta-2Theta
scan range     : 20.0000 - 80.0000 (deg)
scan mode      : Continuous Scan
scan speed     : 2.0000 (deg/min)
sampling pitch : 0.0200 (deg)
preset time    : 0.60 (sec)

# Data Process Condition
Smoothing      [ AUTO ]
smoothing points : 9
B.G.Subtruction [ AUTO ]
sampling points : 9
repeat times    : 30
Ka1-a2 Separate [ MANUAL ]
Ka1 a2 ratio    : 50 (%)
Peak Search    [ AUTO ]
differential points : 9
FWHM threshold  : 0.050 (deg)
intensity threshold : 30 (par mil)
FWHM ratio (n-1)/n : 2
System error Correction [ YES ]
Precise peak Correction [ NO ]

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ๓.5 ข้อมูลผลการทดสอบ  $\text{TiO}_2$  ด้วยเทคนิค XRD (ต่อ)

**\*\*\* Basic Data Process \*\*\***

Group : ChE-KMITL-2018  
Data : 20180328\_2

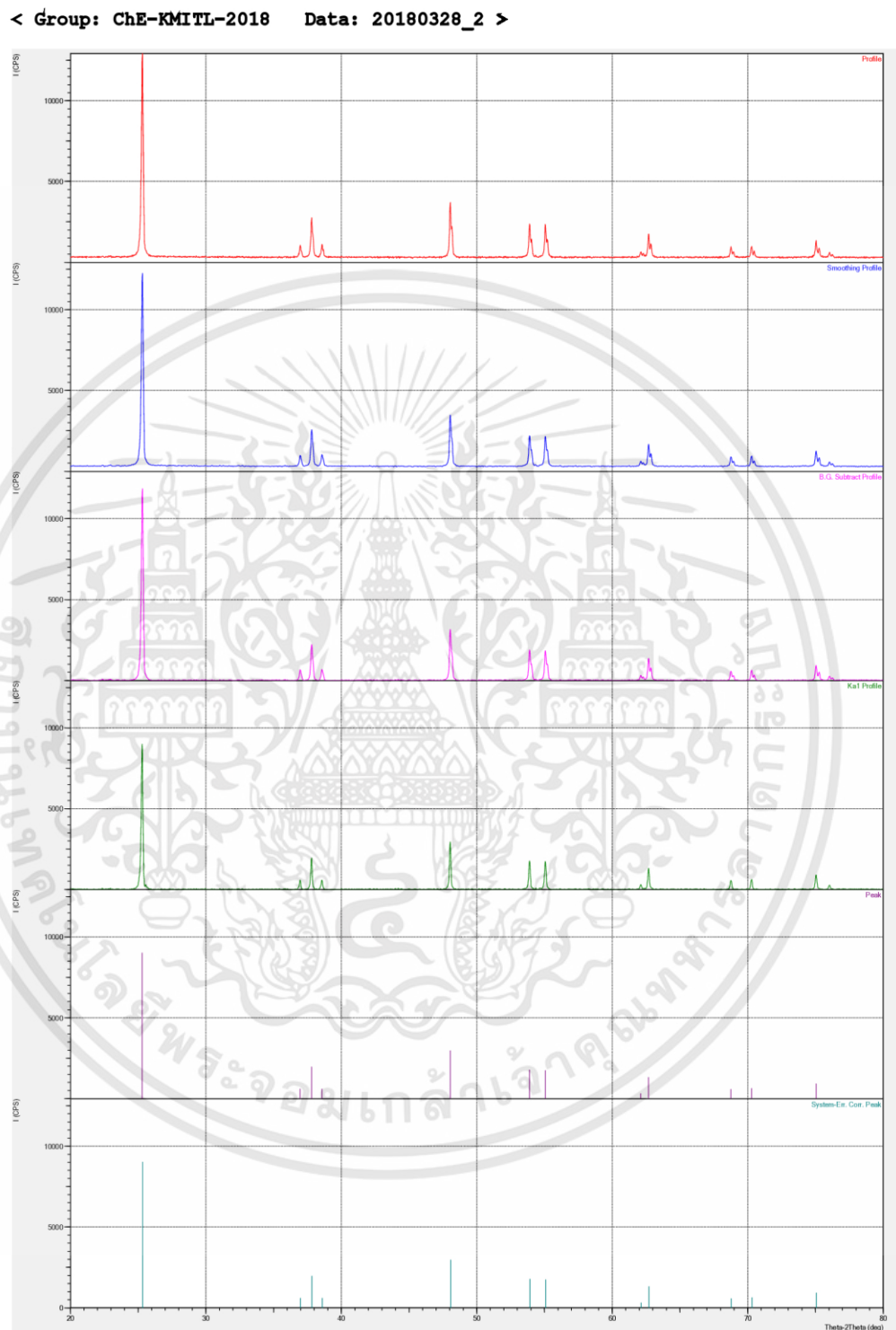
**# Strongest 3 peaks**

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	1	25.3463	3.51111	100	0.14010	5399	46339
2	5	48.0694	1.89128	33	0.13080	1764	13776
3	3	37.8376	2.37580	22	0.13050	1164	9155

**# Peak Data List**

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	25.3463	3.51111	100	0.14010	5399	46339
2	36.9964	2.42786	6	0.12000	345	2530
3	37.8376	2.37580	22	0.13050	1164	9155
4	38.6042	2.33037	6	0.13240	346	2770
5	48.0694	1.89128	33	0.13080	1764	13776
6	53.9228	1.69898	20	0.13470	1057	8645
7	55.0911	1.66568	19	0.13550	1032	8795
8	62.1361	1.49267	3	0.13390	174	1675
9	62.7125	1.48033	14	0.13310	782	6461
10	68.7861	1.36368	6	0.14480	330	2737
11	70.3093	1.33782	7	0.13770	371	3000
12	75.0730	1.26431	10	0.14170	544	4634

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ง.6 ข้อมูลผลการทดสอบ  $\text{TiO}_2$  ด้วยเทคนิค XRD (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 ข้อมูลผลการทดลองความแข็งแรงดึง

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	ABS	TiO <sub>2</sub>	APTES	Tensile strength (MPa)
1	18	1	1	99.4	0.1	0.5	17.02
2	1	1	1	99.8	0.1	0.1	15.29
3	10	1	1	99.4	0.5	0.1	23.46
4	4	2	1	99.4	0.3	0.3	22.52
5	17	2	1	99.6	0.1	0.3	15.37
6	7	2	1	99.6	0.3	0.1	19.35
7	8	0	1	99.5	0.2	0.2	18.02
8	11	1	1	99.4	0.1	0.5	17.40
9	14	1	1	99.8	0.1	0.1	15.08
10	15	1	1	99.4	0.5	0.1	23.12
11	12	2	1	99.4	0.3	0.3	21.37
12	19	2	1	99.6	0.1	0.3	14.91
13	21	2	1	99.6	0.3	0.1	19.21
14	16	0	1	99.5	0.2	0.2	17.79
15	6	1	1	99.4	0.1	0.5	16.97
16	3	1	1	99.8	0.1	0.1	15.22
17	20	1	1	99.4	0.5	0.1	21.87
18	13	2	1	99.4	0.3	0.3	21.81
19	9	2	1	99.6	0.1	0.3	15.12
20	5	2	1	99.6	0.3	0.1	18.92
21	2	0	1	99.5	0.2	0.2	17.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.2 ข้อมูลผลการทดลองมอดูลัสแรงดึง

