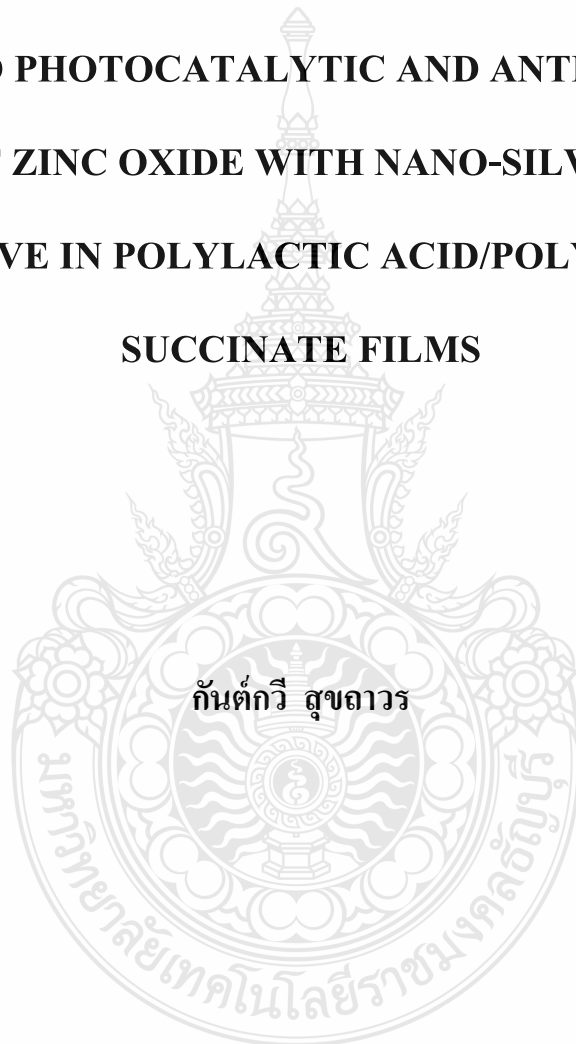


การเพิ่มสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสมบัติการต้านจุลชีพของ
ซิงค์ออกไซด์ด้วยนาโนซิลเวอร์และใช้เป็นสารเติมแต่งใน
ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

ENHANCED PHOTOCATALYTIC AND ANTIMICROBIAL
PROPERTIES OF ZINC OXIDE WITH NANO-SILVER AND USED AS
AN ADDITIVE IN POLYLACTIC ACID/POLYBUTYLENE
SUCCINATE FILMS



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การเพิ่มสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสมบัติการต้านจุลชีพของ
ซิงค์ออกไซด์ด้วยนาโนซิลเวอร์และใช้เป็นสารเติมแต่งใน
ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิবিทิลีนซัคซิเนต

กัณฑ์กวี สุขถาวร

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเพิ่มสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสมบัติการต้านจุลชีพของซิงค์ออกไซด์ด้วยนาโนซิลเวอร์และใช้เป็นสารเติมแต่งในฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

Enhanced Photocatalytic and Antimicrobial Properties of Zinc Oxide with Nano-silver and Used as an Additive in Poly(lactic Acid/Polybutylene Succinate) Films

ชื่อ - นามสกุล

นายกันต์กวี สุขถาวร

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, Ph.D.

ปีการศึกษา

2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีย์, Ph.D.)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์อภิรัตน์ เลาห์บุตร, ปร.ด.)

..... กรรมการ
(อาจารย์สุมนมาลย์ เนียมกลาง, ปร.ด.)

..... กรรมการ
(อาจารย์ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 17 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสมบัติการต้านจุลชีพของ ซิงค์ออกไซด์ด้วยนาโนซิลเวอร์และใช้เป็นสารเติมแต่งในฟิล์มพอลิแลคติก แอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซักซิเนต
ชื่อ – นามสกุล	นายกันต์กวี สุขถาวร
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

ซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุที่น่าสนใจและสามารถถูกใช้งานได้อย่างกว้างขวางเช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรับรู้ อย่างไรก็ตามการปรับปรุงพื้นผิวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของซิงค์ออกไซด์ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสมบัติการต้านจุลชีพของซิงค์ออกไซด์ด้วยนาโนซิลเวอร์และใช้เป็นสารเติมแต่งในฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซักซิเนต

ซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์สามารถเตรียมด้วยวิธีออกซิเดชันของเบนซอกซาซีนตามอนุสิทธิบัตรเลขที่ 9717 ผงที่เตรียมได้ถูกวิเคราะห์โดย XRD, XRF, BET, SEM, สมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสมบัติการต้านจุลชีพ หลังจากนั้นซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 5 ถูกใช้เป็นสารเติมแต่งในฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (90:10 โดยน้ำหนัก) ที่ 1, 2, 3 และ 4 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติการต้านจุลชีพของฟิล์มคอมโพสิตถูกตรวจสอบ

ผลการทดลองพบว่าซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์แสดงสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและต้านจุลชีพดีกว่าซิงค์ออกไซด์ ยิ่งไปกว่านั้นฟิล์มคอมโพสิตที่มีซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ 1 ส่วนในร้อยละ แสดงค่ามอดูลัสสูงที่สุดและยับยั้งทั้งแบคทีเรียชนิดแกรมบวก (*S.aureus*) และแกรมลบ (*E.coli* และ *P.aeruginosa*) จึงสามารถสรุปได้ว่าซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์สามารถทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงและสารต้านจุลชีพในฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตได้

คำสำคัญ: ซิงค์ออกไซด์ นาโนซิลเวอร์ สมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง สมบัติการต้านจุลชีพ
ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซักซิเนต

Thesis Title Enhanced Photocatalytic and Antimicrobial Properties of Zinc Oxide with Nano-silver and Used as an Additive in Polylactic Acid/Polybutylene Succinate Films

Name – Surname Mr. Kankavee Sukthavorn

Program Materials Engineering

Thesis Advisor Mr. Chatchai veranitisagul, Ph.D.

Academic Year 2016

ABSTRACT

Zinc oxide (ZnO) is interesting material and can be widely used in many applications, such as catalysts and sensors. However, surface modifications can increase ZnO performance. Therefore, this research aimed to enhance photocatalytic and antimicrobial properties of ZnO with nano-silver and use as an additive in polylactic acid (PLA)/polybutylene succinate (PBS) films.

Nano-silver coated zinc oxide (Ag/ZnO) powders can be successfully prepared via benzoxazine oxidation method according to Thai petty patent No. 9717. The prepared powders were characterized by XRD, XRF, BET, SEM, photocatalytic and antimicrobial properties. After that, 5%Ag/ZnO powder was used as an additive in PLA/PBS (90:10 wt%) films at 1, 2, 3 and 4 phr. The physical, mechanical, thermal and antimicrobial properties of composite films were examined.

The results found that the Ag/ZnO powders showed better photocatalytic and antimicrobial properties than ZnO. In addition, the composite films at 1 phr Ag/ZnO powders showed the highest modulus and inhibited both gram positive (*S.aureus*) and gram negative (*E.coli* and *P.aeruginosa*) bacteria. It can be concluded that the Ag/ZnO powders can act as nucleating and antimicrobial agents in PLA/PBS films.

Keywords: zinc oxide, nano-silver, photocatalytic property, antimicrobial property, polylactic acid/polybutylene succinate films.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความกรุณาและความช่วยเหลือของ ดร.ฉัตรชัย วีระนิติสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัย ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตร อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิ จากภาควิชา วิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์ และ ดร.สุมนมาลย์ เนียมกลาง อาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ข้อเสนอแนะและเป็นกรรมการ สำหรับสอบวิทยานิพนธ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณ เกสัชกรหญิง ดร.สุชาดา จรุงรุ่งเรืองโชค อาจารย์ประจำคณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต และนางสาวนลพรรณ นุชสุวรรณ ผู้ช่วยนักวิจัยภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผู้เป็นที่ปรึกษาและให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการสังเคราะห์และเครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบให้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน จากภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่คอยอบรมสั่งสอนให้ความรู้ ตลอดจนให้ การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องจักรและสถานที่ สำหรับใช้ในการทำงานวิจัยนี้จนเสร็จ สมบูรณ์

อนึ่งยังมีบุคคลอีกหลายท่านนอกเหนือจากที่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ขอกราบ ขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้ด้วย

กัณฑ์วี สุขदार

สารบัญ

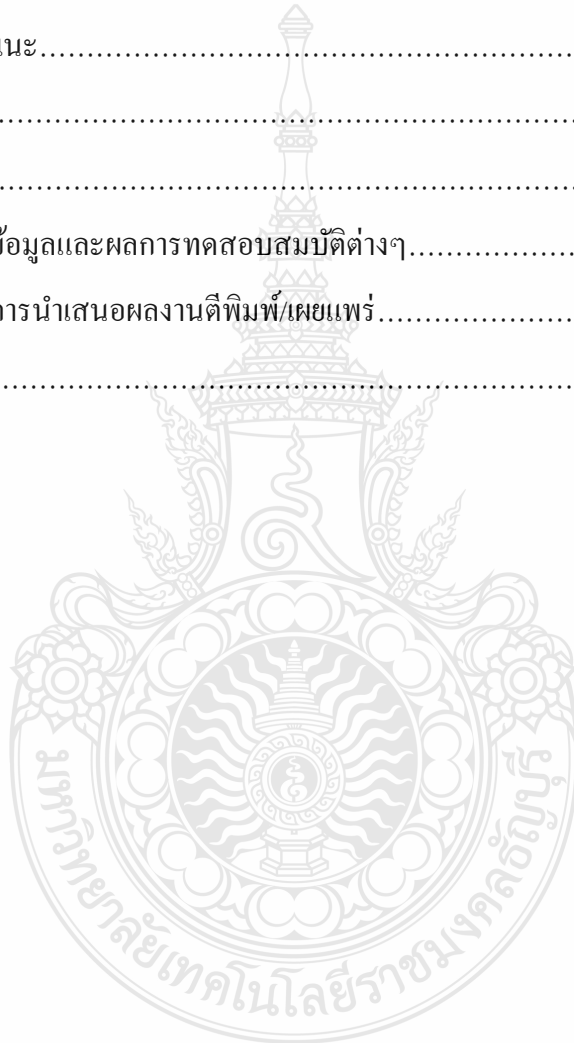
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(14)
บทที่ 1 บทนำ.....	15
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	15
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	17
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	17
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	18
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.2 พลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics).....	24
2.3 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA).....	25
2.4 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS).....	26
2.5 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO).....	26
2.6 นาโนซิลเวอร์ (Nano-silver).....	27
2.7 การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic).....	29
2.8 แบคทีเรีย (Bacteria).....	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	33
3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	35
3.3 การเตรียมซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์.....	38
3.4 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ที่เตรียมได้....	39
3.5 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ.....	41
3.6 การเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซักซิเนต.....	42
3.7 การศึกษาสมบัติของแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซักซิเนต.....	43
3.8 การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีน ซักซิเนตกับซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์.....	44
3.9 การศึกษาสมบัติของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดผสม พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์....	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	47
4.1 ผลการเตรียมซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์.....	47
4.2 ผลการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ที่เตรียมได้	48
4.3 ผลการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ.....	60
4.4 ผลการเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซักซิเนต.....	63
4.5 ผลการศึกษาสมบัติของแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซักซิเนต..	64
4.6 ผลการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีน ซักซิเนตกับซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์.....	69
4.7 ผลการศึกษาสมบัติของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดผสม พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์....	70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	82
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	84
บรรณานุกรม.....	85
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆ.....	90
ภาคผนวก ข การนำเสนอผลงานตีพิมพ์/เผยแพร่.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	111



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม Ag/ZnO.....	38
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนการผสมแผ่นฟิล์ม PLA/PBS.....	43
ตารางที่ 3.3 สภาวะในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม.....	43
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนการผสมแผ่นฟิล์มคอมโพสิต PLA/PBS กับ ZnO หรือ Ag/ZnO.....	44
ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึกของ (Crystallite size, D_{XRD}) ZnO และ Ag/ZnO ทั้งสองเกรด.....	50
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area, S_{BET}) และขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particle size, D_{BET}) ของ ZnO และ Ag/ZnO ทั้งสองเกรด.....	52
ตารางที่ 4.3 ผลการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวกและแกรมลบของ ZnO และ Ag/ZnO ทั้งสองเกรด.....	59
ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของ PLA และ PBS.....	63
ตารางที่ 4.5 สมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์ม PLA และ PLA/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	68
ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์ม PLA90 และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่มีการเติม Com-ZnO หรือ 5%Ag/Com-ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	80
ตารางที่ 4.7 จำนวนเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวกและแกรมลบที่มีอยู่บนแผ่นฟิล์มคอมโพสิตก่อนและหลังที่จะมีการทดสอบ.....	81

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	สูตรโครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด.....	25
รูปที่ 2.2	สูตรโครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....	26
รูปที่ 2.3	รูปแบบโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์.....	27
รูปที่ 2.4	กลไกการฆ่าเชื้อแบคทีเรียเมื่อใช้ออนุภาคนาโนซิลเวอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	28
รูปที่ 2.5	กลไกการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ที่มีต่อสีย้อม Methylene blue (MB).....	31
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการเตรียม Ag/ZnO.....	35
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฟิล์ม PLA/PBS.....	36
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิต.....	37
รูปที่ 4.1	ลักษณะทางกายภาพของ (ก) Com-ZnO กับ Ag/Com-ZnO ที่ปริมาณนาโนซิลเวอร์ร้อยละ (ข) 0.1 (ค) 0.5 (ง) 1 (จ) 5 โดยโมล และลักษณะทางกายภาพของ (ฉ) Nano-ZnO กับ Ag/Nano-ZnO ที่ปริมาณนาโนซิลเวอร์ร้อยละ (ช) 0.1 (ซ) 0.5 (ฌ) 1 และ (ญ) 5 โดยโมล.....	47
รูปที่ 4.2	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (ก) ฟิล์มมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 01-076-0704 (ข) Com-ZnO และ Com-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ (ค) 0.1 (ง) 0.5 (จ) 1 และ (ฉ) 5 โดยโมล.....	49
รูปที่ 4.3	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (ก) ฟิล์มมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 01-076-0704 (ข) Nano-ZnO และ Nano-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ (ค) 0.1 (ง) 0.5 (จ) 1 และ (ฉ) 5 โดยโมล.....	50
รูปที่ 4.4	ผลการวิเคราะห์ธาตุและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโกปีสำหรับ (ก) Com-ZnO และ Com-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ (ข) 0.1 (ค) 0.5 (ง) 1 และ (จ) 5 โดยโมล.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.5	ผลการวิเคราะห์ธาตุและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโกปีสำหรับ (ก) Nano-ZnO และ Nano-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ (ข) 0.1 (ค) 0.5 (ง) 1 และ (จ) 5 โดยโมล.....	51
รูปที่ 4.6	ภาพถ่าย SEM ของ (ก) Com-ZnO และ Com-ZnO ที่มีปริมาณนาโนซิลเวอร์ร้อยละ (ข) 0.1 (ค) 0.5 (ง) 1 และ (จ) 5 โดยโมล.....	53
รูปที่ 4.7	ภาพถ่าย SEM ของ (ก) Nano-ZnO และ Nano-ZnO ที่มีปริมาณนาโนซิลเวอร์ร้อยละ (ข) 0.1 (ค) 0.5 (ง) 1 และ (จ) 5 โดยโมล.....	53
รูปที่ 4.8	ผลการย่อยสลายสีย้อม Edicol tartrazine ของ (ก) Com-ZnO และ (ข) Nano-ZnO	54
รูปที่ 4.9	ผลการย่อยสลายสีย้อม Edicol tartrazine ของ (ก) Com-ZnO และ Ag/Com-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ (ข) 0.1 (ค) 5 (ง) 1 และ (จ) 0.5 โดยโมล.....	55
รูปที่ 4.10	ผลการย่อยสลายสีย้อม Edicol tartrazine ของ (ก) Nano-ZnO และ Ag/Nano-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ(ข) 0.1 (ค) 5 (ง) 1 และ (จ) 0.5 โดยโมล	56
รูปที่ 4.11	ผลการย่อยสลายสีย้อม Edicol tartrazine ของ (ก) 0.5%Ag/Com-ZnO และ (ข) 1%Ag/Nano-ZnO.....	57
รูปที่ 4.12	ผลการย่อยสลายสีย้อม Edicol tartrazine ของ 5%Ag/Com-ZnO (ก) ครั้งที่ 1 (ข) ครั้งที่ 2 (ค) ครั้งที่ 3.....	58
รูปที่ 4.13	อัตราการไหลของ PLA และ PLA ที่ผสม PBS ในอัตราส่วนต่างๆ ก่อนขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม.....	60
รูปที่ 4.14	อัตราการไหลของ PLA90 และ PLA90 ที่มีการเติม Com-ZnO ในอัตราส่วนต่างๆ ก่อนขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม.....	61
รูปที่ 4.15	อัตราการไหลของ PLA90 และ PLA90 ที่มีการเติม 5%Ag/Com-ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆ ก่อนขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม.....	62

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.16	DSC เทอร์โมแกรมของ PLA และ PBS.....	62
รูปที่ 4.17	ภาพถ่ายแผ่นฟิล์ม (ก) PLA, (ข) PLA95, (ค) PLA90, (ง) PLA85 และ (จ) PLA80.....	63
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์ม PLA/PBS กับ ปริมาณการผสม PBS.....	64
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของแผ่นฟิล์ม PLA/PBS กับปริมาณการผสม PBS.....	65
รูปที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์ม PLA/PBS กับ ปริมาณการผสม PBS.....	66
รูปที่ 4.21	ภาพถ่าย SEM ของแผ่นฟิล์ม (ก) PLA, (ข) PLA95, (ค) PLA90, (ง) PLA85 และ (จ) PLA80 หลังจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง.....	67
รูปที่ 4.22	DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นฟิล์ม (ก) PLA, (ข) PLA95, (ค) PLA90, (ง) PLA85, (จ) PLA80 และ (ช) PBS.....	68
รูปที่ 4.23	ภาพถ่ายแผ่นฟิล์มคอมโพสิต (ก) PLA90-Com-ZnO-1, (ข) PLA90-Com-ZnO-2, (ค) PLA90-Com-ZnO-3 และ (ง) PLA90-Com-ZnO-4.....	69
รูปที่ 4.24	ภาพถ่ายแผ่นฟิล์มคอมโพสิต (ก) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-1, (ข) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-2, (ค) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-3 และ (ง) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-4.....	70
รูปที่ 4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับ ปริมาณการเติม Com-ZnO.....	71
รูปที่ 4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับปริมาณการเติม Com-ZnO.....	72

สารบัญญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับปริมาณการเติม Com-ZnO	73
รูปที่ 4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับปริมาณการเติม 5%Ag/Com-ZnO	74
รูปที่ 4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับปริมาณการเติม 5%Ag/Com-ZnO.....	75
รูปที่ 4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับปริมาณการเติม 5%Ag/Com-ZnO.....	76
รูปที่ 4.31	ภาพถ่าย SEM ที่ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต (ก) PLA90-ZnO-1, (ข) PLA90-ZnO-2, (ค) PLA90-ZnO-3 และ (ง) PLA90-ZnO-4.....	77
รูปที่ 4.32	ภาพถ่าย SEM ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต (ก) PLA90-Ag/ZnO-1, (ข) PLA90-Ag/ZnO-2, (ค) PLA90-Ag/ZnO-3 และ (ง) PLA90-Ag/ZnO-4.....	78
รูปที่ 4.33	DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นฟิล์ม (ก) PLA90, (ข) PLA90-Com-ZnO-1, (ค) PLA90-Com-ZnO-2, (ง) PLA90-Com-ZnO-3 และ (จ) PLA90-Com-ZnO-4.	79
รูปที่ 4.34	DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นฟิล์ม (ก) PLA90, (ข) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-1, (ค) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-2, (ง) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-3 และ (จ) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-4.....	80

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ZnO	ซิงค์ออกไซด์
Ag	นาโนซิลเวอร์
Ag/ZnO	ซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์
Com-ZnO	ซิงค์ออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม
Nano-ZnO	ซิงค์ออกไซด์เกรดอนุภาคนาโน
Ag/Com-ZnO	ซิงค์ออกไซด์เกรดอุตสาหกรรมเคลือบนาโนซิลเวอร์
Ag/Nano-ZnO	ซิงค์ออกไซด์เกรดอนุภาคนาโนเคลือบนาโนซิลเวอร์
PLA	พอลิแลคติกแอซิด
PBS	พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต
PLA/PBS	พอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต
PLA90-Com-ZnO	พอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับซิงค์ออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม
PLA90-5%Ag/Com-ZnO	พอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับซิงค์ออกไซด์เกรดอุตสาหกรรมเคลือบนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 5
nm	นาโนเมตร
°C	องศาเซลเซียส
h	ชั่วโมง
Å	อังสตรอม
m ² /g	ตารางเมตรต่อกรัม
g/cm ³	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
g	กรัม
s	วินาที
J/g	จูลต่อกรัม
T _g	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว
T _c	อุณหภูมิการเกิดผลึก
T _m	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันวัสดุคอมโพสิต (Composite materials) ที่ประกอบด้วยโลหะออกไซด์ เช่น Titanium dioxide (TiO_2), Aluminium oxide (Al_2O_3), Magnesium oxide (MgO), Zinc oxide (ZnO), Ferric oxide (Fe_2O_3), Magnetite (Fe_3O_4) และอื่นๆ ได้รับความสนใจและถูกพัฒนาเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันเช่น สมบัติเชิงแสง สมบัติทางไฟฟ้า ความเป็นแม่เหล็ก การต้านเชื้อจุลชีพ ตัวเร่งปฏิกิริยา การหน่วงไฟ และอื่นๆ อีกมากมาย [1]

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) เป็นหนึ่งในวัสดุโลหะออกไซด์ที่ถูกศึกษาเป็นอย่างมาก เนื่องจากซิงค์ออกไซด์นั้นเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีพิษ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) กว้าง สามารถใช้เป็นสารตัวเติมอนินทรีย์หรือสารให้สี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางเช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts), ตัวรับรู้ (Sensor) หรือ โซลาร์เซลล์ (Solar cell) เป็นต้น [2] แต่อย่างไรก็ตามการใช้ซิงค์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวเพื่อให้ได้สมบัติดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้นก็ยังมีความจำกัดอยู่ ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ด้วยอนุภาคนาโนโลหะชนิดต่างๆ เช่น เหล็ก (Fe), เงิน (Ag), ทอง (Au), ดีบุก (Sn) และอื่นๆ ซึ่งจะช่วยให้ส่งเสริมประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและการต้านเชื้อจุลชีพ [3]

อนุภาคนาโนซิลเวอร์ถูกใช้งานเป็นสารต้านจุลชีพในผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เนื่องจากโลหะเงินจะเกิดประจุบวก (Ag^+) ได้ดี และมีอิเล็กตรอนวงนอกสุดเพียงตัวเดียว อีกทั้งผลึกของนาโนซิลเวอร์มีขนาดเล็ก จึงมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้มีโอกาสสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้นเช่นกัน เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียเพิ่มสูงขึ้น จากงานวิจัยพบว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะเข้าสัมผัสกับแบคทีเรียที่ผนังเซลล์ และแทรกเข้าไปภายในโดยจะไปเกาะกับหมู่ -SH (Sulphydryl) ของเอนไซม์ ซึ่งจะมีผลต่อระบบเมตาโบลิซึมทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์ และเกิดการทำลายระบบหายใจ ระบบขนย้ายอิเล็กตรอนในกระบวนการเมตาโบลิซึม ยิ่งไปกว่านั้น ยังเกิดการยับยั้งการเพิ่มจำนวนและการเจริญของแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของการติดเชื้อ, กลิ่น, อากาโรคัน และ

การเกิดแผล [4] ยิ่งไปกว่านั้นงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการรายงานเกี่ยวกับการนำสารตัวเติม ซิงค์ออกไซด์มาผสมลงในพอลิเมอร์ได้หลายชนิด เช่น พอลิเอไมด์-6 (Polyamide-6), อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin), พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate), พอลิสไตรีน (Polystyrene), พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) เป็นต้น เพื่อให้มีสมบัติการต้านจุลชีพ การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง หรือการดูดกลืนรังสียูวี [5] ในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าซิงค์ออกไซด์ถูกนำมาใช้กับพลาสติกที่ผลิตมาจากฐานปิโตรเลียมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าพลาสติกที่มาจากฐานปิโตรเลียมนั้น ไม่สามารถแตกสลายได้เองตามธรรมชาติ จึงมักจะมีผลเสียทางมลพิษตามมาเสมอ เช่น การเกิดขยะ การเกิดภาวะโลกร้อน เป็นต้น ด้วยเหตุนี้พลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพจึงได้รับความสนใจในการนำมาใช้ทดแทนพลาสติกที่มาจากฐานปิโตรเลียม

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) จัดเป็นพลาสติกที่สามารถแตกสลายได้เองทางชีวภาพชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดสามารถผลิตได้จากวัสดุที่สามารถสร้างทดแทนใหม่ได้ (Renewable resources) เช่น ข้าวโพด อ้อยและมันสำปะหลัง เป็นต้น และยังมีสมบัติที่ดีหลายประการ คือมีการดูดซึมความชื้นต่ำ ติดไฟยาก โปร่งใสและมีความแข็งแรง แต่มีข้อเสียคือมีความเปราะ ทำการขึ้นรูปได้ยาก จึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงสมบัติให้มีความเปราะลดลงหรือยืดหยุ่นมากขึ้นก่อนที่จะมีการนำไปใช้งาน ซึ่งการลดความเปราะหรือเพิ่มความยืดหยุ่นของพอลิแลคติกแอซิดนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ที่เลือกนำมาใช้ก็คือการผสม (Blending) กับพลาสติกชนิดอื่น ซึ่งก็คือพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) ซึ่งจัดเป็นพลาสติกที่สามารถแตกสลายได้เองทางชีวภาพเช่นเดียวกัน มีสมบัติที่คล้ายกันแต่มีความยืดหยุ่นและสมบัติทางความร้อนดีกว่าพอลิแลคติกแอซิด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะเพิ่มสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสมบัติการต้านจุลชีพของซิงค์ออกไซด์โดยการเคลือบด้วยนาโนซิลเวอร์ และใช้ซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ที่สามารถเตรียมได้เป็นสารเติมแต่งชนิดใหม่ให้กับฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่นด้วยการผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อเพิ่มสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสมบัติการต้านจุลชีพของซิงค์ออกไซด์โดยการเคลือบด้วยนาโนซิลเวอร์

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสมบัติการต้านจุลชีพของซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์เกรดอุตสาหกรรมและเกรดนาโน

1.2.3 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดด้วยการผสมด้วยพอลิบีวทิลีนซัคซิเนต

1.2.4 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบีวทิลีนซัคซิเนตกับซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์

1.2.5 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง สมบัติทางความร้อน และสมบัติการต้านจุลชีพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบีวทิลีนซัคซิเนตกับซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ทำการเตรียมผงซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ทั้งเกรดอุตสาหกรรมและเกรดนาโนด้วยวิธีออกซิเดชันของเบนซอกซาซีนที่ปริมาณของนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.1, 0.5, 1 และ 5 โดยโมล

1.3.2 ทำการศึกษาและเปรียบเทียบความเป็นผลึก องค์ประกอบทางเคมี พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย สัณฐานวิทยา การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและการต้านจุลชีพของผงซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ที่เตรียมได้ทั้งสองเกรด

1.3.3 ทำการเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบีวทิลีนซัคซิเนตที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มแบบสกรูคู่ (Cast film twin screw extruder)

1.3.4 ทำการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง สัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบีวทิลีนซัคซิเนต

1.3.5 ทำการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีน ซักซิเนตกับซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3 และ 4 ส่วนใน ร้อยส่วนของพอลิเมอร์ (phr) ด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มแบบสกรูคู่

1.3.6 ทำการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อนและ การต้านจุลชีพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ผงซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ที่มีสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและ สมบัติการต้านจุลชีพ

1.4.2 ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบนาโนซิลเวอร์ลงบนพื้นผิวของ ซิงค์ออกไซด์ที่สามารถเพิ่มสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสมบัติการต้านจุลชีพได้

1.4.3 ทราบถึงประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสมบัติการต้านจุลชีพ ของซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ทั้งเกรดอุตสาหกรรมและเกรดนาโน

1.4.4 ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสม พอลิบิวทิลีนซักซิเนต

1.4.5 ได้แผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซักซิเนต

1.4.6 ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์

1.4.7 ได้แผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่มีสมบัติการต้านจุลชีพ

1.4.8 ได้สารเติมแต่งชนิดใหม่สำหรับพลาสติก

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสมบัติการต้านจุลชีพของซิงค์ออกไซด์ด้วยการเคลือบนาโนซิลเวอร์

Y. I. Choi และคณะ [2] ได้ทำการสังเคราะห์ ZnO และ Ag/ZnO ด้วยวิธีบดด้วยหม้อบดแบบลูกบอลแบบเปียกและแบบแห้ง จากการทดสอบการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็น (Visible) พบว่าตัวอย่างของ Ag/ZnO ที่ผ่านการบดแบบแห้ง แสดงการดูดกลืนแสง Visible ที่แข็งแกร่งที่สุดใน การทดสอบการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกับ Rhodamine B และสีผสม (Methyl orange + Rhodamine B + Methylene blue) ภายใต้การฉายด้วยแสง Visible พบว่า ZnO (Reference) ให้ผลดีที่สุด ซึ่งบ่งบอกว่า กระบวนการบดแบบลูกบอลให้ผลเป็นลบต่อการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ Rhodamine B พวกเขา สันนิษฐานว่า ซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเรดิคัล (Superoxide anion radical) ทำลายโครงสร้าง ของ Rhodamine B และในการทดลองพบการเคลื่อนที่ของออกซิเจนโดยฟองก๊าซไนโตรเจนและ ซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเรดิคัลถูกขับออกในระหว่างการทดสอบ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าหากมี การเติม H_2O_2 ในระหว่างการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของสีผสม ZnO (Reference) จะให้ผล การทดสอบการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงต่ำที่สุดแต่ในตัวอย่าง Ag/ZnO ที่ผ่านการบดแบบแห้งและแบบ เปียกจะดีที่สุด (ตามอัตราการเสื่อมสภาพจากแสงของ Rhodamine B และ Methylene blue ในสีผสม)

