

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของกระบวนการเตรียมผิวและการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าบนอะครีโลไนไตรล์-
บิวทาไดอีน-สไตรีนและพอลิแลคติกแอซิด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Comparative study of metallization and electrodeposition on Acrylonitrile-Butadiene-
Styrene and Polylactic acid



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical and Materials Engineering
Department of Metallurgical Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2020
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของกระบวนการเตรียมผิวและ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าบนอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีนและพอลิแลคติกแอซิด
โดย	น.ส.วริณธร ศรีสุพรวิชัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.จิราภรณ์ คำวรรณะ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.มาร์ติน เมตซ์เนอร์)

วรินทร์ ศรีสุพรวิชัย : การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของกระบวนการเตรียมผิวและการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าบนอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีนและพอลิแลคติกแอซิด. (Comparative study of metallization and electrodeposition on Acrylonitrile-Butadiene-Styrene and Polylactic acid) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ยุทนันท์ บุญยมณีนรัตน์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล

เนื่องด้วยอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีความต้องการผลิตภัณฑ์จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนพลาสติกที่สูงขึ้น ด้วยเหตุที่สามารถลดน้ำหนักและต้นทุนของผลิตภัณฑ์ได้ แต่การศึกษาและพัฒนาวิธีการเตรียมผิวเพื่อชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพยังคงมีข้อจำกัดและสามารถใช้ได้กับพอลิเมอร์ชนิด ABS (อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน) เท่านั้น ซึ่ง ABS เป็นพอลิเมอร์ชนิดที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ในขณะที่สังคมต่าง ๆ มีความตระหนักต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น จึงทำให้มีแนวโน้มการใช้งานพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติสูงขึ้น โดย PLA (พอลิแลคติกแอซิด) เป็นพอลิเมอร์ชนิดที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและมีความแข็งแรงสูง แต่ PLA มีโครงสร้างที่แตกต่างกับ ABS จึงทำให้กระบวนการเตรียมผิวเพื่อชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันไม่สามารถปรับใช้กับ PLA ได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการขึ้นรูปชิ้นงาน ABS และ PLA ด้วยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM และเตรียมผิวโดย (1) วิธีการกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม, (2) วิธีการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอิลิกโพรไลด์และแอคติเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน และ (3) วิธีการทาสีเงินนำไฟฟ้า เพื่อทำการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าและศึกษาเชิงเปรียบเทียบกับชิ้นงาน ABS ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการตามอุตสาหกรรม ซึ่งได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาค, องค์ประกอบทางเคมีและประสิทธิภาพในการชุบไฟฟ้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และศึกษาความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบด้วยเทปกาวและการทดสอบรอยขีดข่วน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน ABS และ PLA ที่เตรียมผิวด้วยวิธีต่าง ๆ ได้ โดยอัตราเร็วในการชุบไฟฟ้าของชิ้นงานมีค่าแตกต่างกันในช่วง 1.2-1.9 ไมโครเมตร/นาที ภายหลังจากชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าพบว่าชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมดมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี โดยพบว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการทาสีเงินนำไฟฟ้าทำให้ชั้นเคลือบมีความสามารถในการยึดติดสูงกว่าวิธีการเตรียมผิวในปัจจุบัน 1-2 เท่า อย่างไรก็ตามพบว่าวิธีการเตรียมผิวแต่ละวิธีมีข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการศึกษาและพัฒนากระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนพลาสติกได้ในอนาคต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6170263021 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORD: 3D Printing; Metallizing; Electroplating; Plating on Plastics

Varintorn Srisupornwichai : Comparative study of metallization and electrodeposition on Acrylonitrile-Butadiene-Styrene and Polylactic acid. Advisor: Prof. YUTTANANT BOONYONGMANEERAT Co-advisor: Assoc. Prof. PATAMA VISUTTIPITUKUL

With an increasing demand for ‘plating-on-plastic’ (POP) products in various industries due to weight and cost reductions for part production, a study and development for effective surface pre-treatment methods for POP process however remain limited, and the available method is merely compatible with ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene), the non-biodegradable polymer. With high environmental awareness in society, bioplastic continues to receive increasing attention and utilization rate. PLA, polylactic acid, is one of the critical biopolymers today, owing to its high strength and relative ease of forming. Unlike the common structural, non-biodegradable ABS, the surface of PLA cannot be readily pre-treated in preparation for electroplating using the conventional POP process. In this research, ABS and PLA specimens fabricated by the FDM 3D printing method were surface pre-treated with three strategies, namely, (1) chemical etching and Pd activation technique, (2) polyelectrolyte multilayers (PEMs) & Ag nanoparticle deposition technique, and (3) Ag conductive painting technique, followed by electroplating of copper layers. The study was performed comparatively to the ABS with the conventional POP process. The samples’ microstructure, chemical distribution, and plating characteristics were assessed with scanning electron microscopy and optical microscopy. The adhesion of the metallic coatings was analyzed using scratch test and tape test. The results indicated that electroplating could be achieved on all pre-treated ABS and PLA specimens, however with a different plating speed in the range of 1.2-1.9 micrometer per minute. All three surface pre-treatment techniques could achieve the uniform copper deposit on PLA. The conductivity after electroplating was excellent. Furthermore, the Ag conductive painting technique delivered 1-2 times higher adhesion performance of plated film over that offered by the conventional pre-treatment method. Nevertheless, each pretreatment method shows different degrees of benefits, which could be further developed in a future study of POP processes.

Field of Study: Metallurgical and Materials Engineering Student's Signature

Academic Year: 2020 Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ดีด้วยความช่วยเหลือและอนุเคราะห์จากหลาย ๆ ท่าน ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ในการถ่ายทอดความรู้ แนวทางในการวางแผนการดำเนินงานวิจัย ให้โอกาสผู้เขียนได้พัฒนา ศักยภาพ ตลอดจนกรุณาให้คำปรึกษาในทุก ๆ ด้าน และเป็นแบบอย่างที่ดีในการทำงานเสมอมา ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับการถ่ายทอดความรู้และกรุณาให้คำชี้แนะอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งด้วยความเต็มใจ

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ชวนชม อ่วมเนตร สำหรับการถ่ายทอดความรู้และสละเวลาให้คำปรึกษาในทุกด้านเป็นอย่างดี ตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหา ให้กำลังใจ และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. Stephan T. Dubas สำหรับการถ่ายทอดความรู้ ให้คำปรึกษาและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องทดลอง สารเคมีและเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ประจำสถาบันฯ ทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือด้วยความเต็มใจ ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ในการสนับสนุนทุนสำหรับการทำวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และให้กำลังใจเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและคอยสนับสนุนผู้เขียนในทุกด้าน รวมถึงเป็นกำลังใจสำคัญและเป็นแรงผลักดันตลอดจนผู้เขียนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี ทั้งนี้ ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

วริณธร ศรีสุพรวิชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม	4
2.1 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติระบบหัวฉีด.....	4
2.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนพอลิเมอร์.....	5
2.2.1 การเตรียมผิว	5
2.2.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	7
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการเตรียมผิว	9
2.3.1 การปรับปรุงกระบวนการกัดผิว	9
2.3.2 การปรับปรุงกระบวนการกระตุ้นพื้นผิว (การเซ็นซิไทซิงและแอคติเวท)	10
2.3.3 การดัดแปลงกระบวนการเตรียมผิว	11

2.3.3.1 การเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์และแอคติเวทด้วยอนุภาคนาโน ของเงิน	12
2.3.3.2 การเคลือบผิวด้วยสีกาไฟฟ้า	15
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการทดลอง.....	17
3.1 การสืบค้นและรวบรวมข้อมูล	17
3.2 การเตรียมชิ้นงาน.....	18
3.2.1 การขึ้นรูปชิ้นงาน	18
3.2.2 การเตรียมผิวเพื่อชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	19
3.2.2.1 วิธีการเตรียมผิวโดยใช้กระบวนการกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม	19
3.2.2.2 วิธีการเตรียมผิวโดยใช้การเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์และ แอคติเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน	20
3.2.2.3 วิธีการเตรียมผิวโดยการทาสีกาไฟฟ้า	21
3.2.3 การชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า	22
3.2.4 การชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า	22
3.3 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน.....	23
3.3.1 การทดสอบความสามารถในการเปียก	23
3.3.2 การทดสอบความต้านทานไฟฟ้า	23
3.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างบริเวณผิวชิ้นงาน.....	23
3.3.4 การทดสอบความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบโดยใช้เทปกาว.....	23
3.3.5 การทดสอบความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบโดยใช้เครื่องทดสอบรอยขีดข่วน	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	25
4.1 ผลการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบหัวฉีด	25
4.2 ผลการเตรียมผิวและชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน ABS และ PLA	26
4.2.1 ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า.....	27

4.2.2 ลักษณะของชิ้นงานขณะก่อน-หลังการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า และความหยาบผิว ภายหลังการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า.....	29
4.3 ผลการเปรียบเทียบภาคตัดขวางของชิ้นเคลือบทองแดงที่ได้จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	31
4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค, ความหยาบผิว และความสามารถในการเปียกของชิ้นงาน ที่เตรียมผิวด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีที่ 1 ขณะก่อน-หลังการกัดผิวด้วยสารเคมี	34
4.5 ประสิทธิภาพในการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า	37
4.6 ความสามารถในการยึดติดของชิ้นเคลือบ	39
4.6.1 ผลการทดสอบความสามารถในการยึดติดของชิ้นเคลือบด้วยเทปกาว	39
4.6.2 ผลการทดสอบความสามารถในการยึดติดของชิ้นเคลือบด้วยเครื่องทดสอบรอยขีดข่วน	40
4.7 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบของกระบวนการเตรียมผิวทั้ง 3 วิธี	42
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผลการทดลอง	51
บรรณานุกรม.....	53
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงาน	61
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบรอยขีดข่วน	67
ประวัติผู้เขียน.....	69

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าของวัสดุ.....	15
ตารางที่ 3.1 แสดงข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบของกระบวนการเตรียมผิวเพื่อชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนพลาสติก.....	17
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM	19
ตารางที่ 3.3 แสดงระดับความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบโลหะ	24
ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงาน ABS และ PLA	28
ตารางที่ 4.2 การเตรียมผิวและการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน ABS และ PLA ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ.....	30
ตารางที่ 4.3 ภาคตัดขวางของชิ้นงาน ABS และ PLA ภายหลังจากการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าลงบนชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีต่าง ๆ.....	33
ตารางที่ 4.4 พื้นผิวของชิ้นงาน ABS และ PLA ก่อน-หลังการกัดผิวด้วยสารเคมี และแสดงมุมสัมผัสของหยดน้ำภายหลังจากการกัดผิวด้วยสารเคมี.....	36
ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน ABS และ PLA ที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1, 2 และ 3.....	38
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบเมื่อทดสอบด้วยวิธีเทปกาวตามมาตรฐาน ASTM D3359-02.....	40
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบเมื่อทดสอบด้วยวิธีการ scratch test ตามมาตรฐาน ASTM C 1624-05.....	42
ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของกระบวนการเตรียมผิวแต่ละวิธี	49