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	ABS	TiO <sub>2</sub>	APTES	Young's modulus (GPa)
1	18	1	1	99.4	0.1	0.5	1.79
2	1	1	1	99.8	0.1	0.1	0.82
3	10	1	1	99.4	0.5	0.1	1.05
4	4	2	1	99.4	0.3	0.3	0.97
5	17	2	1	99.6	0.1	0.3	1.05
6	7	2	1	99.6	0.3	0.1	0.77
7	8	0	1	99.5	0.2	0.2	0.84
8	11	1	1	99.4	0.1	0.5	1.72
9	14	1	1	99.8	0.1	0.1	0.96
10	15	1	1	99.4	0.5	0.1	1.21
11	12	2	1	99.4	0.3	0.3	1.04
12	19	2	1	99.6	0.1	0.3	1.11
13	21	2	1	99.6	0.3	0.1	0.89
14	16	0	1	99.5	0.2	0.2	0.79
15	6	1	1	99.4	0.1	0.5	1.68
16	3	1	1	99.8	0.1	0.1	0.91
17	20	1	1	99.4	0.5	0.1	1.17
18	13	2	1	99.4	0.3	0.3	1.08
19	9	2	1	99.6	0.1	0.3	1.09
20	5	2	1	99.6	0.3	0.1	1.02
21	2	0	1	99.5	0.2	0.2	0.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.3 ข้อมูลผลการทดลองระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	ABS	TiO <sub>2</sub>	APTES	Elongation at break (%)
1	18	1	1	99.4	0.1	0.5	1.06
2	1	1	1	99.8	0.1	0.1	0.83
3	10	1	1	99.4	0.5	0.1	1.07
4	4	2	1	99.4	0.3	0.3	1.19
5	17	2	1	99.6	0.1	0.3	0.78
6	7	2	1	99.6	0.3	0.1	0.98
7	8	0	1	99.5	0.2	0.2	0.90
8	11	1	1	99.4	0.1	0.5	1.12
9	14	1	1	99.8	0.1	0.1	0.91
10	15	1	1	99.4	0.5	0.1	1.33
11	12	2	1	99.4	0.3	0.3	1.06
12	19	2	1	99.6	0.1	0.3	0.89
13	21	2	1	99.6	0.3	0.1	1.07
14	16	0	1	99.5	0.2	0.2	0.84
15	6	1	1	99.4	0.1	0.5	1.15
16	3	1	1	99.8	0.1	0.1	0.71
17	20	1	1	99.4	0.5	0.1	1.09
18	13	2	1	99.4	0.3	0.3	1.23
19	9	2	1	99.6	0.1	0.3	0.74
20	5	2	1	99.6	0.3	0.1	0.86
21	2	0	1	99.5	0.2	0.2	0.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ฉ

ผลการ Run ผลทดสอบอง  $\hat{Y}_1$ ,  $\hat{Y}_2$  และ  $\hat{Y}_3$  ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab

ตารางที่ ๑.1 ผลการ Run ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ผลทดสอบความแข็งแรงดึง

### Regression for Mixtures: Tensile strength versus ABS, TiO<sub>2</sub>, APTES

Estimated Regression Coefficients for Tensile strength (component proportions)

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
ABS	14	0	*	*	25.95
TiO <sub>2</sub>	2136	159	*	*	20.88
APTES	-932	231	*	*	44.08
ABS*ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES	-567961	200754	-2.83	0.012	113.86
ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES*APTES	334186437	63160308	5.29	0.000	103.45

S = 0.431929      PRESS = 5.51882  
 R-Sq = 98.22%      R-Sq(pred) = 96.71%      R-Sq(adj) = 97.77%

Analysis of Variance for Tensile strength (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	164.660	164.6599	41.1650	220.65	0.000
Linear	2	152.998	34.1031	17.0515	91.40	0.000
Special Quartic	2	11.662	11.6621	5.8310	31.26	0.000
ABS*ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES	1	6.439	1.4933	1.4933	8.00	0.012
ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES*APTES	1	5.223	5.2229	5.2229	28.00	0.000
Residual Error	16	2.985	2.9850	0.1866		
Lack-of-Fit	2	0.551	0.5507	0.2753	1.58	0.240
Pure Error	14	2.434	2.4343	0.1739		
Total	20	167.645				

Estimated Regression Coefficients for Tensile strength (component amounts)

Term	Coef
ABS	0.143206
TiO <sub>2</sub>	21.3614
APTES	-9.31971
ABS*ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES	-0.00567961
ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES*APTES	3.34186

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.2 ผลการ Run ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ผลทดสอบมอดูลัสแรงดึง

### Regression for Mixtures: Modulus versus ABS, TiO2, APTES

Estimated Regression Coefficients for Modulus (component proportions)

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
ABS	1	0	*	*	25.95
TiO2	287	31	*	*	20.88
APTES	137	45	*	*	44.08
ABS*ABS*TiO2*APTES	-291984	39006	-7.49	0.000	113.86
ABS*TiO2*APTES*APTES	62417756	12272034	5.09	0.000	103.45

S = 0.0839236 PRESS = 0.179743  
R-Sq = 93.62% R-Sq(pred) = 89.82% R-Sq(adj) = 92.02%

Analysis of Variance for Modulus (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	1.65283	1.65283	0.413208	58.67	0.000
Linear	2	1.06086	0.74472	0.372361	52.87	0.000
Special Quartic	2	0.59198	0.59198	0.295988	42.02	0.000
ABS*ABS*TiO2*APTES	1	0.40977	0.39465	0.394651	56.03	0.000
ABS*TiO2*APTES*APTES	1	0.18220	0.18220	0.182201	25.87	0.000
Residual Error	16	0.11269	0.11269	0.007043		
Lack-of-Fit	2	0.04182	0.04182	0.020912	4.13	0.390
Pure Error	14	0.07087	0.07087	0.005062		
Total	20	1.76552				

Estimated Regression Coefficients for Modulus (component amounts)

Term	Coef
ABS	0.00663345
TiO2	2.86586
APTES	1.37446
ABS*ABS*TiO2*APTES	-0.00291984
ABS*TiO2*APTES*APTES	0.624178

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.3 ผลการ Run ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ผลทดสอบระยะยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด

### Regression for Mixtures: Elongation versus ABS, TiO<sub>2</sub>, APTES

Estimated Regression Coefficients for Elongation (component proportions)

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
ABS	1	0	*	*	25.95
TiO <sub>2</sub>	187	35	*	*	20.88
APTES	-74	51	*	*	44.08
ABS*ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES	-154052	44201	-3.49	0.003	113.86
ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES*APTES	50989866	13906250	3.67	0.002	103.45

S = 0.0950994 PRESS = 0.250676  
R-Sq = 76.76% R-Sq(pred) = 59.74% R-Sq(adj) = 70.95%

Analysis of Variance for Elongation (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	0.477955	0.47795	0.119489	13.21	0.000
Linear	2	0.356084	0.25979	0.129897	14.36	0.000
Special Quartic	2	0.121870	0.12187	0.060935	6.74	0.008
ABS*ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES	1	0.000279	0.10986	0.109857	12.15	0.003
ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES*APTES	1	0.121592	0.12159	0.121592	13.44	0.002
Residual Error	16	0.144702	0.14470	0.009044		
Lack-of-Fit	2	0.015236	0.01524	0.007618	0.82	0.459
Pure Error	14	0.129467	0.12947	0.009248		
Total	20	0.622657				

Estimated Regression Coefficients for Elongation (component amounts)

