

การศึกษาความแข็งแรงดึงและการต้านเชื้อแบคทีเรียของพลาสติก
ชนิดอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์
A STUDY OF TENSILE STRENGTH AND ANTIBACTERIAL
PLASTIC BLENDED ACRYLONITRILE-BUTADIENE-STYRENE
(ABS) WITH TITANIUM DIOXIDE (TiO₂)

นายธีรพงศ์ แพรทหลาย
MR. TEERAPONG PHRAELAI
นางสาวอุษา สาริมา
MS. USA SARIMA

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การศึกษาความแข็งแรงดึงและการต้านเชื้อแบคทีเรียของพลาสติก
ชนิดอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

A STUDY OF TENSILE STRENGTH AND ANTIBACTERIAL
PLASTIC BLENDED ACRYLONITRILE-BUTADIENE-STYRENE
(ABS) WITH TITANIUM DIOXIDE (TiO₂)



นายธีรพงศ์ แพร่หลาย

MR. TEERAPONG PHRAELAI

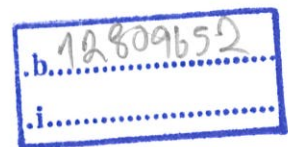
นางสาวอุษา สาริมา

MS. USA SARIMA

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

143893

04 ต.ค. 2559



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

A STUDY OF TENSILE STRENGTH AND ANTIBACTERIAL
PLASTIC BLENDED ACRYLONITRILE-BUTADIENE-STYRENE
(ABS) WITH TITANIUM DIOXIDE (TiO₂)

MR. TEERAPONG PHRAELAI

MS. USA SARIMA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การศึกษาความแข็งแรงดึงและการต้านเชื้อแบคทีเรียของพลาสติกชนิด
อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์
A STUDY OF TENSILE STRENGTH AND ANTIBACTERIAL
PLASTIC BLENDED ACRYLONITRILE-BUTADIENE-STYRENE
(ABS) WITH TITANIUM DIOXIDE (TiO₂)


นักศึกษา

นายธีรพงศ์ แพร์หลาย รหัสประจำตัว 55010579
นางสาวอุษา สาริมา รหัสประจำตัว 55011482

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์



(ผศ.ดร.วิภู ศรีสีบสาย)

Thesis Title	A STUDY OF TENSILE STRENGTH AND ANTIBACTERIAL PLASTIC BLENDED ACRYLONITRILE-BUTADIENE-STYRENE (ABS) WITH TITANIUM DIOXIDE (TiO ₂)
Student	Mr. Teerapong Phraelai Ms. Usa Sarima
Degree	Bachelor of Engineering Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2015
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Wipoo Sriseubsai

ABSTRACT

This thesis is to study about mixed Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) with Titanium dioxide (TiO₂). The objective is to study the mixing ratio of ABS and TiO₂ for E.coli antibacterial properties of the plastic. In this study, the Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) and titanium dioxide (TiO₂) was mixed with the ratio of 100:0, 99.5:0.5, 99:1, and 98:2 respectively. The specimens were prepared by using the internal mixer before compression molding to make the plaque specimen. After that, The E.coli antibacterial performance was performed according to JIS Z 2801:2010. The results showed that bacteria were degraded by Photocatalytic activity. So the mixing ratio of ABS with TiO₂ influenced to antibacterial property. In addition, the results showed that increasing TiO₂ decreased the photocatalytic activity. The ratio of 99.5:0.5 of ABS and TiO₂ was the best condition of this study. The mechanical properties when mixed titanium dioxide with ABS by the ratio of 99.5: 0.5, the modulus and tensile stress were increased but if increasing TiO₂, both properties were decreased. When mixed titanium dioxide with ABS by the ratio of 95.5: 0.5 and 99: 1 the strain was increased but if increasing TiO₂, the strain was decreased.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาความแข็งแรงดึงและการต้านเชื้อแบคทีเรียของพลาสติกชนิดอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้จากอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ ผศ.ดร.วิภู ศรีสีบสาย อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณที่ได้ให้คำแนะนำและเสนอแนวทางการแก้ปัญหาโครงการงานพิเศษนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ นายฤทธิชัย สังฆทิพย์ นักศึกษาปริญญาเอก และนางสาวภิญญาพัชญ์ เพ็งบุบผา นักศึกษาปริญญาโท ที่มีส่วนร่วมในการทำโครงการงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณอัศนีศ วิจิตรระกะ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด ตลอดจนเอื้อเพื่อห้องปฏิบัติการสำหรับทำโครงการงานพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมืออาคารปฏิบัติการพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่อำนวยความสะดวกสถานที่สำหรับการทำโครงการงานพิเศษนี้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกๆด้าน รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ให้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำโครงการงานพิเศษนี้

นายธีรพงศ์ แพร์หลาย

นางสาวอุษา สาริมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความหมายของพอลิเมอร์ (Polymer).....	4
2.2 ประเภทของพอลิเมอร์.....	4
2.3 การเปลี่ยนสถานะของพอลิเมอร์.....	8
2.4 การเกิดพอลิเมอร์.....	10
2.5 การวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้าของพอลิเมอร์.....	10
2.5.1 Scanning Electron Microscopy (SEM).....	11
2.5.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Tests).....	11
2.5.2.1 ความเค้น (Stress).....	11
2.5.2.2 ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation).....	12
2.5.2.3 การทดสอบแรงดึง (Tension Test).....	14
2.5.2.4 ความคืบ (Creep).....	17
2.5.2.5 ความแกร่ง (Toughness).....	19
2.5.2.6 ความล้า (Fatigue).....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2.7 ความแข็ง (Hardness).....	20
2.5.3 ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength)	21
2.6 คุณสมบัติของพอลิเมอร์.....	23
2.7 แบบการใช้งานของพอลิเมอร์.....	25
2.8 ประวัติความเป็นมาของพลาสติก	25
2.9 พลาสติก	28
2.10 ประเภทของพลาสติก	28
2.11 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกเบื้องต้น.....	30
2.11.1 การเตรียมพลาสติกเพื่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก.....	30
2.12 การคอมปาวด์ (Compounding).....	31
2.12.1 การคอมปาวด์แบบกะ (Batch Compounding).....	31
2.12.2 การคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง (Continuous Compounding)	32
2.13 กระบวนการกดอัด.....	34
2.13.1 ลักษณะเครื่องกดอัด.....	34
2.13.2 วัฏจักรกระบวนการกดอัด (Compression Molding Cycle)	35
2.13.3 แม่แบบสำหรับกระบวนการกดอัด	35
2.13.4 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการกดอัด	38
2.14 พลาสติกอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS)	39
2.15 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis)	40
2.16 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂).....	41
2.17 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส	44
2.18 คลื่นแสงที่พบในแสงอาทิตย์.....	45
2.19 แบคทีเรีย Escherichia coli (E.coli).....	45
2.20 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย
3.1	สังเคราะห์และเตรียมชิ้นงานทดสอบ48
3.1.1	วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย48
3.1.2	เครื่องมือและอุปกรณ์48
3.1.3	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน 48
3.2	ศึกษาความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli บนชิ้นงาน 51
3.2.1	วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย51
3.2.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ 51
3.2.3	วิธีเตรียมสารละลาย 52
3.2.4	ขั้นตอนการลงเชื้อ E.coli บนชิ้นงาน..... 53
3.3	ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ 55
3.4	ศึกษาคุณสมบัติทางกล 55
3.4.1	การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)..... 55
บทที่ 4	ผลการดำเนินงาน
4.1	ผลการศึกษาความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ABS/ TiO ₂ 57
4.2	ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ60
4.3	ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกล..... 63
บทที่ 5	สรุปผลการดำเนินงานวิจัย
5.1	สรุปผลการดำเนินงานวิจัย..... 66
5.1.1	ผลการศึกษาความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ABS/TiO ₂ 66
5.1.2	ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ 66
5.1.3	ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกล 66
5.2	ข้อเสนอแนะ 67
เอกสารอ้างอิง.....	68

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

- ภาคผนวก ก. การทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อ แบคทีเรีย E.coli
บนชิ้นงานตามมาตรฐาน JIS Z 2801 : 2010 ผก1
- ภาคผนวก ข. การทดสอบบิทธิพลของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อ
สมบัติทางกลของพลาสติก ABS ผข1

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิ T_m และ T_g ของพอลิเมอร์บางชนิด	9
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างค่าคงที่ และ ของวัสดุชนิดต่าง ๆ.....	17
ตารางที่ 2.3 ค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาดสำหรับพอลิเมอร์ทั่วไปที่พบในชีวิตประจำวัน	23
ตารางที่ 2.4 ปีกำเนิดพลาสติกชนิดต่างๆ	26
ตารางที่ 2.5 แสดงความแตกต่างระหว่างประเภทพลาสติก Thermoplastic และThermosetting	29
ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ระหว่างรูไทล์และอนาเทส	43
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของ ABS/TiO ₂ (wt %).....	48
ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนเชื้อแบคทีเรีย E.coli ที่เติบโตบนพลาสติก ABS/ TiO ₂	57
ตารางที่ 4.2 ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และค่ามอดูลัสของชิ้นงาน (Modulus) ของชิ้นงานที่ทดสอบ	63

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบเส้น (Chain Length Polymer).....	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบกิ่ง (Branched Polymer).....	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างพอลิเมอร์พอลิเมอร์แบบร่างแห (Cross - linking Polymer).....	6
รูปที่ 2.4 การจัดเรียงโมเลกุลในการเกิดผลึกตาม (a) ทฤษฎี Fringed Micelle และ (b) ทฤษฎี Lamellae	7
รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของแรงกระทำชนิดต่างๆ.....	12
รูปที่ 2.7 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) .	13
รูปที่ 2.8 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก.....	15
รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก.....	16
รูปที่ 2.10 เส้นโค้งความคืบ.....	17
รูปที่ 2.11 Creep Curve ที่ Condition ต่างกัน.....	18
รูปที่ 2.12 Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ.....	19
รูปที่ 2.13 รูปร่างตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบความเค้น และความเครียด.....	21
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น- ความเครียด.....	22
รูปที่ 2.15 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่าง ๆ กัน.....	22
รูปที่ 2.16 โครงสร้างของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic).....	28
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติง (Thermosetting).....	29
รูปที่ 2.18 แผนภาพกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก.....	30
รูปที่ 2.19 เครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer).....	32
รูปที่ 2.21 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single Screw Extruder).....	33
รูปที่ 2.22 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder).....	33
รูปที่ 2.21 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single Screw Extruder).....	34
รูปที่ 2.22 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder).....	36
รูปที่ 2.25 แม่แบบอัดผลิตภัณฑ์ราบหรือแม่แบบชนิดบาง.....	37
รูปที่ 2.26 แม่แบบปิดอัดหรือแม่แบบชนิดบวก.....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.27 แม่แบบฝาประกบหรือแม่แบบชนิดกึ่งบวก.....	38
รูปที่ 2.28 โครงสร้างของพลาสติก ABS.....	39
รูปที่ 2.29 โครงสร้างเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	42
รูปที่ 2.30 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) ของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	47
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการศึกษา.....	47
รูปที่ 3.2 ผสมเม็ดพลาสติก Internal Mixture.....	49
รูปที่ 3.3 เครื่องเครื่องบดเม็ดพลาสติก.....	50
รูปที่ 3.4 พลาสติก ABS/TiO ₂ อัตราส่วนผสม 0, 0.5, 1.0 และ 2.0 (wt%) ตามลำดับ.....	50
รูปที่ 3.5 เครื่องกดอัดพลาสติก (Compression Molding Machine).....	50
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายเชื้อ E.coli สำหรับหยดลงบนชิ้นงาน.....	52
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการลงเชื้อ E.coli บนชิ้นงาน.....	53
รูปที่ 3.8 ชิ้นงานขนาด 5 × 5 เซนติเมตร สำหรับทดสอบเชื้อแบคทีเรีย.....	54
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการดูสารละลายเชื้อแบคทีเรีย.....	54
รูปที่ 3.10 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM).....	55
รูปที่ 3.11 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง.....	56
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine).....	56
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างทดสอบแรงดึง.....	56
รูปที่ 4.1 จำนวนเชื้อแบคทีเรียที่นับได้ ภายใต้เวลาฉายแสงยูวีที่เวลา 0, 5, 15 และ 30 นาที.....	58
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์จำนวนแบคทีเรียที่นับได้ ภายใต้เวลาในการฉายแสงยูวีของ ABS/TiO ₂ ที่อัตราส่วน 0.5, 1 และ 2 (wt%) ตามลำดับ.....	58
รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ E.coli ของพลาสติกอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) ที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂) ใน อัตราส่วนที่ 0, 0.5, 1 และ 2 (wt%).....	59
รูปที่ 4.4 สันฐานวิทยาของพลาสติก ABS.....	61
รูปที่ 4.5 สันฐานวิทยาของพลาสติก ABS/TiO ₂ 0.5%.....	61
รูปที่ 4.6 สันฐานวิทยาของพลาสติก ABS/TiO ₂ 1%.....	62

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของพลาสติก ABS/TiO ₂ 2%.....	62
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบระหว่างความเค้น (MPa) กับชิ้นงาน	64
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบระหว่างความเครียด (%) กับชิ้นงาน.....	65
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบระหว่างค่ามอดูลัส (N/mm ²) กับชิ้นงาน.....	65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในยุคปัจจุบันนี้ ประชาชนส่วนใหญ่ให้ความสำคัญและหันมาให้ความสนใจปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมากขึ้น เนื่องจากปัจจุบันนี้ ประชาชนสามารถเกิดโรคมะเร็งได้ง่าย เพราะสภาพแวดล้อมรอบๆ ตัวนั้นมีแต่เชื้อโรคและแบคทีเรีย ซึ่งสามารถสัมผัสกับสิ่งเหล่านี้ได้ตลอดเวลา เชื้อโรคและแบคทีเรียบางชนิดมีความร้ายแรงอาจส่งผลกระทบต่อระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย อย่างเช่น แบคทีเรีย *Escherichia coli* หรืออีโคไล (*E.coli*) เป็นแบคทีเรียอยู่ตามธรรมชาติในลำไส้ใหญ่ของสัตว์และมนุษย์[1] แบคทีเรียชนิดนี้ทำให้เกิดอาการท้องเสียบ่อยที่สุด ทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ ทำให้ถ่ายอุจจาระเหลวหรือเป็นน้ำ แบคทีเรียชนิดนี้ถือว่าเป็นแบคทีเรียที่อันตรายที่ก่อให้เกิดโรคทางเดินอาหารในผู้ป่วยเด็กและคนแก่ ซึ่งเป็นสาเหตุในการปนเปื้อนอาหาร เช่นน้ำ และอาหารสดต่างๆ ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญในเรื่องการรักษาสุขภาพมากขึ้น โดยปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนา นำสารไทเทเนียมไดออกไซด์มาประยุกต์ในการยับยั้งและฆ่าเชื้อโรค เนื่องจากผลของสมบัติโฟโตคาตาไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถทำลายและสลายสารอินทรีย์ (Organic Compounds) หรือสารอนินทรีย์ (Inorganic Compounds) บางชนิดได้[2] ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่มีประสิทธิภาพสูง มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ปฏิกิริยาจะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิวหรือเมื่อแบคทีเรียแพร่กระจายไปบนพื้นผิว ปฏิกิริยาที่กล่าวข้างต้นนั้นเกิดจากกระบวนการโฟโตคาตาไลติก (Photocatalytic Process) ตลอดจนสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไวรัสที่เกาะอยู่บนพื้นผิววัสดุต่างๆ ได้

จากการสัมผัสเชื้อโรคและแบคทีเรียที่ไม่สามารถมองเห็นได้ จนอาจส่งผลกระทบต่อระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย จึงนำไปสู่งานวิจัยที่จะศึกษาและพัฒนา เกี่ยวกับวัสดุที่สามารถยับยั้งหรือทำลายเชื้อแบคทีเรียได้ จึงนำไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับพลาสติกชนิดอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในด้านสุขภาพและสามารถนำไปต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ หรือด้านอุตสาหกรรมอาหาร อีกทั้งยังได้พลาสติกที่สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์หรือบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ที่ที่คุณสมบัติและสามารถยับยั้งการเกิดเชื้อแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาและนำเสนอแนวทางสำหรับการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli ของพลาสติกอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) โดยมีการเติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถ โดยมีวัตถุประสงค์ มีดังนี้

1. ศึกษาความสามารถ ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย E.coli ของพลาสติกอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน- สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) โดยมีการเติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย
2. ศึกษาปัจจัยของอัตราส่วนผสมของ ABS/TiO₂ ที่มีผลต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจากปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติก
3. ศึกษาวิธีการทดสอบเชื้อแบคทีเรียจากมาตรฐาน JIS Z 2801:2010
4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของ ABS/TiO₂

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัย มีดังนี้

1. ทำการสังเคราะห์พลาสติก อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีนและเติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในอัตราส่วน 0, 0.5, 1, และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด (Compression)
2. ทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน JIS Z 2801:2010
3. วิเคราะห์และทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจากปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติก
4. ทดสอบสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิค SEM และสมบัติทางกล

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนในการดำเนินการศึกษา มีดังนี้

1. สืบค้นข้อมูลและบทความงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาความสามารถและเป็นไปได้ของการเพิ่มคุณสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย
3. ศึกษาวิธีการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน JIS Z 2801:2010
4. ศึกษาผลของปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติกและปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย
5. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM และสมบัติทางกล
6. สรุปผลที่ได้จากการวิจัยและทดลอง พร้อมทั้งนำเสนอแนวทางแก้ไขอื่นๆ รวมไปถึงวิธีการปรับปรุงและกระบวนการพัฒนาต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดความรู้พื้นฐานในการเพิ่มความสามารถ ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของพลาสติก อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) โดยมีการเติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) รวมไปถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย
2. ได้ความสัมพันธ์และสภาวะที่เหมาะสมในการผสม ABS/ TiO_2 ที่มีสมบัติยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย
3. ทราบถึงกลไกและประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจากปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก
4. สามารถนำความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการผลิตชิ้นงานด้านสาธารณสุข หรืออุปกรณ์ที่ต้องการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้
5. เกิดการเชื่อมโยงแนวคิดในงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับพลาสติก เพื่อนำไปพัฒนาเพิ่มองค์ความรู้และก่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายของพอลิเมอร์ (Polymer) [3]

พอลิเมอร์ มาจากภาษากรีก 2 คำ คือ Poly แปลว่า หลายหรือมาก Neros แปลว่า ส่วนหรือหน่วย พอลิเมอร์ (Polymer) เป็นสารที่สามารถพบได้ในสิ่งมีชีวิตทุกชนิดมีลักษณะเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งเกิดจากพอลิเมอร์พื้นฐานที่เรียกว่า มอนอเมอร์ (Monomer) จำนวนมากมาสร้างพันธะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยพอลิเมอร์บางชนิดอาจเกิดจากมอนอเมอร์ที่เป็นชนิดเดียวกันทั้งหมดมาเชื่อมต่อกัน เช่น แป้งและพอลิเอทิลีน เป็นต้น แต่ในบางชนิดก็อาจเกิดขึ้นจากมอนอเมอร์ที่แตกต่างกันมาเชื่อมต่อกัน ตัวอย่างเช่น พอลิเอสเทอร์ และโปรตีน เป็นต้น

2.2 ประเภทของพอลิเมอร์ [4]

ประเภทของพอลิเมอร์ สามารถจำแนกตามเกณฑ์ต่างๆ ได้ดังนี้

ก. แบ่งตามการเกิดเป็นเกณฑ์ เป็น 2 ชนิด คือ

1. พอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural Polymers)

เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ สามารถพบได้ในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด โดยพอลิเมอร์ธรรมชาติเหล่านี้เป็นสิ่งที่สิ่งมีชีวิตผลิตขึ้นโดยอาศัยกระบวนการทางเคมีต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ และมีการเก็บสะสมไว้ใช้ประโยชน์ตามส่วนต่างๆ ดังนั้น พอลิเมอร์ธรรมชาติจึงมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของสิ่งมีชีวิตและตำแหน่งที่พบในสิ่งมีชีวิต ตัวอย่างพอลิเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยพืช เซลลูโลส และไคติน เป็นต้น

2. พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymers)

เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นโดยมนุษย์ด้วยวิธีการนำสารมอนอเมอร์จำนวนมากมาทำปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ทำให้มอนอเมอร์เหล่านั้นเกิดพันธะโคเวเลนต์ต่อกันกลายเป็นโมเลกุลพอลิเมอร์ โดยสารมอนอเมอร์ที่มักใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ คือ สารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นผลพลอยได้จากกรกลั่นน้ำมันดิบและการแยกแก๊สธรรมชาติ เช่น เอทิลีน สไตรีน โพรพิลีน ไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น

ข. แบ่งตามโครงสร้างของพอลิเมอร์ แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

1. พอลิเมอร์แบบเส้น (Chain Length Polymer)

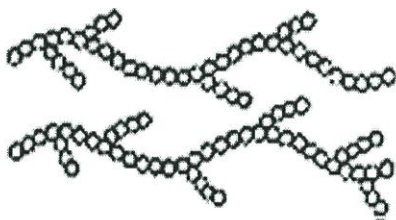
เกิดจากมอนอเมอร์สร้างพันธะโคเวเลนต์เป็นโซ่ยาว ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในกรณีที่เป็นโคพอลิเมอร์ มอนอเมอร์จะจัดเรียงสลับกันในแบบต่างๆ ได้หลายแบบ ตัวอย่างพอลิเมอร์แบบเส้น ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิสไตรีน พอลิอคริโลไนไตรล์ ไนลอน และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบเส้น (Chain Length Polymer) [3]

2. พอลิเมอร์แบบกิ่ง (Branched Polymer)

เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ยึดกันแตกกิ่งก้านสาขา มีทั้งโซ่สั้นและโซ่ยาว ดังแสดงในรูปที่ 2.2 กิ่งที่แตกจากพอลิเมอร์ของโซ่หลัก ทำให้ไม่สามารถจัดเรียงโซ่พอลิเมอร์ให้ชิดกันได้มาก จึงมีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำยึดหยุ่นได้ ความเหนียวต่ำ โครงสร้างเปลี่ยนรูปได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบกิ่ง (Branched Polymer) [3]

3. พอลิเมอร์แบบร่างแห (Cross - linking Polymer)

เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างโซ่พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเส้น หรือแบบกิ่ง ต่อเนื่องกันเป็นร่างแห ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ถ้าพันธะที่เชื่อมโยงระหว่างโซ่หลักมีจำนวนน้อย พอลิเมอร์จะมีสมบัติยึดหยุ่นและอ่อนตัว แต่ถ้ามีจำนวนพันธะมาก พอลิเมอร์จะแข็งไม่ยึดหยุ่น พอลิเมอร์แบบร่างแหจะมีจุดหลอมเหลวสูงเมื่อขึ้นรูปแล้วไม่สามารถหลอมหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างพอลิเมอร์พอลิเมอร์แบบร่างแห (Cross - linking Polymer) [3]

ค. แบ่งตามชนิดของมอนอเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymers)

คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยเล็กๆ ของมอนอเมอร์ชนิดเดียวกัน เช่น แป้ง เป็นพอลิเมอร์ที่มีกลูโคสประกอบด้วยเป็นมอนอเมอร์พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีสไตรีนเป็นมอนอเมอร์

2. โคพอลิเมอร์ (Copolymer)

คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยเล็กๆ ของมอนอเมอร์ต่างชนิดกันอย่างน้อย 2 ชนิด เช่น พอลิเอสเตอร์และพอลิเอไมด์ เป็นต้น สำหรับโคพอลิเมอร์จำแนกได้ 4 แบบ

- โคพอลิเมอร์ที่จัดแบบสุ่ม (Random Copolymer)

ตัวอย่างเช่น A-A-B-B-A-A-A-B-A-A-B-B-A-B-A-A-A-B-A-A-B-B-

- โคพอลิเมอร์ที่จัดแบบสลับกัน (Alternating Copolymer)

ตัวอย่าง เช่น -A-B-A-B-A-B-A-B-A-B- หรือ $-(A-B)_n-$

- โคพอลิเมอร์ที่จัดแบบบล็อก (Block Copolymer)

ตัวอย่าง เช่น -A-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-B-A-A-A-A-A-A-B-B-

- โคพอลิเมอร์ที่จัดแบบไซ้ (Graft Copolymer)

ตัวอย่าง เช่น -A-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-B

สารอินทรีย์ทั่วไปโมเลกุลมีขนาดเล็ก น้ำหนักโมเลกุลต่ำ สามารถตกผลึกหรืออยู่ในรูปของผลึกได้ แต่สำหรับพอลิเมอร์ขนาดของโมเลกุลยาว น้ำหนักโมเลกุลสูง จึงมีโอกาสที่จะอยู่ในรูปผลึกน้อยกว่า ส่วนของพอลิเมอร์ซึ่งโมเลกุลจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (Unordered Polymer) หรือไม่เป็นผลึกเรียกว่า “พอลิเมอร์อสัณฐาน” (Amorphous Polymer) และพอลิเมอร์ซึ่งโมเลกุลจัดเรียงตัวอย่างซิดกันอย่างเป็นระเบียบ (Ordered Polymer) เรียกว่า “พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึก” (Crystalline Polymer) [5]

1. พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึก (Crystalline Polymer)

โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกบางชนิดสามารถจัดเรียงใหม่ให้ซิดกันอย่างเป็นระเบียบหรือเกิดเป็นผลึกได้ เมื่อถูกทำให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูง เช่น พอลิเอธิลีน และ PTFE จากการศึกษาด้วย X-ray พบว่าพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูงมีทั้งส่วนที่เป็น

อสัณฐาน (Amorphous) และ ส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) ปนอยู่ด้วยกัน โดยส่วนที่เป็นผลึกมีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร