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงกลไกการตัดพันระคู่ของ ABS ด้วยสารละลายกรดโครมิก.....	5
รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวพอลิเมอร์ระหว่างกระบวนการเตรียมผิวโดย (ก) การกัดผิว (ข) การกระตุ้นผิว และ (ค) การชุบโลหะโดยไม่อาศัยไฟฟ้า	7
รูปที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	8
รูปที่ 2.4 แสดงกลไกการเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิกบนผิวพอลิเมอร์.....	13
รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของภาวะการเปียกบนผิวพอลิเมอร์	13
รูปที่ 2.6 แสดงการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์ ด้วยวิธี layer-by-layer.....	14
รูปที่ 3.1 รูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	19
รูปที่ 4.1 ชิ้นงาน ABS และ PLA ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบหัวฉีด	25
รูปที่ 4.2 ลักษณะการเรียงตัวของเส้นพอลิเมอร์ ก) ABS และ ข) PLA และการเกิด Air gap	26
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวชิ้นงาน ก) ABS และ ข) PLA ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM.....	26
รูปที่ 4.4 รูปแบบความหยาบผิวของชิ้นงาน ABS ก่อนการกัดผิว.....	35
รูปที่ 4.5 รูปแบบความหยาบผิวของชิ้นงาน ABS หลังการกัดผิวด้วยกรดโครมิกผสมกรดซัลฟูริกที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที.....	35
รูปที่ 4.6 รูปแบบความหยาบผิวของชิ้นงาน PLA ก่อนการกัดผิว.....	36
รูปที่ 4.7 รูปแบบความหยาบผิวของชิ้นงาน PLA หลังการกัดผิวด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที.....	36
รูปที่ 4.8 รอยขีดข่วนของชั้นเคลือบโลหะทองแดงบนชิ้นงาน ABS ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิว และแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม (วิธีมาตรฐาน).....	41
รูปที่ 4.9 รอยขีดข่วนของชั้นเคลือบโลหะทองแดงบนชิ้นงาน ABS ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการทาสีนำไฟฟ้า (วิธีที่ 3).....	41

รูปที่ 4.10 รอยขีดข่วนของชั้นเคลือบโลหะทองแดงบนชิ้นงาน PLA ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม (วิธีที่ 1).....	41
รูปที่ 4.11 รอยขีดข่วนของชั้นเคลือบโลหะทองแดงบนชิ้นงาน PLA ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการทาสีนำไฟฟ้า (วิธีที่ 3).....	42
รูปที่ 4.12 แผนภูมิเปรียบเทียบกระบวนการเตรียมผิวด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า.....	50
รูปที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน ABS ที่เตรียมผิวด้วยวิธีมาตรฐาน	61
รูปที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน PLA ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม	62
รูปที่ ก.3 โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน ABS ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิเอทิลีนโพรไนด์และแอคติเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน	63
รูปที่ ก.4 โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน PLA ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิเอทิลีนโพรไนด์และแอคติเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน	64
รูปที่ ก.5 โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน ABS ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการทาสีเงินนำไฟฟ้า.....	65
รูปที่ ก.6 โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน PLA ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการทาสีเงินนำไฟฟ้า.....	66
รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบรอยขีดข่วนของชั้นเคลือบทองแดงบนชิ้นงาน ABS ที่เตรียมผิวด้วยวิธีมาตรฐาน	67
รูปที่ ข.2 ผลการทดสอบรอยขีดข่วนของชั้นเคลือบทองแดงบนชิ้นงาน PLA ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม	67
รูปที่ ข.3 ผลการทดสอบรอยขีดข่วนของชั้นเคลือบทองแดงบนชิ้นงาน ABS ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการทาสีเงินนำไฟฟ้า.....	68
รูปที่ ข.4 ผลการทดสอบรอยขีดข่วนของชั้นเคลือบทองแดงบนชิ้นงาน PLA ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการทาสีเงินนำไฟฟ้า.....	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การเคลือบผิววัสดุต่าง ๆ เช่น โลหะ พอลิเมอร์ เซรามิก และวัสดุผสม โดยวิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมในการปรับปรุงสมบัติที่ผิวของวัสดุ เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อน เพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า เพื่อเพิ่มความสวยงาม รวมไปถึงการเพิ่มมูลค่า เนื่องจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าสามารถควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มได้ง่าย และสามารถทำการชุบโลหะได้หลากหลายชนิด เช่น ทองแดง, โครเมียม, นิกเกิล และทอง เป็นต้น ปัจจุบันอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ และอุตสาหกรรมเครื่องสุขภัณฑ์ นิยมนำวัสดุประเภทพอลิเมอร์มาทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยมีชื่อเรียกทางอุตสาหกรรมว่า Plating On Plastics (POP) ซึ่งอุตสาหกรรมมีแนวโน้มความต้องการผลิตภัณฑ์เหล่านี้สูงขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ POP มีลักษณะเด่น คือ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักเบา และสามารถลดต้นทุนของวัสดุลงได้อย่างมาก

สำหรับกระบวนการ POP นั้น ประกอบไปด้วยการเตรียมผิวหลายขั้นตอน ได้แก่ การกัดผิว (Etching), การกระตุ้นผิว (Sensitizing and Activating) และการชุบโลหะโดยไม่อาศัยไฟฟ้า (Electroless deposition) เพื่อสร้างกลไกการยึดติดของชั้นฟิล์ม และเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านได้ จึงต้องทำการเตรียมผิวเพื่อปรับสภาพพื้นผิวให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าโดยการทำให้พื้นผิวกลายเป็นโลหะ (Metallizing) แต่พบว่ากระบวนการเตรียมผิวในปัจจุบันมีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ การใช้สารเคมีที่มีความรุนแรง และอันตรายในการกัดผิว, มีการปลดปล่อยไอออน Cr(VI) ที่มีความเป็นพิษสูงระหว่างกระบวนการกัดผิว [1], การใช้โลหะหนัก และโลหะมีค่าในการกระตุ้นพื้นผิว [1-6] ซึ่งทำให้ต้นทุนของกระบวนการ POP มีราคาสูง อีกทั้งสารละลายที่มีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบสามารถส่งผลกระทบต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมได้ จึงจำเป็นต้องมีการลงทุนสร้างระบบการบำบัด และจัดการน้ำเสียที่ดี [5, 7, 8] นอกจากนี้กระบวนการเตรียมผิวพอลิเมอร์สำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าในปัจจุบันเป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับ อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) เท่านั้น ซึ่งไม่สามารถที่จะปรับใช้กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีโครงสร้างโมเลกุลแตกต่างไปจาก ABS ได้ โดยพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลแตกต่างกันจำเป็นต้องใช้วิธีการเตรียมผิวที่แตกต่างกันออกไป [9] ซึ่งพบว่าปัจจุบันยังมี

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมผิวของพอลิเมอร์ชนิดอื่นค่อนข้างน้อย จึงได้เกิดศึกษาวิจัย และพัฒนาเพื่อปรับปรุงกระบวนการเตรียมผิวให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมนุษย์มากขึ้น โดยหลีกเลี่ยงการใช้โลหะหนัก และโลหะมีค่า ร่วมกับการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ แบบระบบหัวฉีด หรือ Fused Deposition Modelling (FDM) มาช่วยในการขึ้นรูปชิ้นงานพอลิเมอร์ เพื่อความสะดวก รวดเร็ว และลดปริมาณของเสียจากกระบวนการขึ้นรูป [10]

ABS เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก แต่กระบวนการสังเคราะห์ ABS ต้องใช้พลังงานสูง และแหล่งทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ก็มีแนวโน้มที่จะลดลง ในขณะที่อุตสาหกรรม POP มีความต้องการสูงขึ้น รวมถึง ABS เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ หลังสิ้นสุดการใช้งานมักสร้างปัญหาขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อม

เพื่อลดปัญหาต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงมีความสนใจที่จะนำพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) ประเภทอะลิฟาติกเอสเทอร์ (Aliphatic ester) ที่สังเคราะห์ได้จากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียนและยั่งยืน เช่น พืช, แป้ง, น้ำตาล [11-16] อีกทั้งยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable polymer) มาใช้ในงาน POP เพื่อทดแทน ABS ซึ่ง PLA เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีราคาถูก และสามารถหาได้ง่ายในทางการค้า อย่างไรก็ตามพบว่าในปัจจุบันยังมีข้อมูล และการศึกษาเกี่ยวกับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบน PLA รวมถึงการศึกษาสภาวะการเตรียมผิว PLA เพื่อการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ค่อนข้างจำกัด

ในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาระบบการเตรียมผิวสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบน ABS และ PLA ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ FDM โดยมุ่งเน้นกระบวนการที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และลดต้นทุนของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเตรียมผิวโดยหลีกเลี่ยงการใช้โลหะแพลเลเดียม ควบคู่ไปกับการศึกษาผลจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนพอลิเมอร์แต่ละประเภท และเปรียบเทียบผลที่ได้จากกระบวนการเตรียมผิวเพื่อชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ การเตรียมผิวโดยใช้กระบวนการกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม, การเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์โพรไลต์ (Polyelectrolyte multilayers, PEMs) และแอคติเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน (Silver nanoparticles, Ag NPs) และการเตรียมผิวโดยการทาสีเงินนำไฟฟ้า (Silver conductive paint)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษา และเปรียบเทียบกระบวนการเตรียมผิวแบบต่าง ๆ สำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบน ABS และ PLA

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบของ ABS และ PLA ที่ผ่านการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อเสนอแนะแนวทางการพัฒนากระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ FDM โดยใช้ ABS เป็นตัวแทนของพอลิเมอร์สังเคราะห์ และใช้ PLA เป็นตัวแทนของพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้

1.3.2 ศึกษาวิธีการเตรียมผิวชิ้นงานพอลิเมอร์เพื่อทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 การเตรียมผิวโดยใช้กระบวนการกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม

วิธีที่ 2 การเตรียมผิวโดยการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์และแอคติเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน

วิธีที่ 3 การเตรียมผิวโดยการทาสีเงินนำไฟฟ้า

1.3.3 ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ ได้แก่ ภาวะการเปื่อย ความต้านทานไฟฟ้า ความหยาบผิว โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบ และศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทราบปัจจัยของกระบวนการเตรียมผิวพอลิเมอร์ที่ส่งผลต่อสมบัติ และประสิทธิภาพของชั้นเคลือบหลังทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

1.4.2 สามารถลดต้นทุน และความรุนแรงของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเตรียมผิวได้

1.4.3 ทราบแนวทางการนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ FDM มาทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เพื่อศึกษาและพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรมจริงต่อไป