Term	Coef
ABS	0.00804021
TiO <sub>2</sub>	1.86821
APTES	-0.737192
ABS*ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES	-0.00154052
ABS*TiO <sub>2</sub> *APTES*APTES	0.509899

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการ Run ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ผลทดสอบ Response optimization

## Response Optimization

### Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Tensile stre	Maximum	18.0	22.5	22.5	1	1
Modulus	Maximum	0.8	1.6	1.6	1	1
Elongation	Maximum	0.9	1.2	1.2	1	1

### Global Solution

### Components

ABS = 99.4  
 TiO2 = 0.201010  
 APTES = 0.398990

### Predicted Responses

Tensile stre = 20.9390 , desirability = 0.653120  
 Modulus = 1.4554 , desirability = 0.819311  
 Elongation = 1.2817 , desirability = 1.000000

Composite Desirability = 0.811859



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการ Run ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab การทดสอบสมมติฐาน

### One-Sample T: Tensile strength

Test of  $\mu = 20.69$  vs  $\neq 20.69$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Tensile strength	5	21.732	1.635	0.731	(19.702, 23.762)	1.43	0.227

### One-Sample T: Modulus

Test of  $\mu = 1.51$  vs  $\neq 1.51$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Modulus	5	1.4660	0.0541	0.0242	(1.3988, 1.5332)	-1.82	0.143

### One-Sample T: Elongation at break

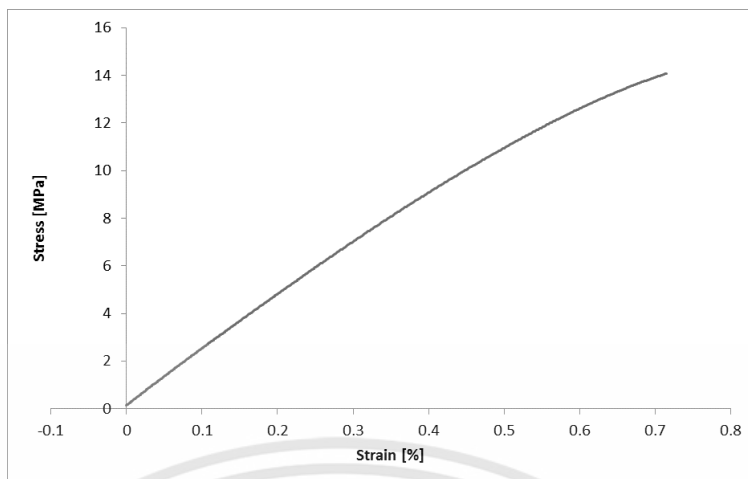
Test of  $\mu = 1.29$  vs  $\neq 1.29$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Elongation at break	5	1.2160	0.0956	0.0427	(1.0974, 1.3346)	-1.73	0.158

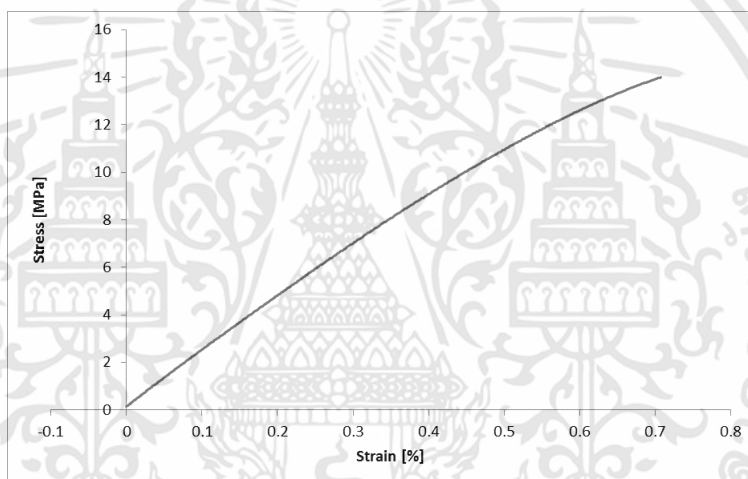
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



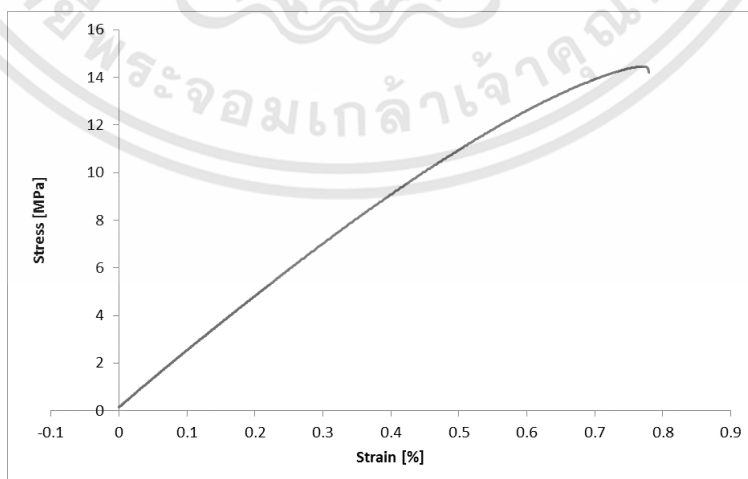
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฌ.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพลาสติกชนิด ABS ของการทดสอบครั้งที่ 1



รูปที่ ฌ.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพลาสติกชนิด ABS ของการทดสอบครั้งที่ 2

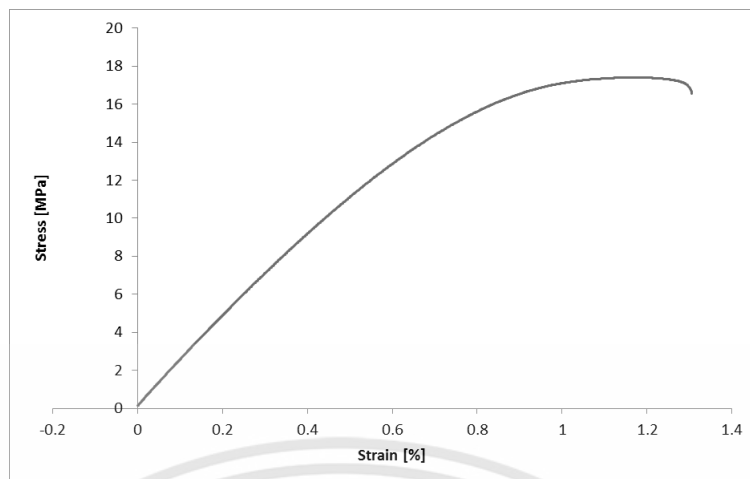


รูปที่ ฌ.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพลาสติกชนิด ABS ของการทดสอบครั้งที่ 3

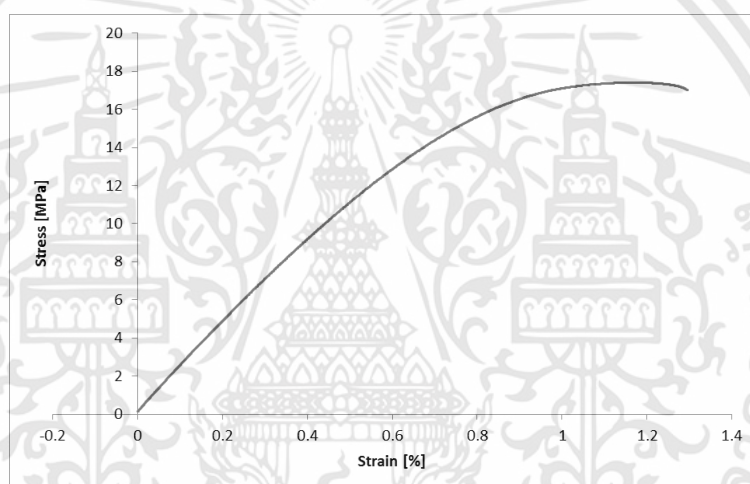
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