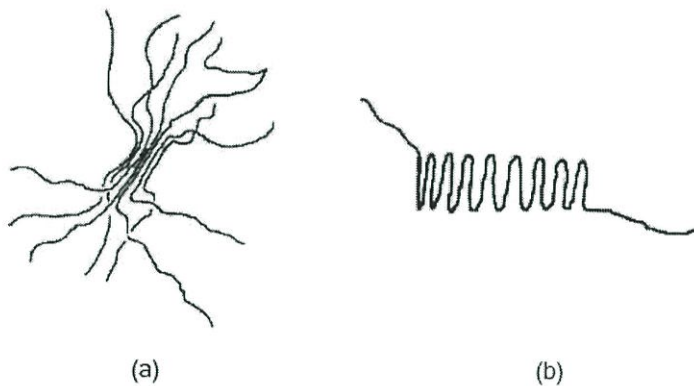
ทฤษฎี Fringed Micelle ได้อธิบายกระบวนการเกิดผลึก (Crystallization) ไว้ว่าเกิดจากส่วนของโมเลกุลหลายๆ โมเลกุลมาจัดเรียงตัวชิดกันอย่างเป็นระเบียบ ดังรูปที่ 2.4 (a) แต่ในภายหลังมีทฤษฎี Lamella ซึ่งเกิดจากงานวิจัยเกี่ยวกับผลึกของพอลิเมอร์อธิบายว่า ผลึกในพอลิเมอร์เกิดจากการพับตัวของหนึ่งสายโซ่โมเลกุล ด้วยระยะประมาณ 10 nm เกิดเป็น Lamellae ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึก ดังรูปที่ 2.4 (b) และพบว่าระหว่าง Lamellae ของพอลิเมอร์ยังคงมีส่วนของโมเลกุลที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ หรืออสัณฐานปนอยู่ด้วยซึ่งเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนที่เป็นผลึก สามารถคำนวณได้จากความหนาแน่นของพอลิเมอร์

$$\% \text{ Crystalline} = \frac{\rho_c(\rho - \rho_a)}{\rho(\rho_c - \rho_a)} \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่วัดได้

ρ_a คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ในลักษณะอสัณฐาน

ρ_c คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นผลึกสมบูรณ์



รูปที่ 2.4 การจัดเรียงโมเลกุลในการเกิดผลึกตาม (a) ทฤษฎี Fringed Micelle และ (b) ทฤษฎี Lamellae [3]

2. พอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous Polymer)

พอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous Polymer) ประกอบด้วยโมเลกุลที่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ โมเลกุลอยู่ห่างกันมากกว่าในพลาสติกมีผลึก ดังนั้นพลาสติกพวกนี้จะแข็งแรงน้อยกว่า ทนความร้อนได้ต่ำกว่า และเปลี่ยนแปลงขนาดได้น้อยกว่าแต่มักจะใสกว่า นอกจากนี้พลาสติกประเภทไม่มีผลึกยังเป็นพลาสติกที่ไม่มีจุดหลอมเหลวแต่จะมีเพียงอุณหภูมิที่พลาสติกอ่อนตัว เท่านั้น ตัวอย่างพลาสติกไม่มีผลึก เช่น Polystyrene, Acrylic เป็นต้น

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ มีดังต่อไปนี้

1. ความซับซ้อนของโครงสร้างโมเลกุล (Complexity) ความเป็นผลึกจะเกิดขึ้นได้ง่ายสำหรับพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน เช่น พอลิเอธิลีน ซึ่งไม่มีหมู่แทนที่ที่เกะกะหรือกลุ่มของอะตอม ซึ่งอาจเกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของสายโซ่
2. อัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) เมื่อถูกทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆจะทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีเวลาในการจัดเรียงตัวมากขึ้น โอกาสที่จะเกิดเป็นผลึก จึงมีมากกว่า
3. องศาของพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of Polymerization) พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลยาวมาก จะมีโอกาสเกิดเป็นผลึกได้ยากกว่า
4. การเสียรูป (Deformation) การทำให้พอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่างกลาสทรานสิชันและอุณหภูมิหลอมเหลว เกิดการเสียรูปอย่างช้า ๆ เช่น การดึง จะทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ยืดออก และจัดเรียงได้ชิดกันมากขึ้นเกิดความเป็นผลึกได้ดีขึ้น
5. การให้ความร้อน (Annealing) การให้ความร้อนกับพอลิเมอร์โครงสร้างอสัณฐานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวเพียงเล็กน้อยสามารถกระตุ้นให้โมเลกุลจัดเรียงตัวใหม่อย่างเป็นระเบียบและเกิดเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น

2.3 การเปลี่ยนสถานะของพอลิเมอร์ [6]

การเปลี่ยนสถานะของพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (Glass Transition Temperature , T_g)

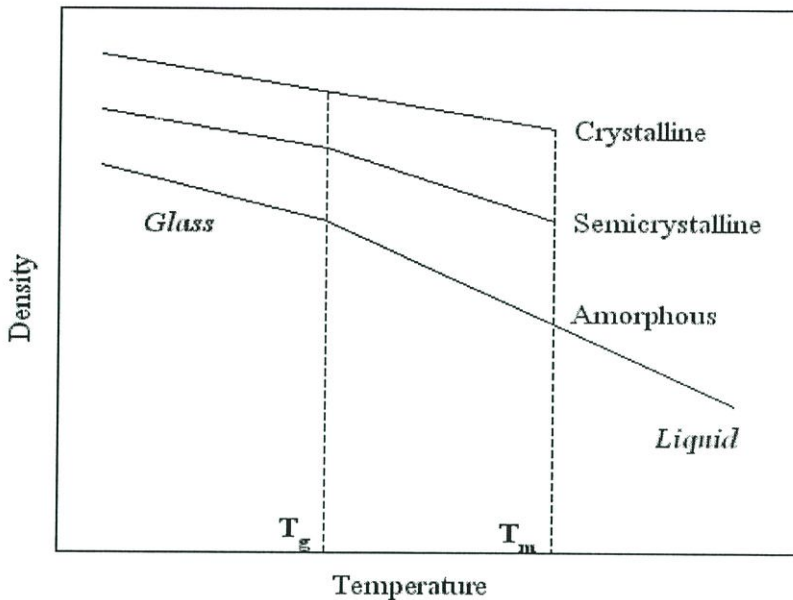
พอลิเมอร์ที่แสดงค่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันเป็นพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลแบบไม่เป็นระเบียบ หรือ พอลิเมอร์อสัณฐาน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g พอลิเมอร์จะมีลักษณะเป็นของแข็งคล้ายแก้ว (Glasslike) แข็ง และเปราะ เมื่อถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่า T_g มาก ๆ สมบัติบางอย่างของพอลิเมอร์จะเปลี่ยนไป เช่น ความหนาแน่น ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น ดังรูปที่ 2.5

2. อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature , T_m)

พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งผลึกเป็นของเหลวที่อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมินี้ พ้นระยะระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์จะอ่อนลง เมื่อพอลิเมอร์ได้รับแรงโมเลกุลจะเลื่อนผ่านกันและไหลได้ ความแข็งแรงและโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าใกล้เคียงศูนย์ ณ สภาวะนี้เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่น การหล่อ การฉีดขึ้นรูป เป็นต้น จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์หลายชนิด แสดงดังตารางที่ 2.1 พอลิเมอร์ทั่วไปที่มีลักษณะกึ่งผลึก (Semicrystalline) หรือมีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐานปนกันอยู่ จะแสดงการเปลี่ยนสถานะทั้งอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน

3. อุณหภูมิสลายตัว (Degradation Temperature , T_d)

ที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ พันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมในสายโซ่พอลิเมอร์ สามารถถูกทำลายลง และทำให้พอลิเมอร์ไหม้ อุณหภูมิดังกล่าวนี้ คืออุณหภูมิของการสลายตัว นอกจากนี้ ก๊าซออกซิเจน รังสีอัลตราไวโอเล็ตและแบคทีเรีย ก็สามารถทำให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวได้แม้อยู่ในอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของพอลิเมอร์ [6]

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิ T_m และ T_g ของพอลิเมอร์บางชนิด [6]

Polymer	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
Addition Polymers		
Low - density (LD) polyethylene	115	- 120
High - density (LD) polyethylene	137	- 120
Polyvinyl chloride	175 - 212	87
Polypropylene	168 - 176	- 16
Polystyrene	240	85 - 125
Polyacrylonitrile	320	107
Polytetrafluoroethylene (Teflon)	327	
Polychlorotrifluoroethylene	220	
Polymethyl methacrylate (Acrylic)		90 - 105
ABS		88 - 125

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิ T_m และ T_g ของพอลิเมอร์บางชนิด (ต่อ) [6]

Condensation polymers		
Polyamide (Nylon 6,6)	265	50
Acetal	181	- 85
Polycarbonate	230	145
Polyester	255	75
Elastomers		
Silicone		- 123
Polybutadiene	120	- 90
Polychloroprene	80	- 50
Polyisoprene	30	- 73

2.4 การเกิดพอลิเมอร์ [6]

ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์เรียกว่า ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) คือกระบวนการเกิดสร้างสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (พอลิเมอร์) จากสารที่มีโมเลกุลเล็ก (มอนอเมอร์) การเกิดพอลิเมอไรเซชัน จะเกิดภายใต้สภาวะต่างๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาอุณหภูมิมีความดัน เป็นต้น ทำให้เกิดพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ขึ้นมากมาย ทั้งที่เป็นพอลิเมอร์ในธรรมชาติหรือพอลิเมอร์สังเคราะห์เมื่อพิจารณากลไกของการเกิดปฏิกิริยาและโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์แล้ว

สามารถแบ่งพอลิเมอไรเซชันออกได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. พอลิเมอไรเซชันแบบขั้น หรือควบแน่น
2. พอลิเมอไรเซชันแบบลูกโซ่เรดิคัล หรือเพิ่มเข้า
3. พอลิเมอไรเซชันแบบไอออนิก
4. พอลิเมอไรเซชันแบบโคออร์ดิเนชัน

2.5 การวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้าของพอลิเมอร์ [6]

การวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้าของวัสดุมีความสำคัญ และได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการศึกษาเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยา สารกึ่งตัวนำ อุปกรณ์ไฟฟ้า การเคลือบผิว และพอลิเมอร์ พื้นฐานการวิเคราะห์อาศัยการแผ่รังสีจากแหล่งพลังงานสูง (อิเล็กตรอน โฟตอน หรือ ไอออน) ที่ตกกระทบหรือผ่านผิวหน้าของตัวอย่าง และเป็นสาเหตุให้เกิดการสะท้อนกลับของพลังงาน ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ เทคนิควิเคราะห์ลักษณะผิวหน้าของพอลิเมอร์ ได้แก่

2.5.1 Scanning Electron Microscopy (SEM) [7]

เทคนิคนี้ใช้ลำอิเล็กตรอนสแกนไปบนผิวหน้าของสารตัวอย่าง ทำให้เกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอน (Scattered Electron) และเกิดสัญญาณเพื่อใช้ในการสร้างภาพที่สามารถเห็นความลึก SEM มีประโยชน์มากในการศึกษาเกี่ยวกับผิวหน้าของพอลิเมอร์ เนื่องจากมีกำลังขยายสูงและเป็นภาพสามมิติ การประยุกต์ใช้เทคนิคนี้มีหลากหลาย เช่น ใช้ศึกษาการกระจายของเม็ดสีที่แขวนลอยอยู่ในสี โครงสร้างของรูพรุนในพอลิเมอร์ประเภทโฟม การพองหรือการแตกออกของวัสดุที่ใช้เคลือบผิว การแยกเฟสในพอลิเมอร์ผสม และลักษณะการแตกของผิวหน้าระหว่างวัสดุและสารที่ใช้ยึดติด เป็นต้น

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย

2.5.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Tests) [7]

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียว (Ductility) ฯลฯ เป็นสิ่งที่จะบอกว่าวัสดุนั้นๆ สามารถที่จะรับหรือทนทานแรง หรือพลังงานเชิงกลภายนอกที่มากกระทำได้ดีมากน้อยเพียงใด ในงานวิศวกรรมคุณสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากที่สุด เพราะเมื่อเลือกใช้วัสดุใดๆ ก็ตาม สิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณาก็คือ คุณสมบัติเชิงกลของมัน การที่เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใดๆ จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักรอุปกรณ์นั้นๆ เป็นสำคัญ

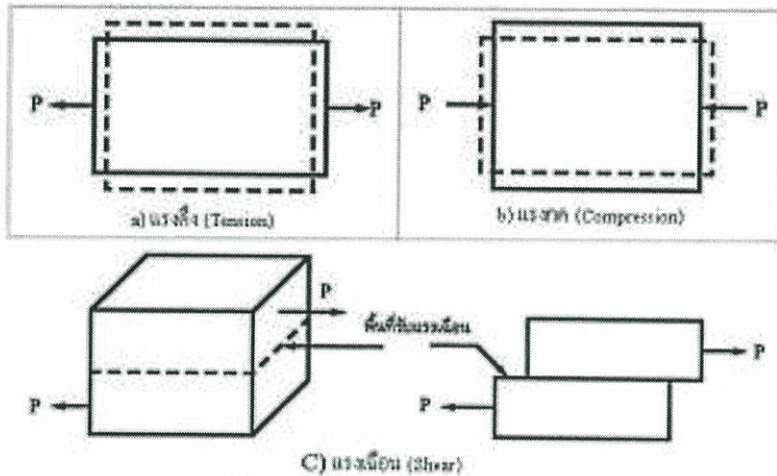
2.5.2.1 ความเค้น (Stress) [8]

ตามความเป็นจริงความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะของแรงที่มากกระทำ

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกันดังรูปที่ 2.6a

2. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางเพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.6b

3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) ใช้สัญลักษณ์ t เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูปที่ 2.6c มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อม ๆ กัน



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของแรงกระทำชนิดต่างๆ [8]

2.5.2.2 ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation) [8]

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. การเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืด สปริง ถ้าดึงแล้วปล่อยจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

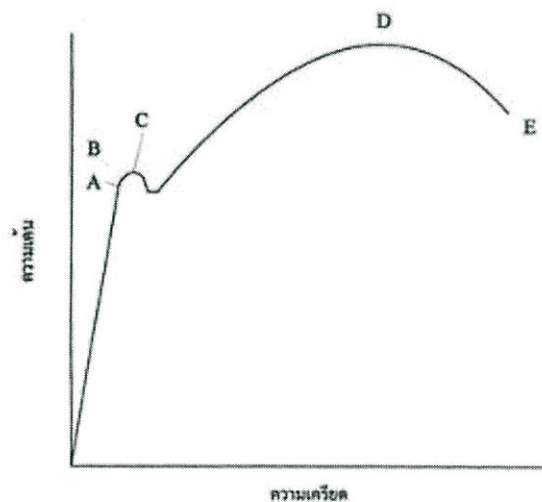
2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม

วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากกระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่าความเครียดกึ่งอีลาสติกจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

1. แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากกระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม

2. แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ

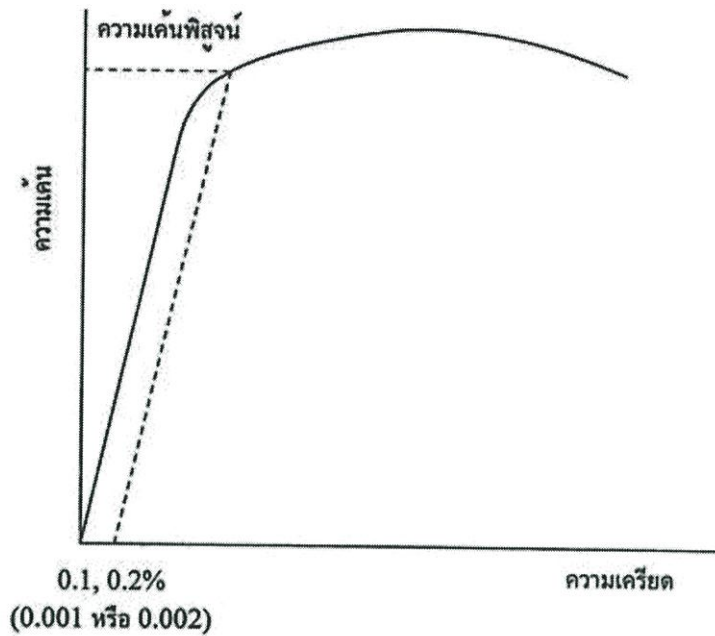
ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship) ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้จะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูป 2.7 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้ออกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability)



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) [8]

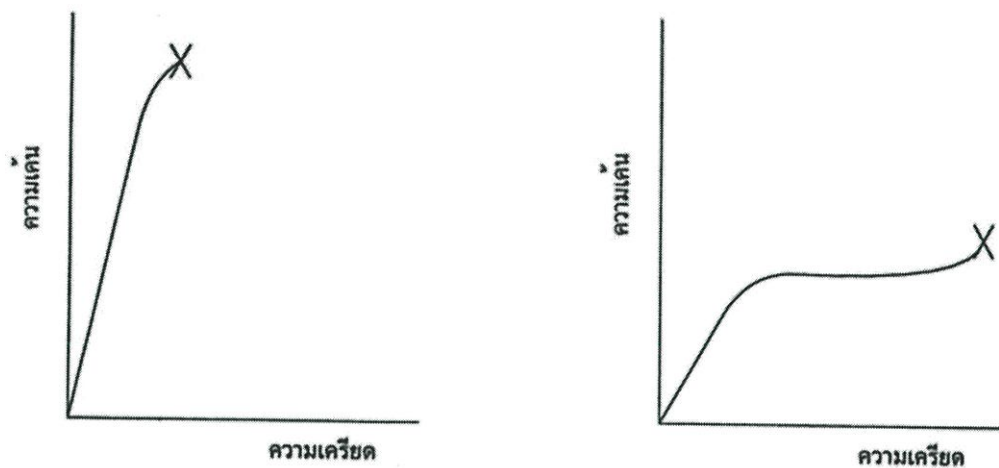
2.5.2.3 การทดสอบแรงดึง (Tension Test) [8]

วิธีการทดสอบนั้น จะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพลอตเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 2.7 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุชิ้น ๆ มาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้ เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด พบว่า เมื่อเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ชิ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้ได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้ เรียกว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิสัยสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่าพิสัยยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุชิ้นนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกลเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะ จะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่คงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหายวัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่ก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.8 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% Offset ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก [8]

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้อยู่ใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่า ค่าความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไป จะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เอง ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่ยังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่น ๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังรูป 2.9a ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังรูป 2.9b



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก [8]

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่าง ๆ ได้อีกดังนี้ คือ

1. ความเหนียว (Ductility) ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) ในทางปฏิบัติมักใช้ค่า %El มากกว่าเพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%El สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เปราะ , Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

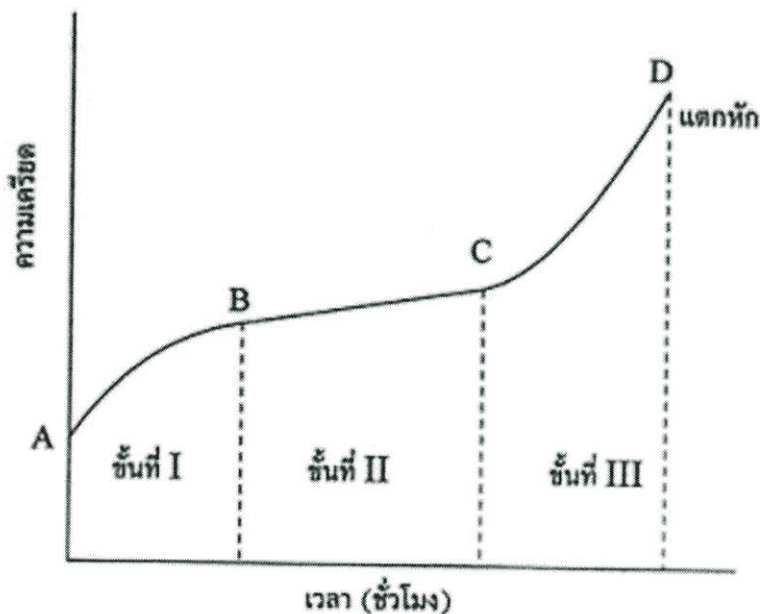
2. Modulus of Elasticity or Stiffness ภายใต้พิภักต์สัดส่วนซึ่งวัสดุมีพฤติกรรมเป็นอิลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness มักมีหน่วยเป็น ksi (1 ksi=1000 psi) หรือ kgf/mm² หรือ GPa ถ้าแรงที่มากกระทำเป็นแรงเฉือนเรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G) ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างอิลาสติกได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างอิลาสติกได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่าง ๆ ตารางที่ 2.2 จะแสดงตัวอย่างค่า E และ G ของวัสดุ ต่าง ๆ ไว้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างค่าคงที่ และ ของวัสดุชนิดต่าง ๆ [8]

วัสดุ	Modulus of elasticity 10 ⁶ psi	Shear Modulus 10 ⁶ psi
Aluminium alloy	10.5	4.0
Copper	16.0	6.0
Steel (plain carbon and low alloys)	29.0	11.0
Stainless Steel (18.8)	28.0	9.5
Titanium	17.0	6.5
Tungsten	58.0	22.8

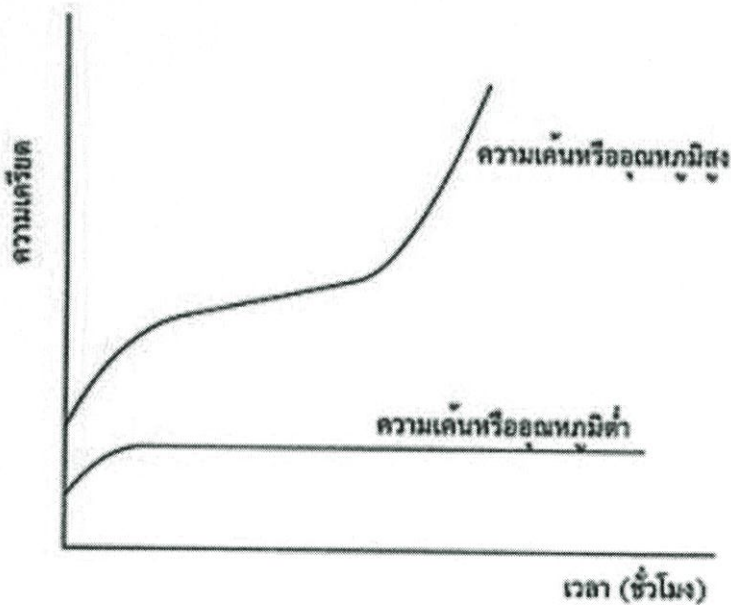
2.5.2.4 ความคืบ (Creep) [8]

วัสดุส่วนใหญ่เมื่ออยู่ภายใต้แรงที่มากกระทำ แม้ว่าจะต่ำกว่าพิกัดยืดหยุ่น หากทิ้งไว้นาน ๆ แล้ว ก็อาจเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรหรือแบบพลาสติกได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ ด้วยปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่า ความคืบ ปริมาณของความคืบที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ปริมาณของความเค้น อุณหภูมิและเวลา หากให้สภาวะที่เหมาะสมและมีเวลาเพียงพอ ความคืบจะเกิดขึ้นได้จนครบ 3 ขั้นตอน ดังที่แสดงในรูป ที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เส้นโค้งความคืบ [8]

เมื่อใช้แรงกระทำคงที่จะเกิดความเครียด (OA) ขึ้นทันที ซึ่งค่าความเครียด OA นี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและสภาวะที่ให้ (ปริมาณของแรงกระทำ ความเค้นและอุณหภูมิ) และจะมีความสัมพันธ์กับค่า Modulus of elasticity (E) ของวัสดุนั้น หลังจากนั้นวัสดุก็จะเริ่มเกิดความคืบในขั้นที่ I ซึ่งอัตราการเกิดความเครียดจะค่อย ๆ ลดลง (AB) ในขั้นที่ II (BC) อัตราการเกิดความเครียดจะคงที่และเป็นอัตราการเกิดความเครียดต่ำสุดในขณะที่วัสดุเกิด Creep ขึ้น อัตราการเกิดความเครียดนี้เรียกว่า Minimum Creep Rate จากนั้นเมื่อถึงขั้นที่ III (CD) อัตราการเกิดความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนวัสดุขาดหรือแตกออกจากกัน ที่จุด D การเกิดความคืบไม่จำเป็นจะต้องครบทั้ง 3 ขั้น ขึ้นอยู่กับสภาวะและเวลาที่ใช้ ดังรูปที่ 2.11

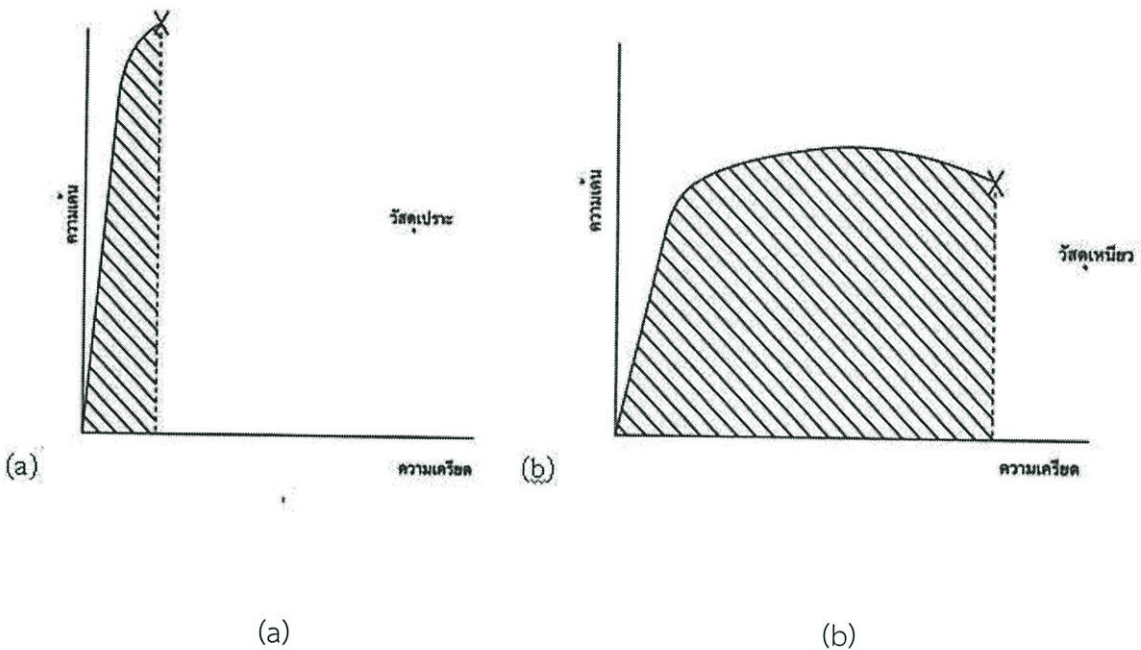


รูปที่ 2.11 Creep Curve ที่ Condition ต่างกัน [8]

เส้นบน ถ้าให้แรงกระทำที่ทำให้เกิดความเค้นหรืออุณหภูมิสูงพอจะเกิดความคืบจนครบ 3 ขั้น แต่เส้นล่างนั้นความเค้นหรืออุณหภูมิต่ำจะมีแค่ 2 ขั้นนั่นคือจะไม่เกิดการแตกหักขึ้น ในกรณีของพวกโพลีเมอร์ อาจเกิดความคืบขึ้นได้ แม้ที่อุณหภูมิต่ำ แต่โลหะส่วนใหญ่และพวกเซรามิกจะไม่เกิดความคืบที่อุณหภูมิต่ำ แต่ถ้าที่อุณหภูมิสูงก็อาจเกิดได้ ดังนั้น การใช้พวกโลหะหรือเซรามิกที่อุณหภูมิสูงจะต้องนำคุณสมบัติในการเกิดความคืบมาพิจารณาด้วย