S. Kuriakose และคณะ [3] ได้ทำการสังเคราะห์ซิลเวอร์บนพื้นผิวนาโน ZnO เพื่อส่งเสริม ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง จากการสังเคราะห์พบว่าอนุภาคของ Ag/ZnO จะเกิดการเกาะ กลุ่มกันมากขึ้นไปจนถึงการเกาะติดกันเป็นแผ่นๆ เมื่อปริมาณของซิลเวอร์เพิ่มขึ้น และจากผลการ วิเคราะห์การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ Ag/ZnO จากการเสื่อมสภาพของสีย้อม Methylene blue พบว่า ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซิลเวอร์ที่อยู่บนพื้นผิวของ ZnO ที่ 2 mM Ag/ZnO จะแสดงประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่สูงที่สุดคือ 94% ในเวลา 20 นาที

เนื่องจากมีปริมาณของซิลเวอร์มากที่สุดและมีสัดส่วนวิทยาคลายแผ่นนาโน เนื่องจากมีความเข้มข้นของซิลเวอร์ที่สูงจึงทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นง่ายต่อการดูดกลืนสีข้อม

B. Pavel และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาการเตรียม Ag/ZnO ด้วยเทคนิคการใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยในการสังเคราะห์ โดยใช้สารตั้งต้นคือซิลเวอร์ไนเตรตและซิงค์ไนเตรต ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 15 นาที ซึ่ง Ag/ZnO ที่เตรียมได้ในตัวอย่างแรกมีลักษณะของ ZnO เป็นแบบ Hexagonal microrods แต่ในตัวอย่างที่สอง ZnO จะมีลักษณะเป็น Polyhedral บริเวณตรงมุมของอนุภาคจะมีลักษณะคล้ายกลีบเกลี้ยง (Calyx-like) และมีอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลักษณะกลมๆ กระจายตัวอยู่รอบของ ZnO ทั้งสองตัวอย่าง จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าตัวอย่างทั้งสองชนิดมีรูปแบบผลึกของซิลเวอร์เป็นแบบ Face centered cubic (FCC) และของ ZnO เป็นแบบ Hexagonal และจากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการด้านจุลชีพ พบว่าเฉพาะตัวอย่างที่หนึ่งสามารถยับยั้งเฉพาะเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวกเท่านั้นคือ *S. aureus* และ *C. albicans* ส่วนแบคทีเรียชนิดแกรมลบ *E. coli* ไม่เกิดการยับยั้ง ซึ่งให้เหตุผลว่าในแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มนี้มีความแตกต่างกันที่ผนังเซลล์ ผนังเซลล์ของแบคทีเรียชนิดแกรมบวกจะบรรจุชั้นของ Peptidoglycan มากกว่าแบคทีเรียชนิดแกรมลบ แต่แบคทีเรียชนิดแกรมบวกจะว่องไวต่อ ZnO มากกว่าชนิดแกรมลบ

H. Liua และคณะ [7] ได้ทำการสังเคราะห์คอมโพสิต Spherical Ag/ZnO heterostructural โดยวิธีทางเคมีสองขั้นตอน ซึ่งสัดส่วนวิทยาของคอมโพสิตที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะคล้ายทรงกลมพื้นผิวค่อนข้างเรียบ อนุภาคของซิลเวอร์เกาะอยู่รอบๆ พื้นผิวของอนุภาค ZnO เมื่อคอมโพสิตมีปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์มากขึ้นพื้นผิวจะขรุขระมากขึ้น รูปแบบ XRD ของคอมโพสิตสามารถบ่งชี้ได้ถึงโครงสร้าง Wurtzite ZnO (JCPDS File No. 36-1451) และจะปรากฏฟีกของโครงสร้าง Face centered cubic ของซิลเวอร์ (JCPDS File No. 04-783) การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของคอมโพสิตจะถูกทดสอบกับ Rhodamine B ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และแสง Visible พบว่า ภายใต้แสง UV ประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงสามารถสรุปได้ดังนี้ $ZnO < Ag/ZnO-1 < Ag/ZnO-3 < Ag/ZnO-2$ ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นในตอนแรกและหลังจากนั้นจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณซิลเวอร์ ส่วนภายใต้แสง Visible ประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงสามารถสรุปได้ดังนี้ $ZnO < Ag/ZnO-1 < Ag/ZnO-2 < Ag/ZnO-3$ ซึ่งจะแตกต่างกับการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงภายใต้แสง UV หลังจากนั้นพวกเขาได้สันนิษฐานถึงปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ทำให้สีเกิดการ

เสื่อมสภาพนั้นเกิดจากชนิดของเรดิคอลลที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเช่น โฮล (Hole), ซุปเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเรดิคอลล ($\cdot O_2^-$) และไฮดรอกซิลเรดิคอลล ($\cdot OH$) พวกเขาได้ทดลองโดยการกำจัดเรดิคอลลแต่ละตัวในระหว่างการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ซึ่งพวกเขาสรุปว่าไฮดรอกซิลเรดิคอลลเป็นชนิดที่ว่องไวหลักและโฮลจะทำหน้าที่รองในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ Ag/ZnO-2 ภายใต้การฉายด้วยแสง UV และโฮลกับซุปเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเรดิคอลลจะเป็นชนิดที่ว่องไวหลักสำหรับ Ag/ZnO-3 ในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงภายใต้แสงสีขาว

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

A. Bhatia และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถผสมเข้าไปได้ในพอลิแลคติกแอซิดไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ถ้ามากกว่านี้จะเกิดการแยกเฟสขึ้นอย่างชัดเจน ความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสจะลดลงแต่ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือเกือบคงที่ตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แต่ที่อัตราส่วนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก เกือบมีค่าเป็นไปตามกฎการผสม ผลการศึกษาด้วย DSC แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะเกิดพิกจูดหลอมเหลวขึ้นสองพิก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด และผลการทดสอบอัตราการไหลปรากฏว่าที่ปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักจะมีความหนืดใกล้เคียงกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่ปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่ำกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

E. Hassan และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมจะสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ การสูญเสียน้ำหนักของพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก จะต่ำกว่าพอลิเมอร์ปกติ ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมพบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสจะมีค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แต่ในช่วงที่ปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก จะลดลงอย่างช้าๆ แต่ถ้ามีปริมาณมากกว่านี้จะเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการถ่ายโอนความเค้นในแต่ละเฟสของพอลิเมอร์

ทำได้ไม่ดี ส่วนร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของพอลิบิวทิลีน ซักซิเนตและจะมีพฤติกรรมการแตกหักเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการทดสอบจากแข็งเปราะของ พอลิแลคติกแอซิด ไปเป็นแตกหักแบบเหนียวและความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นตาม ปริมาณของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เพิ่มสูงขึ้น ที่ปริมาณของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตร้อยละ 60 โดย น้ำหนัก มีความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงขึ้นไปสองเท่าของพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารเติมแต่งในคอมโพสิตพอลิแลคติก แอซิด

J. Jayaramudu และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิด กับซิงค์ออกไซด์ (เกรดอุตสาหกรรม) เดิมในอัตราส่วนร้อยละ 0, 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนัก ด้วยวิธี Solution casting พบว่าในการเติมซิงค์ออกไซด์ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ลงในพอลิแลคติกแอซิดจะ ช่วยปรับปรุงความแข็งแรงและความเหนียวของฟิล์มได้พอสมควร มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้นไป ร้อยละ 20 จากฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์และร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดที่สูงถึงร้อยละ 181 ส่วน มอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณการเติมซิงค์ออกไซด์ ซึ่งความแข็งแรงของฟิล์มและความ เหนียวที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการกระจายตัวได้ดีของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ (มีลักษณะคล้ายปลาตา) ในเมทริกซ์พอลิแลคติกแอซิด แต่ในปริมาณการเติมซิงค์ออกไซด์ที่สูงขึ้นการกระจายตัวจะไม่ดีเกิด การเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ส่วนผลการทดสอบ Polarized optical microscope (POM) จะสามารถ สังเกตเห็นกลไกการเติบโตของผลึกสเฟียรูไลท์ในพอลิแลคติกแอซิดที่ปริมาณการเติมร้อยละ 2 โดย น้ำหนัก ซิงค์ออกไซด์จะทำให้ผลึกสเฟียรูไลท์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จึงสามารถสรุปได้ว่าสารตัว เติมซิงค์ออกไซด์สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้กับพอลิแลคติกแอซิดได้ จึงเป็นการช่วยยืนยัน สนับสนุนถึงสมบัติเชิงกลที่เพิ่มสูงขึ้น

R. Pantani และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับ ซิงค์ออกไซด์ (มีลักษณะเหมือนผงขนาดนาโน) โดยทำการเติมซิงค์ออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (ซิงค์ออกไซด์จะถูกปรับพื้นผิวด้วย Triethoxy caprylylsilane) ในการ ผสมจะใช้เครื่องอัลทริคแบบสกรูคู่และทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการอัลทริค ซึ่งสัณฐานวิทยาจะ แสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ดีในเมทริกซ์พอลิแลคติกแอซิดทั้งในปริมาณ

การเติมที่สูงก็ตาม เนื่องมาจากซิงค์ออกไซด์ถูกปรับพื้นผิวด้วยไซเลน ซึ่งพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์จะถูกปกคลุมด้วยหมู่ของไฮดรอกซี ซึ่งจะทำหน้าที่เป็น Compatibilizer ช่วยในการกระจายตัว ผลของ DSC แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g), อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และ อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักจากพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ แต่ร้อยละความเป็นผลึก (X_c) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของซิงค์ออกไซด์จากร้อยละ 6.6 เหลือ 2.8 เนื่องจากความเป็นผลึกที่ไม่ดีของพอลิแลคติกแอซิดและการปรับพื้นผิวด้วยไซเลนอาจส่งผลให้ปริมาณผลึกในเมทริกซ์พอลิแลคติกแอซิดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของ XRD ที่ปรากฏพีกกว้างที่ $2\theta = 17^\circ$ ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของออสเทนไนต์และเมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 1-3 จะทำให้เกิดความเป็นออสเทนไนต์เพิ่มมากขึ้น ส่วนผลการด้านเชื้อแบคทีเรียทั้งชนิดแกรมบวกและแกรมลบพบว่าฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับซิงค์ออกไซด์มีประสิทธิภาพด้านทานได้ตั้งแต่ต้องขึ้นอยู่กัเวลา (เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน) ส่วนสมบัติเชิงกลจะพบว่าเมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับพื้นผิวจะทำให้มีความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (มอดูลัส) ส่วนความเค้นจะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเติมในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 3 แต่ความเครียดจะลดต่ำลงตามปริมาณการเติมที่เพิ่มขึ้น

M. Murariu และคณะ [5] ได้ทำการศึกษานาโนซิงค์ออกไซด์ในการรีไซเคิลพอลิแลคติกแอซิดให้ได้ Lactide monomer โดยผ่านปฏิกิริยา Unzipping depolymerization และทำการศึกษาแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นฟิล์มและเส้นใยคอมโพสิต โดยศึกษาพอลิแลคติกแอซิดสองเกรด (เกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและต่ำ) และนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับพื้นผิวด้วย Triethoxy caprylylsilane เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการลดลงของน้ำหนักโมเลกุล สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของเมทริกซ์พอลิแลคติกแอซิด พบว่าการเติมนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ผ่านการปรับพื้นผิวจะทำให้สูญเสียสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล (ความต้านทานต่อแรงดึง) การลดลงของสมบัติดังกล่าวจะสอดคล้องกับปริมาณการเติมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสันนิษฐานได้ว่าเป็นการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลในพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งตรงข้ามกับนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการปรับพื้นผิวจะมีการกระจายในเมทริกซ์พอลิแลคติกแอซิด มีสมบัติเชิงกล (ความต้านทานต่อแรงดึง) และสมบัติทางความร้อนดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้มันยังสามารถป้องกันแสงยูวีได้ดีที่สุดในปริมาณการเติมต่ำๆ (ที่ร้อยละ 1) และผลการด้านจุลชีพจะทดสอบโดยใช้เส้นใยคอมโพสิต PLA/ZnO (ที่ผ่านการปรับพื้นผิว) มาถักเป็นผ้าแล้วทดสอบเทียบกับผ้าพอลิแลคติกแอซิด ผลปรากฏว่าผ้าพอลิแลคติกแอซิด

ให้ผลการทดสอบเป็นบวกกับแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) และ *Klebsiella pneumoniae* (*K.pneumoniae*) หมายความว่า จะปรากฏเชื้อแบคทีเรียอยู่ตลอดในระยะเวลาการบ่ม หรือไม่ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีนั่นเอง ส่วนผ้าคอมโพสิต PLA/ZnO จะให้ผลการทดสอบที่เป็นลบคือ สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้ทั้ง *S.aureus* และ *K.pneumoniae*

2.2 พลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) [12]

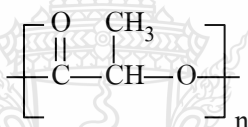
พลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพเป็นพลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดเฉพาะ ซึ่งจะก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการของพลาสติก สืบเนื่องมาจากสาเหตุที่น้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติที่เป็นแหล่งวัตถุดิบหลักในการผลิตพลาสติกเริ่มจะหมดไป อีกทั้งกระบวนการผลิตไม่เป็นผลดีต่อสภาพแวดล้อม ปัญหาการไม่แตกสลายของขยะพลาสติกหรือการกำจัดด้วยการเผาไหม้ อันก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกที่ทำให้โลกร้อนขึ้น ปัญหาทั้งหมดล้วนเป็นประเด็นสำคัญและต้องรีบดำเนินการแก้ไข จึงทำให้เกิดมีการคิดค้นพลาสติกที่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพขึ้นมา พลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพสามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดวัตถุดิบได้ 2 ประเภทคือ พลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (Petroleum-based biodegradable plastics) และพลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (Bio-based biodegradable plastics) ซึ่งในประเภทที่สองกำลังได้รับความนิยมสนใจอย่างมาก

สำหรับวงจรของพลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพนั้นจะเริ่มจากพืชผลทางการเกษตรที่สามารถปลูกทดแทนขึ้นใหม่ได้เช่น ข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง อ้อย หัวบีท ข้าวสาลี ข้าวไรย์ และปาล์ม ซึ่งจะถูกนำมาทำการเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลเพื่อนำไปผลิตเป็นมอนอเมอร์แล้วก็สังเคราะห์เป็นพลาสติกขึ้นมา เมื่อได้พลาสติกแล้วก็จะนำไปทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ จากนั้นเมื่อใช้งานเสร็จแล้วหรือหมดอายุการใช้งานแล้วก็สามารถนำไปทำให้แตกสลายได้ทางชีวภาพโดยการทิ้งในสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งจะมี 4 วิธีด้วยกันคือ 1) แบบที่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพด้วยเอนไซม์และแบคทีเรียในธรรมชาติ 2) แบบที่แตกสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันสามารถเกิดขึ้นได้เองโดยมีออกซิเจน ความร้อนและแสง UV เป็นตัวกระตุ้น 3) แบบที่แตกสลายด้วย

แสงมักจะเกิดจากการเติมสารที่ว่องไวต่อแสงลงในพลาสติก เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) และ 4) แบบที่แตกสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดจากการย่อยสลายของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ในโครงสร้างพลาสติก โดยมีทั้งแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) [8,9,12]

พอลิแลคติกแอซิดเป็นพลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพชนิดหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่มอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (Aliphatic polyester) สามารถสังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (Lactic acid) ที่มาจากการหมักพืชจำพวกที่มีแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพดและมันสำปะหลัง ซึ่งกรดแลคติกนี้จะถูกนำไปสังเคราะห์ต่อเป็นพอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดที่ได้มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.1

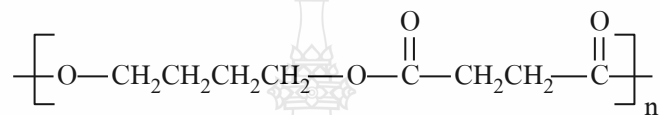


รูปที่ 2.1 สูตร โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด [12]

โดยทั่วไปพอลิแลคติกแอซิดจะมีลักษณะใส ไม่มีสี มีความแวววาวสูง มีความแข็ง สามารถทำการขึ้นรูปได้ง่าย สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภท เช่น ด้านการแพทย์ ด้านการเกษตร ด้านบรรจุภัณฑ์ เส้นใย อิเล็กทรอนิกส์และอื่นๆ ถึงแม้พอลิแลคติกแอซิดจะมีสมบัติที่ดีหลายประการ แต่ก็มีข้อเสียคือ สมบัติด้านความโค้งงอ (Flexural properties) การอ่อนตัวเนื่องจากความร้อน (Heat distortion temperature, HDT) การซึมผ่านของแก๊ส (Gas permeability) ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) และส่งผลให้ไม่สามารถนำไปใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ เพราะฉะนั้นจึงมีการศึกษามากมายเพื่อเพิ่มสมบัติด้านความโค้งงอ เพิ่มความต้านทานต่อแรงกระแทกหรือช่วยลดต้นทุนในกระบวนการผลิต

2.4 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) [8,9,12]

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตก็เป็นพลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพที่จัดอยู่ในกลุ่มอะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ (Aliphatic polyester) เช่นเดียวกับพอลิแลคติกแอซิด สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างกรดซัคซินิกกับ 1, 4-บิวเทนไดออลโดยมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตนี้สามารถเตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมีและผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบธรรมชาติ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ได้จะมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.2



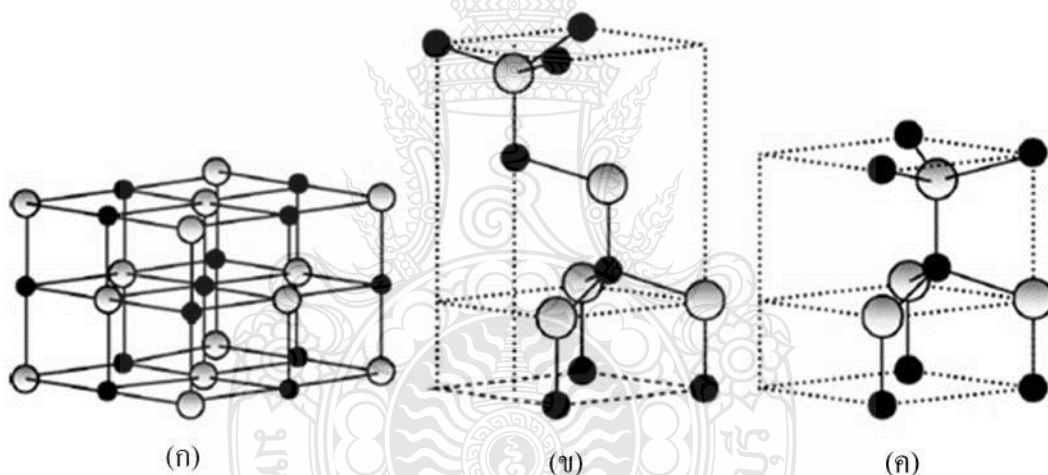
รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [12]

โดยทั่วไปพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะมีสีขาว มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด แต่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ต่ำมาก จึงมีความยืดหยุ่นมากกว่าพอลิแลคติกแอซิด สามารถนำไปใช้งานแทนที่พวกพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate) หรือพอลิโพรพิลีน (Polypropylene) และนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภท เช่น ด้านการแพทย์ บรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องเคมีการเกษตรและอื่นๆ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีสมบัติเด่นคือมีความยืดหยุ่นสูง (High flexibility) มีความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ดีและมีความต้านทานต่อความร้อนและสารเคมีที่ดี พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจึงเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดที่จะนำมาผสมกับพอลิแลคติกแอซิด

2.5 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) [3,5,11,13,14]

ซิงค์ออกไซด์หรือที่รู้จักกันในนาม คาลาไมล์ เป็นธาตุธรรมชาติจากสินแร่สมิทโซไนต์ (Smithsonite) การใช้ซิงค์ออกไซด์ในการทำเป็นยารักษาโรคนั้นมีมาตั้งแต่ยุคอียิปต์โบราณ ลักษณะของซิงค์ออกไซด์เป็นผงละเอียดสีขาว ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและใช้เป็นสารเติมแต่งอนินทรีย์สำหรับพอลิเมอร์ต่างๆ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานกว้าง และยังสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

สารประกอบซิงค์ออกไซด์จะมีโครงสร้างผลึกแบบ Rocksalt, Zinc blend และ Wurtzite ดังรูปที่ 2.3 (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ โดยที่วงกลมสีเทาและสีดำจะแทนอะตอมของ Zn และ O ตามลำดับ โครงสร้างที่สำคัญคือแบบ Wurtzite ดังรูปที่ 2.3 (ค) จะเห็นว่าอะตอมของซิงค์ออกไซด์ จะถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจน ทั้งหมด 4 อะตอมและในขณะเดียวกันอะตอมของออกซิเจน ก็ถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของซิงค์ออกไซด์ 4 อะตอมเช่นเดียวกันหรือเป็นแบบ Hexagonal จึงนิยมเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า Hexagonal wurtzite ซึ่งการยืดเกาะแบบนี้จะทำให้เกิดสมมาตรแบบชั่วคราวตามแนวแกนของ Hexagonal และจะส่งผลให้เกิดสมบัติต่างๆ ของซิงค์ออกไซด์ เช่นความเป็นเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) และการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarization) ขึ้นและเป็นปัจจัยสำคัญในการบ่งบอกถึงการเติบโตของผลึก



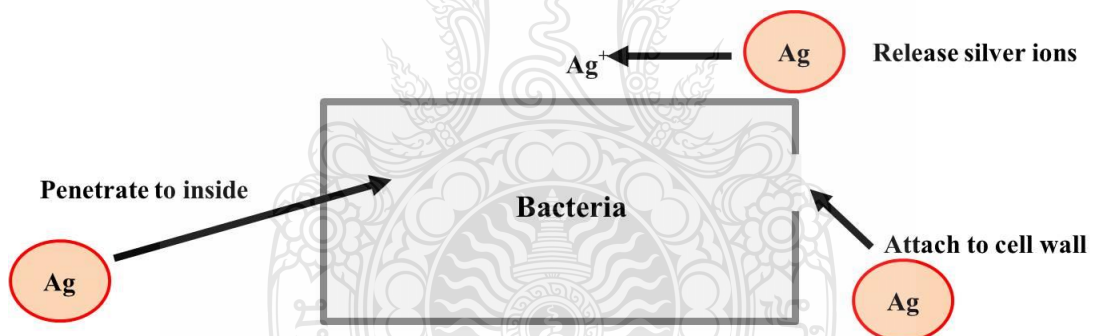
รูปที่ 2.3 รูปแบบโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ [14]

2.6 นาโนซิลเวอร์ (Nano-silver) [15,16]

อนุภาคนาโนซิลเวอร์คือโลหะเงินหรือสารประกอบเงินที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร การสังเคราะห์นาโนซิลเวอร์ทำได้โดยการรีดิวซ์ไอออนของเงินให้กลายเป็นโลหะเงิน ซึ่งนาโนซิลเวอร์มีสมบัติพิเศษอย่างหนึ่งคือสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและจุลินทรีย์ต่างๆ ได้ และโลหะเงินนั้นจะมีอิเล็กตรอนวงนอกสุดเพียงตัวเดียวเท่านั้น จึงทำให้เกิดประจุบวก (Ag^+) ไปได้ ซึ่งในปัจจุบัน

สามารถพบได้มากขึ้นในผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคต่างๆ เช่นการบรรจุหีบห่ออาหาร สิ่งทอที่ต้านทานการเกิดกลิ่น อุปกรณ์ที่ใช้ในบ้าน อุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น

โดยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สามารถสังเคราะห์ได้นั้นจะมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 25 นาโนเมตร หรือประมาณ 1 ใน 1,000 ของขนาดเซลล์ของแบคทีเรีย ซึ่งกลไกการทำงานของอนุภาคนาโนซิลเวอร์คือ เมื่ออนุภาคนาโนซิลเวอร์สัมผัสกับผนังเซลล์จะสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเซลล์ของแบคทีเรียหรือเชื้อราได้ จากนั้นอนุภาคนาโนซิลเวอร์ซึ่งมีสมบัติเป็นกรดอ่อนจะเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลที่เป็นเบสอ่อนภายในเซลล์ ซึ่งก็คือหมู่ที่เรียกว่าซัลไฟดริล (Sulphydryl group; -SH) ของเอนไซม์โปรตีนเนส (Proteinase) ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับเมตาบอลิซึมของเซลล์โดยหมู่ซัลไฟดริลที่มีอะตอมของซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบจะจับตัวกับอนุภาคของเงิน ทำให้กระบวนการทำงานของเอนไซม์หยุดการทำงานจนกระทั่งเซลล์ของแบคทีเรียหยุดการเจริญเติบโตและเสื่อมสภาพไปในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กลไกการฆ่าเชื้อแบคทีเรียเมื่อใช้อนุภาคนาโนซิลเวอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [17]

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ M. Guzman และคณะ [17] ได้อธิบายกลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ไว้ 3 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นที่หนึ่งอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะไปสัมผัสกับผนังเซลล์หรือเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งจะไปรบกวนการแพร่ผ่าน (Permeability) และการหายใจ (Respiration) ของเซลล์ โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ยิ่งมีขนาดเล็กมากก็จะสามารถเข้าไปเกาะและส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียได้มากกว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีขนาดใหญ่ ขั้นที่สองอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเซลล์ของแบคทีเรียหรือเชื้อราได้ โดยอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะไปเกาะกับฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์ซึ่งเป็นส่วนประกอบของ DNA จะส่งผลให้เอนไซม์ไม่สามารถ

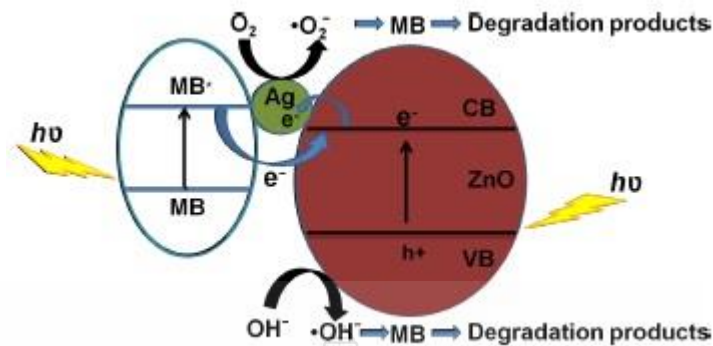
ทำงานได้และทำให้เซลล์ตายในที่สุด และในขั้นที่สามอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะปล่อยไอออนของเงินออกมาและจะเกิดปฏิกิริยากับ DNA และยังเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนต่างๆ ที่อยู่ในไซโทพลาสซึม และกรดนิวคลีอิก

2.7 การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic) [18,19,20]

การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นกระบวนการที่อนุภาคของสารจะมีส่วนในการทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยที่ตัวของมันเองจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ และเรียกสารที่เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีนี้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalyst) หรือคือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงไปกระตุ้นสารที่เปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยที่ไม่เกี่ยวข้องกับตัวมันเอง

สารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานอยู่ 2 แถบคือแถบเวเลนซ์และแถบการนำ โดยจะมีแถบช่องว่างพลังงานกั้นอยู่ในระหว่างแถบพลังงานทั้งสอง ส่วนใหญ่กระบวนการเร่งปฏิกิริยาจะเกิดจากสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานที่สูงกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน อิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ จะถูกกระตุ้นไปยังแถบการนำและทิ้งช่องว่างอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ไว้เรียกว่าโฮล (Hole) ซึ่งมีประจุบวก ส่วนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำ จะมีประจุลบและมันสามารถกลับมารวมตัวกันใหม่หรืออยู่ในสถานะเดิมได้เรียกว่า Recombination โดยการทำนี้จะทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ดีจะต้องลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล การที่สารกึ่งตัวนำมีแถบช่องว่างพลังงานกั้นอยู่ระหว่างแถบพลังงาน 2 แถบทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นและ โฮลมีระยะเวลาเพียงพอที่จะเคลื่อนไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยา เมื่อทำการกระตุ้นด้วยการฉายแสงไปยังสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิงค์ออกไซด์จะก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) และประจุลบของซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (Superoxide anion) ซึ่งเรดิคัลพวกนี้เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง สามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งชีวเคมีของแบคทีเรียและเซลล์ที่ติดเชื้อไวรัสหรือจะทำให้สารประกอบอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในที่สุด

โดยทั่วไปการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยการเสื่อมสภาพของสีย้อมก็คือกระบวนการ Oxidative แต่อย่างไรก็ตามการใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพียงอย่างเดียวก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ ดังนั้นหลายๆ งานวิจัยจึงได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ด้วยอนุภาคนาโน โลหะชนิดต่างๆ ซึ่งจะส่งเสริมประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยอนุภาคนาโนโลหะจะช่วยลดอัตราการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งในงานวิจัยของ S. Kuriakose และคณะ [3] ได้อธิบายกลไกการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงภายใต้การเสริมด้วยโครงสร้างนาโนซิลเวอร์บนพื้นผิวซิงค์ออกไซด์ไปยังการเสื่อมสภาพของสีย้อม Methylene blue ซึ่งพบว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์ช่วยในการขยายการดูดกลืนแสงของซิงค์ออกไซด์จากใกล้ UV ไปถึงขอบเขตของแสงสีขาว เมื่อซิงค์ออกไซด์ทำการดูดกลืนโฟตอนของพลังงานที่ใหญ่กว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงานของมัน การเคลื่อนอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำ ทำให้เกิดจำนวนของโฮลในแถบเวเลนซ์เท่ากันตั้งแต่ระดับพลังงานในแถบการนำของซิงค์ออกไซด์ที่สูงกว่าระดับพลังงาน Fermi ของ Ag/ZnO โดยเริ่มจากอิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากโครงสร้างซิงค์ออกไซด์ไปยังอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ส่งผลให้เกิดการ Photogenerate ที่ต่ำลงเนื่องจากเกิดการขัดขวางการรวมตัวกันใหม่ระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล นอกจากนี้รังสีจากแสงแดดจะกระตุ้นการดูดกลืนโมเลกุลของสีย้อมไปยังโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์การกระตุ้นด้วยแสงจะถ่ายโอนอิเล็กตรอนของโมเลกุลของสีย้อมไปยังแถบการนำของซิงค์ออกไซด์ โดยอิเล็กตรอนจะแสดงผลกระทบต่อโมเลกุลของออกซิเจนไปเป็นรูปแบบซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเรดิคัล ขณะที่โฮลจะแสดงผลกระทบต่อ H_2O นำไปสู่รูปแบบของไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งเรดิคัลทั้งสองชนิดนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของสีย้อม Methylene blue ปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กลไกการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ที่มีต่อสีย้อม Methylene blue (MB) [3]

2.8 แบคทีเรีย (Bacteria) [21]

แบคทีเรียเป็นจุลชีพที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์และสัตว์มากที่สุดชนิดหนึ่ง แบคทีเรียทั่วไปจะมีองค์ประกอบที่สำคัญได้แก่ ผนังเซลล์ (Cell wall), เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane), ไซโตพลาสซึม (Cytoplasm), โครโมโซม (Chromosome) และไรโบโซม (Ribosome) ซึ่งแบคทีเรียจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ โดยแบคทีเรียแกรมบวกจะมีผนังเซลล์ ที่ประกอบด้วยเปปทิโดไกลแคน (Peptidoglycan) ที่หนาประมาณ 30 นาโนเมตร ในขณะที่แบคทีเรียแกรมลบจะมีชั้นของเปปทิโดไกลแคนหนาเพียง 2-3 นาโนเมตร และมีเยื่อหุ้มชั้นนอกหุ้มอยู่ด้านนอกอีกชั้นหนึ่ง เนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบเป็นพวกที่สามารถเติบโตในช่วงอุณหภูมิของร่างกายได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมบวก ดังนั้นแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคในคนจึงมักเป็นแบคทีเรียแกรมลบ

ปัจจัยที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียก็คืออุณหภูมิ โดยแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 25-40 องศาเซลเซียส แบคทีเรียแต่ละชนิดมีความต้องการออกซิเจนที่ไม่เหมือนกัน บางชนิดอาจต้องการออกซิเจนแต่บางชนิดอาจไม่ต้องการออกซิเจนก็ได้ โดยออกซิเจนจะใช้ในกระบวนการหายใจระดับเซลล์ และความเป็นกรดต่างของสภาพแวดล้อมก็มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งแบคทีเรียส่วนใหญ่เจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 6-8 ซึ่งกลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้นดังรูปที่ 2.5

แบคทีเรียและเชื้อราที่ก่อให้เกิดโรคต่างๆ ในชีวิตประจำวัน เช่น *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) เป็นแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ, *Bacillus subtilis* (*B.subtilis*) เป็นแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียของอาหาร, *Escherichia coli* (*E.coli*) เป็นแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคอุจจาระร่วง, *Pseudomonas aeruginosa* (*P.aeruginosa*) เป็นแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดการติดเชื้อได้ในหลายๆ ส่วนของร่างกาย และ *Candida albicans* (*C.albicans*) เป็นเชื้อราที่ก่อให้เกิดฝ้าขาวในปากของเด็กและทำให้เกิดอาการอักเสบในบริเวณช่องคลอดของสตรี



บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเพิ่มสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสมบัติการต้านจุลชีพของซิงค์ออกไซด์ด้วยนาโนซิลเวอร์และใช้เป็นสารเติมแต่งในแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุ

3.1.1.1 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) 2003D grade ผลิตโดยบริษัท Nature[®] Work LLC

3.1.1.2 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) AZ71TN grade ผลิตโดยบริษัท Mitsubishi Chemical Co., Ltd.