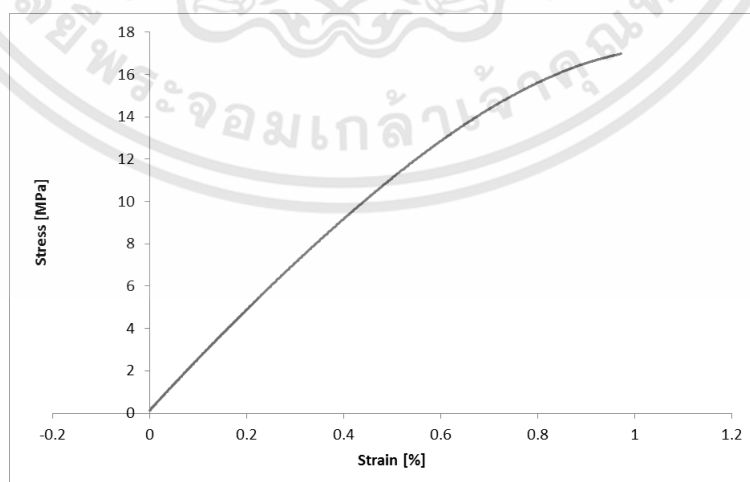
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.๑ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.1 : APTES 0.5 ของการทดสอบครั้งที่ 1

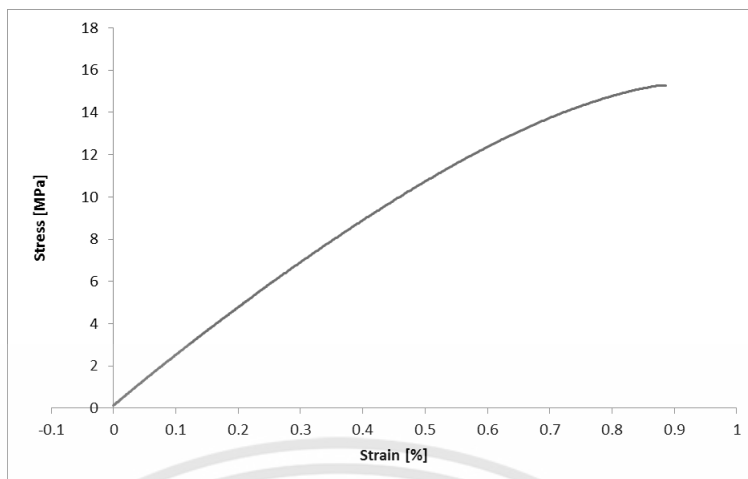


รูปที่ ๓.๒ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.1 : APTES 0.5 ของการทดสอบครั้งที่ 2

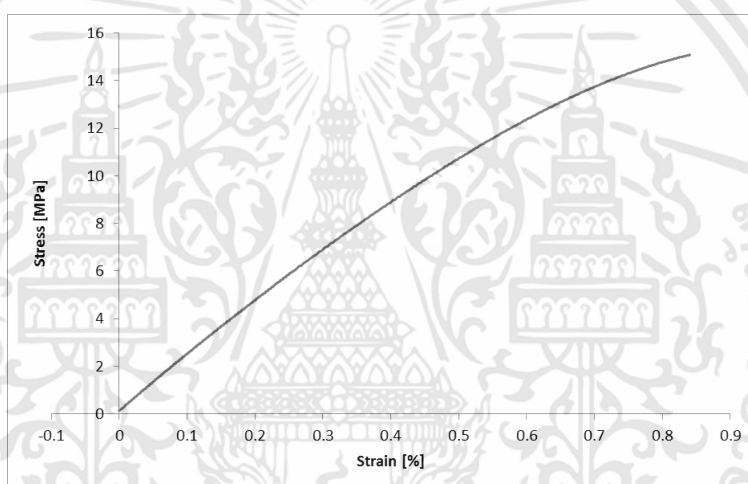


รูปที่ ๓.๓ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.1 : APTES 0.5 ของการทดสอบครั้งที่ 3

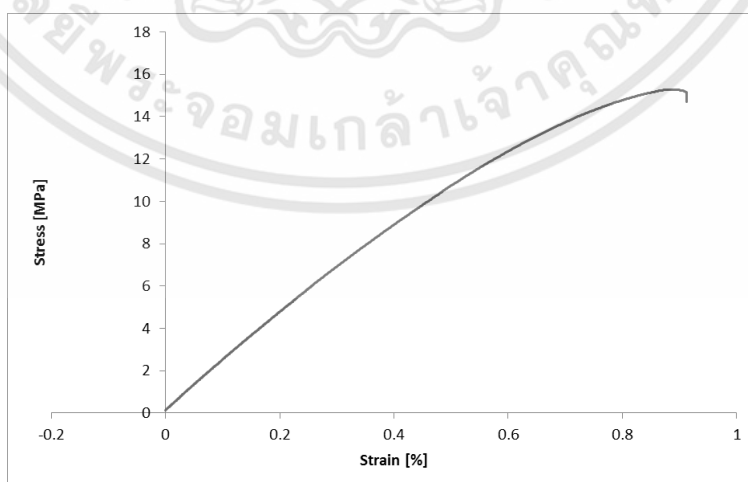
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.๔ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.8 : TiO<sub>2</sub> 0.1 : APTES 0.1 ของการทดสอบครั้งที่ 1

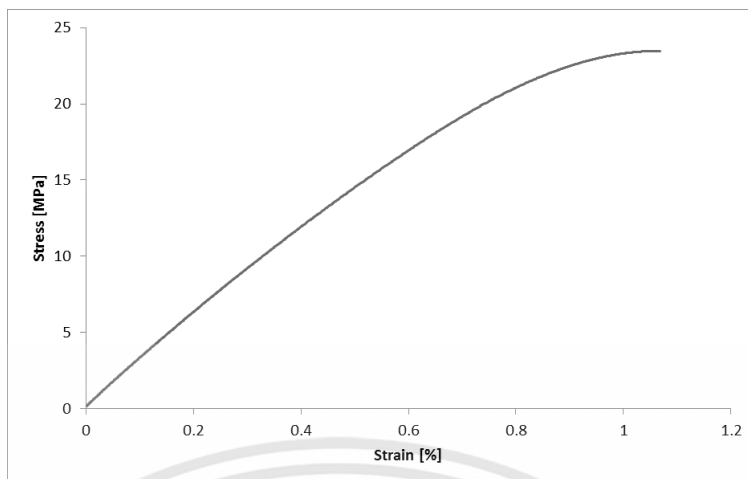


รูปที่ ๓.๕ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.8 : TiO<sub>2</sub> 0.1 : APTES 0.1 ของการทดสอบครั้งที่ 2