2.5.2.5 ความแกร่ง (Toughness) [8]

ความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก เรียกว่า ความแกร่ง (Toughness) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความเหนียวของมัน โดยกำหนดว่า Modulus of Toughness เท่ากับพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ค่า Modulus of Toughness นี้ จะแสดงถึงงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้จนทำให้เกิดการแตกหักด้วย ข้อกำหนดนี้จะแสดงให้เห็นถึงข้อแตกต่างระหว่างวัสดุเหนียวที่มีความแกร่งสูงและวัสดุเปราะที่มีความแกร่งต่ำด้วย ดังรูปที่ 2.12 a และ b



รูปที่ 2.12 Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ [8]

2.5.2.6 ความล้า (Fatigue) [8]

เมื่อวัสดุถูกแรงซึ่งต่ำกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) มากกระทำกลับไปกลับมา ซ้ำ ๆ กันก็อาจจะเกิดการแตกหักขึ้นได้ เนื่องจากเกิดความล้าหรือ Fatigue ขึ้น ความล้าที่เกิดในวัสดุนี้เป็นสาเหตุใหญ่ของการเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรต่าง ๆ เพราะตลอดอายุงานของเครื่องจักร เช่น เครื่องยนต์ สวิตช์รีเลย์ ฯลฯ จะต้องเกิดความเค้นสลับไปสลับมาเป็นล้าน ๆ ครั้ง ทำให้เกิดการล้าขึ้นในชิ้นส่วนต่าง ๆ ของมันได้ ขบวนการเกิดความล้าที่แท้จริงยังไม่เป็นที่เข้าใจดีนัก แต่จากการศึกษาพบว่า ความล้าจะเกิดเป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกจะเกิดรอยแตกขึ้น เมื่อมีความเค้นรวมศูนย์ (Stress Concentration) ในบริเวณนั้น และในระยะที่สอง เมื่อมีความเค้นเข้าไปซ้ำมารอยแตกนี้จะโตขึ้นเรื่อย ๆ จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุลดลง จนกระทั่งแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด วัสดุ

ก็จะแตกหักจากกัน ถ้ากำหนดจำนวนรอบของความเค้นที่ทำเข้าไปเข้ามาแล้ว (โดยปกติจะใช้ที่ค่า 10^6 รอบ) ค่าความเค้นที่จะทำให้วัสดุแตกหักได้ที่จำนวนรอบของความเค้นรอบนั้น ๆ เรียกว่า Fatigue Strength สำหรับโลหะโดยเฉพาะพวกเหล็ก จะมีค่าความเค้นอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าใช้ความเค้นต่ำกว่านี้แล้ว ไม่ว่าจะจำนวนรอบของแรงกระทำจะเป็นเท่าใด วัสดุจะไม่แตกออก ค่าความเค้นนี้เรียกว่า Endurance Limit

2.5.2.7 ความแข็ง (Hardness) [8]

ความแข็งเป็นความต้านทานการเจาะทะลุ (penetration) หรือการเสียดสี (Abrasion) ของวัสดุ ความแข็งของวัสดุเกี่ยวข้องกับกำกับการจับตัวของอะตอมและโมเลกุลภายในเนื้อวัสดุ เช่นเดียวกับกับความแข็งแรง ดังนั้นความแข็งมักจะเพิ่มเมื่อวัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้นนั่นคือ พวกโลหะและเซรามิกจะแข็งกว่าพวกโพลีเมอร์การทดสอบความแข็งมีอยู่หลายวิธีแต่ที่ใช้กันมากที่สุดมี 3 วิธี คือ

1. การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) วิธีการ คือ ใช้ลูกบอลเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. กดลงบนผิวเรียบของวัสดุที่จะวัด โดยใช้แรง 3000 กก. สำหรับวัสดุแข็ง และ 500 กก. สำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลา 30 วินาที เป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม (Indentation) นำค่าที่ได้ไปคำนวณ จะได้ค่าความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Number) การทดสอบความแข็งแบบบริเนลนี้ ไม่เหมาะสมกับวัสดุแข็ง เนื่องจากความแข็งของหัวกดไม่มากนักนอกจากนี้ยังไม่เหมาะกับชิ้นทดสอบที่บางกว่าขนาดของรอยบุ๋ม

2. การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test) การทดสอบแบบนี้คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนล แต่ใช้หัวกดเล็กกว่าและแรงน้อยกว่า ค่าของแรงที่ใช้และชนิด หรือขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นกับสเกลของความแข็งแบบร็อคเวลที่จะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าความแข็งจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง กล่าวคือ ถ้าความลึกของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูง แสดงว่าวัสดุมีความแข็งมาก วิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อยคือ 10 กก. จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60 -100 กก. ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้ อาจจะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบแบบร็อคเวลนี้ ใช้อย่างกว้างขวางเพราะสามารถใช้วัดความแข็งของวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้มากกว่า สามารถวัดความแข็งของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนลวัดไม่ได้ การใช้งานสะดวกอ่านค่าได้รวดเร็วเพราะอ่านโดยตรงจากเครื่องและเนื่องจากรอยบุ๋มมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ

3. การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) การทดสอบแบบวิกเกอร์นี้คล้ายกับบริเนลในแง่ที่ว่า ค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่ต่างกันที่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปปิระมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5-120 กก. ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ

2.5.3 ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) [6]

ความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ สามารถทดสอบจากลักษณะการยืดออกของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงจากภายนอก โดยอาศัยเทอม 2 เทอมที่สัมพันธ์กัน คือ ความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ความเค้น คือ แรงที่ใช้ในการดึงหรือยืดตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด

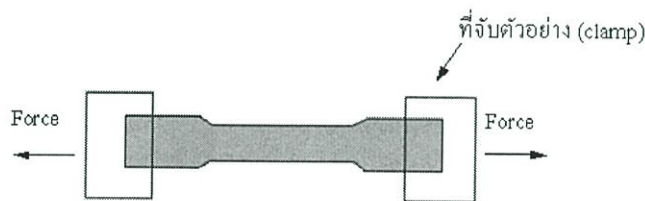
$$\text{ความเค้น} = \frac{\text{แรง (F)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด (A)}} \quad (2.2)$$

ความเครียด (ϵ) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงต่อความยาวเริ่มต้น เนื่องจากพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุเป็นลักษณะที่ขึ้นกับเวลา อัตราเร็วที่ความเค้นหรือแรงถูกให้กับตัวอย่างจึงมีผลต่อการยืดของตัวอย่าง หรือความเครียดเป็นอย่างมาก

$$\text{ความเครียด} = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนไป}}{\text{ความยาวเดิม}} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.3)$$

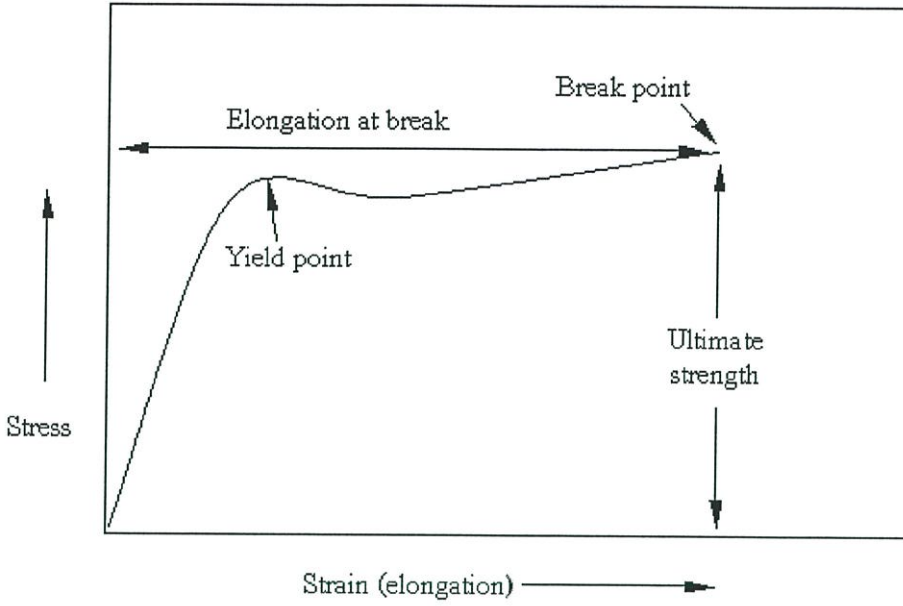
$$\text{โมดูลัส (Modulus)} = \frac{\text{ความเค้น}}{\text{ความเครียด}} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.4)$$

ตัวอย่าง เช่น เมื่อนำตัวอย่างประเภทเส้นใยมาทดสอบ โดยใช้แรงดึงอย่างรวดเร็วจนทำให้เส้นใยขาดออกโดยง่าย แต่เมื่อใช้แรงขนาดเดิมแต่ดึงอย่างช้า ๆ จะทำให้เส้นใยยืดออกและทนต่อแรงดึงอยู่ได้นานก่อนที่จะขาด ในทางปฏิบัติทั่วไปการทดสอบความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.13

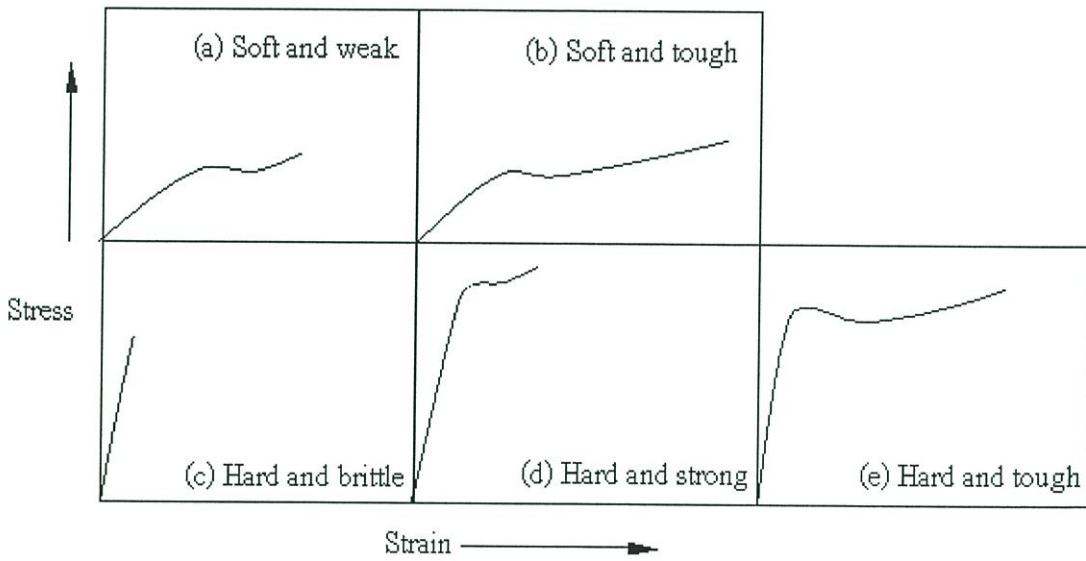


รูปที่ 2.13 รูปร่างตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบความเค้น และความเครียด [6]

ปลายของตัวอย่างถูกยึดด้วยที่จับ และจะถูกดึงให้ยืดออกด้วยแรงที่รู้ขนาดแน่นอน จากนั้นจึงนำข้อมูลไปพลอตกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Curve) สำหรับพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายยาง (Elastomer) ซึ่งเกิดการยืดออกได้ง่ายเมื่อได้รับแรงดึง กราฟที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 2.14 นอกจากความเค้นและความเครียด แล้วยังมีเทอมที่แสดงสมบัติเชิงกลประเภทอื่นของพอลิเมอร์ อีก เช่น Modulus หรือ Stiffness ซึ่งแสดงโดยค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด (หรือความชันในช่วงแรกของเส้นกราฟ) และ Toughness ซึ่งแสดงความต้านทานต่อการขาดดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น- ความเครียด [6]



รูปที่ 2.15 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่าง ๆ กัน [6]

ข้อมูลที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียด คือค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile Strength at Break) ซึ่งค่านี้สำหรับพอลิเมอร์ทั่วไป สรุปลงในตารางด้านล่าง ตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาดสำหรับพอลิเมอร์ทั่วไป [6]

Polymer	Tensile Strength (psi)
Polyethylene (Low to Medium Density)	1000 – 2400
Poly Tetrafluoroethylene)	3500
Polyethylene (High Density)	4400
Poly (Dimethylsiloxane)	5000
Polypropylene	5000
Poly (Vinylidene Chloride)	8000
Polystyrene	8000
ABS Terpolymer	8500
Polyamide	9000 – 12000
Polycarbonate	9500
Polyesters (Cast)	~ 10000
Polysulfone	10200 – 12000
Epoxy Resin	
Cast	12000
Molded	16000
Glass – filled Nylon	31000
Fabric – reinforced Epoxy Resin	60000 - 85000

2.6 คุณสมบัติของพอลิเมอร์ [3]

ชนิดของคุณสมบัติของพอลิเมอร์แบ่งอย่างกว้างๆได้เป็นหลายหมวดขึ้นกับความละเอียด ในระดับนาโนหรือไมโคร เป็นคุณสมบัติที่อธิบายลักษณะของสายโดยตรงโดยเฉพาะโครงสร้างของพอลิเมอร์ ในระดับกลาง เป็นคุณสมบัติที่อธิบายสัณฐานของพอลิเมอร์เมื่ออยู่ในที่ว่างในระดับกว้างเป็นการอธิบายพฤติกรรมโดยรวมของพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติในระดับการใช้งาน คุณสมบัติของพอลิเมอร์สามารถจำแนกได้เป็น ดังนี้

1. คุณสมบัติในการขนส่ง เป็นคุณสมบัติของอัตราการแพร่หรือโมเลกุลเคลื่อนไปได้เร็วเท่าใดในสารละลายของพอลิเมอร์มีความสำคัญมากในการนำพอลิเมอร์ไปใช้เป็นเยื่อหุ้ม
2. จุดหลอมเหลว จุดหลอมเหลวที่ใช้กับพอลิเมอร์ไม่ใช้การเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวแต่เป็นการเปลี่ยนจากรูปผลึกหรือกึ่งผลึกมาเป็นรูปของแข็ง บางครั้งเรียกว่าจุดหลอมเหลวผลึก ในกลุ่มของพอลิเมอร์สังเคราะห์จุดหลอมเหลวผลึกยังเป็นที่ถกเถียงในกรณีของเทอร์โมพลาสติกเช่นเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ที่สลายตัวในอุณหภูมิสูงมากกว่าจะหลอมเหลว

3. พฤติกรรมการผสม โดยทั่วไปส่วนผสมของพอลิเมอร์มีการผสมกันได้น้อยกว่าการผสมของโมเลกุลเล็กๆ ผลกระทบนี้เป็นผลจากข้อเท็จจริงที่ว่าแรงขับเคลื่อนสำหรับการผสมมักเป็นแบบระบบปิด ไม่ใช่แบบใช้พลังงาน หรืออีกอย่างหนึ่ง วัสดุที่ผสมกันได้ที่เกิดเป็นสารละลายไม่ใช่เพราะปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลที่ชอบทำปฏิกิริยากันแต่เป็นเพราะการเพิ่มค่าเอนโทรปีและพลังงานอิสระที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มปริมาตรที่ใช้งานได้ของแต่ละส่วนประกอบ การเพิ่มขึ้นในระดับเอนโทรปีขึ้นกับจำนวนของอนุภาคที่นำมาผสมกัน เพราะโมเลกุลของพอลิเมอร์มีขนาดใหญ่กว่าและมีความจำเพาะกับปริมาตรเฉพาะมากกว่าโมเลกุลขนาดเล็ก จำนวนของโมเลกุลที่เกี่ยวข้องในส่วนผสมของพอลิเมอร์มีค่าน้อยกว่าจำนวนในส่วนผสมของโมเลกุลขนาดเล็กที่มีปริมาตรเท่ากันค่าพลังงานในการผสมเปรียบเทียบได้ต่อหน่วยปริมาตรสำหรับส่วนผสมของพอลิเมอร์ และโมเลกุลขนาดเล็ก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นของพลังงานอิสระในการผสม สารละลายพอลิเมอร์และทำให้การละลายของพอลิเมอร์เกิดได้น้อย สารละลายพอลิเมอร์ที่เข้มข้นพบน้อยกว่าที่พบในสารละลายของโมเลกุลขนาดเล็ก ในสารละลายที่เจือจาง คุณสมบัติของพอลิเมอร์จำแนกโดยปฏิกิริยาระหว่างตัวทำละลายและพอลิเมอร์ ในตัวทำละลายที่ดี พอลิเมอร์จะพองและมีปริมาตรมากขึ้น แรงระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายกับหน่วยย่อยจะสูงกว่าแรงภายในโมเลกุลในตัวทำละลายที่ไม่ดี แรงภายในโมเลกุลสูงกว่าและสายจะหดตัว ในตัวทำละลายแบบอีตา หรือสถานะที่สารละลายพอลิเมอร์ซึ่งมีค่าของสัมประสิทธิ์วีเรียลที่สองเป็นศูนย์แรงผลักระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับตัวทำละลายเท่ากับแรงภายในโมเลกุล ระหว่างหน่วยย่อย ในสภาวะนี้พอลิเมอร์อยู่ในรูปเกลียวอุดมคติ

4. การแตกกิ่ง การแตกกิ่งของสายพอลิเมอร์มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทั้งหมดของพอลิเมอร์ สายยาวที่แตกกิ่งจะเพิ่มความเหนียว เนื่องจากการเพิ่มจำนวนของความซับซ้อนต่อสาย ความยาวอย่างสุ่มและสายสั้นจะลดแรงภายในพอลิเมอร์เพราะการรบกวนการจัดตัวโซ่ข้างสั้นๆ ลดความเป็นผลึกเพราะรบกวนโครงสร้างผลึก การลดความเป็นผลึกเกี่ยวข้องกับการเพิ่มลักษณะโปร่งใสแบบกระจกเพราะแสง ผ่านบริเวณที่เป็นผลึกขนาดเล็ก ตัวอย่างที่ดีของผลกระทบนี้เกี่ยวข้องกับขอบเขตของลักษณะทางกายภาพของพอลิเอทิลีน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีระดับการแตกกิ่งต่ำมีความแข็งและใช้เป็นเหยือกนม พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีการแตกกิ่งขนาดสั้นๆ จำนวนมาก มีความยืดหยุ่นกว่าและใช้ในการทำฟิล์มพลาสติก ดัชนีการแตกกิ่งของพอลิเมอร์เป็นคุณสมบัติที่ใช้จำแนกผลกระทบของการแตกกิ่ง

5. สายยาวต่อขนาดของโมเลกุลที่แตกกิ่งในสารละลายเดนไดรเมอร์ เป็นกรณีพิเศษของพอลิเมอร์ที่หน่วยย่อยทุกตัวแตกกิ่ง ซึ่งมีแนวโน้มลดแรงระหว่างโมเลกุลและการเกิดผลึก พอลิเมอร์แบบเดนไดรติกไม่ได้แตกกิ่งอย่างสมบูรณ์แต่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ เดนไดรเมอร์เพราะมีการแตกกิ่งมากเหมือนกัน

6. การเติมพลาสติกไซเซอร์ การเติมพลาสติกไซเซอร์มีแนวโน้มเพิ่มความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ พลาสติกไซเซอร์โดยทั่วไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายกับพอลิเมอร์และเข้าเติมในช่องว่างของพอลิเมอร์ที่เคลื่อนไหวได้ดีและลดปฏิกิริยา ระหว่างสายตัวอย่างที่ดีของพลาสติกไซเซอร์เกี่ยวข้องกับพอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี พีวีซี ที่ไม่ได้เติมพลาสติกไซเซอร์ใช้ทำท่อ ส่วนพีวีซีที่เติมพลาสติกไซเซอร์ใช้ทำผ้าเพราะมีความยืดหยุ่นได้มากกว่า

2.7 แบบการใช้งานของพอลิเมอร์ [3]

พอลิเมอร์ที่มีการใช้งานในชีวิตประจำวันนั้น สามารถแบ่งออกตามลักษณะทางกายภาพได้ออกมากว้าง ๆ ได้ 4 แบบ

1. เส้นใย เป็นพอลิเมอร์กลุ่มที่แข็งแรงที่สุด เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยนั้นมีขนาดเล็กมาก ตัวพอลิเมอร์เองจึงจำเป็นต้องรับแรงในแนวแกนเส้นใยให้ได้สูงสุด เส้นใยจึงมีลักษณะทางกายภาพที่ดูเบาบาง แต่มีความแข็งแรงสูง

2. พลาสติก มีความแข็งแรงรองจากเส้นใย แม้ว่าการใช้งานพลาสติกนั้น จะมีมิติความกว้าง ยาว สูง มากกว่าเส้นใยหลายเท่า ทำให้ดูเหมือนว่าแข็งแรงกว่าเส้นใย แต่ถ้าลองนำพลาสติกไปฉีกให้มีความบางเท่าเส้นใย จะพบว่ามันแข็งแรงน้อยกว่ามาก

3. ยาง มีจุดเด่นคือความยืดหยุ่นสูง จึงไม่เปรียบเทียบเรื่องความแข็งแรง แต่มักจะคำนึงถึงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนขาด (Elongation at Break) และแรงดึงที่จุดขาด (Load at Break) แทน นอกจากนี้พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้จำเป็นต้องมีการคืนตัวกลับได้ดีด้วย (Recovery Property) จึงต้องมีการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโซ่โมเลกุลด้วยการเชื่อมขวาง (Crosslink) ซึ่งจุดที่เชื่อมขวางนี้ควรจะอยู่ห่างกันในระยะที่เหมาะสม เนื่องจากหากถี่เกินไป ยางที่ได้จะมีลักษณะแข็งไม่ยืดหยุ่น ในขณะที่ถ้าห่างเกินไป ก็จะได้ยางที่มีลักษณะนิ่มเกินไป

4. สารละลายและลาเทกซ์ สารละลายและลาเทกซ์ ใช้งานในรูปของพอลิเมอร์ที่กระจายตัวในของเหลวอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นตัวทำละลายของพอลิเมอร์ หรือกระจายตัวเป็นอิมัลชันในน้ำ ลักษณะการใช้งานคือเป็นกาว สีทาบ้าน เซลลูลีค หรือสารเคลือบผิวอื่นๆ พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ควรจะกระจายตัวได้ดีและมีความสามารถในการเชื่อมขวางได้ในสถานะที่มีแสง หรือแก๊ซออกซิเจนได้หรือไม่ก็สามารถที่จะนำตัวเองไปเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัสดุอื่นๆ

2.8 ประวัติความเป็นมาของพลาสติก [9]

ในปี ค.ศ.1868 (พ.ศ.2411) ช่างพิมพ์ (Printer) ชาวอเมริกันชื่อ John Wesley Hyatt ได้ค้นพบพลาสติกชนิดแรกของสหรัฐอเมริกาชื่อเซลลูลอยด์ (Celluliod) หรือ Cellulose Nitrate โดยการนำเอาไพโรกซีลีน (Pyroxylin) ซึ่งทำจากฝ้ายกับกรดไนตริกผสมกับการบูร (Solid Camphor) ทำเป็นลูกบิลเลียด ซึ่งเกิดขาดแคลนมากในระยะนั้น ขณะเดียวกันที่ประเทศอังกฤษได้นำไพโรกซีลีนไปทำเป็นวัสดุเคลือบผิว (Coating Materials) ต่อมา ได้มีผู้นำเอาเซลลูลอยด์ดัดแปลงไปใช้ทำหมึกพิมพ์ปลอมแทนการใช้อย่างแข็ง หลังจากนั้น ได้นำเอาไปใช้ทำกระจกรถยนต์ จนกระทั่งปีค.ศ.1882 (พ.ศ.2425) บริษัท Eastman ได้ประดิษฐ์ทำเป็นฟิล์มภาพยนตร์ การคิดค้นพลาสติกได้หยุดชะงักไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง จนกระทั่งปีค.ศ.1909 (พ.ศ.2452) Dr.Leo Hendrick Baekeland ได้ค้นพบพลาสติกชื่อฟีนอล - พอร์มาลดีไฮด์ (Phenol Formaldehyde) หรือฟีนอลโนลิก (Phenolic) โดยการสังเคราะห์ฟีนอลกับ

พอร์มาลดีไฮด์เข้าด้วยกัน พลาสติกชนิดนี้รู้จักกันดีในชื่อเบเกอร์ไลต์ ซึ่งใช้ทำด้ามกะทะหุหม้อ และ อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ต่อมาได้มีการคิดพลาสติกใหม่ ๆ ขึ้นมาเรื่อย ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปีกำเนิดพลาสติกชนิดต่าง ๆ [9]

ค.ศ.	ชื่อพลาสติก	ประเภทผลิตภัณฑ์
1868	Cellulose Nitrate	กรอบแว่นตา ลูกบิลเลียด พลาสติก บรรจุของวัสดุใช้ทำฟัน ปลอดภัย (ปัจจุบันใช้อะคริลิกแทน) ลูกปิงปอง
1909	Phenol - Formaldehyde (Phenolic)	ผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์ไฟฟ้า ด้ามมือจับหม้อ กะทะ (ชนิดสีเข้ม) โฟม
1909	Cold Molded	ปุ่มจับ, มือถือ
1909	Phenol - Formaldehyde (Phenolic)	ผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์ไฟฟ้า ด้ามมือจับหม้อ กะทะ (ชนิดสีเข้ม) โฟม
1926	Alkyd	ผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์ไฟฟ้า น้ำยาเคลือบผิวสีน้ำมัน
1926	Aniline - Formaldehyde	อุปกรณ์ไฟฟ้า
1927	Cellulose Acetate	ฟิล์มถ่ายภาพ พลาสติกบรรจุของ
1927	Polyvinyl Chloride (PVC)	ฝ้ายาง กระเบื้องยาง ท่อยาง สายไฟ ขวดบรรจุของเหลว เช่น ขวดน้ำมันพืช ขวดแชมพูสระผม
1929	Urea - Formaldehyde	ผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์ไฟฟ้า, กาวไม้อัด
1936	Ethyl Cellulose	ผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์ไฟฟ้า
1936	Acrylic	ป้ายโฆษณา เลนซ์ หลังคาโปร่งใส ของชำร่วย
1936	Polyvinyl Acetate	ยางประคบข้อต่อ กาว
1938	Cellulose Acetate Butyrate	พลาสติกบรรจุของ ด้ามเครื่องมือ พวงมาลัยรถยนต์
1938	Polystyrene (PS)	ผนังด้านในตู้เย็น ลังแบตเตอรี่ กล่องบรรจุชนิดใสและทึบ ตู้วิทยุ หน้ากากโทรทัศน์ ตลับเทป โฟมสีขาว
1938	Nylon (Polyamide)	เส้นใย เสื้อผ้า เกียร์ ส่วนรับน้ำหนักและเสียดสี
1938	Polyvinyl Acetal	กระจกแว่นตาใช้ในโรงงาน
1939	Polyvinylidene Chloride	พลาสติกหุ้มเบาะรถยนต์ (บางชนิด)
1939	Melamine - Formaldehyde	ถ้วยชาม ภาชนะบรรจุอาหาร
1942	Polyester (Unsaturated)	ผลิตภัณฑ์ ไฟเบอร์กลาส เช่น เรือ รถยนต์ อ่างอาบน้ำ ถังน้ำ และผลิตภัณฑ์พลาสติกหล่อ
1942	Polyethylene (PE)	ขวด ถุงพลาสติก ถังพลาสติกดอกไม้พลาสติก
ค.ศ.	ชื่อพลาสติก	ประเภทผลิตภัณฑ์
1943	Fluorocarbon (Teflon)	วาล์ว ส่วนรับน้ำหนัก แผ่นกั้นระหว่างรอยต่อใน เครื่องจักรกล วัสดุเคลือบหม้อกระทะ