3.1.1.3 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) Commercial grade ผลิตโดยบริษัท Global Chemical Co., Ltd. (Thailand) และ Nano-size grade ผลิตโดยบริษัท Nanoscience Technology Co., Ltd. (Thailand)

3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate, AgNO₃) Analytical reagent grade ผลิตโดยบริษัท Turupati Industries (India)

3.1.2.2 สารรีควิวซ์ (Benzoxazine) สังกะราห์โดยกลุ่มวิจัยของ รศ.ดร.อภิรัตน์ เลาห์บุตรี ซึ่งจดอนุสิทธิบัตรเลขที่ 9717

3.1.2.3 ไดคลอโรมีเทน (CH₂Cl₂) Commercial grade ผลิตโดยบริษัท Ajax (Australia)

3.1.2.4 สีย้อม Edicol tartrazine ผลิตโดยบริษัท East Asiatic Company (Thailand)

3.1.3 เครื่องมือ

3.1.3.1 บีกเกอร์ (Beaker)

3.1.3.2 แท่งแม่เหล็กกวน (Magnetic bar)

3.1.3.3 เครื่องกวนสารละลายด้วยแรงแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)

3.1.3.4 หลอดเซนตริฟิวก์ (Centrifuge tube)

3.1.3.5 ตู้อบ ยี่ห้อ Memmert รุ่น UF110

3.1.3.6 เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มแบบสกรูคู่ (Cast film twin screws extruder) ยี่ห้อ CHAREON รุ่น CTE-D20L800

3.1.3.7 เครื่องวัดอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt flow index, MFI) ยี่ห้อ CEAST รุ่น TELEX 220147

3.1.3.8 เครื่องทดสอบแรงดึงมาตรฐาน (Universal testing machine) ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น Model H 50 KS

3.1.3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510

3.1.3.10 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) ยี่ห้อ PANalytical รุ่น X'Pert PRO

3.1.3.11 เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometer, XRF) ยี่ห้อ Horiba รุ่น XGT-520

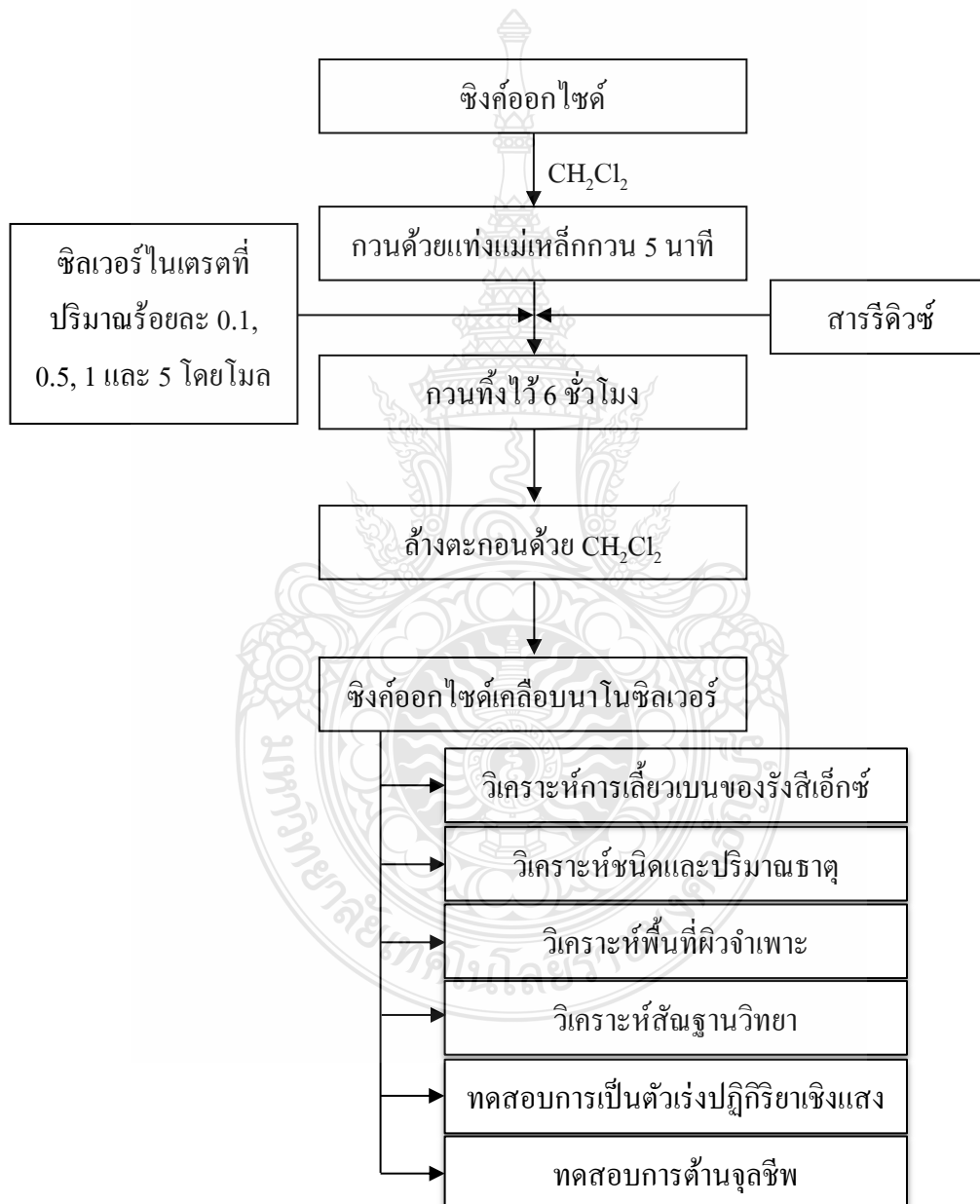
3.1.3.12 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter; DSC) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น DSC1

3.1.3.13 เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-PharmaSpec 1700

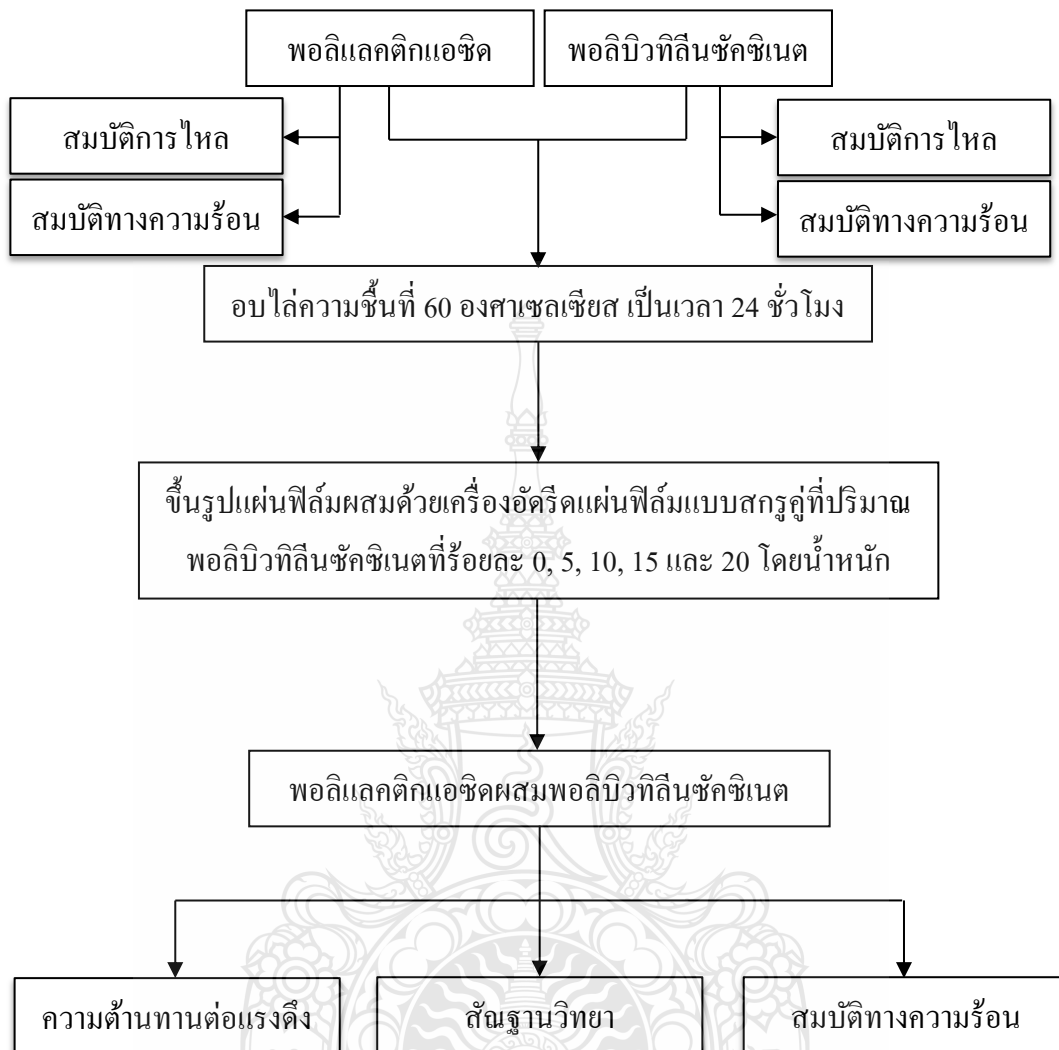
3.1.3.14 เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) ยี่ห้อ Quantachrome รุ่น Autosorb 1 MP

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

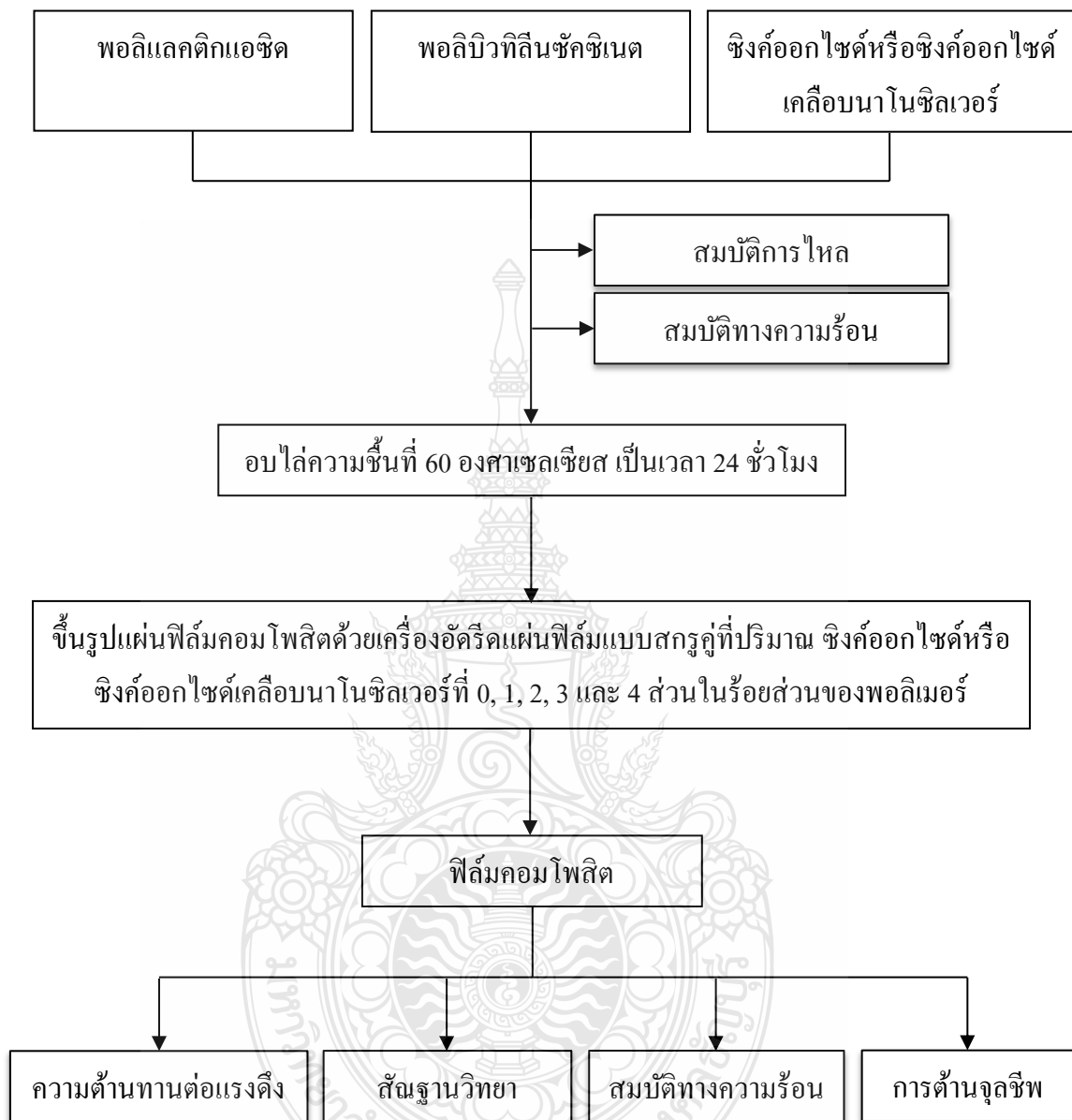
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) การเตรียมซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ (Ag/ZnO), 2) การเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิবিวทิลินซัคซิเนต (PLA/PBS) และ 3) การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิต ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียม Ag/ZnO



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฟิล์ม PLA/PBS



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิต

3.3 การเตรียมซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์

ก่อนที่จะทำการเตรียม Ag/ZnO นั้น จะต้องทำการสังเคราะห์สารรีดิวซ์ก่อน ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้จะสังเคราะห์ตามสิทธิบัตรคุ้มครองที่จดโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ตามจดอนุสิทธิบัตรเลขที่ 9717 วันที่ประกาศโฆษณา 27 มีนาคม 2558 โดยมีรองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี เป็นหัวหน้าโครงการวิจัย หลังจากที่ได้สังเคราะห์สารรีดิวซ์ได้แล้วก็จะนำไปใช้ในการสังเคราะห์ต่อไป

ผสมซิงค์ออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (Commercial grade ในที่นี้จะใช้ตัวย่อว่า Com-ZnO) ปริมาณ 50 กรัม กับไดคลอโรมีเทนปริมาตร 200 มิลลิลิตร นำไปกวนอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องให้ความร้อน จากนั้นเติมสารรีดิวซ์ตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม Ag/ZnO

ร้อยละของนาโนซิลเวอร์ โดยโมล	ซิงค์ออกไซด์ (กรัม) (เกรดอุตสาหกรรมและนาโน)	ซิลเวอร์ไนเตรต (กรัม)	สารรีดิวซ์ (กรัม)
0.1	50	0.0787	0.0787
0.5	50	0.3930	0.3930
1	50	0.7870	0.7870
5	50	3.9350	3.9350

ทำการเติมซิลเวอร์ไนเตรตตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1 ทำการกวนสารผสมต่อไปอีก 6 ชั่วโมง จากนั้นทำการล้างสารรีดิวซ์ออกจากของผสมที่สังเคราะห์ได้ ด้วยไดคลอโรมีเทน แล้วทำการกรองซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ นำสารที่ผ่านการกรองไปอบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนซิงค์ออกไซด์เป็นชนิดอนุภาคนาโน (Nano-zinc oxide ในที่นี้จะใช้ตัวย่อว่า Nano-ZnO)

3.4 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ที่เตรียมได้

3.4.1 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ ZnO และ Ag/ZnO ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยปรับตั้งความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้า 30 มิลลิแอมแปร์ ทำการบันทึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในช่วงมุม 2Theta ตั้งแต่ 10 ถึง 80 องศา และใช้ความเร็วในการทดสอบเป็น 0.02 องศาต่อวินาที หลังจากนั้นจะทำการคำนวณขนาดผลึกโดยใช้สมการของ Scherrer equation ดังสมการที่ 3.1

$$D_{\text{XRD}} = 0.94\lambda/\beta \cos \theta \quad (3.1)$$

เมื่อ D_{XRD} = ขนาดผลึก (Å)
 λ = ค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (nm)
 β = ความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงสุดของกราฟ
หรือ Full width half maximum (FWHM)
 θ = มุมของแบรกก (Bragg's angle)

3.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและวิเคราะห์ปริมาณธาตุของ ZnO และ Ag/ZnO จะทำการวิเคราะห์โดยเตรียมผงตัวอย่างใส่ในภาชนะกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร อัดให้แน่นแล้วทำการทดสอบ โดยใช้ความต่างศักย์ในหลอดเอ็กซ์เรย์ (X-ray tube) 50 กิโลโวลต์ และใช้กระแสไฟฟ้า 1 มิลลิแอมแปร์

3.4.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ยด้วยเครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค BET ของ ZnO และ Ag/ZnO โดยนำตัวอย่างที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการชั่งตัวอย่างให้มีน้ำหนักอยู่ในช่วงประมาณ 1 กรัม แล้วทำการบรรจุลงในหลอดตัวอย่าง ทำการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) โดยเริ่มจากการไล่แก๊สที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นใช้แก๊ส

ไนโตรเจนเป็นตัวดูดซับซึ่งใช้พื้นที่ในการดูดซับ (Absorption) และการคาย (Desorption) ของแก๊สไนโตรเจนทั้งหมด หลังจากนั้นจะทำการคำนวณขนาดอนุภาคเฉลี่ยโดยใช้สมการที่ 3.2

$$D_{\text{BET}} = 6 \times 10^3 / d_{\text{th}} S_{\text{BET}} \quad (3.2)$$

เมื่อ D_{BET} = ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (nm)

S_{BET} = พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)

d_{th} = ความหนาแน่นทางทฤษฎีของวัสดุ (g/cm^3)

โดยที่ $d_{\text{Com-ZnO}} = 5.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ (US Research Nanomaterials, Inc. SAFTY DATA SHEET 2015)

$d_{\text{Nano-ZnO}} = 5.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ (US Research Nanomaterials, Inc. SAFTY DATA SHEET 2015)

3.4.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของ ZnO และ Ag/ZnO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยเริ่มจากการเคลือบทองลงบนสารตัวอย่าง โดยถ่ายภาพที่กำลังขยาย 30,000 เท่า ใช้ศักย์ไฟฟ้าในการเร่งความเร็วของอิเล็กตรอน (Accelerating voltage) 13 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับเลนส์ (Working distance) 10 มิลลิเมตร และเปิดขนาดรูรับแสง (Aperture size) ที่ 20 ไมโครเมตร

3.4.5 การทดสอบสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ ZnO และ Ag/ZnO โดยใช้สารละลาย Edicol tartrazine เป็นสีย้อมในการทดสอบ สารตัวอย่างจะถูกชั่งในปริมาณ 0.10 กรัม แล้วนำไปใส่ในภาชนะที่มีสารละลาย Edicol tartrazine ความเข้มข้น 10 ppm บรรจุอยู่ประมาณ 30 มิลลิลิตร นำไปฉายแสงยูวี ทำการดูดสารสีย้อมทุกๆ 15 นาที ด้วยหลอดจี้ดยาแล้วนำไปเติมในหลอดเซ็นตริฟิวก์ และนำไปวิเคราะห์การย่อยสลายของสีย้อมด้วยเครื่องยูวีวิทีเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 427 นาโนเมตร และใช้น้ำกลั่นเป็นสารพื้น (Blank) ในการวิเคราะห์

3.4.6 การทดสอบสมบัติการต้านจุลชีพของ ZnO และ Ag/ZnO ทำการทดสอบด้วยวิธี Agar disc diffusion เชื้อจุลินทรีย์ที่เราเลือกใช้มี 3 ชนิดคือแบคทีเรียชนิดแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) และ *Bacillus subtilis* (*B.subtilis*), แบคทีเรียชนิดแกรมลบ *Escherichia coli*

(*E.coli*) และ *Pseudomonas aeruginosa* (*P.aeruginosa*) และเชื้อรา *Candida albicans* (*C.albicans*) โดยจะเริ่มจากเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ที่ต้องการทดสอบทุกชนิดให้ได้ความเข้มข้นของเชื้อมีความเข้มข้นใกล้เคียงกับ McFarland No. 0.5 จากนั้นทำการกระจายเชื้อให้ทั่วบนอาหาร Plate แล้ววาง Disc ที่ใส่ ZnO และ Ag/ZnO เพื่อใช้เปรียบเทียบกัน จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สำหรับเชื้อแบคทีเรีย ส่วนเชื้อราให้บ่มเชื้อที่ 30 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อ่านผลโดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนใส (Inhibition zone) ที่เกิดขึ้น

3.5 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของวัสดุพิมพ์

3.5.1 การวิเคราะห์อัตราการไหลของ PLA, PBS และ PLA/PBS ในปริมาณต่างๆ ก่อนที่จะทำการขึ้นรูปฟิล์ม ด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ตามมาตรฐาน ASTM D1238 โดยใช้แท่งน้ำหนักกดพอลิเมอร์หลอมเหลวที่อยู่ภายในกระบอกทดสอบ พอลิเมอร์หลอมเหลวจะไหลผ่านหัวคายออกมา จากนั้นก็นำพอลิเมอร์ที่ไหลออกมาไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณตามสมการที่ 3.3 จะได้อัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt flow index, MFI) ซึ่งมีหน่วยเป็น กรัมต่อ 10 นาที ในการทดสอบจะใช้อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 2,160 กรัม และใช้เวลาในการตัดต่อขึ้น 5 วินาที

$$MFI = m \times 600/t \quad (3.3)$$

เมื่อ MFI = อัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (g/ 10 min)
 m = น้ำหนักชิ้นงานเฉลี่ย (g)
 t = เวลาที่ใช้ตัดชิ้นงาน (s)

3.5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของ PLA และ PBS ด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ โดยเริ่มจากบรรจุชิ้นตัวอย่างทดสอบประมาณ 8-10 มิลลิกรัม ใน Aluminium pan ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที หลังจากนั้นจะทำการคำนวณร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity, X_c) โดยใช้สมการที่ 3.4

$$\%Crystallinity (X_c) = (\Delta H_m - \Delta H_c / \Delta H_f) \times 100\% / W \quad (3.4)$$

เมื่อ ΔH_m = ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก (J/g)
 ΔH_c = ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการตกผลึก (J/g)
 ΔH_f = ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกสำหรับพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึก 100% ซึ่ง PLA มีค่าเท่ากับ 93.6 J/g, PBS มีค่าเท่ากับ 110.3 J/g
W = สัดส่วนของพอลิเมอร์ผสม

3.6 การเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

เริ่มจากนำเม็ด PLA กับ PBS มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการผสมเบื้องต้นก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยการผสม PLA กับ PBS จะทำการผสมตามสัดส่วนดังตารางที่ 3.2 จากนั้นจะนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มแบบสกรูคู่ โดยจะตั้งอุณหภูมิจากส่วนการป้อน (Feed zone) ไปจนถึงดาบ (Die) และสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มดังตารางที่ 3.3 จากนั้นจะนำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนการผสมแผ่นฟิล์ม PLA/PBS

ชื่อตัวอย่าง	สัดส่วนการผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	PLA	PBS
PLA100	100	0
PLA95	95	5
PLA90	90	10
PLA85	85	15
PLA80	80	20

ตารางที่ 3.3 สภาพะในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)						ความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที)	ความเร็วชุดม้วนฟิล์ม (รอบต่อนาที)	
โซน 1	โซน 2	โซน 3	โซน 4	โซน 5	คาย	ชุดดึง 1	ชุดดึง 2	
150	160	170	180	190	180	60	9	8

3.7 การศึกษาสมบัติของแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

3.7.1 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยจะเตรียมตัวอย่างชิ้นงานเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 20 มิลลิเมตร ยาวไม่น้อยกว่า 50 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วในการดึง (Crosshead of speed) 50 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างของตัวจับชิ้นงาน (Gauge length) 100 มิลลิเมตร

3.7.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการแตกหักของแผ่นฟิล์ม ชิ้นงานจะถูกเตรียมได้หลังจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ก่อนที่จะทำการทดสอบจะต้องนำชิ้นงานที่เตรียมได้เคลือบด้วยทองเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า โดยถ่ายภาพที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ใช้ศักย์ไฟฟ้าในการเร่งความเร็วของอิเล็กตรอน 5 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับเลนส์ 15 มิลลิเมตร

3.7.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ โดยเริ่มจากบรรจุแผ่นฟิล์มตัวอย่างประมาณ 8-10 มิลลิกรัม ใน Aluminium pan

ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที หลังจากนั้นจะทำการคำนวณร้อยละความเป็นผลึกโดยใช้สมการที่ 3.4

3.8 การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนต กับซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์

การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS กับ ZnO หรือ Ag/ZnO โดยจะเลือกใช้ อัตราส่วน PLA/PBS ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.6 มาทำการผสมกับ ZnO หรือ Ag/ZnO ใน อัตราส่วนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3 โดยจะเริ่มจากนำส่วนผสมทั้งหมดมาอบไล่ความชื้นที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มคอมโพสิตโดยใช้สัดส่วน การผสม ZnO หรือ Ag/ZnO ดังตารางที่ 3.4 ด้วย โดยตั้งอุณหภูมิจากการป้อนไปจนถึงคายและ สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มดังตารางที่ 3.3 จากนั้นจะนำแผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่ได้ไปทดสอบ สมบัติต่างๆ

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนการผสมแผ่นฟิล์มคอมโพสิต PLA90 กับ ZnO หรือ Ag/ZnO

ตัวอย่าง	สัดส่วนการผสม (ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์)	
	ZnO	Ag/ZnO
PLA90	-	-
PLA90-Com-ZnO-1	1	-
PLA90-Com-ZnO-2	2	-
PLA90-Com-ZnO-3	3	-
PLA90-Com-ZnO-4	4	-
PLA90-5%Ag/Com-ZnO-1	-	1
PLA90-5%Ag/Com-ZnO-2	-	2
PLA90-5%Ag/Com-ZnO-3	-	3
PLA90-5%Ag/Com-ZnO-4	-	4

3.9 การศึกษาสมบัติของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีน ซักซิเนตกับซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์

3.9.1 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยจะเตรียมตัวอย่างชิ้นงานเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 20 มิลลิเมตร ยาวไม่น้อยกว่า 50 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วในการดึง (Crosshead of speed) 50 มิลลิเมตรต่อ นาที ระยะห่างของตัวจับชิ้นงาน (Gauge length) 100 มิลลิเมตร

3.9.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการแตกหักของฟิล์ม ชิ้นงานจะถูกเตรียมได้หลังจากการทดสอบความต้านทานแรงดึง ก่อนที่จะทำการทดสอบจะต้องนำชิ้นงานที่เตรียมได้เคลือบด้วยทอง เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า โดยถ่ายภาพที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ใช้ศักย์ไฟฟ้าในการเร่งความเร็วของอิเล็กตรอน 5 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับเลนส์ 15 มิลลิเมตร