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

2.1 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติระบบหัวฉีด

การขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ Fused Deposition Modelling (FDM) เป็นหนึ่งในวิธีการขึ้นรูปโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใช้งานได้สะดวกรวดเร็ว ต้นทุนในการผลิตต่ำ [17, 18] สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ง่าย [19, 20] มีข้อเสียจากกระบวนการขึ้นรูปน้อย และทำให้ชิ้นงานมีความเค้นตึงน้อย จึงนิยมนำมาใช้ในการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) รวมถึงมีการขึ้นรูปเพื่อใช้เป็นชิ้นงานจริงด้วย แต่พอลิเมอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปจะต้องเป็นชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เท่านั้น เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปต้องอาศัยการหลอมเหลวและการแข็งตัวโดยเทอร์โมพลาสติกที่นิยม ได้แก่ ABS, PLA, PET (Polyethylene Terephthalate) [21] เป็นต้น โดยพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบจะอยู่ในลักษณะที่เป็นเส้น (Filament) และถูกลำเลียงเข้าสู่หัวฉีด (Nozzle) โดยในหัวฉีดจะมีอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสของพอลิเมอร์ชนิดนั้น ๆ เมื่อพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวในหัวฉีดอย่างสมบูรณ์แล้ว จะถูกดันให้ไหลผ่านหัวฉีดออกมาแข็งตัวอยู่บนฐานวางชิ้นงานทีละชั้น ๆ จนได้เป็นรูปร่างชิ้นงานตามที่ได้ออกแบบไว้ พอลิเมอร์ชนิดที่มีความเป็นผลึกสูงจะทำให้ชิ้นงานมีสมบัติทางกลสูง แต่จะขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM ได้ยาก [22] เช่น ABS เนื่องจากชิ้นงานมักเกิดการหลุดร่อน เกิดการหดตัวสูง นอกจากนี้ยังมีกลิ่นเหม็นไหม้เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป โดยใช้อุณหภูมิในการหลอมเหลว ABS อยู่ในช่วง 220 – 240 องศาเซลเซียส สำหรับพอลิเมอร์บางชนิดที่มีความเป็นผลึกต่ำ เช่น PLA อาจให้สมบัติทางกลต่ำกว่า ABS แต่จะสามารถขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM ได้ง่าย [21, 22] เนื่องจากจะเกิดการหดตัวน้อยเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ชิ้นงานสามารถยึดติดกับฐานได้ดี โดย PLA เป็นพอลิเมอร์ชนิดที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ อุณหภูมิในการหลอมเหลวอยู่ในช่วง 190 – 210 องศาเซลเซียส ตัวแปรต่าง ๆ ของเครื่องพิมพ์ เช่น Raster angle, Air gap, ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุ, ความเร็วในการพิมพ์, เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด, อุณหภูมิ, ทิศทางในการพิมพ์ชิ้นงาน เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงานอย่างมาก [17, 19, 23-27] ทำให้มีการศึกษา และพัฒนาเกี่ยวกับการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ กันอย่างแพร่หลาย ในปัจจุบันได้มีการนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติมาขยายขอบเขตการใช้งานให้กว้างขึ้น โดยนำชิ้นงานมาทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) [10, 24, 28-32] หรือที่เรียกว่าการชุบเคลือบบนพลาสติก (Plating on plastics)

เพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ เช่น การนำไฟฟ้า ความแข็ง ความต้านทานต่อการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความสวยงาม และเพิ่มมูลค่าได้อีกด้วย

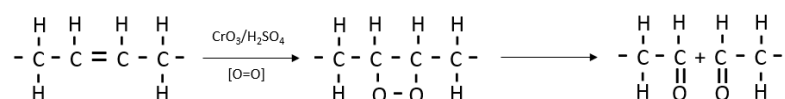
2.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนพอลิเมอร์

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนพอลิเมอร์จะสามารถกระทำได้เมื่อพอลิเมอร์สามารถนำไฟฟ้าได้ดี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูง ทำให้ไม่สามารถที่จะทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องทำการเตรียมผิวให้เป็นโลหะ (Metallizing) ก่อนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเสมอ โดยขั้นตอนนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้า และคุณภาพของการเคลือบ เนื่องจากโดยทั่วไปพอลิเมอร์ไม่มีความสามารถในการยึดติดกับชั้นเคลือบที่เป็นโลหะ การเตรียมผิวจะช่วยสร้างกลไกการยึดติดทางกล (Mechanical interlocking mechanism) ระหว่างชั้นเคลือบกับผิวชิ้นงาน [33, 34]

2.2.1 การเตรียมผิว

ขั้นตอนการเตรียมผิวเพื่อสร้างกลไกการยึดติดทางกลและการทำให้พื้นผิวของชิ้นงานมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การกัดผิว (Etching) เป็นการสร้างความหยาบผิวโดยการทำให้เกิดเป็นหลุม หรือรูพรุนขนาดเล็กบนผิวชิ้นงานด้วยสารเคมี โดยทั่วไปนิยมทำกับ ABS เนื่องจาก ABS มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วย 3 มอนอเมอร์ ได้แก่ อะคริโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน และสไตรีน ซึ่งในส่วนของบิวทาไดอีนนั้น เป็นเฟสของยาง ที่มีความอ่อนไหวต่อสารเคมีที่ประกอบไปด้วยสารประเภทออกซิไดซ์รุนแรง เช่น สารละลายกรดโครมิก เมื่อ ABS สัมผัสกับสารเคมีประเภทนี้จะทำให้เฟสของบิวทาไดอีนเกิดการหลุดออกจากเนื้อพื้น โดยการตัดพันธะที่ตำแหน่งพันธะคู่ ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำให้เกิดเป็นช่องว่าง หรือรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวบนพื้นผิว [35]



รูปที่ 2.1 แสดงกลไกการตัดพันธะคู่ของ ABS ด้วยสารละลายกรดโครมิก

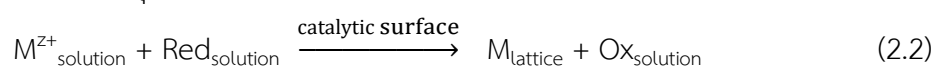
2. การกระตุ้นพื้นผิวโดยการเซ็นซิไทซิ่งและแอคติเวท สำหรับการเซ็นซิไทซิ่งเป็นการทำให้ผิวพอลิเมอร์ไวต่อปฏิกิริยาเคมี โดยใช้สารละลายสแตนนัสคลอไรด์ (SnCl_2) ซึ่งไอออนของ Sn^{2+} จะเกิดการ

ดูดซับอยู่บนผิวของพอลิเมอร์ เมื่อทำการแอคติเวทในสารละลายแพลเลเดียมคลอไรด์ (PdCl_2) จะทำให้ Pd^{2+} เกิดปฏิกิริยากับ Sn^{2+} ดังแสดงในสมการที่ 2.1 แพลเลเดียมที่ถูกรีดิวซ์เป็น Pd^0 จะเกาะติดอยู่บนพื้นผิวที่มีรูพรุน เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในขั้นตอนการชุบโลหะโดยไม่อาศัยไฟฟ้าต่อไป



3. การชุบโลหะโดยไม่อาศัยไฟฟ้า เป็นกระบวนการสร้างชั้นเคลือบโลหะที่ผิวหน้าของชิ้นงานชนิดที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยกระแสไฟฟ้าในกระบวนการชุบ แต่อาศัยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่สามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง (Autocatalytic reaction) ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดูดซับอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงานกับสารละลายที่มีไอออนของโลหะ และตัวรีดิวซ์เป็นส่วนประกอบ โดยจะเกิดปฏิกิริยาดังในสมการที่ (2.2) [36] และสามารถแบ่งออกได้เป็นปฏิกิริยาที่แอโนด ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวรีดิวซ์ทำให้ได้อิเล็กตรอนบนผิวหน้าที่เวตต่อปฏิกิริยา ดังแสดงในสมการที่ (2.3) และปฏิกิริยาที่แคโทด ซึ่งทำให้อิออนของโลหะเกิดปฏิกิริยารีดักชันจากการรับอิเล็กตรอนบนผิวหน้าที่เวตต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในสมการที่ (2.4) โดยปฏิกิริยาทั้งหมดนี้จะเกิดขึ้นพร้อมกันในสารละลาย นอกจากในสารละลายจะประกอบไปด้วยไอออนของโลหะ และตัวรีดิวซ์แล้ว อาจมีการเติมสารยับยั้งการตกตะกอน (Complexing agent) สารควบคุมค่าพีเอช (Buffer) และสารเพิ่มความเสถียร (Stabilizer) เพื่อควบคุมคุณภาพของสารละลายด้วย สำหรับโลหะที่นิยมทำการชุบแบบไม่อาศัยไฟฟ้า ได้แก่ นิกเกิล ทองแดง โดยในสารละลายที่ใช้ชุบของทั้ง 2 ระบบจะประกอบไปด้วยไอออนของโลหะ ตัวรีดิวซ์และสารตัวเติมต่าง ๆ แม้ว่าจะมีความคล้ายคลึงกันในแง่ของสารเคมีและการเกิดปฏิกิริยา แต่ก็มี ความแตกต่างกันในแง่ของอุณหภูมิที่ใช้ในการชุบ โดยการชุบโลหะแบบไม่อาศัยไฟฟ้าของระบบ นิกเกิลจะต้องทำการชุบในช่วงอุณหภูมิประมาณ 70 – 95 องศาเซลเซียส แต่สำหรับการชุบโลหะแบบไม่อาศัยไฟฟ้าของระบบทองแดงจะสามารถทำการชุบได้ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 20 – 40 องศาเซลเซียส ดังนั้นหากต้องการทำการชุบโลหะโดยไม่อาศัยไฟฟ้าลงบนชิ้นงานพอลิเมอร์จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสของพอลิเมอร์ชนิดนั้น ๆ ด้วยเพื่อไม่ให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายจากความร้อน โดยได้แสดงการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวพอลิเมอร์ระหว่างกระบวนการเตรียมผิวดังรูปที่ 2.2

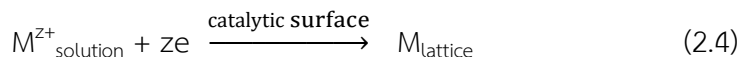
ปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นในการชุบโลหะโดยไม่อาศัยไฟฟ้า



ปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวรีดิวซ์บนผิวหน้า



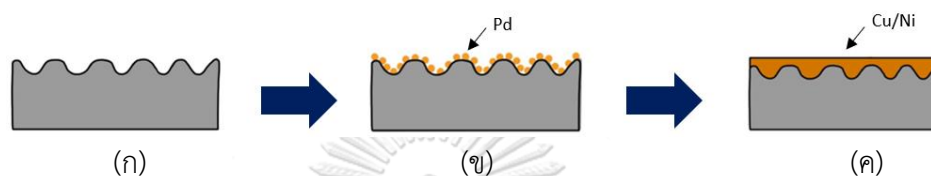
ปฏิกิริยารีดักชันของอออนโลหะ



โดย Ox คือ ตัวรับอิเล็กตรอนหรือตัวออกซิไดซ์

Red คือ ตัวให้อิเล็กตรอนหรือตัวรีดิวซ์

z, m คือ จำนวนอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวพอลิเมอร์ระหว่างกระบวนการเตรียมผิวโดย (ก) การกัดผิว (ข) การกระตุ้นผิว และ (ค) การชุบโลหะโดยไม่อาศัยไฟฟ้า

2.2.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

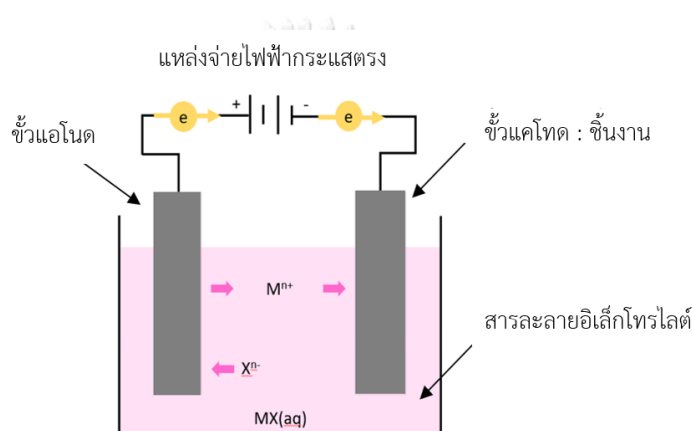
การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นการชุบเคลือบผิววัสดุด้วยโลหะต่าง ๆ เช่น ทองแดง โครเมียม โรเดียม สังกะสี นิกเกิล ทอง เป็นต้น เพื่อเพิ่มความหนา และความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบ หรือเพื่อเคลือบชั้นโลหะหลากหลายชนิดลงบนชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ต้องการนำมาเคลือบผิวจะต้องมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) โดยมีองค์ประกอบที่ใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ได้แก่