ตารางที่ 2.4 ปีกำเนิดพลาสติกชนิดต่าง ๆ (ต่อ) [9]

1943	Silicone	แผ่นฉนวนกันความร้อนในเครื่องจักร แม่แบบยางในอุตสาหกรรมพลาสติกหล่อ กาวเชื่อมกระจกตู้ปลา
1945	Cellulose Propionate	พลาสติกบรรจุของ ปากกา
1947	Epoxy	ผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสชนิดติน้ำยาเคลือบผิว กาว เครื่องมือและอุปกรณ์ (Tool & Jigs)
1948	Acrylonitrile - Butadiene - Styrene (ABS)	เครื่องรับโทรทัศน์ กระจาใส่เสื้อผ้า หมวกกันน็อคชนิดดี ตัวโครงเครื่องใช้ไฟฟ้า
1949	Allylic	อุปกรณ์ไฟฟ้า
1954	Polyurethane	พองน้ำ หนังเทียม วัสดุเคลือบผิวไม้และสลัก
1956	Acetal	เกียร์ ส่วนรับน้ำหนักและเสียดสี
1957	Polypropylene (PP)	หมวกกันน็อค ผนังด้านในตู้เย็น ลังแบตเตอรี่ ถุงพลาสติก และภาชนะพลาสติก อื่นๆ
1957	Polycarbonate	กระจกหน้าหมวกของนักบินอวกาศ โคมไฟฟ้าสาธารณะ ขวดนมเด็กชนิดดี
1959	Chlorinated Polyether	วาล์ว
1962	Phenoxy	ขวด
1962	Polyallomer	เครื่องพิมพ์ดีด
1964	Ionomer	พลาสติกบรรจุเครื่องมือหรือของมีคม (Skin Packages) ลูกกอล์ฟ
1964	Polypropylene Oxide	ลังแบตเตอรี่
1964	Polyimide	ส่วนรับน้ำหนัก ชิ้นส่วนอุปกรณ์มิเตอร์วัดน้ำ
1964	Ethylene - Vinyl Acetate	ฝ้ายางพลาสติกชนิดหนา
1965	Patylene	น้ำยาเคลือบผิว
1965	Polysulfone	ผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าชนิดทนความร้อนสูง
1970	Polyester (Thermoplastic)	ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เส้นใย फिल्मไมลาร์
1973	Polybutylene	ท่อน้ำ
1975	Nitrile Resins	ภาชนะบรรจุ

2.9 พลาสติก [10]

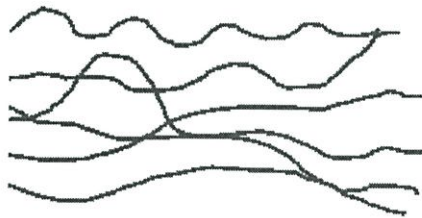
พลาสติก จัดเป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยโมเลกุลซ้ำๆ กันต่อกันเป็นโมเลกุลสายยาวๆ ประกอบด้วยธาตุสำคัญ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน นอกจากนี้ อาจมีธาตุอื่นๆเป็นส่วนประกอบย่อย ซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน ฟลูออรีน คลอรีน และกำมะถัน เป็นต้น บางครั้งพบว่ามีการใช้คำว่า "พลาสติก" และ "พอลิเมอร์" ในความหมายเดียวกัน หรือใกล้เคียงกัน แต่คำว่า "พอลิเมอร์" มักหมายถึงวัสดุประเภทพลาสติก ยาง เส้นใย และกาว ส่วนคำว่า "พลาสติก" จะหมายถึงสารผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง เช่น สี สารพลาสติกไซเซอร์ สารเพิ่มเสถียรภาพ และฟิลเลอร์ ที่ถูกนำมาใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปโดยการขึ้นรูปให้มีรูปร่างต่างๆ เช่น ถัง จาน และช้อน เป็นต้น

2.10 ประเภทของพลาสติก [10]

หากแบ่งประเภทของพลาสติกตามสมบัติทางความร้อน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

พอลิเมอร์ประเภทนี้จะมีโครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นแบบเส้นตรงหรือแบบกิ่งสั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืดเนื่องจาก โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่พันกันอยู่สามารถเคลื่อนที่ผ่านกันไปมาได้ ง่ายขึ้นเมื่อได้รับความร้อน และเมื่อเย็นตัวลงก็จะแข็งตัว ซึ่งการหลอมเหลวและเย็นตัวนี้ สามารถเกิดกลับไปกลับมาได้โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพ หรือโครงสร้างของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงมากนัก

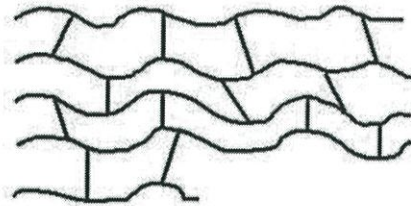


รูปที่ 2.16 โครงสร้างของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) [10]

พลาสติกประเภทนี้สามารถขึ้นรูปโดยการฉีดขณะที่พลาสติกถูกทำให้อ่อนตัวและไหลได้ด้วย ความร้อนและความดัน เข้าไปในแม่แบบที่มีช่องว่างเป็นรูปร่างตามต้องการ ภายหลังจากที่พลาสติกไหลเข้าจนเต็มแม่พิมพ์จะถูกทำให้เย็นตัว และถอดออกจากแม่พิมพ์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามต้องการ สามารถนำไปใช้งานได้ เมื่อใช้เสร็จแล้วสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้โดยการบด และหลอมด้วยความร้อนเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีก แต่พลาสติกประเภทนี้มีข้อเสียและขีดจำกัดของการใช้งาน คือไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ เพราะอาจเกิดการบิดเบี้ยวหรือเสียรูปร่างไป ตัวอย่างเช่น ขวดน้ำดื่มไม่เหมาะสำหรับใช้บรรจุน้ำร้อนจัดหรือเดือด

2. เทอร์โมเซตติง (Thermosetting)

โพลิเมอร์ประเภทนี้จะมีโครงสร้างเป็นแบบร่างแห ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งจะหลอมเหลวได้ในขั้นตอนการขึ้นรูปครั้งแรกเท่านั้น ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ทำให้โพลิเมอร์มีรูปร่างที่ถาวร ไม่สามารถหลอมเหลวได้อีกเมื่อได้รับความร้อน และหากได้รับความร้อนสูงเกินไป จะทำให้พันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลแตกออก ได้สารที่ไม่มีสมบัติของความเป็นโพลิเมอร์ต่อไป



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติง (Thermosetting) [10]

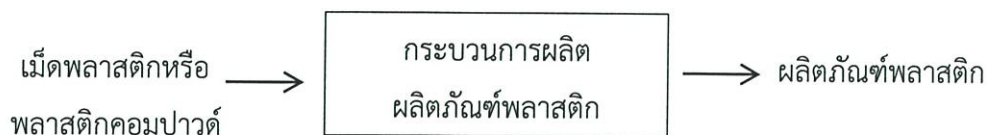
การผลิตพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตจะแตกต่างจากพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก คือ ในขั้นตอนแรกต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันเพียงบางส่วน มีการเชื่อมโยงโมเลกุลเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อย และยังสามารถหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน แสดงดังตารางที่ 2.5 จึงสามารถขึ้นรูปภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงได้ เมื่อผลิตภัณฑ์มีรูปร่างตามต้องการแล้ว ให้คงอุณหภูมิไว้ประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้โครงสร้างแบบร่างแหที่เสถียรและแข็งแรง สามารถนำผลิตภัณฑ์ออกจากแบบโดยไม่ต้องรอให้เย็น เนื่องจากผลิตภัณฑ์จะแข็งตัวอยู่ในแม่พิมพ์ ดังนั้นการให้ความร้อนในกระบวนการผลิตพลาสติกเทอร์โมเซตกลับทำให้วัสดุแข็งขึ้น ต่างจากกระบวนการผลิตพลาสติกเทอร์โมพลาสติกที่การให้ความร้อนจะทำให้พลาสติกนิ่ม และหลอมเหลว พลาสติกเทอร์โมเซตเมื่อใช้งานเสร็จแล้วไม่สามารถนำมาผ่านการหลอมและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) ได้อีก และถ้าให้ความร้อนมากเกินไป จะทำให้พลาสติกเกิดการสลายตัวหรือไหม้ โดยไม่เกิดการหลอมเหลว [9]

ตารางที่ 2.5 แสดงความแตกต่างระหว่างประเภทพลาสติก Thermoplastic และ Thermosetting [11]

Thermoplastic	Thermosetting
1. เป็นโพลิเมอร์แบบเส้นหรือแบบกึ่ง	1. เป็นโพลิเมอร์แบบเชื่อมโยงหรือแบบร่างแห
2. จะอ่อนตัวหรือหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน	2. จะแข็งตัวเมื่อได้รับความร้อน
3. ต้องทำให้เย็นก่อนเอาออกจากแม่แบบ มิฉะนั้นจะเสียรูปทรงได้	3. ไม่ต้องรอให้เย็นก่อนเอาออกจากแม่แบบ
4. ไม่เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันในแม่พิมพ์	4. เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันในแม่พิมพ์
5. นำมารีไซเคิลโดยการหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้	5. ไม่สามารถนำมารีไซเคิลได้

2.11 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกเบื้องต้น [12]

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก หรือกระบวนการแปรรูปพลาสติกเป็นการทำให้พลาสติกที่ผลิตจากโรงงานซึ่งมักมีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นผงเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แผนภาพกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก [12]

ในการทำให้พลาสติกเกิดเป็นรูปร่างต่างๆ นั้นต้องทำให้พลาสติกอยู่ในสถานะของไหล โดยอาจทำให้พลาสติกเกิดการหลอมด้วยความร้อนหรือทำให้พลาสติกอยู่ในสถานะสารละลาย ทั้งนี้เพื่อให้พลาสติกสามารถเกิดเป็นรูปร่างต่างๆ ตามลักษณะชิ้นส่วนที่ควบคุมการเกิดรูปร่างของผลิตภัณฑ์พลาสติก เช่น แม่แบบหรือหัวตาย หลังการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกจะต้องผ่านกระบวนการหล่อเย็น เพื่อให้สามารถคงรูปร่างได้ โดยในพลาสติกประเภทเทอร์มอพลาสติกจะเกิดการแข็งตัวเมื่อได้รับความเย็น ในขณะที่พลาสติกประเภทเทอร์มอเซตจะเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล (Crosslinking) กระบวนการผลิตหรือการแปรรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกมีหลายวิธี แต่วิธีที่สำคัญและนิยมทำกันในวงการอุตสาหกรรมพลาสติก ได้แก่ การฉีดพลาสติก (Injection Molding) การอัดรีด (Extrusion) การอัด (Compression Molding) การถ่ายโอน (Transfer Molding) การเป่า (Blowing) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) การรีด (Calendering) การอัดแบบชนิดหมุน (Rotation molding) และการหล่อ (Casting) เป็นต้น

2.11.1 การเตรียมพลาสติกเพื่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก [12]

การเตรียมพลาสติกเพื่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการแปรรูปพลาสติกจัดขั้นตอนที่จำเป็น เพื่อเตรียมพลาสติกซึ่งอยู่ในลักษณะวัตถุดิบให้พร้อมที่จะนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้ โดยปกติพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปจะต้องมีการผสมสารเคมีที่เรียกว่า สารเติมแต่ง (Additives) หลายชนิดเพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์พลาสติกและปรับปรุงความสามารถในการแปรรูปพลาสติกเพื่อให้แปรรูปได้ง่ายขึ้น กระบวนการเตรียมพลาสติกเพื่อกระบวนการแปรรูปจึงประกอบด้วย การบดย่อย การผสมขณะที่เป็นของแข็ง (Mixing) การผสมขณะที่เป็นของเหลวหรือการคอมปาวด์ (Compounding) และ การทำพลาสติกเม็ด (Pelletizing)

2.12 การคอมปาวด์ (Compounding) [12]

การคอมปาวด์เป็นการผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ กับพลาสติก โดยพลาสติกจะถูกให้ความร้อนจนอยู่ในสภาวะหลอม จากนั้นสารเติมแต่งและพลาสติกหลอมจะถูกรวมผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เทคนิคการคอมปาวด์พลาสติก สามารถแบ่งออกเป็น การคอมปาวด์แบบกะ (Batch Compounding) และการคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง (Continuous Compounding)

2.12.1 การคอมปาวด์แบบกะ (Batch Compounding) [12]

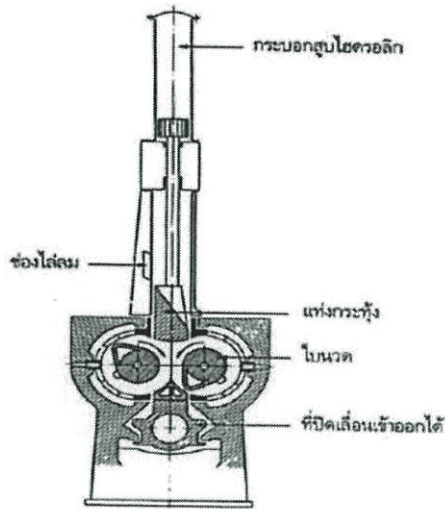
ตัวอย่างของเครื่องคอมปาวด์แบบนี้ ได้แก่ เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll Mill Mixer) เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal Mixer)

ก. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll Mill Mixer)

เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยลูกกลิ้งสองลูกซึ่งทำจากเหล็กหล่อที่มีการเคลือบผิวให้มีความแข็งและลื่น ลูกกลิ้งทั้งสองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 300 - 500 มิลลิเมตร และความยาวระหว่าง 800 - 1,500 มิลลิเมตร โดยวางขนานกันและหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วแตกต่างกันเล็กน้อย ในขณะที่ทำการผสมจะมีการให้ความร้อนแก่พลาสติกผ่านผิวลูกกลิ้งทั้งสอง โดยความร้อนของลูกกลิ้งมาจากชุดให้ความร้อนไฟฟ้าหรือการไหลเวียนของน้ำร้อน หรือน้ำมันร้อนผ่านภายในลูกกลิ้ง ข้อดีของเครื่องผสมแบบนี้ คือ สามารถมองเห็นลักษณะและระดับการผสมเข้ากัน ของสารเติมแต่งและพลาสติกได้ สามารถทำการผสมในปริมาณที่แตกต่างกันได้ สะดวกในการทำความสะอาด รวมทั้งการผสมแบบนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ในลักษณะแผ่น ซึ่งเหมาะสำหรับการแปรรูปต่อโดยบางเทคนิค เช่น การอัด (Compression Molding) สำหรับข้อเสียของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ผู้ปฏิบัติต้องมีทักษะในการใช้เครื่อง และมีความรู้เกี่ยวกับการคอมปาวด์สูง ต้องมีการช่วยผสม โดยการปาดพลาสติกให้เข้าไปอยู่ตรงกลางระหว่างลูกกลิ้งเสมอ ความสม่ำเสมอในการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างต่ำ และเกิดการสูญเสียสารเคมีหรือการปนเปื้อนได้ง่ายเนื่องจากการผสมในระบบเปิด

ข. เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal Mixer)

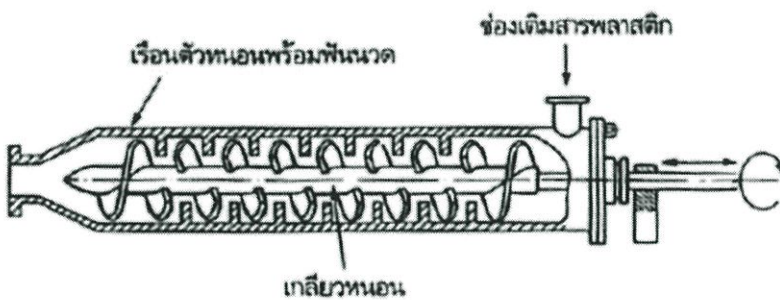
เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งมีพื้นผิวไม่ราบเรียบเหมือนผิวลูกกลิ้งจำนวนสองชุดบรรจุอยู่ในห้องผสมที่สามารถปรับอุณหภูมิได้ โดยใช้น้ำมันร้อนหรือน้ำไหลหมุนเวียน โรเตอร์ทั้งสองหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วในการหมุนที่สามารถปรับได้ การหมุนของโรเตอร์ภายในห้องผสมทำให้เกิดแรงเฉือนภายในห้องผสมสูงมาก จึงทำให้การกระจายตัวของสารเติมแต่งในพลาสติกเกิดขึ้นได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ข้อดีของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ใช้เวลาในการผสมสั้น ผู้ปฏิบัติไม่จำเป็นต้องมีทักษะสูง ไม่มีการสูญเสียวัสดุหรือเกิดการปนเปื้อน เนื่องจากการผสมทำในระบบปิด ขนาดและความสม่ำเสมอของการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างแน่นอน สำหรับข้อเสียของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ไม่สามารถมองเห็นการผสมได้และการทำความสะอาดห้องผสมทำได้ยาก



รูปที่ 2.19 เครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer) [12]

2.12.2 การคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง (Continuous Compounding) [12]

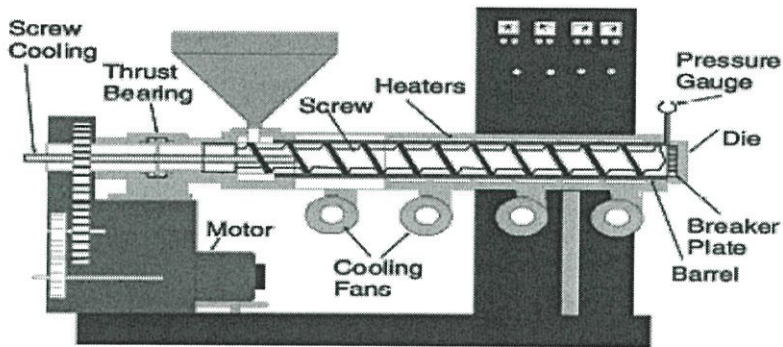
โดยทั่วไปการคอมปาวด์แบบต่อเนื่องมักใช้เครื่องอัดรีด (Extruder) หรือเครื่องนวดผสมร่วม (Co-kneader) แสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งประกอบด้วยสกรูหรือฟันนวดที่หมุนอยู่ภายในกระบอบอัดรีด การหมุนของสกรูทำให้เกิดแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวไปทุกทิศทางของส่วนผสม ซึ่งทำให้การผสมเกิดขึ้นในระดับที่ละเอียดกว่าการคอมปาวด์แบบกะ เครื่องอัดรีดที่ใช้ในการคอมปาวด์พลาสติกมักจะใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่เป็นหลัก ส่วนเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวจะใช้ในกรณีที่ไม่ต้องการความพิถีพิถันในการคอมปาวด์มากนัก



รูปที่ 2.20 เครื่องนวดผสมร่วม (Co-kneader) [12]

ก. อัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single Screw Extruder)

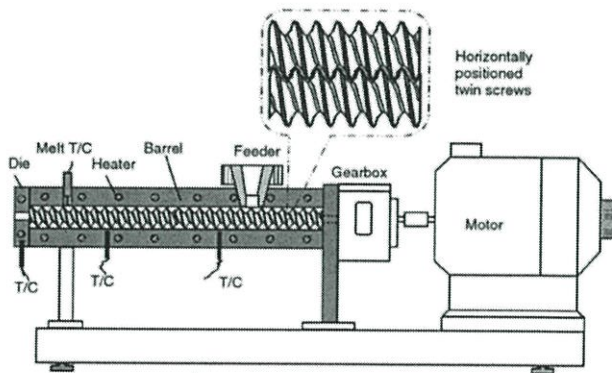
โดยทั่วไปเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวที่ใช้ในการแปรรูปพลาสติกมักใช้สกรูแบบธรรมดา ซึ่งไม่สามารถผสมสารเติมแต่งให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกับพลาสติกได้ เนื่องจากการหมุนของสกรูแบบนี้ไม่ก่อให้เกิดแรงเฉือนมากพอที่จะทำให้สารเติมแต่งต่างๆ เกิดการกระจายตัวได้ดีถึงระดับโมเลกุล แสดงในรูปที่ 2.21 ดังนั้น การใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวในการคอมปาวด์พลาสติกจึงต้องปรับปรุงลักษณะของสกรู โดยการเพิ่มส่วนที่เพิ่มแรงเฉือนของสกรู



รูปที่ 2.21 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single Screw Extruder) [12]

ข. เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder)

เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่มักมีประสิทธิภาพการผสมสูงกว่าเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ทั้งนี้เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของสกรูคู่สูงกว่า โดยลักษณะการหมุนของสกรูคู่มีสองแบบ ได้แก่ การหมุนในทิศทางเดียวกัน (Co-rotating Screw) และการหมุนสวนทางกัน (Counter-rotating Screw) โดยในการทำคอมปาวด์พลาสติก มักใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่มีลักษณะการหมุนของสกรูคู่แบบหมุนในทิศทางเดียวกัน แสดงในรูปที่ 2.22



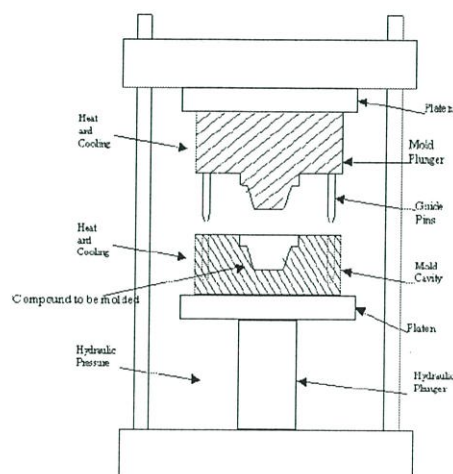
รูปที่ 2.22 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) [12]

2.13 กระบวนการกดอัด [12]

กระบวนการแปรรูปพลาสติกด้วยกระบวนการกดอัดหรือการอัดแบบชนิดแรงอัด เป็นเทคนิคการแปรรูปที่เก่าแก่ที่สุดเทคนิคหนึ่ง โดยเริ่มมีการประยุกต์ใช้ครั้งแรกหลังจาก Bakeland ค้นพบการสังเคราะห์ฟีนอล ฟอรัมาลดีไฮด์ เรซินในปี ค.ศ. 1908 แต่ในปัจจุบันก็ยังคงมีการใช้เทคนิคนี้ในการแปรรูปพลาสติกอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งการแปรรูปยาง (Rubbers และ Elastomers) และพลาสติกประเภทเทอร์มอเซต (Thermosets) เช่น ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic Resin) อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) เมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde) และยูเรียฟอรัมาลดีไฮด์ (Urea formaldehyde) เป็นต้น นอกจากนี้ยังนิยมใช้ในการแปรรูปเทอร์มอพลาสติก (Thermoplastics) ที่แปรรูปโดยเทคนิคอื่นได้ยาก เช่น การแปรรูปเทอร์มอพลาสติกคอมโพสิตที่มีการผสมไฟเบอร์ต่างๆ การแปรรูปเทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์ และการแปรรูปพลาสติกไวนิลและสไตรีนสำหรับทำแผ่นเสียงที่ต้องการความละเอียดแน่นอน เป็นต้น สำหรับตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการกดอัด ได้แก่ ช้อน ขาม จาน ที่เขียนหรือ สวิตช์ไฟ กล่องบรรจุสวิตช์ หูหม้อ หูกระโหะ มือจับเตารีด แผ่นเสียง และตัวกวนของเครื่องซักผ้า เป็นต้น

2.13.1 ลักษณะเครื่องกดอัด [12]

กระบวนการกดอัดเป็นเทคนิคการแปรรูปพลาสติกที่ไม่ซับซ้อน โดยหลักการทำงานของกระบวนการกดอัด คือ การนำเม็ดหรือผงพลาสติกมาอัดในแม่แบบ (Mold) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อให้พลาสติกหลอมและไหลเข้าสู่ช่องว่างภายในแม่แบบ (Cavity) ส่วนประกอบหลักของเครื่องกดอัด (Compression Molding Machine) คือ แผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ (Movable Platen) ส่วนอีกแผ่นหนึ่งจะถูกยึดติดกับที่ (Fixed Platen) แม่แบบสำหรับการแปรรูปพลาสติกทั้งตัวผู้และตัวเมียจะถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่นนี้แสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ส่วนประกอบหลักของเครื่องกดอัด [12]

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ รวมด้วย ได้แก่

ก. ระบบการขับเคลื่อน

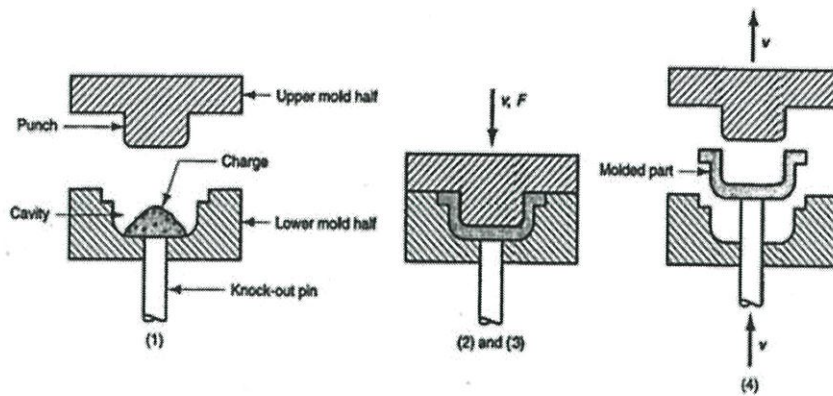
เครื่องอัดส่วนใหญ่ได้รับการพัฒนาให้สามารถทำงานอัตโนมัติโดยใช้แรงขับเคลื่อนจากระบบไฮดรอลิกในการเคลื่อนที่แผ่นเหล็กอัดขึ้นลง นอกจากนี้ระบบขับเคลื่อนยังทำหน้าที่ในการให้ความดันในการอัดอีกด้วย เครื่องกดอัดขนาดเล็กที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจะมีระบบขับเคลื่อนที่ให้ความดันในช่วง 5 -100 ตัน ส่วนเครื่องกดอัดที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมจะมีระบบขับเคลื่อนที่ให้ความดันในช่วง 10 - 4,000 ตัน โดยขนาดของความดันจะขึ้นกับขนาดของแผ่นเหล็กอัดซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 8 ตารางนิ้วถึง 5 ตารางฟุต ชนิดของพลาสติก ความหนาของผนังผลิตภัณฑ์พลาสติก และการให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนการกดอัด

ข. ระบบให้ความร้อนและหล่อเย็น

ระยะเวลาการทำงานต่อวัฏจักรของการกดอัดนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของผนังผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตที่เป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดีและในการกดอัดต้องให้อุณหภูมิถึงจุดที่เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลได้ (Curing) ซึ่งหากเติมเม็ดหรือผงพลาสติกลงในแม่แบบโดยตรงจะทำให้ระยะเวลาในการกดอัดนานมาก ดังนั้นจึงควรมีการให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนนำเข้าแม่แบบเพื่อให้พลาสติกสามารถไหลได้ดีขึ้น ลดระยะเวลาในการทำงานต่อวัฏจักรให้สั้นลง และสามารถลดความดันที่ใช้ในการกดอัดได้

2.13.2 วัฏจักรกระบวนการกดอัด (Compression Molding Cycle) [12]

กระบวนการกดอัดเริ่มจากการยึดแม่แบบติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่น แล้วให้ความร้อนแก่แม่แบบตามชนิดของพลาสติก โดยทั่วไปอุณหภูมิแม่แบบสำหรับการกดอัดเทอร์โมเซตจะเป็นอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งอยู่ในช่วง 140 - 200 องศาเซลเซียส ขึ้นกับชนิดของพลาสติก หลังจากนั้นจึงเติมวัตถุดิบซึ่งอาจอยู่ในรูปเม็ดพลาสติกหรือผงพลาสติก หรือพลาสติกคอมปาวด์ โดยปริมาณการเติมต้องเหมาะสมกับขนาดของผลิตภัณฑ์ จากนั้นปิดแม่แบบโดยเคลื่อนแผ่นเหล็กอัดลงด้วยความดันที่เหมาะสม พลาสติกจะเกิดการหลอมหรืออ่อนตัวไหลเข้าสู่ช่องว่าง (Cavity) ของแม่แบบสำหรับพลาสติกเทอร์โมเซตต้องปล่อยให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกอยู่ภายใต้ความดันและอุณหภูมินี้ระยะหนึ่งตามระยะเวลาการสุก หรือการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล (Cure Time) ของพลาสติกเทอร์โมเซตนั้นๆ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเกิดอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นความดันภายในแม่แบบจะลดลงในขณะที่ทำการหล่อเย็น จากนั้นจึงเปิดแม่แบบโดยเคลื่อนแผ่นเหล็กอัดขึ้น ปลดผลิตภัณฑ์ออกจากแม่แบบ ซึ่งในการปลดผลิตภัณฑ์ออกจะต้องเป็นช่วงที่พลาสติกแข็งตัวเรียบร้อยแล้ว เพื่อป้องกันความเสียหายหรือการบิดตัวของผลิตภัณฑ์ แล้วเริ่มเติมพลาสติกลงในแม่แบบเพื่อทำงานในวัฏจักรต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ขั้นตอนกระบวนการกดอัด [12]

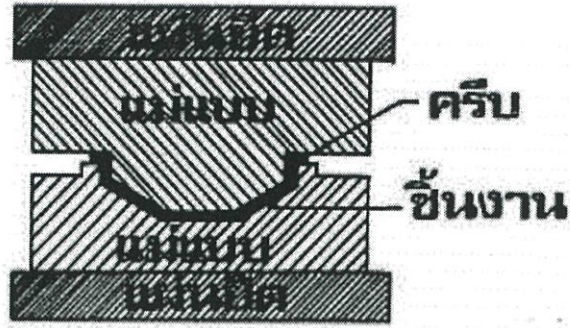
การกดอัดพลาสติกบางครั้งอาจเกิดก๊าซหรือไอน้ำขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดการฝังตัวของก๊าซใต้ผิวของผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดรอยปูดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกที่ไม่ได้ให้ความร้อนก่อนการกดอัด เพื่อแก้ปัญหาจำเป็นต้องมีขั้นตอนการไล่ก๊าซ (Degassing Stage) โดยในขณะทำการกดอัดต้องมีการยกแม่แบบตัวผู้ขึ้นจนความดันภายในแม่แบบลดลงถึงความดันบรรยากาศ เมื่อก๊าซระเหยออกไปแล้วจึงทำการกดอัดต่อไปจนพลาสติกแข็งตัว นอกจากปัญหาการเกิดก๊าซแล้ว ระยะเวลาของการแข็งตัวก็มีอิทธิพลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์พลาสติกเช่นกัน หากระยะเวลาของการแข็งตัวของพลาสติกสั้นเกินไปจะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์พอง ผลิตภัณฑ์ทนความร้อนได้ไม่ดี และทำให้ผลิตภัณฑ์ดูดซึมน้ำมันได้มากขึ้น แต่หากปล่อยให้แข็งตัวนานเกินไปอาจทำให้เกิดรอยร้าวได้ ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ดูดซึมน้ำมันได้มากขึ้นอีก ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานจึงต้องมีความชำนาญ และประสบการณ์ค่อนข้างสูงในการควบคุมขั้นตอนการทำงานอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกได้ตรงตามความต้องการ

2.13.3 แม่แบบสำหรับกระบวนการกดอัด [12]

แม่แบบสำหรับกระบวนการกดอัดพลาสติกนั้น ต้องรับการเสียดสีสูงมากจากพลาสติกและสารเติมแต่ง ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำแม่แบบควรทนต่อความดันหรือแรงอัดสูง ทนต่ออุณหภูมิสูง ทนต่อการขีดสี และทนต่อการกัดกร่อน แม่แบบที่ใช้ในกระบวนการกดอัดแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

ก. แม่แบบอัดผลิตภัณฑ์ราบหรือแม่แบบชนิดบาง (Flat Form หรือ Flash Mold)

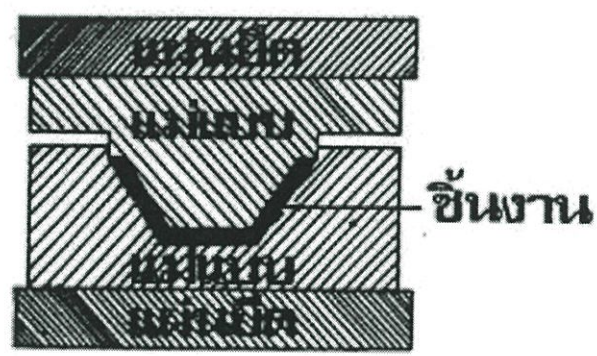
เป็นแม่แบบชนิดง่ายที่สุด มีความยุ่งยากน้อยที่สุด แสดงในรูปที่ 2.25 โดยปกติจะใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแบน เช่น จานและชาม เป็นต้น เป็นแม่แบบที่ยอมให้พลาสติกไหลออกได้เมื่อกดแม่แบบตัวผู้ลงมาทำให้ไม่ต้องใช้แรงอัดมาก ข้อดีของแม่แบบประเภทนี้ คือ การออกแบบและการผลิตสามารถทำได้ง่าย มีน้ำหนักเบาและราคาถูก ส่วนข้อเสีย คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อไม่แน่น ความแข็งแรงน้อย มีความหนาไม่สม่ำเสมอ และมีครีบ (Flash) มาก ทำให้ต้องมีขั้นตอนการตกแต่งชิ้นงานหลังกระบวนการกดอัด



รูปที่ 2.25 แม่แบบอัดผลิตภัณฑ์ราบหรือแม่แบบชนิดบาง [12]

ข. แม่แบบปิดอัดหรือแม่แบบชนิดบวก (Sealed Mold หรือ Fully Positive Mold)

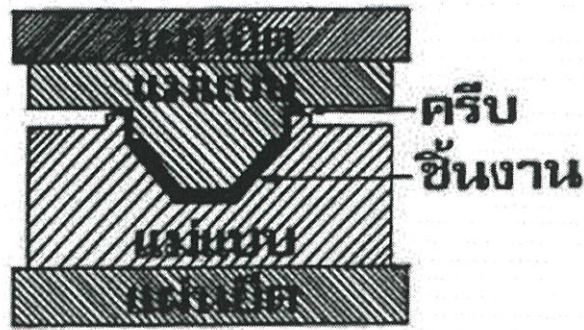
เป็นแม่แบบชนิดตรงข้ามกับแม่แบบอัดผลิตภัณฑ์ราบ คือ ยอมให้พลาสติกหลอมละลายไหลออกน้อยที่สุดหรือไม่ให้ออกเลย แสดงในรูปที่ 2.26 เนื่องจากไม่มีร่องให้วัสดุพลาสติกไหลล้นออกมา โดยในขณะที่ปิดแม่แบบนี้แม่แบบบนจะลึกลงไปในแม่แบบล่างประมาณ 2 - 3 มิลลิเมตร หรือจนถึง 20 - 30 มิลลิเมตร เพื่อปิดช่องทางไม่ให้พลาสติกไหลล้นออกมา จึงทำให้สามารถอัดพลาสติกด้วยความดันสูง โดยพลาสติกจะได้รับแรงดันทั้งหมด ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อแน่นและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่มีข้อเสีย คือ หากใส่วัสดุพลาสติกมากเกินไปแรงอัดจะทำให้แม่แบบแตกร้าวได้ นอกจากนี้ แม่แบบประเภทนี้ไม่ค่อยนิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความละเอียด เนื่องจากหากในการกดอัดแต่ละครั้งใช้ปริมาณพลาสติกที่ต่างกัน จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาต่างกัน ทำให้ยากต่อการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.26 แม่แบบปิดอัดหรือแม่แบบชนิดบวก [12]

ค. แม่แบบผ่าประกบหรือแม่แบบชนิดกึ่งบวก (Split Mold หรือ Semi - positive Mold)

แม่แบบประเภทนี้จะมีลักษณะผสมผสานอยู่ระหว่างสองประเภทข้างต้น แสดงในรูปที่ 2.27 โดยในจังหวะแรกที่แม่แบบตัวผู้เริ่มกดอัด พลาสติกส่วนเกินยังสามารถไหลล้นออกมาได้ แต่เมื่อแม่แบบตัวผู้เคลื่อนลงมาถึงระยะหนึ่ง บ่าของแม่แบบตัวผู้จะปิดช่องว่างไม่ให้พลาสติกไหลล้นออกได้อีกแล้วจึงอัดแน่นแม่แบบชนิดนี้ เหมาะสมกับงานทั่วไป ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรงพอสมควร



รูปที่ 2.27 แม่แบบฝาประกบหรือแม่แบบชนิดกึ่งบวก [12]

2.13.4 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการกดอัด [12]

แม้การแปรรูปด้วยกระบวนการกดอัดจะเป็นเทคนิคที่ใช้กันมานาน แต่ในปัจจุบันก็ยังมีการใช้งานสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการกดอัดมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับกระบวนการแปรรูปด้วยเทคนิคอื่นๆ หลายประการ ดังนี้

1. แม่แบบมีราคาถูกและผลิตได้ง่าย
2. มีการสูญเสียวัสดุน้อยมาก คือ มีครีบบนหรือ Flash เกิดขึ้นน้อยมากประมาณ 2 - 5% เท่านั้น
3. โมเลกุลของพลาสติกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (Reorientation) น้อยมาก เนื่องจากในระหว่างการกดอัดเกิดการไหลของพลาสติกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น
4. เครื่องกดอัดมีราคาถูกกว่าเครื่องแปรรูปพลาสติกชนิดอื่นๆ
5. ไม่เกิดเส้นรอยเชื่อม (Weld Line) บนชิ้นงาน ซึ่งเส้นรอยเชื่อมนี้เป็นจุดบกพร่องที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย
6. แม่แบบสำหรับกระบวนการกดอัดไม่มีส่วนของท่อวิ่ง (Runners) ท่อนำพลาสติก (Sprue) และประตูเข้า (Gates) ทำให้ไม่มีรอยตำหนิบนชิ้นงาน

ถึงแม้ว่ากระบวนการกดอัดจะมีข้อได้เปรียบดังได้กล่าวมาแล้ว แต่เทคนิคนี้ก็ยังมีข้อเสียเปรียบหลายประการ เช่น

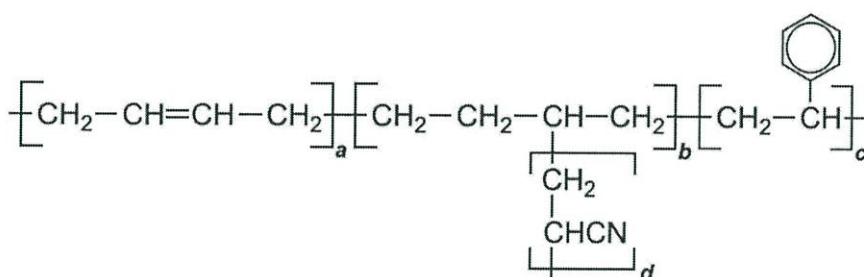
1. วัสดุที่อยู่ในสถานะของแข็งหรือกึ่งของแข็ง ทำให้เกิดความเครียดภายในแม่แบบสูงมากในขณะทำการกดอัด จึงไม่สามารถใส่วัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ ลงไปในแม่แบบได้ เนื่องจากจะทำให้โลหะเกิดการบิดเบี้ยวและแม่แบบเกิดการเสียหายได้ จึงทำให้ไม่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์แบบหุ้มด้วยเทคนิคนี้ได้
2. ไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้
3. เวลาของวัฏจักรการผลิต (Cycle Time) ค่อนข้างยาว ทำให้กำลังการผลิตต่ำ
4. การผลิตชิ้นงานที่หนาต้องใช้เวลาานาน

2.14 พลาสติกอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) [13]

เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก หรือพลาสติกที่หลอมใหม่ได้ที่ใช้กับแพร่หลาย ซึ่งพลาสติกทั่วไปจะมีลักษณะแข็งแต่เปราะแตกหักง่าย หรือถ้ามีลักษณะแข็งเหนียวก็จะมีลักษณะอ่อนนิ่มไม่อยู่ทรง แต่พลาสติก ABS แตกต่างจากพลาสติกทั่วไป เพราะเป็นพลาสติกที่มีความสมดุลทั้งในเรื่องความแข็งและความเหนียว สามารถคงสภาพรูปร่างได้ดี ทำให้มีคุณสมบัติทนทานต่อแรงกระแทกได้ดี และยังทนต่อแรงเสียดสี ความร้อน สารเคมีได้ดีกว่าพลาสติกธรรมดาทั่วไป มีช่วงอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้กว้างคือ -20 องศาเซลเซียสถึง 80 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลวสูงอยู่ที่ 200 - 250 องศา ทำให้สามารถใช้งานในสภาพที่ร้อนกว่าได้

โครงสร้างของพลาสติก ABS ได้มาจากการทำปฏิกิริยาของโมโนเมอร์ 3 ชนิดคือ สไตรีน (Styrene) อะครีโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) และโพลิบิวทาไดอีน (Polybutadiene) แสดงในรูปที่ 2.28 ซึ่งโมโนเมอร์ทั้ง 3 ชนิดล้วนส่งผลต่อคุณสมบัติของพลาสติก ABS โดยอะครีโลไนไตรล์ช่วยให้ทนความร้อนและสารเคมี บิวทาไดอีนช่วยให้มีความทนทานต่อแรงกระแทกกระทึก ส่วนสไตรีนช่วยให้เนื้อพลาสติกมีพื้นผิวเป็นมันเงาสวยงาม และสามารถตัดแต่งรูปร่างได้ง่าย ดังนั้นจึงสามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนของโมโนเมอร์ทั้ง 3 ชนิดเพื่อให้พลาสติก ABS มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

คุณสมบัติเด่นของพลาสติก ABS คือมีความแข็งแรงและยืดหยุ่น ซึ่งเป็นคุณสมบัติเด่นของพลาสติก ABS มีความแข็งกว่าแต่เปราะ การประยุกต์การใช้งานโดยใช้พลาสติก ABS นั้นสามารถทนต่อแรงบีบดึงได้ดีจึงเหมาะในการชิ้นงานทางกลไก Engineering หรือ Mechanic เช่น ข้อต่อต่างๆ โช้ หรือ ตาข่าย สามารถนำไปใช้ในการ Outdoor ได้เนื่องจากเป็นผลผลิตจากปิโตรเลียม ทำให้ทนต่อสภาพอากาศได้ดี [14]



รูปที่ 2.28 โครงสร้างของพลาสติก ABS [15]

2.15 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) [16]

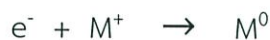
กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดหรือทำให้สารบริสุทธิ์ทั้งในน้ำและอากาศ ซึ่งหลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1. การเกาะหรือดูดติดผิว (Adsorption Process)

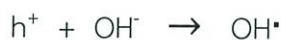
เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิวของคะตะลิสต์ (Catalyst) ปฏิกิริยาการเช่นนี้เป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งหรือคอลลอยด์เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพหรือด้วยแรงทางเคมีหรือทั้งสองอย่างรวมกัน ส่วนกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส การดูดซับจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก

2. การฉายแสง (Irradiation Process)

เมื่ออนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสง ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน (Eg) ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น เปลี่ยนที่อยู่จากวาเลนซ์แบนด์ไปยังคอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดสถานะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่วาเลนซ์แบนด์ เรียกว่า โฮล (Hole) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ h^+_{vb} ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในคอนดักชันแบนด์ แทนด้วยสัญลักษณ์ e^-_{cb} คะตะลิสต์ถูกฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) จะถูกให้อิเล็กตรอน (e^-) และโฮล (h^+) ซึ่งอิเล็กตรอนและโฮลมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน โดยอิเล็กตรอน (e^-) สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับสารอินทรีย์ทำให้เกิดการลดออกซิเดชันสเตต ทำให้ความเป็นพิษของสารอินทรีย์ลดลงได้ ดังนี้



ส่วนโฮล (h^+) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์หรือไอออนต่าง ๆ ในน้ำได้เช่น



กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เร่งปฏิกิริยาที่ใช้แสงซึ่งในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบนี้เป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Catalyst) คือการเร่งที่ผิวหน้าระหว่างสถานะที่ต่างกันของระบบที่มีมากกว่าหนึ่งสถานะ โดยทั่วไปโมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกดูดซับ (Absorbed) ไว้บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในแง่ของการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนและบางพันธะของโมเลกุลจะเริ่มสลายตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสนี้เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ ทั้งนี้เพื่อที่จะให้เข้าใจการเกิดปฏิกิริยาจึงจำเป็นต้องศึกษาและทำความเข้าใจกับโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานอยู่สองแถบคือ แถบวาเลนซ์ (Valence Band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap) ซึ่งมีความกว้าง E_g กันอยู่

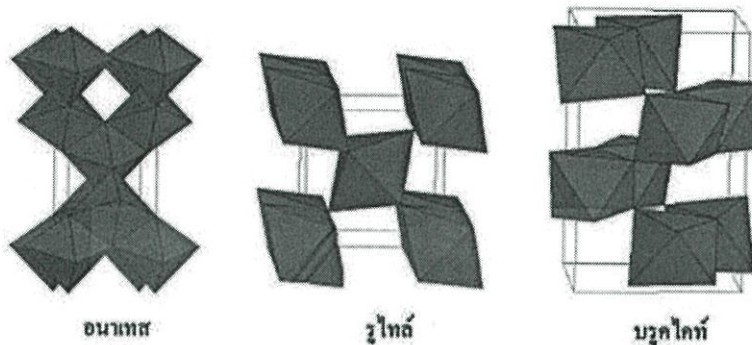
กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในเอควีเอสเฟส (Aqueous Phase) คือ กระบวนการการโฟโตออกซิเดชัน (Photooxidation) ของอนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสง (Photo) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน Eg ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นเปลี่ยนที่อยู่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดสภาวะขาดอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์เรียกว่า โฮล (Hole) แทนด้วยสัญลักษณ์ h^+_{vb} ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้าแทนด้วยสัญลักษณ์ e^-_{cb} ซึ่ง h^+_{vb} และ e^-_{cb} สามารถที่จะกลับมาอยู่ในสภาวะเดิมอีกได้ เรียกว่า รีคอมบิเนชัน (Recombination) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน และที่ผิวหน้าระหว่างของแข็งและของเหลว (Solid-Liquid Interface) อิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนย้ายจากแถบการนำไฟฟ้าไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอน (Acceptor) ในสารละลาย เรียกว่า รีดักชัน (Reduction) หรืออิเล็กตรอนจากผู้ให้ (Donor) ในสารละลายไปสู่โฮลในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong Oxidation)

2.16 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) [16]

ไทเทเนียมเป็นโลหะสีเทาในกลุ่มทรานซิชัน จัดเป็นธาตุที่มีอยู่มากในโลกแต่มักจะอยู่ในรูปสารประกอบของแร่ และจะต้องสกัดออกมาเพื่อให้ได้ไทเทเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งก็มีวิธีการแตกต่างกันไป ไทเทเนียมบริสุทธิ์มีเลขอะตอมคือ 22 ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน คือ [Ar]3d²4s² และมีน้ำหนักอะตอม คือ 47.867 ในส่วนของขนาดอะตอมไทเทเนียมมีรัศมีอะตอม 147 พิโคเมตร (pm) มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือด คือ 1667°C และ 3285°C ตามลำดับ ในขณะที่ความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องคือ 4.50 gcm⁻³ และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity) ที่อุณหภูมิ 200°C คือ 42.0 μΩ-cm ทนต่อการกัดกร่อนสูงไม่เป็นสารไวไฟ ลักษณะพิเศษของไทเทเนียม คือ จะทำปฏิกิริยาได้ดีกับพวกสารที่ไม่ใช่โลหะ (Non-metal) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสถานะออกซิเดชัน (Oxidation State) ทางเคมีที่มักจะเกิดขึ้นมากที่สุด คือ 4+ ซึ่งสารประกอบที่จะมีโอกาสเกิดขึ้นมากที่สุดคือ โมเลกุลจำพวกไดออกไซด์และเตตระคลอไรด์ เพราะมีสถานะออกซิเดชันเป็น 4- ดังนั้นโครงสร้างที่จะเกิดขึ้นจะอยู่ในรูป TiO₂ และ TiCl₄ เป็นส่วนใหญ่

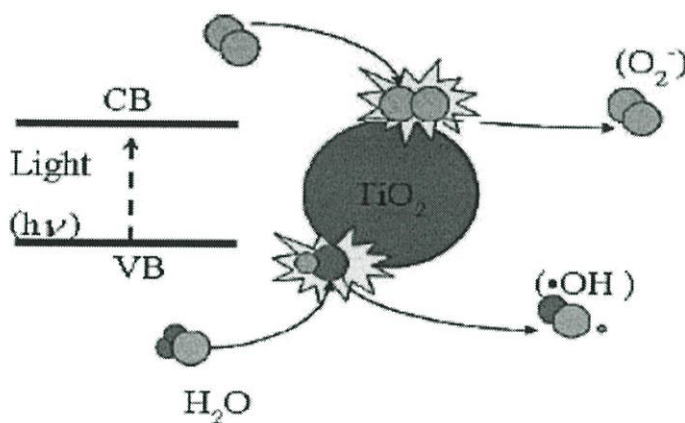
ไทเทเนียมไดออกไซด์จัดเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งมีโครงสร้าง 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.29 คือ รูไทล์ (Rutile) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) เป็นชนิดที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติ มีความคงทน และเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่สูง อะนาทาส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) เป็นชนิดที่พบในธรรมชาติปานกลาง หากให้ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์ และบรูคไคต์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) เป็นชนิดที่พบน้อยในธรรมชาติ มีความเสถียรต่ออุณหภูมิต่ำ โดยที่โครงสร้างผลึกที่นิยมนำมาใช้สำหรับกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยวิธีกระตุ้นด้วยแสงคือ

โครงสร้างผลึกแบบ ortonah และรูไทล์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียมเป็นแบบออร์โธโรมบิ (Orthorhombic) จากการศึกษาไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนั้นส่งผลให้โครงสร้างผลึกแต่ละโครงสร้างมีคุณสมบัติที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.6



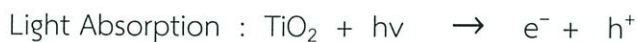
รูปที่ 2.29 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ [16]

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยมีไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ [16]

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส สามารถแสดงได้ดัง สมการ

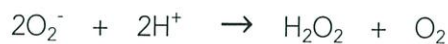


- เมื่อ $h\nu$ = อนุภาคของแสง (photon)
 h^+_{vb} = โฮลที่วาเลนซ์แบนด์
 e^-_{cb} = อิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์
 R = โมเลกุลของสารอินทรีย์
 M = โลหะหนัก

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ระหว่างรูไทล์และอนาเทส [16]

Property	Rutile	Anatase
Crytalline	Orthorhombic	Orthorhombic
Band Gap Energy (eV)	3.030	3.200
Hardness (Mohs)	6.0 – 7.0	5.5 – 6.0
Density (g/cm ³)	4.250	3.894
Gibbs Free Energy (kcal/mole)	-212.6	-211.4
Lattice Constant, a (Å ⁰)	4.593	3.784
Lattice constant, c (Å ⁰)	2.959	9.515
Melting point (°C)	1858	Change to rutile at high Temperature 800 °C

อิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ดูดซับไว้บนพื้นผิวไททาเนียมไดออกไซด์ ทำให้โมเลกุลออกซิเจนเปลี่ยนเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลอ็อกซิเจน (O_2^-) ส่วนโฮลที่วาเลนซ์แบนด์ สามารถรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในสารละลายได้โดยตรง หรือไฮดรอกซิล อ็อกซิเจน (OH^-) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\cdot) และยังทำให้โมเลกุลของน้ำที่ดูดซับไว้บนพื้นผิวไททาเนียม ไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลด้วยเช่นกัน ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาสูง และทำหน้าที่สลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ในสารละลายที่ดูดซับไว้บนพื้นผิวของ ไททาเนียมไดออกไซด์ ส่วนซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลอ็อกซิเจนสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังสมการ



ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ โดยจะทำปฏิกิริยากับ e^-_{cb} ทำให้เกิดเรดิคัล ดังสมการ



2.17 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส [17]

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) ความเข้มข้นของอนุภาค ไททาเนียมไดออกไซด์ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen) และความเข้มของแสง (Light Intensity)

1. ค่าพีเอช (pH) ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสารละลายซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการดูดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จะเปลี่ยนไปเมื่อค่าพีเอชสูงหรือต่ำ โดยจะเป็นบวกที่ค่าพีเอชต่ำและมีค่าเป็นลบเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น

2. ความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ Dosage) อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลาย ทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลทำปฏิกิริยา และเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารปนเปื้อน และทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลาย ยึดเกาะ โดยการยึดเกาะของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของอนุภาค ไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในปัจจัยการควบคุมการเกิดปฏิกิริยา แต่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปในสารละลาย จะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสลดลง เนื่องจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์จะไปขัดขวางแสงที่ส่องไปยังสารละลาย ทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคแสงและปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง

3. อุณหภูมิ ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการทำปฏิกิริยาของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} และอาจเนื่องจากความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และ อาจเนื่องมาจาก การลดลงของพลังงานกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา

4. ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen) อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในสารละลาย เพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพราะออกซิเจนจะยึด เกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำหน้าที่ยึดจับ e^-_{cb} ที่คอนดักชันแบนด์ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์อ็อกไซด์

5. ความเข้มของแสง (Light Intensity) เนื่องจากความเข้มของแสง (คือ พลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา หรืออนุภาคแสง 1 โฟตอน ที่มีความถี่ ν มีพลังงาน $E = h\nu$ คิดเป็น 1 ควอนตัม) ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของแสงโดยตรง ถ้าให้พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวหน้าโลหะเป็น E_r ดังนั้น

$$\text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ} = \frac{\text{พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบ}}{\text{พลังงานของแสง 1 โฟตอน}} = \frac{E_r}{h\nu} \quad (2.5)$$

$$\text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อ 1 วินาที} = \frac{\text{ความเข้มแสง}}{hv} \quad (2.6)$$

ความเข้มแสงที่มีผลต่ออัตราการเกิด ปฏิกิริยาไว้ว่าที่ระดับความเข้มแสงต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่ ระดับความเข้มแสงปานกลาง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตามรากที่สองของความเข้มแสง และที่ระดับความเข้มแสงสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะไม่ขึ้นกับความเข้มแสง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่คงที่ เมื่อถึงจุดจำกัดของการเคลื่อนย้ายมวล (Quantum Efficiency of Degradation = สัดส่วนของการสลายตัวต่อจำนวนโฟตอนที่ใช้) จะมีค่าคงที่ที่ระดับความเข้มแสงต่ำ และจะแปรผกผันกับรากที่สองของความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงปานกลางและจะแปรผกผันกับความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงสูง

2.18 คลื่นแสงที่พบในแสงอาทิตย์ [2]

แสงแดดประกอบด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ดังนี้ UVC มีความยาวคลื่น 100 - 290 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้โดยมากจะถูกดูดซับโดยก๊าซโอโซนในบรรยากาศ ฉะนั้นแสงอุลตราไวโอเล็ตที่มาถึงโลกจะอยู่ระหว่างช่วงความยาวคลื่น 290 - 400 นาโนเมตร

1. UVB มีความยาวคลื่น 290 - 320 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้ทำให้เกิดผิวเกรียมแดดและผิวหนังอักเสบ เป็นตัวหลักที่ทำให้ผิวแก่ก่อนวัย และทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้บ่อยขึ้น
2. UVA มีความยาวคลื่น 320 - 400 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้ทำให้เกิดผิวคล้ำแดดโดยกระตุ้นให้เกิดการสร้างเมลานิน แต่ไม่ทำให้เกิดการอักเสบ
3. Visible Light มีความยาวคลื่น 400 - 800 นาโนเมตร
4. Infrared Light มีความยาวคลื่น 800 - 1,700 นาโนเมตร

2.19 แบคทีเรีย Escherichia coli (E.coli) [1]

Escherichia coli หรืออีโคไล (นิยมใช้ชื่อย่อ E.coli) เป็นแบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์ม กลุ่มของแบคทีเรียในตระกูล Enterobacteriaceae ที่มีรูปร่างท่อนสั้น ติดสีแกรมลบไม่สร้างสปอร์และมีขนาดเล็กมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ส่วนใหญ่มีเซลล์เดี่ยวและมีโครงสร้างเซลล์ที่ไม่ซับซ้อนมาก โดยมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30 - 37 องศาเซลเซียส สามารถเจริญได้ดีในทั้งสภาพที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน มีอยู่ตามธรรมชาติในลำไส้ใหญ่ของสัตว์และมนุษย์ แบคทีเรียชนิดนี้ทำให้เกิดอาการท้องเสียบ่อยที่สุด ทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ ทำให้ถ่ายอุจจาระเหลวหรือเป็นน้ำ แบคทีเรีย E.coli ถือว่าเป็นแบคทีเรียที่อันตรายที่ก่อให้เกิดโรคทางเดินอาหารในผู้ป่วยเด็กและคนแก่ โดยส่วนใหญ่ในปัจจุบันเป็นสาเหตุในการปนเปื้อนอาหาร เช่น น้ำ และอาหารสดต่าง ๆ

2.20 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- Japanese Standards Association ได้กำหนดมาตรฐาน JIS Z 2801:2010 เป็นมาตรฐานที่ใช้ทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียบนพื้นผิววัสดุผิวเรียบ เช่น ผลิตภัณฑ์พลาสติก ผลิตภัณฑ์โลหะ และผลิตภัณฑ์เซรามิก เป็นต้น ซึ่งวิธีการทดสอบมาตรฐานนี้ได้รับการยอมรับในระดับสากลสำหรับประเมินความสามารถและประสิทธิภาพ การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียเป็นการทดสอบในเชิงปริมาณ รายงานผลเป็นร้อยละของการลดจำนวนแบคทีเรีย (% Microbial Reduction) โดยทำการหยดเชื้อแบคทีเรียที่จะทดสอบลงพื้นผิวหน้าของวัสดุที่จะทดสอบ นำเชื้อแบคทีเรียไปบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนับจำนวนจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่รอดชีวิต [18]

- Kim และคณะ ได้ประยุกต์การใช้งานประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้านฆ่าเชื้อโรค งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการประยุกต์ใช้งานประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ในด้านฆ่าเชื้อโรค โดยKim และคณะได้ใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ด้บด้วยเงิน (Ag) มาทำการฆ่าเชื้อ E.coli ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ และเมื่อใช้เวลามากขึ้น ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคและแบคทีเรียก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน [19]

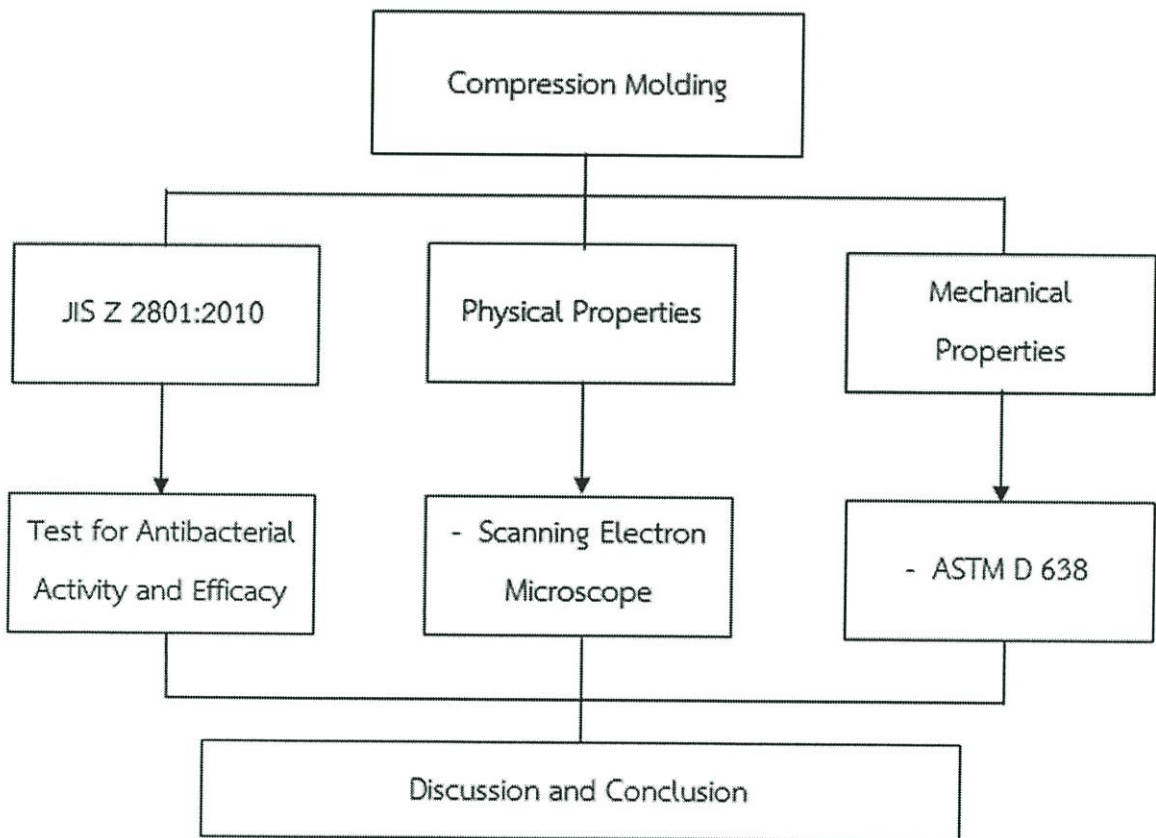
- Silvia และคณะ ได้ทดสอบความสามารถต้านเชื้อแบคทีเรีย E.coli , S.aureus , P.putida และ L.innocua โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนกระเบื้องเซรามิกและทำการฉายแสงยูวีที่เวลา 180, 60, 30 และ 20 นาที ตามลำดับ พบว่าใช้เวลาฉายแสงยูวีมากขึ้น อัตราการรอดชีวิตของแบคทีเรียลดลง [20]

- Zhang, H.J และ Wen D.Z. ศึกษาสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ด้บด้วยพลวง (Sb) ในการยับยั้งแบคทีเรีย พบว่าฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จากการด้บพลวง (Sb) กับ TiO_2 สามารถยับยั้งการเกิดแบคทีเรียได้ เช่น แบคทีเรีย E.coli สามารถกำจัดจำนวนเชื้อแบคทีเรียได้ภายใน 2 ชั่วโมง โดยฉายรังสียูวี [21]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาและนำเสนอแนวทางสำหรับการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli ของพลาสติกอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) โดยมีการเติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถยับยั้งการเกิดแบคทีเรียด้วยปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติก โดยขั้นตอนการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการศึกษา

3.1 สังกะหรและเตรียมน้ช้งานทดสอบ

3.1.1 วัสดุและสารเคมีที่ช้ในงานวิจัย

1. เม็ดพลาสติก ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) เกรด PA - 717C (โดยบริษัท CHI MEI CORPORATION ประเทศไต้หวัน)
2. ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (โดยบริษัท เคมีภัณฑ์ คอปเปอเรชั่น จำกัด)

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องผสมเม็ดพลาสติก Internal Mixture (เครื่องผสมแบบปิด)
2. เครื่องกดอัดพลาสติก Compression Machine
3. เครื่องบดเม็ดพลาสติก
4. เครื่องชั่งเม็ดพลาสติก
5. ภาชนะสำหรับใส่เม็ดพลาสติก
6. ซ้อดักสาร

3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมน้ช้งาน

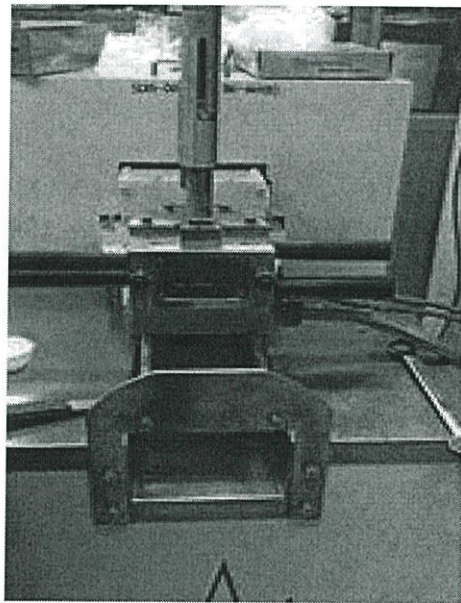
เตรียมน้เม็ดพลาสติก ABS โดยมีการเติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในอัตราส่วนผสม 0, 0.5, 1.0 และ 2.0 (wt%) ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 3.1

1. ช้เม็ดพลาสติก ABS จำนวน 100 กรัม
2. นำเม็ดพลาสติกที่ช้แล้วใส่เครื่องผสมเม็ดพลาสติก Internal Mixture หลอมพลาสติกเป็นเวลา 6 นาที และเติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับพลาสติกหลอมเหลวอีก 4 นาที อุณหภูมิที่ช้ในการผสม อยู่ที่ 250 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.2
3. นำพลาสติกที่ผสมกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ใส่ในเครื่องบดเม็ดพลาสติกเพื่อทำการบด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4
4. ทำซ้ำข้อ 1. – 3. โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสม ABS/TiO₂ เป็น 0.5, 1.0 และ 2.0 โดยอัตราส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 3.1

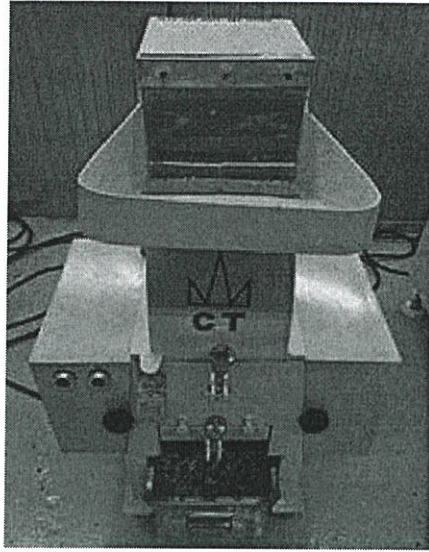
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของ ABS/TiO₂

อัตราส่วนผสม ABS/TiO ₂ (wt%)	ABS (กรัม)	TiO ₂ (กรัม)
0	100.0	0
0.5	99.5	0.5
1.0	99.0	1.0
2.0	98.0	2.0

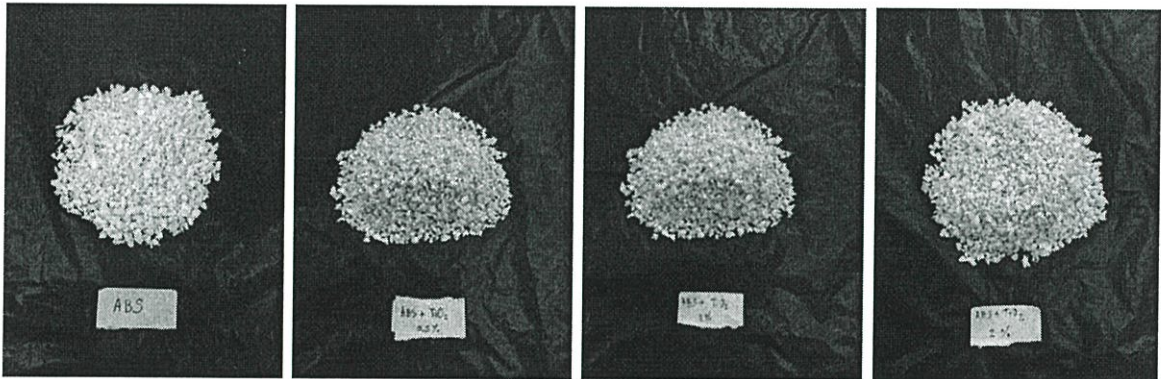
5. ชั่งพลาสติก ABS/TiO₂ ที่ผสมเสร็จแล้ว จำนวน 40 กรัม
6. เทพลาสติกลงบนแผ่นแม่แบบ (Mold) โดยเทพลาสติกให้อยู่ตรงกลางของแผ่นแม่แบบ ใช้แผ่นแม่แบบอีก 1 แผ่นวางทับ และนำแผ่นเหล็กกดอัดวางประกบอีกชั้น
7. นำแผ่นเหล็กกดอัดที่ประกบกันทั้งหมดวางลงบนเครื่องกดอัดพลาสติก Compression Machine เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน โดยตั้งอุณหภูมิที่ 245 องศาเซลเซียส ตั้งเวลา Preheat ที่ 6 นาที เวลาอัดพลาสติกที่ 4 นาที และ Cooling time ที่ 5 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.5
8. ทำซ้ำข้อ 5. – 7. โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสม ABS/TiO₂ เป็น 0.5%, 1.0% และ 2.0% ตามลำดับ
9. นำพลาสติกผ่านกระบวนการอัดเสร็จแล้ว จะได้ชิ้นงานขนาด 13 × 13 เซนติเมตร นำชิ้นงานไปทำการทดสอบฆ่าเชื้อแบคทีเรียในห้องปฏิบัติการ ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและศึกษาลักษณะสมบัติทางกายกล ต่อไป



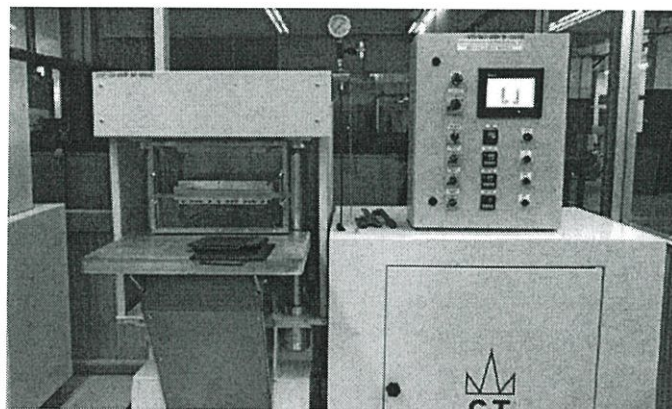
รูปที่ 3.2 ผสมเม็ดพลาสติก Internal Mixture



รูปที่ 3.3 เครื่องเครื่องบดเม็ดพลาสติก



รูปที่ 3.4 พลาสติก ABS/TiO₂ อัตราส่วนผสม 0, 0.5, 1.0 และ 2.0 (wt%) ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 เครื่องกดอัดพลาสติก (Compression Molding Machine)

3.2 ศึกษาความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli บนชิ้นงาน

3.2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. Phosphate Buffer Solution (PBS)
2. เชื้อ E.coli ชนิด AIKL 1070
3. อาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient Broth (NB)
4. อาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar (PCA)
5. อาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Broth (TSB)
6. แอลกอฮอล์ 95%
7. แอลกอฮอล์ 70% (สำหรับทำความสะอาดชิ้นงาน)
8. น้ำกลั่น (Distilled Water)

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดทดลองพร้อมฝาจุก ขนาด 16 x 125
2. ปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร
3. ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร
4. ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร
5. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask)
6. ตะเกียงแอลกอฮอล์
7. ไมโครปิเปต
8. ไมโครปิเปตทิป
9. จานเพาะเชื้อ (Petri Dish)
10. ปีกเกอร์
11. คิวเวทท์ (Cuvette)
12. ตะแกรงใส่หลอดทดลอง
13. แผ่นพลาสติกใส PET ขนาด 4 x 4 เซนติเมตร
14. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
15. ตู้บ่มเชื้อ ตั้งอุณหภูมิ 35-37 °C
16. เครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ Thermo รุ่น Genesys 10VIS
17. เครื่อง Autoclave รุ่น Tommy
18. เครื่อง Biohazard Laminar Flow รุ่น HUB 120 S Boss Tech
19. เครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer)

3.2.3 วิธีเตรียมสารละลาย

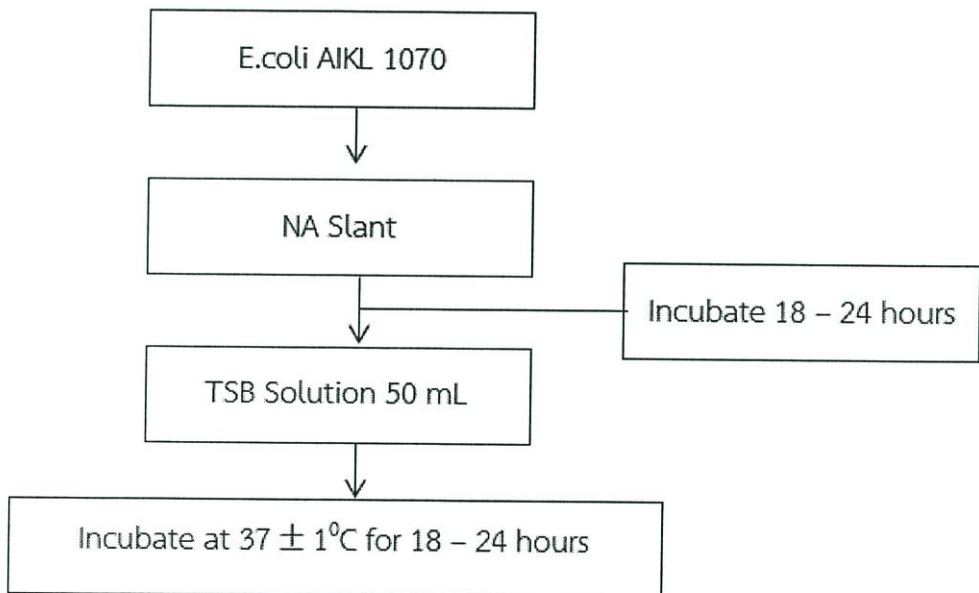
1. เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Broth (TSB) ในน้ำกลั่น ในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร โดยชั่ง TSB 23.5 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. เตรียมสารละลาย 1/500 NB ในน้ำกลั่น ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร โดยชั่ง Beef Extract 0.03 กรัม Peptone 0.1 กรัม และโซเดียมคลอไรด์ 0.01 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3. เตรียมสารละลาย Phosphate Buffer Solution (สำหรับหาปริมาณเชื้อ) ในน้ำกลั่น ในขวดวัดปริมาตร 1000 มิลลิลิตร โดยชั่งสารโซเดียมคลอไรด์ 8.5 กรัม และดูดสารละลายจาก Stock Phosphate buffer solution 1.25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ถ่ายใส่หลอดทดลอง หลอดละ 9 มิลลิลิตร จำนวน 100 หลอด

4. เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar (PCA) โดยชั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ PCA 22.5 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 1 ลิตร และนำไปให้ความร้อนพร้อมกับกวนสารละลายให้เข้ากัน

สำหรับสารละลายเชื้อแบคทีเรีย E.coli ที่ใช้ทดสอบ ความเข้มข้นของเชื้ออยู่ที่ 10^8 cell/mL ขั้นตอนการเตรียมสารละลายเชื้อ E.coli สำหรับหยดลงบนชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.6

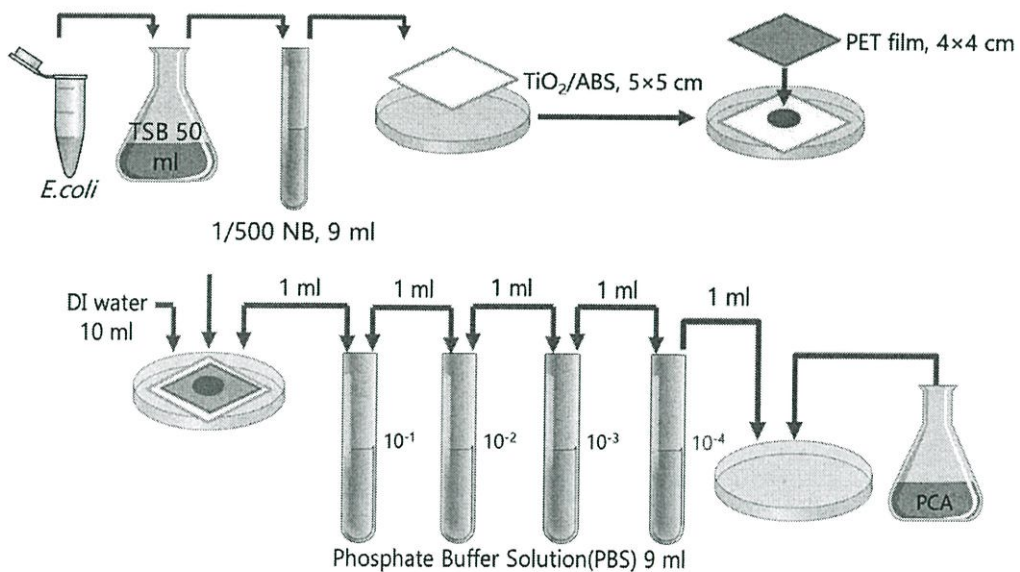


รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายเชื้อ E.coli สำหรับหยดลงบนชิ้นงาน

3.2.4 ขั้นตอนการลงเชื้อ E.coli บนชิ้นงาน

ขั้นตอนการลงเชื้อ E.coli บนชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.7

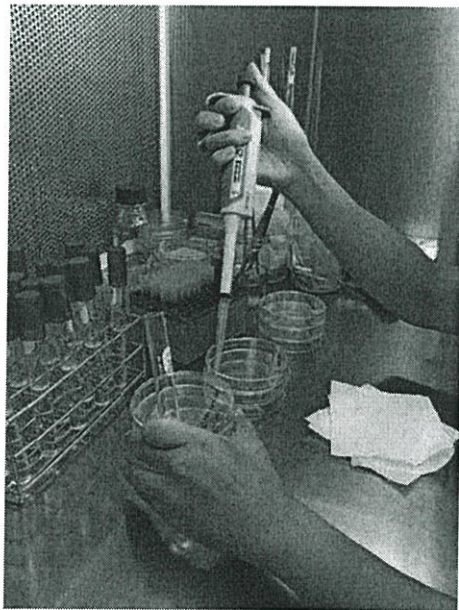
1. ทำความสะอาดชิ้นงานขนาด 5×5 เซนติเมตร โดยนำชิ้นงานจุ่มแอลกอฮอล์ 70% 2 – 3 ครั้ง และวางชิ้นงานลงในจานเพาะเชื้อ แสดงดังรูปที่ 3.8
2. ดูดสารละลายเชื้อ E.coli ปริมาตร 0.4 มิลลิตร หยดลงตรงกลางชิ้นงาน และวางแผ่นใส PET ขนาด 4×4 เซนติเมตร ลงบนชิ้นงานและปิดฝาจานเพาะเชื้อ แสดงดังรูปที่ 3.9
3. นำจานเพาะเชื้อข้อ 2. ไปฉายแสงยูวีในระบบปิดเป็นเวลา 0, 5, 15 และ 30 นาที ตามลำดับ
4. หลังจากนำไปปรับแสงยูวีตามเวลาที่กำหนด นำจานเพาะเชื้อออกจากและเติมน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน (DI Water) ปริมาตร 10 มิลลิตร ลงในจานเพาะเชื้อและเขย่าวนๆ จานเพาะเชื้อจนเชื้อกระจายตัวดี
5. ดูดสารละลายจากข้อ 4. ปริมาตร 1.0 มิลลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีสารละลาย Phosphate Buffer Solution ปริมาตร 9 มิลลิตร เพื่อเจือจางเชื้อต่อไปจนถึง 10^{-5} Cells/mL
6. ดูดสารละลายจากข้อ 5. ปริมาตร 1.0 มิลลิตร ใส่ในจานเพาะเชื้อ และทำการเกลี่ยเชื้อให้ทั่วจานเพาะเชื้อ
7. เติมหอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar (PCA) ลงไป และรอจนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็งตัว
8. นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 – 24 ชั่วโมง
9. นับจำนวนโคโลนีและรายงานผล โดยจำนวนโคโลนีที่นับได้ต้องอยู่ระหว่าง 30 – 300 โคโลนีต่อหนึ่งจานเพาะเชื้อ



