

ฟิล์มป้องกันสนิมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและโลหะ
Corrosion protection film of high density polyethylene
filled metals



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-014-045

ฟิล์มป้องกันสนิมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและโลหะ
Corrosion protection film of high density polyethylene
filled metals

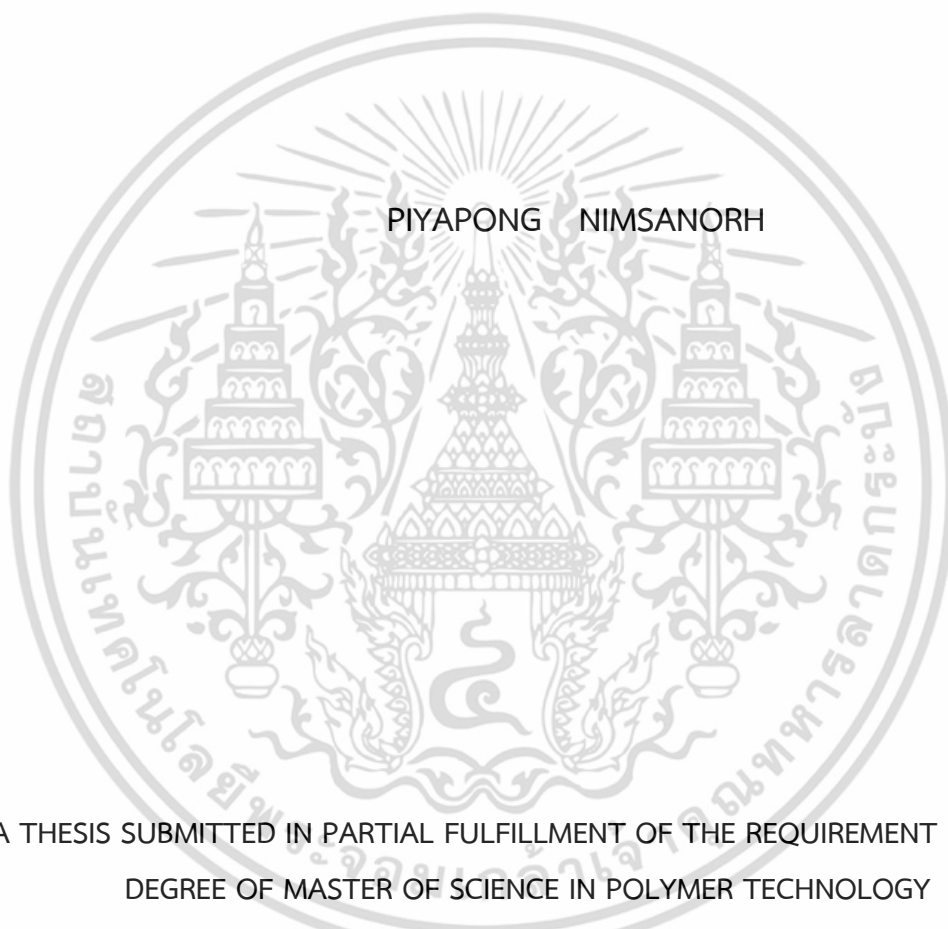


วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-014-045

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Corrosion Protection Film of High Density Polyethylene
filled Metals



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY

DEPARTMENT OF CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

KMITL-2017-SC-M-014-045

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT© 2017

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “ฟิล์มป้องกันสนิมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและโลหะ”
“CORROSION PROTECTION FILM OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE FILLED METALS”

ชื่อนักศึกษา นายปิยะพงษ์ นิมเสนาะ
รหัสประจำตัว 576050505
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รองศาสตราจารย์ ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ ประธานกรรมการ	
รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) ศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ	 
รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ พทหัสบดที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ.2560 เวลา 09.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 502 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภณี ธนะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
วันที่ 24 เดือน พ.ศ. 60

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ฟิล์มป้องกันสนิมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและโลหะ
ชื่อนักศึกษา	นายปิยะพงษ์ นิมเสนาะ
รหัสประจำตัว	57605050
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันได้มีการใช้เหล็กในการสร้างและพัฒนาสิ่งต่างๆ เช่น ใช้ในอุตสาหกรรม ใช้ก่อสร้าง ตึกและอาคารต่างๆ ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่ที่เกิดกับเหล็กที่นำมาใช้คือสนิม ทำให้เหล็กเกิดการกัดกร่อน และเสียหาย ในงานวิจัยนี้ได้คิดค้นวิธีป้องกันสนิมด้วยการห่อโลหะด้วยฟิล์มพอลิเมอร์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ผสมกับผงทองแดงหรือผงสังกะสี โดยใช้ผงโลหะในปริมาณต่างๆ คือ 1, 2, 3, 4, 5, และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทำการผสมในระบบปิด จากนั้นทำการตัดเม็ดใน เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว แล้วนำเม็ดที่ได้ป้อนเข้าสู่เครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ก่อนทำการผสม ผงทองแดงหรือสังกะสี ได้นำโลหะไปทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิว ด้วยกรดสแตียริกเพื่อให้สามารถ กระจายตัวและยึดเกาะกับฟิล์มพอลิเมอร์ได้ จากนั้นนำฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเติมผงทองแดงหรือสังกะสีลงในฟิล์มพอลิเมอร์ ทำให้ สมบัติเชิงกลมีค่าที่ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมผงทองแดงหรือสังกะสี การ ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูการกระจายตัวของผงทองแดงหรือผงสังกะสี พบว่า ผงทองแดงหรือผงสังกะสี สามารถกระจายตัวในฟิล์มพอลิเมอร์ได้ดี การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric analysis พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงทองแดงหรือผงสังกะสี เริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส และสลายตัวหมดที่อุณหภูมิ 500 องศา เซลเซียส โดยมีน้ำหนักที่เหลือเป็นของผงทองแดงและผงสังกะสี จากนั้นทำการทดสอบการกัดกร่อน ด้วยเทคนิค salt spray test โดยการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายกรดอะซิติกพ่น เป็นละออง พบว่าการเติมผงทองแดงสามารถช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้ โดยการเติมผงทองแดง 5% โดยน้ำหนักสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด จึงเลือกมาทำการทดสอบด้วยการเติมผงคาร์บอน แบล็ค พบว่าการเติมคาร์บอนแบล็คที่ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ช่วยให้ผงทองแดง สามารถกระจาย ตัวได้ดี

คำสำคัญ : ฟิล์มป้องกันสนิม, การกัดกร่อนของโลหะ, ทองแดง, การทดสอบการกัดกร่อน

Title	Corrosion Protection Film of high density polyethylene filled metals
Student	Piyapong Nimsanorh
Degree	Master of science
Program	Technology polymer
Year	2017
Thesis advisor	Assoc.Prof.Dr. Somsak Woramongkolchai

ABSTRACT

Nowaday, iron has been used for the industry and worldwide development but the main problem of iron is corrosion. In this research high density polyethylene (HDPE) films, containing different amounts of copper or zinc powder of 1, 2, 3, 4, 5 and 10 wt% were prepared by melt mixing in an internal mixer and cut into pellet by single screw extrusion followed with blown film extrusion. Before mixed copper or zinc powder into HDPE, they were coated surface with stearic acid for dispersion and holding on polymer film. The polymer film were then tested mechanical properties, thermogravimetric analysis (TGA) and scanning electron microscope (SEM). Comparison in corrosion behavior of the polymer films with different amounts of copper were also evaluated by calculated the weight changes. Mechanical properties were decreased when copper or zinc powder was more added. TGA revealed that the decomposition was started at 200 °C and ended about 500°C. The other remaining weights were copper or zinc powder. Salt spray test with NaCl and acetic acid was evidenced for containing 5 wt% of copper powder shown the greatest corrosion protection with mixed with carbon black 2% w/w, which was the better dispersion for enhancing copper powder in the polymer film

Keywords: film corrosion protection, metal corrosion, copper, corrosion test

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องฟิล์มป้องกันสนิมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและผงโลหะ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ได้รับการช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จากบุคคลดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยนี้ ที่ได้ให้คำแนะนำ แนวทางความคิด ความรู้ คำปรึกษา และช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น รวมถึงความห่วงใยต่างๆที่อาจารย์มอบให้ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร และ ศ.ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล ที่เป็นกรรมการสอบและช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง รวมทั้งเสนอแนะแก้ไขให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ พี่กฤษณะ เกษประดิษฐ์ และพี่สุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ที่คอยช่วยอำนวยความสะดวกต่างๆ ทั้งการเบิกอุปกรณ์เครื่องมือในการทำงานวิจัย และคอยช่วยแก้ไขเครื่องจักรเมื่อเกิดปัญหา ทำให้งานวิจัยสามารถทำได้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ ที่คอยห่วงใยและเป็นกำลังใจให้สามารถทำงานวิจัยชิ้นนี้ได้จนสำเร็จ

ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดได้ในอนาคตต่อไป

ปิยะพงษ์ นิยมเสนาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีและหลักการของการกักกรอง.....	4
2.1.1 กลไกการกักกรอง.....	5
2.1.2 การป้องกันการกักกรอง.....	7
2.2 โลหะทรานซิชัน.....	8
2.2.1 ทองแดง.....	9
2.2.2 สังกะสี.....	10
2.3 สารตัวเติมและสารช่วยผสม.....	11
2.3.1 คาร์บอนแบล็ค.....	11
2.3.2 กรดสเตียริก.....	12
2.3.3 น้ำมันพาราฟิน.....	13
2.3.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.....	13
2.4 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม.....	14
2.5 การทดสอบ.....	15
2.5.1 Thermal Gravimetric Analysis.....	15
2.5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	16
2.5.3 Universal Testing Machine.....	17
2.5.4 Scanning Electron Microscope.....	18
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	27
3.2 วัสดุและสารเคมี.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	27
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	27
3.2 วัสดุและสารเคมี.....	28
3.3 วิธีการทดลอง.....	32
3.3.1 การเตรียมผงโลหะ	32
3.3.2 กระบวนการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม	32
3.3.3 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม	33
3.3.4 การทดสอบสมบัติ	33
3.3.5 การปรับปรุงสมบัติฟิล์มพอลิเมอร์	35
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	36
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของผงโลหะด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)	36
4.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาคผงโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	40
4.3 การทดสอบฟิล์มพอลิเมอร์	44
4.4 การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยการเติมคาร์บอนแบล็ค.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
เอกสารอ้างอิง	77
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานที่ 25°C (298 K)	6
2.2 สมบัติเชิงกลของ HDPE ผสมกับเส้นใยทองแดงนาโน	23
3.1 สมบัติเม็ดพลาสติก HDPE จากบริษัท PTT Global Chemical.....	29
3.2 สูตรในการผสมของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง HDPE ผสมกับผงโลหะ	32
3.3 สูตรในการผสมของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง HDPE ผสมกับผงโลหะ เมื่อทำการเติมคาร์บอนแบล็คเพื่อช่วยในการผสม	35
4.1 สูตรที่ทำการผสมระหว่าง HDPE : ผงทองแดง : คาร์บอนแบล็ค.....	65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 สถานการณ์อุตสาหกรรมเหล็กของไทย	1
2.1 กระบวนการทำ cathodic protection	7
2.2 ส่วนประกอบของเครื่อง Extruder	15
2.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก	16
2.4 ลักษณะของชิ้นงานและผลการทดสอบจากเครื่องทดสอบแรงดึง UTM.....	17
2.5 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง SEM.....	19
2.6 อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานในหลายระดับพลังงาน.....	20
2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและปริมาณการเติมของ ทองแดงที่เป็นเส้นใยนาโน	20
2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกาะตัวของเชื้อแบคทีเรียและปริมาณการเติมของ ทองแดงที่เป็นเส้นใยนาโนในระยะเวลาพักตัว 24 ชม.....	21
2.9 ภาพ SEM ของ HDPE ที่ผสมกับเส้นใยทองแดงนาโนในปริมาณต่างๆ (a)0.5%wt (b)1%wt (c)2.5%wt.....	21
2.10 กราฟ XRD ของ HDPE ผสมกับเส้นใยทองแดงนาโน.....	22
2.11 FTIR spectrum ของ HDPE ผ่านรังสี UV ในช่วงเวลาต่างๆ.....	23
2.12 FTIR spectrum ของ HDPE ผสมกับเส้นใยทองแดงนาโนปริมาณ 0.5 %wt.....	24
2.13 FTIR spectrum ของ HDPE ผสมกับเส้นใยทองแดงนาโนปริมาณ 2.5 %wt ที่ผ่านรังสี UV ในช่วงเวลาต่างๆ	24
2.14 ภาพ SEM ที่เกิดการกัดกร่อนของทองแดงและนิกเกิล90:10 ในน้ำทะเลเป็นเวลา 1 เดือน	25
2.15 ภาพ SEM ตัดขวางของทองแดงที่ทดสอบในสภาพอากาศที่ร้อนและแห้งเป็น ระยะเวลา 3 ปี	26
2.16 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างทองแดงในสารละลาย 0.5 % NaCl (pH= 9.0) ที่ทดสอบในอุณหภูมิที่ 25, 30 และ 35 °C.....	26
4.1 IR spectrum ของผงทองแดงก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิว	37
4.2 IR spectrum ของผงสังกะสีก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิว	39
4.3 ผงทองแดงที่กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	40
4.4 ผงทองแดงที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	40
4.5 ผงทองแดงที่ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวที่กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	41
4.6 ผงทองแดงที่ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	41
4.7 ผงสังกะสีที่กำลังขยาย 3,000 เท่า	42
4.8 ผงสังกะสีที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	42
4.9 ผงสังกะสีที่ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวที่กำลังขยาย 3,000 เท่า	43
4.10 ผงสังกะสีที่ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ภาพ SEM ของฟิล์ม HDPE ที่กำลังขยาย 2000 และ 3000 เท่า	44
4.12 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง 1 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า	44
4.13 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง 2 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า	45
4.14 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง 3 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า	45
4.15 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง 4 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า	46
4.16 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง 5 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า	46
4.17 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง 10 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า	47
4.18 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี 1 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า	48
4.19 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี 2 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า	48
4.20 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี 3 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า	49
4.21 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี 4 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า	49
4.22 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี 5 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า	50
4.23 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี 10 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า	50
4.24 การทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงทองแดงในปริมาณต่างๆ	51
4.25 การทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงสังกะสีในปริมาณต่างๆ	52
4.26 การทดสอบค่าการดึงยึด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงทองแดงในปริมาณต่างๆ ...	53
4.27 การทดสอบค่าการดึงยึด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงสังกะสีในปริมาณต่างๆ	54
4.28 การทดสอบค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงทองแดงในปริมาณต่างๆ	55
4.29 การทดสอบค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงสังกะสีในปริมาณต่างๆ	56
4.30 กราฟ TGA ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดงในปริมาณต่างๆ	57
4.31 กราฟ TGA ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสีในปริมาณต่างๆ	58
4.32 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง ในอัตราส่วนต่างๆ	59
4.33 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี ในอัตราส่วนต่างๆ	60
4.34 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักชิ้นงานที่หายไปการทดสอบการกัดกร่อนด้วยสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง	61
4.35 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักชิ้นงานที่หายไปโดยการทดสอบการกัดกร่อนด้วย กรดอะซิติกของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง	62
4.36 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักชิ้นงานที่หายไปโดยการทดสอบการกัดกร่อน ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี	63
4.37 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักชิ้นงานที่หายไปการทดสอบการกัดกร่อนด้วย กรดอะซิติกของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี	64

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

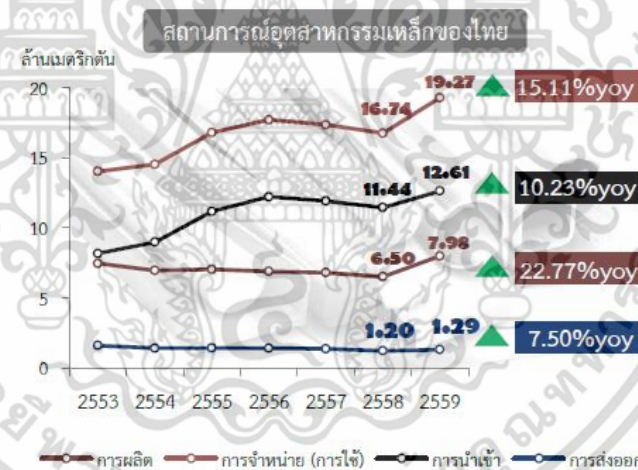
รูปที่	หน้า
4.38 फिल्मพอลิเมอร์ที่ทำการผสมคาร์บอนแบล็ค 0.5 % และผงทองแดง 5% ที่กำลังขยาย 3000 เท่า.....	66
4.39 फिल्मพอลิเมอร์ที่ทำการผสมคาร์บอนแบล็ค 1 % และผงทองแดง 5% ที่กำลังขยาย 3000 เท่า.....	66
4.40 फिल्मพอลิเมอร์ที่ทำการผสมคาร์บอนแบล็ค 1.5 % และผงทองแดง 5% ที่กำลังขยาย 3000 เท่า.....	67
4.41 फिल्मพอลิเมอร์ที่ทำการผสมคาร์บอนแบล็ค 2 % และผงทองแดง 5% ที่กำลังขยาย 3000 เท่า.....	67
4.42 फिल्मพอลิเมอร์ที่ทำการผสมคาร์บอนแบล็ค 2.5 % และผงทองแดง 5% ที่กำลังขยาย 3000 เท่า.....	68
4.43 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมผงทองแดงและคาร์บอนแบล็ค	69
4.44 ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมผงทองแดงและคาร์บอนแบล็ค	70
4.45 ค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมผงทองแดงและคาร์บอนแบล็ค.....	71
4.46 กราฟ TGA ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงทองแดง 5% และคาร์บอนแบล็คในปริมาณต่างๆ.	72
4.47 กราฟ XRD ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการผสมทองแดง 5 % และฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการผสมผงทองแดง 5 % และคาร์บอนแบล็คในอัตราส่วนต่างๆ.....	73
4.48 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงทองแดงและคาร์บอนแบล็ค.....	74
4.49 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยกรดสเตียริกของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงทองแดงและคาร์บอนแบล็ค	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

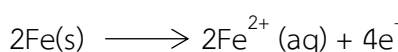
อุตสาหกรรมในปัจจุบัน ได้มีการใช้เหล็กเป็นวัตถุดิบในการสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ ชิ้นส่วนอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ของระดับตกแต่ง เป็นต้น ซึ่งปริมาณการใช้เหล็กในประเทศไทยสูงถึง 18 ล้านตันต่อปีในปี 2558 ถือว่าสูงเป็นอันดับที่หนึ่งของประเทศในกลุ่มอาเซียนทั้ง 10 ประเทศ [1] ภาพรวมอุตสาหกรรมเหล็กโลกปี 2559 ขยายตัวเล็กน้อยจากปี 2558 โดยมีปริมาณการผลิตเหล็กดิบจำนวน 1,628.5 ล้านเมตริกตัน ปรับตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.81 ขณะที่มีความต้องการใช้เหล็กรวมจำนวน 1,501.3 ล้านเมตริกตัน ปรับตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.17 โดยราคาผลิตภัณฑ์เหล็กในตลาดโลกปี 2559 พุ่งตัว (Rebound) กลับมาเป็นทิศทางขาขึ้นอีกครั้ง หลังจากอุตสาหกรรมเหล็ก ในปี 2558 เผชิญภาวะอุปทานส่วนเกิน (Excess Supply) จนทำให้ราคาเหล็ก ทุกประเภทปรับตัว ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยราคาเฉลี่ย ณ สิ้นปี 2558 อยู่ที่เพียง 478 เหรียญสหรัฐต่อเมตริกตัน (\$US/metric tonnes) ซึ่งเป็นการปรับตัวลดลงต่ำที่สุดในรอบ 10 ปี ดังรูปที่ 1.1 [2]



รูปที่ 1.1 สถานการณ์อุตสาหกรรมเหล็กของไทย [2]

เนื่องจากเหล็กมีปัญหาในการเกิดสนิมเมื่อมีน้ำหรือความชื้นบนผิวของเหล็ก จึงทำให้เกิดสนิมของเหล็ก ซึ่งมีสูตรเคมีเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{FeO}(\text{OH})$ หรือ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ โดยอาศัยการเกิดทางกระบวนการไฟฟ้าเคมีระหว่าง น้ำ ก๊าซออกซิเจน และสารอิเล็กโทรไลต์ ดังสมการ

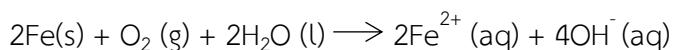
ขั้นที่ 1 ออกซิเดชัน



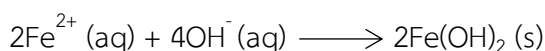
รีดักชัน



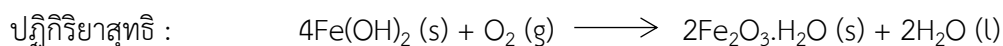
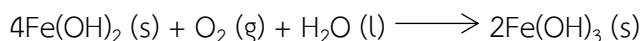
ปฏิกิริยาสุทธิ :



ขั้นที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้มีการป้องกันเหล็กไม่ให้เกิดสนิมซึ่งมีอยู่หลายวิธี [2] ไม่ว่าจะเป็น การเคลือบผิวเหล็ก เพื่อป้องกันมิให้เนื้อเหล็กสัมผัสกับน้ำและอากาศโดยตรง อาจทำได้หลายวิธี เช่น การทาสี การชุบด้วยโลหะ อาทิ ดีบุก สังกะสี วิธีนี้มักใช้กับชิ้นงานขนาดเล็กหรือกลาง อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของวิธีนี้คือ ผิวเคลือบชนิดนี้ สามารถหลุดออกได้ง่าย ทั้งทางกายภาพและเคมีซึ่งจะทำให้เนื้อเหล็กมีโอกาสสัมผัสกับบรรยากาศและเกิดสนิมขึ้น ยิ่งกว่านั้นผิวเคลือบบางชนิด เช่น ดีบุก ยังสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมให้เร็วขึ้นอีกด้วย การทำเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) โดยการเติมธาตุอื่นๆ ที่สามารถทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางๆ ขึ้นบนผิวเหล็ก เช่น โครเมียม นิกเกิล ธาตุเหล่านี้จะสร้างฟิล์มบางๆ ที่ติดแน่นบนผิวเหล็ก ช่วยป้องกันมิให้เนื้อเหล็กสัมผัสกับบรรยากาศโดยตรง ผิวเคลือบชนิดนี้มีความคงทนทั้งทางกายภาพและเคมี เหล็กกล้าไร้สนิมมีหลายเกรด แต่ละเกรดก็จะมีส่วนผสมที่ต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งานแต่ละประเภท การใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อให้เหล็กมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณใกล้เคียง ซึ่งจะทำให้เหล็กไม่เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนและกลายเป็นสนิม วิธีนี้สามารถป้องกันการเกิดสนิมได้ในทุกสภาพแวดล้อม แต่มีค่าใช้จ่ายสูง และต้องอาศัยแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไม่สะดวกกับการโยกย้ายไปมา จึงเหมาะสมสำหรับโครงสร้างใหญ่ๆ ที่ต้องใช้งานในสภาพแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมอย่างรุนแรง เช่น ท่อที่ฝังอยู่ใต้ดิน ท่อส่งน้ำมันใต้ทะเล เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จึงเกิดแนวความคิดที่จะใช้ทองแดงเป็นสารตัวเติมลงในพอลิเมอร์ โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นเมทริกซ์เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความชื้นที่ค่อนข้างต่ำ และมีความทนทานต่อสารเคมี เพื่อให้อนุภาคของทองแดงที่กระจายตัวบนเมทริกซ์ สามารถดักจับก๊าซที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนโลหะ ได้แก่ ก๊าซโอโซน (O_3), ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S), ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2), คาร์บอนิล ซัลไฟด์ (COS), สารประกอบไนโตรส (NO_x) และไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) ทำให้มีสมบัติในการป้องกันไฟฟ้าสถิตย์และสามารถนำความร้อนได้ดี ทั้งนี้เนื่องจากทองแดงมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชัน (E^0) เท่ากับ $+0.34 \text{ V}$ แสดงว่าชอบที่จะรับอิเล็กตรอน (จัดเป็นตัวออกซิไดส์ที่ดีกว่าเหล็กที่มีค่า E^0 เท่ากับ -0.45 V) จึงสามารถรับอิเล็กตรอนจากเหล็กได้ ทำให้หยุดวงโคจรของก๊าซออกซิเจน ก๊าซที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน (corrosive gas) และน้ำที่จะมารับอิเล็กตรอนส่งผลให้กระบวนการเกิดสนิมหยุดลง เพื่อที่จะยืนยันผลให้แน่ชัดขึ้นจึงใช้ผงสังกะสีที่มีค่า E^0 เท่ากับ -0.76 V มาเป็นตัวเปรียบเทียบเพราะค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชันของสังกะสีนั้นมีค่าน้อยกว่าเหล็กจึงอาจใช้ทดแทนหรือเสริมการทำงานของผงทองแดงในการช่วยดักจับก๊าซที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนโลหะได้นอกจากนี้ยังได้มีการนำ ผงถ่าน (คาร์บอนแบล็ค, Carbon black) มาใช้เพื่อช่วยในการกระจายตัวของผงทองแดงหรือผงสังกะสีบนพอลิเมอร์เมทริกซ์ HDPE เป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน งานวิจัยนี้จะสามารถพัฒนาไปเป็นฟิล์มเพื่อห่อวัสดุป้องกันสนิมได้ต่อไป ซึ่งฟิล์มป้องกันสนิมมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น การลดค่าใช้จ่ายในการใช้น้ำมันเพื่อเคลือบผิวและล้างคราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อได้รู้เห็นได้โปรดอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันออกจากชิ้นงาน มีอายุในการใช้งานและอายุในการเก็บรักษาที่ยาวนาน สามารถรีไซเคิลนำกลับมาใช้ได้หลายรอบ ซึ่งเป็นการลดปัญหาการเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ต่อชิ้นงาน เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อผลิตฟิล์มป้องกันการเกิดสนิมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE กับผงโลหะทองแดงหรือผงสังกะสี โดยมีคาร์บอนแบล็คเป็นสารช่วยให้เกิดการกระจายตัวของผงโลหะในเมตริกซ์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 การเตรียมโลหะก่อนทำการผสมด้วยสารละลายกรดสเตียริก
- 1.3.2 การผสมฟิล์มพอลิเมอร์ระหว่าง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับผงโลหะทองแดงหรือสังกะสี
- 1.3.3 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม
- 1.3.4 การปรับปรุงสมบัติฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนแบล็ค
- 1.3.5 การตรวจสอบสมบัติต่างๆ
 - 1.3.5.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal testing machine เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง, โมดูลัส และการดึงยืด ณ จุดขาด
 - 1.3.5.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric analysis
 - 1.3.5.3 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธี salt spray test และ acetic spray test
 - 1.3.5.4 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer, XRD

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถผลิตฟิล์มที่ป้องกันการเกิดสนิมได้
- 1.4.2 ลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการเคลือบเพื่อป้องกันสนิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและหลักการของการกัดกร่อน (Corrosion)

ในสภาพแวดล้อมโดยทั่วไปสาเหตุการกัดกร่อนเกิดได้หลายอย่างเช่น ปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาทางกายภาพของวัตถุนั้นเอง ลักษณะการกัดกร่อนที่พบเราสามารถแบ่งออกเป็นหลายแบบ เช่นแบ่งตามกลไกของการกัดกร่อน แบ่งตามลักษณะทางกายภาพหรือตัวแปรที่ส่งผลต่อการกัดกร่อน โดยประเภทของการกัดกร่อนแบ่งได้ดังนี้ [3]

การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) การผุกร่อนเกิดขึ้นทั่วๆ ไปตลอดผิวโลหะที่สัมผัสกับสารละลาย เนื้อโลหะจะบางลงทุกขณะ จนกระทั่งไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป การผุกร่อนแบบนี้ถึงแม้จะทำความเสียหายมาก แต่ในแง่วิศวกรรมแล้วถือว่าเป็นปัญหา เพราะการผุกร่อนจะเป็นไปด้วยอัตราที่คงที่ โดยสามารถประมาณอายุการใช้งานของโลหะได้โดยการตรวจสอบด้วยสายตา

การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic Corrosion) เกิดจากวัตถุโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าได้ 2 ชนิดที่ต่างกันหรือวัตถุชนิดเดียวกันแต่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน มาเชื่อมต่อกัน จะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างวัตถุทั้งสอง

การกัดกร่อนแบบช่องแคบ (Crevice Corrosion) เกิดจากวัตถุสัมผัสสารละลายบางชนิดที่สามารถแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า หรือเกิดจากบริเวณพื้นผิวที่การถ่ายเทของเหลวไม่ดี ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันแตกต่างกัน มักเกิดตามรอยแยกหรือตามซอกต่างๆ ของวัตถุ

การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting Corrosion) ส่วนมากเกิดจากวัตถุสัมผัสกับสารละลายพวกคลอไรด์ เช่น น้ำทะเล เมื่อวัตถุถูกกัดกร่อน บริเวณกัดกร่อนจะเป็นรูหรือหลุม อาจถูกบดบังด้วยตัวกัดกร่อนเอง มักเกิดแบบเฉียบพลันตรวจพบได้ยาก มีขนาดเล็ก ส่วนใหญ่พบในวัตถุโลหะที่สามารถสร้างชั้นป้องกันได้

การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) มักเกิดกับเหล็กกล้าไร้สนิม ในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ โดยเหล็กจะสูญเสีย โครเมียมในรูปคาร์ไบด์ เมื่อเกิดการสูญเสียจะขาดโครเมียมในการสร้างการป้องกันเนื้อเหล็ก

การผุกร่อนแบบเลือก (Selective Leaching or Dealloying) เกิดวัตถุที่เป็นโลหะผสมที่ธาตุโลหะหนึ่งเสถียรกว่าธาตุหนึ่งเมื่อสัมผัสสภาพแวดล้อม เช่น การกัดกร่อนของทองเหลือง (Dezincification) โดยทองเหลืองจะสูญเสียสังกะสี เหลือแต่ทองแดงทำให้เป็นรูพรุน รูปทรงของวัตถุจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ความแข็งแรงจะลดลง สามารถลดการกัดกร่อนได้โดยเติมดีบุกลงไปประมาณร้อยละ 1 ในทองเหลือง

การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion Corrosion) เกิดจากปฏิกิริยาเคมีและการเคลื่อนที่ เช่น การไหลหรือเคลื่อนที่ของสารละลายหรือของเหลวที่มีผลต่อการกัดกร่อน

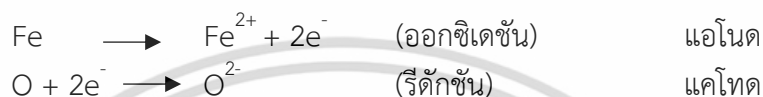
การกัดกร่อนโดยความเค้น (Stress Corrosion) เกิดจากความเค้นหรือแรงเค้นของสภาพแวดล้อม เช่น การตัด การดัด ความร้อนภายนอก การสั่นสะเทือน หรือความเค้นจากภายในของวัตถุที่อาจหลงเหลือจากการขึ้นรูป และ/หรือการเย็นตัวที่ไม่สม่ำเสมอ

2.1.1 กลไกการกัดกร่อน (Mechanism of corrosion)[3]

การกัดกร่อนมีกลไกที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง และการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

2.1.1.1 การกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง (Direct chemical corrosion)

การกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นที่ติดกับโลหะ การเกิดออกซิเดชันของโลหะทรานซิชันกับออกซิเจนในสิ่งแวดล้อมจะเกิดได้ค่อนข้างน้อยและจะเกิดช้ามากที่สุดที่อุณหภูมิห้องและจะเกิดเร็วมากที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งตามความเป็นจริงอะตอมของเหล็กจะถูกออกซิไดซ์ขณะที่อะตอมของออกซิเจนจะถูกรีดิวส์กระบวนการจะเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากอะตอมของเหล็กไปยังอะตอมของออกซิเจน



การเกิดออกซิเดชันนั้น ไม่ได้เกิดจากผลของออกซิเจนเพียงอย่างเดียว อาจรวมถึงเกิดจากสารปนเปื้อน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจน และไอน้ำจะทำให้โลหะเกิดการเสื่อมสภาพเร็วมากขึ้นที่อุณหภูมิสูง

2.1.1.2 การกัดกร่อนจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

การกัดกร่อนของโลหะเกือบทั้งหมด มีขั้นตอนการเกิดเป็นการถ่ายเทประจุไฟฟ้า (Electrochemical reaction) ธรรมชาติของการกัดกร่อนแบบเคมีไฟฟ้าอธิบายได้ด้วยตัวอย่างของเหล็กในสารละลายกรด เมื่อจุ่มเหล็กในสารละลายกรดเจือจางหรือกรดไฮโดรคลอริก จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ผิวพร้อมกับโลหะเหล็กจะละลายเป็นไอออน เกิดเป็นสารประกอบของเหล็กคลอไรด์ที่ละลายได้ ดังสมการ



ปฏิกิริยาของไอออนอย่างง่ายเป็นดังนี้



หรือ



จะเห็นว่าไอออนคลอไรด์ไม่ได้เป็นส่วนหลักของปฏิกิริยา นั่นคือปฏิกิริยาการกัดกร่อนกับกรดใดๆ เกิดปฏิกิริยาย่อยขึ้น 2 ปฏิกิริยาดังนี้



อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะจะลดลงได้ถ้ามีการป้องกันไฟฟ้าลบบหรือป้องกันอิเล็กตรอนแก่โลหะ หลักการนี้ได้ใช้เป็นเทคนิคป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทด (Cathodic Protection) ชนิดของครึ่งเซลล์ปฏิกิริยารีดักชันขึ้นกับชนิดของสิ่งแวดล้อมโลหะซึ่งโดยทั่วไปคือน้ำ ทั้งที่เป็นสารละลายของไอออน หรือความชื้นซึ่งเป็นสภาวะก๊าซ แม้แต่ในสภาพแห้งที่ไม่มีน้ำ

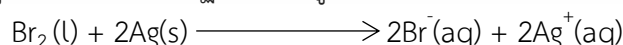
การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นก็ประกอบด้วยกลไกการแลกเปลี่ยนประจุหรืออิเล็กตรอนในอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็งและพิจารณาว่าเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อน

ทั้งนี้อาจใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการรับและให้อิเล็กตรอน เพื่อระบุว่าสารใดจะเกิดการกัดกร่อนได้มากกว่ากัน โดยค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานของธาตุต่างๆจะแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานที่ 25°C (298 K) [4]