3.9.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ โดยเริ่มจากจะบรรจุแผ่นฟิล์มตัวอย่างประมาณ 8-10 มิลลิกรัม ใน Aluminium pan ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที หลังจากนั้นจะทำการคำนวณร้อยละความเป็นผลึกโดยใช้สมการที่ 3.4

3.9.4 การทดสอบสมบัติการต้านจุลชีพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต โดยจะทำการเลือกแผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่มีสมบัติที่เหมาะสมมาทำการทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z2801 เริ่มจากวางแผ่นฟิล์มขนาด 5x5 ตารางเซนติเมตรลงบนจานเพาะเชื้อ แล้วหยดเชื้อจุลินทรีย์ที่ต้องการทดสอบลงบนแผ่นฟิล์ม จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบได้แก่ *E.coli*, *S.aureus* และ *P. aeruginosa* ทำการวิเคราะห์ผลโดยคำนวณร้อยละการลดลงของเชื้อแบคทีเรียดังสมการที่ 3.5

$$R = ((B-A) \times 100)/A \quad (3.5)$$

- เมื่อ R = ร้อยละการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย
A = Log CFU/ml ของหัวเชื้อแบคทีเรียบนพื้นผิวสารตัวอย่างหลังจาก 24 ชั่วโมง
B = Log CFU/ml ของหัวเชื้อแบคทีเรียภายในขวดเริ่มต้น

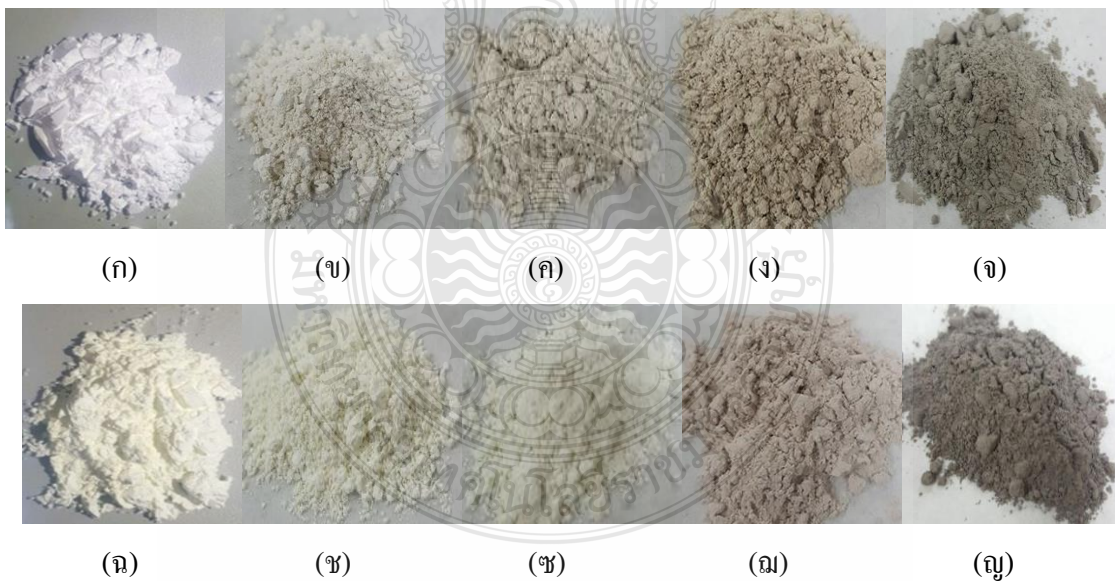


บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการเตรียมซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์

ลักษณะทางกายภาพของผง ZnO ทั้ง 2 ชนิดนั้นคือซิงค์ออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (Com-ZnO) และเกรดอนุภาคนาโน (Nano-ZnO) ไม่มีกลิ่นและมีลักษณะเป็นผงละเอียด สำหรับ Com-ZnO (รูปที่ 4.1(ก)) มีสีขาว แต่ Nano-ZnO (รูปที่ 4.1 (ฉ)) มีสีเหลืองอ่อน เมื่อผ่านการเคลือบด้วยนาโนซิลเวอร์ (Ag/ZnO) โดยการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารรีดิวซ์กับซิลเวอร์ไนเตรต พบว่า สีของซิงค์ออกไซด์เกรดอุตสาหกรรมเคลือบนาโนซิลเวอร์ (Ag/Com-ZnO) รูปที่ 4.1(ข-จ) และซิงค์ออกไซด์เกรดอนุภาคนาโนเคลือบนาโนซิลเวอร์ (Ag/Nano-ZnO) รูปที่ 4.1(ข-ญ) จะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง สีนํ้าตาลอ่อน และเป็นสีเทา เมื่อปริมาณของนาโนซิลเวอร์ที่เคลือบบนผิวมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น



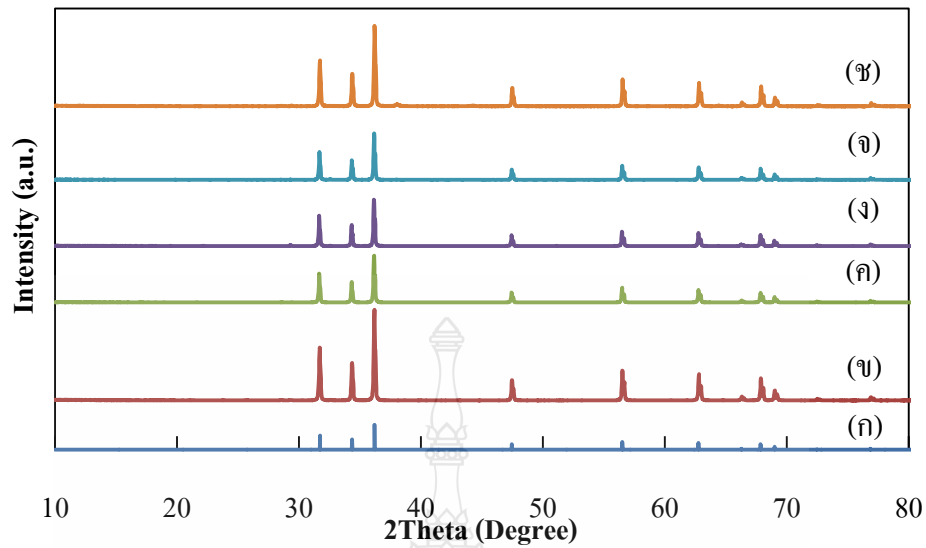
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) Com-ZnO กับ Ag/Com-ZnO ที่ปริมาณนาโนซิลเวอร์ร้อยละ (ข) 0.1 (ค) 0.5 (ง) 1 (จ) 5 โดยโมล และลักษณะทางกายภาพของ (ฉ) Nano-ZnO กับ Ag/Nano-ZnO ที่ปริมาณนาโนซิลเวอร์ร้อยละ (ช) 0.1 (ฅ) 0.5 (ฉ) 1 และ (ญ) 5 โดยโมล

4.2 ผลการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์ที่เตรียมได้

4.2.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เมื่อนำผง ZnO ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สำหรับ Com-ZnO จะพบพีคการเลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่ตำแหน่งมุม 2Theta ที่ 31.71, 34.37, 36.19, 47.51, 56.53, 62.81, 66.33, 67.89, 69.03, 72.75, 76.91, 81.35 และ 89.57 องศา ตามลำดับ (รูปที่ 4.2 (ข)) และ สำหรับ Nano-ZnO จะพบพีคการเลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่ตำแหน่งมุม 2Theta ที่ 31.71, 34.39, 36.19, 47.51, 56.51, 62.89, 66.33, 67.87, 69.07, 72.55, 76.83, 81.37 และ 89.61 (รูปที่ 4.3 (ข)) ซึ่งผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สำหรับ ZnO ทั้งสองชนิดจะสอดคล้องกับพีคมาตรฐาน JCPDS No. 01-076-0704 ซึ่งลักษณะของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สำหรับ Com-ZnO จะเป็นรูปแบบพีคที่มีความเข้มสูงและคมชัด (Sharp) ในขณะที่รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สำหรับ Nano-ZnO จะเป็นรูปแบบพีคที่มีความเข้มสูงแต่จะเป็นพีคที่กว้าง (Broad) กว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของผลึก Com-ZnO จะมีขนาดใหญ่กว่าผลึก Nano-ZnO ทั้งนี้สามารถยืนยันได้จากผลในตารางที่ 4.1 ซึ่งมาจากการคำนวณขนาดผลึก (Crystallite size, D_{XRD}) โดยใช้สมการ Scherrer equation สมการที่ (3.1)

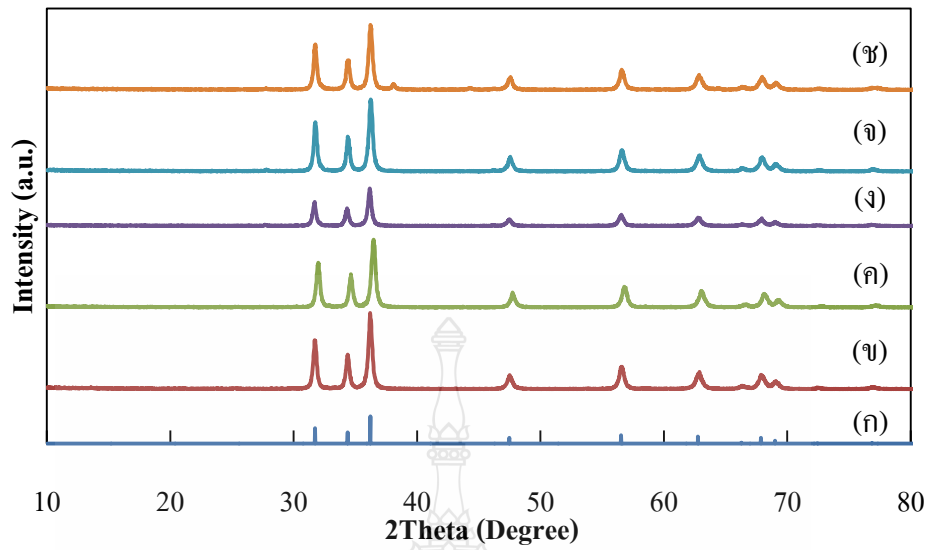
เมื่อใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไปวิเคราะห์ Ag/Com-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในอัตราส่วนต่างๆ จะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ดังรูปที่ 4.2 (ค-ข) โดยจะพบพีคการเลี้ยวเบนของ ZnO ที่ตำแหน่งมุม 2Theta ที่ 31.71, 34.37, 36.19, 47.51, 56.53, 62.81, 66.33, 67.89, 69.03, 72.75, 76.91, 81.35 และ 89.57 องศา



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ (ก) ไฟล์มาตรฐาน JCPDS เลขที่ 01-076-0704

(ข) Com-ZnO และ Com-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ (ค) 0.1 (ง) 0.5 (จ) 1 และ (ช) 5 โดยโมล

เมื่อใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไปวิเคราะห์ Ag/Nano-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในอัตราส่วนต่างๆ จะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ดังรูปที่ 4.3 (ค-ช) โดยผลสอดคล้องกับกรณีเดียวกันกับของ Com-ZnO และ Ag/Com-ZnO กล่าวคือ จะพบฟีกการเลี้ยวเบนของ ZnO ที่ตำแหน่งมุม 2Theta ที่ 31.71, 34.37, 36.19, 47.51, 56.53, 62.81, 66.33, 67.89, 69.03, 72.75, 76.91, 81.35 และ 89.57 องศา อย่างไรก็ตามรูปร่างฟีกของ Ag/Nano-ZnO จะมีขนาดกว้างกว่า แสดงถึงขนาดของผลึก Ag/Nano-ZnO ที่มีขนาดเล็กกว่าของ Ag/Com-ZnO และผลของขนาดของผลึก Ag/Nano-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณต่างๆ กัน จะมีขนาดไม่แตกต่างจากขนาดของผลึก Nano-ZnO ที่ไม่ผ่านการเคลือบนาโนซิลเวอร์ (ตารางที่ 4.1) อย่างไรก็ตามเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาจไม่สามารถวิเคราะห์ถึงนาโนซิลเวอร์ที่เคลือบบนผิวของ ZnO ได้ ดังนั้นจึงต้องทำการยืนยันการมีอยู่ของนาโนซิลเวอร์ด้วยเทคนิคอื่นต่อไป



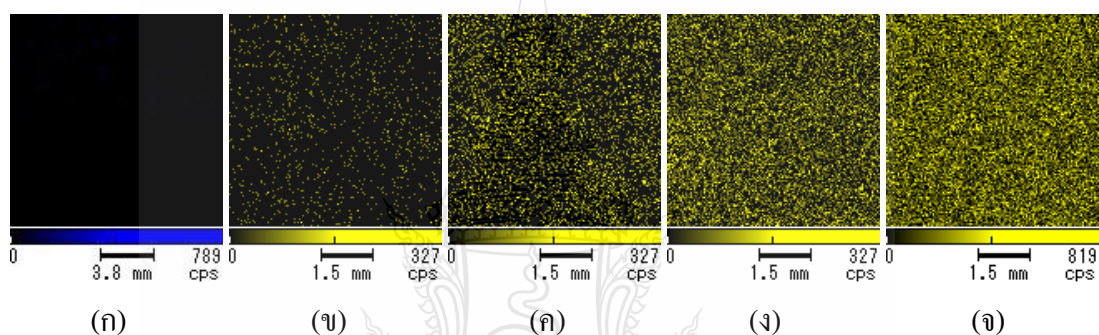
รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ (ก) ฟิล์มมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 01-076-0704 (ข) Nano-ZnO และ Nano-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ (ค) 0.1 (ง) 0.5 (จ) 1 และ (ช) 5 โดยโมล

ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึก (Crystallite size, D_{XRD}) ของ ZnO และ Ag/ZnO ทั้งสองเกรด

ตัวอย่าง	Crystallite size (D_{XRD} : nm)
Com-ZnO	37
0.1%Ag/ Com-ZnO	37
0.5%Ag/ Com-ZnO	37
1%Ag/ Com-ZnO	37
5%Ag/ Com-ZnO	37
Nano-ZnO	32
0.1%Ag/ Nano-ZnO	32
0.5%Ag/ Nano-ZnO	32
1%Ag/ Nano-ZnO	32
5%Ag/ Nano-ZnO	32

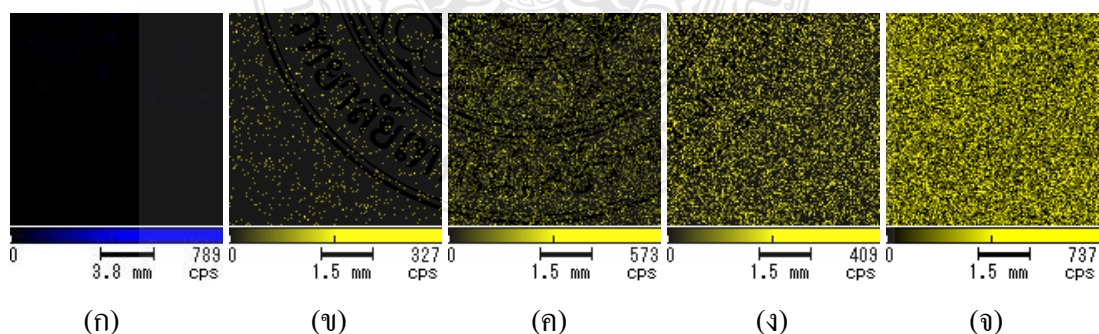
4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

ผลการวิเคราะห์สำหรับ Com-ZnO และ Ag/Com-ZnO แสดงดังรูปที่ 4.4 ในขณะที่ผลการวิเคราะห์สำหรับ Nano-ZnO และ Ag/Nano-ZnO แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยจากผลการวิเคราะห์นี้สามารถยืนยันได้ว่า Ag/ZnO มีอนุภาคซิลเวอร์อยู่จริง โดยปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลเวอร์ที่ทำการเคลือบลงบนผิวของ ZnO นอกจากนี้ยังพบว่ามีการเคลือบอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธีการของคณะวิจัยนี้สามารถทำให้ได้อนุภาคซิลเวอร์ในขนาดนาโนเมตรที่มีการกระจายตัวที่ดีและไม่เกาะเป็นกลุ่มก้อนบนพื้นผิวของ ZnO



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์

ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโกปีสำหรับ (ก) Com-ZnO และ Ag/Com-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ (ข) 0.1 (ค) 0.5 (ง) 1 และ (จ) 5 โดยโมล



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์

ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโกปีสำหรับ (ก) Nano-ZnO และ Ag/Nano-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ (ข) 0.1 (ค) 0.5 (ง) 1 และ (จ) 5 โดยโมล

4.2.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ย

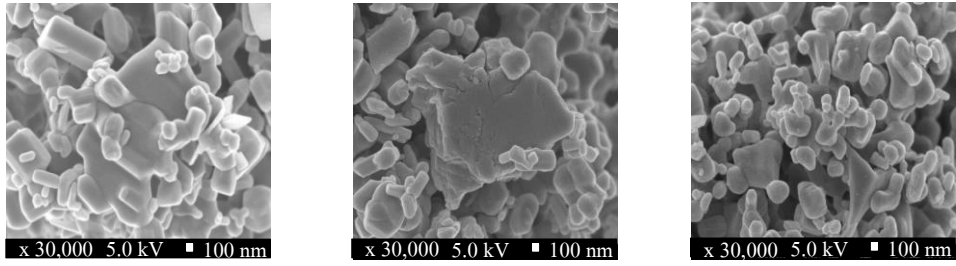
เมื่อทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area; S_{BET}) และขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particle size; D_{BET}) ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ พบว่า Nano-ZnO จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่า และขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า Com-ZnO จากนั้น เมื่อทำการสังเคราะห์นาโนซิลเวอร์ให้เกิดการเคลือบบนผิว ZnO ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นและขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กลง ซึ่งสามารถเห็นได้จากผลของพื้นที่ผิวจำเพาะและผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ ZnO และ 5%Ag/ZnO ดังตารางที่ 4.2 ซึ่ง Ag/ZnO จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่าและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เล็กกว่า ZnO

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area, S_{BET}) และขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particle size, D_{BET}) ของ ZnO และ Ag/ZnO ทั้งสองเกรด

ตัวอย่าง	Specific surface area (S_{BET} : m^2/g)	Average particle size (D_{BET} : nm)
Com-ZnO	4.3	624
5%Ag/Com-ZnO	7.4	477
Nano-ZnO	17.2	238
5%Ag/Nano-ZnO	22.5	146

4.2.4 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

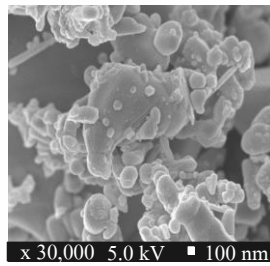
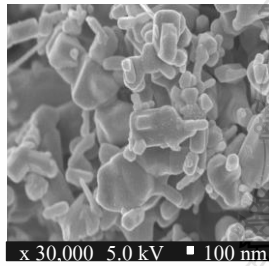
เมื่อนำ ZnO ทั้งสองชนิดไปวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า Com-ZnO (รูปที่ 4.6 (ก)) จะมีลักษณะรูปร่างของอนุภาคที่ไม่แน่นอน เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน และมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับ Nano-ZnO ส่วนลักษณะรูปร่างของ Nano-ZnO (รูปที่ 4.7 (ก)) ก็คล้ายกับ Com-ZnO แต่จะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า และเมื่อนำ Ag/Com-ZnO และ Ag/Nano-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณต่างๆ กัน ไปวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะได้ผลดังรูปที่ 4.6 (ข-จ) และ 4.7 (ข-จ) ตามลำดับ โดยลักษณะหรือรูปร่างของผง Ag/Com-ZnO และ Ag/Nano-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณต่างๆ กัน จะไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญไปจากผง ZnO ก่อนทำการเคลือบนาโนซิลเวอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวของ ZnO จะพบว่า ผง Ag/Com-ZnO และ Ag/Nano-ZnO จะมีพื้นที่ผิวที่ขรุขระขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์บนผิวของ ZnO นั้นเอง



(ก)

(ข)

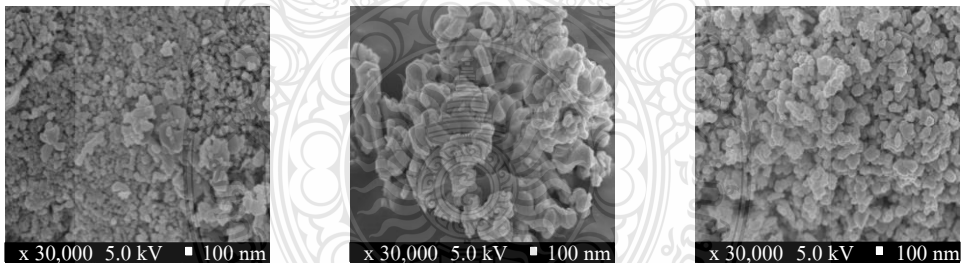
(ค)



(ง)

(จ)

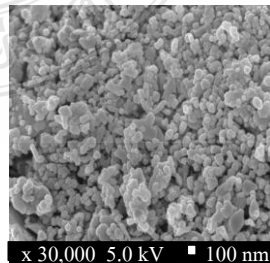
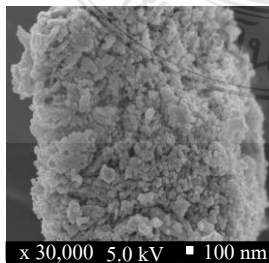
รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของ (ก) Com-ZnO และ Com-ZnO ที่มีปริมาณนาโนซิลเวอร์ร้อยละ (ข) 0.1 (ค) 0.5 (ง) 1 และ (จ) 5 โดยโมล



(ก)

(ข)

(ค)



(ง)

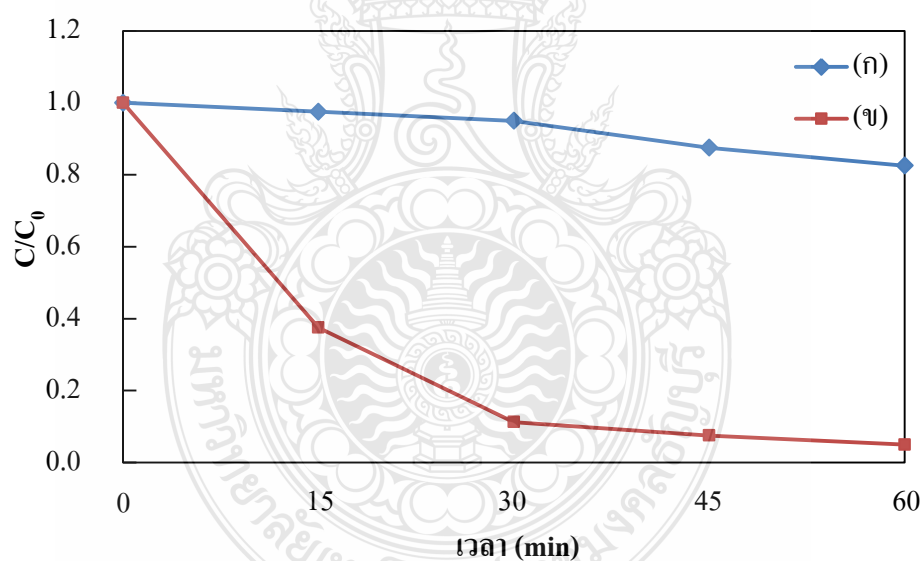
(จ)

รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของ (ก) Nano-ZnO และ Nano-ZnO ที่มีปริมาณนาโนซิลเวอร์ร้อยละ (ข) 0.1 (ค) 0.5 (ง) 1 และ (จ) 5 โดยโมล

4.2.5 ผลการทดสอบสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

การทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจะเป็นการทดสอบให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ ZnO และ Ag/ZnO ทั้งสองเกรด เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

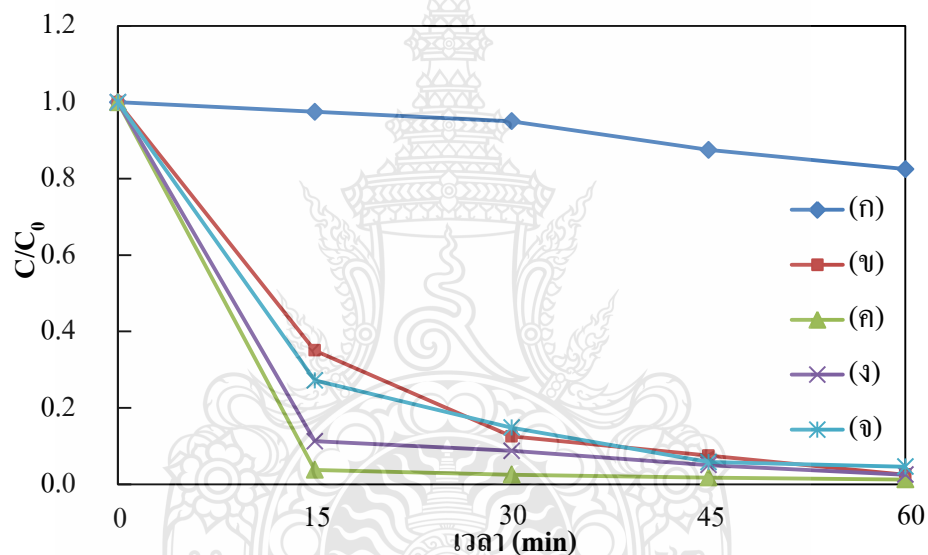
จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 พบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมสำหรับ Com-ZnO จะน้อยมากจนแทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแม้ว่าเวลาในการทดสอบจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมของ Nano-ZnO จะดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่ Nano-ZnO มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าและมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่า จึงทำให้อนุภาคสามารถสัมผัสและเกิดปฏิกิริยากับสีย้อมได้ดีกว่า Com-ZnO จึงสามารถสรุปได้ว่า Nano-ZnO มีประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ดีกว่า Com-ZnO



รูปที่ 4.8 ผลการย่อยสลายสีย้อม Edicol tartrazine ของ (ก) Com-ZnO และ (ข) Nano-ZnO

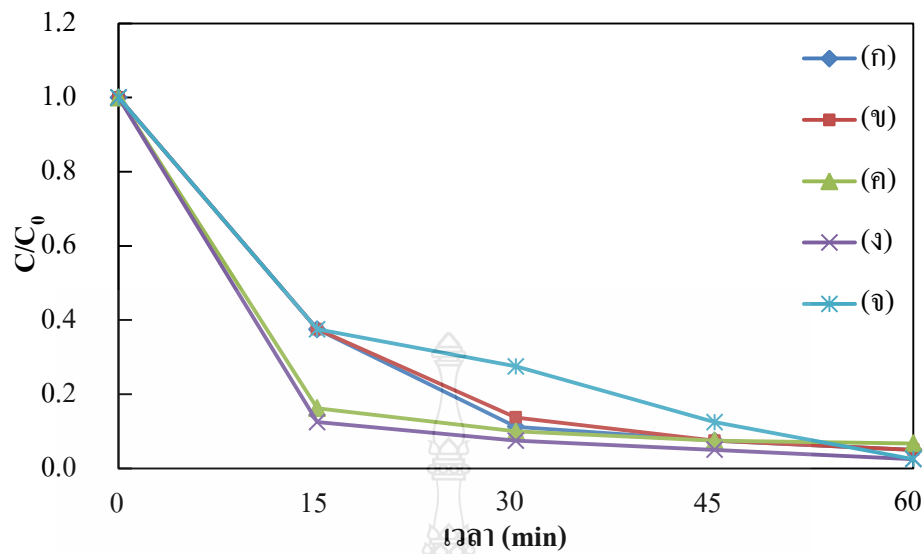
สำหรับผลของ Ag/Com-ZnO ที่มีการเคลือบผิวด้วยนาโนซิลเวอร์ในอัตราส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 4.9 พบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมจะดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วง 15 นาทีแรก เมื่อเทียบกับ Com-ZnO แสดงให้เห็นว่า การเคลือบนาโนซิลเวอร์ลงบนผิวจะสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมสำหรับ Com-ZnO ได้ โดยซิลเวอร์ช่วยทำให้การรวมตัว (Recombination) ระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล (Electrons and holes) ซ้ำลงโดยอาศัยหลักการของ

เซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor) [2,3] อย่างไรก็ตามการเคลือบนาโนซิลเวอร์ในอัตราส่วนต่างๆ ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อม โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า 0.5%Ag/Com-ZnO มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมได้สูงมากที่สุดภายใน 15 นาทีแรก เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากการเคลือบนาโนซิลเวอร์ในปริมาณมากขึ้นมีผลทำให้เกิดการเกาะกลุ่มและปกปิดผิวของ Com-ZnO ในการที่จะสัมผัสกับแสง ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชิงแสงที่ช้าลง แต่หลังจาก 15 นาที จะพบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมจะมีค่าใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนของ Ag/Com-ZnO



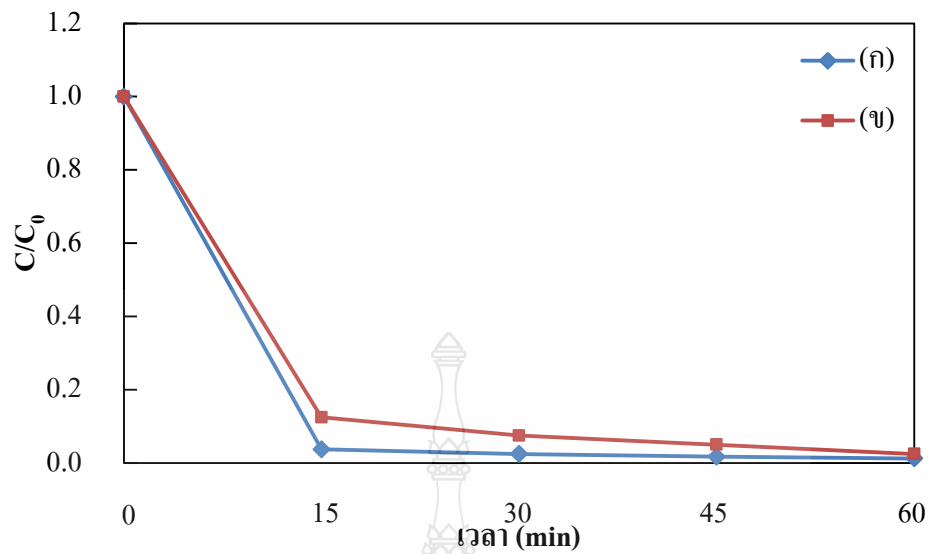
รูปที่ 4.9 ผลการย่อยสลายสีย้อม Edicol tartrazine ของ (ก) Com-ZnO และ Ag/Com-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ (ข) 0.1 (ค) 5 (ง) 1 และ (จ) 0.5 โดยโมล