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ต่อขั้วบวกเข้ากับขั้วแอโนด (Anode) และต่อขั้วลบเข้ากับขั้วแคโทด (Cathode)
2. ขั้วแอโนด ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าเฉื่อย หรือขั้วโลหะของสารละลาย คือ โลหะชนิดที่ต้องการชุบลงบนชิ้นงานซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการที่ (2.5)
3. ขั้วแคโทด ได้แก่ ชิ้นงานที่ต้องการชุบผิว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ดังสมการที่ (2.6)



4. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution) ที่ประกอบด้วยอออนของโลหะที่ต้องการชุบลงบนชิ้นงาน

เมื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ อีออนลบ (Anion) จะวิ่งไปให้อิเล็กตรอนที่ขั้วบวก และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สำหรับอีออนบวก (Cation) ในสารละลายที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าน้ำจะรับอิเล็กตรอนจากขั้วงานที่ต่ออยู่กับขั้วแคโทด และเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้เกิดเป็นอะตอมของโลหะเคลือบติดอยู่ที่ผิวของขั้วงานที่นำมาชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ขณะเดียวกันโลหะที่ขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้เป็นอีออนของโลหะที่ละลายอยู่ในสารละลาย เพื่อชดเชยอีออนของโลหะที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นอะตอมของโลหะขณะเกิดปฏิกิริยา ดังนั้น ขั้วแอโนดจะสึกกร่อนไป (ในกรณีที่เป็นขั้วโลหะของสารละลาย) ส่วนที่ขั้วแคโทดจะมีโลหะมาเคลือบเพิ่มขึ้น ทำให้ได้เป็นชั้นเคลือบโลหะบนผิวขั้วงาน



รูปที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ได้กล่าวไว้ว่า “ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนที่มีการถ่ายเทในปฏิกิริยาเคมีของสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์นั้น” ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ ดังนี้

$$N = \frac{Q}{F} \quad (2.7)$$

โดย Q คือ ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ถูกพาเข้าสู่เซลล์ มีหน่วยเป็นคูลอมบ์

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ มีค่าเท่ากับ 96,485 คูลอมบ์ต่อโมล (C/mol)

n คือ จำนวนโมลของอิเล็กตรอนที่เข้าทำปฏิกิริยา

ดังนั้น สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลของอิเล็กตรอนที่เข้าทำปฏิกิริยากับประจุไฟฟ้าที่เกิดการแลกเปลี่ยนต่ออีออนได้ ดังนี้

$$N = \frac{mz}{A_w} \quad (2.8)$$

โดย m คือ มวลของโลหะที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็นกรัม (g)

A_w คือ มวลอะตอมของโลหะที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็นกรัมต่อโมล (g/mol)

z คือ ประจุไฟฟ้าที่แลกเปลี่ยนต่ออไอออน

จากความสัมพันธ์จากสมการที่ (2.7) และ (2.8) ทำให้ได้กฎของฟาราเดย์ ดังสมการที่ (2.9) ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหากระแสไฟฟ้า และระยะเวลาที่จะใช้ในการชุบชิ้นงานเพื่อให้ได้ความหนาตามของชั้นเคลือบตามที่ต้องการได้

$$m = \frac{QA_w}{zF} = \frac{I \cdot t \cdot A_w}{zF} \quad (2.9)$$

โดย I คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

t คือ เวลา มีหน่วยเป็นวินาที (s)

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการเตรียมผิว

เนื่องจากความเป็นพิษและความรุนแรงของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเตรียมผิว ABS และราคาของแพลเลเดียมที่ค่อนข้างสูงในปัจจุบัน อีกทั้งยังมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นไปอีกในอนาคต [37] ประกอบกับเป็นกระบวนการเตรียมผิวที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์ชนิด ABS เท่านั้น ทำให้พอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีโครงสร้างแตกต่างไปจาก ABS ไม่สามารถเตรียมผิวได้ด้วยวิธีการดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น และแม้ว่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับการชุบเคลือบโลหะลงบนพอลิเมอร์ชนิดอื่นบ้าง แต่ก็พบว่ายังมีข้อมูลค่อนข้างน้อย และมีข้อจำกัดสำหรับพอลิเมอร์แต่ละชนิดค่อนข้างมาก ทำให้มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงกระบวนการเตรียมผิวในแต่ละขั้นตอนให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น รวมถึงการลดต้นทุนของสารเคมี และมีความพยายามในการขยายงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ดังนี้

2.3.1 การปรับปรุงกระบวนการกัดผิว

ปัจจุบันในงานวิจัยต่าง ๆ มีความพยายามในการหลีกเลี่ยงขั้นตอนการกัดผิวในกระบวนการเตรียมผิวด้วยการเปลี่ยนไปใช้วิธีการเตรียมผิวแบบอื่นแทน แต่พบว่าในบางงานวิจัยได้มีการปรับเปลี่ยนสารเคมีที่ใช้ในการกัดผิวพอลิเมอร์ให้มีความรุนแรงน้อยลง เพื่อให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ดังนี้

Luiz Alberto Cesar Teixeira และ Marcela Costa Santini [1] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสารเคมีที่ใช้ในการกัดผิว ABS โดยทำการศึกษาสารเคมี 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายกรดซัลฟูริกผสม

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารละลายกรดไนตริกผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าสารเคมีทั้ง 2 ชนิด สามารถใช้ในการกัดผิว ABS ทดแทนการใช้สารละลายกรดโครมิกซึ่งมีความเป็นพิษสูงได้

Zengnian Shu และ Xu Wang [38] ได้เสนอการใช้สารคอลลอยด์ของกรดซัลฟูริก-แมงกานีสออกไซด์ ($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-MnO}_2$ colloid) ในการกัดผิว ABS ซึ่งพบว่าสามารถทำให้ความหยาบผิวของ ABS เพิ่มขึ้น และทำให้หมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิก ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิล (COOH), หมู่ไฮดรอกซิล (OH) เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน โดยออกซิเจนจากหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ จะสามารถจับกับอะตอมของโลหะที่ชั้นเคลือบและทำให้แรงยึดเกาะของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น 0.12 กิโลนิวตัน/เมตร

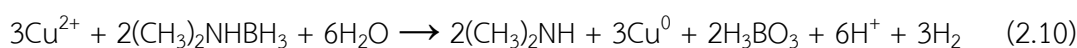
2.3.2 การปรับปรุงกระบวนการกระตุ้นพื้นผิว (การเซ็นซิไทซิ่งและแอคติเวท)

ในขั้นตอนการเซ็นซิไทซิ่งมีการใช้ Sn ซึ่งเป็นโลหะหนัก โดยไอออนของ Sn^{2+} ที่ตกค้างบนผิวชิ้นงานจะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาเคมีในขั้นตอนการชุบ ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบโลหะ ความสม่ำเสมอและคุณภาพของการเคลือบผิวได้

Yong Wang และคณะ [39] ได้เสนอการใช้สารเคมีชีวภาพ เช่น กลูโคส ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) ทดแทนการใช้ SnCl_2 จากงานวิจัยพบว่า สามารถช่วยให้การยึดติดของชั้นเคลือบดีขึ้น และทำให้สมบัติของชิ้นงานที่ได้หลังจากการชุบโลหะ เช่น ความสามารถในการนำไฟฟ้า มีความใกล้เคียงกับกระบวนการที่ใช้ทั่วไป แต่เป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นและใช้สารเคมีที่มีราคาต่ำลง

Xuejiao Tang และคณะ [6, 8] ได้หลีกเลี่ยงการใช้สารละลาย SnCl_2 โดยเปลี่ยนมาใช้เป็นการสร้างชั้นฟิล์มไคโตซาน (Chitosan, CTS) บนผิว ABS ร่วมกับการใช้ตัวรีดิวซ์ที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยอะตอมของไนโตรเจนในไคโตซานจะสามารถจับกับแพลเลเดียม (Pd) หรือนิกเกิล (Ni) ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) เกิดเป็น ABS-CTS-Pd หรือ ABS-CTS-Ni ซึ่ง Pd และ Ni สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการชุบโลหะโดยไม่อาศัยไฟฟ้าได้ และทำให้ชั้นเคลือบกับชิ้นงานยึดเกาะกันได้อย่างแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนไปใช้ Ni เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ต้นทุนของสารเคมีลดลงอย่างมาก

Zengnian Shu และ Xu Wang [38] ได้ใช้ทองแดง (Cu) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ร่วมกับการใช้ DMAB (CH_3)₂NHBH₃ เป็นตัวรีดิวซ์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ (2.10) ทำให้ได้นิวเคลียสของ Cu^0 บนผิวชิ้นงาน โดยปราศจากการใช้ Sn และ Pd จากผลการทดลองพบว่า Cu สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีเช่นเดียวกับ Pd แต่มีราคาที่ถูกลงกว่า



Dapeng Li และ Chen-Lu Yang [2] ได้เสนอวิธีการสร้างตัวเร่งปฏิกิริยาบนพื้นผิว ABS โดยใช้การทาของเหลวที่ประกอบด้วยโลหะ catalyst โดยของเหลวนี้ประกอบด้วยผงอะลูมิเนียม ผงคาร์บอน อีนาเมล และน้ำปอดประจุ ผสมกันในอัตราส่วน 40:3:36:21 ทาลงบนผิวของ ABS และนำไปอบให้แห้งสนิท จากผลการทดลองพบว่า สามารถทำการชุบโลหะโดยไม่อาศัยไฟฟ้าลงบน ABS ได้

Dexin Chen และ Zhixin Kang [40] ได้ทำการเคลือบผิว ABS ด้วย 6-(3-triethoxysilylpropylamino)-1,3,5-triazine-2,4-azide (P-TES) และนำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV grafting) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร จากนั้นทำการเคลือบผิวด้วย 6-(3-triethoxysilylpropylamino)-1,3,5-triazine-2,4-dithiol monosodium (N-TES) และทำการพ่นสเปรย์ 2 ชนิด ที่มีส่วนผสมของซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ผสมกับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และฟอร์มัลดีไฮด์ผสมกับไตรเอทานอลามีน เมื่อทำการพ่นสเปรย์ลงไปบนผิวชิ้นงานจะทำให้ Ag^+ อนุภาคนิวเคลียสเป็น Ag^0 ซึ่งจะทำการเปลี่ยนแปลงเป็นสีเงินคล้ายกระจกเงา โดยนิวเคลียสของ Ag^0 ที่ผิวสามารถใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาการชุบโลหะโดยไม่อาศัยไฟฟ้าได้

2.3.3 การดัดแปลงกระบวนการเตรียมผิว

กระบวนการเตรียมผิวสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าได้มีการศึกษา และพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีการเสนอแนวทางการเตรียมผิวด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

T. Tamai และคณะ [41, 42] ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิเอทิลีนโกลีโกล์ลงบนผิวพอลิเมอร์ด้วยวิธี layer-by-layer เพื่อให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวชิ้นงานโดยใช้สารละลายพอลิเมอร์ PDPA และ PSS เคลือบสลับกันบนผิวชิ้นงาน จากนั้นทำการแช่ชิ้นงานในสารละลายที่ประกอบไปด้วยอนุภาคนาโน Pd ที่ถูกห่อหุ้มด้วยประจุไฟฟ้าชนิดตรงข้ามกับชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้อนุภาคนาโน Pd เกิดการยึดเกาะบนผิวชิ้นงานด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) Pd จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนการชุบโลหะโดยไม่อาศัยไฟฟ้าต่อไป โดยทุกขั้นตอนของการเตรียมผิวด้วยวิธีการนี้สามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้อง