	Reduction Half-Reaction	E° (V)			
Stronger oxidizing agent	$F_2(g) + 2 e^- \longrightarrow 2 F^-(aq)$	2.87	Weaker reducing agent		
	$H_2O_2(aq) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow 2 H_2O(l)$	1.78			
	$MnO_4^-(aq) + 8 H^+(aq) + 5 e^- \longrightarrow Mn^{2+}(aq) + 4 H_2O(l)$	1.51			
	$Cl_2(g) + 2 e^- \longrightarrow 2 Cl^-(aq)$	1.36			
	$Cr_2O_7^{2-}(aq) + 14 H^+(aq) + 6 e^- \longrightarrow 2 Cr^{3+}(aq) + 7 H_2O(l)$	1.33			
	$O_2(g) + 4 H^+(aq) + 4 e^- \longrightarrow 2 H_2O(l)$	1.23			
	$Br_2(l) + 2 e^- \longrightarrow 2 Br^-(aq)$	1.09			
	$Ag^+(aq) + e^- \longrightarrow Ag(s)$	0.80			
	$Fe^{3+}(aq) + e^- \longrightarrow Fe^{2+}(aq)$	0.77			
	$O_2(g) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow H_2O_2(aq)$	0.70			
	$I_2(s) + 2 e^- \longrightarrow 2 I^-(aq)$	0.54			
	$O_2(g) + 2 H_2O(l) + 4 e^- \longrightarrow 4 OH^-(aq)$	0.40			
	$Cu^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Cu(s)$	0.34			
	$Sn^{4+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Sn^{2+}(aq)$	0.15			
	$2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow H_2(g)$	0			
	Weaker oxidizing agent	$Pb^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Pb(s)$		-0.13	Stronger reducing agent
		$Ni^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Ni(s)$		-0.26	
	$Cd^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Cd(s)$	-0.40			
	$Fe^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Fe(s)$	-0.45			
	$Zn^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Zn(s)$	-0.76			
	$2 H_2O(l) + 2 e^- \longrightarrow H_2(g) + 2 OH^-(aq)$	-0.83			
	$Al^{3+}(aq) + 3 e^- \longrightarrow Al(s)$	-1.66			
	$Mg^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Mg(s)$	-2.37			
	$Na^+(aq) + e^- \longrightarrow Na(s)$	-2.71			
	$Li^+(aq) + e^- \longrightarrow Li(s)$	-3.04			

- ค่า E° เป็นค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกิริยารีดักชัน
- ค่า E° เป็นบวกมาก แสดงว่าตัวออกซิไดซ์ (ด้านซ้ายของสมการ) จะเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง ส่วนตัวรีดิวซ์ (ด้านขวาของสมการ) จะเป็นตัวรีดิวซ์ที่อ่อน ดังนั้นสารที่อยู่ทางซ้ายของครึ่งปฏิกิริยาใดๆ จะทำปฏิกิริยาได้เองกับสารที่อยู่ทางขวาของครึ่งปฏิกิริยาที่อยู่ถัดลงมา เช่น

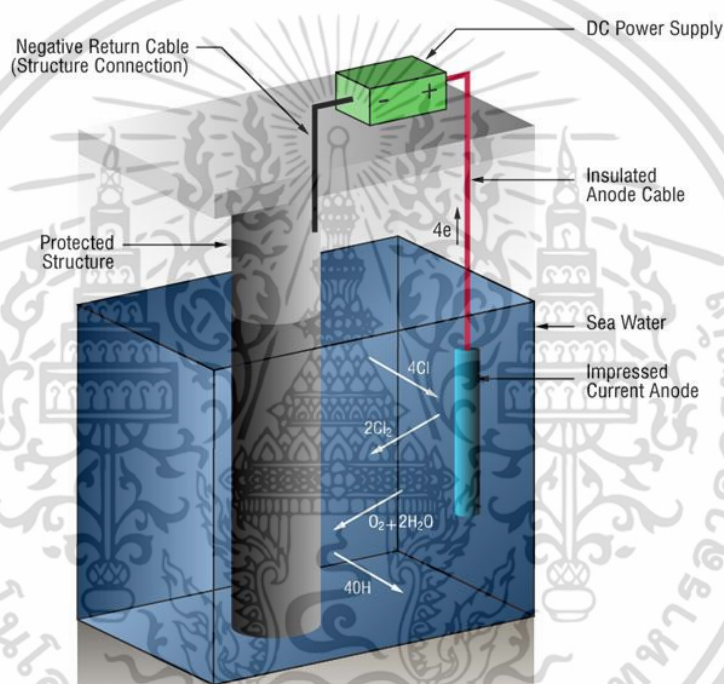


- การเปลี่ยนสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ไม่มีผลต่อค่า E°
- เมื่อกลับทิศทางของปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ค่า E° จะมีเครื่องหมายตรงข้าม
- ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นได้เอง จะต้องมีค่า E° ของเซลล์เป็นบวกเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การป้องกันการกัดกร่อน [5]

วิธี Cathodic protection ทำได้โดยโครงสร้างที่ต้องการป้องกันเป็นขั้วแคโทด ซึ่งอาจทำได้โดยการให้กระแสไฟฟ้า (impressed current) หรือการใช้ขั้วแอโนดสละเปลือง (sacrificial anode) โดยใช้วัสดุตัวอื่นซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดต่อเข้ากับโลหะที่ต้องการป้องกันเพื่อให้ผู้กร่อนแทน โลหะเกิดการผู้กร่อนจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยโลหะจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นเช่นเดียวกับแอโนดในเซลล์กัลวานิกหรือเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นถ้าไม่ต้องการให้เกิดการผู้กร่อนจึงต้องให้โลหะนั้นมีสถานะเป็นแคโทดหรือคล้ายกับแคโทด โดยใช้โลหะที่เสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าเหล็ก (มีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดักชันน้อยกว่าเหล็ก) ไปอยู่กับเหล็กเช่น การเชื่อมต่อแมกนีเซียมตามท่อ หรือตามโครงเรือ จะทำให้เหล็กผู้กร่อนช้าลง เนื่องจากแมกนีเซียมเสียอิเล็กตรอนง่ายกว่าเหล็ก จะเสียอิเล็กตรอนแทน เปรียบเสมือนกับให้แมกนีเซียมเป็นแอโนด และให้เหล็กเป็นแคโทด



รูปที่ 2.1 กระบวนการทำ cathodic protection [7]

วิธี Anodic protection โดยการใช้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกทำให้โลหะที่ต้องการปกป้องสร้างชั้นฟิล์มที่เสถียร (protective film) ที่ผิวซึ่งจะใช้ได้กับโลหะเพียงบางชนิดต่างจาก Cathodic protection ที่สามารถใช้กับโลหะได้ทุกชนิด โลหะบางชนิดเช่น อะลูมิเนียม ($E^\circ = -1.66$ V) และสังกะสี ($E^\circ = -0.76$ V) ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดักชันน้อยกว่าเหล็ก ($E^\circ = -0.45$ V) ย่อมจะมีแนวโน้มที่จะเกิดออกซิเดชันได้ง่ายกว่าเหล็กมาก นั่นคือมีโอกาสที่จะเกิดสนิมหรือเกิดออกไซด์ได้ง่าย แต่ปรากฏว่าไม่เกิดการผู้กร่อนในลักษณะที่เหมือนกับเหล็ก ทั้งนี้เพราะชั้นของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) หรือซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่เกิดขึ้นจะเคลือบเป็นผิวบาง ๆ คลุมอยู่บนผิวของโลหะนั้นเอาไว้ ทำให้เนื้ออะลูมิเนียมหรือสังกะสีที่อยู่ข้างใต้ไม่กร่อน ส่วนออกไซด์ของเหล็กที่เกิดขึ้นที่ผิวของเหล็กมีลักษณะเป็นรูพรุน จึงป้องกันเนื้อเหล็กไม่ได้ และนอกจากอะลูมิเนียมและสังกะสีแล้ว ยังมีติบูกที่ถึงแม้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดักชันมีค่ามากกว่าเหล็ก ($E^\circ = 0.15 \text{ V}$) เมื่อนำมาอยู่ใกล้เหล็กจะสามารถทำให้เหล็กกร่อนได้เร็วขึ้น แต่สามารถนำมาป้องกันการผุกร่อนได้เนื่องจากออกไซด์ของดีบุกจะเคลือบผิวของโลหะ แล้วจะทำให้โลหะไม่เกิดการผุกร่อนอีกต่อไป แต่การเคลือบด้วยดีบุกต้องเคลือบให้มิดชิด เพราะเมื่อใดก็ตามที่เหล็กสามารถสัมผัสกับแก๊สออกซิเจนและน้ำได้ เหล็กก็จะถูกเร่งให้กร่อนเร็วขึ้นกว่าเดิม

2.2 โลหะแทรนซิชัน [6]

โลหะแทรนซิชัน หมายถึงธาตุที่อะตอมหรือไอออนมีอิเล็กตรอนไม่เต็มในระดับพลังงานย่อย (d – orbital หรือ f – orbital) ธาตุแทรนซิชันมีสมบัติคล้ายคลึงกันทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งทุกธาตุต่างเป็นพวกโลหะ แต่มีความแตกต่างจากโลหะหมู่ IA และหมู่ IIA หลายประการดังนี้

1. ธาตุแทรนซิชัน เป็นโลหะซึ่งส่วนใหญ่มีจุดหลอมเหลว จุดเดือด และความหนาแน่นสูง
2. เวเลนซ์อิเล็กตรอนของธาตุแทรนซิชันในคาบที่ 4 เท่ากับ 2 ยกเว้นโครเมียม กับทองแดง ซึ่งมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 1
3. อิเล็กตรอนในระดับพลังงานถัดเข้ามานับจากระดับพลังงานของเวเลนซ์อิเล็กตรอน ส่วนใหญ่มีจำนวนไม่เท่ากัน ส่วนของธาตุหมู่ IA และหมู่ IIA ในคาบเดียวกันมีจำนวนอิเล็กตรอนในระดับพลังงานถัดเข้ามาเท่ากับ 8 หรือ 18 ยกเว้นฮีเลียมที่เท่ากับ 2
4. รัศมีอะตอมมีขนาดใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเลขอะตอมเพิ่มขึ้นตามคาบ
5. ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามคาบ
6. ธาตุแทรนซิชันมีสมบัติคล้ายคลึงกันตามคาบมากกว่าธาตุอื่นๆ ในตารางธาตุ นอกจากสมบัติที่ธาตุแทรนซิชันแตกต่างจากโลหะหมู่ IA และหมู่ IIA แล้ว ธาตุแทรนซิชันยังมีสมบัติพิเศษที่เด่นชัดอีกหลายประการ ดังนี้
 1. โลหะแทรนซิชันเป็นตัวนำไฟฟ้าและนำความร้อนที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งธาตุในหมู่ IB คือ ทองแดง เงิน และทอง
 2. รัศมีอะตอมของธาตุแทรนซิชันโดยทั่วไปมีขนาดลดลงเมื่อเลขอะตอมเพิ่มขึ้น แต่รัศมีอะตอมของธาตุต่างๆ จากโครเมียม (Cr) ถึงทองแดง (Cu) มีขนาดใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากแม้ว่าธาตุในแถวเดียวกันจะมีประจุในนิวเคลียสเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้หมอกอิเล็กตรอนเล็กลงก็ตาม แต่อิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อยมีจำนวนมากขึ้นและมีแรงต้านกับการหดขนาดของหมอกอิเล็กตรอน จึงทำให้ขนาดอะตอมของธาตุแทรนซิชันไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก และจะลดลงอย่างช้า ๆ เท่านั้น
 3. พลังงานไอออไนเซชันลำดับที่ 1 ที่เปลี่ยนแปลงอย่างไม่สม่ำเสมอเป็นผลจากการต้านกันระหว่างประจุของนิวเคลียสที่เพิ่มขึ้น กับการเพิ่มอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อย
 4. มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ยกเว้น III B และหมู่ IIB ซึ่งเกิดสารประกอบที่มีเลขออกซิเดชัน +3 และ +2 ตามลำดับ ส่วนธาตุแทรนซิชันอื่น ๆ สามารถแสดงเลขออกซิเดชันร่วมกันเป็นอย่างน้อย
 5. สารประกอบส่วนมากของธาตุแทรนซิชันมีสี (ยกเว้นหมู่ III B)
 6. มีแนวโน้มเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compounds) ได้ง่ายกว่าธาตุหมู่ IA และหมู่ IIA

โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ผงทองแดงและผงสังกะสีเป็นสารตัวเติมเพื่อศึกษาบทบาทของการป้องกันการเกิดสนิม เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาไม่แพง และเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

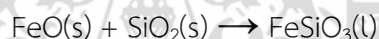
2.2.1 ทองแดง [7,8]

ทองแดง (อังกฤษ: Copper) คือธาตุที่มีเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu ทองแดงอยู่ในตารางธาตุหมู่ IB เป็นที่ทราบกันว่ามนุษย์ใช้ประโยชน์จากทองแดงมาไม่น้อยกว่า 10,000 ปี พบหลักฐานว่ามนุษย์สามารถหลอมสกัดทองแดงให้บริสุทธิ์ได้เมื่อประมาณ 5000 ปีก่อนคริสตกาล ซึ่งเป็นช่วงก่อนที่มนุษย์จะรู้จักกับทองคำ โดยมนุษย์รู้จักทองคำ เมื่อประมาณ 4000 ปีก่อนคริสตกาล

การถลุงทองแดงจากแร่ ขั้นแรกคือการแยกแร่ที่ต้องการออกจากสิ่งเจือปนหรือ กากแร่ อาจใช้วิธีการลอยตัว โดยนำแร่ที่บดละเอียดแล้วผสมเข้ากับน้ำ น้ำมันและสารซัลไฟในถังผสม จากนั้นกวนและผ่านอากาศเข้าไปในช่องเหลวที่อยู่ในถังผสมตลอดเวลา เพื่อให้ไหม้ฟองเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ฟองอากาศ และน้ำมันไปเกาะอยู่กับอนุภาคของแร่และลอยตัวอยู่ด้านบน ส่วนกากแร่จะจมลงอยู่ด้านล่าง เมื่อตักฟองที่ลอยอยู่ด้านบนออกและทำให้แห้ง จะได้ผลแร่ที่มีปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 15 โดยมวล ขึ้นต่อไปนำแร่มาเผาในอากาศ เรียกกระบวนการนี้ว่า การย่างแร่ ไอร์ออน(II)ซัลเฟตบางส่วนจะถูกออกซิไดส์เป็นไอร์ออน(II)ออกไซด์ ดังสมการ

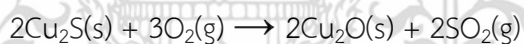


กำจัดไอร์ออน(II)ออกไซด์ออกไป โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปเผาพร้อมกับออกไซด์ของซิลิคอนในเตาถลุงอุณหภูมิประมาณ 1100 °C ไอร์ออน(II)ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของซิลิคอนได้กากตะกอนเหลวซึ่งแยกออกมาได้ ดังสมการ

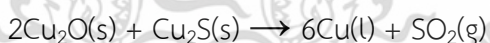


ส่วนคอปเปอร์(II)ซัลไฟด์เมื่ออยู่ในที่มีอุณหภูมิสูงจะสลายตัวได้เป็นคอปเปอร์(I)ซัลไฟด์ในสถานะของเหลวซึ่งสามารถแยกออกได้

ในขั้นตอนสุดท้ายเมื่อแยกคอปเปอร์(I)ซัลไฟด์ในอากาศ บางส่วนจะเปลี่ยนเป็นคอปเปอร์(I)ออกไซด์ ดังสมการ



และคอปเปอร์(I)ออกไซด์กับคอปเปอร์(I)ซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากันโดยมีซัลไฟด์ไอออนทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ได้โลหะทองแดงและแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังสมการ



ทองแดงที่ถลุงได้ในขั้นนี้ยังมีสิ่งเจือปนจึงต้องนำไปทำให้บริสุทธิ์ก่อน การทำทองแดงให้บริสุทธิ์โดยทั่วไปจะใช้วิธีแยกสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้า

สมบัติทางกายภาพ

สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	8.96 g/cm ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	8.02 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	1357.77 K (1084.62 °C)
จุดเดือด	2835 K (2562 °C)
ความร้อนของการหลอมเหลว	13.26 kJ/mol
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	300.4 kJ/mol
ความร้อนจำเพาะ(25 °C)	24.440 J/(mol·K)

การจัดเรียงทางแม่เหล็ก

diamagnetic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานไฟฟ้า(20 °C)	16.78 n Ω ·m
การนำความร้อน (300 K)	401 W/(m·K)
การขยายตัวจากความร้อน (25 °C)	16.5 μ m/(m·K)
อัตราเร็วของเสียง (แท่งบาง)(อุณหภูมิห้อง)(annealed)	3810 m/s
โมดูลัสของยังก์	130 GPa
โมดูลัสของแรงเฉือน	48 GPa
โมดูลัสของแรงบีบอัด	140 GPa

2.2.2 สังกะสี [9]

สังกะสี (Zinc) คือธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 30 และสัญลักษณ์คือ Zn สังกะสีอยู่ในตารางธาตุหมู่ IIB ชื่อในภาษาอังกฤษมาจากภาษาเยอรมันว่า Zink เป็นธาตุประเภทโลหะที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีพอสมควรกับออกซิเจนและธาตุที่ไม่ใช่โลหะ สังกะสีเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดเจือจางจะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนออก ธาตุชนิดนี้เป็นโลหะธาตุที่มีลักษณะที่เป็นสีเงิน มีนวล เป็นที่นิยมนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมมากมาย เพื่อเป็นโลหะโครงสร้างหรือโลหะผสมกับโลหะอื่นสำหรับประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ นอกจากนี้ สังกะสียังเป็นแร่ธาตุชนิดหนึ่งที่สามารถพบได้ในร่างกายมนุษย์ และสัตว์ เนื่องจากจัดเป็นแร่ที่ร่างกายต้องการชนิดหนึ่ง

สมบัติทางกายภาพ

สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	7.14 g/cm ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	6.57 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	692.68 K (419.53 °C)
จุดเดือด	1180 K(907 °C)
ความร้อนของการหลอมเหลว	7.32 kJ/mol
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	123.6 kJ/mol
ความร้อนจำเพาะ (25 °C)	25.390 J/(mol·K)
การจัดเรียงทางแม่เหล็ก	diamagnetic
ความต้านทานไฟฟ้า (20 °C)	59.0 n Ω ·m
การนำความร้อน (300 K)	116 W/(m·K)
การขยายตัวจากความร้อน (25 °C)	30.2 μ m/(m·K)
อัตราเร็วของเสียง (แท่งบาง)(อุณหภูมิห้อง)(rolled)	3850 m/s
โมดูลัสของยังก์	108 GPa
โมดูลัสของแรงเฉือน	43 GPa
โมดูลัสของแรงบีบอัด	70 GPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สารตัวเติมและสารช่วยผสม

2.3.1 คาร์บอนแบล็ค (Carbon black) [10]

คาร์บอนแบล็คเป็นสีดำที่ผลิตจากการเผาไหม้หรือ แก๊ส ให้ได้เขม่าสีดำ เพื่อใช้เป็นสีดำ ในกระบวนการต่างๆ ซึ่งมีสมบัติพิเศษหลายประการ นอกจากนี้ ยังสามารถแบ่งประเภทของคาร์บอนแบล็คตามขนาดของอนุภาค สามารถแบ่งกลุ่มใหญ่ๆ เป็น 5 กลุ่มตามระบบของ IUPAC (IARC, 2010) [11] ได้แก่

1. แชนแนลแบล็ค (channel black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่ได้จากการขูดตะแกรงเหล็ก (iron channel) ซึ่งเป็นตัวรองรับกราบเขม่า ที่เกิดจากการพ่นเปลวไฟและควีนไฟ ออกจากหัวฉีดเชื้อเพลิง แชนแนลแบล็คมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 10-30 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 50-200 นาโนเมตร
2. เฟอร์นาซแบล็ค (furnace black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่เกิดในเตาเผาไหม้ (oil furnace หรือ refractory chamber) หรือไฮโดรคาร์บอนในสถานะที่เป็นไอ มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 10-400 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 50-400 นาโนเมตร
3. อะเซทิลีนแบล็ค (acetylene black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่ได้จากการเผาย่อยสลาย ก๊าซอะเซทิลีนในสภาวะไร้อากาศ อนุภาคที่เกิดขึ้นมีการนำไฟฟ้าที่ดี จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตถ่านไฟฉาย อะเซทิลีนแบล็คมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 30-50 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 350-400 นาโนเมตร
4. แลมป์แบล็ค (lamp black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่ได้จากการเผาไหม้ (oil) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารสกัดจากน้ำมันดิน (coal tar creosote) โดยเผาในภาชนะภายในเตาเผาที่ควบคุมอากาศเพื่อให้ได้ควันดำ มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 60-200 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 300-600 นาโนเมตร
5. เทอร์มัลแบล็ค (thermal black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่ได้จากการเผาย่อยสลายก๊าซธรรมชาติ (natural gas) ในสภาวะไร้อากาศ โดยพ่นเชื้อเพลิงดังกล่าวลงบนผิวของเตาที่ร้อน (heated refractory) มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 120-500 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 400-600 นาโนเมตรนอกจากนั้น ยังสามารถแบ่งแยกออกเป็นชนิดตามกระบวนการผลิตคือ

1. Bead คือแบบอัดเป็นเม็ดขนาดเล็กทรงกลม เพื่อลดฝุ่นละอองในกระบวนการนำไปใช้เนื่องจากสีดำจะทำให้สถานที่ทำงานเปื้อนได้มากที่สุด ข้อดีคือ ลดฝุ่น ส่วนข้อเสียคือ กระจายตัวยาก
2. Powder คือแบบฝุ่นผงปกติ ไม่ได้ผ่านกระบวนการทำเป็น Bead มีข้อเสียคือฟุ้งกระจายได้ง่าย ข้อดีคือกระจายตัวได้ง่ายกว่า

การแบ่งคาร์บอนแบล็คตามลักษณะโครงสร้าง แบ่งได้เป็น

1. โครงสร้างแบบ High Structure จะให้ เหนืดที่ไม่ดำสนิท เนื่องจากโครงสร้างเป็นสายโซ่ต่อกันยาวๆ จึงมีสมบัติการเป็นตัวนำ เช่น Conductive Black
2. โครงสร้างแบบ Low structure ให้ เหนืดที่ต่ำกว่า แต่สมบัติการนำไฟฟ้าจะด้อยกว่าโครงสร้างแบบ High structure

การแบ่งคาร์บอนแบล็คตามขนาดอนุภาค แบ่งได้เป็น

1. อนุภาคขนาดใหญ่ ให้เหนืดที่ต่ำกว่า (Jetness ต่ำกว่า)
2. อนุภาคขนาดเล็ก ให้เหนืดที่ดำมากกว่า (Jetness สูงกว่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนแบล็คผลิตออกมาหลากหลายเกรด โดยแยกเกรดตามขนาดของอนุภาค และโครงสร้างของอนุภาค โดยสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในหลายกรณีดังนี้

1. ใช้เป็น Pigment Black คือใช้เป็นสีดำ ทั่วไปในงานพลาสติก งานพิมพ์ ใช้เกรดทั่วไป
2. ใช้เป็น สีแต่ง เกรดสีต่างๆในงาน Color matching ให้ได้สีตามต้องการ ใช้เกรดทั่วไปชนิด powder
3. ใช้เป็นสีดำที่มีสมบัติเป็น UV Absorber ในงานท่อ งาน Wire Cable ใช้เกรด UV
4. ใช้เป็น Filler ในงานยางรถยนต์ ใช้เกรด Rubber
5. ใช้เป็นสีดำ ที่มีสมบัติเป็น permanent Anti-Static หรือ Conductive ในงาน Electric & Electronic part ต่างๆ ใช้เกรด conductive

สมบัติทางกายภาพ

สถานะ ของแข็ง

ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง) amorphous :	1.8–2.1 g·cm ⁻³
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง) diamond :	3.515 g·cm ⁻³
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง) graphite :	2.267 g·cm ⁻³
จุดระเหิด	3915 K, 3642 °C, 6588 °F
จุดร่วมสาม	4600 K, 10800 kPa
ความร้อนของการหลอมเหลว	117 (graphite) kJ·mol ⁻¹
ความจุความร้อนโมลาร์	6.155 (diamond) J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹ 8.517 (graphite) J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹

2.3.2 กรดสเตียริก (stearic acid) [12, 13]

กรดสเตียริกเป็นกรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid) มีคาร์บอน 18 อะตอม พบมากในไขมันจากสัตว์ มีผลึกเป็นสีขาว ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในแอลกอฮอล์และอีเธอร์ โดยมีสมบัติทาง

กายภาพ ดังนี้

สูตรโมเลกุล	C ₁₈ H ₃₆ O ₂
มวลโมเลกุล	284.48 g·mol ⁻¹
ความหนาแน่น	0.9408 g/cm ³ (20 °C) 0.847 g/cm ³ (70 °C)
จุดหลอมเหลว	69.3 °C (156.7 °F; 342.4 K) [2]
จุดเดือด	361 °C (682 °F; 634 K)
อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัว	232 °C (450 °F; 505 K) ที่ความดัน 15 mmHg
การละลายในน้ำ	0.003 g/L (20 °C) 0.34 g/L (25 °C) 1 g/L (37 °C)
การละลายในไดคลอโรมีเทน	3.58 g/100 g (25 °C) 8.85 g/100 g (30 °C) 18.3 g/100 g (35 °C)
การละลายในเอทานอล	0.9 g/100 mL (10 °C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	2 g/100 mL (20 °C)
	4.5 g/100 mL (30 °C)
	13.8 g/100 mL (40 °C)
การละลายในอะซิโตน	4.96 g/100 g
การละลายในคลอโรฟอร์ม	18.4 g/100 g
การละลายในโทลูอีน	15.75 g/100 g
ความดันไอ	0.01 kPa (158 °C)
	0.46 kPa (200 °C)
	16.9 kPa (300 °C)
ความจุความร้อน	0.173 W/m·K (70 °C)
	0.166 W/m·K (100 °C)

2.3.3 น้ำมันพาราฟิน (paraffin oil) [14, 15]

พาราฟิน หรือ เคโรซีน เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมซึ่งกลั่นแยกออกจากน้ำมันดิบ ไม่ละลายในน้ำ สามารถใช้ประโยชน์ได้มากมาย และมีหลายสถานะ อาจเป็นของแข็งหรือของเหลว มีสมบัติทางกายภาพ ดังนี้

จุดหลอมเหลว	-24 °C
จุดเดือด	300 °C
ความหนาแน่น	0.85 g/mL ที่อุณหภูมิ 20 °C
จุดเยือกแข็ง	>300°C
ลักษณะ	ของเหลวใส ไม่มีสี

2.3.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene) [16]

พอลิเอทิลีนผลิตจากแก๊สเอทิลีนที่ผ่านกระบวนการเติมสารที่ทำให้สามารถจับตัวกันเป็นพอลิเมอร์ได้ภายใต้แรงดันขนาดต่าง ๆ ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีขนาดตั้งแต่น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (ลักษณะเป็นน้ำมัน หรือไขข้น) ไปจนถึงขนาดโมเลกุลสูง (ลักษณะเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้) พอลิเอทิลีน (Polyethylene หรือ Polythene) ถูกค้นพบในปี 1933 โดย Reginald Gibson and Eric Fawcett แห่งบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) ในประเทศอังกฤษ วัสดุประเภทนี้มี 2 รูปแบบ คือ LDPE และ HDPE โดย LDPE ใช้ผลิตแผ่นฟิล์มและวัสดุสำหรับบรรจุหีบห่อ ส่วน HDPE มีความแข็งแรงกว่า ใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ ท่อน้ำ และอุปกรณ์ยานยนต์

HDPE เป็นวัสดุประเภท Polyethylene Thermoplastic (Thermoplastic คือพลาสติกที่สามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้) ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม จัดเป็นพลาสติกที่ได้รับสัญลักษณ์เลข 2 (Resin Identification Code 2) เพื่อความสะดวกสำหรับการจำแนกชนิดของพลาสติกในการนำกลับไปเวียนทำใหม่

ในปี 1945 Earl Tupper แห่งบริษัท DuPont® สังเกตว่าพอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีความเหนียว ทนทาน สามารถนำมาหล่อในแบบพิมพ์ให้มีขนาด รูปร่าง และผสมสีให้มีสีต่าง ๆ ได้ จึงเริ่มด้วยการผลิตแก้วน้ำพลาสติก และชามอ่าง ซึ่งได้รับความนิยมเนื่องจากมีน้ำหนักเบา

สีสันทนน้ำใช้ และต่อมาได้ผลิตภาชนะที่มีฝาปิดได้ด้วย ซึ่งเป็นที่มาของภาชนะบรรจุอาหารที่ได้รับความนิยมจากแม่บ้านในสมัยนั้น ในชื่อของทัปเปอร์แวร์ (Tupperware®)

HDPE มีโครงสร้างทางเคมีที่เป็นกิ่งสาขา (branching) น้อย จึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง มีความแข็งแรง เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนาแน่นลดลง จะทำให้ผิวแตกรานได้ง่าย ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนสารเคมีได้ดี โดยทนความร้อน (ทนอุณหภูมิสูงถึง 110°C และทนอุณหภูมิสูงถึง 120°C ได้ในช่วงสั้น ๆ) แต่ไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงในหม้ออัดไอน้ำ (Autoclave) เท้าพลาสติกชนิด PP (Polypropylene, สัญลักษณ์เลข 5) และทนต่อสารเคมีมากกว่า LDPE (Low-density polyethylene, สัญลักษณ์เลข 4) ทนต่อสภาพอากาศได้ดีพอสมควร แต่อากาศสามารถซึมผ่านได้

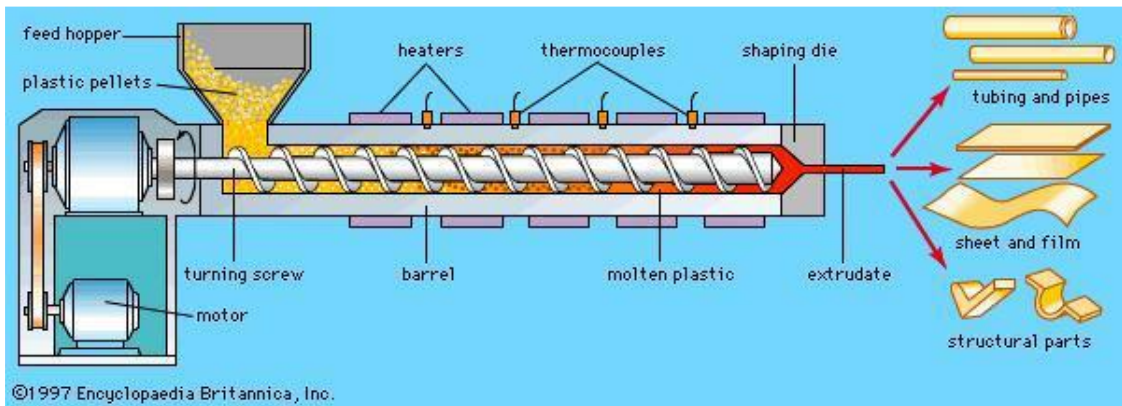
HDPE มีสีขาวขุ่น โปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว มีความเหนียวและยืดหยุ่น ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ สามารถผสมให้มีสีต่าง ๆ ได้

HDPE ทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลายหลายชนิด มีความยืดหยุ่นต่อแรงกระทบกระแทก ไม่แตกร้าวง่าย สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานต่าง ๆ โดยเฉพาะการผลิตภาชนะบรรจุที่เตรียมจากการเป่าจากแม่พิมพ์ (blow molding) เนื่องจากหดตัวในแม่พิมพ์ได้ดีมาก ไม่ติดแม่พิมพ์ ทำให้ถอดออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย ภาชนะที่ผลิตจาก HDPE เช่น ขวดบรรจุนมสด ขวดบรรจุน้ำยาซักผ้า ถึงบรรจุน้ำมันในยานยนต์ ท่อประปา โตะ-เก้าอี้พับได้ ถุงพลาสติก ฯลฯ นอกจากนี้ HDPE ยังใช้ในการบุพื้นบ่อฝังกลบขยะเพื่อป้องกันการรั่วซึมของสารเคมีลงสู่พื้นดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำจาก HDPE

- ขวดน้ำดื่ม ขวดบรรจุนม ถาดทำน้ำแข็ง
- ภาชนะ กล่อง กระปุกบรรจุอาหาร กระปุกยาและวิตามิน
- ขวดใส่สารเคมี ขวดสบู์เหลว (ขวดปั๊ม) ขวดน้ำยาซักผ้า กระจองแปรง
- ลังและกล่องบรรจุสินค้า ถุงใส่ของ
- เครื่องเล่นเด็ก
- ฉนวนไฟฟ้า
- โตะ เก้าอี้

2.4 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม [17]

เป็นกระบวนการขึ้นรูปสำหรับเทอร์โมพลาสติก โดยเม็ดพลาสติกจะเข้าสู่เครื่องทาง Hopper จากนั้นจะถูกหลอมภายในเครื่องอัดรีด (extruder) โดยอาศัยทั้งความร้อน แรงเฉือน และความดัน พลาสติกหลอมจะถูกดันออกสู่แม่พิมพ์ (mould) ที่บริเวณปลายเปิด (Die) เพื่อขึ้นรูปตามต้องการ พลาสติกหลอมที่ออกจากหน้า Die เรียกว่า extrudate ในบางกระบวนการจะมีการให้ความเย็น (cooling) หลังจากพลาสติกออกจากหน้า Die แล้วเพื่อให้คงรูปตามที่ต้องการ (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเครื่อง Extruder [17]

ในการอัดรีดแบบฟิล์มเป่า พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวจะเข้ามายังดายรูปร่างแหวนไหลผ่านออกด้านข้าง โดยที่พอลิเมอร์หลอมเหลวนี้จะถูกบังคับให้อยู่ในขอบแกนหมุน (Mandrel) ที่อยู่ภายในดาย ซึ่งมีรูปคล้ายแขนเสื้อ (Sleeve) และไหลออกผ่านดายเปิดรูปร่างกลมในลักษณะที่เป็นท่อ (Tube) ผ่นค่อนข้างหนา ในขณะที่อยู่ในสถานะหลอมเหลวท่อจะเกิดการขยายตัว และพองออกคล้ายลูกโป่ง (Bubble) ได้ท่อฟิล์มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาตามที่ต้องการ โดยอาศัยความดันของอากาศภายในที่ผ่านมาตรงกลางของรอบแกนหมุนลูกโป่งที่พองออก (Blow-up) ถูกปิดโดยดายที่อยู่ส่วนล่างสุด และโดยลูกกลิ้งที่อยู่ส่วนบนสุด (Nip Rolls) ลูกกลิ้งคู่นี้ทำหน้าที่เหมือนอุปกรณ์ที่ใช้ในการดึงขึ้น (Taken-off Device) ในพองนี้จะมีการรักษาความดันของอากาศให้สม่ำเสมอเพื่อให้ความกว้าง และความหนาของฟิล์มให้สม่ำเสมอ รวมทั้งการม้วนผ่านลูกกลิ้งไม่ให้เกิดรอยยับ ความดันของอากาศจัดเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความหนาแน่นของฟิล์ม ตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ความเร็วในการดึง (Take-off speed) อุณหภูมิตลอดกระบอกใส่สกรู (Barrel) และดาย รวมทั้งปริมาณและทิศทางของอากาศที่ใช้ในการหล่อเย็นฟิล์มจะต้องควบคุมไว้อย่างดี ความกว้างของรูเปิดดาย (Die Opening) ซึ่งเป็นตำแหน่งของแกนหมุนที่อยู่ภายในดายจะต้องมีการปรับให้ดีขึ้น เพื่อให้ความหนาของฟิล์มสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

2.5 การทดสอบ

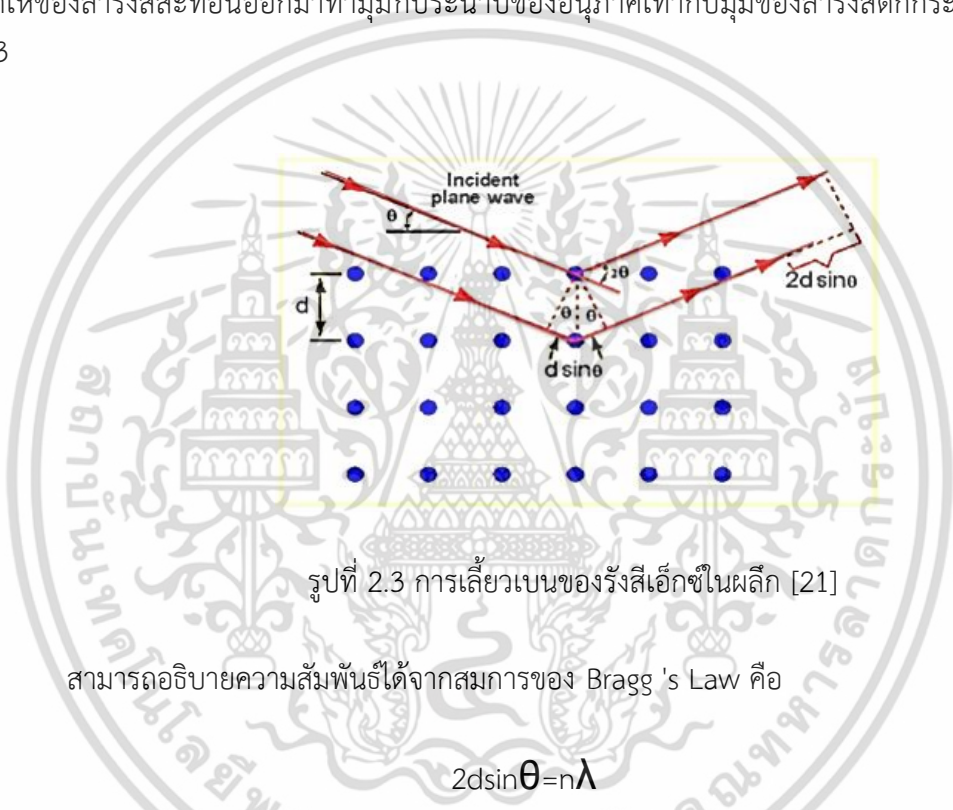
2.5.1 Thermal Gravimetric Analysis (TGA) [18]

เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุ ตัวอย่างเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับความร้อน วิธีนี้เหมาะสำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาพ ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซ หรือระเหยของน้ำ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟส หรือ การแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) วิธีนี้สามารถวิเคราะห์ได้ ทั้งในสุญญากาศ และบรรยากาศ เช่น ออกซิเจน หรือไนโตรเจน เป็นต้น การทำงานของเครื่องมือนี้ คือ เครื่องมือนี้จะมีตาชั่งที่มีความละเอียดมากๆ และมีความไว ต่อการเปลี่ยนแปลงสูง (สามารถต่างถึง 1 ไมโครกรัม) เมื่อใส่สารลงไปจะมีการบันทึกค่า และเมื่อให้ความร้อน เครื่องจะบันทึก ค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง และผู้ใช้ก็สามารถ อ่านค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้น จากกราฟที่ได้การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ เป็นกลุ่มเทคนิคที่จำเป็น สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุต่าง ๆ เช่น พอลิเมอร์ สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ เซรามิก โลหะ และวัสดุทั่วไปอื่นๆ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติ ทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา ผลการวิเคราะห์จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับ สมบัติทางความร้อน เสถียรภาพต่อความร้อน เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกโดยไม่ผ่านการอนุมัติจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และลักษณะการผ่านกระบวนการทางความร้อนของวัสดุ โดยทำการศึกษาน้ำหนักที่หายไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความร้อนที่วัสดุดูดหรือคาย เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลา และการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุ ขึ้นงานภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.