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการลงเชื้อ E.coli บนชิ้นงาน



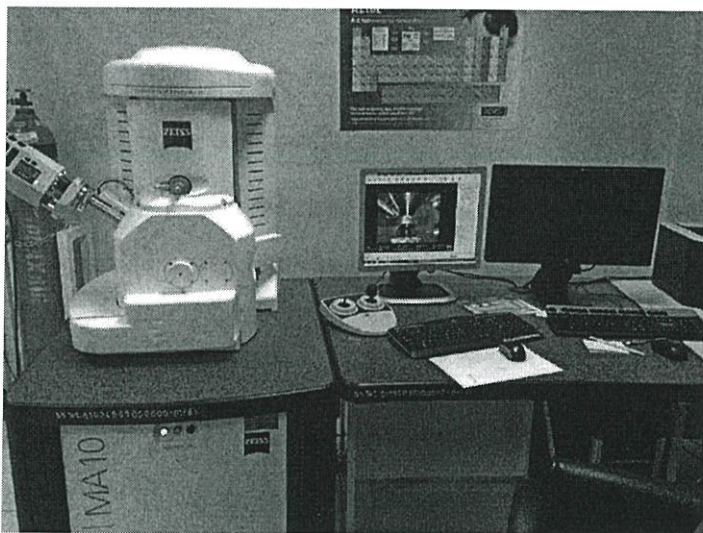
รูปที่ 3.8 ชิ้นงานขนาด 5×5 เซนติเมตร สำหรับทดสอบเชื้อแบคทีเรีย



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการดูดสารละลายเชื้อแบคทีเรีย

3.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

สำหรับการศึกษาสมบัติทางกายภาพของงานวิจัยนี้ ได้นำชิ้นงานไปทดสอบที่วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังรูปที่ 3.10 เพื่อศึกษาการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในเนื้อพลาสติก โดยทำการหักชิ้นงานทดสอบและทำการเคลือบทองบนชิ้นงาน นำชิ้นงานไปส่องกล้องกำลังขยายขนาดต่างๆ พร้อมทั้งบันทึกภาพ

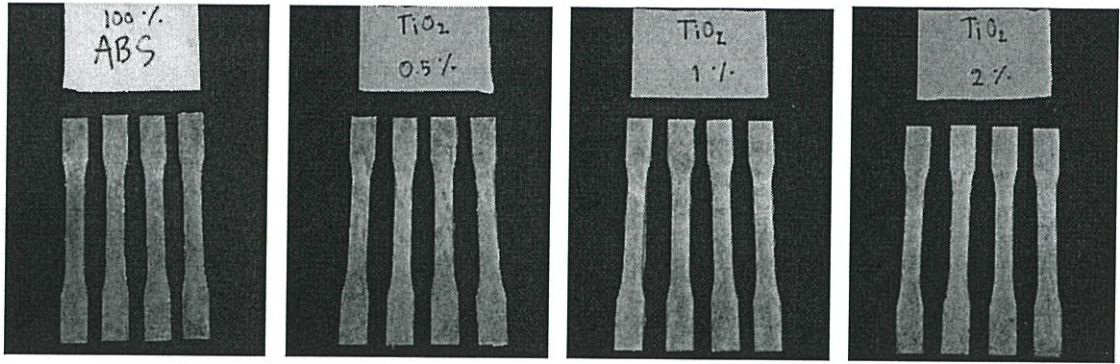


รูปที่ 3.10 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

3.4 ศึกษาสมบัติทางกล

3.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)

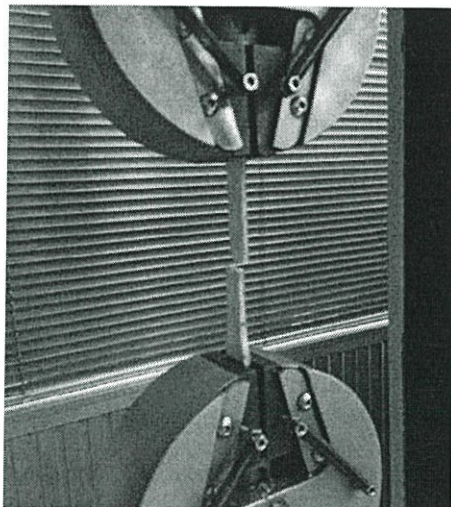
สำหรับการศึกษาสมบัติทางกลภาพของงานวิจัยนี้ ได้นำพลาสติก ABS ที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด นำชิ้นงานไปทดสอบที่สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ซึ่งในการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยแรงดึงของงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาสมบัติที่สำคัญ ได้แก่ ค่าความเค้น ความเครียด (Stress, Strain) และค่ามอดูลัสของชิ้นงาน (Modulus) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type I นำชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.11 ไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งในขณะที่ทดสอบเครื่องทดสอบแรงดึง ทำการจับชิ้นงานที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคองที่ แล้วทำการดึงยึดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ ดังรูปที่ 3.13 บันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงและระยะยึดของชิ้นงานบริเวณตรงกลาง



รูปที่ 3.11 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างทดสอบแรงดึง

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการศึกษาความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ABS/TiO₂

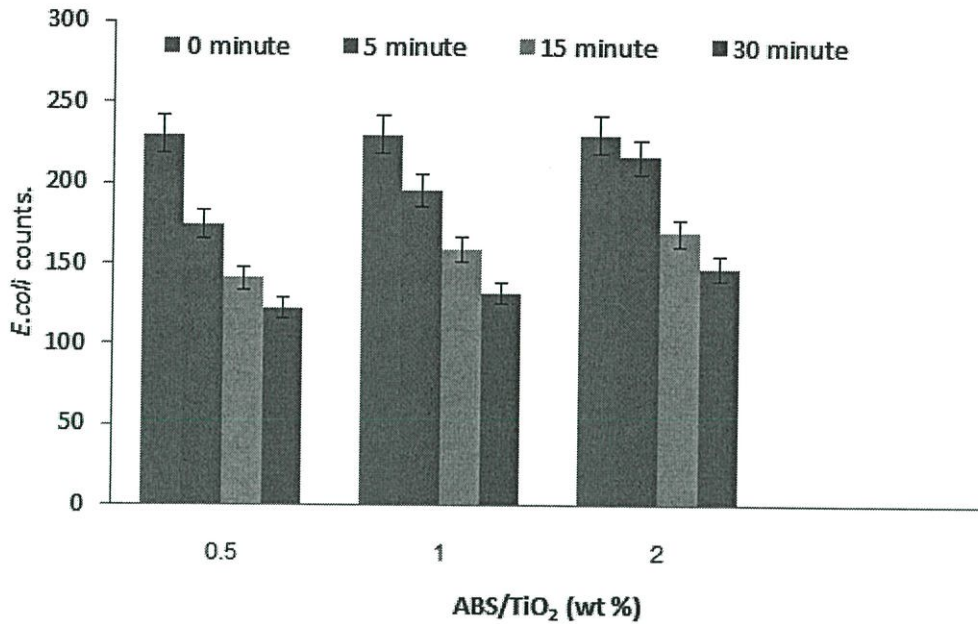
จากการศึกษาวิจัยการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli ของพลาสติกอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) ที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ในอัตราส่วนที่ 0, 0.5, 1 และ 2 (wt%) ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจากปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 จำนวนเชื้อแบคทีเรีย E.coli ที่เติบโตบนพลาสติก ABS/ TiO₂

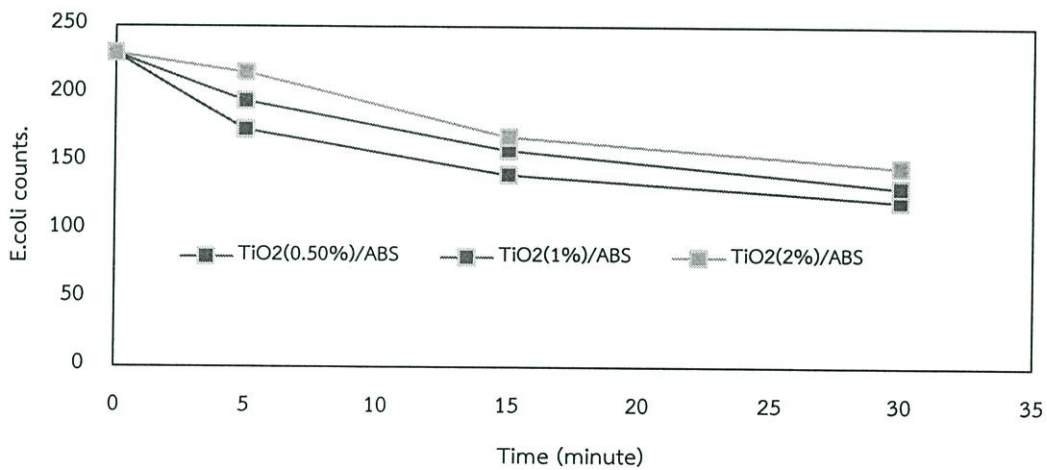
ABS/ TiO ₂ (wt%)	เชื้อ E.coli เริ่มต้น	เวลาในการฉายแสง UV		
		5 นาที	15 นาที	30 นาที
0	230	230	230	230
0.5		174	141	122
1		195	159	132
2		216	169	147

หมายเหตุ: จำนวนเชื้อที่นับได้ระหว่าง 30 – 300 โคโลนี

นำข้อมูลจากตารางมาสร้างกราฟแท่ง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของ ABS/ TiO₂ กับจำนวนเชื้อแบคทีเรีย E.coli ที่นับได้ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2

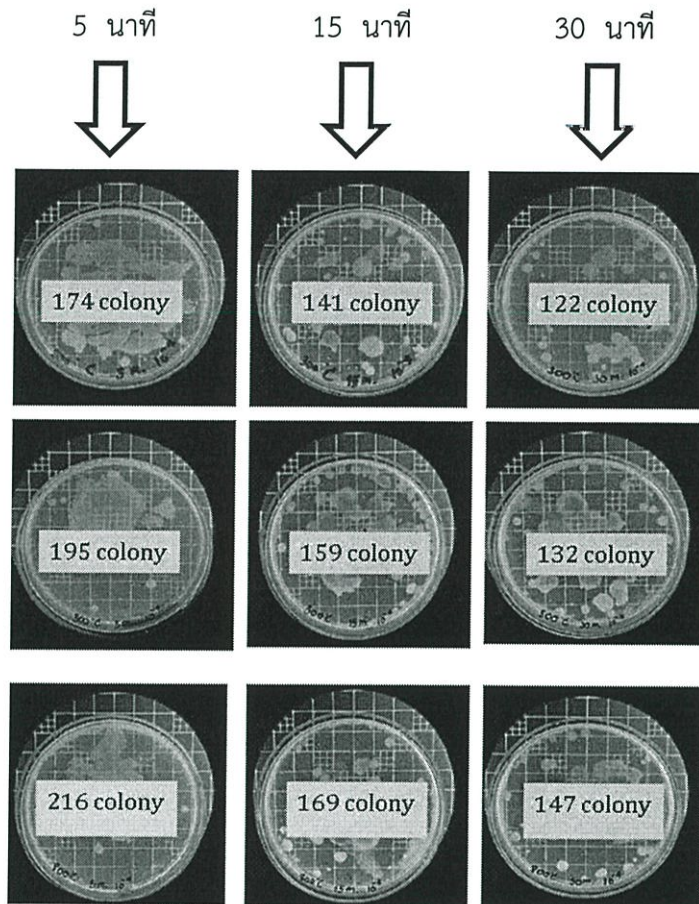


รูปที่ 4.1 จำนวนเชื้อแบคทีเรียที่นับได้ ภายใต้เวลาฉายแสงยูวีที่เวลา 0, 5, 15 และ 30 นาที



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์จำนวนแบคทีเรียที่นับได้ ภายใต้เวลาในการฉายแสงยูวีของ ABS/TiO₂ ที่อัตราส่วน 0.5, 1 และ 2 (wt%) ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อ E.coli ของพลาสติก ABS/TiO₂ ที่ 0.5, 1 และ 2 (wt%) ภายใต้การฉายแสงยูวีที่เวลา 5, 15 และ 30 นาที ตามลำดับ พบว่าการทดสอบชิ้นงานเมื่อได้รับการฉายแสงยูวีที่เวลา 0, 5, 15 และ 30 นาที ตามลำดับ การฉายแสงยูวีในเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้จำนวนเชื้อ E.coli ลดลง ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ E.coli ของพลาสติกอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) ที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ในอัตราส่วนที่ 0, 0.5, 1 และ 2 (wt%)

การทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ E.coli ของพลาสติกอะครีโลไโรไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) ที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ในอัตราส่วนที่ 0, 0.5, 1 และ 2 (wt%) ทดสอบโดยนำเชื้อแบคทีเรีย E.coli ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้นอยู่ที่ 10^8 Cell/mL โดยนำเชื้อหยดลงบนชิ้นงานขนาด 5×5 เซนติเมตร ในจานเพาะเชื้อ เกลี่ยเชื้อให้กระจายทั่วชิ้นงานและนำไปฉายแสงยูวีเป็นเวลา 0, 5, 15, 30 นาที เพื่อศึกษาปัจจัยของอัตราส่วนผสมของ ABS/ TiO_2 ที่มีผลต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจากปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติก ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.1 พบว่า เชื้อเริ่มต้นมีแนวโน้มลดลงตามลำดับจากการฉายแสงที่เวลาต่างๆ แสดงว่าแสงยูวีเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการลดลงของจำนวนเชื้อ E.coli และจากรูปที่ 4.2 พบว่า การผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ 0.5% ให้ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ E.coli ได้ดีที่สุด

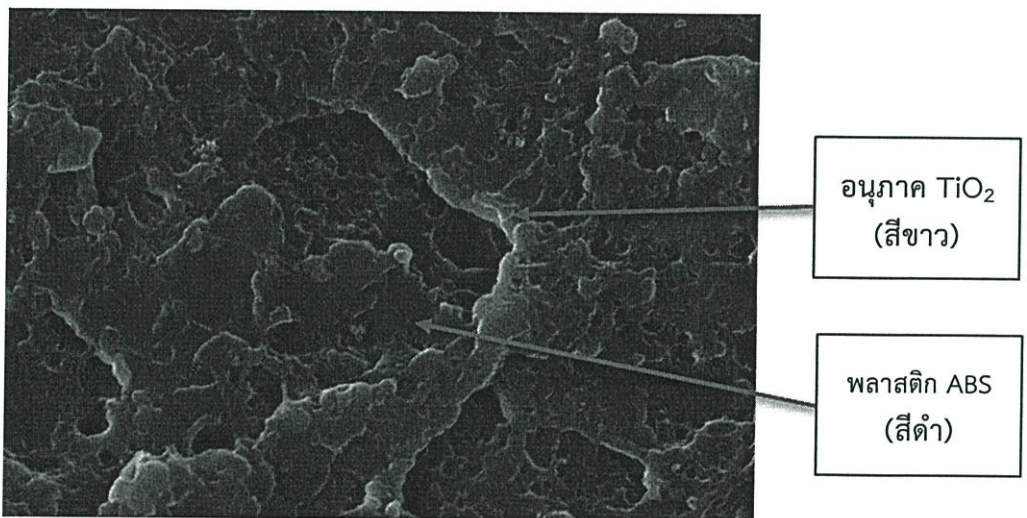
4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ

จากรูปที่ 4.4, 4.5, 4.6 และ 4.7 ได้จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของพลาสติก ABS ที่ผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ในเนื้อพลาสติก ด้วยกำลังขยายของกล้อง 5000 เท่า โดยพบว่าอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) มีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ แสดงว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) มีการกระจายตัวในเนื้อพลาสติก เมื่อเทียบกับลักษณะสัณฐานวิทยาของพลาสติก ABS ที่ไม่ได้ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และลักษณะการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) กับตัวเนื้อพลาสติก ABS เมื่อปริมาณผสมของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ผสมกับตัวพลาสติก ABS ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานมีความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้น

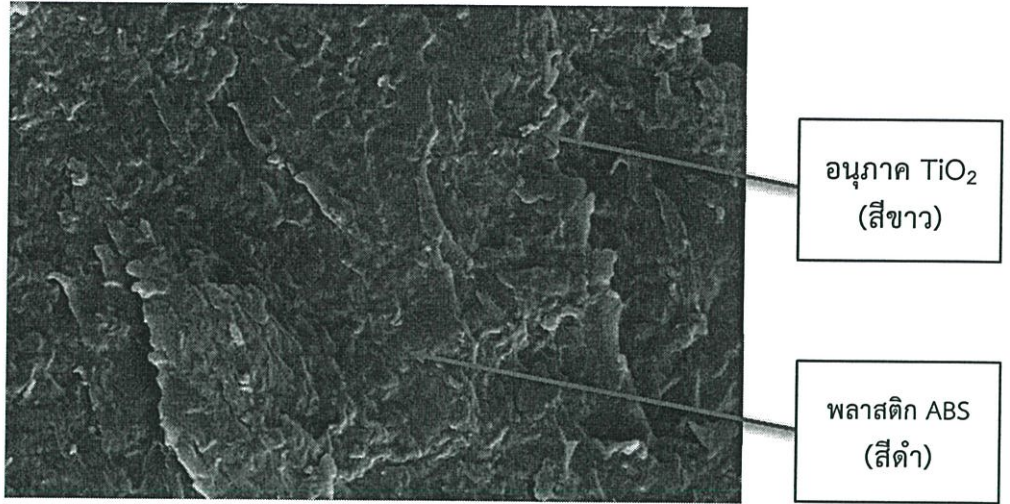
นอกจากนี้การเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) พบว่าเมื่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะสัมผัสกันระหว่างอนุภาคชิดกันมากขึ้น ส่งผลให้การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคมีการเกาะกลุ่มกันดี และกระจายตัวได้เพิ่มขึ้น



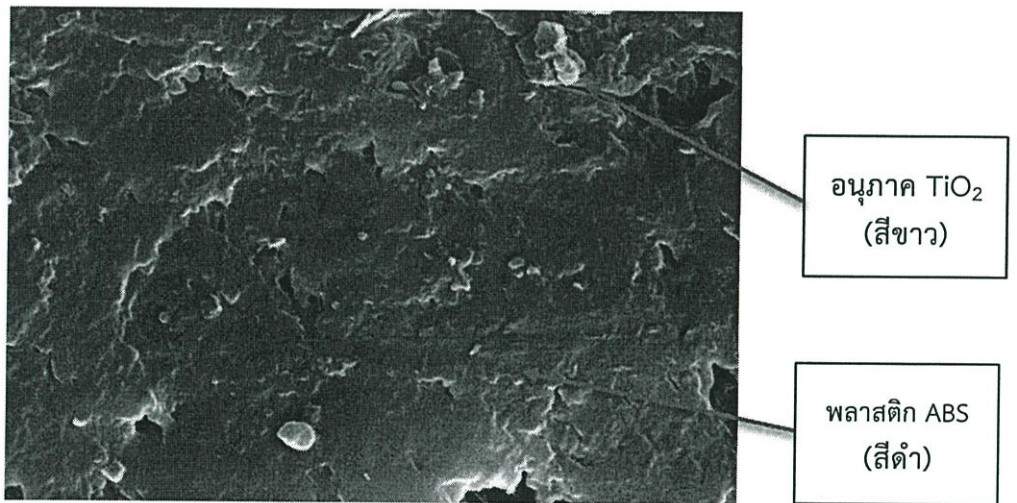
รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของพลาสติก ABS



รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของพลาสติก ABS/TiO₂ 0.5%



รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของพลาสติก ABS/ TiO_2 1%



รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของพลาสติก ABS/ TiO_2 2%

4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ สิ่งสำคัญของการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง คือชิ้นงานทดสอบส่วนใหญ่จะมีรูปทรง dumbbell ซึ่งจะได้จากการเตรียมชิ้นงานแบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ สำหรับงานวิจัยนี้เตรียมชิ้นงานจากกระบวนการกดอัดทำการศึกษาคูณสมบัติทางกลกับพลาสติก ABS ที่ผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ทำการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ซึ่งการทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบความสามารถของวัสดุที่จะทนทานต่อแรงดึงยึดออกจากกันก่อนที่จะเกิดการเสียหาย ซึ่งจะบ่งบอกได้โดยค่าความเค้น ความเครียด (Stress, Strain) และค่ามอดูลัสของชิ้นงาน (Modulus) โดยมีผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และค่ามอดูลัสของชิ้นงาน (Modulus) ของชิ้นงานที่ทดสอบ

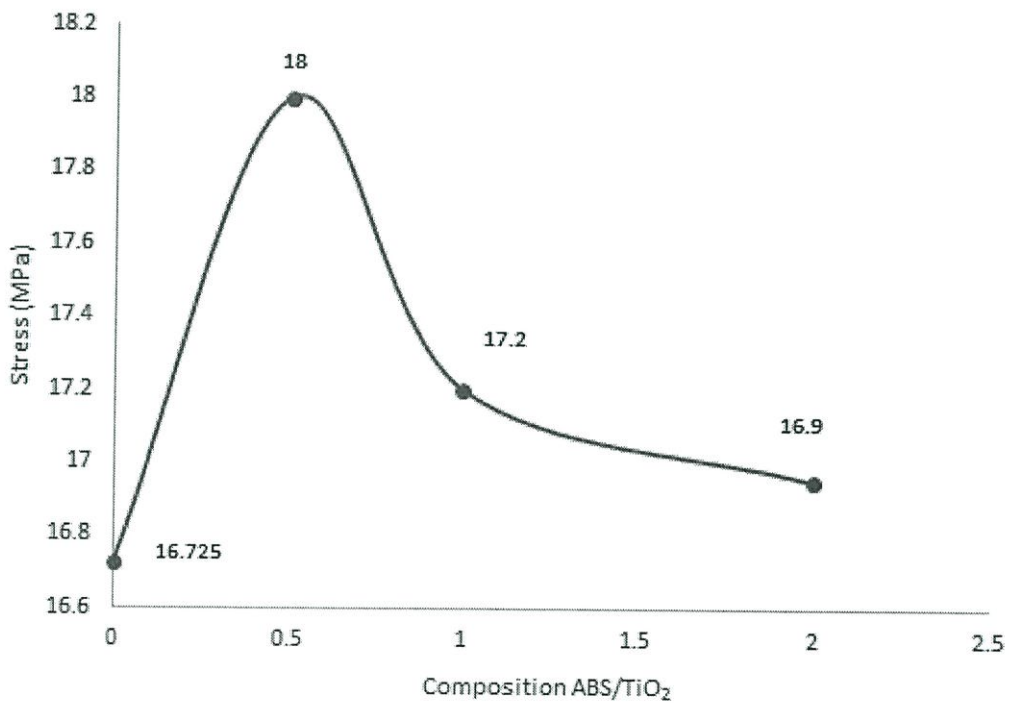
อัตราส่วน (wt%)	Stress (Mpa) หรือ (N/mm ²)	Strain (%)	Young's Modulus (Mpa) หรือ (N/mm ²)
0	16.725	2.2	597.435
0.5	18	4.31	679.3855
1	17.2	5.925	403.802
2	16.95	2.8725	459.709

เมื่อพิจารณาอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ที่ผสมกับพลาสติก ABS พบว่าคุณสมบัติเชิงกลด้านแรงดึง ซึ่งได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของพลาสติกเมื่อผสมอนุภาคดังกล่าวมีค่าแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ไม่มีคุณสมบัติด้านการเสริมแรง เมื่อปริมาณอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นส่วนเนื้อพื้น (พลาสติก ABS) ลดลง และเมื่อให้แรงกระทำกับชิ้นงานทำให้เกิดความเครียดที่จุดรับแรง ดังนั้นจึงส่งผลให้พลาสติก ABS ที่ผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) มีความแข็งแรงลดลง

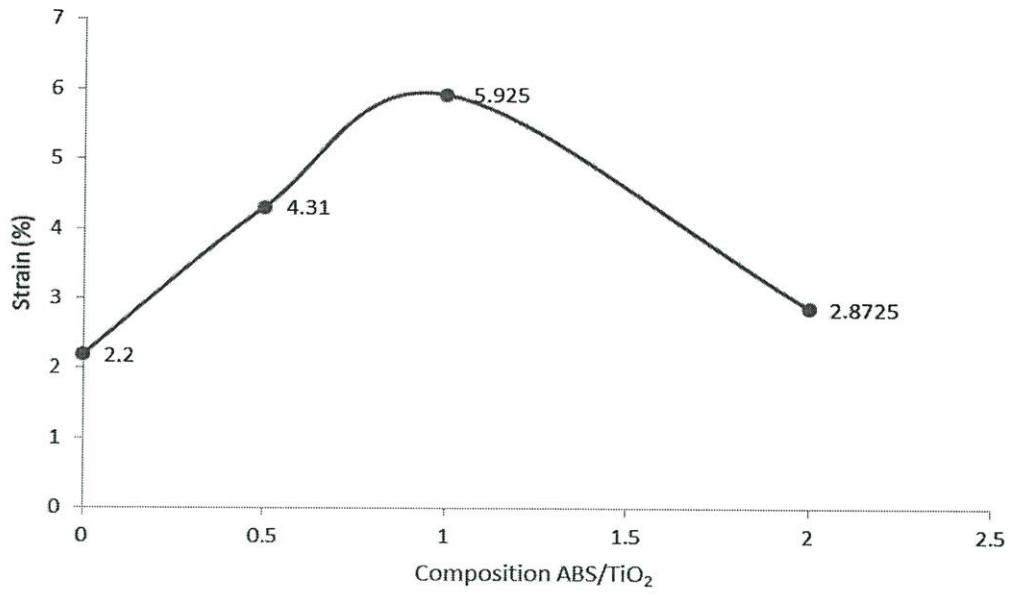
ผลของค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) มีปริมาณเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงจะมีค่าสูงสุดเมื่อผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) กับพลาสติก ABS ที่ 0.5 (wt%) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ผสมกับตัวพลาสติก ที่ 1 และ 2 (wt%) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8

ผลของค่าความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) กับพลาสติก ABS ที่ 0.5 และ 1 (wt%) แต่เมื่อผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) มากขึ้นจะทำให้ความเครียดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.9