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ทำการชุบโลหะลงบนพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการเตรียมผิวที่ไม่จำเป็นต้องทำการชุบโลหะโดยไม่อาศัยไฟฟ้า ทำให้กระบวนการเตรียมผิวมีความง่ายขึ้น เช่น Joon-Suk Oh และ Taeseon Hwang [43, 44] ได้ทำการเตรียมผิวด้วยการปรับปรุงพื้นผิวพอลิเมอร์ด้วยพลาสมา ตามด้วยเคลือบแกรฟีนออกไซด์เพื่อให้ผิวชิ้นงานสามารถนำไฟฟ้าได้ จึงทำให้สามารถทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าได้โดยตรง แต่พบว่าในขั้นตอนการเคลือบแกรฟีนออกไซด์ต้องนำไปอบที่อุณหภูมิสูง จึงไม่เหมาะกับพอลิเมอร์ชนิดที่มีอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสต่ำ อย่างไรก็ตามการเตรียมผิวด้วยวิธีนี้ทำให้สะดวก รวดเร็ว และลดความรุนแรงของสารเคมีลงได้อย่างมาก

M.Bazzaoui และคณะ [45] ได้เสนอกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมบนพอลิเมอร์ชนิด ABS โดยใช้พอลิไพโรล (Polypyrrole) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในการเคลือบผิว ทำให้ผิวของชิ้นงานมีความสามารถในการนำไฟฟ้า จึงสามารถนำไปทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าได้โดยตรง จากผลการทดลองพบว่า ความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบและความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบค่อนข้างดี

ประการสำคัญที่จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนพอลิเมอร์จะประสบความสำเร็จหรือไม่ คือ สามารถทำการเปลี่ยนพื้นผิวของพอลิเมอร์ชนิดนั้น ๆ ให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีเพียงไร โดยมีวิธีการเปลี่ยนพื้นผิวพอลิเมอร์ให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้หลากหลายวิธี แต่เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนใหญ่สามารถทนอุณหภูมิได้ค่อนข้างต่ำ ทำให้ในการเลือกใช้กระบวนการเตรียมผิวต้องพิจารณาถึงอุณหภูมิในการเตรียมผิวเป็นสำคัญ ซึ่งจากการศึกษาวิธีการเตรียมผิวแบบต่าง ๆ พบว่ามีกระบวนการเตรียมผิวที่สามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้องและมีความเหมาะสมในด้านความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนี้

2.3.3.1 การเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์และแอคทีเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน

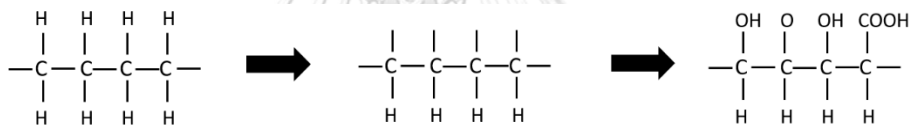
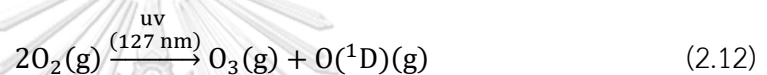
การทำให้พื้นผิวพอลิเมอร์ให้ไวต่อปฏิกิริยาในการชุบโลหะแบบไม่อาศัยไฟฟ้าอีกวิธีหนึ่งสามารถทำได้โดยการเคลือบอนุภาคนาโนของเงินทดแทนการใช้แพลเลเดียม โดยอาศัยกระบวนการเตรียมผิว 3 ขั้นตอน คือ การปรับปรุงพื้นผิวพอลิเมอร์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตเพื่อเพิ่มสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิก, การเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์ (PEMs) ด้วยวิธี layer-by-layer (LBL) เพื่อสร้างประจุไฟฟ้าที่ผิว และการเคลือบผิวด้วยอนุภาคนาโนของเงินโดยอาศัยแรงไฟฟ้าสถิตย์

1. การปรับปรุงพื้นผิวพอลิเมอร์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (UV treatment)

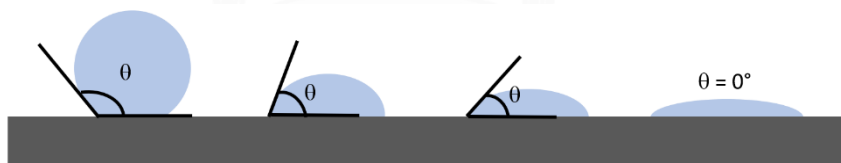
พอลิเมอร์ส่วนใหญ่มักมีพื้นผิวที่เป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) หรือพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ แต่ในด้านงานชุบเคลือบผิวมักต้องการผิวที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) หรือพื้นผิวที่ชอบน้ำ [7, 42, 46, 47] เพื่อให้สารละลายทำปฏิกิริยาที่พื้นผิวพอลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบได้ โดยสมบัตินี้สามารถปรับปรุงได้ด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตลงบนผิวพอลิเมอร์ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันบนผิว โดยความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเลตที่แตกต่างกันจะส่งผลให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่แตกต่างกัน

สำหรับการปรับปรุงผิวเพื่อเพิ่มสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิกด้วยวิธีนี้เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยม เนื่องจากจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะที่ผิวของชิ้นงาน โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติภายในเนื้อ

ของวัสดุ [42] โดย Claire O'Connell และคณะ [46] พบว่าแก๊สโมเลกุลคู่ของซีนอนในสถานะกระตุ้น (Xe_2^* excited dimer) ให้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ความยาวคลื่น 172 นาโนเมตร ดังสมการที่ (2.11) ซึ่งเป็นช่วงความคลื่นที่ทำให้แก๊สออกซิเจน (O_2) เกิดปฏิกิริยาแตกตัวเป็นแก๊สโอโซน (O_3) และออกซิเจนที่พร้อมจะเกิดปฏิกิริยา ($O(^1D)$) ดังสมการที่ (2.12) โดยรังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถทำลายพันธะโคเวเลนต์ระหว่างคาร์บอน (C) กับไฮโดรเจน (H) ในสายโซ่พอลิเมอร์ได้ จากนั้นจะเกิดการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจน แก๊สโอโซน และออกซิเจนที่พร้อมจะเกิดปฏิกิริยา เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (COOH) และหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (OH) ที่ผิวซึ่งจะทำให้ผิวของพอลิเมอร์มีความเป็นไฮโดรฟิลิกมากขึ้น ดังรูปที่ 2.4 และในการที่ผิวมีความเป็นไฮโดรฟิลิกมากขึ้นจะทำให้มุมสัมผัส (Contact angle) ลดลง ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาบนผิวหน้าของชิ้นงานในสารละลายมีประสิทธิภาพดีขึ้น เนื่องจากจะเกิดการดูดซับสารเคมีได้มากขึ้น



รูปที่ 2.4 แสดงกลไกการเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิกบนผิวพอลิเมอร์

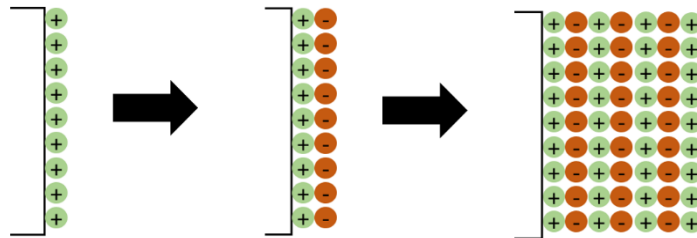


รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของภาวะการเปียกบนผิวพอลิเมอร์

2. การเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์ (PEMs) ด้วยวิธี layer-by-layer (LBL)

การเคลือบผิว PEMs ด้วยวิธี LBL [48-54] เป็นวิธีเคลือบผิวเพื่อสร้างประจุไฟฟ้าชนิดบวก สลับกับลบลงบนผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่เป็นประจุบวก (Polycation) เช่น Poly(allylamine hydrochloride), Poly(diallyldimethylammonium) และสารละลายพอลิเมอร์ที่เป็นประจุลบ (Polyanion) เช่น Polystyrene sulfonate (PSS) เคลือบลงบนผิวสลับกันเป็นชั้น ๆ ซึ่งชิ้นงานกับชั้นเคลือบในแต่ละชั้นจะยึดติดกันด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์ โดยทั่วไปมัก

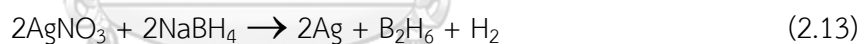
ทำการเคลือบผิว PEMs เป็นจำนวน 5-7 ชั้น ชั้นเคลือบที่ได้จะมีลักษณะโปร่งใสและมีความหนาในระดับนาโนเมตร ทำให้ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า



รูปที่ 2.6 แสดงการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์ ด้วยวิธี layer-by-layer

3. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของเงินด้วยวิธีการทางเคมีเพื่อเคลือบลงบนผิว PEMs

อนุภาคนาโน (Nanoparticle) คือ อนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 100 นาโนเมตร สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เงิน ที่เป็นอนุภาคนาโนจะมีสมบัติแตกต่างไปจากเดิม โดยพบว่าสมบัติของโลหะจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาด และรูปร่างของอนุภาค เช่น สมบัติทางแสง สมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น การสังเคราะห์ Ag NPs สามารถทำได้หลายวิธี [49, 52, 55-59] แต่สำหรับวิธีที่ง่ายและได้รับความนิยม คือ การสังเคราะห์ Ag NPs จากปฏิกิริยารีดักชัน ดังสมการ (2.13) โดยสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบ In-Situ และแบบ Ex-Situ



ในการสังเคราะห์ Ag NPs แบบ In-situ เป็นการทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันบนผิวของชิ้นงานโดยตรง ซึ่งสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต และสารละลายของตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) เช่น โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) จะถูกแยกออกจากกัน โดยจะทำการแช่ชิ้นงานในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตก่อนและตามด้วยแช่ในสารละลายที่ประกอบด้วยตัวรีดิวซ์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน

สำหรับการสังเคราะห์ Ag NPs แบบ Ex-situ จะนำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต สารละลายที่ประกอบด้วยตัวรีดิวซ์และสาร Capping agent ซึ่งมักเป็นสารจำพวกพอลิเมอร์ที่มีประจุลบ [52, 60, 61] เช่น อัลจินต, PVP, PSS-co maleic เป็นต้น ผสมกันเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันอย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะนำมาใช้งาน โดย Capping agent จะทำหน้าที่ป้องกันการรวมตัวกันของ Ag NPs ด้วยการไปล้อมรอบอนุภาค Ag^+ ไว้ และเนื่องจากไม่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคโลหะด้วยเหตุที่พอลิเมอร์ไปแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคของโลหะ ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ซึ่งเป็นสาเหตุให้ชั้นเคลือบไม่สามารถนำไฟฟ้าได้

จากการสังเคราะห์ Ag NPs เพื่อเคลือบลงบนผิวชิ้นงานพอลิเมอร์ทั้งสองแบบที่กล่าวมาจะทำให้สีที่ปรากฏบนผิวชิ้นงานมีความแตกต่างกันเนื่องจากมีสมบัติทางแสงที่ต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Ag NPs ที่สังเคราะห์ขึ้นได้ โดยการสังเคราะห์แบบ In-Situ จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Ag NPs ประมาณ 15 ถึง 36 นาโนเมตร [57] ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีผิวเป็นสีเหลือง [58] และสำหรับการสังเคราะห์ Ag NPs แบบ Ex-Situ จะได้ผิวชิ้นงานเป็นสีเงิน