2.5.2 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) [19]

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เป็นเทคนิคที่มีการใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆโดยสามารถใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบชนิดปริมาณคุณภาพของสารประกอบแบบผลึกต่างๆในชิ้นงานได้โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก [21]

สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Bragg 's Law คือ

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

- โดยที่ λ แทน ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
- n แทน ลำดับการสะท้อน
- d แทน ระยะห่างระหว่างระนาบ

ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นธาตุชนิดใดโดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกันและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัวเปรียบเช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

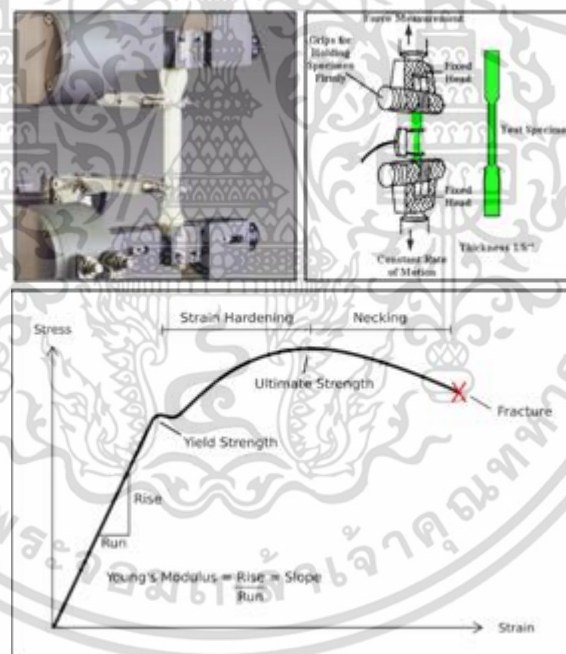
แตกต่างกันจากหลักการทำงานของXRD มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนกันแต่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน

ลักษณะตัวอย่างที่เหมาะสมในการส่งเพื่อทดสอบ

เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือตัวอย่างที่เป็น powder ได้ ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผงจะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 mesh หรือ ประมาณ 40 micron (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้ง จะอยู่ประมาณ 1-2 กรัมในกรณีที่ตัวอย่างเป็นก้อน ต้องมีขนาดกว้างยาว ไม่เกิน 10cm ทั้งนี้ พื้นที่ที่จะทำการทดสอบ จะเป็นเพียงบริเวณเล็กๆ ประมาณ 10 mm เท่านั้น

2.5.3 Universal Testing Machine (UTM) [20]

Universal Testing Machine เป็นเครื่องมือทดสอบที่ใช้หาสมบัติแรงดึง (ความทนต่อแรงดึง, การยืดตัว ณ จุดขาด, ค่าโมดูลัส) ของชิ้นงานคงรูป (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 ลักษณะของชิ้นงานและผลการทดสอบจากเครื่องทดสอบแรงดึง UTM [20]

ให้แรงดึงกับชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่และบันทึกค่าค่าแรงดึง(รูปที่ 2.4) (Tension force) ที่เปลี่ยนไปตามระยะการยืดตัว (Deformation) ของวัสดุ โดยขณะชิ้นทดสอบยืดออกจะมีแรงต้าน ซึ่งแรงต้านของชิ้นงานทดสอบนี้ มีผลทำให้ตัววัดแรงสามารถวัดแรงออกมาได้ แรงที่วัดออกมา มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) หรือนิวตัน (N) การทดสอบจะต้องดึงชิ้นทดสอบจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน ซึ่งแรงต้านสูงสุดของชิ้นทดสอบเป็นผลที่ได้จากการวัดแรง ดังนั้นชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

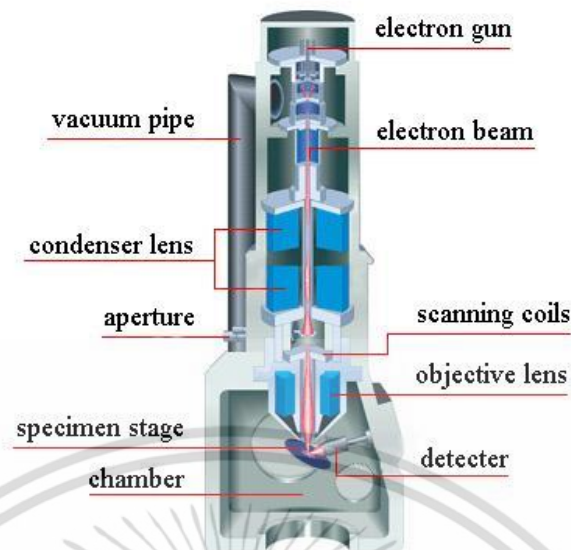
ทดสอบสามารถทนแรงดึงสูงสุดเท่ากับแรงต้านของชิ้นงานที่ทนได้ก่อนขาดจากกัน ลักษณะของผลที่ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain)

จากผลการวิเคราะห์สามารถนำมาทำการวิเคราะห์ ค่าโมดูลัส (Modulus) คือ ค่าความเค้นที่ทำให้วัสดุยืดตัวตามที่กำหนด, ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) คือ ความเค้นดึงสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของชิ้นงานที่ได้รับจนเกิดการขาด มีหน่วยเป็น MPa หรือ N/mm^2 และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) คือ ร้อยละการยืดตัวของชิ้นทดสอบที่จุดขาดเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มต้น

2.5.4 Scanning Electron Microscope (SEM) [21, 22]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

หลักการการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตริทัศน์ได้



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง SEM [22]

ต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตนท์ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็กทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน แบ่งได้เป็น

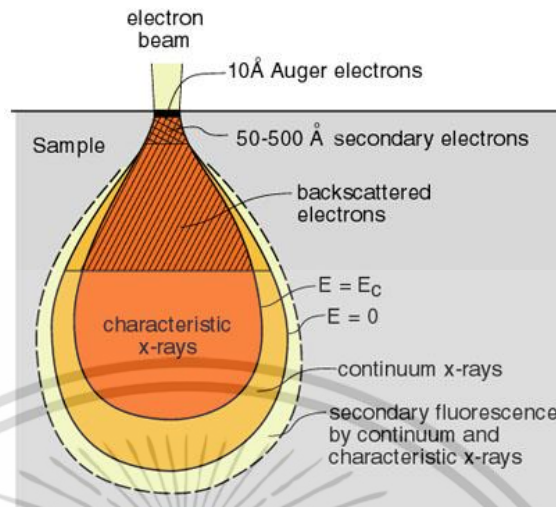
อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

รังสีเอ็กซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M, ...) ได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ที่ปล่อยออกมาสามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

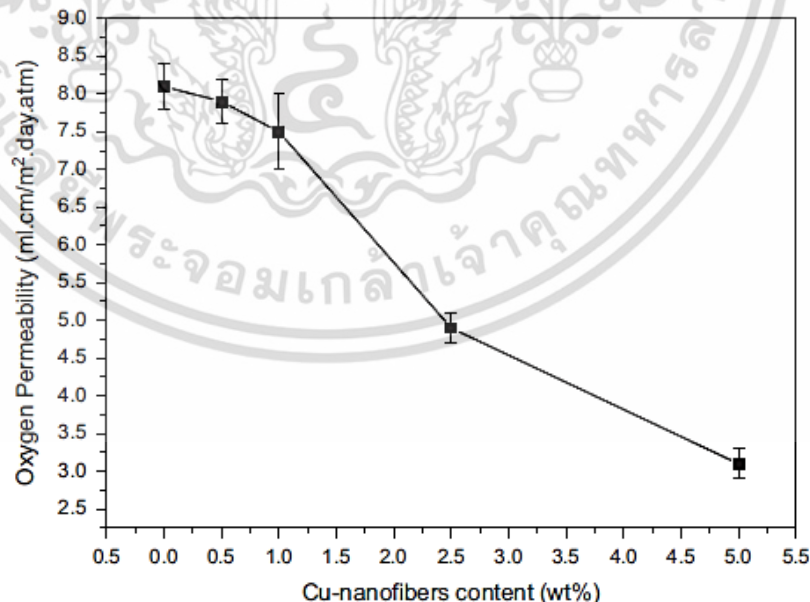
ซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอ็กซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)



รูปที่ 2.6 อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานในหลายระดับพลังงาน [22]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

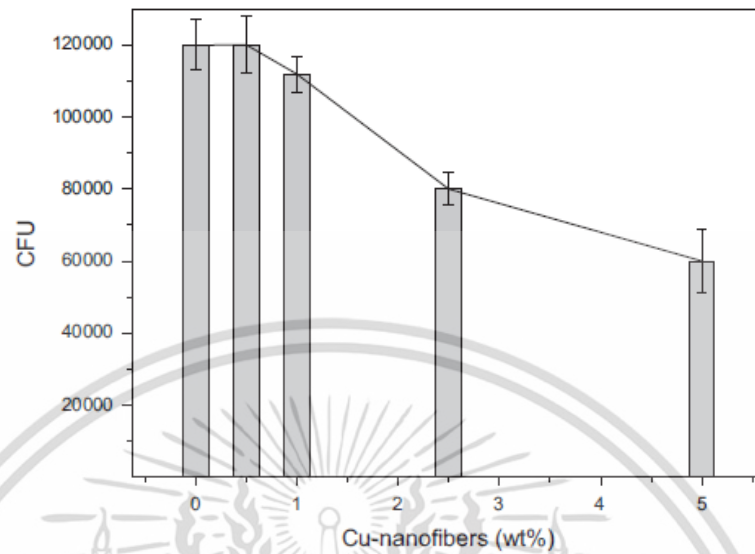
ปี 2013 D.N. Bikiaris และ K.S. Triantafyllidis [23] ได้ทำการทดลองผสม HDPE และ ทองแดงที่มีลักษณะเป็นเส้นใยนาโน (nanofiber) ในปริมาณ 0.5, 1, 2.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก ซึ่งเตรียมโดยวิธี melt-mixing เพื่อป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและต้านเชื้อ แบคทีเรีย พบว่าเมื่อปริมาณของทองแดงที่เป็นเส้นใยนาโนเพิ่มขึ้น ปริมาณการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนมีปริมาณลดลง (รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและปริมาณการเติมของ ทองแดงที่เป็นเส้นใยนาโน [23]

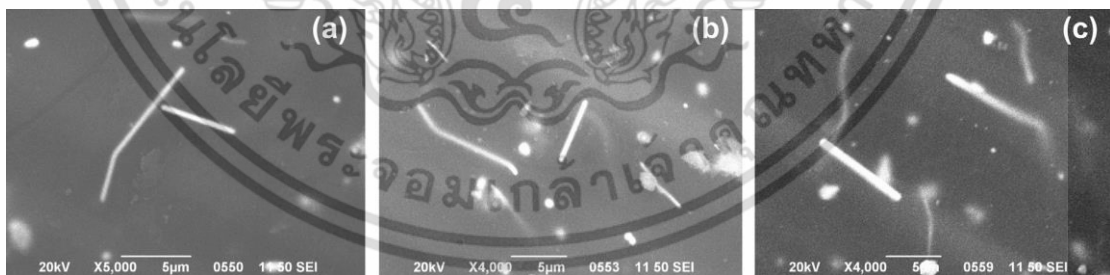
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และปริมาณของแบคทีเรียที่มีการเจริญเติบโตในช่วงเวลา 24 ชม. มีปริมาณที่ลดลง เมื่อทองแดงที่เป็นเส้นใยนาโนเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการการเพาะตัวของเชื้อแบคทีเรียและปริมาณการเติมของทองแดงที่เป็นเส้นใยนาโนในระยะเวลาพักตัว 24 ชม. [23]

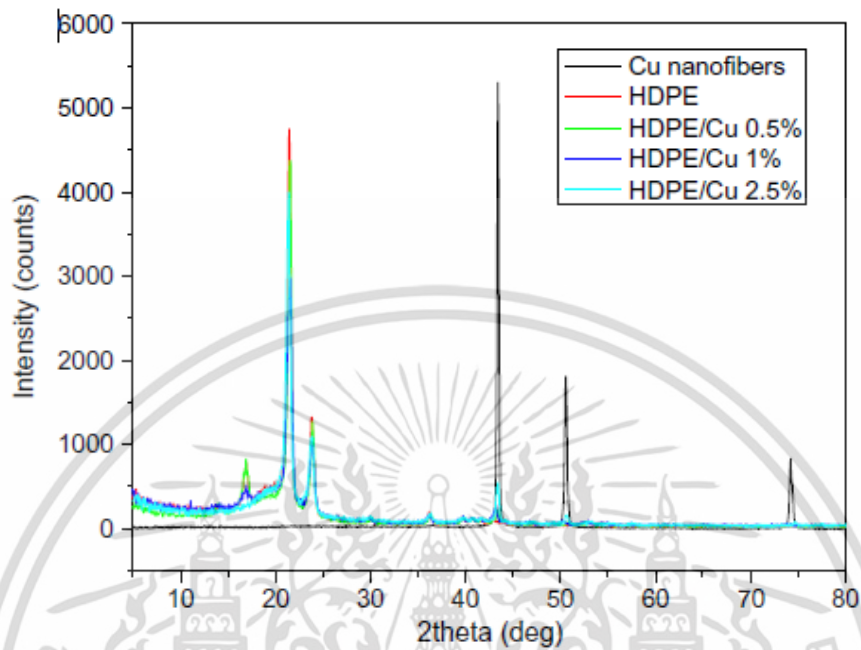
ปี 2015 I. Grigoriadou และคณะ [24] ทำการทดลองผสม HDPE และทองแดงที่มีลักษณะเป็นเส้นใยนาโน (nanofiber) ปริมาณ 0.5, 1, 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโดยวิธี melt-mixing เพื่อทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและความเสถียรต่อรังสี UV พบว่าในการผสมเส้นใยทองแดงนาโนมีการกระจายตัวดี ไม่รวมกลุ่มเป็นก้อน แสดงได้จากภาพ SEM ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพ SEM ของ HDPE ที่ผสมกับเส้นใยทองแดงนาโนในปริมาณต่างๆ (a)0.5%wt (b)1%wt (c)2.5%wt [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง XRD จากข้อมูลพบว่าเส้นใยทองแดงนาโนมีพีคที่เป็นเอกลักษณ์สูงที่มุม 43.45° , 50.57° และ 74.25° โดยในพีคช่วงแรกจะเป็นของ HDPE ที่เป็นเมทริกซ์แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟ XRD ของ HDPE ผสมกับเส้นใยทองแดงนาโน [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า HDPE ที่ผสมเส้นใยทองแดงนาโน มีค่า tensile strength ที่ดีที่สุด เนื่องจากเส้นใยทองแดงนาโนสามารถช่วยเสริมแรงได้ แสดงในตารางที่ 2.2

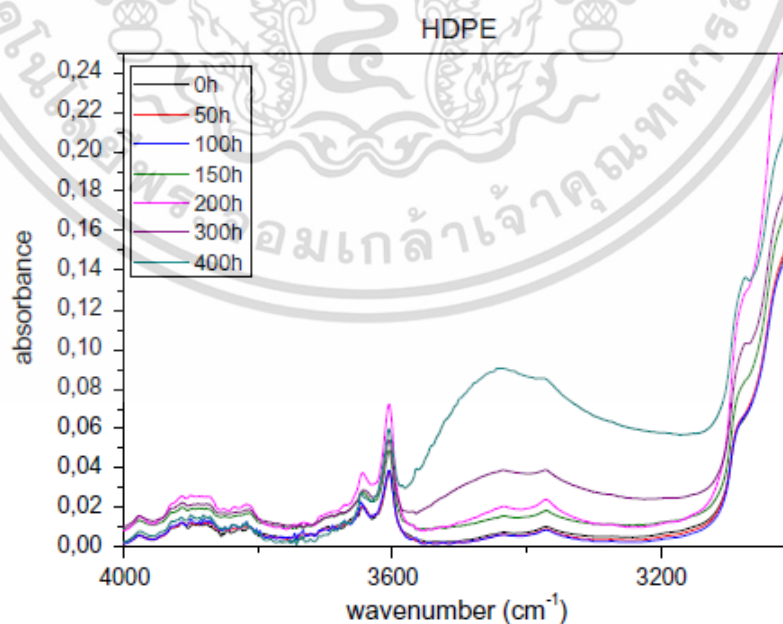
ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของ HDPE ผสมกับเส้นใยทองแดงนาโน

Mechanical properties of HDPE and its nanocomposites.

Samples	Tensile strength at yield point (MPa)	Tensile strength at break (MPa)
HDPE	23.1 ± 2.3	28.4 ± 2.3
Cu-nanotubes 0.5 wt%	23.0 ± 1.5	28.2 ± 1.7
Cu-nanotubes 1.0 wt%	22.7 ± 2.1	29.3 ± 1.6
Cu-nanotubes 2.5 wt%	22.9 ± 2.3	30.8 ± 2.2

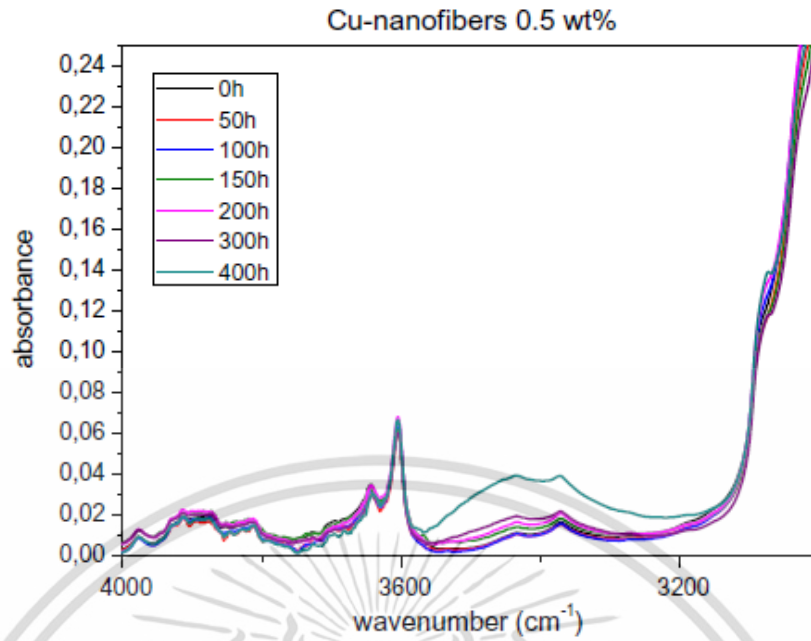
Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)	Impact strength (J/m)
808 ± 45	652 ± 34	486 ± 12
610 ± 60	735 ± 30	268 ± 11
640 ± 50	770 ± 30	242 ± 10
760 ± 55	805 ± 35	258 ± 13

การทดสอบผลของ UV ที่มีผลต่อฟิล์มด้วยเครื่อง FT-IR โดยจะทำการเทียบค่าการดูดกลืนแสงของ hydroxyl peak area ซึ่งจะเพิ่มขึ้นหลังจากให้รังสี UV HDPE, HDPEผสมเส้นใยทองแดงนาโนปริมาณ 0.5 และ 2.5 % โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 2.11, 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ

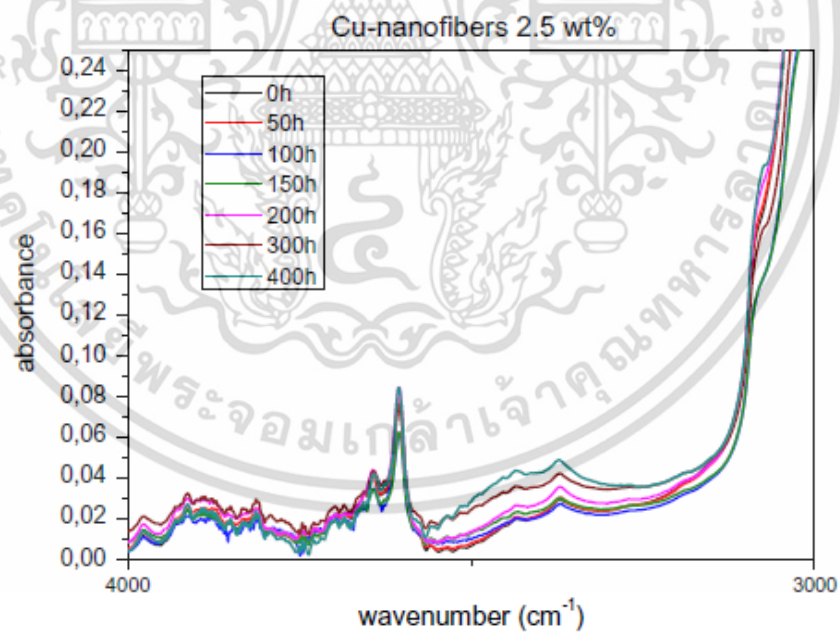


รูปที่ 2.11 FTIR spectrum ของ HDPE ผ่านรังสี UV ในช่วงเวลาต่างๆ [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



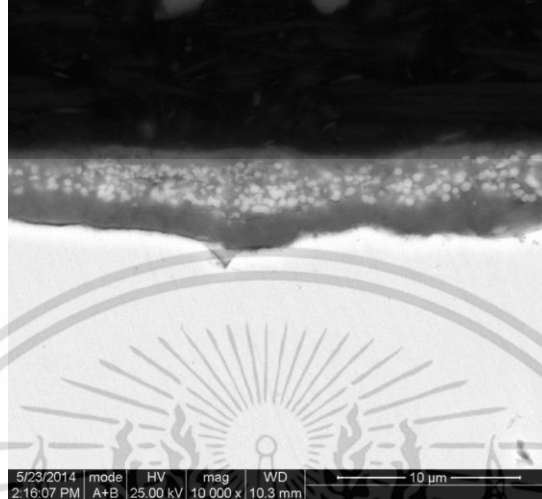
รูปที่ 2.12 FTIR spectrum ของ HDPE ผสมกับเส้นใยทองแดงนาโนปริมาณ 0.5 %wt [24]



รูปที่ 2.13 FTIR spectrum ของ HDPE ผสมกับเส้นใยทองแดงนาโนปริมาณ 2.5 %wt ที่ผ่านรังสี UV ในช่วงเวลาต่างๆ [24]

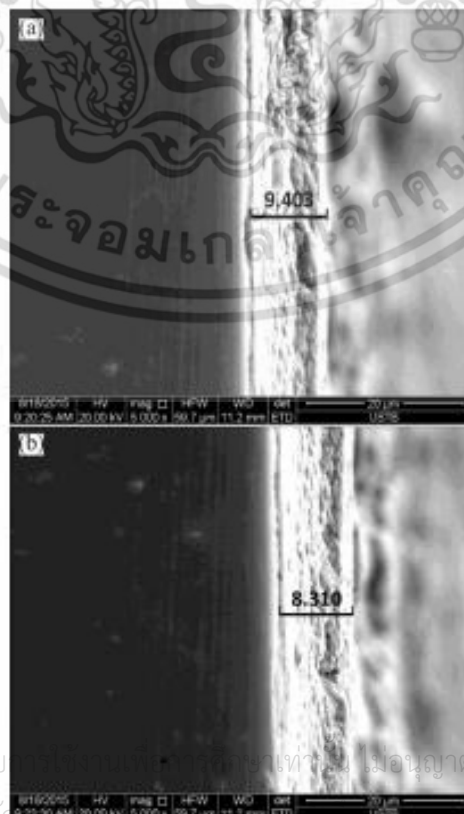
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

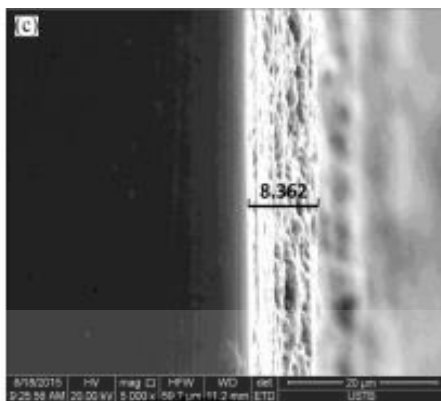
ปี 2015 A.L. Ma และคณะ [25] ได้ทำการทดลองการกัดกร่อนต่อที่มีอัตราส่วนของทองแดงต่อนิกเกิล 90:10 ในน้ำทะเลเป็นเวลา 1 เดือนพบว่า จากภาพ SEM ที่ตัดขวางนั้น ทองแดงมีการกัดกร่อนที่น้อยกว่านิกเกิล และบริเวณที่เกิดการผสมกันระหว่างทองแดงและนิกเกิลที่บริเวณตรงกลางจะมีจุดสีขาวเกิดขึ้น (รูปที่ 2.14)



รูปที่ 2.14 ภาพ SEM ที่เกิดการกัดกร่อนของทองแดงและนิกเกิล 90:10 ในน้ำทะเลเป็นเวลา 1 เดือน [25]

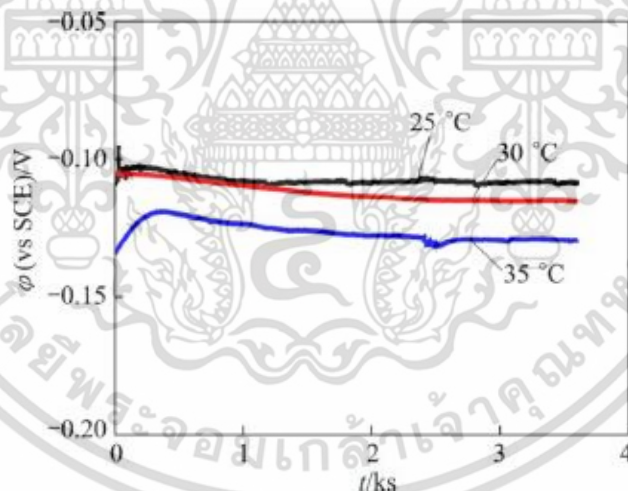
ในปี 2016 D. Kong และคณะ [26] ได้ทำการทดสอบการกัดกร่อนของทองแดงในสภาพอากาศที่ร้อนและแห้ง พบว่า ภาพ SEM ที่ตัดขวางแสดงสัญญาณวิทยาของตัวอย่างทองแดงหลังจากที่ทิ้งเอาไว้ในสภาพอากาศที่ร้อนและแห้งเป็นระยะเวลา 3 ปี ความหนาของชั้นงานมีความบางที่ลดลง ดังรูปที่ 2.15





รูปที่ 2.15 ภาพ SEM ตัดขวางของทองแดงที่ทดสอบในสภาพอากาศที่ร้อนและแห้งเป็นระยะเวลา 3 ปี [26]

เมื่อทำการทดสอบด้วยไฟฟ้าเคมีโดยจุ่มทองแดงในสารละลาย 0.5% NaCl (pH = 9.0) ที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35 °C ค่าความต่างศักย์มีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นและมีความชื้น ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างทองแดงในสารละลาย 0.5 % NaCl (pH= 9.0) ที่ทดสอบในอุณหภูมิที่ 25, 30 และ 35 °C [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.1.1 ซ้อนตักสารพลาสติก
- 3.1.2 แท่งแก้วคนสาร
- 3.1.3 แท่งแม่เหล็กปั่นกวน (Magnetic bar)
- 3.1.4 กระจกฟอยล์
- 3.1.5 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.1.6 กระจกตวงขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 3.1.7 ปีเปตสเกลขนาด 5 มิลลิลิตร
- 3.1.8 ตู้อบสาร ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.9 เตาแผ่นให้ความร้อน (Hot plate) ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.10 ปีกเกอร์ขนาด 100, 1000 มิลลิลิตร
- 3.1.11 เครื่องชั่งสารดิจิทัล 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง ผลิตโดยบริษัท Satorious ประเทศเยอรมนี
- 3.1.12 นาฬิกาจับเวลา
- 3.1.13 ถุงมือกันความร้อน
- 3.1.14 ผ้าปิดจมูก
- 3.1.15 แว่นตาป้องกัน
- 3.1.16 ถุงซีป्लीอค LDPE
- 3.1.17 ถุงร้อน HDPE
- 3.1.18 ถังผสมเม็ดพลาสติก
- 3.1.19 เครื่องผสมภายใน (Internal mixing) BRABENDER รุ่น MX500-D75L90, บริษัท CHAREON, ประเทศไทย
- 3.1.20 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (Grinding machines) รุ่น BG25, บริษัท BOSCO, ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.1.21 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) รุ่น LF-250, บริษัท LLYOD INSTRUMENT LTD, ประเทศอังกฤษ
- 3.1.22 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer;XRD) รุ่น D8 advance, บริษัท SIEMENS, ประเทศเยอรมนี
- 3.1.23 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric analyzer;TGA) รุ่น PYRIS Diamond, บริษัท PERKIN ELMER LTD, ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.24 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning Electron Microscope;FE-SEM) LEO รุ่น JSM-71001F, บริษัท JOEL LTD, ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.25 เครื่องเป่าขึ้นรูปพลาสติก (Blown-film machine) รุ่น SPL 25G-LAB, บริษัท SPL MACHINERY Co., LTD, ประเทศไทย

3.2 วัสดุและสารเคมี

- 3.2.1 ผงทองแดงขนาดประมาณ 10 ไมครอน จากบริษัท Sigma-Aldrich Co. LLC.
- 3.2.2 ผงสังกะสีขนาดประมาณ 10 ไมครอน จากบริษัท AJAX FINECHEM Pty Ltd
- 3.2.3 เอทานอล ความบริสุทธิ์ 95% จากบริษัท CARLO ALBA REAGENTS GROUP
- 3.2.4 น้ำกลั่น
- 3.2.5 น้ำมันพาราฟิน (paraffin oil)
- 3.2.6 กรดสเตียริก (Stearic acid) จากบริษัท CARLO ALBA REAGENTS GROUP
- 3.2.7 เม็ดพลาสติก HDPE จากบริษัท PTT Global Chemical (แสดงในตารางที่ 3.1)
- 3.2.8 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จาก Sigma-Aldrich Co. LLC.
- 3.2.9 กรดอะซิติก (Acetic acid) จาก Sigma-Aldrich Co. LLC.
- 3.2.10 ผงคาร์บอนแบล็ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สมบัติเม็ดพลาสติก HDPE จากบริษัท PTT Global Chemical

Properties	Value	Unit	Test Method
Melt flow rate (190°C, 2.16 kg)	0.047	g/10min	ASTM D1238
Density	0.957	g/cm ³	ASTM D1505
Melting point	129	°C	ASTM D2117
Tensile Strength	300-390	Kg/cm ²	ASTM D638
Elongation at break	820	%	ASTM D638
Flexural Modulus	12000	Kg/cm ²	ASTM D790



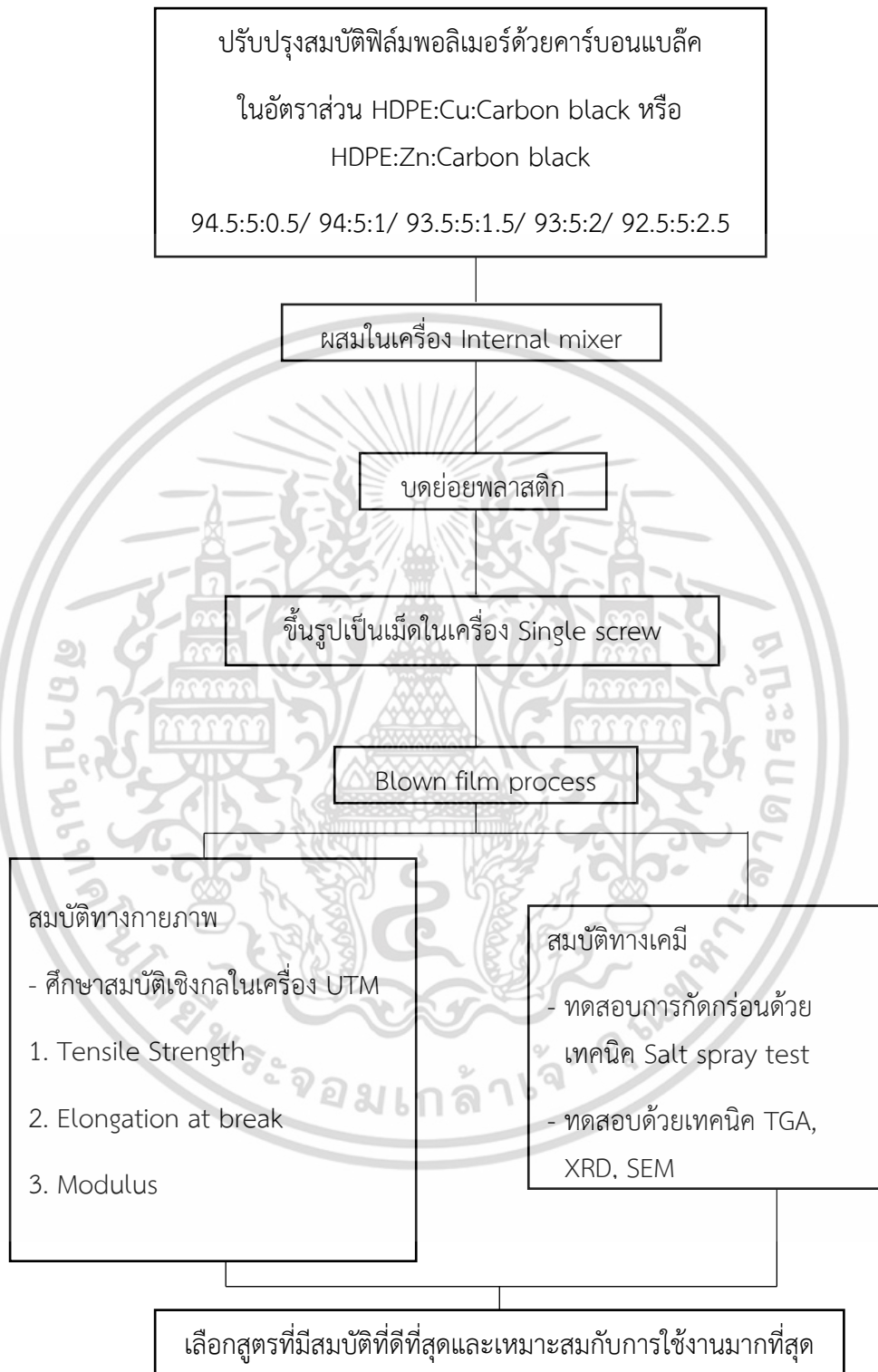
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังแสดงกระบวนการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังแสดงกระบวนการปรับปรุงสมบัติฟิล์มพอลิเมอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมผงโลหะ

ในการเตรียมผงโลหะก่อนทำการผสมลงในเครื่องผสมภายใน ต้องทำการปรับปรุงพื้นที่ผิวของผงโลหะ เพื่อให้ผงโลหะสามารถกระจายตัวในเมทริกซ์และยึดเกาะกับเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้

3.3.1.1 เตรียมสารละลายกรดสเตียริก โดยการชั่งกรดสเตียริก 20 กรัม ละลายในเอทานอล 500 มิลลิลิตร และทำการปั่นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสจนกว่ากรดสเตียริกจะละลายหมด

3.3.1.2 เติมผงโลหะลงในสารละลายกรดสเตียริก 150 กรัม ทำการปั่นกวนโดยใช้แท่งแม่เหล็กปั่นกวนที่จำนวนรอบ 1400 rpm เป็นเวลา 2 ชม.