สำหรับผลของ Ag/Nano-ZnO ที่มีการเคลือบผิวด้วยนาโนซิลเวอร์ในอัตราส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 4.10 พบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วง 15 นาทีแรก โดย 1%Ag/Nano-ZnO จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับ Nano-ZnO แต่หลังจากนั้นจะพบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมจะมีค่าใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนของ Ag/Nano-ZnO และ Nano-ZnO เราจึงสามารถสรุปได้ว่าการเคลือบนาโนซิลเวอร์ลงบนพื้นผิวของ ZnO จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้ดียิ่งขึ้น



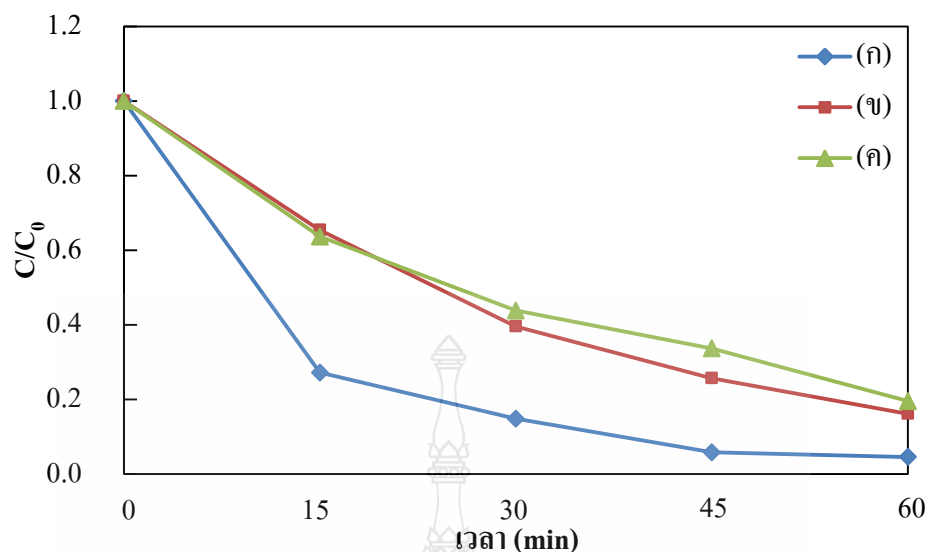
รูปที่ 4.10 ผลการย่อยสลายสีย้อม Edicol tartrazine ของ (ก) Nano-ZnO และ Ag/Nano-ZnO ที่มีนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ (ข) 0.1 (ค) 5 (ง) 1 และ (จ) 0.5 โดยโมล

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมของ Ag/ZnO ทั้งสองเกรด (สำหรับตัวอย่างที่ดีที่สุดดังรูปที่ 4.11) จะพบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมของ 0.5%Ag/Com-ZnO ดีกว่า 1%Ag/Nano-ZnO จึงสามารถสรุปได้ว่า Ag/Com-ZnO มีประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ดีกว่าและใช้ปริมาณของนาโนซิลเวอร์น้อยกว่า Ag/Nano-ZnO นอกจากนี้ในด้านของราคา Com-ZnO ยังมีราคาถูกกว่า Nano-ZnO ถึง 10 เท่า ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการเคลือบผิวโดยใช้ Com-ZnO จะให้ผลการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ดีและประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่าการปรับปรุง Nano-ZnO



รูปที่ 4.11 ผลการย่อยสลายสีย้อม Edicol tartrazine ของ (ก) 0.5%Ag/Com-ZnO และ (ข) 1%Ag/Nano-ZnO

ยิ่งไปกว่านั้นเราได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ Ag/Com-ZnO ในการนำกลับมาใช้ใหม่ ในกรณีนี้เราเลือกใช้ 5%Ag/Com-ZnO เนื่องจากประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมหลังจาก 15 นาทีไม่แตกต่างกันมากนักและเพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้ 5%Ag ในการเคลือบผิววัสดุ จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4.12 พบว่า 5%Ag/Com-ZnO สามารถนำกลับมาใช้ในการย่อยสลายสีย้อมได้ใหม่ถึง 3 ครั้ง อย่างไรก็ตามในครั้งที่ 2 และ 3 ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมของ 5%Ag/Com-ZnO จะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [3]



รูปที่ 4.12 ผลการย่อยสลายสีย้อม Edicol tartrazine ของ 5%Ag/Com-ZnO (ก) ครั้งที่ 1 (ข) ครั้งที่ 2 (ค) ครั้งที่ 3

4.2.6 ผลการทดสอบสมบัติการต้านจุลชีพ

เมื่อนำ Ag/Com-ZnO และ Ag/Nano-ZnO ในแต่ละอัตราส่วนมาทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและแบคทีเรียชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบพบว่า Com-ZnO มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราและเชื้อแบคทีเรียทุกชนิด ซึ่งดีกว่า Nano-ZnO ที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเฉพาะ *S.aureus* และ *E.coli* เท่านั้น ในขณะที่ Ag/Com-ZnO มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมลบ (*E.coli* และ *P.aeruginosa*) เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับ Com-ZnO โดยเฉพาะ 0.1 และ 0.5%Ag/Com-ZnO

สำหรับผลของ Nano-ZnO พบว่ามีประสิทธิภาพในการยับยั้งเฉพาะ *S.aureus* และ *E.coli* เท่านั้น ในขณะที่ Ag/Nano-ZnO สามารถยับยั้งเชื้อราและเชื้อแบคทีเรียได้ทุกชนิด และยังพบอีกว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราและเชื้อแบคทีเรียทุกชนิดดีขึ้น โดยเมื่อปริมาณนาโนซิลเวอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การยับยั้งเชื้อราและเชื้อแบคทีเรียทุกชนิดดีขึ้นด้วย ทั้งนี้ผลทดสอบการต้านจุลชีพที่แตกต่างกันของ Com-ZnO และ Nano-ZnO อาจเนื่องจากปัจจัยของขนาดอนุภาค ความเป็นกรด-ด่าง รวมถึงความบริสุทธิ์ของ ZnO ทั้งสองเกรดด้วย แต่อย่างไรก็ตาม การนำ Nano-ZnO ไปใช้งาน จะมีราคาที่สูงกว่า Com-ZnO

ซึ่งจากผลการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวมา เราจึงสนใจที่จะนำ 5%Ag/Com-ZnO มาใช้เป็นสารเติมแต่งในการเตรียมแผ่นฟิล์มคอม โพลีดีนในขั้นต่อไป

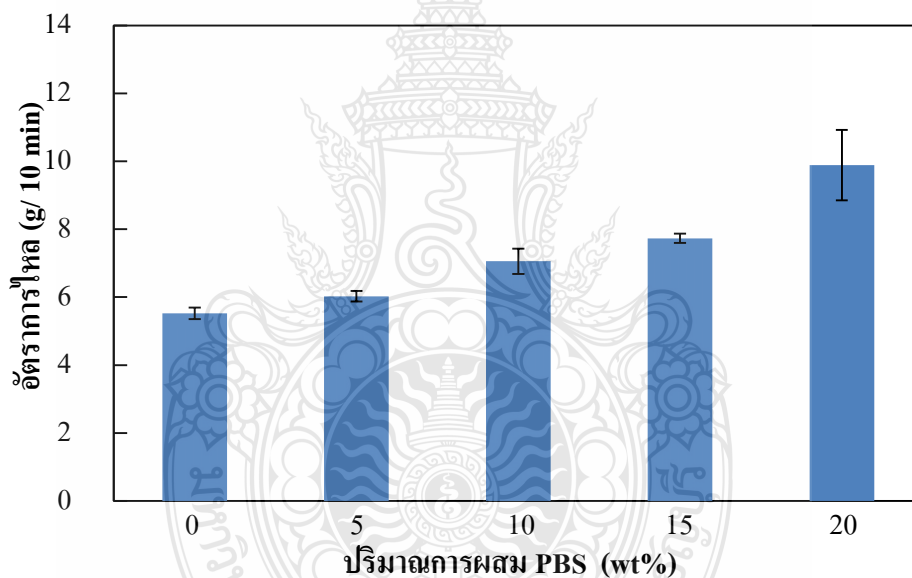
ตารางที่ 4.3 ผลการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวกและแกรมลบของ ZnO และ Ag/ZnO ทั้งสองเกรด

ตัวอย่าง	Inhibition zone (mm)				
	Fungus	Gram positive bacteria		Gram negative bacteria	
	<i>C.albicans</i> ATCC 10231	<i>S.aureus</i> ATCC 25923	<i>B.subtilis</i> ATCC 6633	<i>E.coli</i> ATCC 25922	<i>P.aeruginosa</i> ATCC 2785
Com-ZnO	24.40	9.70	11.60	8.15	8.50
0.1%Ag/Com-ZnO	13.40	9.40	11.60	12.70	8.20
0.5%Ag/Com-ZnO	-	9.20	10.80	8.75	10.10
1%Ag/Com-ZnO	-	9.10	10.50	10.50	10.80
5%Ag/Com-ZnO	-	8.70	-	7.00	8.20
Nano-ZnO	-	14.80	-	14.35	-
0.1%Ag/Nano-ZnO	14.30	15.45	14.20	15.00	13.20
0.5%Ag/Nano-ZnO	15.15	13.10	15.20	15.20	16.45
1%Ag/Nano-ZnO	16.90	14.40	16.45	16.80	17.40
5%Ag/Nano-ZnO	17.60	17.65	15.05	16.90	18.20

4.3 ผลการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของวัสดุดิบ

4.3.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติการไหล

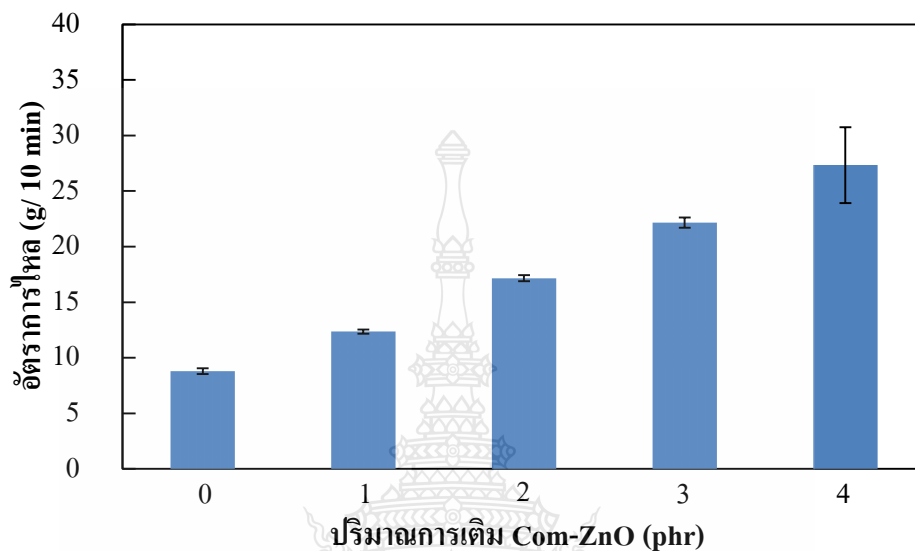
จากการวิเคราะห์สมบัติการไหลของ PLA และ PLA/PBS ก่อนที่จะทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม โดยเริ่มจาก PLA จะมีอัตราการไหลประมาณ 5.52 กรัม/ 10 นาที เมื่อผสม PBS ลงไปที่อัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก จะทำให้มีอัตราการไหลของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มสูงขึ้นเป็น 7.80, 8.78, 10.08 และ 12.14 กรัม/ 10 นาที ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจาก PBS มีอัตราการไหลที่สูงถึง 220 กรัม/ 10 นาที (ที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส, น้ำหนักกด 2,160 กรัม) [22] เมื่อทำการผสมลงไปพอลิเมอร์ผสมจึงทำให้มีอัตราการไหลที่เพิ่มสูงมากขึ้นเรื่อยๆ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 อัตราการไหลของ PLA และ PLA ที่ผสม PBS ในอัตราส่วนต่างๆ ก่อนขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม

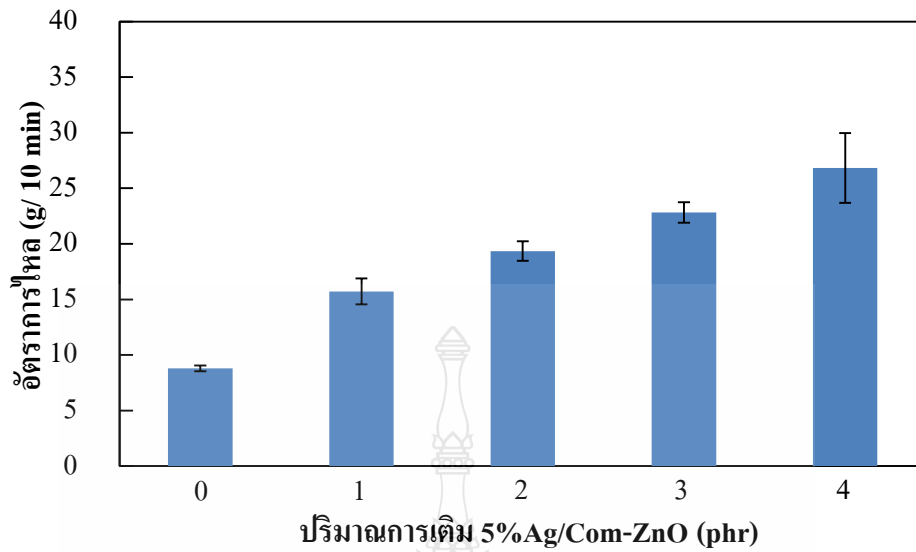
จากการวิเคราะห์สมบัติการไหลของ PLA/PBS ที่ผสมกับ Com-ZnO ก่อนที่จะทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม โดยเริ่มจาก PLA90 จะมีอัตราการไหลประมาณ 8.78 กรัม/ 10 นาที เมื่อผสม Com-ZnO ลงไปที่อัตราส่วน 1, 2, 3 และ 4 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ จะทำให้มีอัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้นเป็น 12.36, 17.16, 22.15 และ 27.33 กรัม/ 10 นาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ S.K. Esthappan [23] ที่มีการผสมสารตัวเติมในปริมาณต่ำแล้วทำให้การไหลเพิ่มสูงขึ้น หรืออาจจะเกิดจาก Com-ZnO ที่ผสมลงไปจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ภายในเนื้อพอลิเมอร์

และขีดขวางแรงที่ยึดติดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โพลิเมอร์ [24] จึงทำให้มีค่าอัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของ Com-ZnO ที่เพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.14 อัตราการไหลของ PLA90 และ PLA90 ที่มีการเติม Com-ZnO ในอัตราส่วนต่างๆ ก่อนขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม

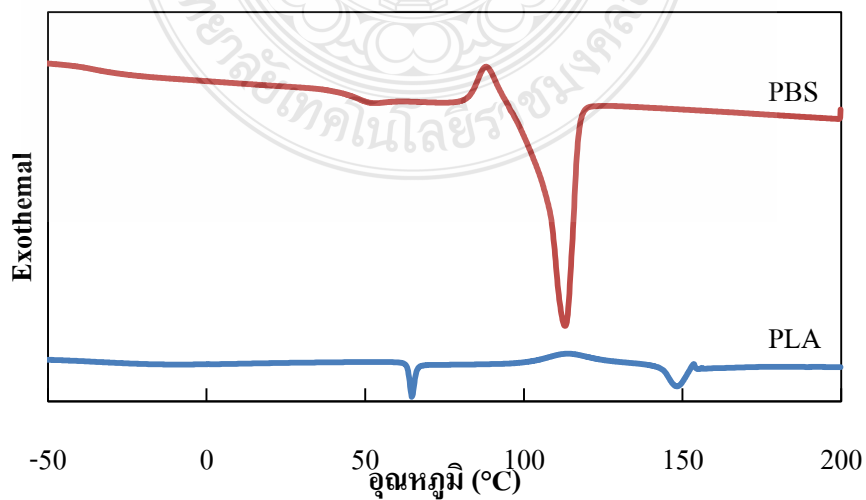
จากการวิเคราะห์สมบัติการไหลของ PLA/PBS ที่ผสมกับ 5%Ag/Com-ZnO ก่อนที่จะทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม โดยเริ่มจาก PLA90 จะมีอัตราการไหลประมาณ 8.78 กรัม/ 10 นาที เมื่อผสม 5%Ag/Com-ZnO ลงไปที่อัตราส่วน 1, 2, 3 และ 4 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ จะทำให้มีอัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้นเป็น 15.72, 19.34, 22.82 และ 26.83 กรัม/ 10 นาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ S.K. Esthappan [23] ที่มีการผสมสารตัวเติมในปริมาณต่ำแล้วทำให้การไหลเพิ่มสูงขึ้น หรืออาจเกิดจาก 5%Ag/Com-ZnO ที่ผสมลงไปจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ภายในเนื้อพอลิเมอร์และขีดขวางแรงที่ยึดติดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โพลิเมอร์ [24] จึงทำให้มีค่าอัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้น ตามปริมาณของ 5%Ag/Com-ZnO ที่เพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.15 อัตราการไหลของ PLA90 และ PLA90 ที่มีการเติม 5%Ag/Com-ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆ ก่อนขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม

4.3.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของ PBS และ PLA ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC เพื่อหาอุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.4 จะพบว่า PLA จะมีค่า T_g ที่ 62.05 องศาเซลเซียส และมีค่า T_m ที่ 148.17 องศาเซลเซียส ขณะที่ PBS จะมีค่า T_g ที่ -30.75 องศาเซลเซียส และมีค่า T_m ที่ 112.03 องศาเซลเซียส



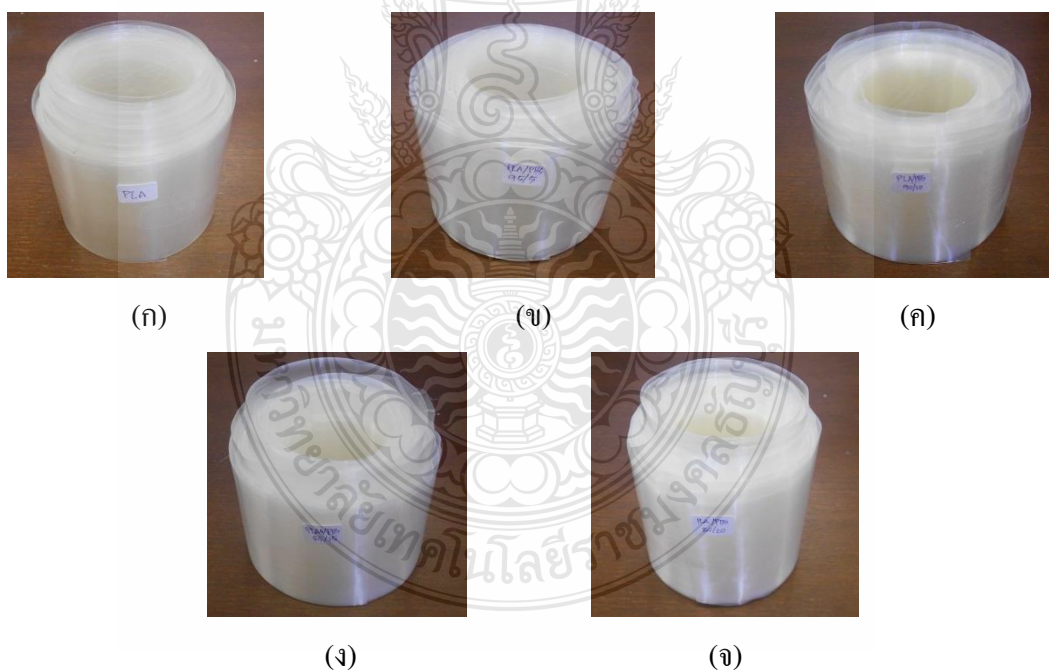
รูปที่ 4.16 DSC เทอร์โมแกรมของ PLA และ PBS

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของ PLA และ PBS

ตัวอย่าง	Temperature (°C)				%Crystallinity
	T _g	T _c	T _m PBS	T _m PLA	
PLA	62.05	113.83	-	148.17	1.21
PBS	-30.75	88.01	112.03	-	51.81

4.4 ผลการเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนต

แผ่นฟิล์ม PLA มีลักษณะเป็นแผ่นใส ไม่มีสี ผิวเป็นมันเงา เมื่อทำการผสม PBS ลงไปทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีความใสน้อยลง มีสีขุ่น และเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของ PBS ที่เติมลงไป ดังรูปที่ 4.17 เนื่องจาก PBS มีความเป็นอสัณฐานน้อยกว่า PLA ดังนั้นเมื่อผสมลงไป PLA จึงทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีขุ่นและความเป็นมันเงาน้อยลง

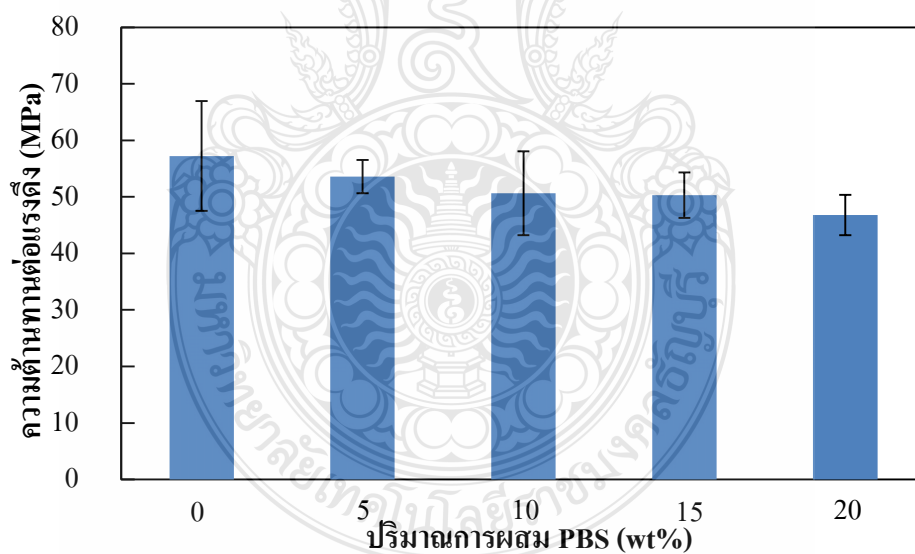


รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายแผ่นฟิล์ม (ก) PLA, (ข) PLA95, (ค) PLA90, (ง) PLA85 และ (จ) PLA80

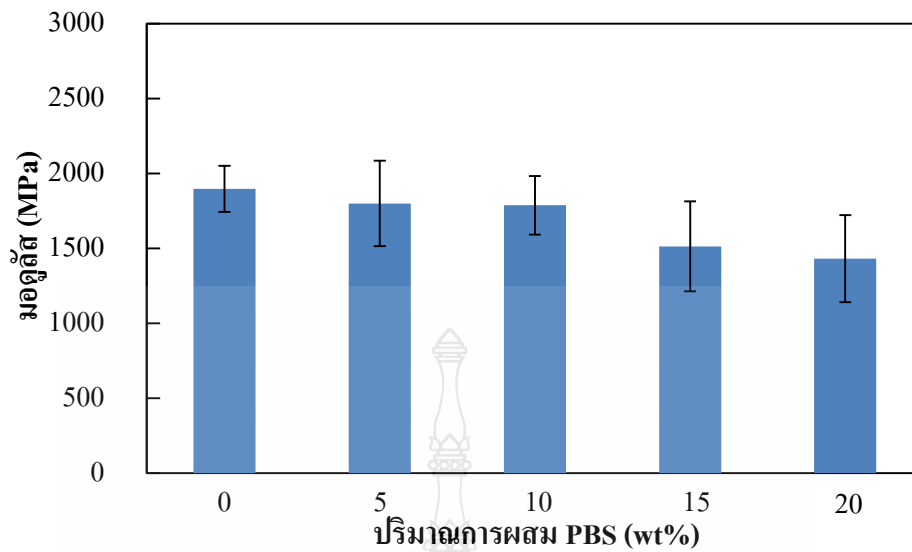
4.5 ผลการศึกษาสมบัติของแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

4.5.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile test) ของแผ่นฟิล์ม PLA/PBS ที่อัตราส่วนของปริมาณ PBS ต่างๆ เทียบกับแผ่นฟิล์ม PLA โดยความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และมอดูลัส (Modulus) ของแผ่นฟิล์ม PLA จะสูงที่สุด ประมาณ 57.22 และ 1897 MPa ตามลำดับ (รูปที่ 4.18 และ 4.19) เมื่อปริมาณสัดส่วนของ PBS ในแผ่นฟิล์ม PLA/PBS เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง และลดลงมากที่สุดคือ PLA80 เนื่องจากเมื่อปริมาณสัดส่วนของ PBS เพิ่มมากขึ้นอาจทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองมีความไม่เข้ากันระหว่างเฟสเพิ่มขึ้นจึงเกิดการถ่ายโอนความเค้นได้ไม่ดีในแผ่นฟิล์ม PLA/PBS ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. Bhatia และคณะ [8] และ E. Hassan และคณะ [9] ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ PBS ใน PLA ความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสมีแนวโน้มลดลง

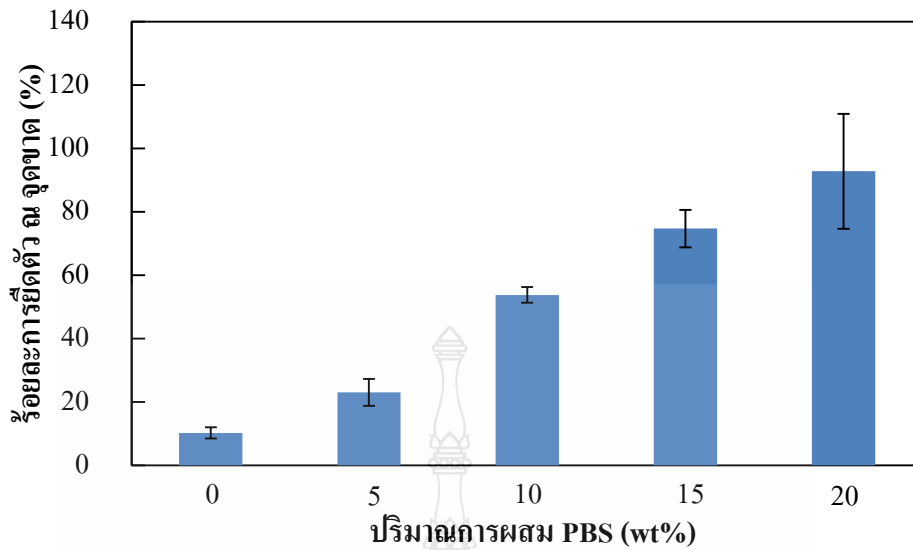


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์ม PLA/PBS กับปริมาณการผสม PBS



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของแผ่นฟิล์ม PLA/PBS กับปริมาณการผสม PBS

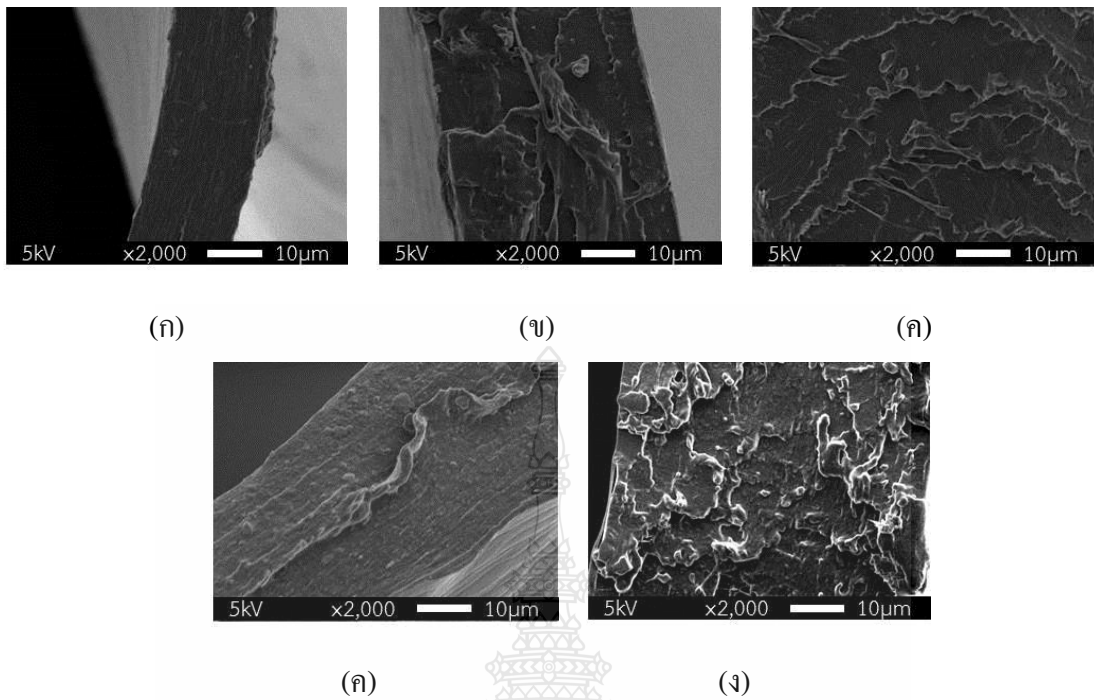
ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์ม PLA/PBS แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์ม PLA จะต่ำที่สุด ประมาณร้อยละ 10.26 เมื่อสัดส่วนของ PBS ในแผ่นฟิล์มเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มมากขึ้น โดยร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดจะเพิ่มขึ้นจากตัวอย่าง PLA95, PLA90, PLA85 และมีค่ามากที่สุดที่ตัวอย่าง PLA80 โดยมีค่าประมาณร้อยละ 23.09, 53.80, 74.72 และ 92.80 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ E. Hassan และคณะ [9] ซึ่งพบว่าเมื่อสัดส่วนของ PBS เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของ PLA/PBS เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก PBS เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นมากกว่า PLA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งและเปราะ ดังนั้นเมื่อนำพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมาผสมกันจึงทำให้สมบัติความแข็งและเปราะของ PLA ลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ PBS ซึ่งสังเกตได้จากร้อยละการยืดตัวที่เพิ่มสูงขึ้น กับความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสที่ลดลง