2.3.3.2 การเคลือบผิวด้วยสีนำไฟฟ้า

สีนำไฟฟ้า คือ สีที่มีส่วนประกอบของอนุภาคที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ เช่น ผงโลหะ หรือผงแกรไฟต์ ที่ผสมกับสารยึดเกาะ (Binder) และอาจมีตัวทำละลาย (Solvent) ร่วมด้วย ซึ่งมักเป็นสารจำพวกพอลิเมอร์ ทำให้ได้เป็นของเหลวที่สามารถนำไฟฟ้าได้โดยสามารถเคลือบลงบนผิวได้ด้วยวิธีการที่หลากหลาย เช่น การทา การจุ่ม การพ่น ซึ่งความเหมาะสมของวิธีการเคลือบจะขึ้นอยู่กับความหนืดของสีนำไฟฟ้าชนิดนั้น ๆ ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนพื้นผิวพอลิเมอร์ให้กลายเป็นพื้นผิวที่สามารถนำไฟฟ้าได้ โดยค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าและความหนืดของสีจะแตกต่างกันตามสัดส่วนของส่วนผสมระหว่างอนุภาคของแข็งและของเหลว รวมไปถึงชนิดของอนุภาคของแข็งและของเหลวด้วย [62-67]

อนุภาคของแข็งที่นิยมนำมาใช้ผสมเป็นสีนำไฟฟ้า ได้แก่ เงิน แกรไฟต์ เนื่องจากความสามารถในการนำไฟฟ้าและความคุ้มค่า โดยจากตารางที่ 2.1 [68] จะเห็นว่าโลหะเงินมีค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงสุด คือ 66.7×10^6 ซีเมนส์/เมตร (S/m) และคาร์บอน - แกรไฟต์เป็นวัสดุที่มีค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำสุด คือ $(1.5 - 20) \times 10^4$ S/m แต่เป็นวัสดุนำไฟฟ้าที่มีราคาต่ำที่สุด

ตารางที่ 2.1 ค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าของวัสดุ

วัสดุ	ค่าความสามารถในการนำไฟฟ้า (S/m)
เงิน	66.7×10^6
ทองแดง	64.1×10^6
ทอง	49.0×10^6
อะลูมิเนียม	40.8×10^6
โรเดียม	23.3×10^6

วัสดุ	ค่าความสามารถในการนำไฟฟ้า (S/m)
สังกะสี	18.2×10^6
นิกเกิล	16.4×10^6
แคดเมียม	14.7×10^6
เหล็ก	11.2×10^6
แพลทินัม	10.2×10^6
แพลเลเดียม	9.3×10^6
ดีบุก	8.7×10^6
โครเมียม	7.9×10^6
ตะกั่ว	5.3×10^6
ไทเทเนียม	2.3×10^6
ปรอท	1.0×10^6
คาร์บอน-แกรไฟต์	$(1.5 - 20) \times 10^4$

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการทดลอง

3.1 การสืบค้นและรวบรวมข้อมูล

จากการศึกษา รวบรวม และวิเคราะห์ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนวัสดุพอลิเมอร์ พบว่าปัจจุบันอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนพลาสติก (POP) ให้ความสนใจในการปรับปรุงกระบวนการเตรียมผิวให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และลดต้นทุนค่าใช้จ่ายของสารเคมีลง

จากการเปรียบเทียบข้อได้เปรียบ/เสียเปรียบของกระบวนการเตรียมผิวพอลิเมอร์แต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3.1 พบว่ามีกระบวนการเตรียมผิวที่มีความได้เปรียบในเชิงความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุน คือ การเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิเอทิลีนโพรพิลีนและแอคติเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน และการเตรียมผิวโดยการทา/พ่น สีที่มีส่วนผสมของผงโลหะ หรือผงแกรไฟต์ เนื่องจากทั้ง 2 กระบวนการนี้ สามารถกระทำได้ที่อุณหภูมิห้องในทุกขั้นตอน จึงมีความเหมาะสมในการนำมาปรับใช้สำหรับการเตรียมผิวพอลิเมอร์ชนิดพอลิแลคติกแอซิด (PLA) อีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการได้อีกด้วย แต่พบว่าจากงานวิจัยในปัจจุบันมีข้อมูลบางประการที่ยังไม่สามารถหาข้อสรุปได้ เช่น ข้อมูลเกี่ยวกับการเตรียมผิวลงบน PLA, การเปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงาน POP หลังผ่านกระบวนการ Metallizing ที่แตกต่างกัน, ความเหมาะสมในการปรับใช้กับอุตสาหกรรม POP เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการทดลองเพื่อนำไปสู่การเปรียบเทียบและหาข้อสรุปดังกล่าว

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบของกระบวนการเตรียมผิวเพื่อชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนพลาสติก

กระบวนการ Metallizing สำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	1	2	3	4	5
ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการ	●	-	-	-	-
ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการเตรียมผิว	-	●	-	-	-
ความซับซ้อนของกระบวนการเตรียมผิว	-	-	-	●	●

กระบวนการ Metallizing สำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	1	2	3	4	5
อุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมผิว	●●	●	●	●	●●●
ต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการเตรียมผิว	●●●	-	-	●●●	-
ความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม	●●●	-	-	●	●
ความสวยงามและความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบ	●●●	-	-	-	-
อ้างอิง	[34]	[2]	[32, 41]	[45]	[43, 44]

●●● สูง ●● ปานกลาง ● ต่ำ - ยังไม่สามารถสรุปได้

กระบวนการเตรียมผิวเพื่อชุบโลหะด้วยไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

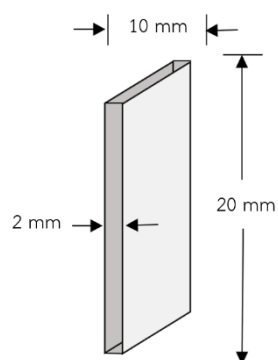
- 1 : การเตรียมผิวโดยใช้การกัดกรดและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม
- 2 : การเตรียมผิวโดยการทา/พ่น สีที่มีส่วนผสมของผงโลหะ หรือผงแกรไฟต์
- 3 : การเตรียมผิวโดยการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิเอทิลีนโพรพิลีนและแอคติเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน
- 4 : การเตรียมผิวโดยใช้การเคลือบพอลิเมอร์นำไฟฟ้า
- 5 : การเตรียมผิวโดยใช้การเคลือบแกรฟีนออกไซด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 การเตรียมชิ้นงาน

3.2.1 การขึ้นรูปชิ้นงาน

ขึ้นรูปชิ้นงานอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) และ PLA ขนาด 10×20×2 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM รุ่น Cubicon 3DP-210F โดยชิ้นงานมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 และใช้ตัวแปรในการขึ้นรูปดังแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.1 รูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM

วัสดุ	อุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิที่ฐานรองชิ้นงาน (องศาเซลเซียส)	ความเร็วในการพิมพ์ (มิลลิเมตร/วินาที)	ความหนาแน่น ของเนื้อวัสดุ (%)
ABS	240	115	50	100
PLA	210	65	50	100

3.2.2 การเตรียมผิวเพื่อชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

3.2.2.1 วิธีการเตรียมผิวโดยใช้กระบวนการกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม

สารเคมีที่ใช้ในการกัดผิว (Etching) ชิ้นงาน ABS [69]

1. กรดโครมิก (H_2CrO_4) 400 กรัม/ลิตร
2. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 400 มิลลิลิตร/ลิตร

สารเคมีที่ใช้ในการกัดผิว (etching) ชิ้นงาน PLA

1. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 200 กรัม/ลิตร

สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นผิวชิ้นงาน (Sensitizing)

1. สแตนนัสคลอไรด์ ($SnCl_2$) 15 กรัม/ลิตร
2. ปรับ pH ของสารละลายให้เท่ากับ 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl)

สารเคมีที่ใช้ในการเร่งผิวชิ้นงาน (Activating)

1. แพลเลเดียมคลอไรด์ (PdCl_2) 0.1 กรัม/ลิตร

2. ปรับ pH ของสารละลายให้เท่ากับ 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl)

วิธีการเตรียมผิวชิ้นงาน

1. การกัดผิว (Etching)

- แช่ชิ้นงาน ABS ในสารละลายกรดโครมิกที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

- แช่ชิ้นงาน PLA ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที

2. ล้างชิ้นงานในน้ำปลอดประจุ (DI water)

3. แช่ชิ้นงานลงในสารละลาย SnCl_2 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 นาที

4. ล้างชิ้นงานในน้ำปลอดประจุ

5. แช่ชิ้นงานลงในสารละลาย PdCl_2 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 นาที

6. ล้างชิ้นงานในน้ำปลอดประจุ

7. ทำการชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2.3

3.2.2.2 วิธีการเตรียมผิวโดยใช้การเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์ และแอคติเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน

3.2.2.2.1 การปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV treatment)

ควบคุมบรรยากาศด้วยแก๊สไนโตรเจนและทำการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่น 172 นาโนเมตร ลงบนผิวชิ้นงานทั้ง 2 ด้าน เป็นเวลาด้านละ 30 นาที เพื่อเพิ่มสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ที่ผิวชิ้นงาน

3.2.2.2.2 การสร้างชั้นพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte multilayers)

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลาย PDAD (Polycation) 10 มิลลิโมลาร์

2. สารละลาย PSS (Polyanion) 10 มิลลิโมลาร์

วิธีการเตรียมผิว

1. แช่ชิ้นงานลงในสารละลาย PDAD เป็นเวลา 1 นาที

2. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำปลอดประจุและเป่าให้แห้ง

3. แช่ชิ้นงานลงในสารละลาย PSS เป็นเวลา 1 นาที
4. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำปลอดประจุและเป่าให้แห้ง
5. ทำขั้นตอนที่ 1-4 ซ้ำ จนได้ชิ้นเคลือบทั้งหมดจำนวน 7 ชิ้น
6. ล้างชิ้นงานในน้ำปลอดประจุ เป็นเวลา 15 นาที และเป่าให้แห้ง จะได้ชิ้นงาน (PEMs⁺)ABS และ (PEMs⁺)PLA

3.2.2.2.3 วิธีการสังเคราะห์และการเคลือบอนุภาคนาโนของเงิน (Ag NPs)

ลงบนผิวชิ้นงาน

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO ₃)	1	มิลลิโมลาร์
2. โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH ₄)	5	มิลลิโมลาร์
3. อัลจิเนต (Alginate)	10	มิลลิโมลาร์

ทำการผสมอัลจิเนตลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตและตามด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ตามลำดับ จากนั้นพักสารละลายไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 7 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยาเคมีอย่างสมบูรณ์ก่อนใช้งาน

วิธีการเตรียมผิว

1. แช่ชิ้นงาน (PEMs⁺) ABS และ (PEMs⁺) PLA ลงในสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำปลอดประจุและเป่าให้แห้ง
3. ทำการชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2.3

3.2.2.3 วิธีการเตรียมผิวโดยการทาสีนำไฟฟ้า

ส่วนประกอบของสีนำไฟฟ้า

1. ผงโลหะเงิน
2. Ethyl-methacrylate copolymer
3. Acetone

วิธีการเตรียมผิว

ทำการทาสีนำไฟฟ้าที่มีส่วนผสมของผงโลหะเงินลงบนผิวชิ้นงานให้ทั่วทั้ง 2 ด้าน โดยทำการทาที่อุณหภูมิห้องและรอให้สีแห้งสนิท โดยการเตรียมผิวด้วยวิธีนี้จะทำให้ชิ้นงานสามารถในการนำ

ไฟฟ้าได้ทันที จึงสามารถนำไปทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าต่อได้โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการชุบโลหะแบบไม่อาศัยไฟฟ้า

3.2.3 การชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า

ทำการชุบโลหะแบบไม่อาศัยไฟฟ้าลงบนชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1 และ 2 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- | | | |
|--------------------|-----------|------------|
| 1. น้ำปลอตประจุ | ร้อยละ 84 | โดยปริมาตร |
| 2. THRU-CUP PSY-1A | ร้อยละ 10 | โดยปริมาตร |
| 3. THRU-CUP PSY-1B | ร้อยละ 4 | โดยปริมาตร |
| 4. ฟอ์มาลีน 18.5% | ร้อยละ 2 | โดยปริมาตร |