3.3.1.3 ตั้งทิ้งไว้จนผงโลหะเริ่มตกตะกอน แล้วทำการเทสารละลายสเตียริกส่วนบนทิ้งให้เหลือปริมาณสารละลายสเตียริกในปิเกออร์ปริมาณ 200 มิลลิลิตรแล้วทำการอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเก็บผงโลหะที่ทำการปรับปรุงพื้นที่ผิวแล้วในที่ที่ควบคุมความชื้น เพื่อนำไปทำการผสมกับเม็ดพลาสติกต่อไป

3.3.2 กระบวนการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

การผสมเม็ดพลาสติก HDPE กับผงโลหะที่ทำการปรับปรุงพื้นที่ผิวแล้วด้วยกรดสเตียริก โดยอัตราส่วนต่างๆที่ใช้ในการผสม แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สูตรในการผสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE ผสมกับผงโลหะ

ชนิดของผงโลหะ	พอลิเมอร์ผสม	สูตรที่1	สูตรที่2	สูตรที่3	สูตรที่4	สูตรที่5	สูตรที่6	สูตรที่7
ผงทองแดง	HDPE:Cu	100:0	99:1	98:2	97:3	96:4	95:5	90:10
ผงสังกะสี	HDPE:Zn	100:0	99:1	98:2	97:3	96:4	95:5	90:10

ทำการผสมด้วยเครื่องผสมภายในระบบปิดแบบ อินเทอร์เน็ต มิกเซอร์ (Internal mixer) จากบริษัท CHAREON TUT Co,LTD รุ่น Mixer: MX500-D75L90 โดยใช้พาราฟิน ออยล์ เป็นสารหล่อลื่นช่วยในการผสมปริมาณ 3 มิลลิลิตร โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการผสมดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ 200 องศาเซลเซียส
- Screw Speed 60 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม (Blown film process)

นำของผสมที่ได้จากเครื่องอินเตอร์นอลมิกเซอร์แต่ละสูตรใส่ในเครื่องบดพลาสติกจากบริษัท BOSCO เพื่อให้พลาสติกมีขนาดเล็กลงและเหมาะสมที่ใช้งานในเครื่อง single screw extruder นำพลาสติกที่ได้จากเครื่องบดมาใส่ในเครื่อง single screw extruder เพื่อใช้ในการตัดเม็ดพลาสติกให้มีขนาดที่เหมาะสมในการใส่ในเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม โดยจะทำการควบคุมค่าพารามิเตอร์ดังนี้

- อุณหภูมิในโซนที่ 1 = 180 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิในโซนที่ 2 = 185 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิในโซนที่ 3 = 190 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิในโซนที่ 4 = 195 องศาเซลเซียส
- Screw speed 20 rpm

เมื่อพลาสติกออกมาจากเครื่อง single screw extruder และผ่านน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นแล้ว จะนำเข้าสู่เครื่องตัดเม็ดโดยความเร็วที่ต้องควบคุมคือความเร็วของสายพานและความเร็วของใบมีดที่ทำการตัดเส้นพลาสติกให้เป็นเม็ด หลังจากนั้นนำเม็ดพลาสติกที่ได้เข้าสู่กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มต่อไป

การขึ้นรูปพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มจากบริษัท SPL MACHINERY Co., LTD รุ่น SPL 25G-LAB ได้ทำการควบคุมสถานะต่างๆดังนี้

- อุณหภูมิในโซนที่ 1 = 190 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิในโซนที่ 2 = 195 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิในโซนที่ 3 = 200 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิในโซนที่ 4 = 210 องศาเซลเซียส
- Screw speed 60 rpm
- Speed ม้วนบน 22 rpm
- Speed ม้วนล่าง 4 rpm

3.3.4 การทดสอบสมบัติ

3.3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal Machine จากบริษัท LLOYD INSTRUMENTS รุ่น LR 5K โดยทำการตัดชิ้นงานเป็นแผ่นฟิล์มหนา 0.05 มิลลิเมตร และกำหนดความยาวของเกต (Gauge length) 30 มิลลิเมตร ทดสอบค่ามอดูลัส การยืดตัว ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงดึง ตามการทดสอบมาตรฐาน ASTM D882 โดยกำหนดสถานะดังนี้

- อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
- น้ำหนักโหลด 100 นิวตัน
- ความเร็วในการดึง 100 มิลลิเมตร/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่ได้จากการทดสอบคือ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดูลัส (Modulus) และ ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) เป็นสิ่งที่บอถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งานของฟิล์มที่นำมาทดสอบสมบัติเชิงกล

3.3.4.2 การทดสอบสมบัติการกัดกร่อน

ในการทดสอบการกัดกร่อน โดยนำแท่งโลหะมาห่อด้วยฟิล์มที่ได้จากเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม แล้วทำการซีลปิดให้สนิท แล้วใช้วิธีทดสอบ salt spray test ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM B-117 โดยนำโซเดียมคลอไรด์ละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับค่า pH อยู่ในช่วง 6.5-7.2 และมีอุณหภูมิประมาณ 35 °C มาทำการฉีดพ่นเป็นละออง และทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จดบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป

หลังจากนั้นนำชิ้นงานใหม่มาทำการทดสอบ Acetic-salt spray test โดยเปลี่ยนสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นสารละลายกรดอะซิติก ที่มีค่า pH ในช่วง 3.1-3.3 มาฉีดพ่นเป็นละออง ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM B-287

3.3.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

การทดสอบทางความร้อนจะใช้เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (thermogravimetric analyzer; TGA) รุ่น PYRIS Diamond เพื่อหาอุณหภูมิในการสลายตัว โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้เริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ถึง 900 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน

3.3.4.4 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD) รุ่น D8 advance ในการวิเคราะห์ความเป็นผลึกแผ่นฟิล์ม โดยกำหนด

Scan Method เริ่มต้นที่ 20 ถึง 80 deg

Step size 0.02 deg

Time/step 1 วินาที

3.3.5 การปรับปรุงสมบัติฟิล์มพอลิเมอร์

ในการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์จะทำการเติมคาร์บอนแบล็คเพื่อช่วยในการกระจายตัวของทองแดงที่ทำการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยกรดสเตียริกแล้ว

ตารางที่ 3.3 สูตรในการผสมของพอลิเมอร์ระหว่าง HDPE ผสมกับผงโลหะ เมื่อทำการเติมคาร์บอนแบล็คเพื่อช่วยในการผสม

ชนิดของผงโลหะ	พอลิเมอร์คอมโพสิต	สูตรที่1	สูตรที่2	สูตรที่3	สูตรที่4	สูตรที่5
ผงทองแดง	HDPE:Cu:CB	94.5:5:0.5	94:5:1	93.5:5:1.5	93:5:2	92.5:5:2.5
ผงสังกะสี	HDPE:Zn:CB	94.5:5:0.5	94:5:1	93.5:5:1.5	93:5:2	92.5:5:2.5

แล้วทำการเตรียมฟิล์มและวิเคราะห์ตามขั้นตอน 3.3.2 – 3.3.4 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

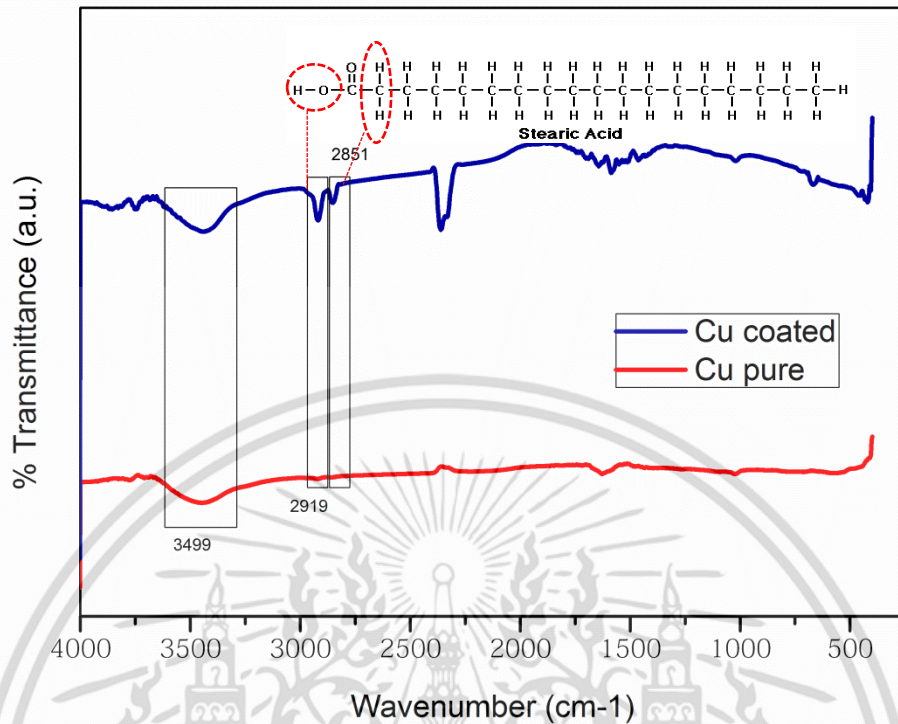
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการป้องกันสนิมจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและผงโลหะ โดยผงโลหะที่ใช้ในงานวิจัยได้ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกเพื่อให้สามารถผสมเข้ากับเม็ดพลาสติกได้ง่าย และนำมาทำการตรวจสอบวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆได้แก่ การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของผงโลหะด้วยเทคนิค FT-IR จากนั้นทำการผสมผงโลหะและเม็ดพลาสติกเข้าด้วยกันในเครื่อง Internal mixer ทำการตัดเม็ดด้วยเครื่อง single screw extruder แล้วนำไปเข้าสู่กระบวนการเป่าฟิล์มและตรวจสอบสมบัติเชิงกล ด้วยเครื่อง Universal testing machine ตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก ตรวจสอบความเป็นผลึกเฉพาะด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และทำการศึกษาลักษณะวิทยาและการกระจายตัวของผงโลหะในฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของผงโลหะด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

การวิเคราะห์ผงโลหะด้วยเทคนิค FT-IR เพื่อทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผงโลหะก่อนทำการปรับปรุงพื้นผิวและหลังจากทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวเพื่อให้สามารถกระจายตัวได้ดีบนพลาสติกที่เป็นเมตริกซ์ โดยเริ่มจากการนำสารตัวอย่างมาอัดเป็นแผ่นบางๆร่วมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (Potassium Bromide, KBr) ที่เป็นสารเนื้อเยื่อยอมให้คลื่นรังสีอินฟราเรดส่องผ่านได้ พบว่า IR spectrum ของผงทองแดงที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก มีพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 3499 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของ O-H stretching ซึ่งเป็นของความชื้นที่อยู่ในผงทองแดง เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของผงทองแดงด้วยกรดสเตียริก พบว่ามีพีคที่เพิ่มขึ้นมา คือ พีคที่ตำแหน่ง 2919 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของ O-H stretching ของหมู่ฟังก์ชันกรดคาร์บอกซิลิก พีคที่ตำแหน่ง 2851 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของ C-H stretching ของอัลเคน ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 IR spectrum ของผงทองแดงก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิว

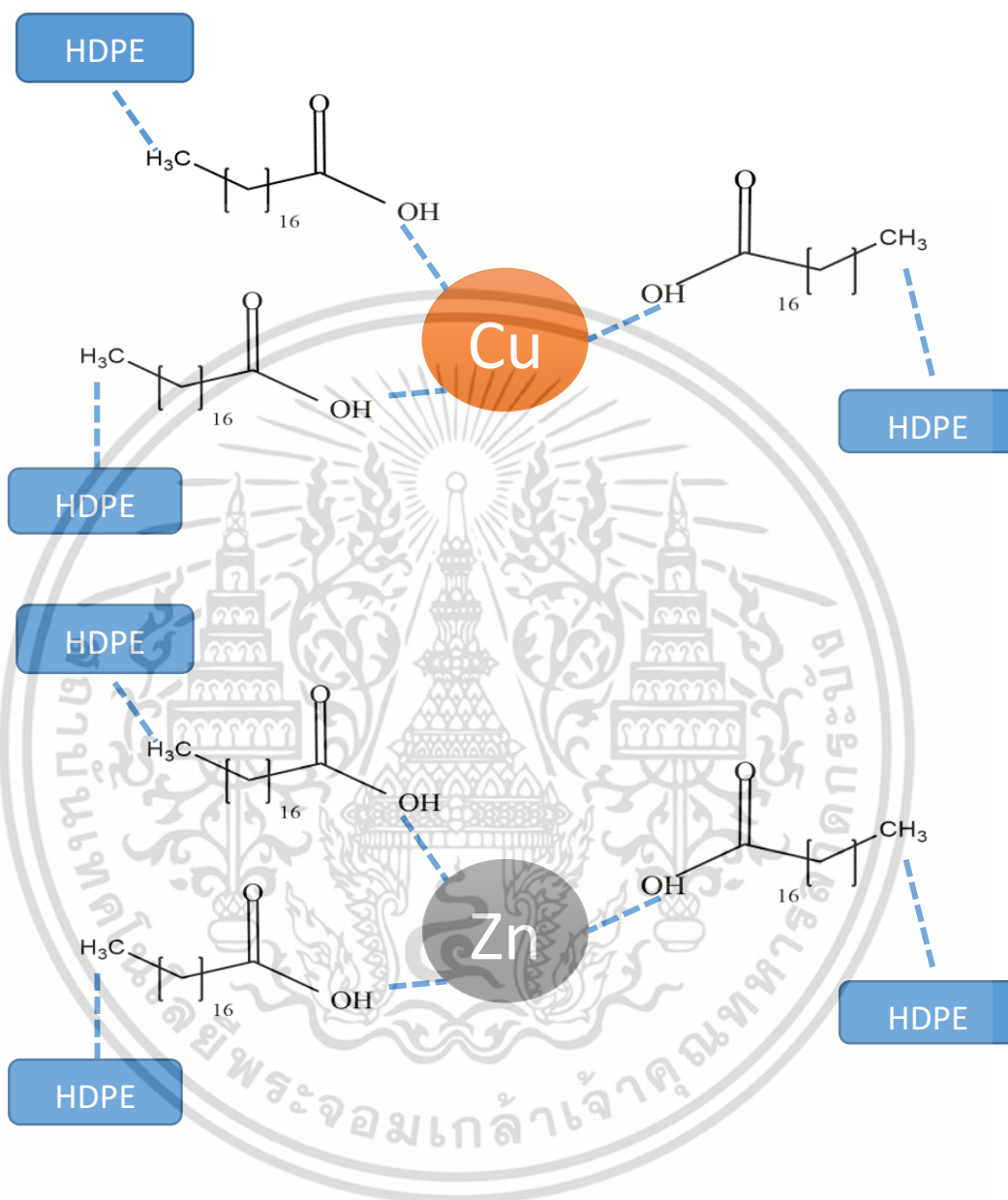
พีคที่เพิ่มขึ้นมานั้น อาจเกิดจากกรดสเตียริกที่เติมไปเพื่อปรับปรุงสมบัติพื้นผิว โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมีของกรดสเตียริก คือ $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ ซึ่งจัดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวประกอบไปด้วยสายโซ่ของคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจน แสดงความไม่มีขั้วแสดงพีคที่ 2851 cm^{-1} และมีหมู่ฟังก์ชันของกรดคาร์บอกซิลิกแสดงส่วนของความมีขั้ว แสดงพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 2919 cm^{-1} ส่วนพีคอื่นๆ อาจมาจากสารปนเปื้อนที่ได้จากกระบวนการผลิตผงทองแดง

IR spectrum ของผงสังกะสีที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิว มีพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 3446 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของ O-H stretching (เปรียบเทียบกับทองแดงซึ่งขึ้นพีคที่ตำแหน่ง 3499 cm^{-1}) ซึ่งอาจเกิดจากความชื้นที่ปนเปื้อนมา หลังจากปรับปรุงพื้นผิวของผงสังกะสีด้วยกรดสเตียริกแล้ว พบว่ามีพีคที่เพิ่มมา คือ พีคที่ตำแหน่ง 2918 cm^{-1} (เปรียบเทียบกับทองแดงซึ่งขึ้นพีคที่ 2919 cm^{-1} และมีหมู่ฟังก์ชันของกรดคาร์บอกซิลิก) ซึ่งเป็นตำแหน่งของ O-H stretching ของหมู่ฟังก์ชันกรดคาร์บอกซิลิก พีคที่ตำแหน่ง 2849 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของ C-H stretching ของอัลเคน (เปรียบเทียบกับทองแดงซึ่งขึ้นพีคที่ 2851 cm^{-1}) ดังรูปที่ 4.2

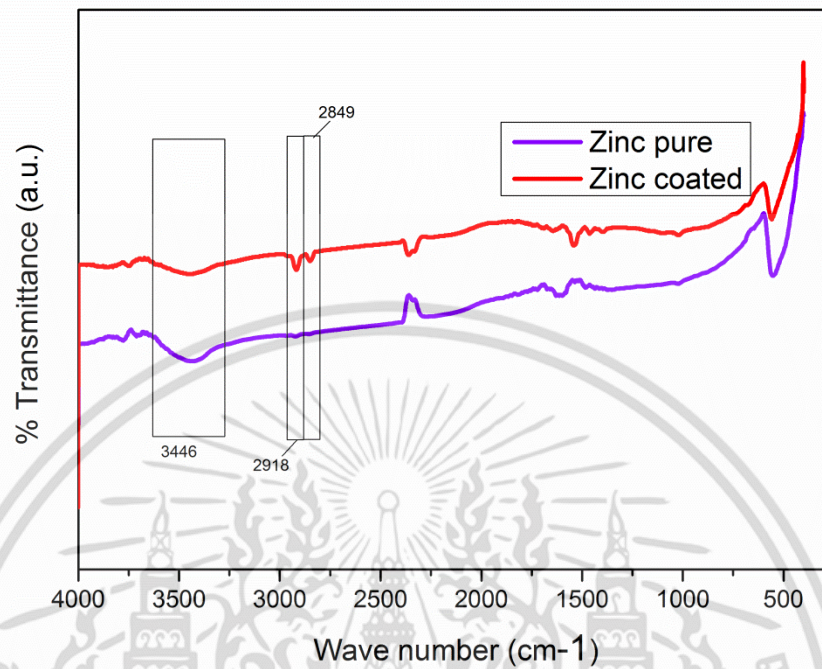
แสดงให้เห็นว่าพีคของผงทองแดงและผงสังกะสี ทั้งก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก พีคที่ปรากฏไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงว่ากรดสเตียริกที่เติมไป ไม่มีมีผลต่อผงโลหะทั้งสองชนิด ทั้งนี้เนื่องจาก ผงทองแดงและผงสังกะสีมีสภาพขั้วค่อนข้างสูง จึงทำให้เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (ดังแสดงในภาพ sem รูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.7, 4.8) ดังนั้นจึงเติมกรดสเตียริกลงไป โดยจะใช้ส่วนที่มีขั้วคือหมู่คาร์บอกซิลิก เข้าไปหาผงทองแดงหรือผงสังกะสี ในส่วนที่ไม่มีขั้วของกรดสเตียริกคือส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของพันธะ C-H จะไปยึดกับผิวของฟิล์ม HDPE ทำให้ความมีขี้ของผงโลหะลดสภาพความมีขี้ลง ทำให้เกิดการกระจายตัวได้ดี (ดังแสดงในภาพ SEM รูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.9, 4.10) ดังแสดงภาพจำลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

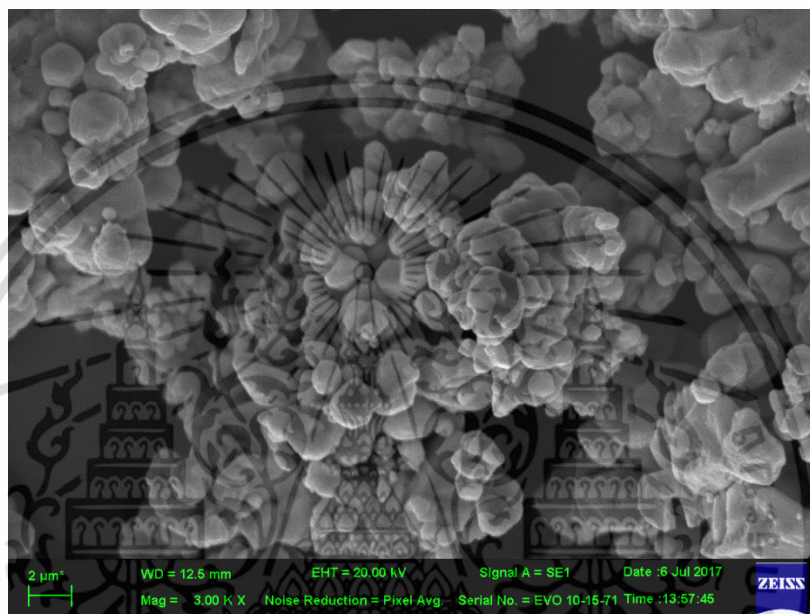


รูปที่ 4.2 IR spectrum ของผงสังกะสีก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิว

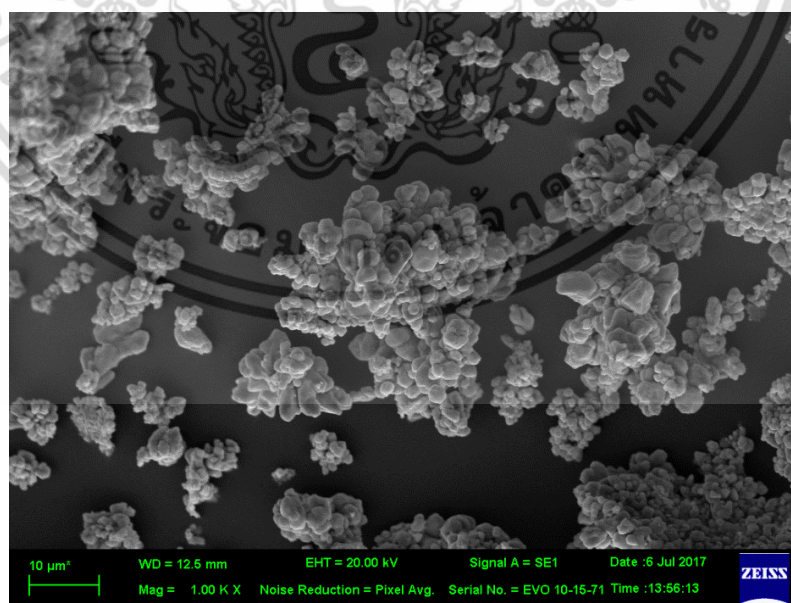
จาก IR spectrum ของผงทองแดงและผงสังกะสี สามารถบอกได้ว่าพีคที่เพิ่มขึ้นมา เป็นพีคของกรดสเตียริกที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติพื้นผิว เพราะพีคทั้ง 3 ตำแหน่ง มีตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันทั้งของผงทองแดงและผงสังกะสี เพราะฉะนั้นผงทองแดงหรือผงสังกะสีที่ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผงทองแดงหรือผงสังกะสีที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิว

4.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาคผงโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การตรวจสอบอนุภาคของผงทองแดงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าผงทองแดงก่อนทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิว มีลักษณะที่ขรุขระไม่เป็นระเบียบเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน อนุภาคมีลักษณะเป็นก้อนกลมปนรี มีขนาดน้อยกว่า 2 จนถึง 10 ไมครอน ซึ่งภาพที่แสดงเป็นภาพของผงทองแดงที่เห็นสเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า (รูปที่ 4.3) และ สเกลบาร์ขนาด 10 ไมครอน ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (รูปที่ 4.4)



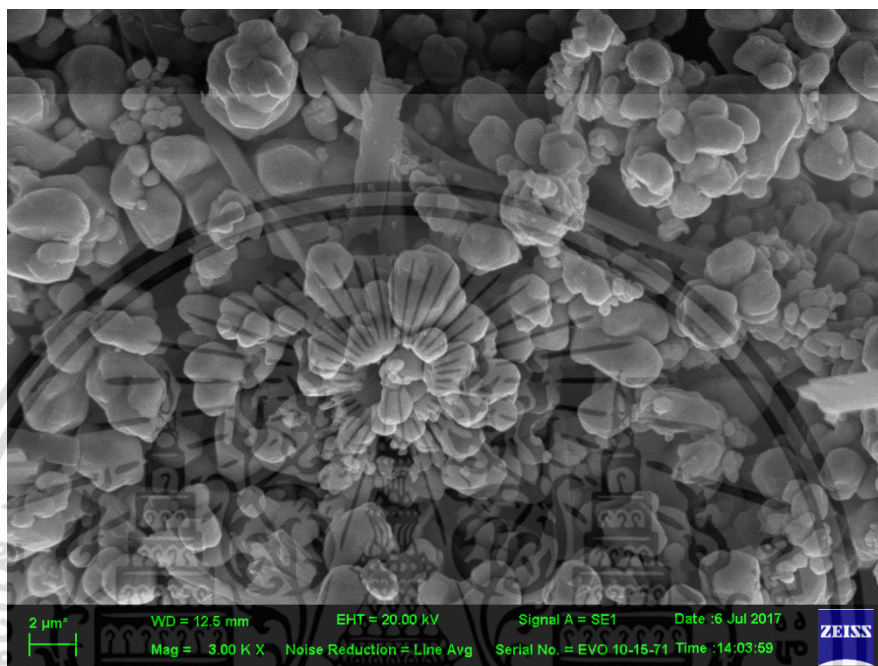
รูปที่ 4.3 ผงทองแดงที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



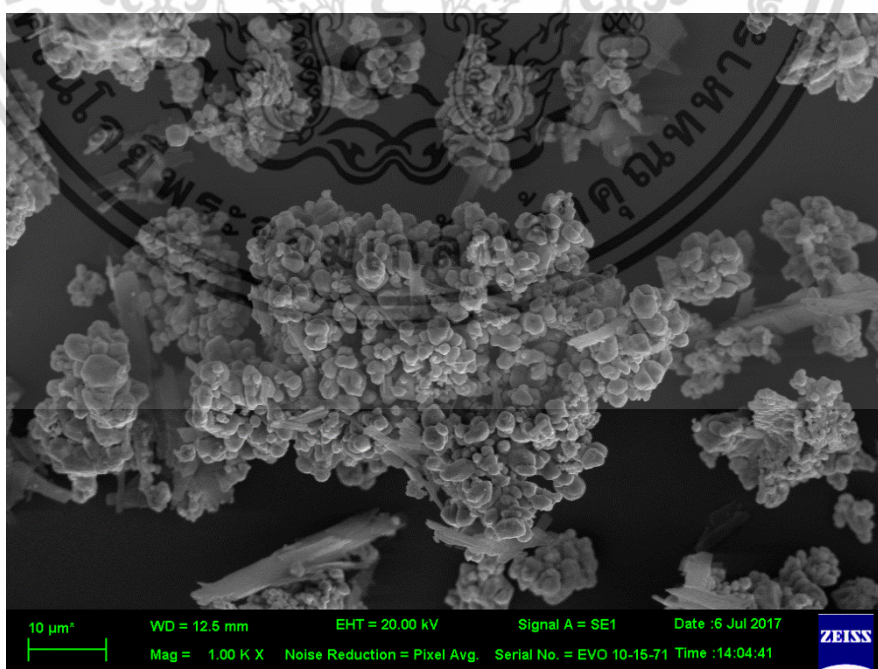
รูปที่ 4.4 ผงทองแดงที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผงทองแดงหลังจากทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิว มีลักษณะที่ขรุขระ อนุภาคมีลักษณะเป็นก้อนกลมปนรี มีขนาด 1 จนถึง 10 ไมครอน และมีเกล็ดของกรดสเตียริกที่ได้จากการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวกระจายอยู่ทั่วและปะปนกับผงทองแดง ซึ่งภาพที่แสดงเป็นภาพของผงทองแดงที่ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้ว โดยสเกลบาร์มีขนาด 2 ไมครอน ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า (รูปที่ 4.5) และสเกลบาร์ขนาด 10 ไมครอน ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (รูปที่ 4.6)



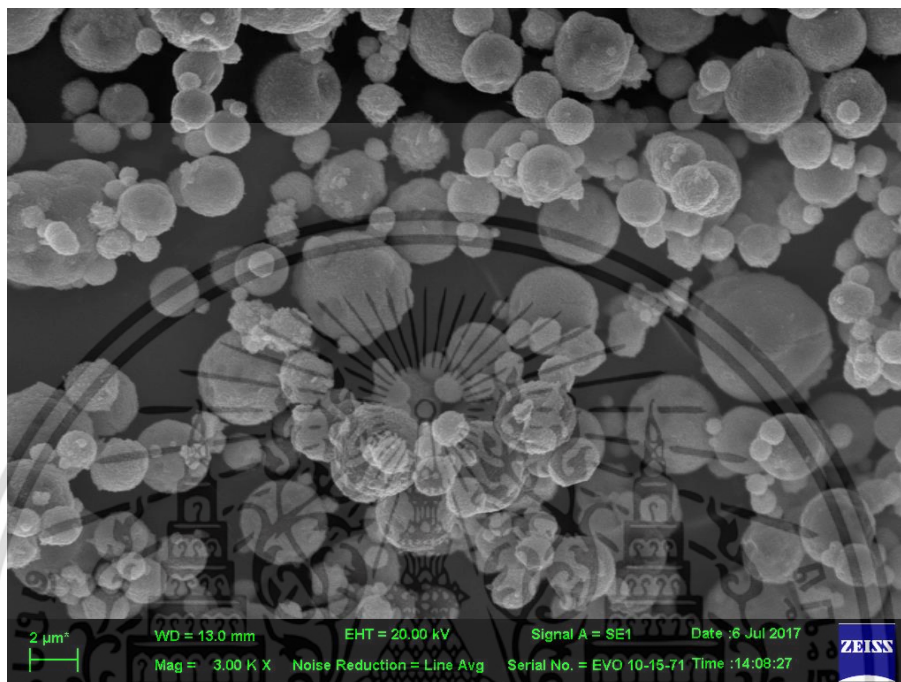
รูปที่ 4.5 ผงทองแดงที่ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