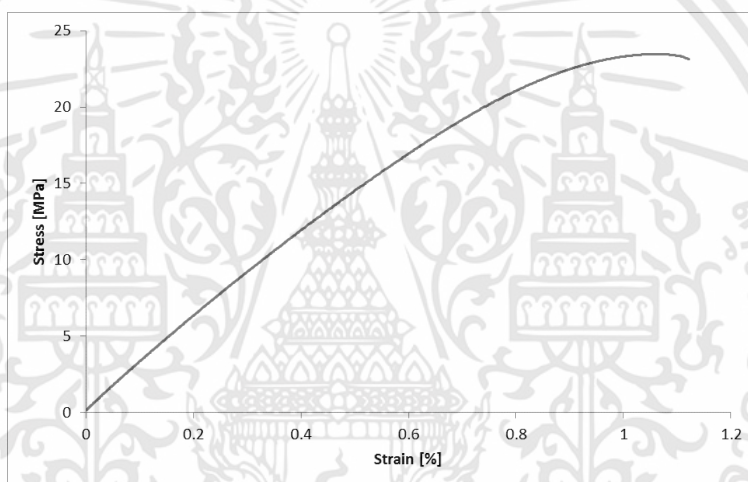


รูปที่ ๓.๖ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.8 : TiO<sub>2</sub> 0.1 : APTES 0.1 ของการทดสอบครั้งที่ 3

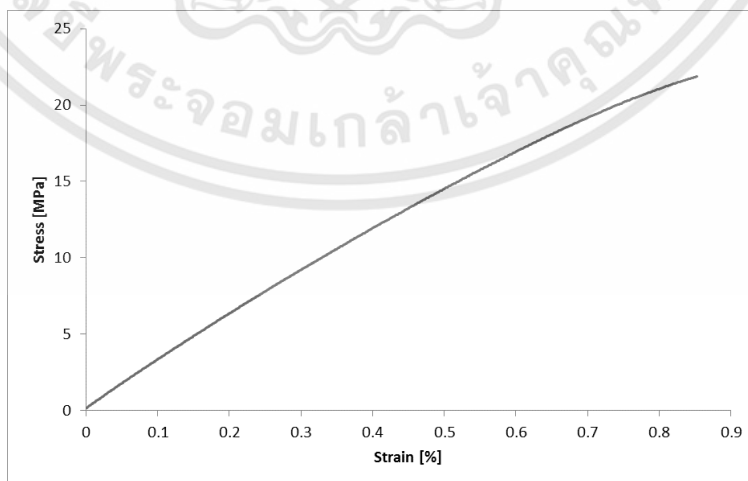
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๗.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.5 : APTES 0.1 ของการทดสอบครั้งที่ 1

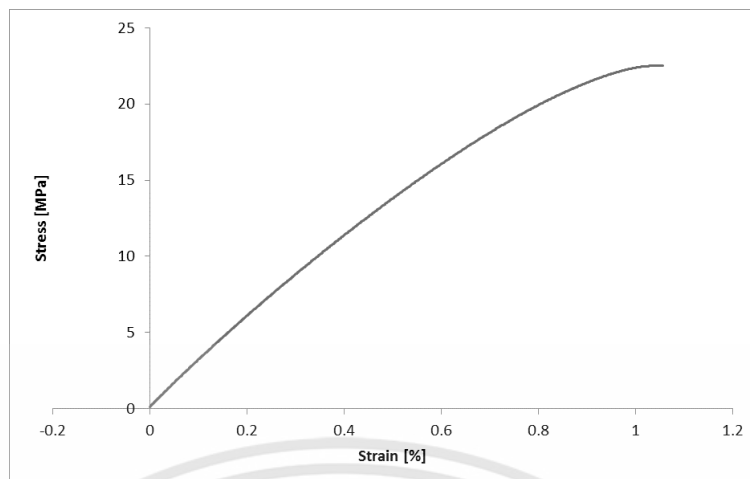


รูปที่ ๗.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.5 : APTES 0.1 ของการทดสอบครั้งที่ 2

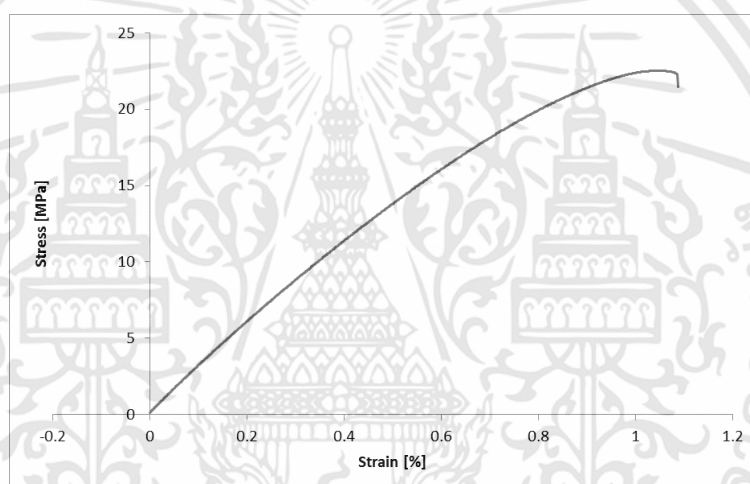


รูปที่ ๗.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.5 : APTES 0.1 ของการทดสอบครั้งที่ 3

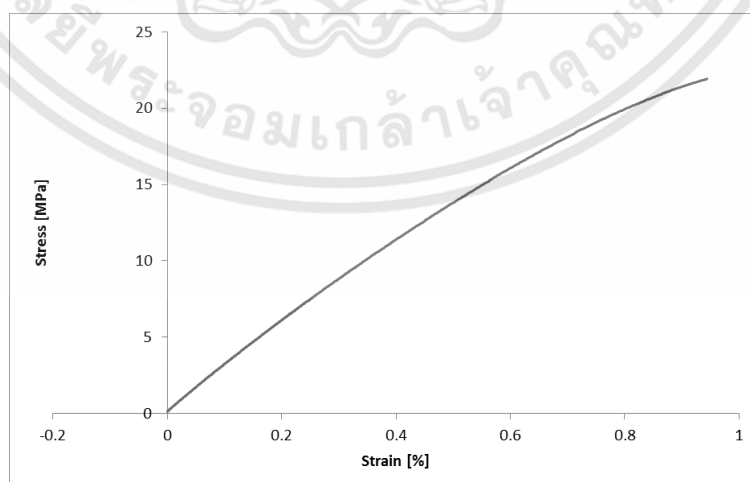
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑๐.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.3 : APTES 0.3 ของการทดสอบครั้งที่ 1

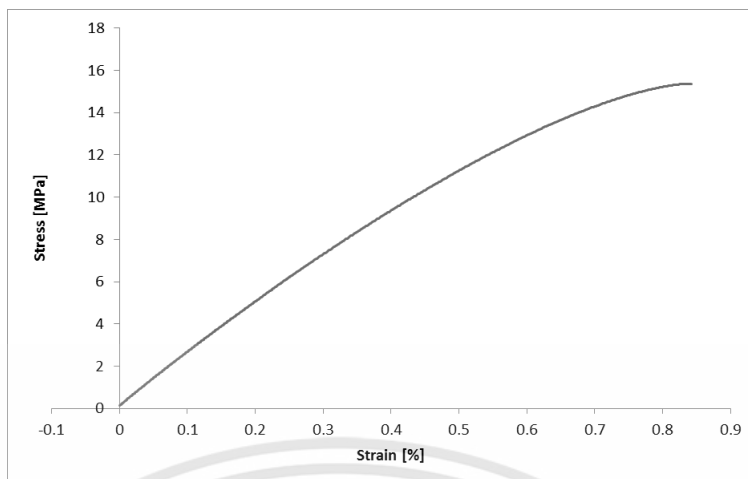


รูปที่ ๑๑.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.3 : APTES 0.3 ของการทดสอบครั้งที่ 2