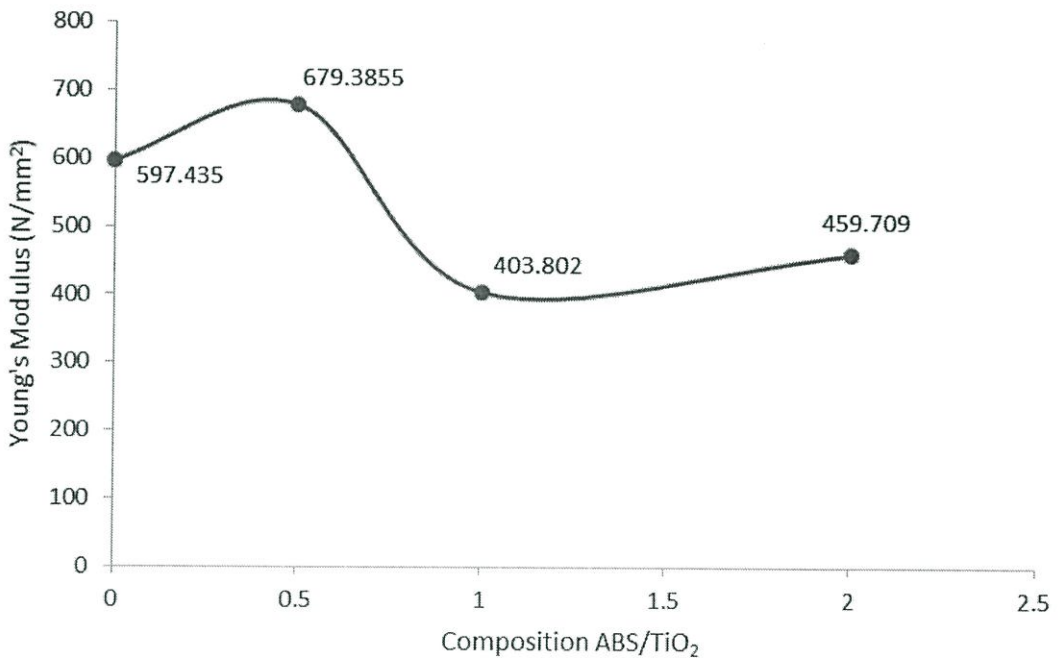
ผลของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติก ABS ผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ 0.5 (wt%) มีค่าสูงสุดและมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบระหว่างความเค้น (MPa) กับชิ้นงาน



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบระหว่างความเครียด (%) กับชิ้นงาน



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบระหว่างค่ามอดูลัส (N/mm²) กับชิ้นงาน

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

5.1.1 ผลการศึกษาความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ABS/TiO₂

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli ของพลาสติกอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) ที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ในอัตราส่วนที่ 0, 0.5, 1 และ 2 (wt%) ตามลำดับ จากนั้นนำไปฉายแสงยูวีเพื่อศึกษาผลต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจากปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติก พบว่า จากการฉายแสงยูวีที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้เวลาฉายแสงยูวีมากขึ้น อัตราการรอดชีวิตของแบคทีเรียลดลง ตามลำดับ สรุปได้ว่า ABS/TiO₂ ที่ 0.5 % ให้ประสิทธิภาพ และสถานะที่เหมาะสมสำหรับการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีที่สุด

5.1.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ

จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของพลาสติก ABS ที่ผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ในเนื้อพลาสติก พบว่าอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) มีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ เมื่อปริมาณผสมของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ที่ผสมกับตัวพลาสติก ABS ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีลักษณะสันฐานวิทยาของชิ้นงานมีความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้นและทำให้ระยะสัมผัสกันระหว่างอนุภาคชิดกันมากขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคมีการเกาะกลุ่มกันดี และกระจายตัวได้เพิ่มขึ้น

5.1.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกล

ก. ค่าความแข็งแรงดึง เมื่อผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) กับพลาสติก ABS ในอัตราส่วน 99.5:0.5 ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) กับพลาสติก ABS ในอัตราส่วน 99.5:0.1 และ 99.5:0.2 ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลง

ข. ค่าความเครียด เมื่อผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) กับพลาสติก ABS ในอัตราส่วน 99.5:0.5 และ 99.5:0.1 ความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) มากขึ้นมีแนวโน้มทำให้ค่าความเครียดลดลง

ค. ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติก ABS ผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จากการทดลองพบว่าเมื่อผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) กับพลาสติก ABS ในอัตราส่วน 99.5:0.5 มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุด และจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการทดสอบเชื้อแบคทีเรียกับชิ้นงาน ในการหยดเชื้อลงบนชิ้นงานควรหยดให้อยู่บริเวณ กึ่งกลางของชิ้นงาน เพื่อให้เชื้อสามารถกระจายได้ทั่วชิ้นงานและเป็นการควบคุมวิธีการหยด
2. อุปกรณ์ต่างๆ ที่นำมาใช้ในการทดสอบต้องสะอาด ควรนำอุปกรณ์ต่างๆ ไปฆ่าเชื้อก่อน ความสกปรกเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้ผลการทดลองผิดพลาด หรือคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง
3. ก่อนทดสอบเชื้อแบคทีเรียในตู้ Biohazard Laminar Flow (ตู้ปลอดเชื้อ) ควรเปิดหลอดยูวีที่อยู่ในตู้ปลอดเชื้อเป็นเวลา 30 นาทีเสมอ
4. ก่อนการหยดเชื้อลงบนชิ้นงาน ควรทำความสะอาดชิ้นงานด้วยแอลกอฮอล์เสมอ ควรศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม ในเรื่องของประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในด้านฆ่าเชื้อโรค
5. ควรมีการศึกษาผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) กับพอลิเมอร์ประเภทอื่นเช่น PVC และ PE เพื่อใช้ในการลดต้นทุน ปรับปรุงสมบัติพอลิเมอร์ และขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆที่สามารถใช้งานได้
6. ควรใช้สารปรับแต่งผิวหรือใช้สารเติมแต่งที่เรียกว่าสารประสาน (Coupling Agent) ซึ่งจะช่วยให้แรงยึดระหว่างอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) กับตัวพลาสติก ABS ลดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุผสม ซึ่งจะช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการยึดตัวเพิ่มมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] แบคทีเรียอีโคไล [Online]. http://lpdi.go.th/enterobacteriaceae_bacterial_feautre_124_.html; Search: 1 March 2016.
- [2] ชวิศร์ กรณ์ยเมธากุล. “การปรับแต่งผิวหน้าของไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง” (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549).
- [3] พอลิเมอร์ [Online]. <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnew/0/286/4/11/polymer/birthofpolymer.html>; Search: 25 February 2016.
- [4] ประเภทของพอลิเมอร์ [Online]. <http://chemsci.kku.ac.th/arayan/polymer>; Search: 6 February 2016.
- [5] สมบัติเชิงกล[Online]. <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/MTT656.%20Chapter.pdf>; Search: 8 April 2016.
- [6] คุณสมบัติของพอลิเมอร์ [Online]. http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer_Chemistry/image_files/chapter2.html; Search: 8 April 2016.
- [7] SEM หลักการ [Online]. <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>; Search: 8 April 2016.
- [8] 1. William F. Smith, 1996, "Principle of Material Science and Engineering", 3rd.ed., NewYork, McGraw-Hill.
2. แม้น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา, แปล, 1997, "วัสดุวิศวกรรม", กรุงเทพมหานคร, McGraw-Hill. ; Search: 25 May 2016
- [9] ประวัติของพลาสติก [Online]. <http://pradittisan.blogspot.com/2011/11/plastics-molding-injection.html>; Search: 25 February 2016.
- [10] พลาสติก [Online]. <http://www.promptstore.com/index.php>; Search: 18 February 2016.
- [11] ประเภทและการใช้งานของพลาสติก [Online]. http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_and_usage_plas.html ; Search: 25 May 2016
- [12] ดร.รชนี พัทธวรการ. เอกสารประกอบการสอน : เทคโนโลยีกระบวนการผลิตภัณฑ์และพอลิเมอร์. เชียงใหม่ : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [13] พลาสติก ABS [Online]. <http://fishinter.com>; Search: 1 March 2016
- [14] คุณสมบัติเด่นของพลาสติก ABS [Online]. <http://www.print3dd.comคุณสมบัติพลาสติก-abs/> Search: 25 February 2016.

- [15] ABS Structure [Online]. http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polymer_s-anoverview.html; Search: 25 February 2016.
- [16] เสาวลักษณ์ บุญรอด. “ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกและพฤติกรรมการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนฟิลิเมอร์” (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2554).
- [17] ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส [Online]. <http://sichon.wu.ac.th/file/envi-shh-20090110-112240-pwrqr.pdf>; Search: 3 February 2016.
- [18] JIS Z 2801/ISO 22196 [Online]. <http://www.microbe-investigations.com/testing-methods/jis-z-2801-iso-22196/>; Search: 1 March 2016.
- [19] Kim S.Y., Chang, T.S., Lee, D.K., Photocatalytic Decomposition of Methylene Blue over Nanosized Titania Partical. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2004.
- [20] Silvia Bonetta, Sara Bonetta, Francesca Motta, Alberto Strini and Elisabetta Carraro, Photocatalytic bacterial inactivation by TiO₂-coated surfaces, a Springer Open Journal, 2013.
- [21] Zhang, H.J., Wen D.Z. Antibacterial Properties of Sb-TiO₂ Thin Films by RF Magnetron Co-Sputtering, *Surface & Coatings Technology*, 2007.

ภาคผนวก ก

การทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli บนชิ้นงาน
ตามมาตรฐาน JIS Z 2801 : 2010

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

Ethanol (C ₂ H ₅ 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 Pharmacopoeia
Agar	Guaranteed reagent specified in JIS K 8263 or superior
Yeast extract	For microbial test
Tryptone	For microbial test
Glucose	For microbial test
Casein peptone	For microbial test
Soybean peptone	For microbial test
Lecithin	For microbial test
Nonionic surfactant	Polyoxyethylene sorbitan monooleate <u>[Polysorbate 80 (Tween80)]</u>
Potassium dihydrogenphosphate (KH ₂ PO ₄)	Guaranteed reagent specified in JIS K 9007
Dipotassium hydrogenphosphate (K ₂ HPO ₄)	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	<u>OME cotton, or silicone stopper, metal stopper, morton stopper, etc.</u>
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	<u>Having performance conforming to JIS K 3800 or equivalent</u>
pH meter	<u>Conforming to JIS Z 8802</u>
Chemical balance	<u>Having performance conforming to JIS K 0050 or equivalent</u>
Clean bench	For microbial test
Measuring pipette	<u>Having precision conforming to JIS K 0970 or Class A in</u>

PROTECTED BY COPYRIGHT

	<u>JIS R 3505, or equivalent</u>
Incubator	Capable of keeping the temperature ± 1 °C
Petri dish	Made of glass with about 90 mm of inside diameter, <u>or conforming to No. 99A or No. 99B specified in JIS K 0950</u>
Stomacher pouch	<u>For microbial test</u>
Stomacher	<u>For microbial test</u>
Film	<u>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</u>

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).

- a) **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.
- b) **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.
- c) **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.

- a) **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

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

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 ± 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 bacter-

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.

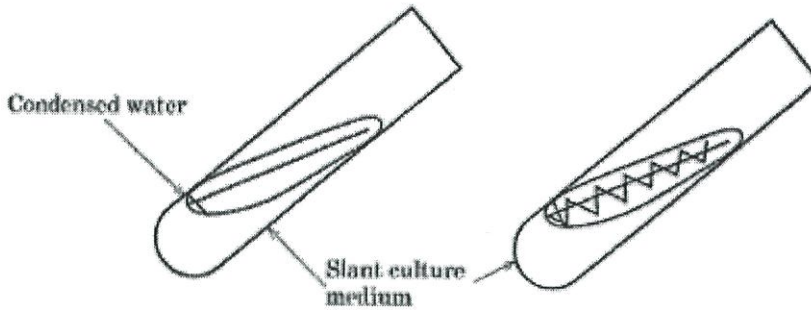


Figure 1 Transfer of bacteria

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 mm^2 to $1\ 600\text{ mm}^2$.
 - 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

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.

- d) 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 2.5×10^5 to 10×10^5 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 6.2×10^3 to 2.5×10^4 cells/cm².
 - 3) The instilled test inoculum shall be covered with a film, the film shall be gently

PROTECTED BY COPYRIGHT

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 mm to 5.0 mm from four sides of the test piece, but the size of film shall not be reduced to less than 400 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 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 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.

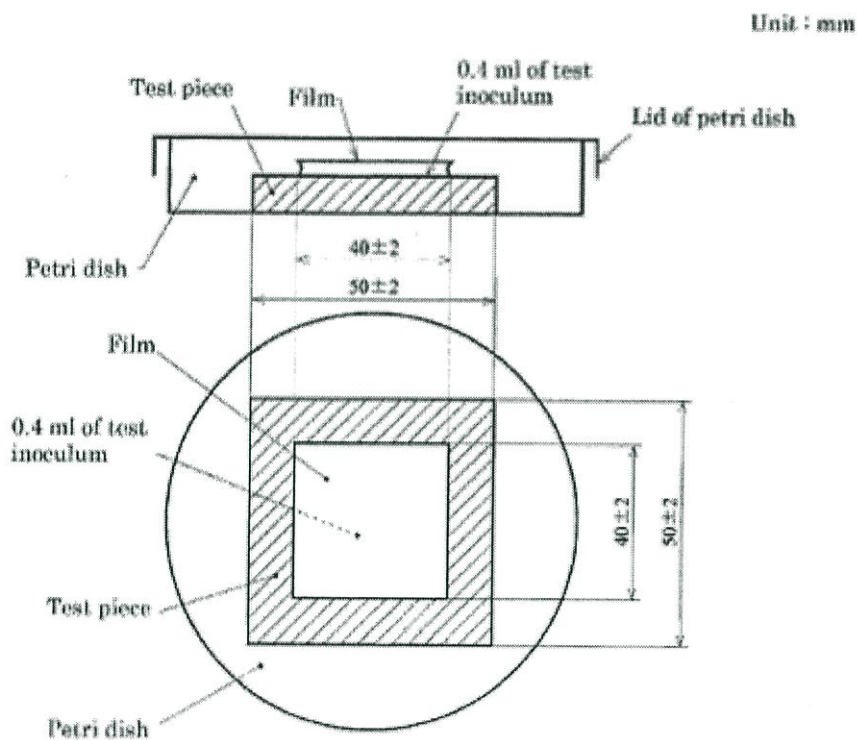


Figure 2 Instillation of inoculum on test piece and covering by film

PROTECTED BY COPYRIGHT

- 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

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).

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

- where, N : number of viable bacteria (per 1 cm^2 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^2)

In the case where the covering film is omitted in 5.6 a) 3), A shall be the surface area (cm^2) 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^2 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-

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.

$$\frac{L_{max} - L_{min}}{L_{mean}} \leq 0.2 \dots\dots\dots(2)$$

where, L_{max} : maximum logarithm number of viable bacteria
 L_{min} : minimum logarithm number of viable bacteria
 L_{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 6.2×10^3 to 2.5×10^4 cells/cm².
 - 3) The number of viable bacteria on untreated test piece after 24 h shall be not less than 62 cells/cm² 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 6.2×10^2 cells/cm² 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.

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

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

- 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_t , A_t 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

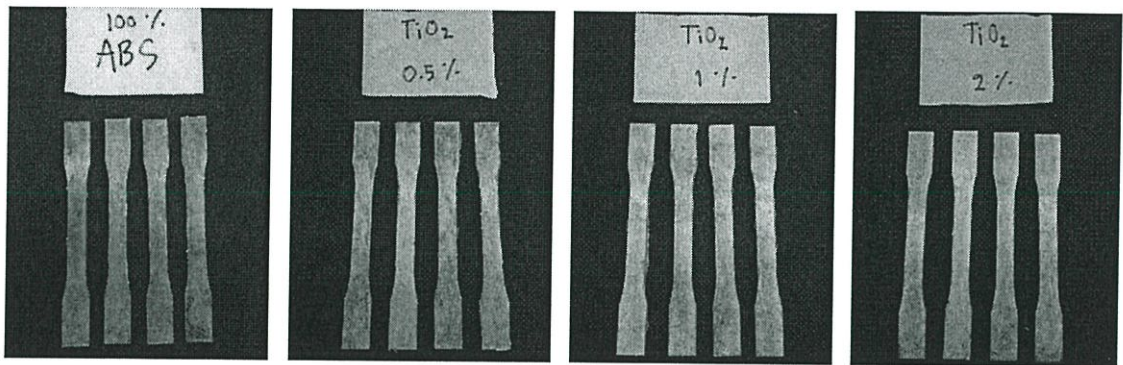
ภาคผนวก ข

การทดสอบอิทธิพลของไททานเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติทางกล
ของพลาสติก ABS

1. ทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)

1.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

เตรียมชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638- 03 Type I ซึ่งใช้สำหรับพลาสติกเสริมแรง (Reinforced Plastics) ตัดชิ้นทดสอบจากถังไฟเบอร์กลาสแบบเดียวกัน และตัดเป็น 2 แนว คือ ตัดตามแนวการพัน และแนวขวางของการพันเส้นใยแก้ว ตัดให้มีขนาด $25 \times 165 \text{ mm}^2$ แล้วจึงนำชิ้นงานไปทำให้โค้งเว้าด้วยเครื่องกัด ดังรูปที่ ข.1



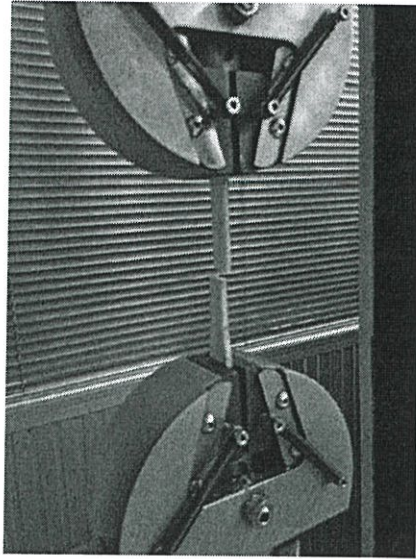
รูปที่ ข.1 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง

1.2 วิธีการทดสอบ

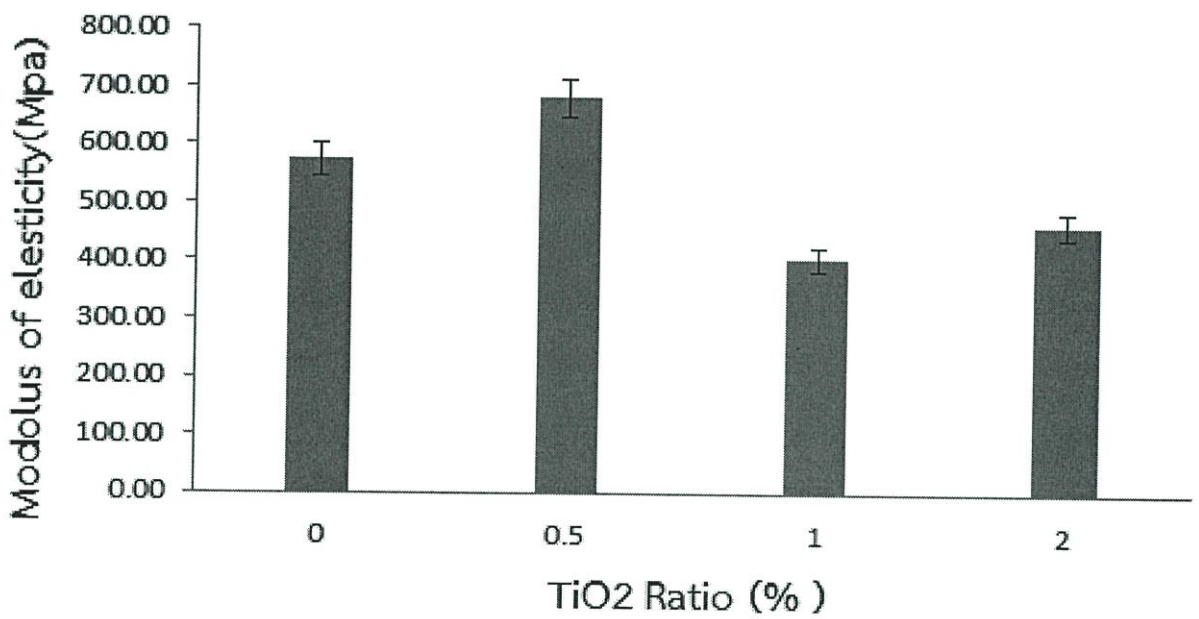
ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type I ชนิดพลาสติกเสริมแรง (Reinforced Plastics) ดังรูปที่ ข.2 และ ข.3 จำนวน 4 ชิ้นทดสอบต่อแบบและแนวการตัด โดยใช้ อัตราเร็วที่ 5 มม/นาที่ กำหนดGauge Length ในการ คำนวณเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ ข.4, ข.5, ข.6 และตารางที่ ข.1, ข.2 และ ข.3



รูปที่ ข.2 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine)

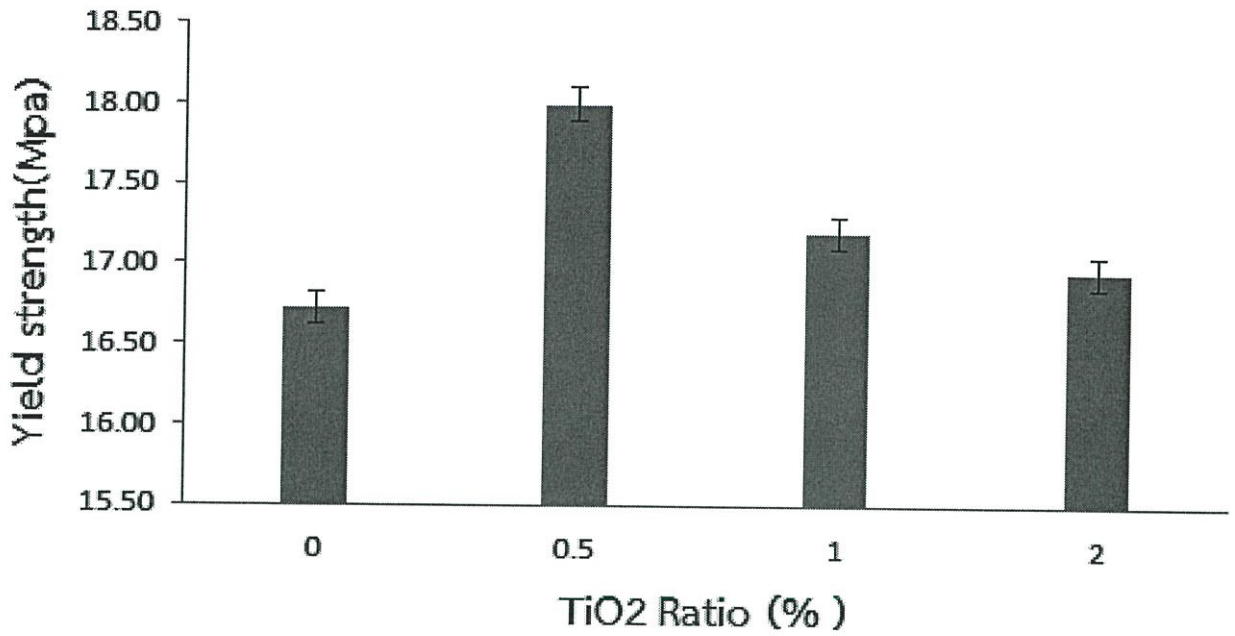


รูปที่ ข.3 ตัวอย่างทดสอบแรงดึง

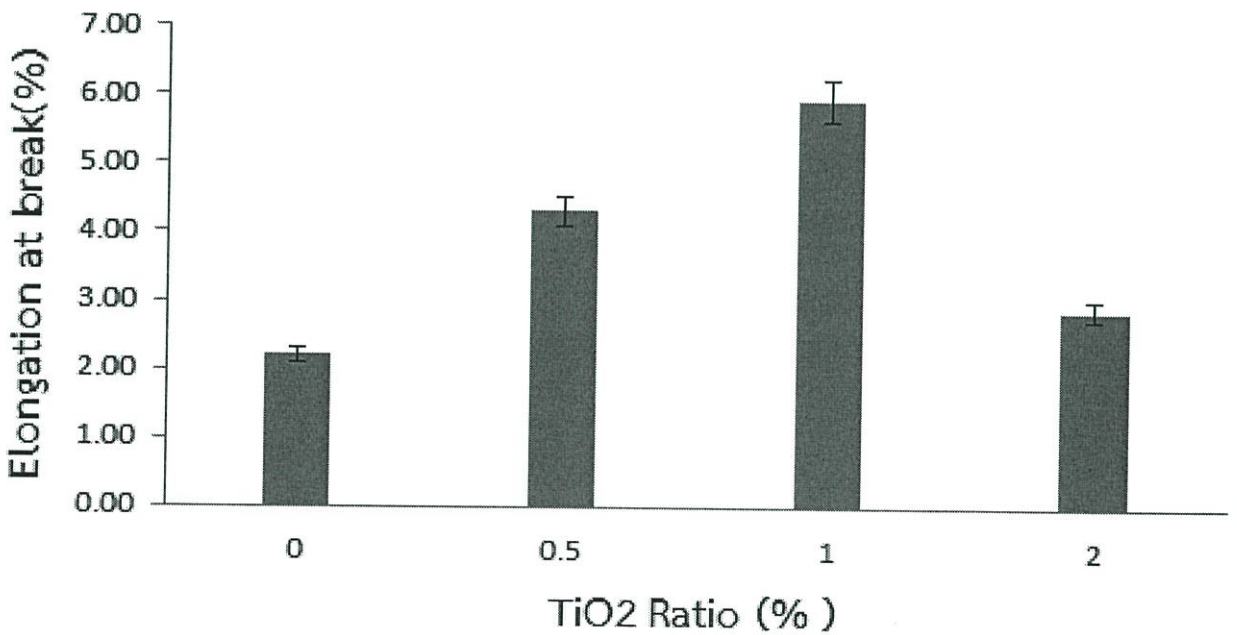


รูปที่ ข.4 ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

ของพลาสติก ABS ผสม TiO₂ 0-2%



รูปที่ ข.5 ค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Yield strength)
ของพลาสติก ABS ผสม TiO₂ 0-2%



รูปที่ ข.6 เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at Break)
ของพลาสติก ABS ผสม TiO₂ 0-2%

ตารางที่ ข.1 เปอร์เซนต์การยืดตัวที่จุดขาด(%Elongation at break)

ปริมาณของ Tio2	%Elongation at break	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0%	2.20	3.2
0.5%	4.31	0.28
1%	5.93	0.38
2%	2.87	3.43

ตารางที่ ข.2 ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก(Yield strength)

ปริมาณของ Tio2	Yield stress (Mpa)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0%	16.73	1.86
0.5%	18.00	0.88
1%	17.20	0.61
2%	16.95	0.39

ตารางที่ ข.2 มอดูลัสความยืดหยุ่น(Modulus of elasticity)

ปริมาณของ Tio2	มอดูลัส (Mpa)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0%	573.44	109.57
0.5%	679.39	37.71
1%	403.80	27.42
2%	459.71	36.56