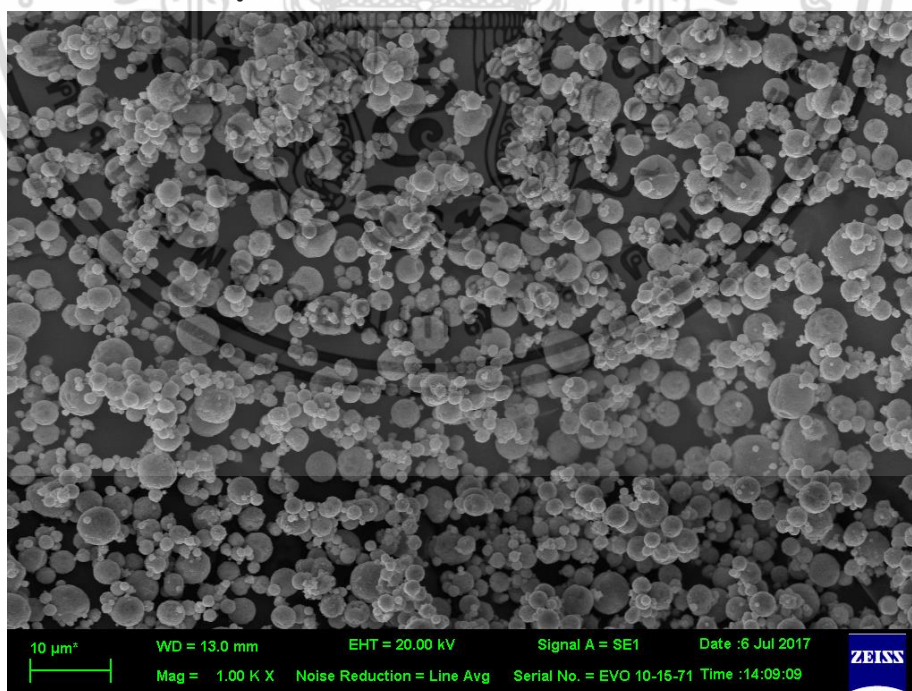
รูปที่ 4.6 ผงทองแดงที่ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบอนุภาคของผงสังกะสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าผงสังกะสีก่อนทำการปรับปรุงสมบัติพื้นที่ผิว อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมเกาะกลุ่มกัน ขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนจนมากกว่า 10 ไมครอน ซึ่งภาพที่แสดงเป็นภาพของผงสังกะสีที่เห็นสเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า (รูปที่ 4.7) และ สเกลบาร์ขนาด 10 ไมครอน ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (รูปที่ 4.8)



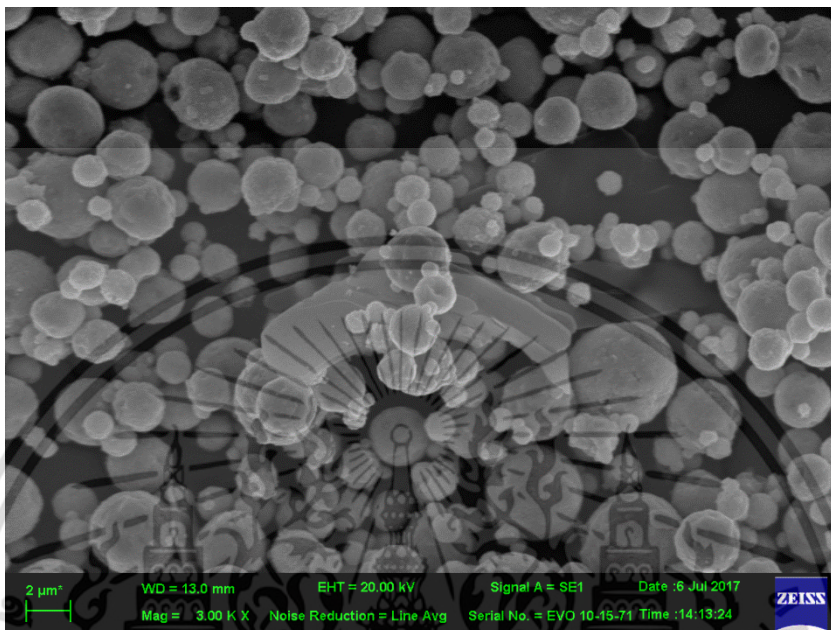
รูปที่ 4.7 ผงสังกะสีที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



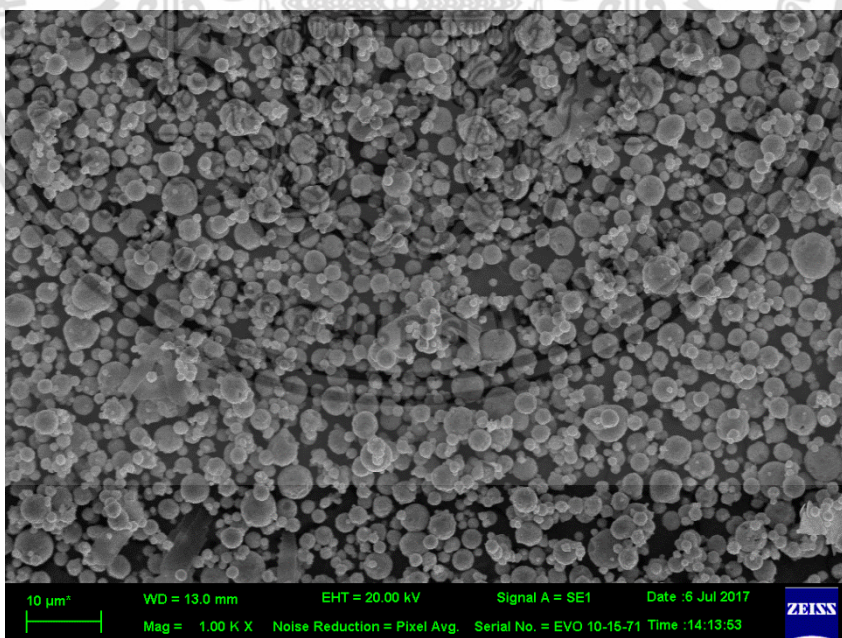
รูปที่ 4.8 ผงสังกะสีที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผงสังกะสีที่ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้ว มีลักษณะขรุขระมากขึ้น อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมเกาะกลุ่มกัน และมีเกล็ดของกรดสเตียริกกระจายปะปนอยู่กับผงสังกะสี ซึ่งภาพที่แสดงเป็นภาพของผงสังกะสีที่ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้ว โดยให้สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า (รูปที่ 4.9) และ สเกลบาร์ขนาด 10 ไมครอน ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (รูปที่ 4.10)



รูปที่ 4.9 ผงสังกะสีที่ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



รูปที่ 4.10 ผงสังกะสีที่ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

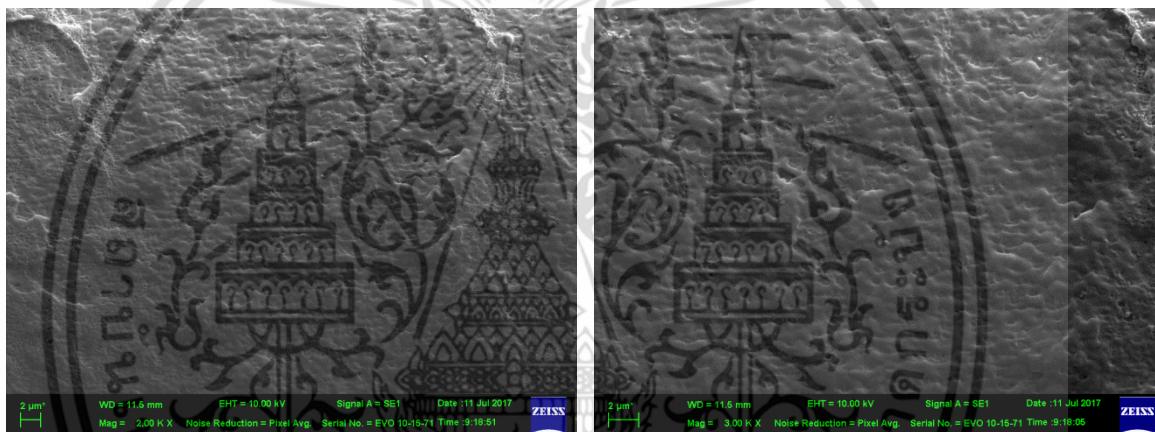
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของผงทองแดงหรือผงสังกะสีด้วยกรดสเตียริก เนื่องจากความเป็นขี้ของผงทองแดงและผงสังกะสีมีมาก ทำให้เกิดการกระจายตัวได้ไม่ดีในเมตริกซ์และเกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนได้ง่าย การขึ้นรูปฟิล์มจะยากขึ้น จึงใช้กรดสเตียริกในการปรับปรุงพื้นผิว เพื่อลดความเป็นขี้และสามารถกระจายตัวในเมตริกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น

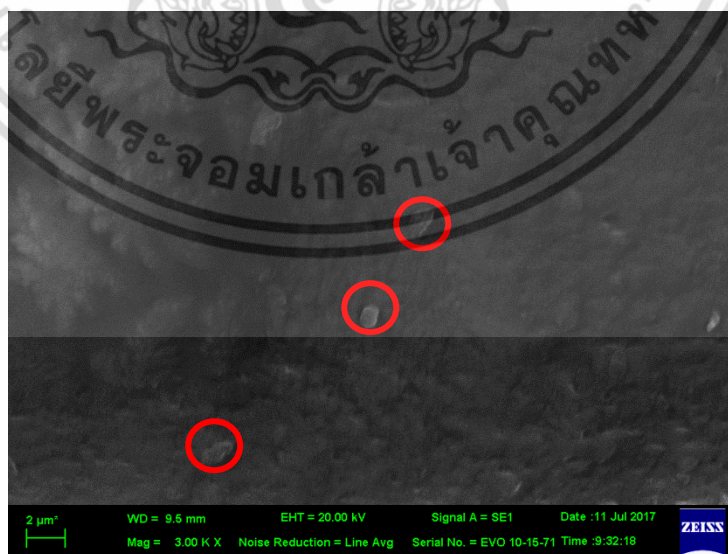
4.3 การทดสอบฟิล์มพอลิเมอร์

4.3.1 สันฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์

การศึกษาสันฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่เติมผงโลหะลงไปเพื่อดูความสามารถในการกระจายตัวของผงโลหะที่อยู่ในวัฏภาคของ HDPE ที่เป็นเมตริกซ์ (รูปที่ 4.11) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า ผงทองแดงหรือผงสังกะสีสามารถกระจายตัวในเมตริกซ์ได้ดี โดยภาพ SEM จะแสดงถึงการกระจายตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.12- 4.17

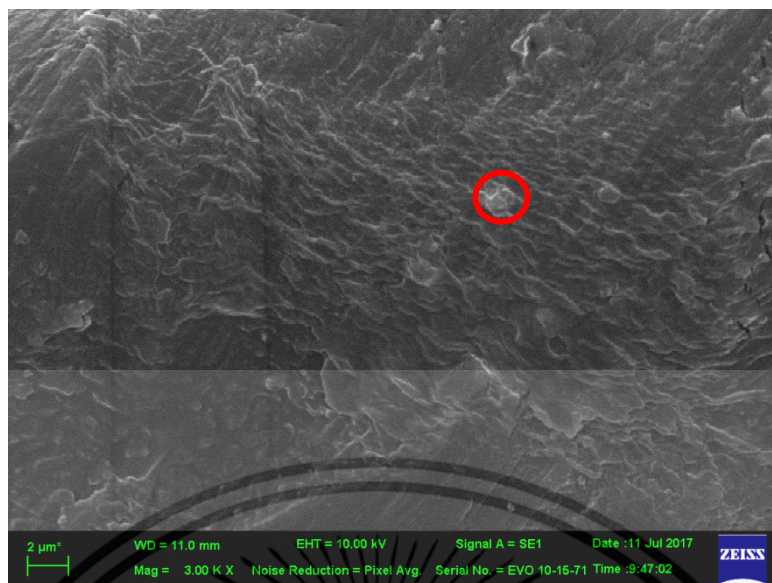


รูปที่ 4.11 ภาพ SEM ของฟิล์ม HDPE ที่กำลังขยาย 2000 และ 3000 เท่า



รูปที่ 4.12 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง 1 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

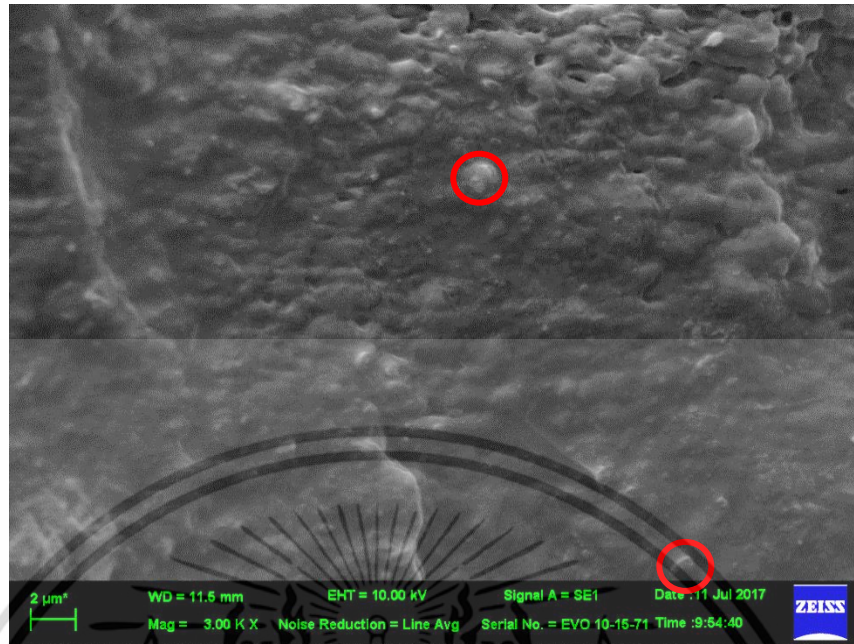


รูปที่ 4.13 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง 2 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า



รูปที่ 4.14 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง 3 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

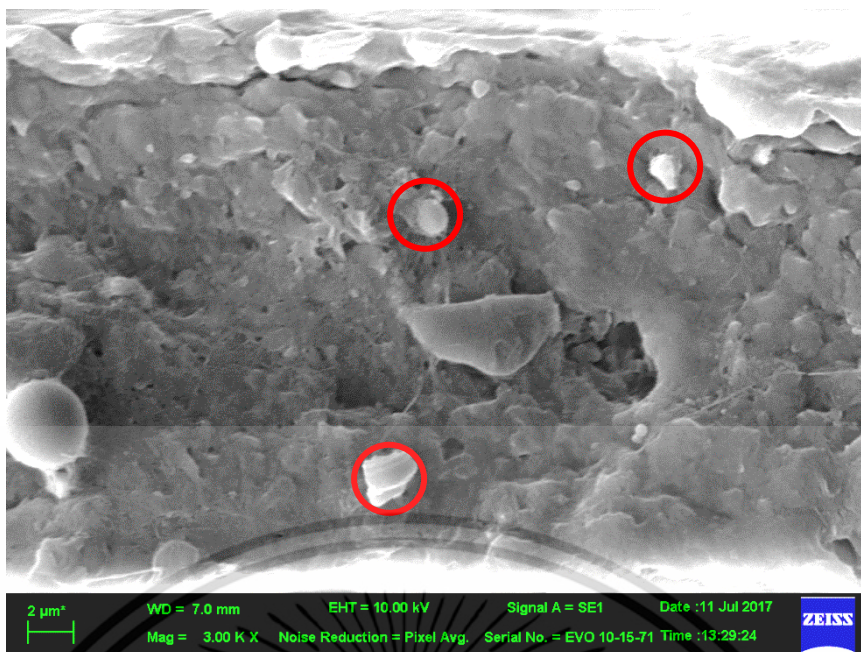


รูปที่ 4.15 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง 4 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า



รูปที่ 4.16 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง 5 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

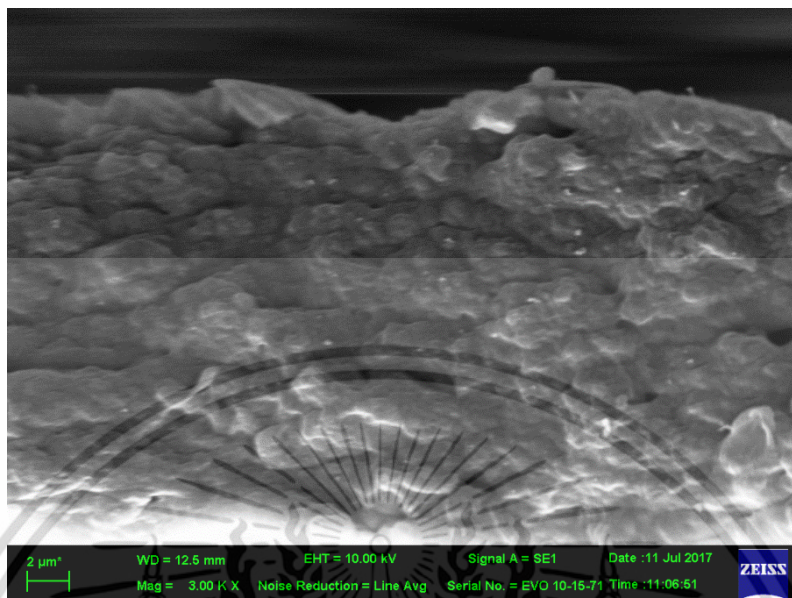
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง 10 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

จากภาพ SEM จะเห็นว่าผงทองแดงสามารถกระจายตัวได้ดีในฟิล์มพอลิเมอร์ และสามารถยึดเกาะกับเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์ได้ดี เนื่องจากผงทองแดงจะกระจายตัวอยู่ทั่วเมตริกซ์ และทองแดงยังเป็นสารที่สามารถออกซิไดส์จับกับไอออนในอากาศที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ แต่การเติมผงทองแดงมาก จะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์ เนื่องจากปริมาณของอนุภาคทองแดงมีจำนวนมาก อาจจะไม่สามารถเกาะบนฟิล์มได้ทั้งหมดจึงทำให้หลุดออกมา และเกิดเป็นรูพรุนขึ้น ทั้งนี้อาจส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลและความสามารถในการป้องกันกรกัดกร่อนได้

ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถ
 ดูการกระจายตัวได้จากภาพ SEM รูปที่ 4.18 – 4.25

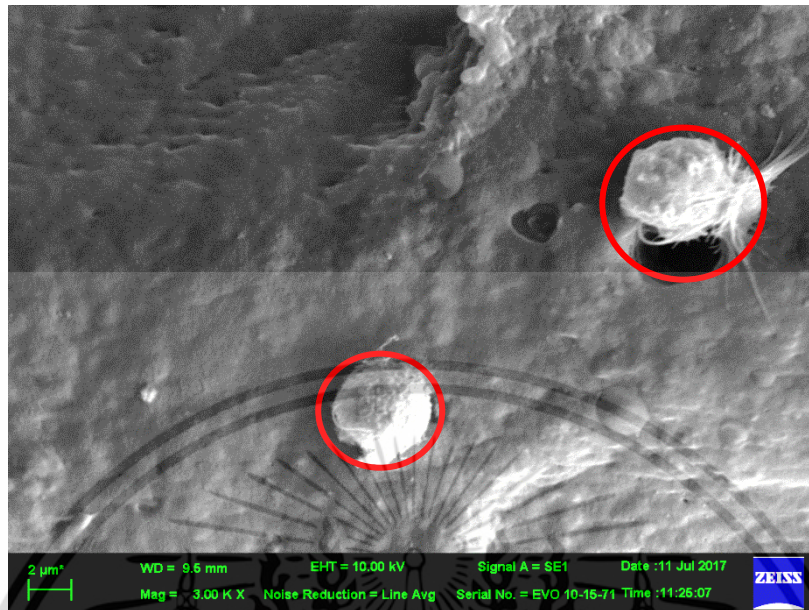


รูปที่ 4.18 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี 1 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า



รูปที่ 4.19 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี 2 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

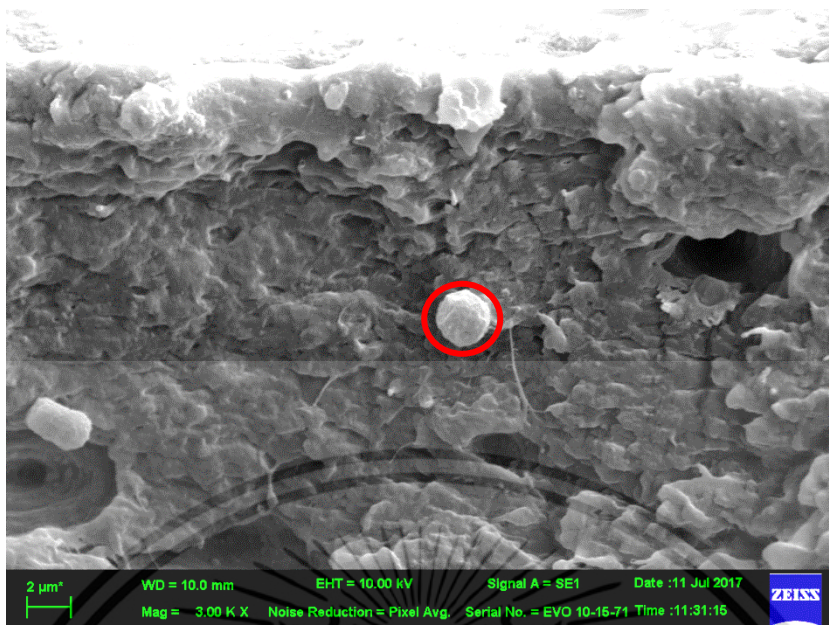


รูปที่ 4.20 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี 3 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

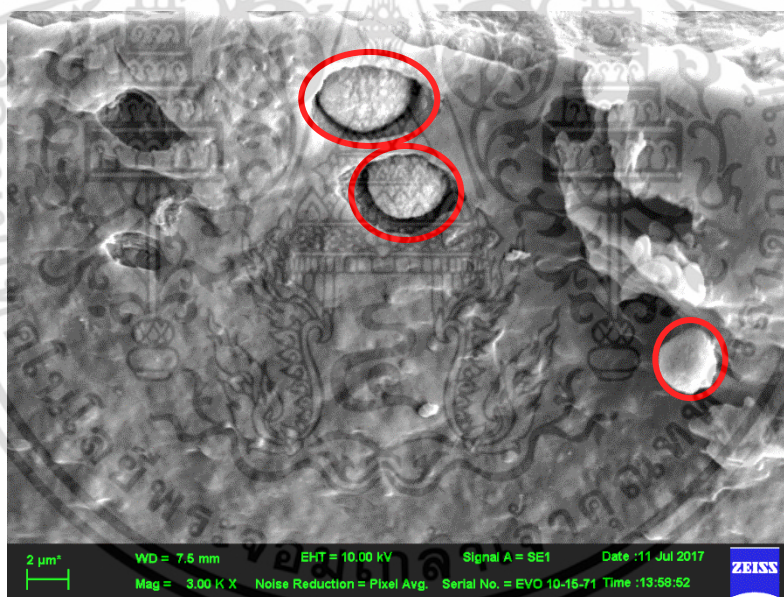


รูปที่ 4.21 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี 4 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี 5 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า



รูปที่ 4.23 ภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี 10 % ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

การใช้ผงสังกะสีเป็นสารตัวเติมในฟิล์มพอลิเมอร์ จากภาพ SEM จะเห็นได้ว่าสามารถกระจายตัวได้ดีในฟิล์มพอลิเมอร์ และ เมื่อทำการเพิ่มปริมาณของผงสังกะสีเพิ่มขึ้นจนถึง 3 % การยึดเกาะของผงสังกะสีในฟิล์มพอลิเมอร์ลดลง สังเกตได้จากรูพรุนที่พบบนผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สมบัติเชิงกลลดต่ำลง เนื่องจากเนื้อฟิล์มเกิดช่องว่างทำให้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลฟิล์มจะขาดได้ง่าย และอาจส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนได้

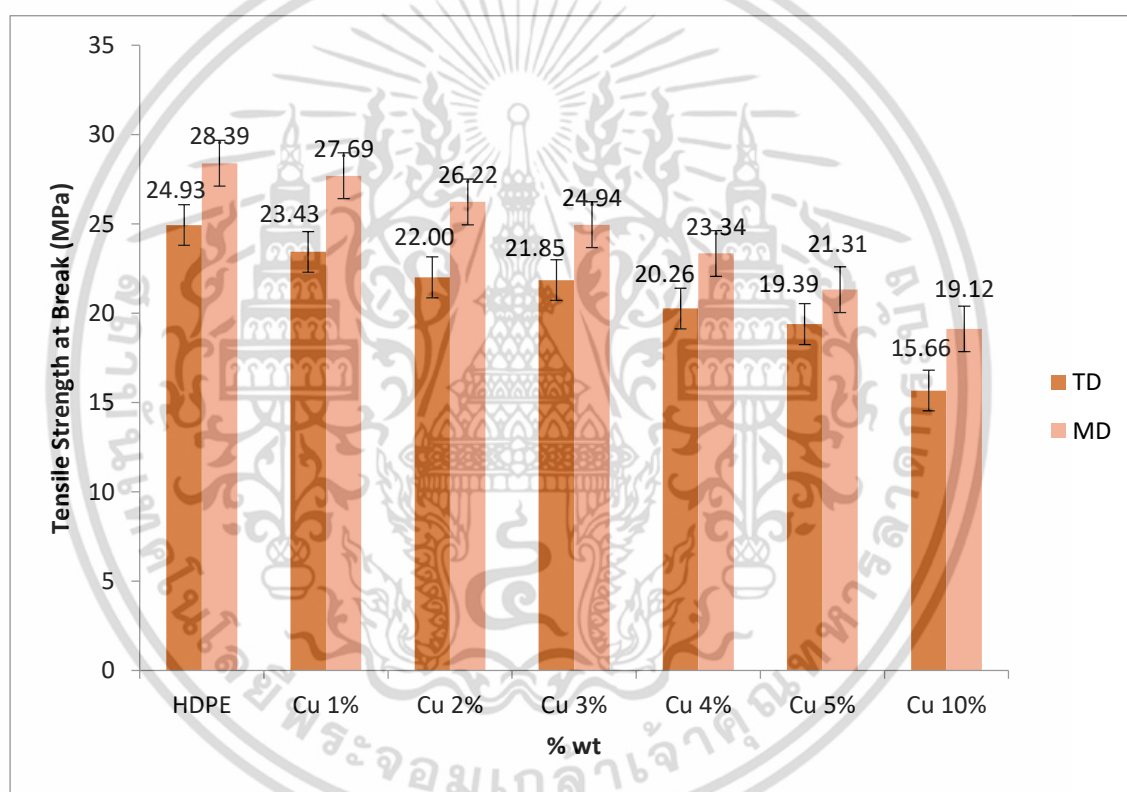
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์

4.3.2.1 ค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength)

การทดสอบความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้จากการเป่าฟิล์มด้วยเครื่อง Blown film extrusion และทำการทดสอบสมบัติความแข็งแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine ซึ่งทำการทดสอบสมบัติเชิงกลทั้งแนว TD (transverse direction) และ แนว MD (machine direction) พบว่า การเติมผงโลหะลงไปในเมตริกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ ส่งผลให้ความแข็งแรงมีค่าลดลงทั้งแนว TD และ MD เมื่อทำการเปรียบเทียบกับฟิล์ม HDPE ที่ไม่ได้ทำการผสมผงโลหะลงไปในเรื่องฟิล์มพอลิเมอร์

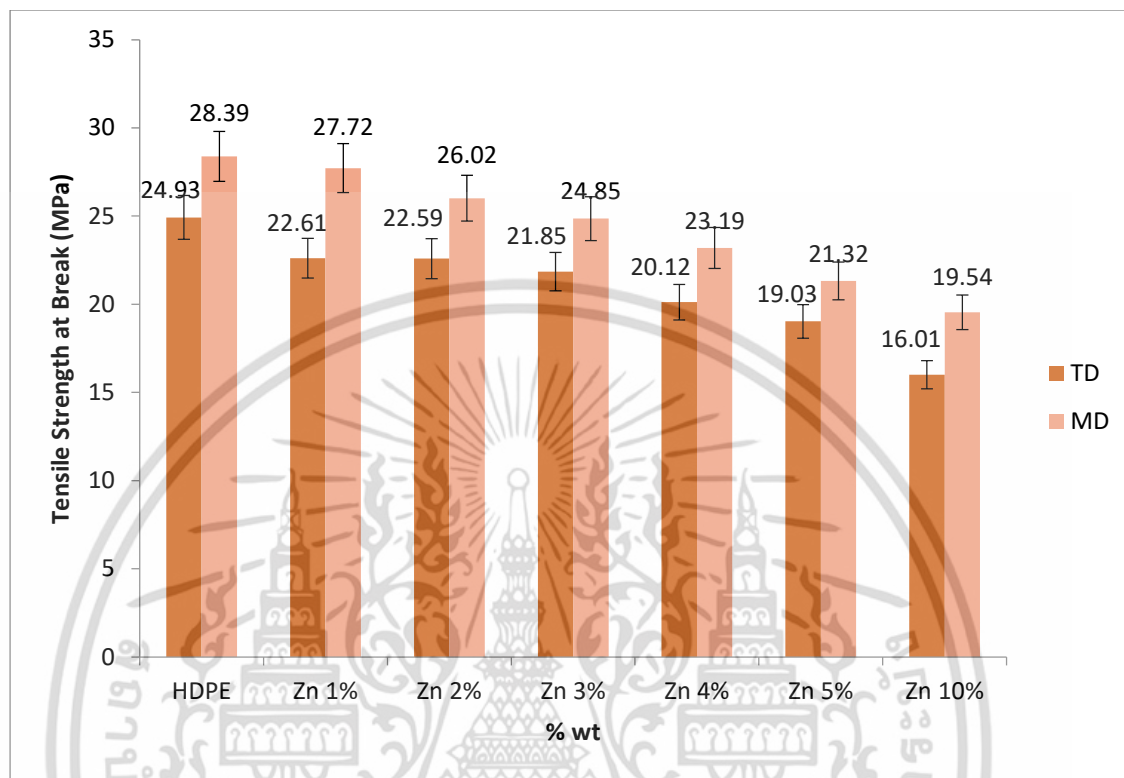
การเติมผงทองแดงจะทำให้สมบัติค่าความแข็งแรงดึงลดลง โดยสูตรที่ทำการทดสอบคือ HDPE : Cu ในอัตราส่วน 100:0, 99:1, 98:2, 97:3, 96:4, 95:5 และ 90:10 โดยค่าความแข็งแรงดึงที่ได้แสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 การทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงทองแดงในปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงสังกะสี พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีค่าลดลงเช่นเดียวกับการเติมผงทองแดง โดยที่เมื่อเพิ่มปริมาณของผงสังกะสี ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์มีค่าลดลง โดยค่าความแข็งแรงดึงแสดงดังในรูปที่ 4.25

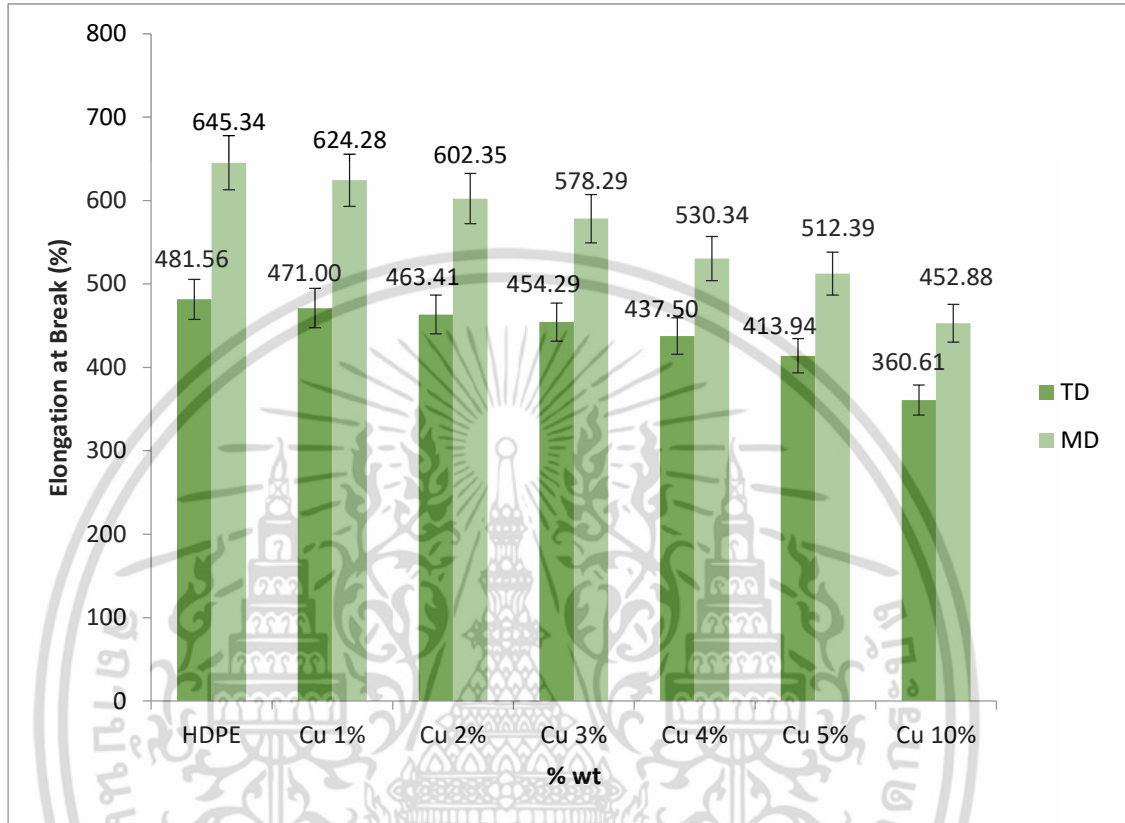


รูปที่ 4.25 การทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงสังกะสีในปริมาณต่างๆ

สาเหตุที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลง อาจมาจากของผงทองแดงหรือผงสังกะสีที่เติมเข้าไป ซึ่งไม่สามารถเข้ากันได้กับวัฏภาคของฟิล์มพอลิเมอร์ จึงเกิดการกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของฟิล์มพอลิเมอร์และแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ได้เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็ก (ประมาณ 2-10 ไมครอน) ทำให้สามารถขัดขวางการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อตัวฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมกับผงทองแดงหรือผงสังกะสีได้รับแรงดึง จึงทำให้สามารถขาดได้ง่ายกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เติมผงทองแดงหรือผงสังกะสี

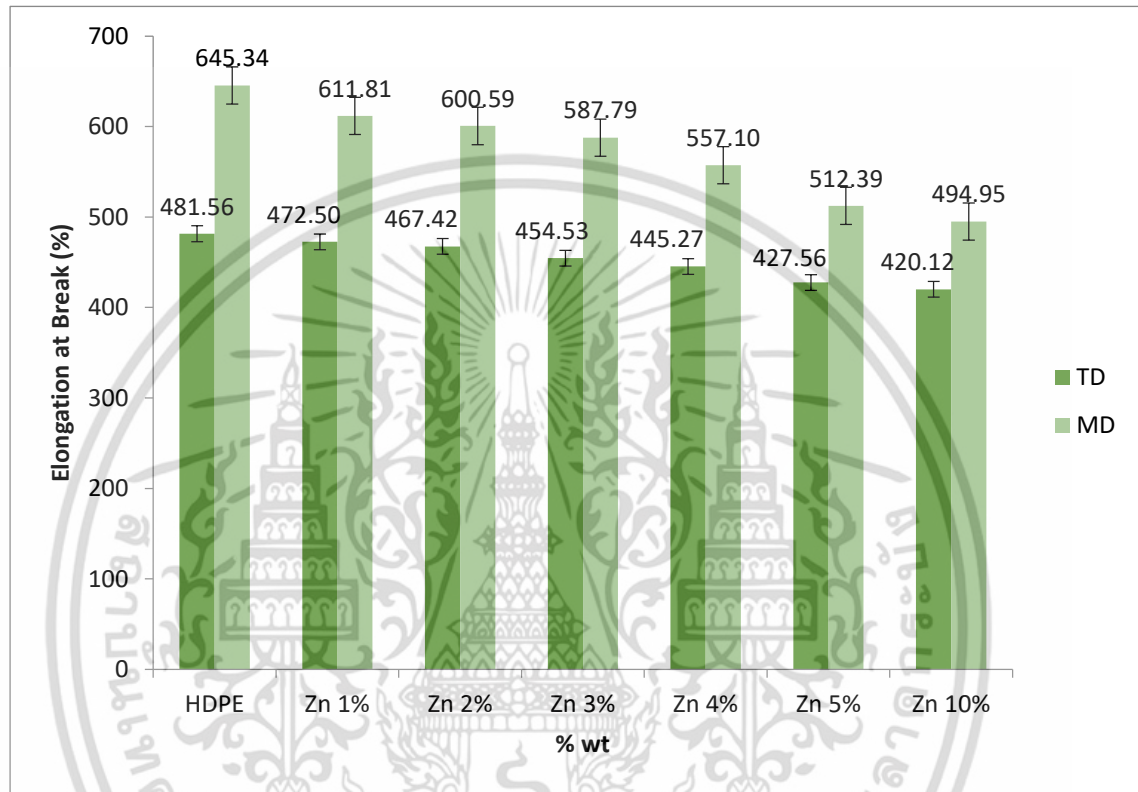
4.3.2.2 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break)