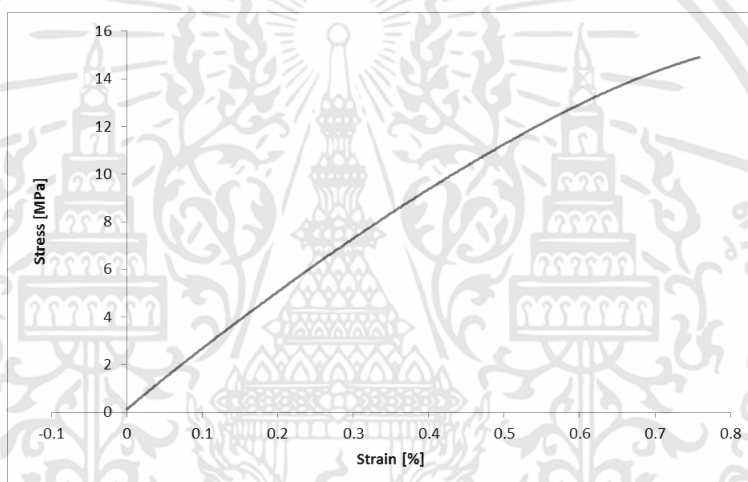


รูปที่ ๑๒.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.3 : APTES 0.3 ของการทดสอบครั้งที่ 3

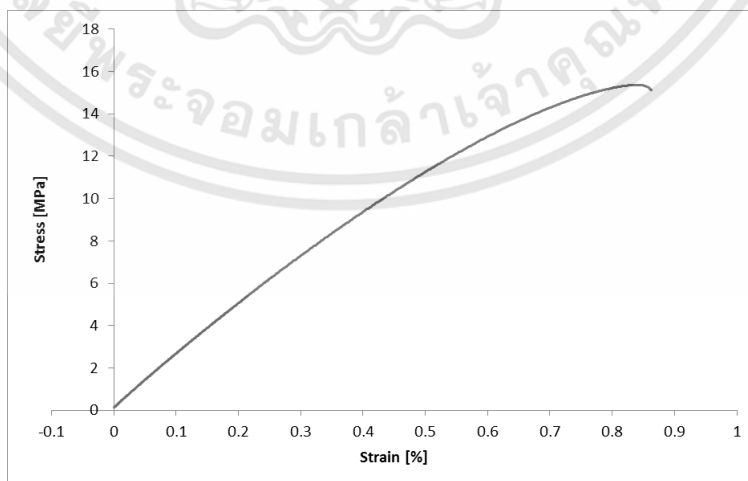
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑๓.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.6 : TiO<sub>2</sub> 0.1 : APTES 0.3 ของการทดสอบครั้งที่ 1

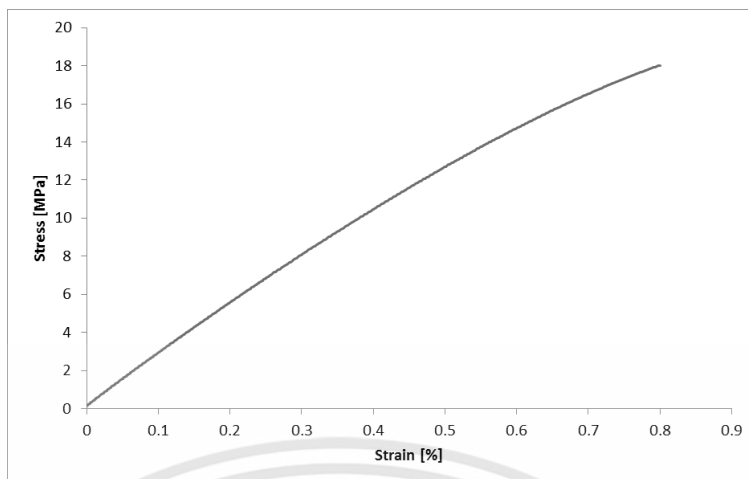


รูปที่ ๑๓.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.6 : TiO<sub>2</sub> 0.1 : APTES 0.3 ของการทดสอบครั้งที่ 2

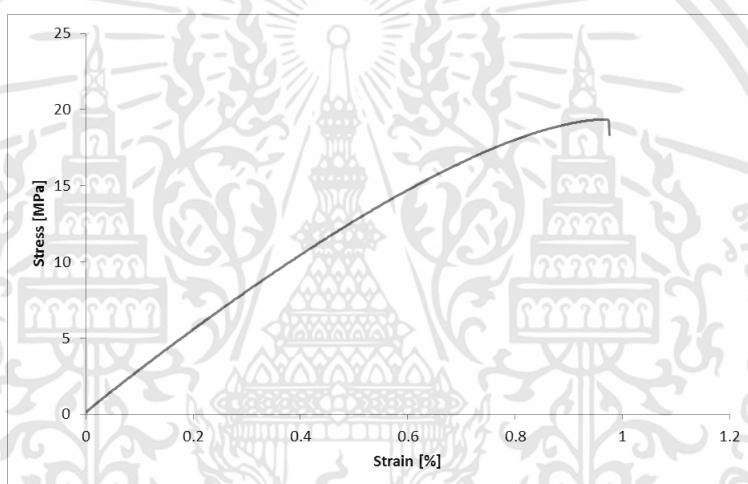


รูปที่ ๑๓.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.6 : TiO<sub>2</sub> 0.1 : APTES 0.3 ของการทดสอบครั้งที่ 3

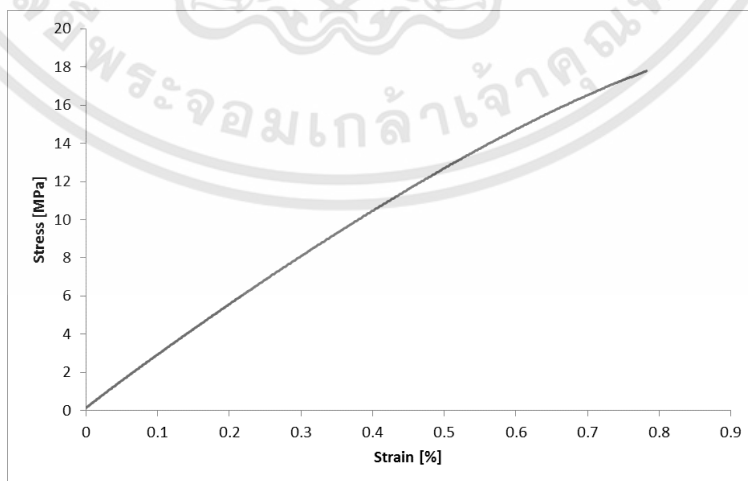
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑๖.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.6 : TiO<sub>2</sub> 0.3 : APTES 0.1 ของการทดสอบครั้งที่ 1