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์ม PLA/PBS กับปริมาณการผสม PBS

4.5.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์ม PLA และแผ่นฟิล์ม PLA/PBS ที่ได้หลังจากการทดสอบแรงดึง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของชิ้นงานเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสัดส่วนของ PBS พบว่าแผ่นฟิล์ม PLA มีการแตกหักที่พื้นผิวแบบเรียบเนียน ซึ่งเกิดจากการแตกหักแบบเปราะของ PLA ดังรูปที่ 4.21 (ก) แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสัดส่วนของ PBS พบว่าลักษณะการแตกหักมีเฟสอื่นที่ยืดออกมาจากผิวหน้าของแผ่นฟิล์ม เมื่อปริมาณของ PBS เพิ่มมากขึ้นก็พบเฟสที่ยืดออกมาเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.21 (ข-ง) ซึ่งเฟสที่ยืดออกมานี้คาดว่าเป็นเฟสของ PBS ที่ผสมลงไปใน PLA ทำให้ลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มเกิดการแตกหักแบบเหนียว ซึ่งลักษณะการแตกหักที่เปลี่ยนแปลงไปของแผ่นฟิล์มนี้ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลอีกด้วย



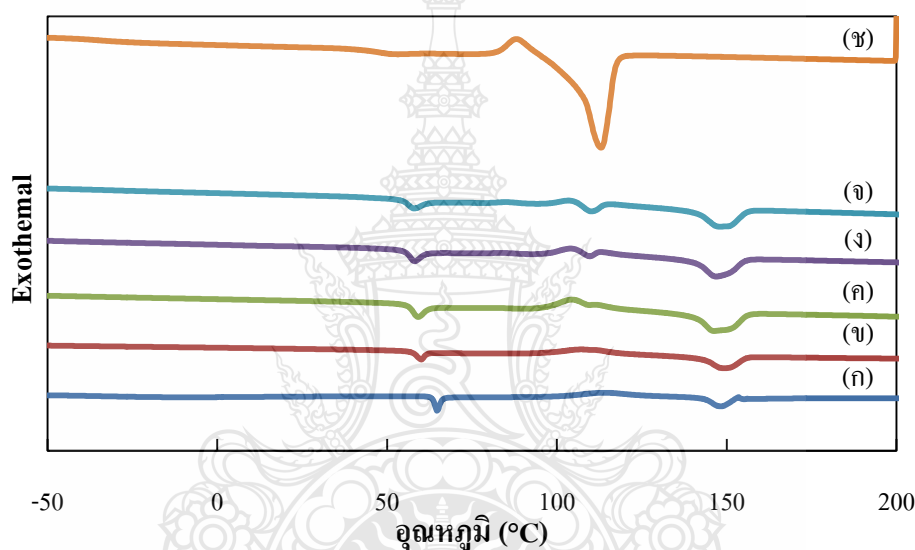
รูปที่ 4.21 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นฟิล์ม (ก) PLA, (ข) PLA95, (ค) PLA90, (ง) PLA85 และ

(จ) PLA80 หลังจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

4.5.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของ PBS แผ่นฟิล์ม PLA และแผ่นฟิล์ม PLA/PBS ด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่งแสดงดังรูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.5 พบว่าแผ่นฟิล์ม PLA มี T_g , T_c และ T_m ที่ 62.05, 113.83 และ 148.17 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่ PBS มี T_g , T_c และ T_m ที่ -30.75, 88.01 และ 112.03 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนแผ่นฟิล์ม PLA/PBS พบว่า T_g ลดลง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ PBS ซึ่ง T_g ที่ลดลงนี้ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม คือทำให้แผ่นฟิล์มมีความยืดหยุ่นและเหนียวมากขึ้นสอดคล้องกับร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของ PBS ดังรูปที่ 4.20 สำหรับ T_c ของแผ่นฟิล์ม PLA/PBS มีค่าลดลงจากแผ่นฟิล์ม PLA เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ PBS ซึ่งค่า T_c ที่ลดลงนี้ส่งผลให้แผ่นฟิล์ม PLA/PBS สามารถเกิดผลึกได้เร็วขึ้น สำหรับ T_m ของแผ่นฟิล์ม PLA/PBS มีค่าลดลงจากแผ่นฟิล์ม PLA เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ PBS สำหรับตัวอย่าง PLA80 สังเกตเห็นพีก T_m เกิดขึ้นสองพีกที่ 109.92 และ 147.43 องศาเซลเซียส พีกที่หนึ่งและพีกที่สองมีค่าใกล้เคียงกับ T_m ของ PBS และ PLA ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการแยกเฟสหรือความไม่เข้ากัน (Immiscible) ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่อัตราส่วนนี้

สำหรับกรณีที่มีปริมาณ PBS ต่ำกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะไม่พบพิกที่สองเกิดขึ้น ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ (Miscible) ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด จากผลดังกล่าวนี้เราสามารถสรุปได้ว่า T_g , T_c และ T_m มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ PBS และเมื่อมีการเติม PBS ไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดจะผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ สำหรับร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) ของแผ่นฟิล์ม PLA ที่ผสมด้วย PBS ในปริมาณต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์ม PLA เนื่องจากสมบัติของ PLA จะมีความเป็นผลึกน้อยกว่า PBS



รูปที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นฟิล์ม (ก) PLA, (ข) PLA95, (ค) PLA90, (ง) PLA85, (จ) PLA80 และ (ข) PBS

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์ม PLA และ PLA/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ

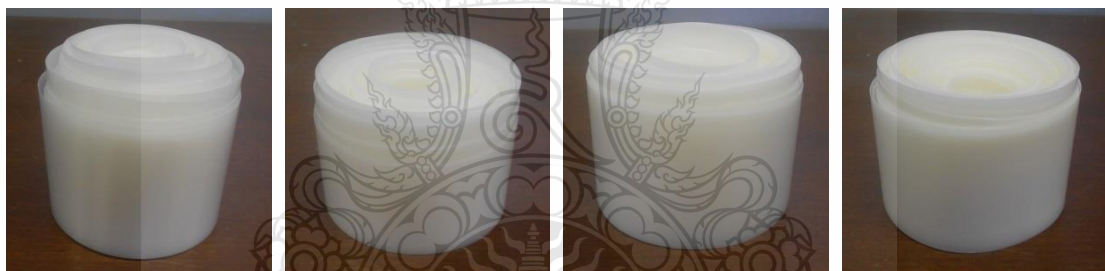
ตัวอย่าง	Temperature (°C)				%Crystallinity
	T_g	T_c	T_m PBS	T_m PLA	
PLA	62.05	113.83	-	148.17	1.21
PLA95	56.49	107.28	-	149.11	2.72
PLA90	55.53	104.41	-	145.97	12.75
PLA85	53.79	104.22	-	146.47	22.24
PLA80	53.90	103.34	109.92	147.43	31.62
PBS	-30.75	88.01	112.03	-	51.81

จากผลการทดสอบแผ่นฟิล์ม PLA/PBS ทั้งหมดที่กล่าวมา เราจึงสนใจที่จะนำ PLA90 มาใช้เป็นเมทริกซ์หลักในการเตรียมแผ่นฟิล์มคอม โพลีเอสเตอร์ เนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสมและดีที่สุด อีกทั้งยังมีความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

4.6 ผลการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพลีเอสเตอร์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิবিวิทลิน

ซัดซิเนตกับซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์

แผ่นฟิล์มคอมโพลีเอสเตอร์ระหว่าง PLA/PBS กับ Com-ZnO ที่ได้มีลักษณะสีขาวขุ่น ผิวด้านและความขุ่นจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนของ Com-ZnO ที่เติมลงไปดังรูปที่ 4.23 เนื่องจาก Com-ZnO มีสีขาวขุ่นดังรูปที่ 4.1 (ก) เมื่อเข้าไปกระจายตัวอยู่ภายในแผ่นฟิล์มคอมโพลีเอสเตอร์ จึงทำให้มีสีขาวขุ่นและเข้มมากขึ้นตามปริมาณที่เติมลงไป



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายแผ่นฟิล์มคอมโพลีเอสเตอร์ (ก) PLA90-Com-ZnO-1, (ข) PLA90-Com-ZnO-2, (ค) PLA90-Com-ZnO-3 และ (ง) PLA90-Com-ZnO-4

แผ่นฟิล์มคอมโพลีเอสเตอร์ระหว่าง PLA/PBS กับ 5%Ag/Com-ZnO ที่ได้มีลักษณะสีเทาอ่อน ผิวด้านและมีสีเข้มมากขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนของ 5%Ag/Com-ZnO ที่เติมลงไป ดังรูปที่ 4.24 เนื่องจาก 5%Ag/Com-ZnO มีสีเทาเข้มดังรูปที่ 4.1 (จ) จึงทำให้แผ่นฟิล์มคอมโพลีเอสเตอร์ที่ได้มีสีเทาอ่อนๆ และเข้มมากขึ้นตามปริมาณที่เติมลงไป



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

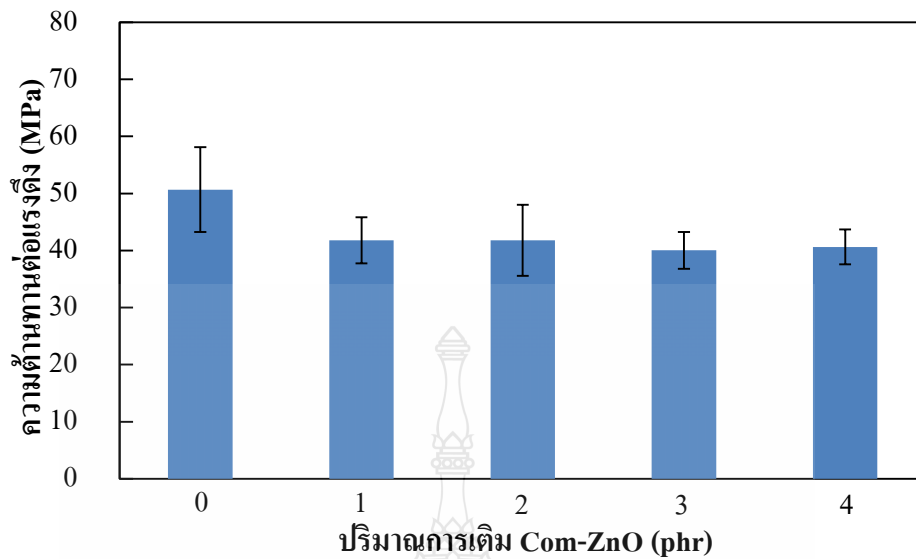
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายแผ่นฟิล์มคอมโพสิต (ก) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-1, (ข) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-2, (ค) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-3 และ (ง) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-4

4.7 ผลการศึกษสมบัติของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดผสม

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เคลือบนาโนซิลเวอร์

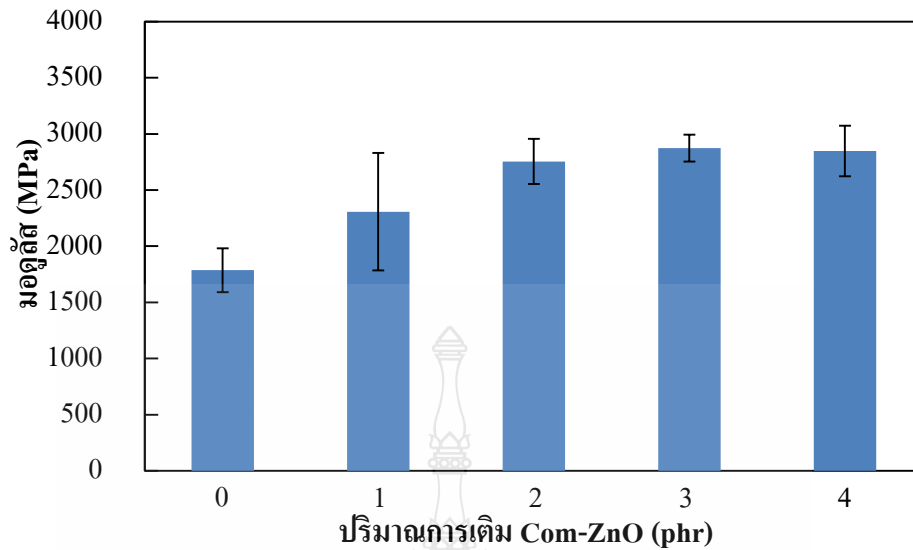
4.7.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต PLA/PBS กับ Com-ZnO ที่ปริมาณของ Com-ZnO ต่างๆ เทียบกับแผ่นฟิล์ม PLA/PBS ที่ไม่มีการเติม Com-ZnO (PLA90) แสดงดังรูปที่ 4.25 โดยความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์ม PLA90 จะมีค่าประมาณ 50.66 MPa เมื่อเติม Com-ZnO ลงในแผ่นฟิล์ม PLA90 จะทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเหลือ 41.80 MPa (ตัวอย่าง PLA90-Com-ZnO-1) และเมื่อเพิ่มปริมาณของ Com-ZnO มากขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดึงก็จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักจากตัวอย่าง PLA90-Com-ZnO-2, PLA90-Com-ZnO-3 และ PLA90-Com-ZnO-4 โดยมีค่าประมาณ 41.77, 40.03 และ 40.63 ตามลำดับ



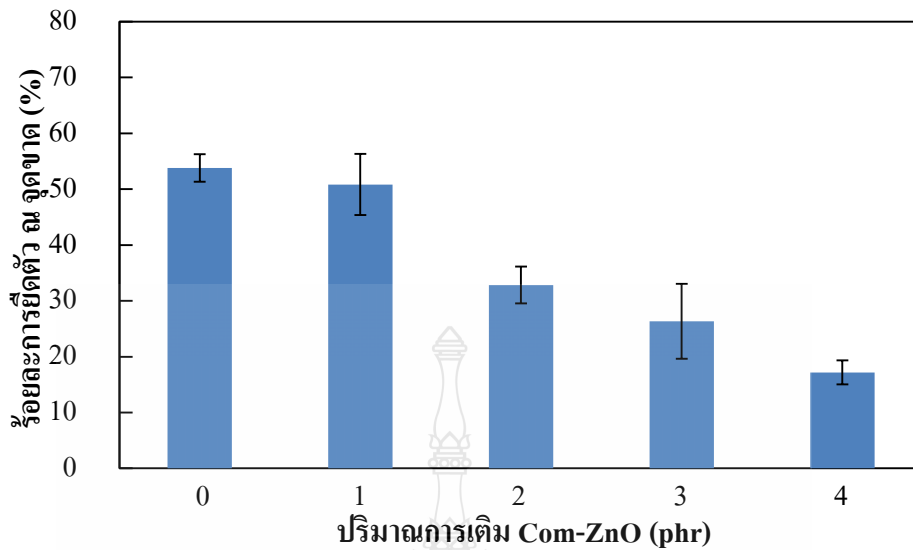
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มคอม โพลีตกับปริมาณการเติม Com-ZnO

มอดูลัสของแผ่นฟิล์มคอม โพลีต PLA/PBS กับ Com-ZnO ที่ปริมาณของ Com-ZnO ต่างๆ เทียบกับแผ่นฟิล์ม PLA90 แสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่ามอดูลัสของแผ่นฟิล์ม PLA90 มีค่าประมาณ 1787 MPa เมื่อมีการเติม Com-ZnO ลงไปพบว่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น จากตัวอย่าง PLA90-ZnO-1 และ PLA90-ZnO-2 โดยมีค่าประมาณ 2307 และ 2755 MPa ตามลำดับ แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณของ Com-ZnO เพิ่มขึ้นอีกพบว่ามอดูลัสไม่เปลี่ยนแปลงมากนักหรือคงที่ จากตัวอย่าง PLA90-ZnO-3 และ PLA90-ZnO-4 โดยมีค่าประมาณ 2872 และ 2847 MPa ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Jayaramudu และคณะ [10]



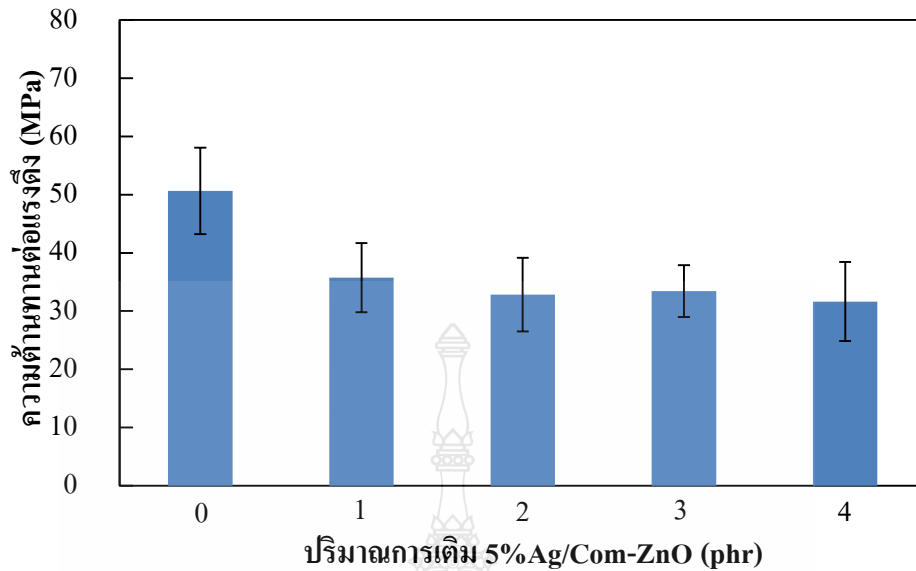
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับปริมาณการเติม Com-ZnO

ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต PLA/PBS กับ Com-ZnO แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่าแผ่นฟิล์ม PLA90 มีร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดสูงสุด ประมาณร้อยละ 53.80 เมื่อมีการเติม Com-ZnO ลงไปร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเล็กน้อยเหลือร้อยละ 50.82 (ตัวอย่าง PLA90-Com-ZnO-1) ซึ่งจะสอดคล้องกับภาพ SEM (รูปที่ 4.31 ก) ที่แสดงลักษณะการแตกหักแบบเหนียว และเมื่อเพิ่มปริมาณของ Com-ZnO มากขึ้นจะทำให้ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดย PLA90-Com-ZnO-4 จะมีร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำที่สุดที่ประมาณ 17.18 ซึ่งอาจเกิดจากอนุภาคของ Com-ZnO ที่แทรกอยู่ภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์มีปริมาณมากเกินไป ดังรูปที่ 4.31 (ข-ง)



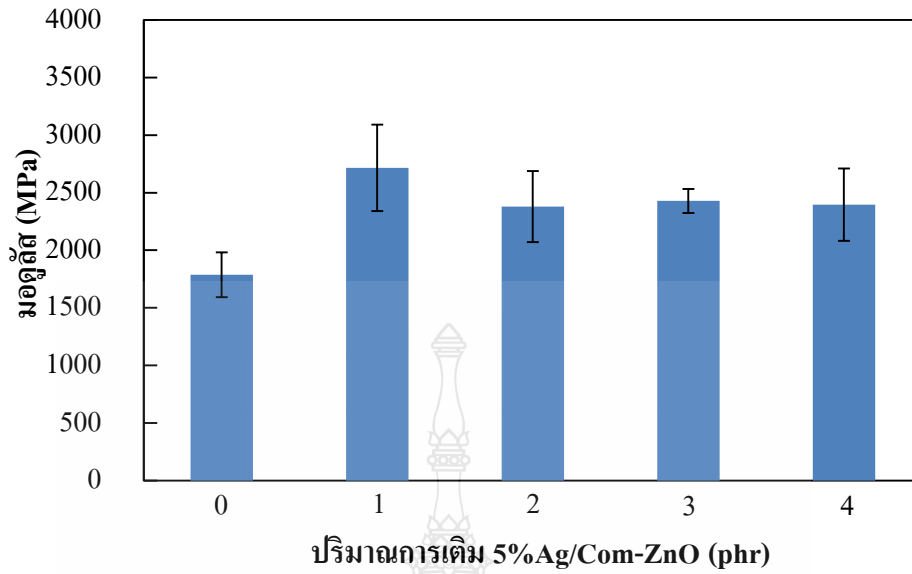
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับปริมาณการเติม Com-ZnO

จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต PLA/PBS กับ 5%Ag/Com-ZnO ที่ปริมาณของ 5%Ag/Com-ZnO ต่างๆ เทียบกับแผ่นฟิล์ม PLA90 แสดงดังรูปที่ 4.28 โดยความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์ม PLA90 มีค่าประมาณ 50.66 MPa เมื่อเติม 5%Ag/Com-ZnO ลงในแผ่นฟิล์ม PLA90 จะทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเหลือ 35.74 MPa (ตัวอย่าง PLA90-5%Ag/Com-ZnO-1) และเมื่อเพิ่มปริมาณของ 5%Ag/Com-ZnO มากขึ้น ความต้านทานต่อแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนักจากตัวอย่าง PLA90-5%Ag/Com-ZnO-2, PLA90-5%Ag/Com-ZnO-3 และ PLA90-5%Ag/Com-ZnO-4 โดยมีค่าประมาณ 32.83, 33.44 และ 31.64 ตามลำดับ



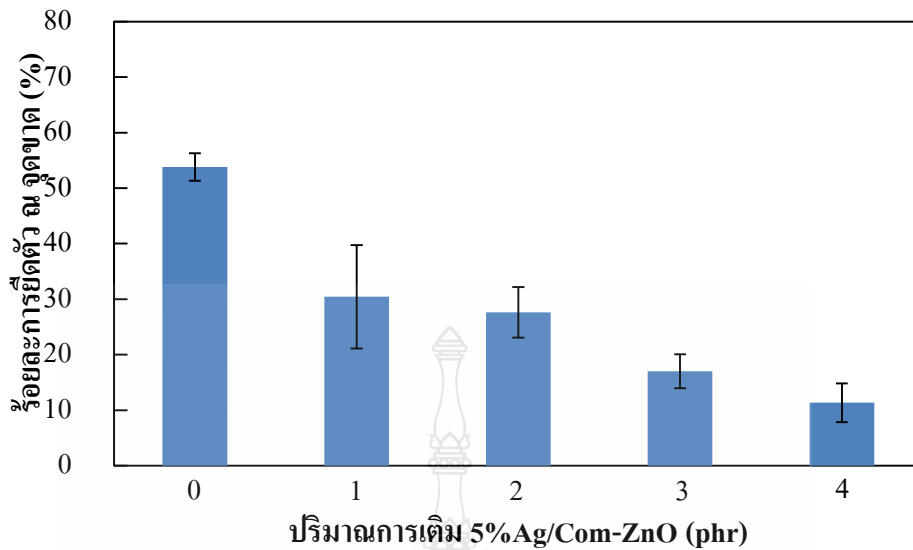
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มคอม โพลีตกับปริมาณการเติม 5%Ag/Com-ZnO

มอดูลัสของแผ่นฟิล์มคอม โพลีต PLA/PBS กับ 5%Ag/Com-ZnO ที่ปริมาณของ 5%Ag/Com-ZnO ต่างๆ เทียบกับแผ่นฟิล์ม PLA90 แสดงดังรูปที่ 4.29 พบว่าแผ่นฟิล์ม PLA90 มีค่ามอดูลัสประมาณ 1787 MPa เมื่อเติม 5%Ag/Com-ZnO ลงไปพบว่ามอดูลัสสูงขึ้นจากตัวอย่าง PLA90-Ag/ZnO-1 โดยมีค่าประมาณ 2715 MPa แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณของ 5%Ag/Com-ZnO เพิ่มขึ้นทำให้มอดูลัสลดลงเป็น 2378 MPa (PLA90-Ag/ZnO-2) และเมื่อเพิ่มปริมาณของ Ag/ZnO เพิ่มขึ้นอีกค่ามอดูลัสก็ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักหรือคงที่ จากตัวอย่าง PLA90-Ag/ZnO-3 และ PLA90-Ag/ZnO-4 โดยมีค่าประมาณ 2428 และ 2397 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของแผ่นฟิล์มคอม โพลีตกับปริมาณการเติม 5%Ag/Com-ZnO

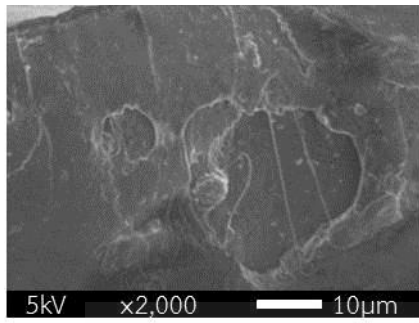
ร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มคอม โพลีต PLA/PBS กับ 5%Ag/Com-ZnO แสดงดังรูปที่ 4.30 พบว่าแผ่นฟิล์ม PLA90 มีร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุด ประมาณร้อยละ 53.80 เมื่อมีการเติม 5%Ag/Com-ZnO ลงไป ร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดลดลงอย่างมากเหลือร้อยละ 30.44 (ตัวอย่าง PLA90-Ag/ZnO-2) ซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM (รูปที่ 4.32 (ก)) ที่แสดงลักษณะการแตกหักแบบเปราะและเมื่อเพิ่มปริมาณของ 5%Ag/Com-ZnO มากขึ้น ทำให้ร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดย PLA90-Ag/ZnO-4 มีร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดที่ประมาณร้อยละ 11.33 ซึ่งอาจเกิดจากอนุภาคของ 5%Ag/Com-ZnO ที่แทรกอยู่ภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์มีปริมาณมากเกินไปดังรูปที่ 4.32 (ข-ง)



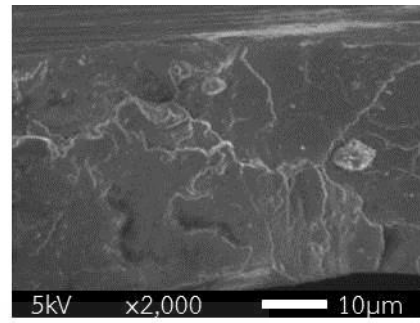
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับปริมาณการเติม 5%Ag/Com-ZnO

4.7.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

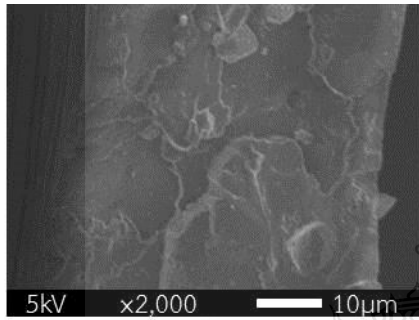
จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS กับ Com-ZnO ที่ได้หลังจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของชิ้นงาน พบว่าแผ่นฟิล์ม PLA90-ZnO-1 (รูปที่ 4.31 (ก)) มีลักษณะการแตกหักที่พื้นผิวแบบเหนียวสังเกตได้จากรอยยึดออกของพอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นวงกลม โดยรอยวงกลมที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการที่อนุภาคของ Com-ZnO เข้าไปแทรกตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ก่อนทำการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ทำให้สมบัติการยึดตัว ณ จุดขาดลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ PLA/PBS (รูปที่ 4.27) แต่เมื่อปริมาณของ Com-ZnO มากขึ้น (รูปที่ 4.31 (ข-ง)) พบว่าลักษณะการแตกหักมีความคล้ายคลึงกัน แต่มีอนุภาคของ Com-ZnO หลงเหลืออยู่และเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomeration) ใหญ่ขึ้นตามปริมาณของ Com-ZnO ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากันและไม่มีแรงอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับอนุภาคของ Com-ZnO ที่เป็นวัสดุเซรามิกส์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สมบัติการยึดตัว ณ จุดขาดลดลงอย่างมากดังรูปที่ 4.27



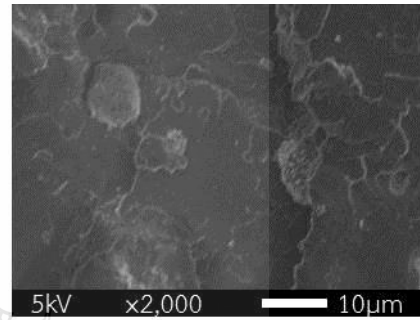
(ก)



(ข)



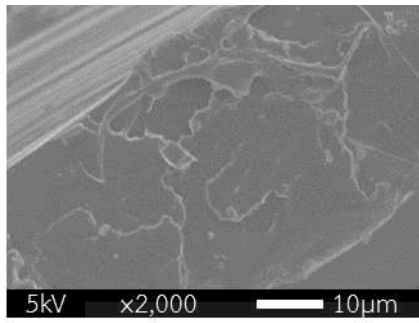
(ค)



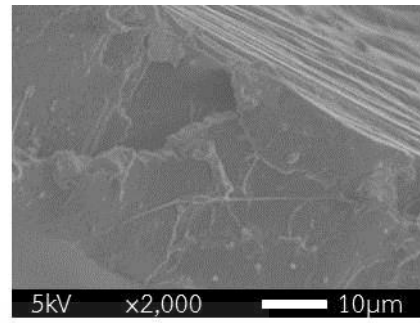
(ง)

รูปที่ 4.31 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต (ก) PLA90-ZnO-1, (ข) PLA90-ZnO-2, (ค) PLA90-ZnO-3 และ (ง) PLA90-ZnO-4

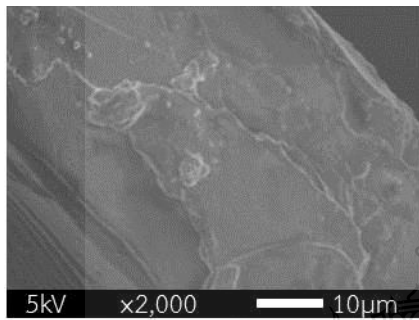
จากการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS กับ 5%Ag/Com-ZnO ที่ได้หลังจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของชิ้นงาน จะพบว่าแผ่นฟิล์ม PLA90-Ag/ZnO-1 (รูปที่ 4.32 (ก)) จะมีลักษณะการแตกหักที่พื้นผิวแบบเปราะกว่าแผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่เติม Com-ZnO ซึ่งสอดคล้องกับผลร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ดังรูปที่ 4.30 แต่เมื่อปริมาณของ 5%Ag/Com-ZnO มากขึ้น (ดังรูปที่ 4.32 (ข-ง)) ลักษณะการแตกหักมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยอนุภาคของ 5%Ag/Com-ZnO เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนหรือเกิดช่องว่าง (Void) ที่พอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งช่องว่างนี้เกิดจากอนุภาคของ 5%Ag/Com-ZnO ที่เกาะกลุ่มกันแล้วแทรกตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดการหลุดออกหลังจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากันและไม่มีแรงอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับอนุภาคของ 5%Ag/Com-ZnO ที่เป็นวัสดุเซรามิกส์กับโลหะ จึงส่งผลให้ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงอย่างมากดังรูปที่ 4.30