จากการศึกษาค่าการยืดตัว ณ จุดขาด พบว่า เมื่อปริมาณของผงทองแดงเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงทั้งในแนว TD และ MD ซึ่งการเพิ่มปริมาณของผงทองแดงมากขึ้น จาก 5% เป็น 10% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าการดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าที่ลดลงมาก แสดงดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 การทดสอบค่าการดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงทองแดงในปริมาณต่างๆ

การเติมผงสังกะสีลงไป ในเมตริกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์แทนการเติมผงทองแดง และ ทำการศึกษาค่าการดึงยืด ณ จุดขาด พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสังกะสี ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าที่ ลดลง แต่แตกต่างจากการใช้ผงทองแดง เนื่องจากปริมาณของผงสังกะสีที่เพิ่มขึ้นจาก 5% ไปเป็น 10% ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด ไม่มีความแตกต่างกันมาก สาเหตุนี้อาจมาจากอนุภาคของผงสังกะสี เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้ว สามารถเกาะกลุ่มกันได้ง่ายกว่าผงทองแดง ทำให้ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังรูปที่ 4.27

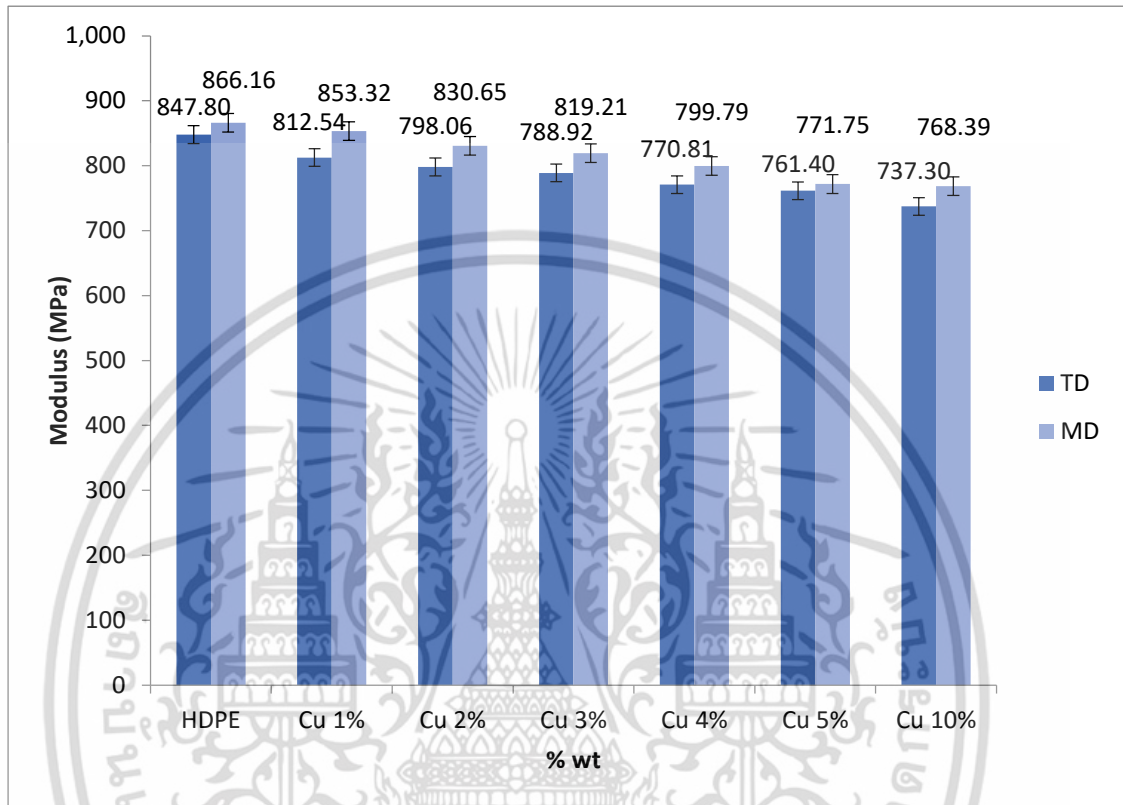


รูปที่ 4.27 การทดสอบค่าการดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงสังกะสีในปริมาณต่างๆ

สาเหตุที่ทำให้ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด ลดลง อาจมาจากการผสมผงทองแดงหรือผงสังกะสีลงไปกระจายตัวอยู่ในเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์มีอนุภาคเป็นของแข็ง ซึ่งเกิดการแยกวัฏภาคระหว่างผงโลหะ และฟิล์มพอลิเมอร์ เนื่องจากไม่สามารถเข้ากันได้ เกิดการขัดขวางการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ขาดง่ายเมื่อได้รับแรง การเพิ่มปริมาณของผงทองแดงหรือสังกะสีนั้น จะให้ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มมากขึ้น เพราะผงโลหะที่เติมลงไปมากขึ้นทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกี่ยวพันกันน้อยลง

4.3.2.3 ค่ามอดูลัส (Modulus of elasticity)

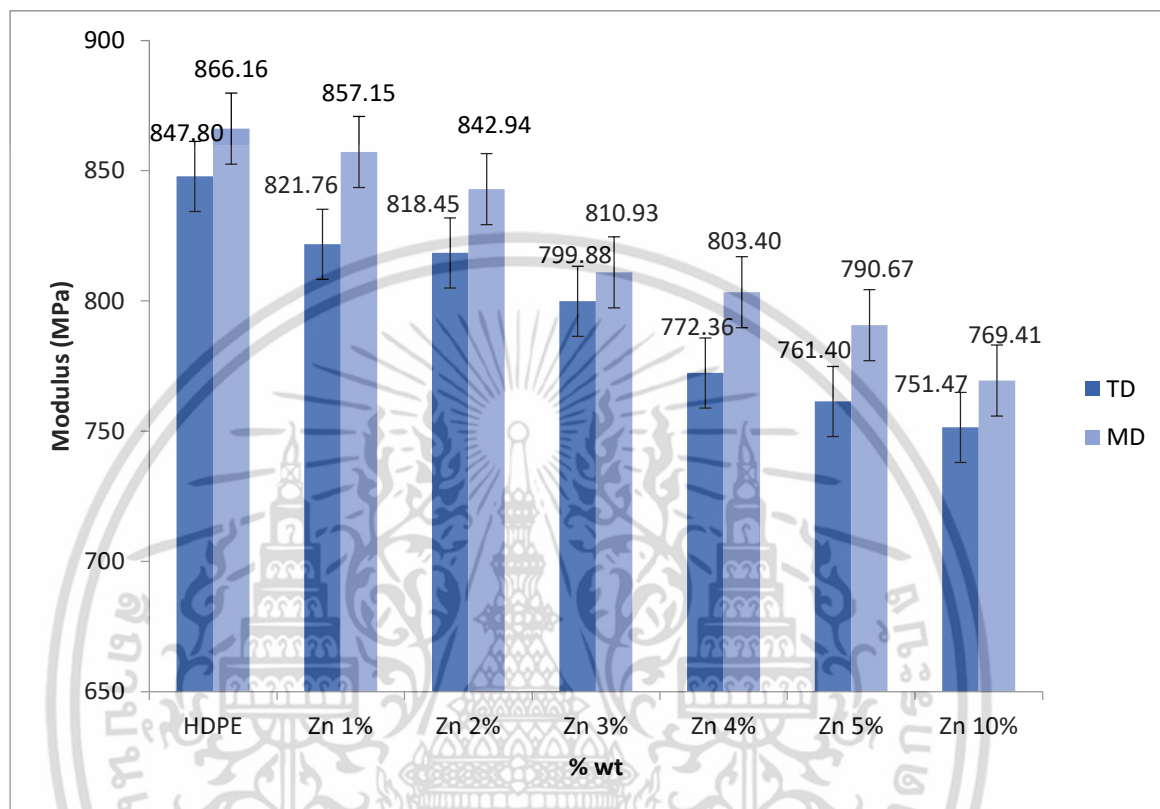
การเติมผงทองแดงลงไป จะทำให้ค่ามอดูลัสมีค่าลดลงทั้งในแนว TD และ MD แต่ค่ามอดูลัสในแนว MD ที่ได้มีความแตกต่างกันไม่มากนัก เมื่อทำการเปรียบเทียบที่การเติมทองแดงที่ 5% และ 10% แสดงดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 การทดสอบค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงทองแดงในปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ผงสังกะสีเป็นสารตัวเติมในฟิล์มพอลิเมอร์ ทำให้ค่ามอดูลัสที่ได้มีค่าลดลงทั้งในแนว TD และ MD เช่นเดียวกับการใช้ผงทองแดงเป็นสารตัวเติม เมื่อเพิ่มปริมาณของผงสังกะสี ค่ามอดูลัสที่ได้จะลดลงมากขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาณของผงสังกะสีที่เติมเข้าไปในฟิล์มพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 การทดสอบค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงสังกะสีในปริมาณต่างๆ

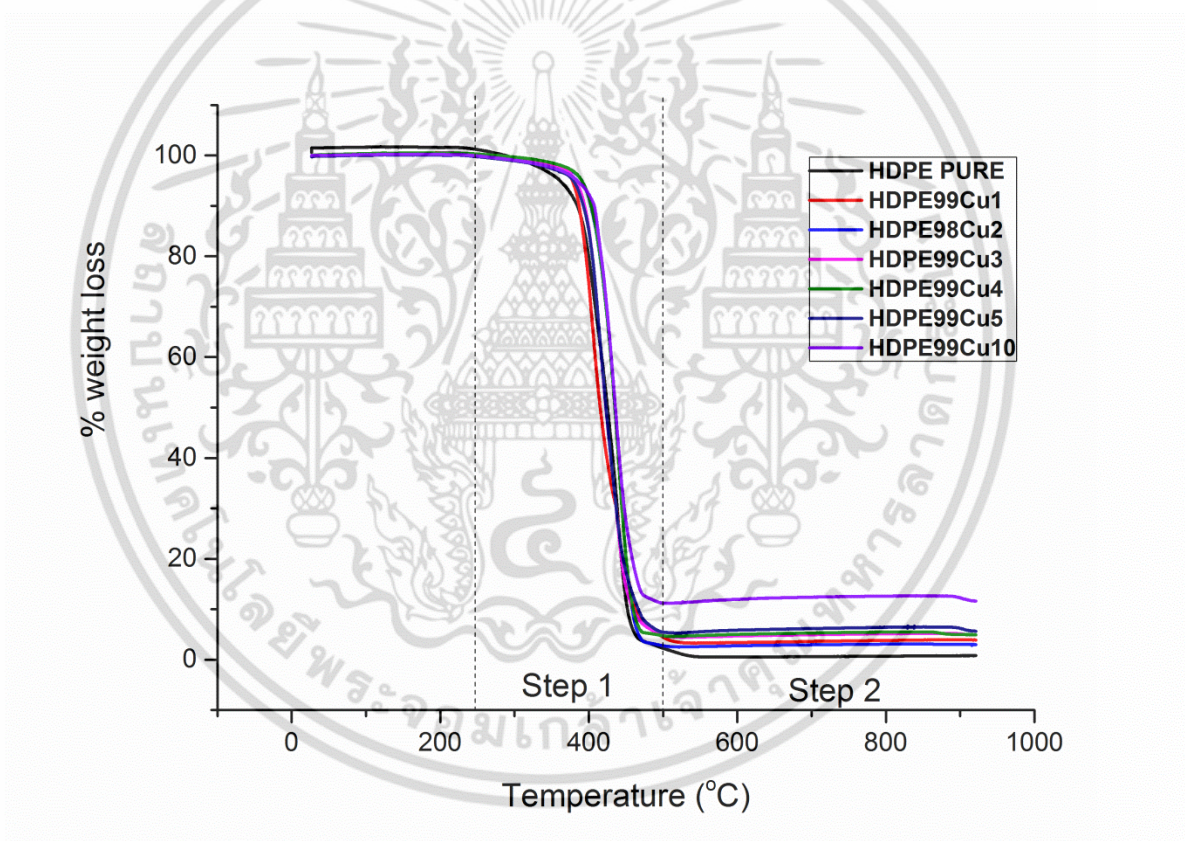
สาเหตุที่ทำให้ค่ามอดูลัสลดลง เนื่องมาจากการเติมผงโลหะลงไปในเมตริกซ์ฟิล์มพอลิเมอร์ HDPE ยิ่งปริมาณของผงโลหะมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของผงโลหะที่เติมลงไปในฟิล์มพอลิเมอร์ ดังเช่นการเพิ่มปริมาณผงทองแดงจาก 5% เป็น 10% ทำให้ผงทองแดงเกิดการกระจายตัวได้ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากพื้นที่ว่างในเมตริกซ์ (free volume) มีน้อยลง ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันได้ง่ายขึ้น ถึงแม้จะทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของผงทองแดงแล้วก็ตาม ค่ามอดูลัสที่ได้จึงมีค่าที่แตกต่างกันมาก ส่วนผงสังกะสีในช่วงแรกค่ามอดูลัสจะลดลงเพียงเล็กน้อย และจะลดลงได้มากขึ้น เมื่อปริมาณของผงสังกะสีเพิ่มขึ้นถึง 4% ทั้งนี้สาเหตุอาจมาจากการเกาะกลุ่มกันของผงสังกะสีมีมากขึ้น ค่ามอดูลัสจึงลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณของผงสังกะสีที่กระจายตัวในเมตริกซ์เท่ากับ 4%

จากผลสมบัติเชิงกลทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบ เมื่ออธิบายด้วยภาพ SEM พบว่าสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ทำการเติมผงทองแดงหรือผงสังกะสี จะมีสมบัติเชิงกลที่ลดลง สาเหตุนี้อาจเกิดได้จากสองปัจจัย คือเมื่อทำการเติมผงทองแดงหรือผงสังกะสีลงไป จะทำให้ขีดขวางการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากอนุภาคสามารถกระจายตัวและเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ จึงเกิดการแยกวัฏภาคระหว่างฟิล์มพอลิเมอร์และผงโลหะ ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง และอีกปัจจัย คือ

การเกิดรูพรุนขึ้นในเนื้อฟิล์ม เนื่องจากผองแดงหรือผองสังกะสีที่เติมมากเกินไป หลุดออกจากเมตริกซ์ ทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้น สมบัติเชิงกลจึงลดลงได้เช่นกัน

4.3.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค thermogravimetric analysis (TGA)

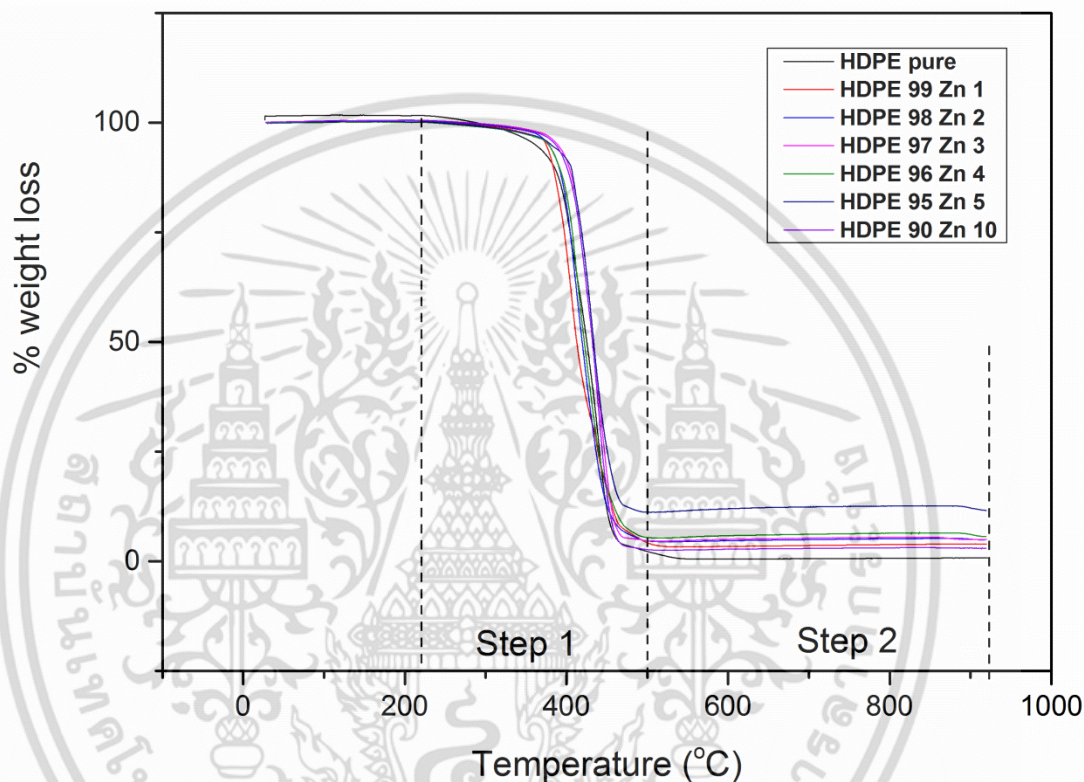
การทดสอบด้วยเครื่อง TGA เพื่อทำการศึกษาการสลายตัวของสารที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์มพอลิเมอร์ พบว่า ฟิล์มพอลิเมอร์ในส่วนของ HDPE ที่เป็นเมตริกซ์จะเริ่มสลายตัวในช่วงแรกที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C และเริ่มสลายตัวหมดที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C (step 1) ซึ่งเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไป จะเห็นว่าน้ำหนักที่เหลือในช่วงหลังจากอุณหภูมิ 500 °C (step 2) เป็นน้ำหนักที่เหลือของทองแดง ซึ่งการสลายตัวของทองแดงจะใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 1000 °C จึงจะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์สลายตัวหมด ดังรูปที่ 4.30 โดยพบว่าการเติมผองแดงที่ 10 เปอร์เซ็นต์ให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เหลือมากที่สุด



รูปที่ 4.30 กราฟ TGA ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผองแดงในปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเติมผงสังกะสีลงในฟิล์มพอลิเมอร์แทนการเติมผงทองแดง จะเริ่มเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิที่ 200 °C ซึ่งเป็นการเริ่มสลายตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เป็นเมตริกซ์ (step 1) และจะสลายจนหมดในช่วงอุณหภูมิ 500 °C มีน้ำหนักในส่วนที่เหลือเป็นของผงสังกะสี (step 2) เนื่องจากผงสังกะสีใช้อุณหภูมิในการสลายตัวที่สูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดของเครื่อง แต่เนื่องจากการสลายตัวของผงสังกะสีจะใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 900 °C จึงจะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์สลายตัวหมด ดังรูปที่ 4.31 โดยพบว่า การเติมผงสังกะสีที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่เหลือมากที่สุด

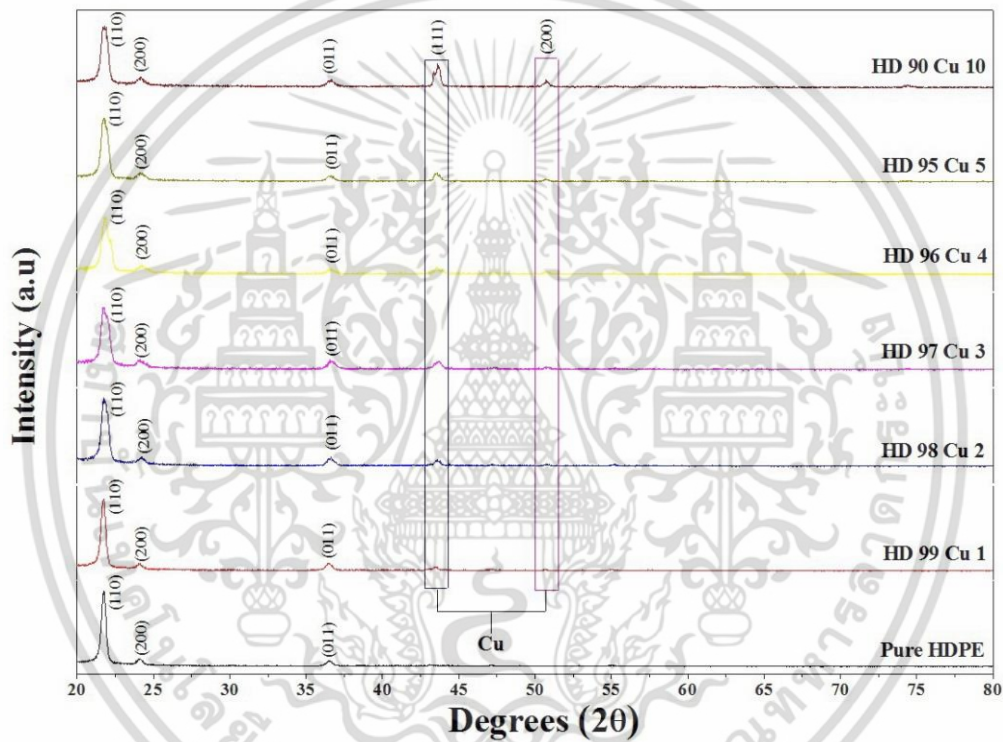


รูปที่ 4.31 กราฟ TGA ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสีในปริมาณต่างๆ

ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมผงทองแดงหรือผงสังกะสี เมื่อทดสอบด้วยเครื่อง TGA จะเกิดการเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน และมีน้ำหนักในส่วนที่เหลือเป็นส่วนของผงโลหะที่เครื่องไม่สามารถทำให้เกิดการสลายตัวได้ ซึ่งการเพิ่มปริมาณของผงทองแดงหรือผงสังกะสีเพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีน้ำหนักในส่วนที่เหลือเพิ่มขึ้น และความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

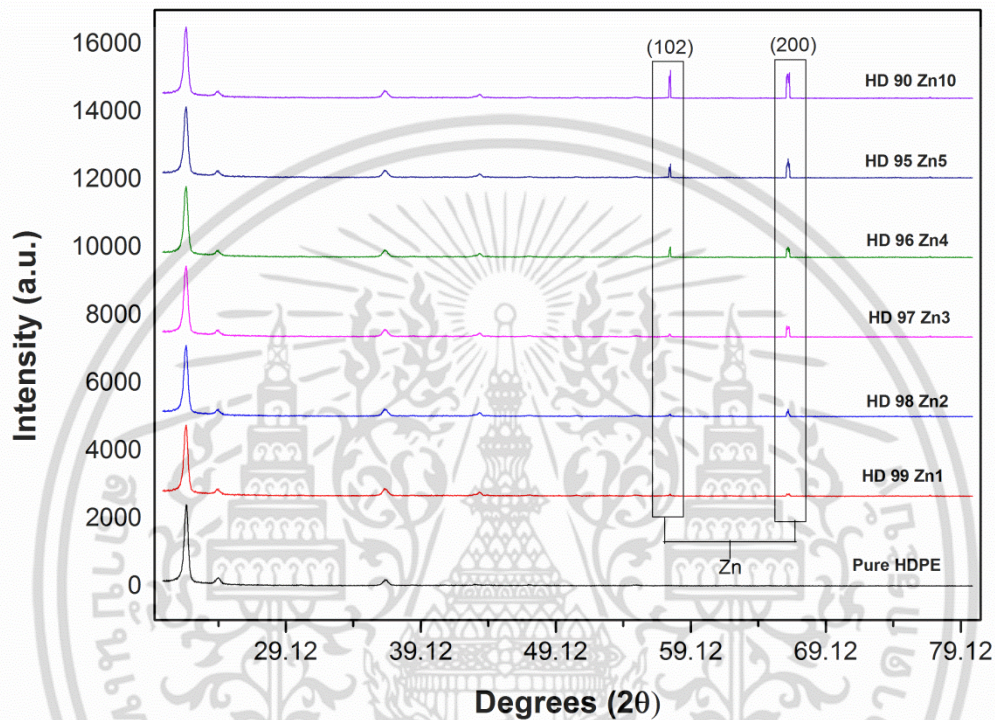
4.3.4 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-ray diffraction (XRD) ของฟิล์มพอลิเมอร์

การเติมผงโลหะลงไปในฟิล์มพอลิเมอร์ พบว่า ก่อนทำการเติมผงทองแดงมีพีคขึ้นที่ระนาบ (011) ขึ้นที่ตำแหน่งประมาณ 22° , ระนาบ (110) ขึ้นที่ตำแหน่งประมาณ 36° และที่ระนาบ (200) ขึ้นที่ตำแหน่งประมาณ 24° โดยเมื่อทำการเติมผงทองแดงลงไปปริมาณร้อยละ 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 พบว่า จะมี diffraction peak ของผงทองแดง ขึ้นที่ตำแหน่ง ประมาณ 43° ที่ระนาบ (111) และที่ตำแหน่งประมาณ 52° ซึ่งเกิดระนาบ (200) [24] ขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ HDPE ที่ไม่ได้เติมผงทองแดง แสดงให้เห็นว่า การเติมผงทองแดงไม่ได้มีผลต่อโครงสร้างผลึกและไม่รบกวนการเกิดผลึกของ HDPE เนื่องจากระนาบที่ปรากฏของพีคอยู่คนละตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดงในอัตราส่วนต่างๆ

เมื่อทำการเติมผงสังกะสีลงไปปริมาณร้อยละ 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 พบว่า จะมี diffraction peak ของผงสังกะสี ขึ้นที่ตำแหน่ง ประมาณ 50° ที่ระนาบ (102) และ ที่ตำแหน่งประมาณ 65° ซึ่งเป็นระนาบ (200) ขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ HDPE ที่ไม่ได้เติมผงสังกะสี แสดงให้เห็นว่า การเติมผงสังกะสีไม่ได้มีผลต่อโครงสร้างผลึกและไม่รบกวนการเกิดผลึกของ HDPE เนื่องจากระนาบที่ปรากฏของพีคอยู่คนละตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.33

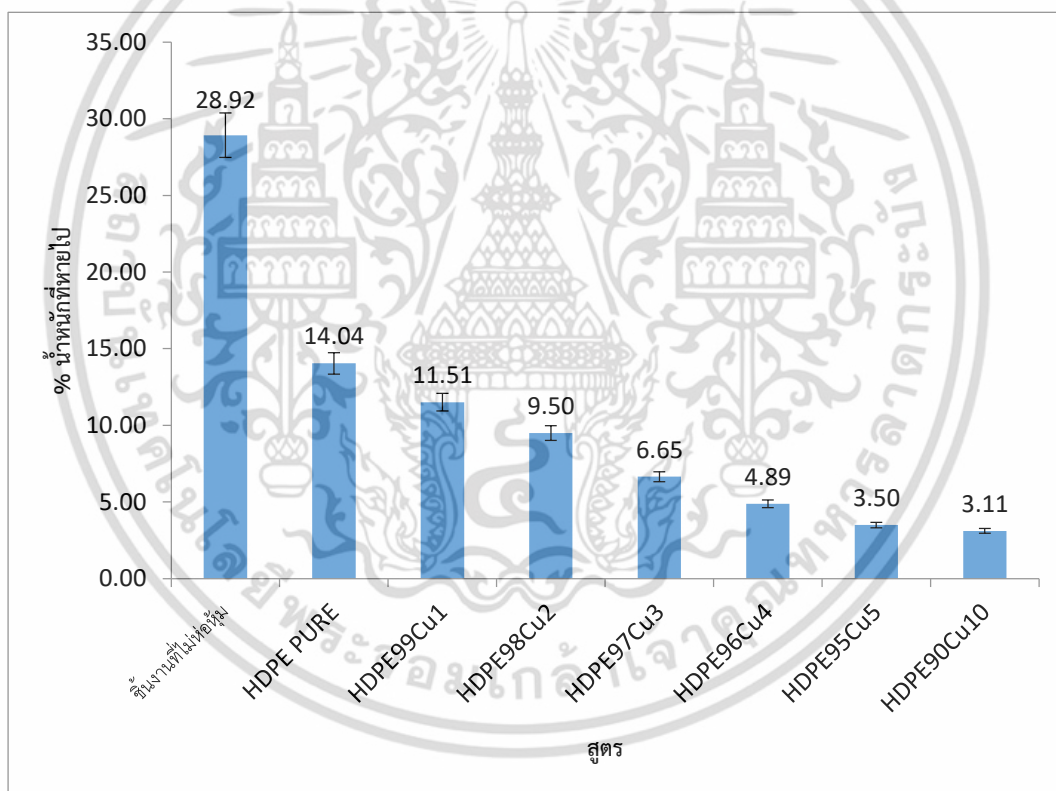


รูปที่ 4.33 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสีในอัตราส่วนต่างๆ

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเติมผงทองแดงหรือผงสังกะสีลงไปในฟิล์มพอลิเมอร์จะทำให้ค่าความเป็นผลึกของฟิล์ม HDPE ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากระนาบที่เกิดขึ้น ไม่ตรงกับตำแหน่งระนาบของฟิล์ม HDPE ทำให้ค่าความเป็นผลึกของฟิล์ม HDPE ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

4.3.3 การทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิเมอร์

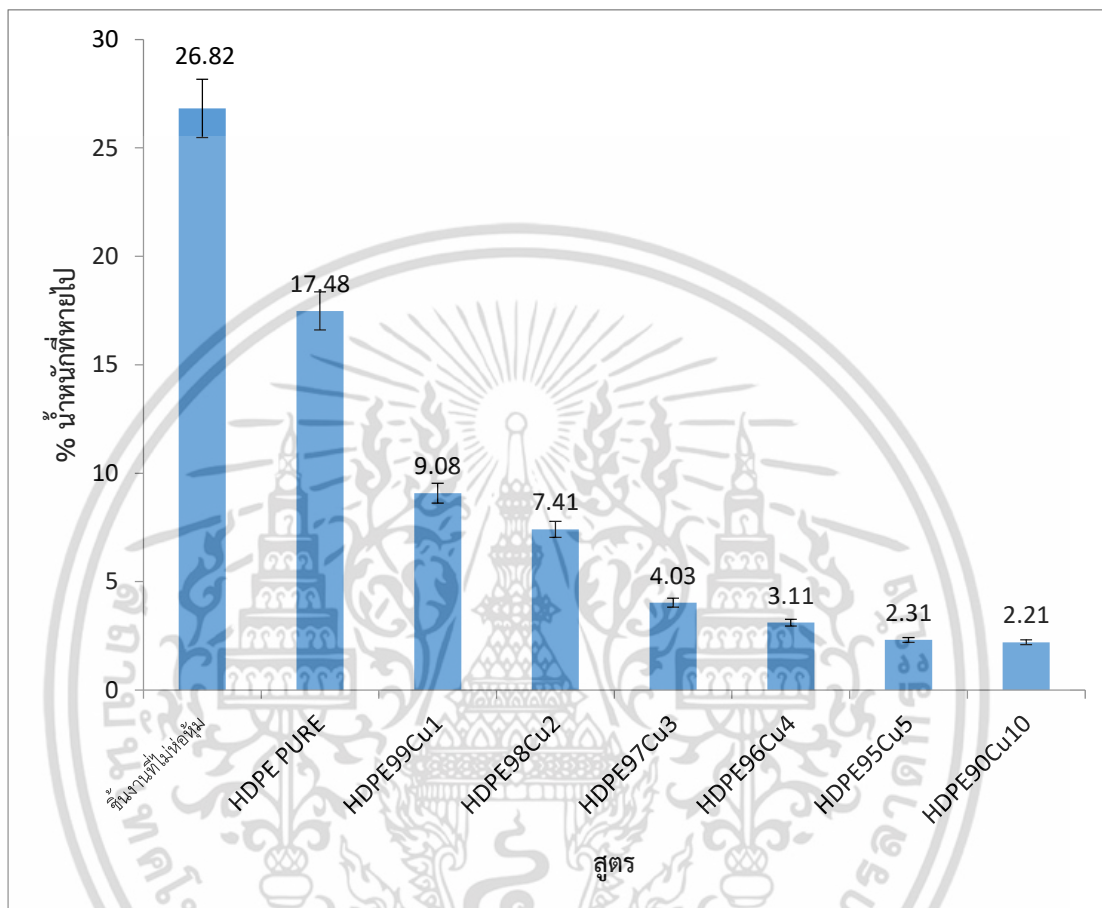
ในการศึกษาความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน โดยการใช้ฟิล์มห่อชิ้นงานที่เป็นโลหะ แล้วทำการทดสอบโดยการพ่นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่มีค่า pH อยู่ในช่วง 6.5-7.2 และมีอุณหภูมิประมาณ 35 °C แล้วทำการพ่นเป็นละอองลงบนฟิล์มพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มชิ้นงานโลหะ และบนชิ้นงานโลหะที่ไม่ได้ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ เพื่อทำการเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น พบว่าน้ำหนักของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการห่อหุ้มด้วยฟิล์มพอลิเมอร์มีน้ำหนักลดลงมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ทำการห่อหุ้มด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง เมื่อปริมาณของผงทองแดงเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนชิ้นงานก็จะสูงขึ้นด้วย แต่เมื่อทำการเติมปริมาณของผงทองแดงลงไปจนถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักพบว่าความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนเริ่มคงที่เมื่อเทียบกับการเติมผงทองแดงที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก การเติมทองแดงร้อยละ 5 สามารถป้องกันการกัดกร่อนโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญหายไปเท่ากับ 3.50 % ส่วนการเติมผงทองแดงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักสามารถป้องกันการกัดกร่อนโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญหายไปได้เท่ากับ 3.11 % ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักชิ้นงานที่หายไปการทดสอบการกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง

เมื่อทำการทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนด้วยกรด โดยการเปลี่ยนสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นกรดอะซิติก ที่มีค่า pH ในช่วง 3.1-3.3 และทำการทดสอบเช่นเดียวกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่า ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดงสามารถป้องกันการกัดกร่อนจากกรดได้ดีขึ้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของผงทองแดง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของผงทองแดงถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