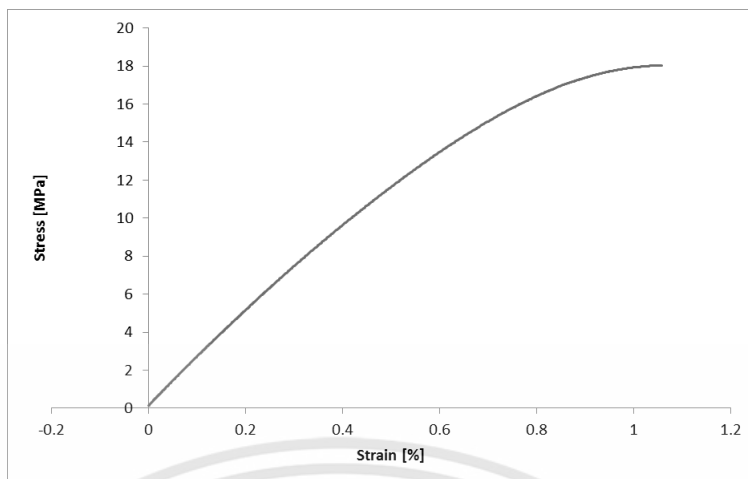


รูปที่ ๑๖.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.6 : TiO<sub>2</sub> 0.3 : APTES 0.1 ของการทดสอบครั้งที่ 2

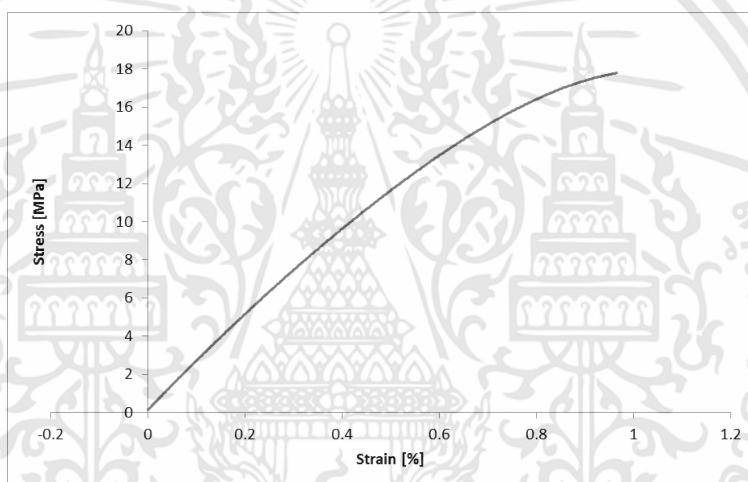


รูปที่ ๑๖.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.6 : TiO<sub>2</sub> 0.3 : APTES 0.1 ของการทดสอบครั้งที่ 3

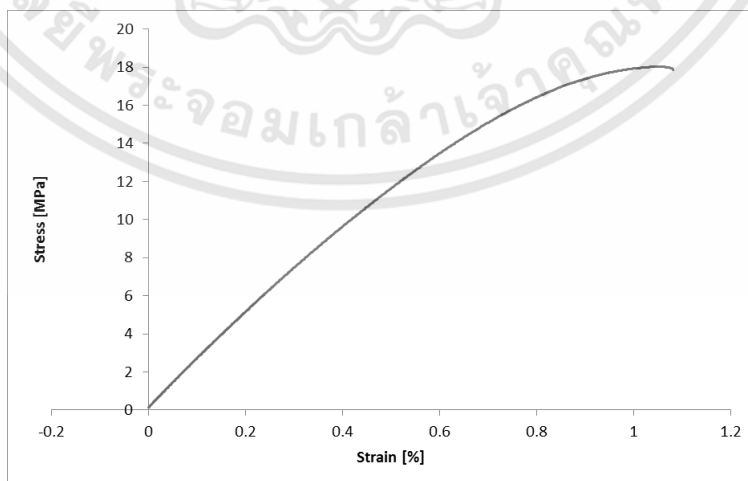
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑๙.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.5 : TiO<sub>2</sub> 0.2 : APTES 0.2 ของการทดสอบครั้งที่ 1



รูปที่ ๑๙.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.5 : TiO<sub>2</sub> 0.2 : APTES 0.2 ของการทดสอบครั้งที่ 2

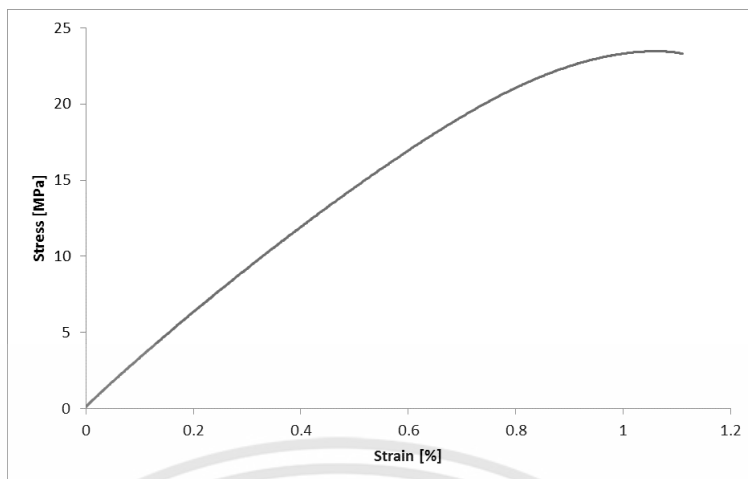


รูปที่ ๑๙.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.5 : TiO<sub>2</sub> 0.2 : APTES 0.2 ของการทดสอบครั้งที่ 3

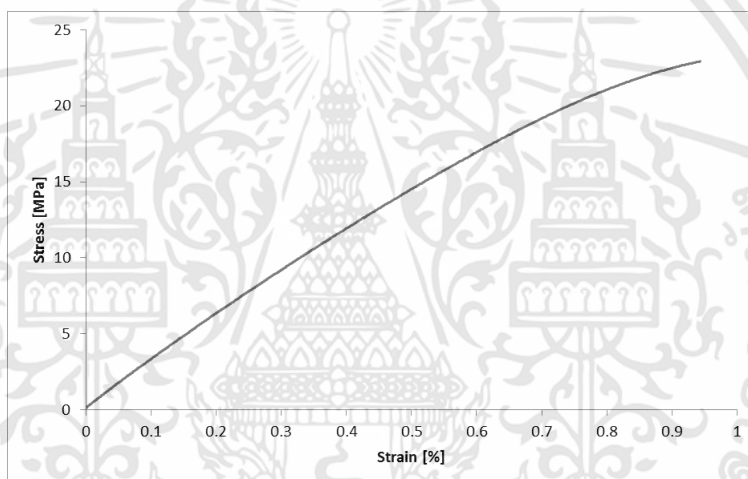
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



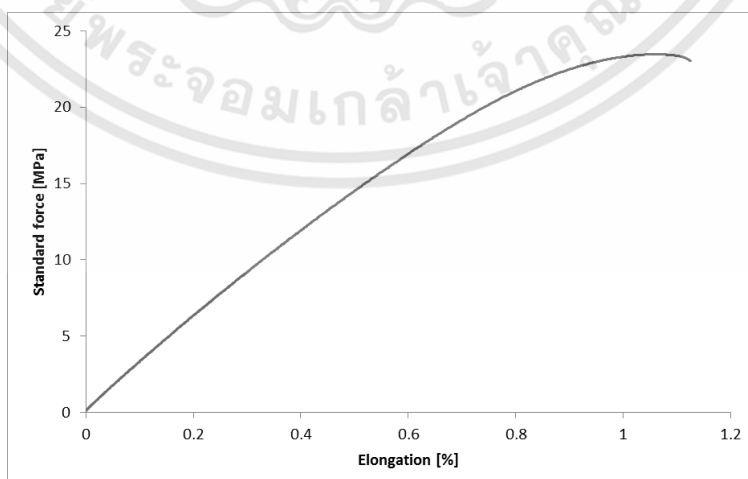
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.๑ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.19 : APTES 0.41 ของการทดสอบครั้งที่ 1