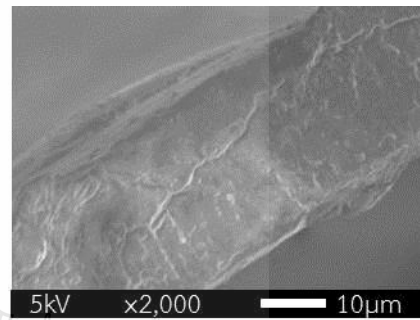
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

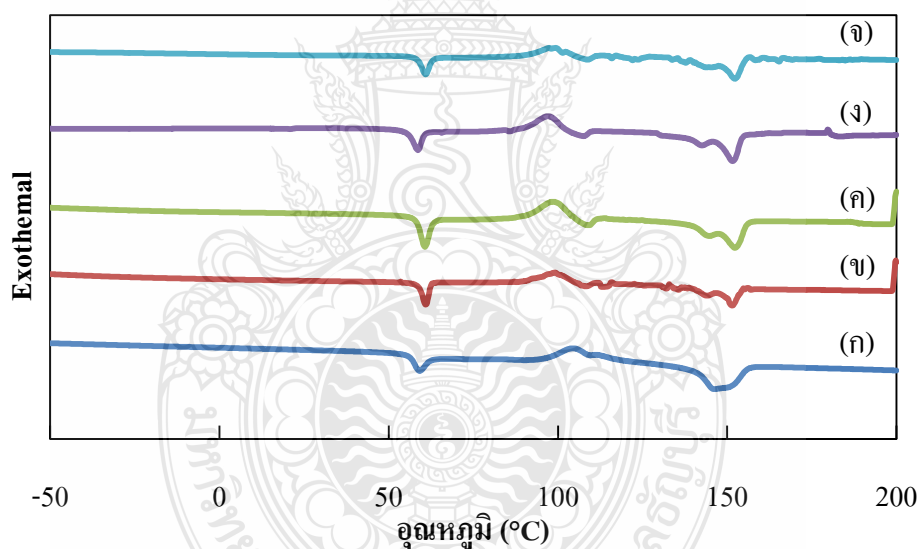
รูปที่ 4.32 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต (ก) PLA90-Ag/ZnO-1, (ข) PLA90-Ag/ZnO-2, (ค) PLA90-Ag/ZnO-3 และ (ง) PLA90-Ag/ZnO-4

4.7.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง PLA90 กับ Com-ZnO และ 5%Ag/Com-ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่งแสดงดังรูปที่ 4.33 และ 4.34 ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลเชิงตัวเลขแสดงไว้ดังตารางที่ 4.5 พบว่าแผ่นฟิล์ม PLA90 จะมี T_g , T_c และ T_m ที่ 55.53, 104.41 และ 145.97 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่แผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่มีการเติม Com-ZnO ลงไป พบว่ามี T_g เพิ่มสูงขึ้น ซึ่ง T_g ที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้แผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่ได้มีความยืดหยุ่นลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการยืดตัว ณ จุดขาดที่ลดลงดังรูปที่ 4.27 สำหรับ T_c พบว่าเมื่อเติม Com-ZnO ลงไป ทำให้ T_c ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเกิดผลึกได้เร็วขึ้น สำหรับ T_m พบว่าเมื่อเติม Com-ZnO ลงไป ทำให้ T_m เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ R. Pantani *et al.* (2013) [11] สำหรับร้อยละความเป็นผลึกของแผ่นฟิล์ม

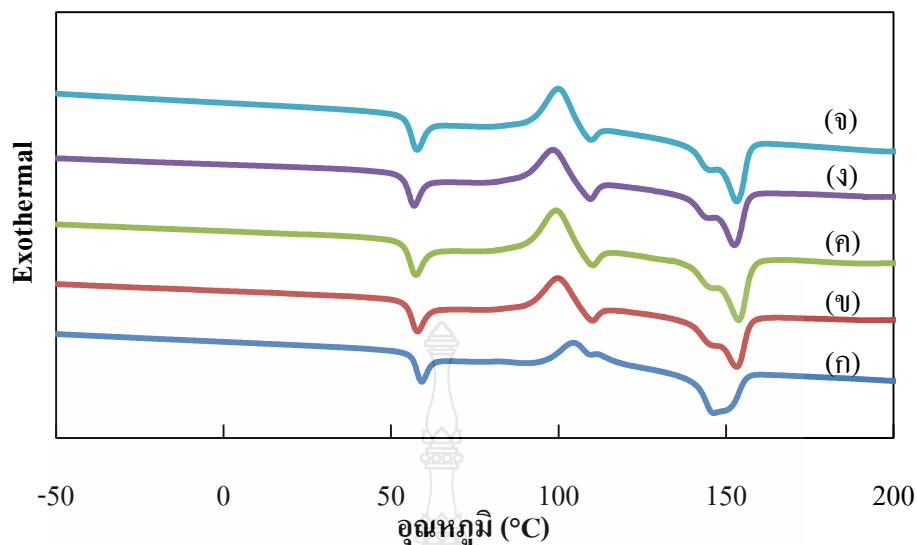
PLA90 ที่ผสม Com-ZnO ในปริมาณต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการเติม Com-ZnO เข้าไปช่วยให้เกิดผลึกได้เร็วขึ้น จึงส่งผลให้ร้อยละความเป็นผลึกสูงขึ้น

สำหรับแผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่มีการเติม 5%Ag/Com-ZnO พบว่า T_g ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ PLA90 ซึ่งผลดังกล่าวตรงกันข้ามกับในกรณีที่เติม Com-ZnO ที่มีค่า T_g เพิ่มขึ้น สำหรับ T_c พบว่าเมื่อเติม 5%Ag/Com-ZnO ลงไป ทำให้มีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเกิดผลึกได้เร็วขึ้น ขณะที่ T_m มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA90 สำหรับร้อยละความเป็นผลึกของแผ่นฟิล์ม PLA90 ที่ผสม 5%Ag/Com-ZnO ในปริมาณต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการเติม 5%Ag/Com-ZnO เข้าไปช่วยให้เกิดผลึกได้เร็วขึ้น จึงส่งผลให้ร้อยละความเป็นผลึกสูงขึ้น



รูปที่ 4.33 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นฟิล์ม (ก) PLA90, (ข) PLA90-Com-ZnO-1,

(ค) PLA90-Com-ZnO-2, (ง) PLA90-Com-ZnO-3 และ (จ) PLA90-Com-ZnO-4



รูปที่ 4.34 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นฟิล์ม (ก) PLA90, (ข) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-1, (ค) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-2, (ง) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-3 และ (จ) PLA90-5%Ag/Com-ZnO-4

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์ม PLA90 และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่มีการเติม Com-ZnO หรือ 5%Ag/Com-ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตัวอย่าง	Temperature (°C)			%Crystallinity
	T _g	T _c	T _m	
PLA90	55.53	104.41	145.97	12.75
PLA90-Com-ZnO-1	61.00	99.17	151.50	15.48
PLA90-Com-ZnO-2	56.40	98.50	152.33	13.01
PLA90-Com-ZnO-3	52.92	97.17	151.50	28.50
PLA90-Com-ZnO-4	55.97	97.50	152.33	13.78
PLA90-5%Ag/Com-ZnO-1	53.57	99.76	152.74	15.97
PLA90-5%Ag/Com-ZnO-2	53.01	99.28	153.35	13.18
PLA90-5%Ag/Com-ZnO-3	52.49	98.28	152.07	13.74
PLA90-5%Ag/Com-ZnO-4	53.40	99.95	152.68	16.14

4.7.4 ผลการทดสอบสมบัติการต้านจุลชีพ

สำหรับผลการต้านจุลชีพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตนั้น เราได้ทำการเลือกแผ่นฟิล์มที่ตัวอย่าง PLA90-5%Ag/Com-ZnO-1 เนื่องจากมีสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาที่ใกล้เคียงกับแผ่นฟิล์ม PLA มากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น โดยนำมาทดสอบการต้านจุลชีพตามมาตรฐาน JIS Z2801 พบว่าแผ่นฟิล์มคอมโพสิตนั้นสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งชนิดแกรมบวกและแกรมลบดังตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงถึงจำนวนของเชื้อแบคทีเรียก่อนและหลังทดสอบ โดยแบคทีเรียชนิดแกรมลบ *E.coli* จำนวนเชื้อลดลงจาก 5.06 เหลือ 4.26 คัดเป็น %Reduction คือร้อยละ 15.83 และ *P.aeruginosa* จำนวนเชื้อลดลงจาก 5.01 เหลือ 2.23 คัดเป็น %Reduction คือร้อยละ 55.51 สำหรับแบคทีเรียชนิดแกรมบวก *S.aureus* จำนวนเชื้อลดลงจาก 5.47 เหลือ 0.00 คัดเป็น %Reduction คือร้อยละ 100 จากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าแผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่มีการเติม 5%Ag/Com-ZnO สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ทั้งชนิดแกรมบวกและแกรมลบ แต่ประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ อาจน้อยกว่าเมื่อเทียบกับผง 5%Ag/Com-ZnO เนื่องจากผง 5%Ag/Com-ZnO ที่อยู่ในฟิล์มคอมโพสิตมีปริมาณน้อยและยังกระจายตัวอยู่บนแผ่นฟิล์ม ทำให้ประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ ลดลง

ตารางที่ 4.7 จำนวนเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวกและแกรมลบที่มีอยู่บนแผ่นฟิล์มคอมโพสิตก่อนและหลังที่จะมีการทดสอบ

ตัวอย่าง	Log CFU/ml					
	Gram negative bacteria				Gram positive bacteria	
	<i>E.coli</i>		<i>P.aeruginosa</i>		<i>S.aureus</i>	
	0 h	24 h	0 h	24 h	0 h	24 h
PLA90-5%Ag/Com-ZnO	5.06±0.10	4.26±0.13	5.01±0.20	2.23±0.05	5.47±0.11	0.00±0.00

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การเตรียม ZnO ที่เคลือบผิวด้วยนาโนซิลเวอร์โดยใช้วิธีการออกซิเดชันของเบนซอกซาซีน ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้จดอนุสิทธิบัตรโดยคณะวิจัย ซึ่ง ZnO ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้ ZnO ที่เป็นเกรดอุตสาหกรรม (Com-ZnO) และเกรดอนุภาคนาโน (Nano-ZnO) โดยจะเคลือบอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณที่แตกต่างกัน (ร้อยละ 0.1, 0.5, 1 และ 5 โดยโมล) จากผลการทดลองพบว่า การใช้วิธีการดังกล่าวในการเตรียมอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะไม่ส่งผลกระทบต่อรูปร่าง และขนาดผลึกของ ZnO แต่จะมีผลทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเกาะตัวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์บนผิวของ ZnO อีกทั้งการเคลือบผิวด้วยนาโนซิลเวอร์ยังทำให้ Com-ZnO ที่มีราคาถูกมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการย่อยสลายสารสีย้อม Edicol tartrazine ที่ดีกว่า Nano-ZnO ที่มีราคาแพงกว่าด้วย ยิ่งไปกว่านั้น 5%Ag/Com-ZnO สามารถนำกลับมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้ใหม่ถึง 3 ครั้ง โดยมีประสิทธิภาพลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้การเคลือบผิว Com-ZnO ด้วยนาโนซิลเวอร์ในปริมาณเล็กน้อยยังส่งผลทำให้มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E. Coli* และ *P. aeruginosa*) ที่ดีขึ้นด้วย ในขณะที่ Nano-ZnO ที่มีราคาแพงกลับไม่มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อรา และแบคทีเรียเมื่อเทียบกับ Com-ZnO แต่อย่างไรก็ตามการเคลือบอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลงบนผิวของ Nano-ZnO ก็จะช่วยให้ Nano-ZnO มีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อได้ ดังนั้นเราจึงเลือก Com-ZnO ที่ผ่านการเคลือบด้วยนาโนซิลเวอร์ ซึ่งมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพดีกว่ามาใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตสำหรับขั้นต่อไป

การเตรียมแผ่นฟิล์ม PLA/PBS ด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มแบบสกรูคู่ ซึ่งทำการผสม PBS ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสลดลง แต่ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PBS ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM ที่พบลักษณะการแตกหักแบบเหนียวที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBS แต่ยังคงพบอีกว่าในตัวอย่างที่มีการเติม PBS ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีลักษณะพื้นผิวรอยแตกหักที่เป็นเนื้อ

เดียวกันมากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด นอกจากนั้นสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA/PBS มีค่า T_g , T_c และ T_m ลดลงตามปริมาณของ PBS ที่เพิ่มขึ้น แต่ยังพบอีกว่าในตัวอย่างที่มีการเติม PBS ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีพิก T_m เกิดขึ้นสองพิก ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ส่วนในตัวอย่างอื่นๆ มีพิก T_m เกิดขึ้นเพียงพิกเดียวเท่านั้น สำหรับร้อยละความเป็นผลึกของแผ่นฟิล์ม PLA/PBS มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ PBS ดังนั้นเราจึงเลือกฟิล์ม PLA/PBS ที่มีอัตราส่วนของ PBS ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (PLA90) เพื่อใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตสำหรับขั้นต่อไป

การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตของ PLA90-Com-ZnO กับ PLA90-5%Ag/Com-ZnO ด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มแบบสกรูคู่ ซึ่งทำการผสม Com-ZnO หรือ 5%Ag/Com-ZnO ในอัตราส่วน 1, 2, 3 และ 4 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ จากผลการทดลองพบว่าแผ่นฟิล์มคอมโพสิตของ PLA90-Com-ZnO และ PLA90-5%Ag/Com-ZnO มีความต้านทานต่อแรงดึงและร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดที่ลดลง เมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์ม PLA90 แต่โมดูลัสของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตทั้งสองชนิดที่ได้หลังจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ซึ่งพบช่องว่างและอนุภาคของสารเติมแต่งที่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่บนพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้เกิดความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์เมทริกซ์กับอนุภาคของสารเติมแต่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงนั่นเอง สำหรับสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตทั้งสองชนิดพบว่า T_m มีค่าเพิ่มขึ้น T_c มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์ม PLA90 แต่ T_g ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต PLA90-Com-ZnO จะเพิ่มสูงขึ้น แต่แผ่นฟิล์มคอมโพสิตของ PLA90-5%Ag/Com-ZnO นั้นจะมีค่าลดลง สำหรับร้อยละความเป็นผลึกของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตทั้งสองชนิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มที่ไม่มีการเติม Com-ZnO หรือ 5%Ag/Com-ZnO นอกจากนั้นจากการทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพบว่า PLA90-5%Ag/Com-ZnO-1 มีสมบัติเชิงกลดีและใช้ปริมาณสารเติมแต่งน้อยที่สุด จึงเลือกแผ่นฟิล์มคอมโพสิตดังกล่าวมาทดสอบสมบัติการต้านจุลชีพ พบว่าสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งสองชนิด โดยแบคทีเรียชนิดแกรมลบ *E.coli* และ *P.aeruginosa* สามารถยับยั้งได้ถึงร้อยละ 15.83 และ 55.51 ตามลำดับ ในขณะที่แบคทีเรียชนิดแกรมบวก *S.aureus* สามารถยับยั้งได้ถึงร้อยละ 100 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าผง 5%Ag/Com-ZnO สามารถนำมาใช้เป็น

สารเติมแต่งในแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์สำหรับทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเป็ผลึก (Nucleating agent) และสารต้านเชื้อจุลชีพ (Antimicrobial agent) ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะเพิ่มสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสมบัติการต้านจุลชีพของ ZnO ด้วยนาโนซิลเวอร์และใช้เป็นสารเติมแต่งชนิดใหม่ในแผ่นฟิล์ม PLA/PBS จากปัญหาที่พบคือความไม่เข้ากันระหว่างอนุภาคของสารเติมแต่งกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มลดลง ดังนั้นควรมีการปรับปรุงความเข้ากันระหว่างทั้ง 2 เฟส เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและเหมาะกับการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ



บรรณานุกรม

- [1] J. M. Raquez, Y. Habibi, M. Murariu and P. Dubois, "Polylactide (PLA)-based nanocomposites," *Progress in Polymer Science*, vol. 38, pp. 1504-1542, Jun 2013.
- [2] Y. I. Choi, H. J. Jung, W. G. Shin and Y. Sohna, "Band gap-engineered ZnO and Ag/ZnO by ball-milling method and their photocatalytic and Fenton-like photocatalytic activities," *Applied Surface Science*, vol. 356, pp. 615-625, Aug 2015.
- [3] S. Kuriakose, V. Choudhary, B. Satpati and S. Mohapatra, "Enhanced photocatalytic activity of Ag-ZnO hybrid plasmonic nanostructures prepared by a facile wet chemical method," *Beilstein Journal Nanotechnology*, vol. 5, pp. 639-650, May 2014.
- [4] S. M. Dizaj, F. Lotfipour, M. B. Jalali, M. H. Zarrintan and K. Adibkia, "Antimicrobial activity of the metals and metal oxide nanoparticles," *Materials Science and Engineering*, vol. C 44, pp. 278-274, Aug 2014.
- [5] M. Murariu, A. Doumbia, L. Bonnaud, A. L. Dechief, Y. Paint, M. Ferreira, C. Campagne, E. Devaux and P. Dubois, "High-performance polylactide/ZnO nanocomposites designed for films and fibers with special end-use properties," *Biomacromolecules*, vol. 12, pp. 1762-1771, Apr 2011.
- [6] B. Pavel, K. Ivo, M. Michal, S. Tomas and P. Miroslav, "Microwave assisted synthesis of Ag-ZnO particles and their antibacterial properties," *Mathematical Methods and Techniques in Engineering and Environmental Science*, pp.341-346, Nov 2011.
- [7] H. Liua, Y. Hua, Z. Zhangb, X. Liu, H. Jia and B. Xub, "Synthesis of spherical Ag/ZnO heterostructural composites with excellent photocatalytic activity under visible light and UV irradiation," *Applied Surface Science*, vol. 355, pp. 644-652, July 2015.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [8] A. Bhatia, R. K.Gupta, S. N. Bhattacharya and H.J. Choi, “Compatibility of biodegradable poly (lactic acid) (PLA) and poly (butylene succinate) (PBS) blends for packaging application,” Korea-Australia Rheology Journal, vol. 19, pp. 125-131, 2007.
- [9] E. Hassan, Y. Wei, H. Jiao and Y. Muhuo, “Dynamic mechanical properties and thermal stability of poly(lactic acid) and poly(butylene succinate) blends composites,” Journal of Fiber Bioengineering and Informatics, pp. 85-94, 2013.
- [10] J. Jayaramudu, K. Das, M. Sonakshi, G. S. M. Reddy, B. Aderibigbe, R. Sadiku and S. S. Ray, “Structure and properties of highly toughened biodegradable polylactide/ZnO biocomposite films,” International Journal of Biological Macromolecules, vol. 64, pp. 428– 434, Dec 2014.
- [11] R. Pantani, G. Gorrasi, G.Vigliotta, M. Murariu and P. Dubois, “PLA-ZnO nanocomposite films: water vapor barrier properties and specific end-use characteristics,” European Polymer Journal, vol. 49, pp. 3471–3482, Aug 2013.
- [12] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ. (2553, มีนาคม). พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics), สืบค้นจาก <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR12.pdf>
- [13] บริษัท นาโน แมททีเรียลส์ เทคโนโลยี, Nano materials technology. (2551). สืบค้นจาก <http://www.nanomaterials.co.th/index2.asp?CType=3>
- [14] H. Morkoç and Ü. Özgür, “General properties of ZnO,” Materials and Device Technology, pp. 1-75, 2009.
- [15] Silver Nano อีกหนึ่งอาวุธกำจัดเชื้อโรค. (2553). สืบค้นจาก <http://www.thelittlegymrama3.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=538690877&Nt>
type=3

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [16] ณัฐพล จิระรุ่งเสถียรและคณะ, ซิลเวอร์นาโน. (2552). สืบค้นจาก <http://nanotech.me.blogspot.com/2009/12/silver-nano.html>
- [17] M. Guzman, J. Dille and S. Godet, “Synthesis and antibacterial activity of silver nanoparticles against gram-positive and gram-negative bacteria,” *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, vol. 8, pp. 37–45, May 2012.
- [18] สรรค์ จิตไคร์ครวญ, “การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไททานเนียมไดออกไซด์,” *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*, ปีที่ 57, ฉบับที่ 179 (มกราคม) : 21-24. 2552.
- [19] ชลดา ชีรการุณวงศ์, “ไททานเนียมไดออกไซด์: วัสดุฆ่าเชื้อแบคทีเรีย,” *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, ปีที่ 40, ฉบับที่ 4 (ตุลาคม-ธันวาคม) : 1049-1058. 2555.
- [20] ชลดา ชีรการุณวงศ์, “ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์,” *วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน) : 62-73. 2554.
- [21] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ. (2553, พฤษภาคม). แบคทีเรียในอาหาร (Bacteria in food), สืบค้นจาก <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR19.pdf>
- [22] B. Panyad, “Modification of mechanical properties and flame retardancy of polybutylene succinate for using in electrical housing,” *Master Thesis, Department of materials science and engineering, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand*, 2011.
- [23] S.K. Esthappan, “Polypropylene/metal oxide nanocomposites: fiber spinning and evaluation,” *Ph.D Thesis, Department of polymer science and rubber technology, Cochin University of Science and Technology, Kerala, India*, 2011.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [24] J.Z. Laing, R.K.Y. Li and S.C. Tjong, “Effect of pressure and temperature on the melt density and the melt flow rate of LDPE and glass bead-filled LDPE composite,” Journal of materials processing technology, Vol. 91, pp. 167-171, 1999.





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆ



ก-1 ผลการทดสอบสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ตารางผนวก ก.1.1 ค่าการย่อยสลายสีของ Com-ZnO

เวลา (min)	0	15	30	45	60
C/C_0	1	0.975	0.950	0.875	0.825

ตารางผนวก ก.1.2 ค่าการย่อยสลายสีของ 0.1%Ag/Com-ZnO

เวลา (min)	0	15	30	45	60
C/C_0	1	0.350	0.125	0.075	0.025

ตารางผนวก ก.1.3 ค่าการย่อยสลายสีของ 0.5%Ag/Com-ZnO

เวลา (min)	0	15	30	45	60
C/C_0	1	0.0375	0.025	0.0175	0.0125

ตารางผนวก ก.1.4 ค่าการย่อยสลายสีของ 1%Ag/Com-ZnO

เวลา (min)	0	15	30	45	60
C/C_0	1	0.1125	0.0875	0.050	0.025

ตารางผนวก ก.1.5 ค่าการย่อยสลายสีของ 5%Ag/Com-ZnO

เวลา (min)	0	15	30	45	60
C/C_0	1	0.27175	0.14825	0.05825	0.04575

ตารางผนวก ก.1.6 ค่าการย่อยสลายสีของ Nano-ZnO

เวลา (min)	0	15	30	45	60
C/C_0	1	0.375	0.1125	0.075	0.050

ตารางผนวก ก.1.7 ค่าการย่อยสลายสีของ 0.1%Ag/Nano-ZnO

เวลา (min)	0	15	30	45	60
C/C ₀	1	0.375	0.1375	0.075	0.050

ตารางผนวก ก.1.8 ค่าการย่อยสลายสีของ 0.5%Ag/Nano-ZnO

เวลา (min)	0	15	30	45	60
C/C ₀	1	0.1625	0.100	0.075	0.0675

ตารางผนวก ก.1.9 ค่าการย่อยสลายสีของ 1%Ag/Nano-ZnO

เวลา (min)	0	15	30	45	60
C/C ₀	1	0.125	0.075	0.050	0.025

ตารางผนวก ก.1.10 ค่าการย่อยสลายสีของ 5%Ag/Nano-ZnO

เวลา (min)	0	15	30	45	60
C/C ₀	1	0.375	0.275	0.125	0.025

ตารางผนวก ก.1.11 ค่าการย่อยสลายสีของ 5%Ag/Com-ZnO ครั้งที่ 2

เวลา (min)	0	15	30	45	60
C/C ₀	1	0.65425	0.39575	0.25675	0.16175

ตารางผนวก ก.1.12 ค่าการย่อยสลายสีของ 5%Ag/Com-ZnO ครั้งที่ 3

เวลา (min)	0	15	30	45	60
C/C ₀	1	0.63675	0.43825	0.33675	0.19575

ก-2 ผลการวิเคราะห์สมบัติการไหล

ตารางผนวก ก.2.1 ค่าอัตราการไหลของ PLA

ชั้นที่	1	2	3	4	5
น้ำหนัก (g)	0.047	0.045	0.045	0.045	0.048

ตารางผนวก ก.2.2 ค่าอัตราการไหลของ PLA95

ชั้นที่	1	2	3	4	5
น้ำหนัก (g)	0.049	0.049	0.050	0.051	0.052

ตารางผนวก ก.2.3 ค่าอัตราการไหลของ PLA90

ชั้นที่	1	2	3	4	5
น้ำหนัก (g)	0.061	0.055	0.056	0.062	0.060

ตารางผนวก ก.2.4 ค่าอัตราการไหลของ PLA85

ชั้นที่	1	2	3	4	5
น้ำหนัก (g)	0.064	0.066	0.064	0.063	0.065

ตารางผนวก ก.2.5 ค่าอัตราการไหลของ PLA80

ชั้นที่	1	2	3	4	5
น้ำหนัก (g)	0.080	0.070	0.084	0.084	0.094

ตารางผนวก ก.2.6 ค่าอัตราการไหลของ PLA90-Com-ZnO-1

ชั้นที่	1	2	3	4	5
น้ำหนัก (g)	0.103	0.102	0.105	0.101	0.104

ตารางผนวก ก.2.7 ค่าอัตราการไหลของ PLA90-Com-ZnO-2

ชั้นที่	1	2	3	4	5
น้ำหนัก (g)	0.141	0.147	0.142	0.142	0.143

ตารางผนวก ก.2.8 ค่าอัตราการไหลของ PLA90-Com-ZnO-3

ชั้นที่	1	2	3	4	5
น้ำหนัก (g)	0.189	0.180	0.184	0.188	0.182

ตารางผนวก ก.2.9 ค่าอัตราการไหลของ PLA90-Com-ZnO-4

ชั้นที่	1	2	3	4	5
น้ำหนัก (g)	0.215	0.195	0.262	0.253	0.214

ตารางผนวก ก.2.10 ค่าอัตราการไหลของ PLA90-5%Ag/Com-ZnO-1

ชั้นที่	1	2	3	4	5
น้ำหนัก (g)	0.120	0.138	0.133	0.122	0.142

ตารางผนวก ก.2.11 ค่าอัตราการไหลของ PLA90-5%Ag/Com-ZnO-2

ชั้นที่	1	2	3	4	5
น้ำหนัก (g)	0.154	0.158	0.158	0.163	0.173

ตารางผนวก ก.2.12 ค่าอัตราการไหลของ PLA90-5%Ag/Com-ZnO-3

ชั้นที่	1	2	3	4	5
น้ำหนัก (g)	0.197	0.194	0.192	0.193	0.175

ตารางผนวก ก.2.13 ค่าอัตราการไหลของ PLA90-5%Ag/Com-ZnO-4

ชั้นที่	1	2	3	4	5
น้ำหนัก (g)	0.200	0.226	0.241	0.256	0.195

ก-3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางผนวก ก.3.1 ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PLA

ชั้นที่	1	2	3	4	5
Tensile strength (MPa)	64.30	67.50	56.80	42.50	55.00
Elongation at break (%)	9.28	12.91	10.13	10.86	8.16
Modulus (MPa)	1897	2101	1801	1705	1981

ตารางผนวก ก.3.2 ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PLA95

ชั้นที่	1	2	3	4	5
Tensile strength (MPa)	51.80	53.60	54.80	57.70	50.00
Elongation at break (%)	25.40	29.40	20.20	19.05	21.40
Modulus (MPa)	2125	1578	1601	1594	2099

ตารางผนวก ก.3.3 ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PLA90

ชั้นที่	1	2	3	4	5
Tensile strength (MPa)	38.04	52.71	57.70	51.75	53.13
Elongation at break (%)	51.04	55.04	56.96	51.60	54.40
Modulus (MPa)	1543	1692	1823	1804	2074

ตารางผนวก ก.3.4 ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PLA85

ชั้นที่	1	2	3	4	5
Tensile strength (MPa)	44.00	54.80	51.80	51.50	49.40
Elongation at break (%)	84.60	75.20	69.80	71.00	73.00
Modulus (MPa)	1400	1265	1333	1551	2015

ตารางผนวก ก.3.5 ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PLA80

ชั้นที่	1	2	3	4	5
Tensile strength (MPa)	43.28	47.92	43.39	47.68	51.79
Elongation at break (%)	81.80	117.40	76.80	81.20	106.80
Modulus (MPa)	1151	1867	1333	1232	1574

ตารางผนวก ก.3.6 ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PLA90-Com-ZnO-1

ชั้นที่	1	2	3	4	5
Tensile strength (MPa)	41.72	46.41	37.50	45.21	38.13
Elongation at break (%)	57.10	44.90	55.60	50.40	46.10
Modulus (MPa)	2083	1518	2494	2876	2568

ตารางผนวก ก.3.7 ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PLA90-Com-ZnO-2

ชั้นที่	1	2	3	4	5
Tensile strength (MPa)	47.68	32.68	45.18	45.21	38.13
Elongation at break (%)	38.72	31.40	31.28	32.08	30.72
Modulus (MPa)	2966	2484	2639	2932	2755

ตารางผนวก ก.3.8 ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PLA90-Com-ZnO-3

ชั้นที่	1	2	3	4	5
Tensile strength (MPa)	43.75	37.50	40.54	42.32	36.04
Elongation at break (%)	18.70	22.90	31.20	23.60	35.20
Modulus (MPa)	2697	2834	2950	2872	3011

ตารางผนวก ก.3.9 ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PLA90-Com-ZnO-4