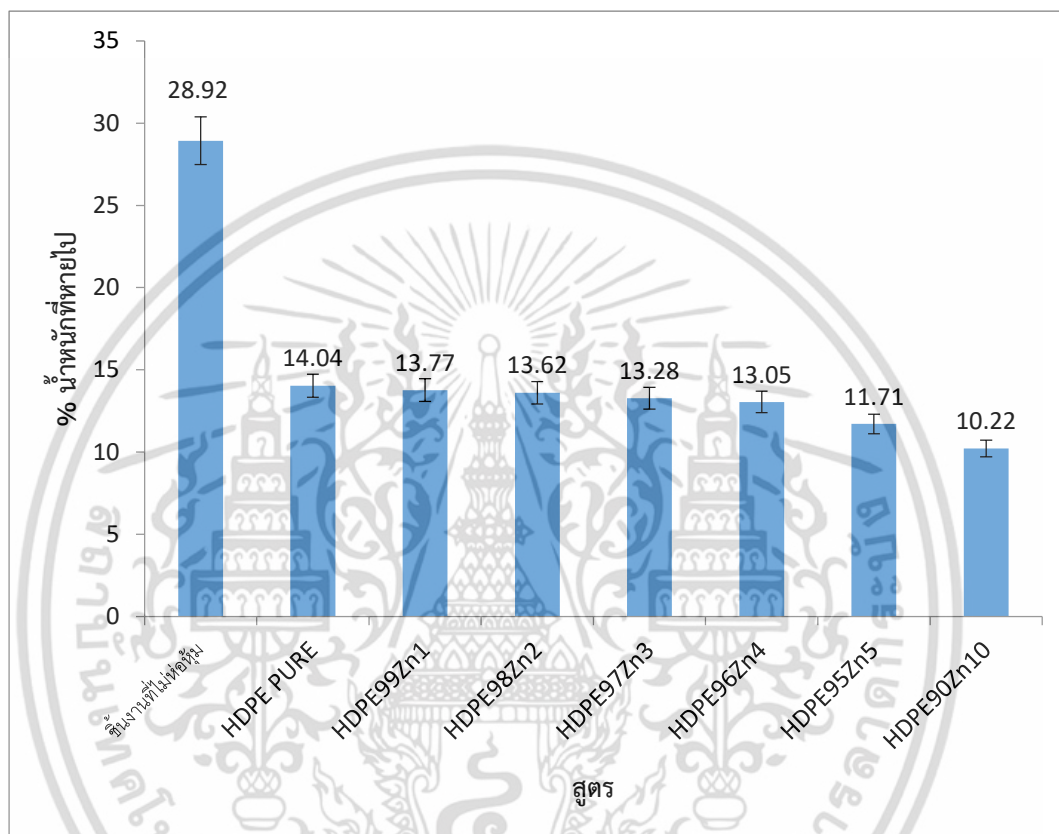
ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนจากกรดเริ่มคงที่เมื่อเทียบกับการเติมผงทองแดงที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก การเติมทองแดงร้อยละ 5 สามารถป้องกันการกัดกร่อนโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียไปเท่ากับ 2.31 % ส่วนการเติมผงทองแดงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักสามารถป้องกันการกัดกร่อนโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียไปได้เท่ากับ 2.21 % ดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักชิ้นงานที่หายไปโดยการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกรดอะซิติกของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง

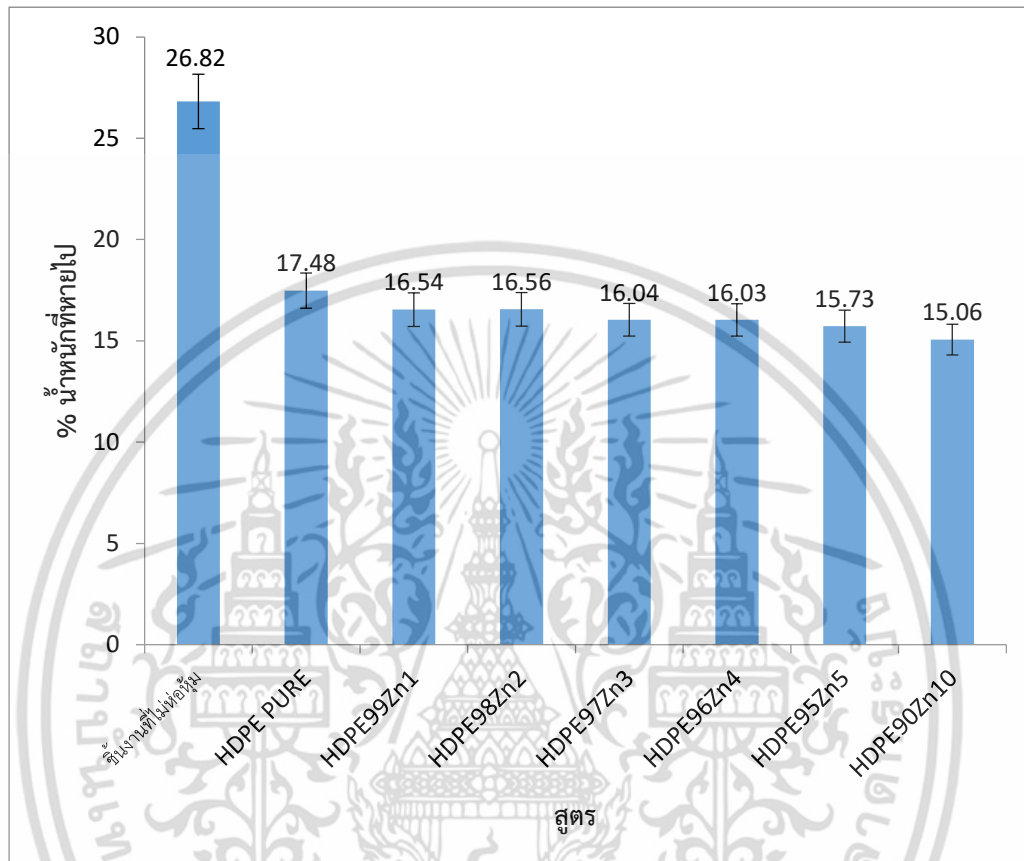
เมื่ออธิบายด้วยภาพ SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมกับผงทองแดง พบว่าการเพิ่มปริมาณทองแดงมากขึ้นความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนจะสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของผงทองแดงสูงกว่า 5 % ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนจะเริ่มคงที่ เนื่องจากผงทองแดงสามารถหลุดออกจากเมตริกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ได้ ดังแสดงในภาพ SEM ที่ทำการเติมผงทองแดง 10 % โดยน้ำหนักลงในเมตริกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ HDPE เมื่อสรุปผลการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้ผงทองแดง พบว่าสูตรที่ดีที่สุดที่เหมาะสมแก่การป้องกันการกัดกร่อนคือการใช้ผงทองแดง 5 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนทั้งเกลือและกรดที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณที่เติมผงทองแดงลงไปเมตริกซ์

จากการศึกษาการเติมผงสังกะสีที่ทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแทนการเติมผงทองแดง พบว่าการทดสอบด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนโดยการเติมผงสังกะสีนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับฟิล์ม HDPE ที่ไม่มีการเติมผงโลหะนั้น ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อทำการเติมผงสังกะสีลงไปถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียไปเท่ากับ 10.22% ดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักชิ้นงานที่หายไปโดยการทดสอบการกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี

เช่นเดียวกับการทดสอบการป้องกันกักร้อนต่อกรด โดยใช้กรดอะซิติกทดสอบกับฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงสังกะสี ความสามารถในการป้องกันการกักร้อนต่อกรดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม HDPE โดยเมื่อเติมผงสังกะสีลงไประยะ 10 ทำให้น้ำหนักที่สูญเสียไปคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 15.06 % ดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักชิ้นงานที่หายไปการทดสอบการกักร้อนด้วยกรดอะซิติกของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี

สาเหตุที่ทำให้การป้องกันสนิมของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการผสมผงทองแดงหรือผงสังกะสี มีความสามารถในการป้องกันสนิมที่แตกต่างกันเนื่องจากค่า E^0 ของทองแดงและสังกะสีมีค่าที่แตกต่างกัน โดยที่ค่า E^0 มีค่าเท่ากับ +0.34 เป็นตัวออกซิไดส์ที่ดี สามารถรับอิเล็กตรอนได้ดี จึงสามารถจับกับก๊าซที่ทำให้เกิดการกักร้อนที่มีประจุเป็นลบได้ดีกว่าสังกะสีที่มีค่า E^0 เท่ากับ -0.76 ที่เป็นตัวออกซิไดส์ที่ไม่ดี ซึ่งความสามารถในการป้องกันการกักร้อนสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ทำการเติมผงสังกะสี 10 % เมื่อคือน้ำหนักที่สูญเสียไปเท่ากับ 10.22 % เมื่อทำการเปรียบเทียบกับฟิล์ม HDPE ที่มีน้ำหนักที่สูญเสียไปคิดเป็น 14.04 % การใช้ผงสังกะสีเป็นสารตัวเติมเพื่อช่วยป้องกันการกักร้อน จะทำให้ป้องกันการกักร้อนได้ไม่เต็มที่เท่าที่ควรเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ผงทองแดง

4.4 การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยการเติมคาร์บอนแบล็ค

สูตรที่ดีที่สุดที่เลือกมาศึกษาผลการเติมคาร์บอนแบล็คลงไปในฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีคือการเติมผงทองแดง 5% และเติมผงคาร์บอนแบล็คในปริมาณต่างๆ โดยสูตรที่ได้ทำการผสมคือ HDPE : Cu : CB ในอัตราส่วนดังนี้

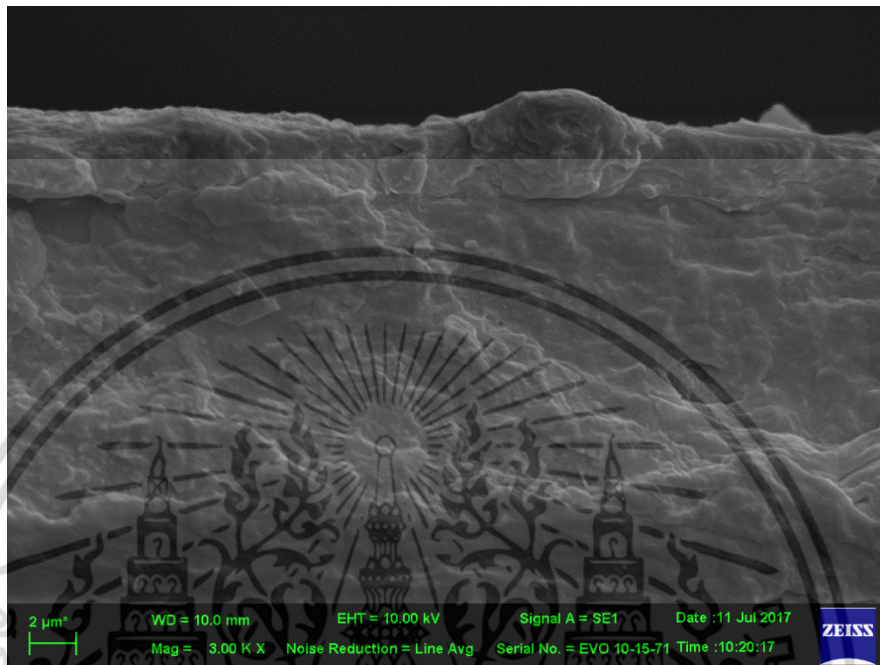
ตารางที่ 4.1 สูตรที่ทำการผสมระหว่าง HDPE : ผงทองแดง : คาร์บอนแบล็ค

HDPE	Cu	CB
94.5	5	0.5
94	5	1
93.5	5	1.5
93	5	2
92.5	5	2.5

สาเหตุที่ไม่ทำการทดสอบฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงสังกะสี เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้ผงสังกะสีเป็นสารตัวเติม เมื่อทำการเติมผงคาร์บอนแบล็คเข้าไป ทำให้กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มไม่สามารถขึ้นรูปได้ เพราะฟิล์มที่ได้เมื่อทำการเพิ่มลมเข้าไปในบับเบิลเพียงเล็กน้อย ตัวฟิล์มก็เกิดการฉีกขาดได้ง่าย ถึงแม้จะทำการเติมผงคาร์บอนแบล็คลงไปเพียงแค่ 0.5 % เท่านั้น

4.4.1 สันฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์จากผงโลหะที่เติมคาร์บอนแบล็ค

การเติมผงคาร์บอนแบล็คลงในฟิล์มพอลิเมอร์เพื่อช่วยในการกระจายตัวของผงโลหะให้ดียิ่งขึ้น โดยขนาดอนุภาคของผงคาร์บอนแบล็คมีขนาดเป็นนาโน โดยในภาพ SEM จะมีลักษณะเป็นจุดที่มีขนาดเล็ก ดังรูปที่ 4.38-4.42



รูปที่ 4.38 ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการผสมคาร์บอนแบล็ค 0.5 % และผงทองแดง 5% ที่กำลังขยาย 3000 เท่า



รูปที่ 4.39 ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการผสมคาร์บอนแบล็ค 1 % และผงทองแดง 5% ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

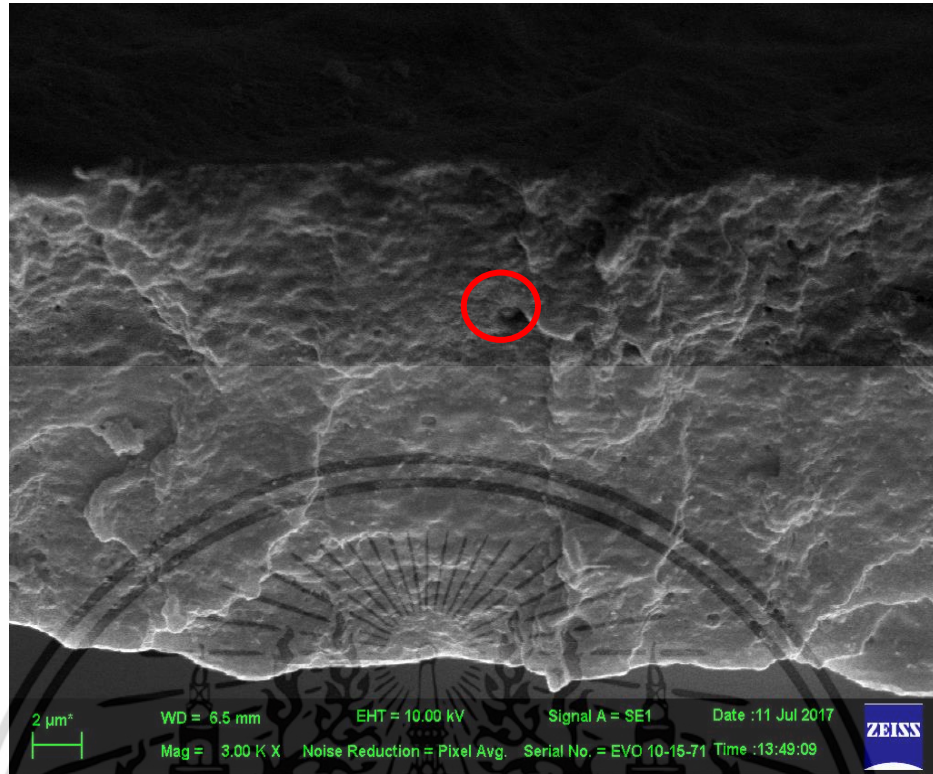


รูปที่ 4.40 फिल्मพอลิเมอร์ที่ทำการผสมคาร์บอนแบล็ค 1.5 % และผงทองแดง 5% ที่กำลังขยาย 3000 เท่า



รูปที่ 4.41 फिल्मพอลิเมอร์ที่ทำการผสมคาร์บอนแบล็ค 2 % และผงทองแดง 5% ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



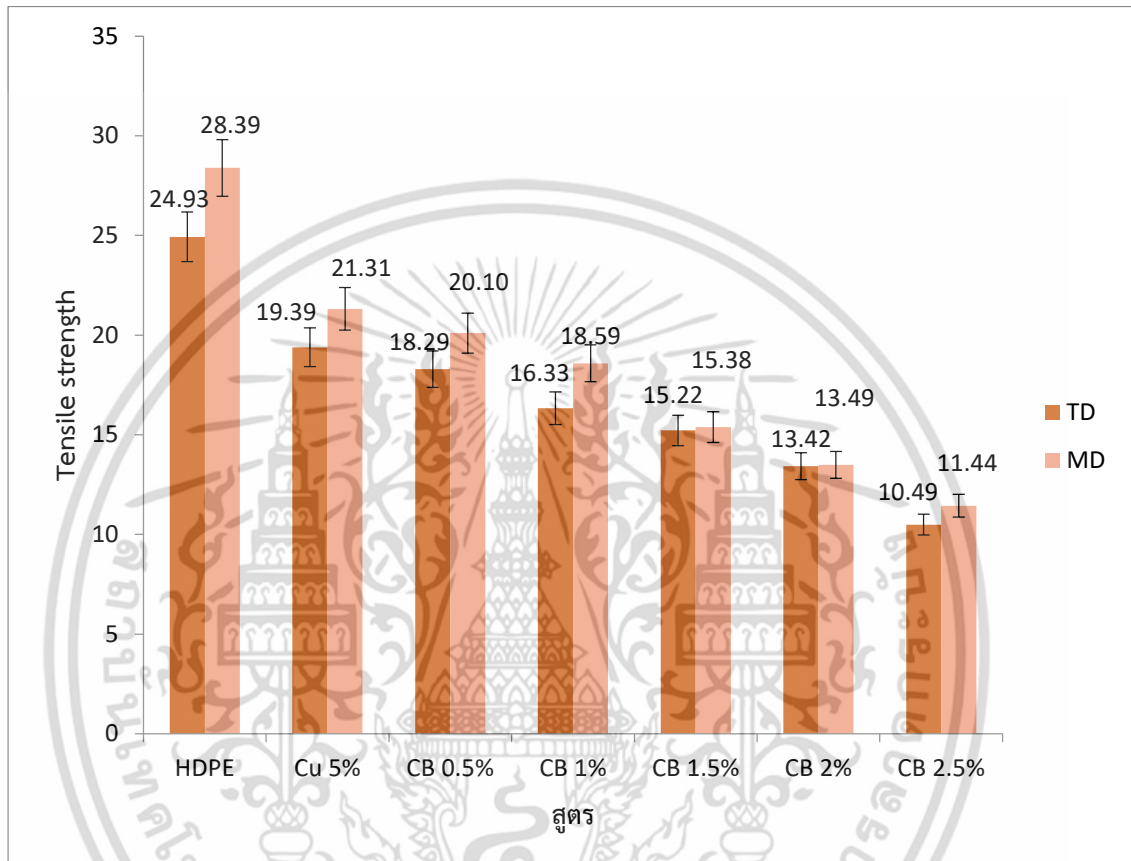
รูปที่ 4.42 พิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการผสมคาร์บอนแบล็ค 2.5 % และผงทองแดง 5% ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

จากภาพ SEM พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของคาร์บอนแบล็คจะทำให้ฟิล์มมีลักษณะเป็นจุดๆ กระจายอยู่ทั่วฟิล์มพอลิเมอร์ปรากฏอยู่ในเนื้อฟิล์ม และอนุภาคของผงทองแดงที่เติมลงไปนั้นอาจจะเห็นบ้างเป็นบางบริเวณ เนื่องจากเกิดการกระจายตัวได้ดีขึ้น และจากภาพ SEM ที่ได้นั้นสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกลคือ เมื่อปริมาณของคาร์บอนแบล็คมากขึ้น สมบัติเชิงกลก็จะลดลง

4.4.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์จากผงโลหะที่เติมคาร์บอนแบล็ค

4.4.2.1 ค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength)

การเติมคาร์บอนแบล็คลงไปในฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมกับผงทองแดง 5% พบว่าจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงทั้งแนว TD และ MD เช่นเดียวกับการเติมผงโลหะ ซึ่งการเติมคาร์บอนแบล็คเข้าไปเพียงปริมาณ 0.5% ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงสามารถลดลงได้มาก โดยแสดงดังรูปที่ 4.43

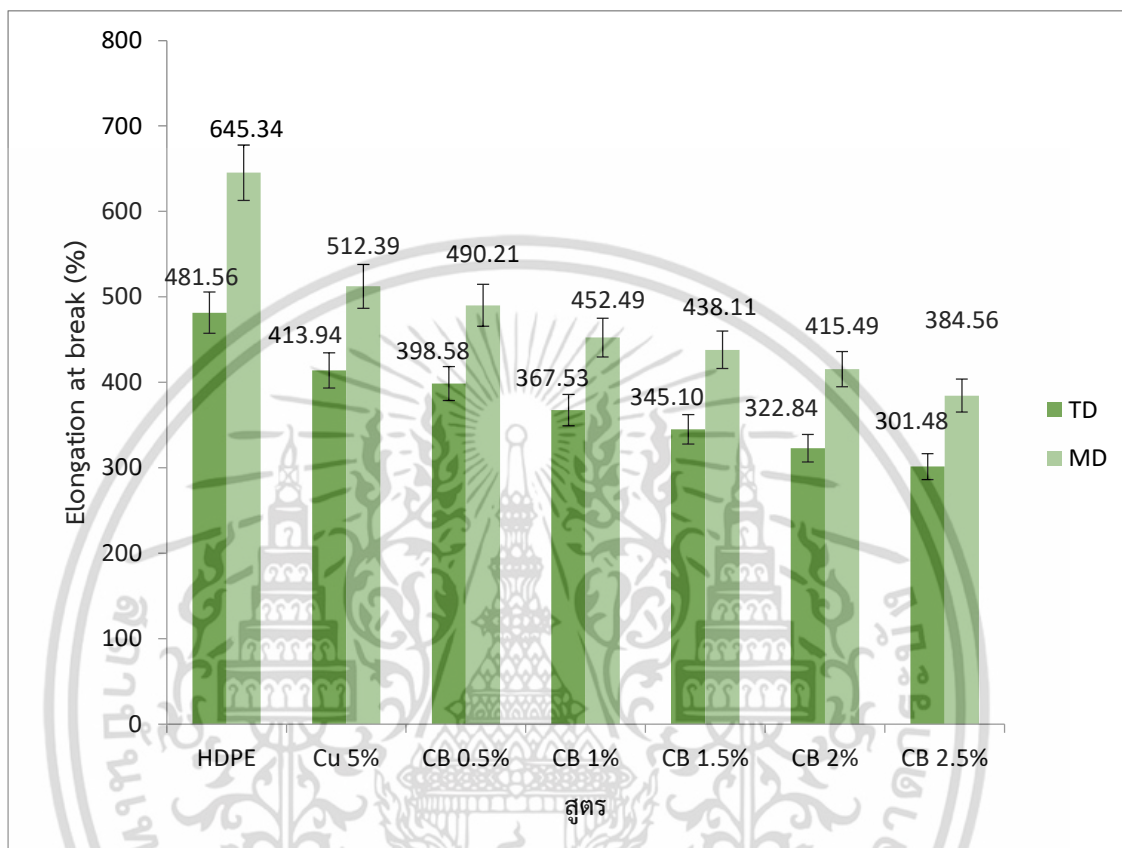


รูปที่ 4.43 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมผงทองแดงและคาร์บอนแบล็ค

สาเหตุมาจากการที่คาร์บอนแบล็คที่เติมลงไปเป็นของแข็ง มีอนุภาคที่มีขนาดเล็กระดับนาโน ทำให้ไปขัดขวางการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นจากเดิมที่ทำการเติมผงทองแดงลงไป จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลง

4.4.2 ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)

คาร์บอนแบล็คสามารถทำให้ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์มีค่าลดลงได้ทั้งในแนว TD และ MD เมื่อทำการเติมคาร์บอนแบล็คลงไปถึง 2.5 % ทำให้ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดลดลงได้มากเมื่อทำการเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดง 5% โดยแสดงดังรูปที่ 4.44

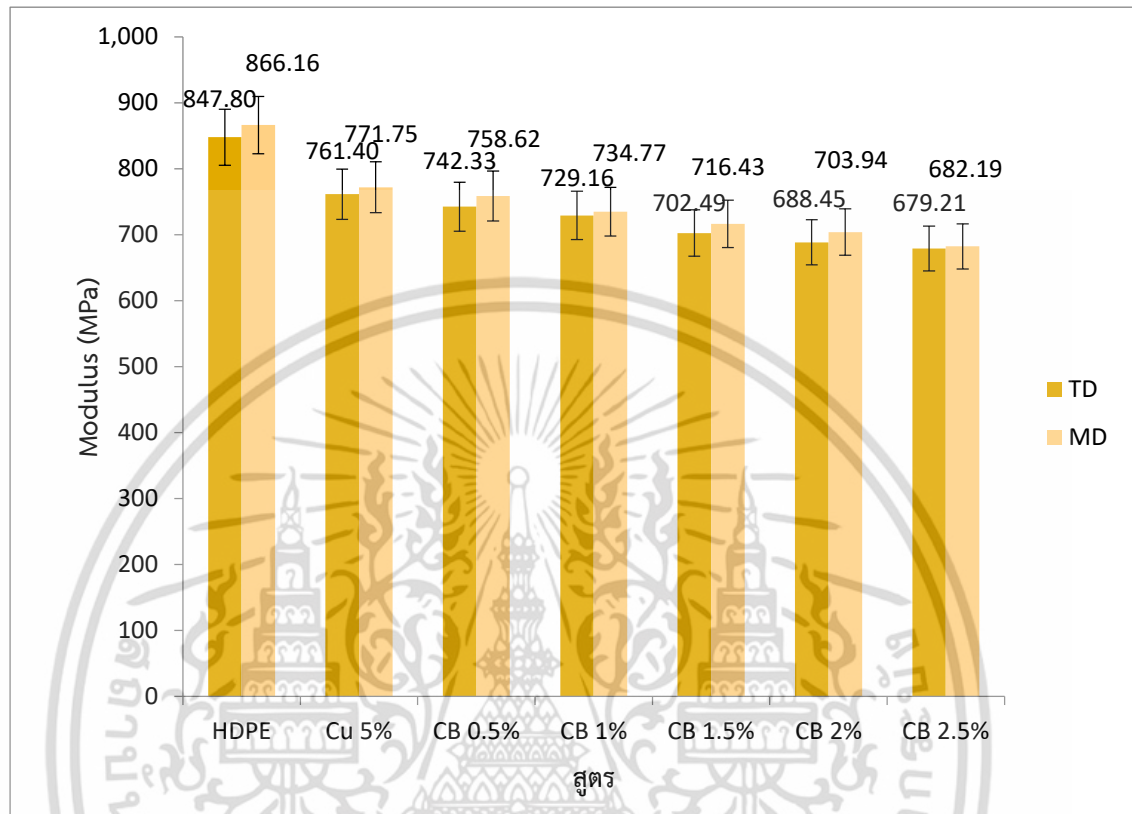


รูปที่ 4.44 ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมผงทองแดงและคาร์บอนแบล็ค

สาเหตุนี้เกิดจากการขัดขวางการเกี่ยวพันของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยการที่คาร์บอนแบล็คที่เติมลงไปเข้าไปแทรกตัวอยู่ตามสายโซ่พอลิเมอร์ จึงทำให้เกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ลำบากมากขึ้น ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดจึงลดลงได้มาก เนื่องจากปริมาณของคาร์บอนแบล็คที่เติมลงไปปริมาณน้อย ก็มีจำนวนมาก เพราะขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็คมีขนาดที่เล็กมาก

4.4.2.3 ค่ามอดูลัส (modulus)

การเติมคาร์บอนแบล็ค จะทำให้ค่ามอดูลัสมีค่าลดลงทั้งในแนว TD และ MD เช่นเดียวกับ การเติมผงโลหะ โดยการเติมผงคาร์บอนแบล็คที่ 2.5 % โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.45

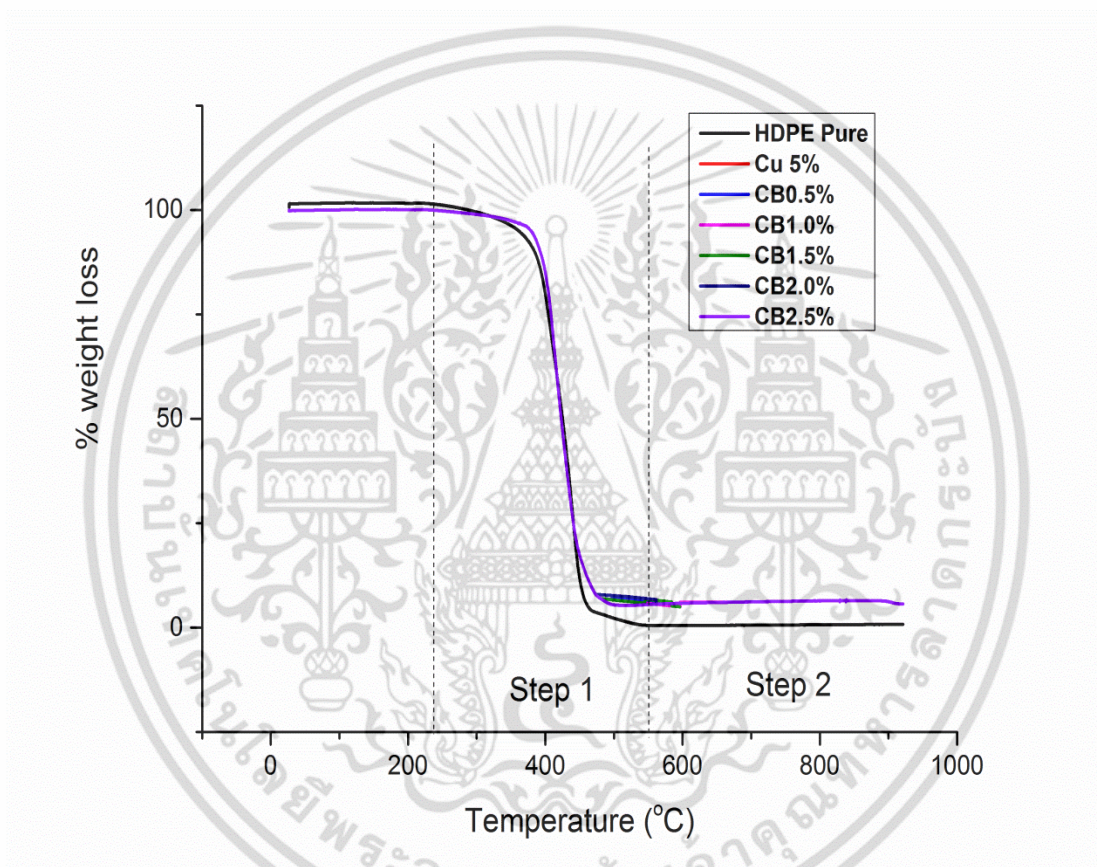


รูปที่ 4.45 ค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมผงทองแดงและคาร์บอนแบล็ค

สาเหตุที่ทำให้ค่ามอดูลัสมีค่าลดลง เนื่องจากคาร์บอนแบล็คมีส่วนที่ทำให้เนื้อฟิล์ม มีความเหนียวลดลง เนื้อฟิล์มจะเปราะง่ายขึ้น จึงทำให้ค่ามอดูลัสมีค่าที่ลดต่ำลง การเติมคาร์บอนแบล็คในปริมาณสูงสุดที่ 2.5% เมื่อทำการเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสมผงทองแดง 5% มีค่ามอดูลัสที่แตกต่างกันมาก การเป่าขึ้นรูปฟิล์มก็ยากขึ้นด้วยเนื่องจากตัวฟิล์มมีความเปราะมากขึ้น ทำให้ฟิล์มฉีกขาดได้ง่าย

4.4.3 การทดสอบด้วยเทคนิค thermogravimetric analysis (TGA) ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอนแบล็ค

การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมผงทองแดงและคาร์บอนแบล็คในสูตรต่างๆ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของคาร์บอนแบล็คเข้าไป อุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มในช่วงแรก (step 1) เริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส และน้ำหนักเริ่มลดลงเรื่อยๆ จนอุณหภูมิประมาณ 550 องศาเซลเซียส กราฟจะเริ่มคงที่ และมีน้ำหนักที่เหลือเป็นน้ำหนักของผงทองแดงและคาร์บอนแบล็คที่เติมลงไปเนื้อฟิล์ม เนื่องจากสารตัวเติมทั้งสองชนิดมีอุณหภูมิในการสลายตัวสูงกว่าอุณหภูมิที่เครื่องสามารถวัดได้ ดังรูปที่ 4.46

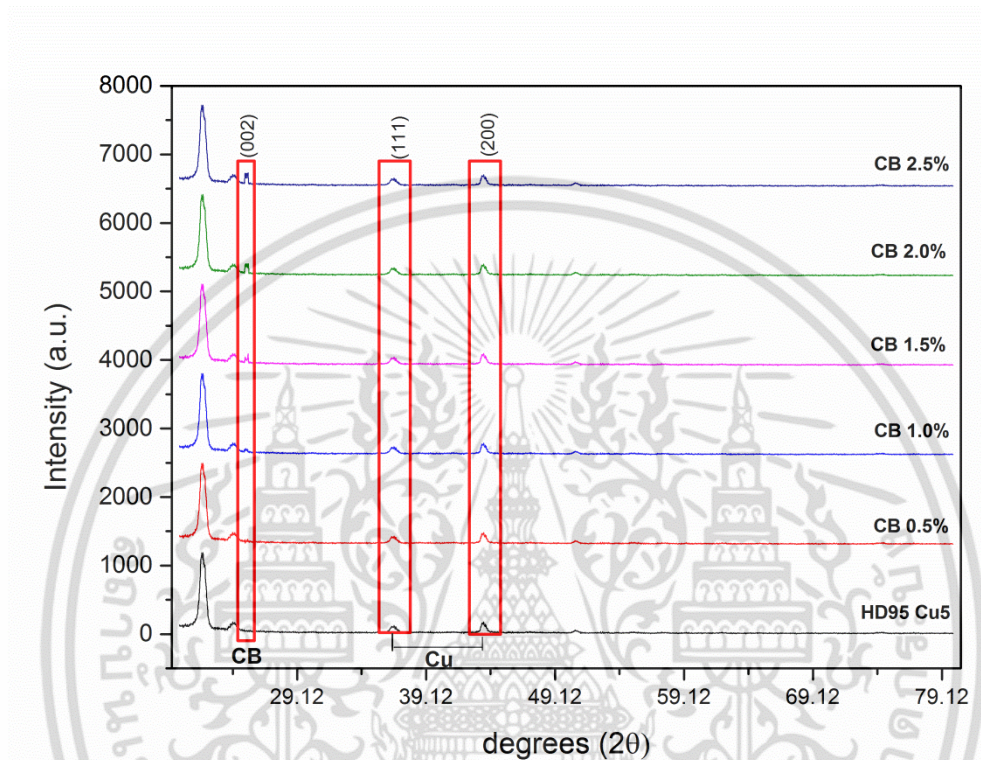


รูปที่ 4.46 กราฟ TGA ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงทองแดง 5% และคาร์บอนแบล็คในปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-ray diffraction (XRD) ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอนแบล็ค

ในการทดสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอนแบล็ค พบว่า การเติมผงคาร์บอนแบล็คจะมีระนาบขึ้นที่ตำแหน่งประมาณ 25° ซึ่งระนาบที่เกิดขึ้นคือระนาบ (002) ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อระนาบของฟิล์ม HDPE ทำให้ความเป็นผลึกไม่เปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 4.47