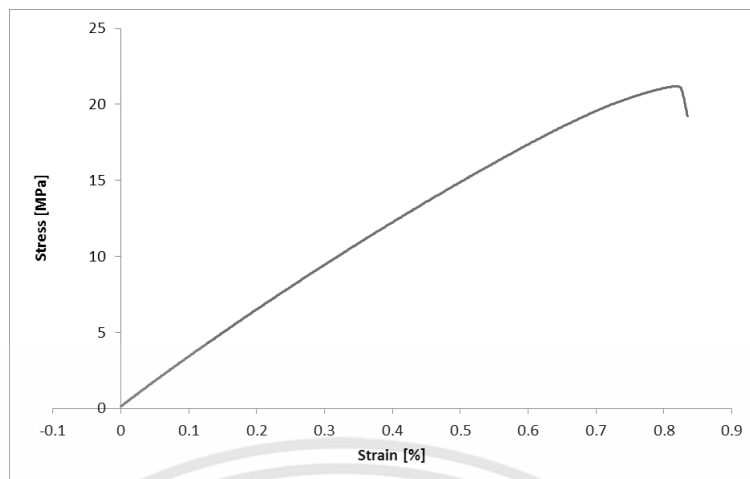


รูปที่ ๓.๒ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.19 : APTES 0.41 ของการทดสอบครั้งที่ 2

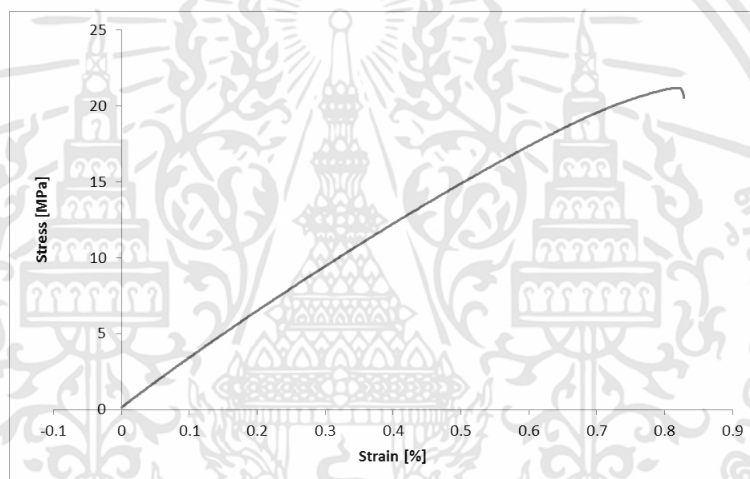


รูปที่ ๓.๓ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.19 : APTES 0.41 ของการทดสอบครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.๔ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.19 : APTES 0.41 ของการทดสอบครั้งที่ 4



รูปที่ ๓.๕ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วน ABS 99.4 : TiO<sub>2</sub> 0.19 : APTES 0.41 ของการทดสอบครั้งที่ 5



ภาคผนวก ก

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรียอีโคไลภายใต้การรับแสงยูวี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย *E.coli* จากการรับแสงฉายแสงยูวี

สำหรับการคำนวณจำนวนแบคทีเรียที่นับได้ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ เมื่อนำชิ้นงานไปรับแสงยูวีที่เวลาต่างๆ เพื่อศึกษาสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{จำนวนแบคทีเรียที่นับได้ (\%)} = \frac{\text{จำนวนแบคทีเรียที่รอดชีวิตจากการรับแสงยูวี (โคโลนี)}}{\text{จำนวนแบคทีเรียก่อนรับแสงยูวี (โคโลนี)}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดลงจากการรับแสงยูวีของชิ้นงานที่เวลาต่างๆ เพื่อศึกษาสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบในหน่วยเปอร์เซ็นต์ โดยจำนวนแบคทีเรียที่เวลา 0 นาที จำนวนแบคทีเรียเริ่มต้นของพลาสติก ABS ที่นับได้จากเครื่องนับจำนวนแบคทีเรียเท่ากับ 284 โคโลนี ดังนั้น จำนวนแบคทีเรียที่นับได้เฉลี่ยที่เวลาการรับแสง 5, 15 และ 30 นาที เท่ากับ 263, 251 และ 148 โคโลนี ตามลำดับ เมื่อนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จะได้ว่า

$$\text{จำนวนแบคทีเรียที่เวลา 5 นาที (\%)} = \frac{263 \text{ โคโลนี}}{284 \text{ โคโลนี}} \times 100 = 93\%$$

$$\text{จำนวนแบคทีเรียที่เวลา 15 นาที (\%)} = \frac{251 \text{ โคโลนี}}{284 \text{ โคโลนี}} \times 100 = 88\%$$

$$\text{จำนวนแบคทีเรียที่เวลา 30 นาที (\%)} = \frac{148 \text{ โคโลนี}}{284 \text{ โคโลนี}} \times 100 = 52\%$$

จำนวนแบคทีเรียเริ่มต้นของวัสดุเชิงประกอบที่ระดับอัตราส่วนผสม ABS 99.4, TiO<sub>2</sub> 0.38 และ APTES 0.22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่นับได้จากเครื่องนับจำนวนแบคทีเรียเท่ากับ 261 โคโลนี จำนวนแบคทีเรียที่นับได้เฉลี่ยที่เวลาการรับแสง 5, 15 และ 30 นาที เท่ากับ 183, 125 และ 49 โคโลนี ตามลำดับ เมื่อนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จะได้ว่า

$$\text{จำนวนแบคทีเรียที่เวลา 5 นาที (\%)} = \frac{183 \text{ โคโลนี}}{261 \text{ โคโลนี}} \times 100 = 70\%$$

$$\text{จำนวนแบคทีเรียที่เวลา 15 นาที (\%)} = \frac{125 \text{ โคโลนี}}{261 \text{ โคโลนี}} \times 100 = 48\%$$

$$\text{จำนวนแบคทีเรียที่เวลา 30 นาที (\%)} = \frac{49 \text{ โคโลนี}}{261 \text{ โคโลนี}} \times 100 = 19\%$$

เมื่อต้องการทราบอัตราการลดลงของแบคทีเรียในหน่วยเปอร์เซ็นต์เท่ากับเท่าใดให้นำ 100 ลบกับจำนวนเปอร์เซ็นต์แบคทีเรียที่เวลาใดๆ หมายความว่าแบคทีเรียจากตัวอย่างนี้ลดลงถึง  $(100 - 93) = 7$  เปอร์เซ็นต์ (กรณีชิ้นงานของพลาสติก ABS รับแสงยูวีที่เวลา 5 นาที)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นางสาวภิญญาพัชญ์ เฟ็งบุบผา
วัน เดือน ปีเกิด	5 กันยายน พ.ศ. 2535
ที่อยู่	302/203 หมู่ที่ 9 ตำบลบ้านสวน อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20000
ประวัติการศึกษา	2557 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	ภิญญาพัชญ์ เฟ็งบุบผา, วิภู ศรีสีบสาย และกุลนันทน์ เกียรติกิตติพงษ์ 2559 “การศึกษาสมบัติทางกลและพฤติกรรมการต้านเชื้อแบคทีเรียของ วัสดุเชิงประกอบอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน/ไทเทเนียมได ออกไซด์” ในงานประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่ง ประเทศไทย (TICHE) ครั้งที่ 26.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้