ชั้นที่	1	2	3	4	5
Tensile strength (MPa)	39.06	39.53	45.89	40.54	38.13
Elongation at break (%)	20.90	16.10	17.10	15.50	16.30
Modulus (MPa)	2685	2593	2845	2955	3161

ตารางผนวก ก.3.10 ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PLA90-5%Ag/Com-ZnO-1

ชั้นที่	1	2	3	4	5
Tensile strength (MPa)	31.25	28.57	36.25	43.06	39.58
Elongation at break (%)	35.20	39.40	19.40	36.80	21.40
Modulus (MPa)	2945	2745	2741	2089	3058

ตารางผนวก ก.3.11 ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PLA90-5%Ag/Com-ZnO-2

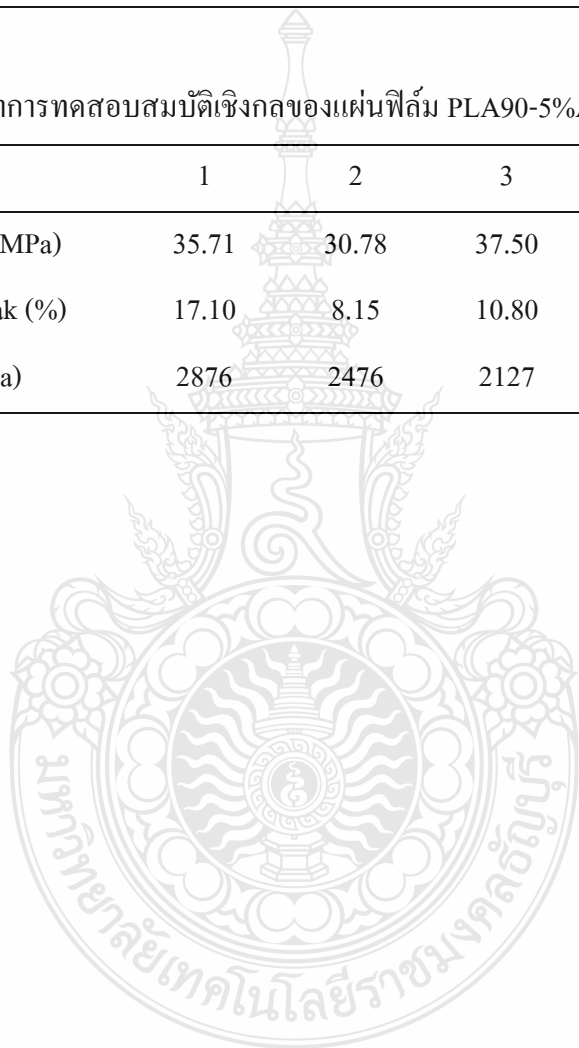
ชั้นที่	1	2	3	4	5
Tensile strength (MPa)	41.09	24.08	34.38	29.82	34.79
Elongation at break (%)	31.60	24.08	21.60	29.20	31.60
Modulus (MPa)	2157	2221	2119	2830	2566

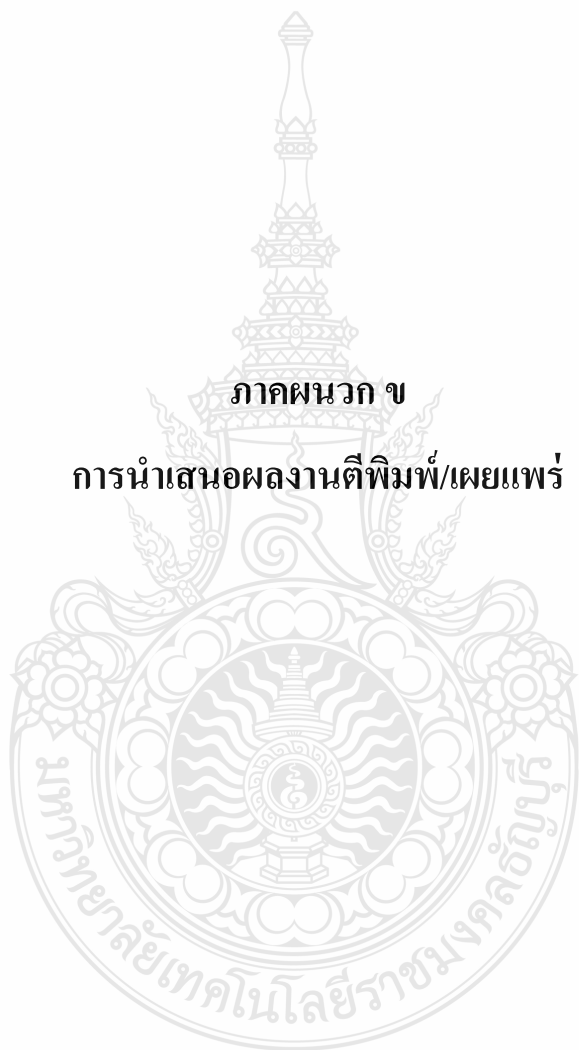
ตารางผนวก ก.3.12 ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PLA90-5%Ag/Com-ZnO-3

ชั้นที่	1	2	3	4	5
Tensile strength (MPa)	34.38	34.84	38.47	33.28	26.25
Elongation at break (%)	19.00	13.80	18.80	13.60	19.90
Modulus (MPa)	2561	2289	2451	2476	2367

ตารางผนวก ก.3.13 ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PLA90-5%Ag/Com-ZnO-4

ชั้นที่	1	2	3	4	5
Tensile strength (MPa)	35.71	30.78	37.50	20.31	33.91
Elongation at break (%)	17.10	8.15	10.80	11.50	9.13
Modulus (MPa)	2876	2476	2127	2104	2403





ภาคผนวก ข

การนำเสนอผลงานตีพิมพ์/เผยแพร่



International Workshop for East Asian Young Rheologists

Hosted by Faculty of Science at Sriracha, Kasetsart University, Thailand

Conference Book

8–11 February 2017

Ambassador City Jomtien Pattaya, Chonburi, Thailand

Supported by



Faculty of Science at Sriracha
Kasetsart University Sriracha Campus





Conference book

The 12th International Workshop for East Asian Young Rheologists

• To celebrate the 20th Anniversary of Faculty of Science at Sriracha, Kasetsart University.

February 8-11, 2017

Venue: Ambassador City Jomtein Pattaya, Chonburi, Thailand.

Organized by:

Faculty of Science at Sriracha, Kasetsart University, Chonburi, Thailand.

Supported by:



Acknowledgement for the Sponsors of IWEAYR-12



Kasetsart University



The Thailand Convention and Exhibition Bureau



Coax Group Corporation Co., Ltd.



Thaioil Public Company Limited



IRPC Public Company Limited



Crest (Thailand) Co., Ltd.



Chemoscience (Thailand) Co., Ltd.



The Science and Educational Co., Ltd.



BUCHI (Thailand) Co., Ltd.

Local Advisory Committees

Korchoke Chantawarangul, Vice President for Sriracha Campus, Kasetsart University

Ugrit Manujantararat, Director of the Office of Sriracha Campus, Kasetsart University

Somchit Palakas, Dean of Faculty of Science at Sriracha, Kasetsart University

International Scientific Committees

Hiroshi Watanabe, Kyoto University, Japan

Yoshiaki Takahashi, Kyushu University, Japan

Takashi Taniguchi, Kyoto University, Japan

Masataka Sugimoto, Yamagata University, Japan

Yuichi Masubuchi, Nagoya University, Japan

Kyung Hyun Ahn, Seoul National University, Korea

Kyu Hyun, Pusan National University, Korea

Florian Stadler, Shenzhen University, China

Wei Yu, Shanghai Jiao Tong University, China

Tongsai Jannongkan, Kasetsart University, Thailand

Apirat Laobuthee, Kasetsart University, Thailand

Supraanee Kaewpirom, Burapha University, Thailand

Natthida Rakkapao, Prince of Songkla University, Thailand

Santi Meansiri, Suranaree University of Technology, Thailand

Local Organizing Committees

Somchit Palakas	Narongrit Kaewbanjak
Panya Khaenamkaew	Methee Juntaropakorn
Weeraphan Issavasopon	P. Pungboon Pansila
Janpen Tangjitjaroenkun	Suwaporn luangkamin
Sukanya Yimngam	Tongsai Jannongkan
Sopanat Kongsriprapan	Juthatip Ramrueng
Miro Lethonen	Sutassana Na Phattalung
Laddawan Puthong	Panor Ruaysungnern
Wissawat Sakulsaknimit	Sunan Kitjaruwankul
Pornchanok Sisai	Chonlada Chalermroob
Janjira Chinto	Jarewat Jukmune
Malinee Promkatkaew	Cholada Komintarachat
Thanit Tangcharoen	Chaiyasit Tabtintong
Krikk Wongsontam	Worasit Palkawong Na-Ayutaya
Somphop Sakhondi	Udomporn Tungkasiri
Wantsara Pha-Aroon	Tanabat Promjun
Nuttapong Kajang	Tanapop Sondee
Arnon Phongrusamepane	Tosaporn Sai-Yim
Jaruwan Suraseing	Mana Oonkeaw
Narinwat Pabpunkul	Panutda Roop-ngam
Pattarawadee Sumthong Nakmee	Pompan Panpattapong
Pailin Srisuratsiri	Apinya Chanapim
Suree Thongwanitmiyom	Supaporn Baiya
Ong-ard Tara	Konbongkhod Boonjalearn
Sanran Namkhot	Nuttapong Krajang
Maneerat Jansaeng	Anwaraporn Suramitr
Jitrada Sukprasong	Shutimon Teansai
Supaporn Dangrikaew	Sompong Khangthong
Jammong Tanyasit	Wilawan Shukaew
Ketsarin Chantarasunthon	

Content

O1:	Phase Separation and Transformation of Polymer Nanostructures via Imprinting Methods. Paritat Muanchan Takashi Kyotani and Hiroshi Ito (Yamagata University, Japan).....	1
O2:	Evaluation of the Degree of Dispersion for Polypropylene nanocomposites with Large Amplitude Oscillatory Shear Measurement via FT-Rheology. Minguen Kim and Kyu Hyun (Pusan National University, Korea).....	5
O3:	Interrelation between structure and property of electric field-induced graphene networks in poly (lactic acid). Oh Min Kwon, Hiroshi Watanabe, Kyung Hyun Ahn and Seung Jong Lee (Seoul National University, Korea).....	7
O4:	ZnO Surface Modification by Nano-Silver Coating via Benzoxazine Oxidation to Enhance Photocatalytic Activity and Antimicrobial Property. Kankavee Sukthavorn, Nollapan Nootsuwan, Suchada Jongrungruangchok, Nattamon Koonsaeng, Apirat Laobuthee and Chatchai Veranitisagul. (Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand).....	11
O5:	Chemical Gels Cross-linked by Reversible Covalent Bonds: Toward Changes in Network Sizes and Self-healing Materials. Yoshifumi Amamoto, Hideyuki Otsuka, Atsushi Takahara and Krzysztof Matyjaszewski (Nagoya University, Japan).....	16
O6:	Phenol Adsorption On Zeolite NaY Synthesized From Rice Husk Silica. Jittima Kulawong and Sittichai Kulawong (Vongchavalitkul University, Thailand).....	20
O7:	Quantifying Dispersion of Spherical Nanoparticles in Polymer Nanocomposites by Rheology Analysis. Wei You, Wei Yu and Chixing Zhou (Shanghai Jiao Tong University, China).....	24
O8:	Slip and Roughness at a ETFE/PS Interface during Coextrusion. Takuya Ito, Sathish K. Sukumaran and Masataka Sugimoto (Yamagata University, Japan).....	27

ZnO Surface Modification by Nano-Silver Coating via Benzoxazine Oxidation to Enhance Photocatalytic Activity and Antimicrobial Property

Kankavee Sukthavorn¹, Nollapan Nootsuwan², Suchada Jongrungruangchok³,
Nattamon Koonsaeng⁴, Apirat Laobuthee² and Chatchai Veranitisagul^{1,*}

¹Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand

²Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

³Department of Pharmaceutical Chemistry, Faculty of Pharmacy, Rangsit University, Pathumthani 12000, Thailand

⁴Department of Chemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand
(*chatchai.v@en.rmutt.ac.th)

Abstract: This research aims to prepare nano-silver coated ZnO from two different types of zinc oxide (Com-ZnO and Nano-ZnO) via benzoxazine oxidation. Various silver amounts (0.1, 0.5, 1 and 5 mol%) coated on both types of ZnO were prepared to study photocatalytic activity for degradation of Edicol tartrazine dye and antimicrobial property. All Ag/ZnO powders, especially for 0.5%Ag/Com-ZnO and 1%Ag/Nano-ZnO, showed higher photocatalytic activity than both types of ZnO in 15 min. In addition, Ag/ZnO showed antimicrobial property for fungus (*C.albicans*) and all of gram positive bacteria (*S.aureus* and *B.subtilis*) and gram negative bacteria (*E.coli* and *P.aeruginosa*).

Keywords: Zinc oxide, Silver nanoparticle, Photocatalytic activity, Antimicrobial property

1. Introduction

Because of high quantum efficiency, high redox potential, superior physical and chemical stability, non-toxicity and low cost [1-3], ZnO is an interesting material for using as a photocatalyst to transform toxic and harmless chemicals [1,4]. However, pure ZnO has not provided a sufficient catalytic performance to enhance the performance of pure ZnO, doping with Ag on ZnO surface has been focused [4-6]. Recently, our group has proposed 3,4-dihydro-1,3-2H-benzoxazines as a novel one-electron donor for silver(I) ion and patented a new process for nano-silver coating on various surfaces via oxidation of benzoxazine monomer [7]. This process offers many advantages such as simple, low processing temperature and short time. Moreover, the nano-silver formed also shows the remarkable property as antimicrobial activity. Therefore, in this work, the obtained ZnO coated nano-silver from our process has been expected to enhance photocatalytic activity as well as antimicrobial property. In addition, two types of ZnO (commercial and nano-size grades: Com-ZnO and Nano-ZnO) were used as supports for surface modification

to compare the photocatalytic activity and antimicrobial property.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

Zinc oxide (commercial grade, Com-ZnO) was purchased from Global Chemical Co., Ltd. (Thailand). Zinc oxide (nano-size grade, Nano-ZnO) was purchased from Nanoscience Technology Co., Ltd. (Thailand). Silver nitrate (AgNO₃, Analytical reagent grade) was purchased from Turupati Industries (India). Dichloromethane (CH₂Cl₂, Commercial grade) was purchased from Ajax (Australia). 3,4-Dihydro-3,6-dimethyl-1,3-2H-benzoxazine was synthesized as a reducing agent for silver(I) ion according to Thai patent No. 9717. Edicol tartrazine dye was purchased from East Asiatic Company (Thailand).

2.2 Synthesis of nano-silver coated ZnO (Ag/ZnO)

Various amount of nano-silver as 0.1, 0.5, 1 and 5 mol% were coated on two grades of ZnO (Com-ZnO and Nano-ZnO) used as supports. The method for nano-silver coating was used according to Thai patent No. 9717.

2.3 Characterization

The morphology of the powders was investigated by scanning electron microscope (Philips, XL30) with beam acceleration voltage at 5 kV. The samples were sputter coated with gold to increase the conductivity.

BET specific surface area analysis using nitrogen as adsorption-desorption was done by using Autosorb 1 MP, Quantachrome. Each powder sample was dried at 200°C and degassed for 4 h before testing. The particle size was calculated by $D_{BET} = 6 \times 10^3 / d_h S_{BET}$, when D_{BET} is particle size (nm), S_{BET} is specific surface area (m^2/g) and d_h is the theoretical density of materials (g/cm^3).

The crystalline structure of all the powders was carried out using Phillips X-Pert-MPD X-ray diffractometer with scanning rate 0.02°/min in 2θ range of 10-90°, using a $CuK\alpha$ radiation, operating at 40 kV and 30 mA. The peak width at half maximum in the XRD peaks was used to determine the crystallite size by Scherrer equation: $D_{XRD} = 0.94\lambda / \beta_{1/2} \cos \theta$, where $\lambda=0.154$ nm, the X-ray wavelength (λ) is full width at half maximum and θ is Bragg's diffraction angle.

2.4 Photocatalytic activity of ZnO and Ag/ZnO

0.10 g of each sample (ZnO and Ag/ZnO powders) was dispersed into 30.0 mL of 10.0 mg/L Edicol tartrazine dye. After irradiation under UV for 15 min, 5.0 mL of the mixture was collected and the catalysts were separated by centrifugation. The photocatalytic degradation was investigated using UV-visible absorption spectroscopy to measure the absorption of Edicol tartrazine dye at 427 nm.

2.5 Antimicrobial property of ZnO and Ag/ZnO

Antimicrobial property of ZnO and Ag/ZnO was studied by agar disc diffusion method. The bacteria used in this study were gram positive bacteria (*Staphylococcus aureus* ATCC 25923 and *Bacillus subtilis* ATCC 6633), gram negative bacteria (*Escherichia coli* ATCC 25922 and *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 2785) and

fungus (*Candida albicans* ATCC 10231). All bacteria were incubated at 37°C 24 h while the fungus was incubated at 30°C 48 h. The diameter of the inhibition zone will appear on the surface. The efficiency of antimicrobial property was evaluated from the inhibition zone area of each sample.

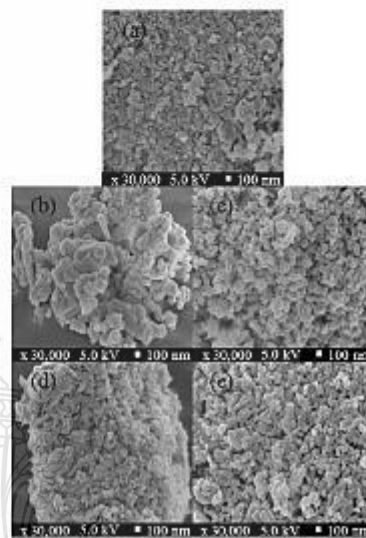


Figure 1. SEM images of (a) Com-ZnO (b) 0.1%Ag/Com-ZnO (c) 0.5%Ag/Com-ZnO (d) 1%Ag/Com-ZnO and (e) 5%Ag/Com-ZnO.

3. Results and Discussion

3.1 Morphology and structure

Figures 1 and 2 show SEM images of Com-ZnO, Ag/Com-ZnO, Nano-ZnO and Ag/Nano-ZnO powders with various ratios of silver nanoparticle. The morphology of silver coated ZnO powders is an irregular shape as same as pure ZnO powders. It can be concluded that the various silver nanoparticle coated ZnO will not affect significantly on the shape and morphology of the pure ZnO powders. However, the nano-silver particles coated on ZnO might increase the surface roughness resulting in the increment of the specific surface area (S_{BET}) and the decrement particle size (D_{BET}) of silver coated ZnO powders as shown in Table 1.

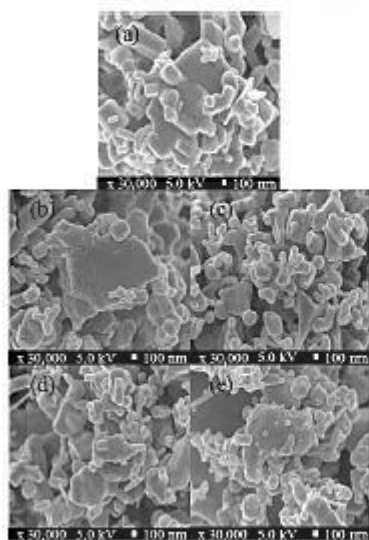


Figure 2. SEM images of (a) Nano-ZnO, (b) 0.1%Ag/Nano-ZnO (c) 0.5%Ag/Nano-ZnO (d) 1%Ag/Nano-ZnO and (e) 5%Ag/Nano-ZnO.

Table 1 Specific surface area (S_{BET}), Average particle size (D_{BET}) and crystallite size (D_{XRD}) of powders.

Samples	S_{BET} (m^2/g)	D_{BET} (nm)	D_{XRD} (nm)
Com-ZnO	4.3	624	37
5%Ag/Com-ZnO	7.4	477	37
Nano-ZnO	17.2	238	32
5%Ag/Nano-ZnO	22.5	146	32

Figures 3 and 4 show the XRD patterns of Com-ZnO, Ag/Com-ZnO, Nano-ZnO and Ag/Nano-ZnO powders. It was found that Com-ZnO and Nano-ZnO showed 2theta peaks at 31.71, 34.37, 36.19, 47.51, 56.53, 62.81, 66.33, 67.89, 69.03, 72.75, 76.91, 81.35 and 89.57°, respectively corresponding to JCPDS 01-0704. For the Ag/Com-ZnO and Ag/Nano-ZnO samples, new weak peaks were observed and assigned to cubic metallic Ag corresponding to JCPDS 01-0597. In addition, Nano-ZnO and Ag/Nano-ZnO samples exhibit slightly broader peaks than that of Com-ZnO and

Ag/Com-ZnO due to the small particle size of Nano-ZnO. From XRD patterns, the crystalline size of the Com-ZnO and Ag/Com-ZnO samples were calculated to be about 37 nm, while that crystalline size of the Nano-ZnO and Ag/Nano-ZnO samples were calculated to be about 32 nm. From XRD results (Table 1) and SEM images (Figures 1-2) indicated that the coating process did not affect the crystalline size of pure ZnO.

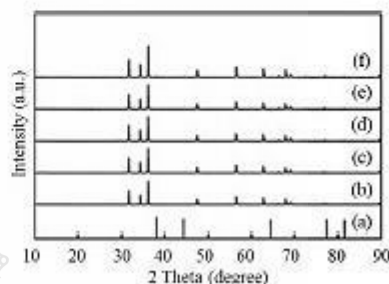


Figure 3. XRD patterns of (a) JCPDS 01-0597 (b) Com-ZnO (c) 0.1%Ag/Com-ZnO (d) 0.5%Ag/Com-ZnO (e) 1%Ag/Com-ZnO and (f) 5%Ag/Com-ZnO.

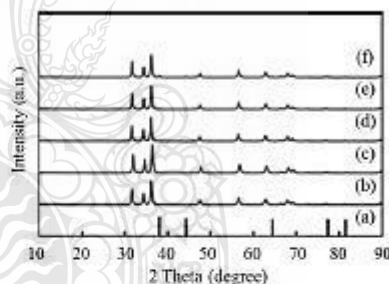


Figure 4. XRD patterns of (a) JCPDS 01-0597 (b) Nano-ZnO (c) 0.1%Ag/Nano-ZnO (d) 0.5%Ag/Nano-ZnO (e) 1%Ag/Nano-ZnO and (f) 5%Ag/Nano-ZnO.

3.2 Photocatalytic activity

Figure 5 shows the photocatalytic activity of Com-ZnO and Ag/Com-ZnO to degrade Edicol tartrazine dye under UV irradiation. The results showed that Com-ZnO did not show the photocatalytic activity as compared to all Ag/Com-ZnO samples providing the good photocatalytic activity in

15 min. This implied that coating the surface of ZnO with silver nanoparticle can improve photocatalytic activity of Com-ZnO since silver nanoparticle can reduce the recombination rate of electron-hole pairs on the surface of ZnO. However, the 0.5%Ag/Com-ZnO shows the highest photocatalytic activity as compared to others for the initial 15 min. This might be due to the increment of silver loading resulting in the agglomeration of silver particles on the Com-ZnO surface to decrease the photocatalytic activity. Meanwhile, the photocatalytic activity of Nano-ZnO was higher than Com-ZnO as shown in Figure 6. This might be due to smaller particle size and higher specific surface area of Nano-ZnO. For Ag/Nano-ZnO, it was found that 1%Ag/Nano-ZnO exhibited the highest photodegradation of Edicol tartrazine in 15 min. As compared with Ag/Nano-ZnO powders, 0.5%Ag/Com-ZnO still gave the highest photodegradation of Edicol tartrazine. Moreover, the cost of Com-ZnO is cheaper than Nano-ZnO. Therefore, by using the benzoxazine oxidation method for Ag coating, both types of ZnO could be modified to enhance the photocatalytic activity. In addition, by using Com-ZnO as a cheap support as compared to Nano-ZnO can reduce the catalyst cost in practice since the photocatalytic activity of Ag/Com-ZnO is much higher than that of Ag/Nano-ZnO.

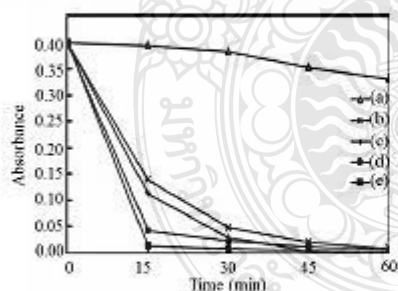


Figure 5. Photocatalytic activity of Com-ZnO samples with Ag (a) 0, (b) 0.1, (c) 5, (d) 1 and (e) 0.5 mol%, for degradation of Edicol tartrazine dye under UV irradiation.

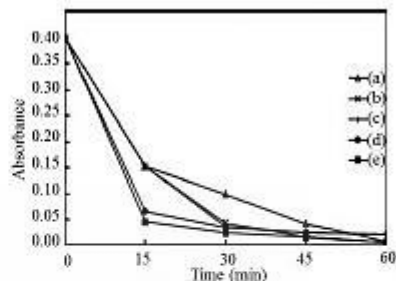


Figure 6. Photocatalytic activity of Nano-ZnO samples with Ag (a) 5, (b) 0.1, (c) 0, (d) 0.5 and (e) 1 mol% for degradation of Edicol tartrazine dye under UV irradiation.

3.3 Antimicrobial property

The antimicrobial property of ZnO and Ag/ZnO powders was shown in Table 2. The results showed that Com-ZnO exhibited the antimicrobial property especially for fungus (*C.albicans*) and gram positive bacteria (*S.aureus* and *B.subtilis*) while Ag/Com-ZnO provides inhibition zone for gram negative bacteria (*E.coli* and *P.aeruginosa*). The results indicated that by surface modification, Com-ZnO can be modified as Ag/Com-ZnO to enhance the antimicrobial property for all types microbial including fungus. In case of Nano-ZnO, it showed the antimicrobial property only for *S.aureus* and *E.coli* while Ag/Nano-ZnO provides the inhibition zone for fungus and all gram positive and negative bacteria. Although Ag/Nano-ZnO showed better antimicrobial properties than Ag/Com-ZnO, the cost of Nano-ZnO is still higher.

4. Conclusions

Two types of ZnO (Com-ZnO and Nano-ZnO) were successfully modified by nano-silver coating via benzoxazine oxidation. Various silver amounts on both types of ZnO did not affect the shape and crystalline size of ZnO as confirmed by SEM and XRD. However, ZnO with nano-Ag coating has a higher surface area as compared to pure ZnO. The results showed that by using the benzoxazine oxidation method for Ag coating, both types of ZnO could be modified to enhance the photocatalytic activity and

antimicrobial property. Moreover, this method can be used to modify low cost Com-ZnO with no photocatalytic activity and no anti-gram negative bacteria activity to

Ag/Com-ZnO with higher photocatalytic activity and antimicrobial property as compared with Nano-ZnO and Ag/Nano-ZnO.

Table 2 Antimicrobial property of ZnO and Ag/ZnO powders

Sample	Inhibition zone (mm)				
	<i>C.albicans</i> ATCC 10231	<i>S.aureus</i> ATCC 25923	<i>B.subtilis</i> ATCC 6633	<i>E.coli</i> ATCC 25922	<i>P.aeruginosa</i> ATCC 2785
Com-ZnO	24.40	9.70	11.60	8.15	8.50
0.1%Ag/Com-ZnO	13.40	9.40	11.60	12.70	8.20
0.5%Ag/Com-ZnO	-	9.20	10.80	8.75	10.10
1%Ag/Com-ZnO	-	9.10	10.50	10.50	10.80
5%Ag/Com-ZnO	-	8.70	-	7.00	8.20
Nano-ZnO	-	14.80	-	14.35	-
0.1%Ag/Nano-ZnO	14.30	15.45	14.20	15.00	13.20
0.5%Ag/Nano-ZnO	15.15	13.10	15.20	15.20	16.45
1%Ag/Nano-ZnO	16.90	14.40	16.45	16.80	17.40
5%Ag/Nano-ZnO	17.60	17.65	15.05	16.90	18.20

Acknowledgements

The authors would like to thanks Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI), Kasetsart University and Rajamangala University of Technology Thanyaburi for their financial supports.

References

- [1] Kuriakose S, Choudhary V, Satpati B and Mohapatra S. Enhanced photocatalytic activity of Ag-ZnO hybrid plasmonic nanostructures prepared by a facile wet chemical method. *Beilstein J. Nanotechnol.*, 5 (2014), 639-650.
- [2] Liu H, Hu Y, Zhang Z, Liu X, Jia H and Xu B. Synthesis of spherical Ag/ZnO heterostructural composite with excellent photocatalytic activity under visible light and UV irradiation. *Appl. Surf. Sci.*, 355 (2015), 644-652.
- [3] Zhang X, Wang Y, Hou F, Li H, Yang Y, Zhang X, Yang Y and Wang Y. Effect of Ag loading on structural and photocatalytic properties of flower-like ZnO microspheres. *Appl. Surf. Sci.*, 391 (2017), 476-483.
- [4] Choi YI, Jung HJ, Shin WG and Sohn Y. Band gap-engineered ZnO and Ag/ZnO by ball-milling method and their photocatalytic and Fenton-like photocatalytic activities. *Appl. Surf. Sci.*, 356 (2015), 615-625.
- [5] Yang Y, Li H, Hou F, Hu J, Zhang X and Wang Y. Facile synthesis of ZnO/Ag nanocomposite with enhanced photocatalytic properties under visible light. *Mater. Lett.*, 180 (2016), 97-100.
- [6] Pant B, Park M, Kim HY and Park SJ. Ag-ZnO photocatalyst anchored on carbon nanofibers: Synthesis, Characterization, and photocatalytic activities. *Synth. Met.*, 220 (2016), 533-537.
- [7] Kaewvilai A, Jongrungruangchok S, Wattanathana W, Veranitisagul C, Koonsaeng N and Laobuthee A. 3,4-Dihydro-1,3,2H-benzoxazines: Novel reducing agents through one electron donation mechanism and their application as the formation of nano-metallic silver coating. *Mater. Chem. Phys.*, 167 (2015), 9-13.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	ว่าที่ร้อยตรีกันต์กี สุขถาวร
วัน เดือน ปีเกิด	14 กรกฎาคม 2536
ที่อยู่	232/4 ถนนเพชรบุรี แขวงถนนเพชรบุรี เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2557-ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	088-2257956
E-mail	sukthavorn.k@gmail.com