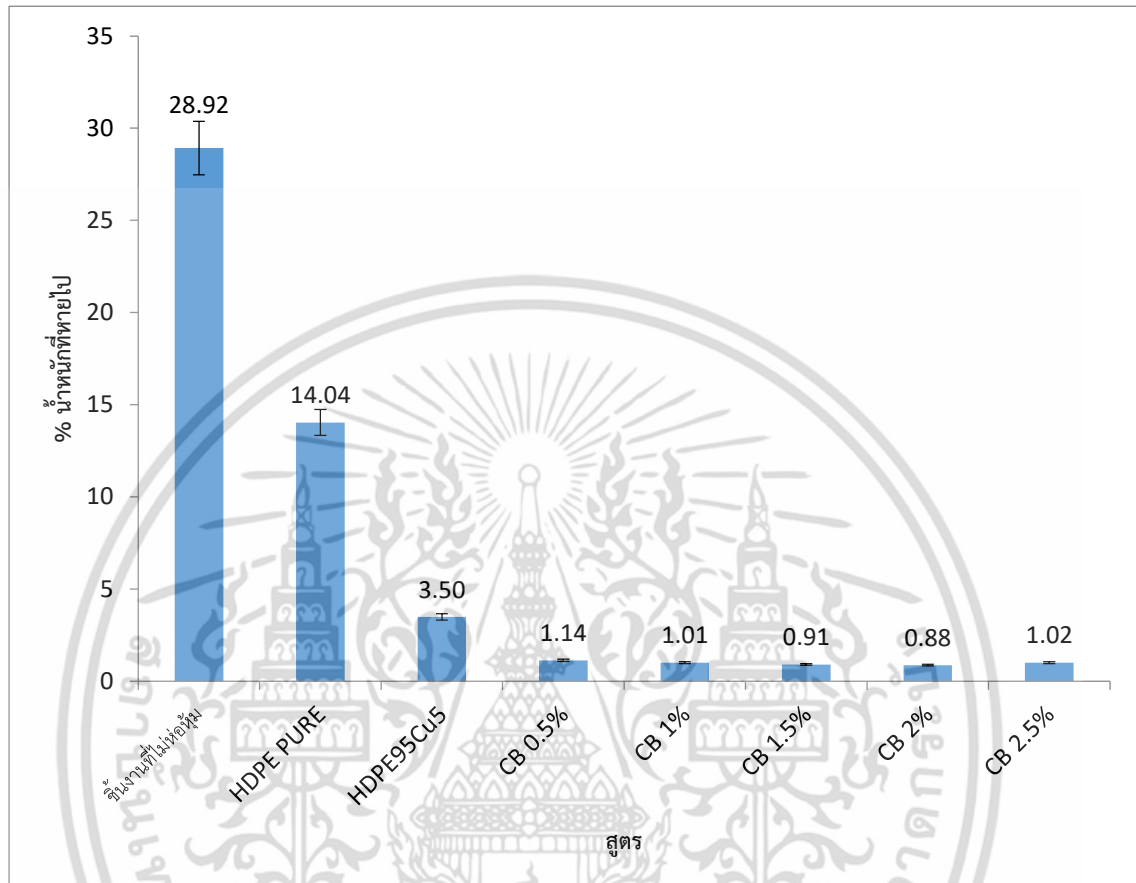
รูปที่ 4.47 กราฟ XRD ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการผสมทองแดง 5 % และฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการผสมผงทองแดง 5 % และคาร์บอนแบล็คในอัตราส่วนต่างๆ

4.4.5 การทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิเมอร์เพื่อเติมคาร์บอนแบล็ค

การทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มที่เติมผงคาร์บอนแบล็คลงไปในฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงโลหะลงไปปริมาณ 5% ที่เลือกใช้ปริมาณของผงโลหะที่เติมลงไป 5% โดยน้ำหนักมาทำการทดสอบเนื่องจากผลการป้องกันการกัดกร่อนที่เติมผงโลหะลงไป 5% นั้น สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นๆ ดังนั้นการเติมผงคาร์บอนแบล็คลงไปในฟิล์มพอลิเมอร์จะเป็นการทดสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด เพื่อช่วยในการกระจายตัวของผงโลหะ เนื่องจากคาร์บอนแบล็คมีอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากจึงสามารถที่จะขัดขวางการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนของผงโลหะได้

จากการทดสอบพบว่าคาร์บอนแบล็คมีส่วนช่วยเสริมความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดียิ่งขึ้น เมื่อทำการทดสอบด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยการเติมคาร์บอนแบล็คในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะช่วยทำให้ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเพียงแค่เล็กน้อยเท่านั้น เปรียบเทียบได้จากฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดงลงไป 5% ที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนและเกิดการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานไป 3.50% ส่วนการเติมคาร์บอนแบล็คเพิ่มเข้าไป 2% เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

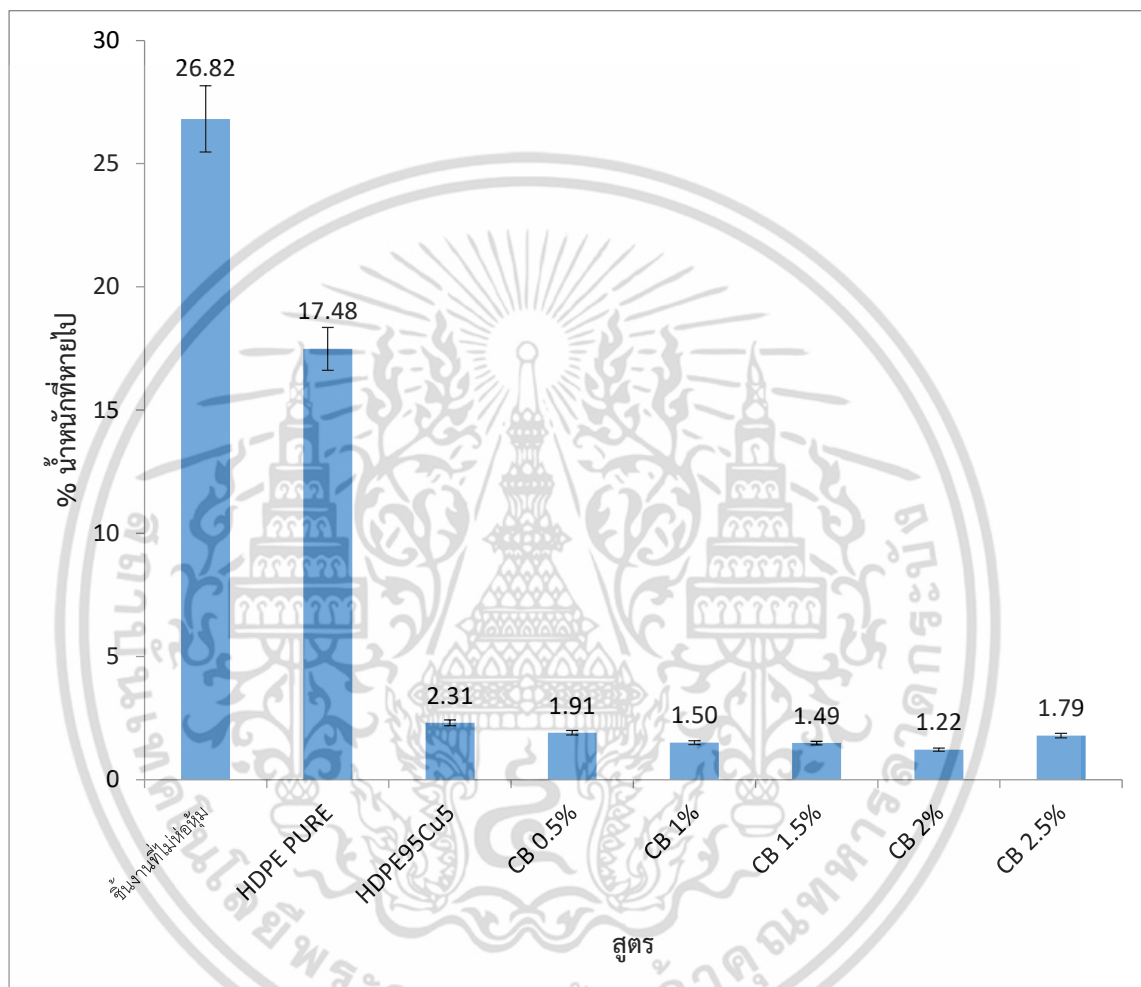
จะสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้สูงสุด โดยที่น้ำหนักที่สูญเสียไปคิดเป็น 0.88% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของผงคาร์บอนแบล็คจนถึง 2.5 % โดยน้ำหนัก ทำให้ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนลดลง โดยน้ำหนักที่หายไปคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 1.02 % แสดงดังรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.48 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงทองแดงและคาร์บอนแบล็ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ผงทองแดงเป็นสารตัวเติมและเพิ่มคาร์บอนแบล็คเพื่อช่วยในการกระจายตัวด้วยกรดอะซิติก พบว่าการเพิ่มคาร์บอนแบล็ค สามารถช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้มากขึ้น โดยการเติมคาร์บอนแบล็คที่สูงสุด 2 % สามารถป้องกันการกัดกร่อนด้วยกรดอะซิติก โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียไปได้เท่ากับ 1.22 % แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของผงคาร์บอนแบล็คจนถึง 2.5 % โดยน้ำหนัก ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนลดลง โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.49 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยกรดสเตรียริกของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมผงทองแดงและคาร์บอนแบล็ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเป่าขึ้นรูปฟิล์มโดยใช้ผงทองแดงหรือผงสังกะสีเป็นสารตัวเติมเพื่อใช้ในการป้องกันสนิม ซึ่งจากการทดสอบการป้องกันสนิมของฟิล์มได้เป็นผลสำเร็จและสามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการป้องกันการเกิดสนิมได้ เนื่องจากฟิล์มสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และตัวฟิล์มพอลิเมอร์ มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน จากการวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของผงโลหะ

ในการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของผงโลหะ โดยใช้กรดสเตียริกในการปรับปรุงสมบัติพื้นผิว เนื่องจากมีราคาถูกและสามารถทำให้ผงโลหะกระจายตัวในเมทริกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ได้ดี รวมถึงการช่วยให้พอลิเมอร์สามารถเกาะบนพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น เพราะกรดสเตียริกเป็นสารที่มีขี้วในส่วนของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก และไม่มีขี้วในส่วนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจึงสามารถยึดกับผงทองแดงในส่วนของด้านที่มีขี้ว (หมู่ฟังก์ชันกรดคาร์บอกซิลิก) และด้านที่ไม่มีขี้ว (สารประกอบไฮโดรคาร์บอน) ยึดเกาะกับฟิล์ม HDPE

5.1.2 การขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์

ในการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ควรวัดขนาดของฟิล์มพอลิเมอร์ให้เท่าๆกัน และควบคุมปริมาณของลมที่ปล่อยออกมาเพื่อให้บับเบิลของฟิล์มพอลิเมอร์ไม่หนาหรือบางจนเกินไป เมื่อทำการเพิ่มผงทองแดงหรือผงสังกะสีเข้าไปในฟิล์มพอลิเมอร์ จะทำให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลต่ำลง การขึ้นรูปฟิล์มจะยากขึ้นเนื่องจากเนื้อฟิล์มจะขาดได้ง่ายขึ้นเมื่อให้ลมมากเกินไป

5.1.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ฟิล์มที่ทำการเติมผงทองแดงหรือผงสังกะสีเพิ่มขึ้น จะทำให้สมบัติเชิงกลที่ได้ต่ำลง เนื่องจากการเติมผงทองแดงหรือผงสังกะสีลงไป จะทำให้การเกี่ยวพันของสายโซ่พอลิเมอร์ (Entanglement) ลดลง ทำให้สมบัติเชิงกลที่ได้ต่ำลง เนื่องจากผงโลหะที่เติมลงไปมีลักษณะเป็นของแข็ง และสามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ แต่ไม่สามารถรวมกันได้ จึงเกิดการแยกวัฏภาคระหว่างฟิล์มพอลิเมอร์และผงโลหะที่เติมลงไป

5.1.4 สันฐานวิทยา

จากการดูสันฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การกระจายตัวของผงทองแดงและผงสังกะสีมีการกระจายตัวได้ดีในฟิล์มพอลิเมอร์ ไม่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ผงทองแดงสามารถเกาะบนพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ได้ดี แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงทองแดงถึง 10 % จะเริ่มเกิดรูพรุนและมีการหลุดออกของผงทองแดง ส่วนผงสังกะสีสามารถหลุดออกจากพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ได้ทำให้ตัวฟิล์มพอลิเมอร์มีรูพรุนเมื่อเติมผงสังกะสีถึง 3 % สาเหตุอาจจะมาจากรูปร่างอนุภาคของผงทองแดงมีลักษณะเป็นทรงรี การฝังตัวในเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์จะดีกว่าผงสังกะสีที่มีลักษณะเป็นทรงกลม จึงทำให้สามารถหลุดร่วงออกมาจากฟิล์มพอลิเมอร์ได้ง่ายกว่าผงทองแดง

5.1.5 พฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์

ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเติมผงทองแดงหรือผงสังกะสีเมื่อทำการทดสอบด้วยเครื่อง TGA พบว่าเกิดการสลายตัวของฟิล์มพอลิเมอร์เริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C และสลายตัวหมดที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C และน้ำหนักที่เหลืออยู่คือน้ำหนักของผงทองแดงหรือผงสังกะสี

5.1.6 การทดสอบการป้องกันการกัดกร่อน

การทดสอบการกัดกร่อนด้วยการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์และกรดอะซิติก พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมกับผงทองแดงสามารถป้องกันการกัดกร่อนจากเกลือและกรดได้ ซึ่งการใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมกับผงทองแดงสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด คือทองแดงที่ 5% โดยน้ำหนักเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของผงทองแดงที่เติมลงไป ส่วนการใช้ผงสังกะสีในการป้องกันการกัดกร่อนนั้นไม่ดีเนื่องจากผงสังกะสีเป็นตัวออกซิไดส์ที่ไม่ดี จึงทำให้ไม่สามารถดักจับไอออนลบได้ดีเท่าที่ควร

5.1.7 การปรับปรุงสมบัติฟิล์มพอลิเมอร์

การใช้คาร์บอนแบล็คในการปรับปรุงสมบัติฟิล์มพอลิเมอร์ เพื่อช่วยในการกระจายตัวของผงทองแดง โดยผงทองแดงที่ใช้ในการเติมคาร์บอนแบล็คคือการใช้ผงทองแดง 5% โดยน้ำหนัก เมื่อทำการเติมผงคาร์บอนแบล็ค จะทำให้ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนดีขึ้น แต่ความสามารถทางสมบัติเชิงกลลดลง ซึ่งสูตรที่ดีที่สุดในการป้องกันการกัดกร่อนคือการเติมคาร์บอนแบล็คลงไป 2 % โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของผงคาร์บอนแบล็คถึง 2.5 % โดยน้ำหนัก ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนจะลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาบทบาทร่วมของโลหะผสม เช่นผงทองแดงผสมกับผงสังกะสี เพื่อเปรียบเทียบกับสมบัติต่างๆกับโลหะเดี่ยวที่ทำการศึกษามาแล้ว

5.2.2 ศึกษาบทบาทของสารช่วยกระจายตัว เพื่อให้ผงโลหะเกิดการกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ส่งผลให้สมบัติต่างๆที่ได้ดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] อรรถสิทธิ์ แจ่มฟ้า. 2560. **อุตสาหกรรมเหล็ก** [online]. Available: <https://www.gsb.or.th/getattachment/20fbdd15-2e9b-4f92-a488-ab25d7df626a/%E0%B8%AD%E0%B8%95%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%AB%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%A3%E0%B8%A1%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B8%81-%E0%B9%80%E0%B8%94%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B8%A1%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B8%84%E0%B8%A1-2560.aspx>
- [2] สุธศักดิ์ ไททวงค์สกุล. **การป้องกันการเกิดสนิมเหล็ก** [online]. Available: <http://www.material.chula.ac.th/RADIO45/October/radio10-4.htm>
- [3] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2554. **โลหะและการกัดกร่อนของโลหะ** [online]. Available: sc.sci.mutp.ac.th/sctank/appchem/wcs-metal.pdf
- [4] **ศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน** [online]. Available: http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/electrode_potential.htm
- [5] บริษัท เอ็นดูแพ็ค จำกัด. **การป้องกันสนิมแคโทดิก** [online]. Available: www.พลาสติกกันสนิม.com/การป้องกันสนิมแคโทดิก-cathodic/
- [6] superiteng. 2553. **ธาตุแทรนซิชัน** [online]. Available: <http://www.vcharkarn.com/lesson/1180>
- [7] **ทองแดง**. [online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%97%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%94%E0%B8%87>
- [8] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. **Copper**. [online]. Available: <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Cu.html>
- [9] **สังกะสี**. [online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B0%E0%B8%AA%E0%B8%B5>
- [10] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์. **คาร์บอนแบล็ค**. [online] Available: http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info_index.php?cat_id=13
- [11] บริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด. **Carbon black**. [online] Available: <http://thaipolychemicals.weebly.com/carbon-black.html>
- [12] Stearic acid. [online] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Stearic_acid
- [13] บริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด. **กรดสเตียริก**. [online] Available: <http://thaipolychemicals.weebly.com/stearic-acid.html>
- [14] **พาราฟิน** [online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%9E%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%9F%E0%B8%B4%E0%B8%99>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] **Liquid paraffin (drug)**. [online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_paraffin_\(drug\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_paraffin_(drug))
- [16] **HDPE**. [online]. Available: http://www.neutron.rmutphysics.com/chemistry-glossary/index.php?option=com_content&task=view&id=1290&Itemid=108
- [17] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. **กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม**. 2547. เอกสารประกอบการเรียนวิชาปฏิบัติการพอลิเมอร์.
- [18] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2555. **Thermogravimetric Analyser**. [online] Available: http://cste.sut.ac.th/cste/index.php?mod=link_detail_full&path=web/linktolink&id_detail=149
- [19] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. **การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction)** [online] Available: <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/16-x-ray-diffraction>
- [20] ปริญา พวงนาค. **เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น** สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543. หน้า179-194.
- [21] มหาวิทยาลัยมหิดล. **กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด**. [online] Available: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [22] หัสวิภา หมายมั่น. 2555. **Scanning Electron Microscope : SEM** [online] Available: <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html>
- [23] D.N. Bikiaris and K.S. Triantafyllidis. 2013. “HDPE/Cu-nanofiber nanocomposites with enhanced antibacterial and oxygen barrier properties appropriate for food packaging applications”. *Materials Letters*. 93(1) 1–4.
- [24] I. Grigoriadou, K.M. Paraskevopoulos, M. Karavasili, G. Karagiannis, A. Vasileiou and D. Bikiaris. 2013. “HDPE/Cu-nanofiber nanocomposites with enhanced mechanical and UV stability properties”. *Composites: Part B* 55(1) 407–420.
- [25] A.L. Ma, S.L. Jiang, Y.G. Zheng and W. Ke. 2015. “Corrosion product film formed on the 90/10 copper–nickel tube in natural seawater: Composition/structure and formation mechanism”. *Corrosion Science* 91(1) 245–261.
- [26] D. KONG, C. DONG, Y. FANG, K. XIAO, C. GUO, G. HE and X. LI. 2016. “Copper corrosion in hot and dry atmosphere environment in Turpan, China”. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 26(1) 1721–1728.

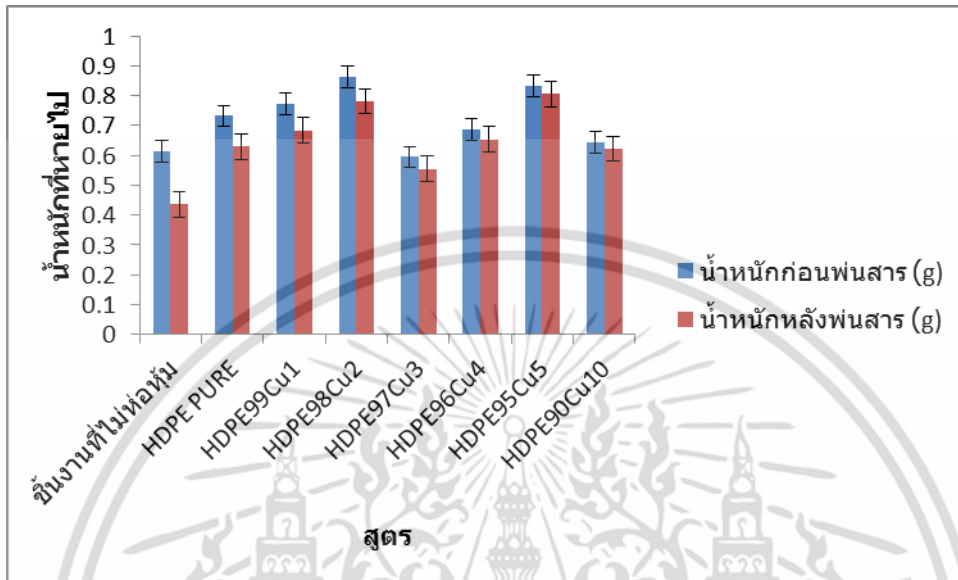
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



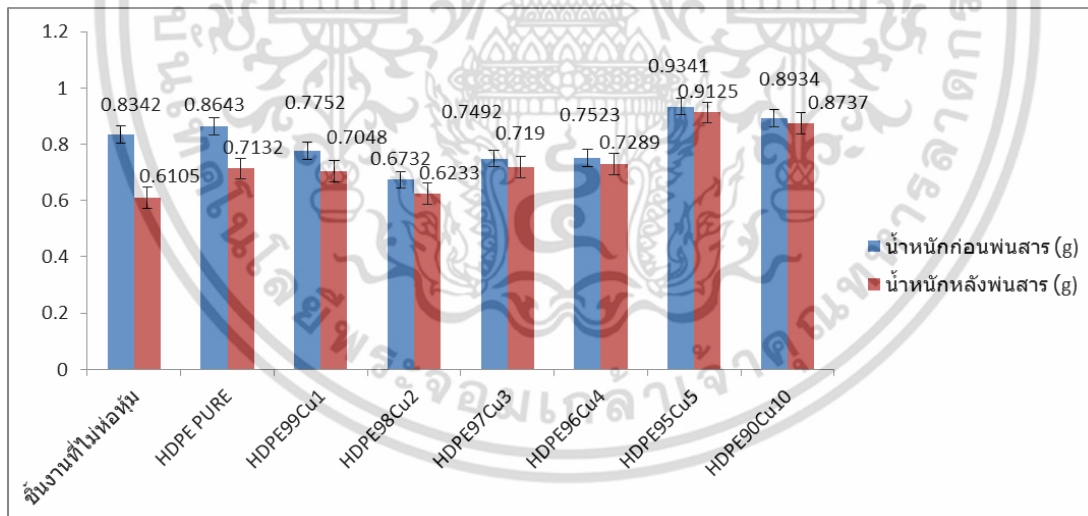
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ก. น้ำหนักก่อนและหลังทำการทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิเมอร์

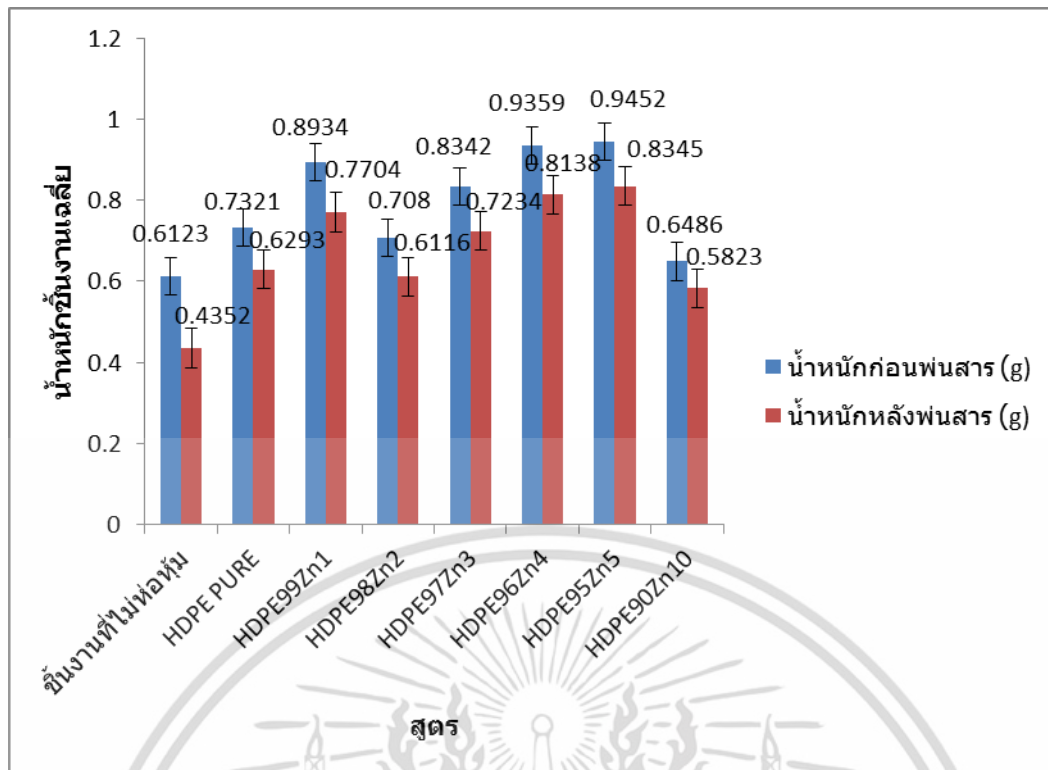


ก.1 น้ำหนักก่อนและหลังพ่นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของฟิล์มที่เติมผงทองแดง

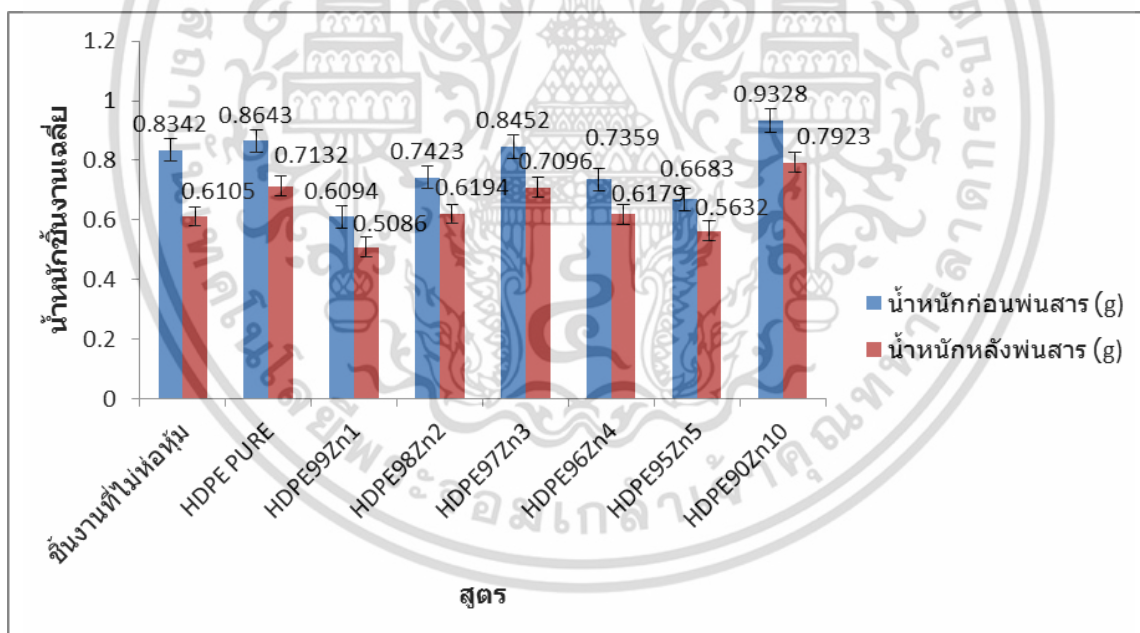


ก.2 น้ำหนักก่อนและหลังพ่นกรดอะซิติกของฟิล์มที่เติมผงทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

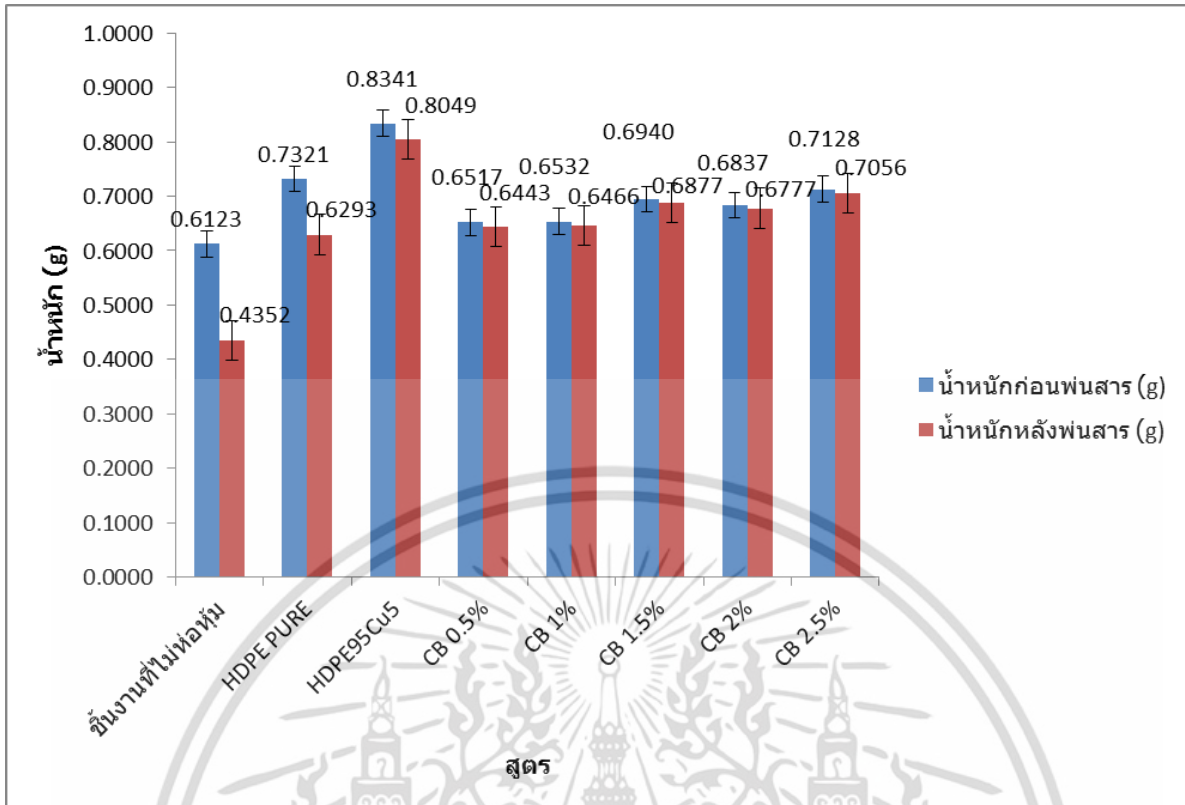


ก.3 น้ำหนักก่อนและหลังพ่นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของฟิล์มที่เติมผงสังกะสี

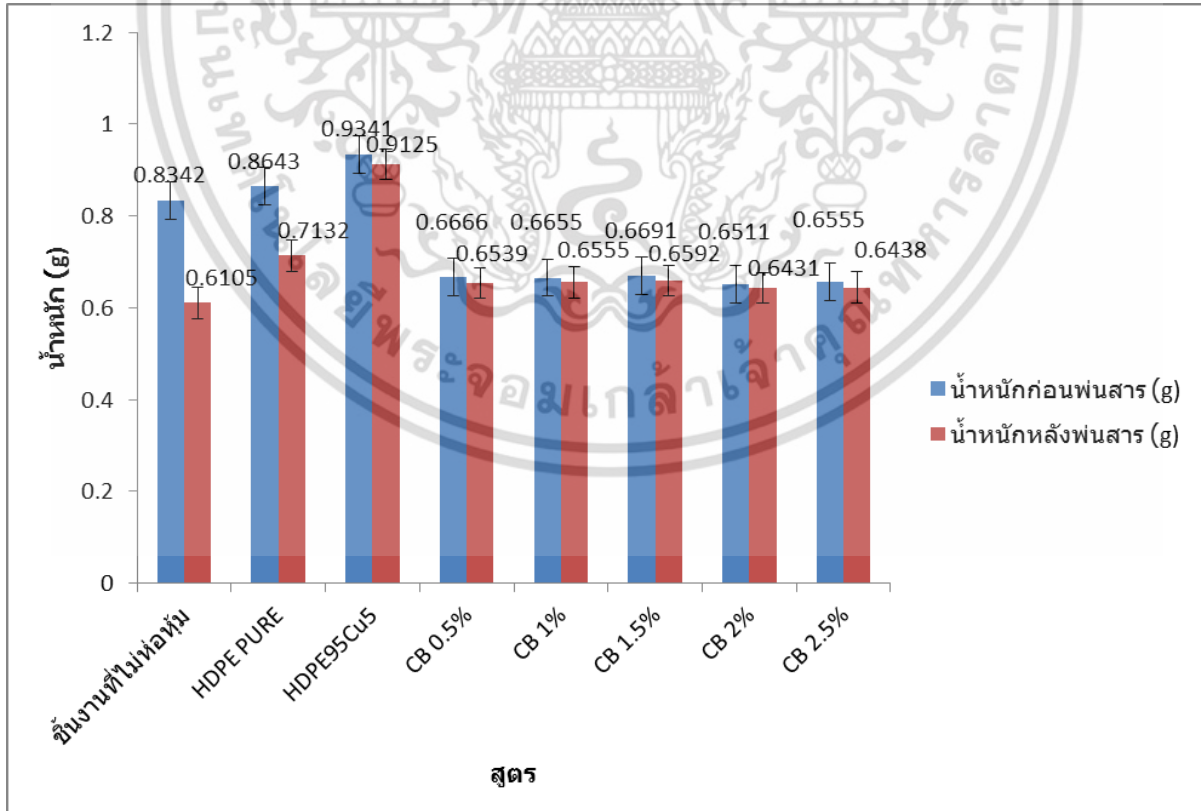


ก.4 น้ำหนักก่อนและหลังพ่นกรดอะซิติกของฟิล์มที่เติมผงสังกะสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.5 น้ำหนักก่อนและหลังพ่นสารละลายไซโตเดียมคลอไรด์ของฟิล์มที่เติมผงทองแดงและผงคาร์บอนแบล็ค



ก.6 น้ำหนักก่อนและหลังพ่นกรดอะซิติกของฟิล์มที่เติมผงทองแดงและผงคาร์บอนแบล็ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายปิยะพงษ์ นิ่มเสนาะ
วัน เดือน ปีเกิด	5 ธันวาคม พ.ศ. 2533
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 186 ถนนชลบุรี-บ้านบึง ต.บ้านบึง อ.บ้านบึง จ.ชลบุรี 20170
ประวัติการศึกษา	(2556) วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรมและเครื่องมือวิเคราะห์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2560) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา เทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้