วิธีการชุบโลหะแบบไม่อาศัยไฟฟ้า

ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ในช่วง 30-40 องศาเซลเซียส และนำชิ้นงานแช่ลงในสารละลายเป็นเวลา 2-3 นาที จากนั้นล้างให้สะอาดด้วยน้ำปลอตประจุและเป่าให้แห้ง

3.2.4 การชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า

สารเคมีที่ใช้ในการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า

- | | | |
|--|-----|----------------|
| 1. คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) | 220 | กรัม/ลิตร |
| 2. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) | 40 | มิลลิลิตร/ลิตร |
| 3. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) | 60 | ppm |

วิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมป์/ตารางเดซิเมตร เข้าที่ขั้วแอโนดและแคโทด (ชิ้นงาน) เพื่อชุบไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 15-20 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นล้างให้สะอาดด้วยน้ำปลอตประจุและเป่าให้แห้ง

3.3 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

3.3.1 การทดสอบความสามารถในการเปียก

ทดสอบความสามารถในการเปียก (Wettability) โดยใช้เครื่องมือวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว (อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D7334-08) โดยกรณีที่มีมุมสัมผัสมีค่าน้อยกว่า 45 องศา จะแสดงถึงความเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) และกรณีที่มีมุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา จะแสดงถึงความเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic)

3.3.2 การทดสอบความต้านทานไฟฟ้า

วัดค่าความต้านทานของชิ้นงานก่อนและหลังการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า โดยใช้เครื่องมือวัดอิมพีแดนซ์ที่มีความสามารถในการวัดความต้านทานช่วง 0 โอห์ม-40 เมกะโอห์ม โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

3.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างบริเวณผิวชิ้นงาน


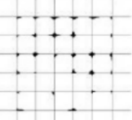
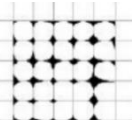
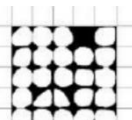
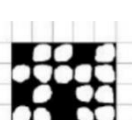
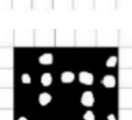
3.3.3.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบและวัดความหยาบผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบเลเซอร์คอนโฟคอล (Confocal laser microscope)

3.3.3.2 ตรวจสอบบริเวณภาคตัดขวาง เพื่อศึกษาบริเวณรอยต่อของชั้นเคลือบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) และวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของชั้นเคลือบโดยใช้สเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive Spectrometry, EDS)

3.3.4 การทดสอบความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบโดยใช้เทปกาว

ทำการทดสอบโดยใช้ใบมีดกรีดลงบนชั้นเคลือบ ให้มีลักษณะเป็นตารางจำนวน 10x10 ช่อง โดยแต่ละช่องมีพื้นที่ประมาณ 1 ตารางมิลลิเมตร จากนั้นทำการติดเทปกาวลงบนพื้นที่ทดสอบและดึงออกด้วยแรงคงที่ ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชั้นเคลือบจะถูกเปรียบเทียบกับตารางที่ 4 เพื่อประเมินระดับความเสียหายตามมาตรฐาน ASTM D 3359-02

ตารางที่ 3.3 แสดงระดับความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบโลหะ

ระดับ	ปริมาณการหลุดของชั้นเคลือบ	ASTM D 3359-02
5B	0 %	
4B	< 5 %	
3B	5 – 15 %	
2B	15 – 35 %	
1B	35 – 65 %	
0B	> 65 %	

3.3.5 การทดสอบความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบโดยใช้เครื่องทดสอบรอยขีดข่วน

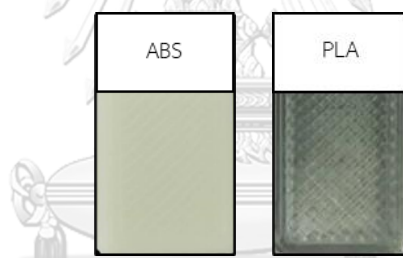
ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบรอยขีดข่วนรุ่น Fisherscope ST200 ตามมาตรฐาน ASTM C1624-05 ซึ่งทำทดสอบแบบเพิ่มแรงกดจาก 0.5-100 นิวตัน ด้วยอัตราเร็วคงที่ 2.8 มิลลิเมตร/นาที โดยกำหนดบริเวณทดสอบเป็นระยะทาง 7 มิลลิเมตร และใช้หัวกดเพชรแบบ Rockwell ที่มีรัศมี 200 ไมโครเมตร จากนั้นทำการตรวจสอบความเสียหายบริเวณพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 5 เท่า

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

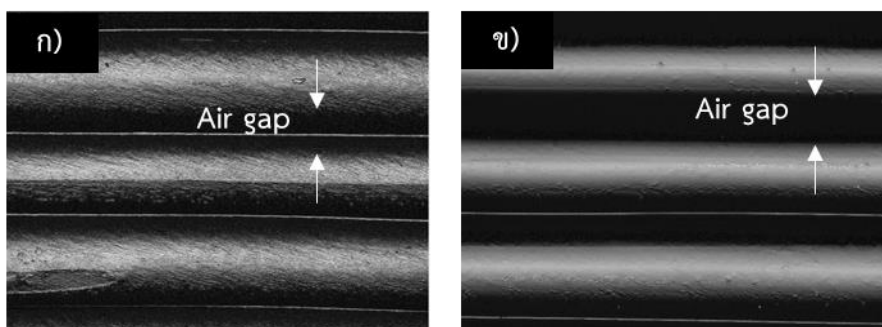
4.1 ผลการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบหัวฉีด

ในการทดลองได้ขึ้นรูปชิ้นงานอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS) และพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ขนาด 10×20×2 มิลลิเมตร จากเส้นพอลิเมอร์เกรดทางการค้าด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น Cubicon 3DP-210F และเนื่องจากชิ้นงานทั้งสองชนิดนี้มีสมบัติและพฤติกรรมทางความร้อนที่แตกต่างกัน ในกระบวนการขึ้นรูปจึงต้องกำหนดสภาวะการพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิให้เหมาะสมกับพอลิเมอร์แต่ละชนิด อย่างไรก็ตาม ในการทดลองนี้ได้ทำการควบคุมความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานอยู่ที่ 50 มิลลิเมตร/วินาที และควบคุมความหนาของการพิมพ์แต่ละชั้น (Layer height) อยู่ที่ 0.2 มิลลิเมตร โดยชิ้นงานที่ได้มีรูปทรงและขนาดที่ค่อนข้างแม่นยำตรงตามการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



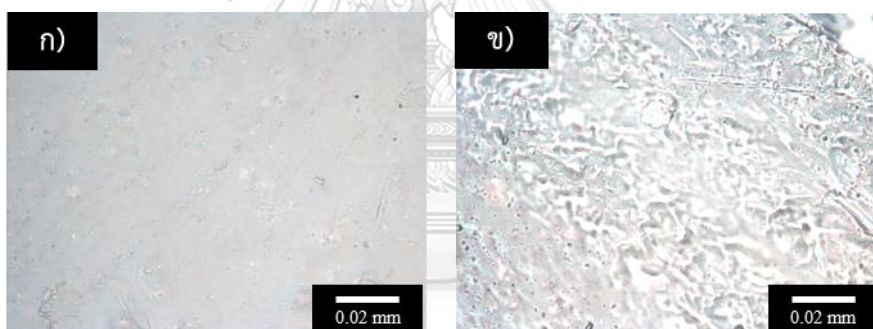
รูปที่ 4.1 ชิ้นงาน ABS และ PLA ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบหัวฉีด

ผลการตรวจสอบชิ้นงาน ABS และ PLA ด้วยตาเปล่า พบว่าพื้นผิวชิ้นงานมีเส้นพอลิเมอร์เรียงตัวสลับกันเป็นชั้น ๆ โดยมีลักษณะคล้ายขั้นบันได (Stair case effect) จากการศึกษาพบว่า การเกิด Stair case effect เป็นลักษณะเฉพาะของกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM [70] และเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบเลเซอร์คอนโฟคอลที่กำลังขยาย 20 เท่า ทำให้สามารถมองเห็นการเกิด Stair case effect ได้อย่างชัดเจนขึ้น นอกจากนี้ได้พบว่าบริเวณรอยต่อของเส้นพอลิเมอร์ที่เรียงตัวสลับกันมีช่องว่างอากาศ (Air gap) เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2 ส่งผลให้ได้ชิ้นงานที่มีพื้นผิวก่อนข้างหยาบ โดยเมื่อตรวจสอบความหยาบผิวได้พบว่าชิ้นงานทั้งสองชนิดมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square roughness, R_{rms}) แตกต่างกัน โดย ABS มีค่า R_{rms} ประมาณ 0.54 ไมโครเมตร และ PLA มีค่า R_{rms} ประมาณ 1.12 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.2 ลักษณะการเรียงตัวของเส้นพอลิเมอร์ ก) ABS และ ข) PLA และการเกิด Air gap

จากการตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน ABS และ PLA มีรอยตำหนิต่าง ๆ กระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งรอยตำหนิเหล่านี้ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยพบว่าชิ้นงาน PLA มีร่องรอยการเกิดตำหนิมากกว่า ABS ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากกระบวนการขึ้นรูปส่วนผสมและคุณภาพของเส้นพอลิเมอร์



รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวชิ้นงาน ก) ABS และ ข) PLA ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM

4.2 ผลการเตรียมผิวและชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน ABS และ PLA

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษากระบวนการเตรียมผิวเพื่อชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าทั้งหมด 3 วิธี ประกอบด้วย การเตรียมโดยใช้กระบวนการกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม (วิธีที่ 1), การเตรียมผิวโดยใช้การเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอีเล็กโทรไลต์และแอคติเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน (วิธีที่ 2) และการเตรียมผิวโดยการทาสีนำไฟฟ้า (วิธีที่ 3) ควบคู่ไปกับการศึกษาและเปรียบเทียบกับกระบวนการเตรียมผิวด้วยวิธีมาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง โดยชิ้นงานที่เตรียมผิว

ด้วยวิธีที่ 1 และ 2 จะถูกนำไปทำการชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า (electroless plating) เพิ่มเติม ในขณะที่ชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีที่ 3 สามารถทำการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า (electroplating) ได้โดยไม่จำเป็นต้องทำการชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า ซึ่งผลการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า

4.2.1.1 ความต้านทานของพอลิเมอร์หลังการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM ($R_{As-printed}$)

ความสามารถในการนำไฟฟ้าของชิ้นงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เนื่องจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจะสามารถกระทำได้กับชิ้นงานที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าเท่านั้น ในการทดลองได้ทำการทดสอบความสามารถในการนำไฟฟ้าของชิ้นงานโดยอาศัยการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าชิ้นงาน ABS และ PLA ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่า 40×10^6 โอห์ม ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการเป็นฉนวนไฟฟ้า

4.2.1.2 ความต้านทานก่อนการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า ($R_{Metalized}$)

ภายหลังจากเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1 และ 2 พบว่าชิ้นงานพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ยังคงมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงมาก เนื่องจากการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1 เป็นเพียงการทำให้เกิดอนุภาคโลหะแพลเลเดียมดูดซับอยู่บนผิวชิ้นงานที่มีรูพรุน ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการชุบโลหะทองแดงโดยไม่อาศัยไฟฟ้า และการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 2 เป็นการทำให้อนุภาคนาโนของเงินดูดซับอยู่บนผิวชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย PEMS⁺ แม้ว่าเงินจะเป็นโลหะที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง แต่เมื่อเงินอยู่ในรูปแบบของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี โดยอาศัยการใช้โมเลกุลของอัลจินเตมาล้อมรอบอนุภาค (Capping agent) เพื่อบังคับให้เงินอยู่ในรูปอนุภาคนาโนที่เสถียรจะทำให้เงินไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากบริเวณรอยต่อของเงินแต่ละอนุภาคมีพอลิเมอร์มาแทรกตัวอยู่จึงทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ แต่ชั้นเคลือบอนุภาคนาโนของเงินที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวนี้นี้ สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้าได้ดี โดยภายหลังจากชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้าลงบนชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1 และ 2 พบว่า

ชิ้นงานมีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงเหลือเพียง 0.5-3 และ 10-20 โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการนำไฟฟ้าที่ดี

ภายหลังจากเตรียมผิวด้วยวิธีการทาสีเงินนำไฟฟ้า (วิธีที่ 3) เป็นการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยของเหลวประเภทพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของโลหะเงินเป็นองค์ประกอบ (เมื่อผสมผงเงินเข้ากับพอลิเมอร์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้ได้เป็นสีนำไฟฟ้า) จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบด้วยสีนำไฟฟ้าจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10-30 โอห์ม ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี ดังนั้น การเตรียมผิวด้วยวิธีนี้จึงไม่จำเป็นต้องทำการชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า

จากผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าภายหลังจากกระบวนการเตรียมผิวทั้ง 3 วิธี ทำให้ทราบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ แต่ขึ้นอยู่กับกระบวนการเตรียมผิวและวัสดุที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงานให้เป็นโลหะ (Metallizing material) นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1 ทำให้ชิ้นงานมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับการเตรียมผิวด้วยวิธีมาตรฐาน ในขณะที่การเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 2 และ 3 ทำให้ชิ้นงานมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูงกว่าวิธีที่มาตรฐาน

4.2.1.3 ความต้านทานหลังการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า ($R_{\text{Electroplated}}$)

ผลการทดสอบภายหลังจากชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงานทุกกลุ่มมีค่าต่ำกว่า 0 โอห์ม ซึ่งไม่สามารถทำการวัดได้ด้วยเครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ แสดงถึงการมีพฤติกรรมการนำไฟฟ้าที่ดีมาก โดยได้แสดงผลการทดลองไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงาน ABS และ PLA

พอลิเมอร์	วิธีการเตรียมผิว	$R_{\text{As-printed}}$ (โอห์ม)	$R_{\text{Metallized}}$ (โอห์ม)	$R_{\text{Electroplated}}$ (โอห์ม)
ABS	มาตรฐาน	$> 40 \times 10^6$	0.5-3	< 0
PLA	1			
ABS	2	$> 40 \times 10^6$	10-20	< 0
PLA				









พอลิเมอร์	วิธีการเตรียมผิว	$R_{As-printed}$ (โอห์ม)	$R_{Metallized}$ (โอห์ม)	$R_{Electroplated}$ (โอห์ม)
ABS	3	$> 40 \times 10^6$	10-30	< 0
PLA				

4.2.2 ลักษณะของชิ้นงานขณะก่อน-หลังการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า และความหยาบผิว ภายหลังจากชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า


ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะของชิ้นงาน ABS และ PLA ภายหลังจากการเตรียมผิวให้มีความเป็นโลหะ (Metallized) ด้วยการชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า (วิธีที่ 1 และ 2) และการทาสีเงินนำไฟฟ้า (วิธีที่ 3) แม้ว่าการชุบโลหะแบบไม่อาศัยไฟฟ้าจะทำให้ได้ชั้นเคลือบโลหะทองแดงบนผิวชิ้นงาน ABS และ PLA แต่การชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้านั้นเป็นเพียงการชุบเคลือบแบบบาง ๆ (ความหนาประมาณ 1-5 ไมโครเมตร) เพื่อให้ชิ้นงานสามารถนำไฟฟ้าได้ จึงยังไม่เหมาะแก่การนำไปใช้งาน เนื่องจากชั้นเคลือบอาจเกิดการเสียหายหรือหลุดร่อนได้ จึงจำเป็นต้องทำการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าเพื่อเพิ่มความหนา, ความเงางามของชั้นเคลือบทองแดง และเพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ เช่น ความต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น โดยผลการทดลองภายหลังจากชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าลงบนชิ้นงานแต่ละกลุ่มได้แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานทุกกลุ่มมีผิวเคลือบทองแดงที่สม่ำเสมอดี และมีความเงา แต่การชุบเคลือบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าไม่สามารถปิดร่องรอยบนผิวชิ้นงานอันเป็นผลจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ได้ เนื่องจากชั้นเคลือบทองแดงมีความหนาอยู่ในช่วง 25-30 ไมโครเมตร ซึ่งไม่หนาพอที่จะปิดร่องรอยของการเกิด Stair case effect ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าส่งผลให้ชิ้นงานทุกกลุ่มมีค่า R_{rms} เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1-4 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานยังคงมีความหยาบผิวอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม กระบวนการเตรียมผิวเป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลต่อค่า R_{rms} โดยการเตรียมผิวชิ้นงานด้วยวิธีที่ 3 ทำให้ชิ้นงานมีค่า R_{rms} สูงสุด เนื่องจากผลของการทาสีนำไฟฟ้าด้วยแปรงที่ไม่สามารถควบคุมความเรียบ, ความสม่ำเสมอได้ และการเตรียมผิวชิ้นงานด้วยวิธีที่ 1 ทำให้ชิ้นงานมีค่า R_{rms} เพิ่มขึ้นจากกระบวนการกัดผิวด้วยสารเคมี ซึ่งส่งผลให้พื้นผิวมีรูพรุนและความขรุขระเพิ่มมากขึ้น แต่สำหรับการเตรียมผิวชิ้นงานด้วยวิธีที่ 2 จะทำให้ชิ้นงานมีค่า R_{rms} ต่ำสุด เนื่องจากเป็นการเตรียมผิวโดยอาศัยการ

เคลือบฟิล์มบางที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตรจึงไม่กระทบต่อความหยาบผิวของชิ้นงานมากนัก

ตารางที่ 4.2 การเตรียมผิวและการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน ABS และ PLA ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

การเตรียมผิวด้วยวิธีมาตรฐานและการชุบไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน		การเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1 และการชุบไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน	
ชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า	ชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า	ชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า	ชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า
 <p>ABS</p>	 <p>ABS</p> <p>$R_{rms} = 1.94$ ไมโครเมตร</p>	 <p>PLA</p>	 <p>PLA</p> <p>$R_{rms} = 1.68$ ไมโครเมตร</p>
การเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 2 และการชุบไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน			
ชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า	ชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า	ชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า	ชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า
 <p>ABS</p>	 <p>ABS</p> <p>$R_{rms} = 1.10$ ไมโครเมตร</p>	 <p>PLA</p>	 <p>PLA</p> <p>$R_{rms} = 1.38$ ไมโครเมตร</p>

การเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 3 และการชุบไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน

ทาสีเงินนำไฟฟ้า	ชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า	ทาสีเงินนำไฟฟ้า	ชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า
	 $R_{rms} = 3.60$ ไมโครเมตร		 $R_{rms} = 2.49$ ไมโครเมตร

4.3 ผลการเปรียบเทียบภาคตัดขวางของชั้นเคลือบทองแดงที่ได้จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

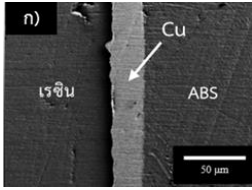
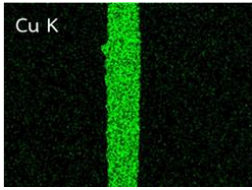
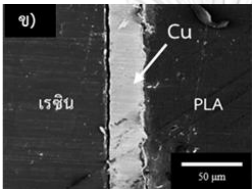
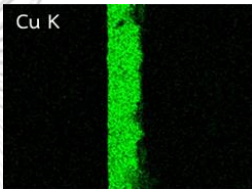
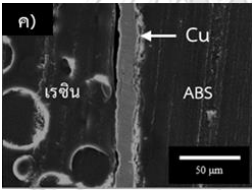
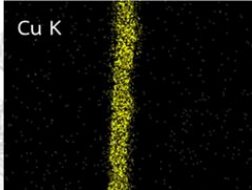
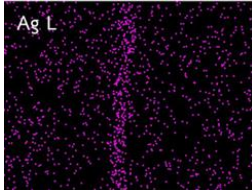
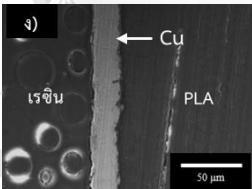
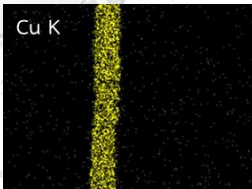
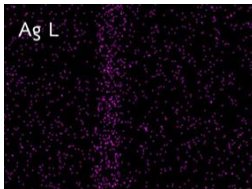
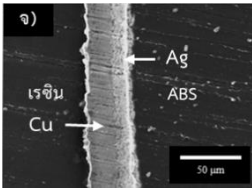
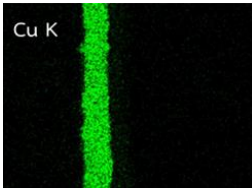
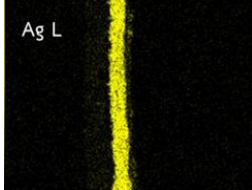
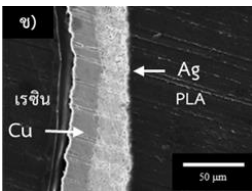
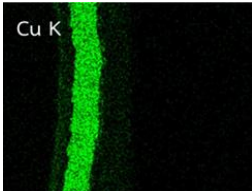
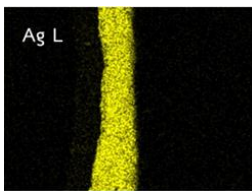
จากภาคตัดขวาง (Cross-section) ของชั้นเคลือบทองแดงที่ได้จากการชุบไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน ABS และ PLA ที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1 ทำให้ทราบว่าชั้นเคลือบทองแดงของชิ้นงานทั้งสองกลุ่มมีความหนาที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยชั้นเคลือบทองแดงมีความหนา 27.72 และ 28.50 ไมโครเมตร ตามลำดับ และมีการชุบเคลือบที่ดีปราศจากตำหนิตลอดแนวรอยต่อระหว่างชั้นเคลือบกับชิ้นงาน จากภาพจะเห็นได้ชัดว่าบริเวณรอยต่อของชั้นเคลือบทองแดงกับผิวชิ้นงานมีการยึดเกาะกันด้วยกลไกการทางกล (Mechanical interlocking mechanism) อันเป็นผลมาจากการกัดผิวเพื่อทำให้เกิดการเชื่อมสภาพด้วยสารเคมี อย่างไรก็ตาม พบว่าบริเวณรอยต่อของชิ้นงานทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยพบว่ารอยต่อของชิ้นงาน PLA จะมีความขรุขระมากกว่ารอยต่อของชิ้นงาน ABS เนื่องจากรูพรุนที่เกิดจากกระบวนการกัดผิวของ PLA มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนบนผิว ABS ค่อนข้างมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.3

จากภาคตัดขวางของชั้นเคลือบทองแดงที่ได้จากการชุบไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน ABS และ PLA ที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 2 แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบของชิ้นงานทั้งสองกลุ่มมีความหนาที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยชั้นเคลือบทองแดงมีความหนา 26.52 และ 25.90 ไมโครเมตร ตามลำดับ และมีการชุบเคลือบที่ดีปราศจากตำหนิตลอดแนวรอยต่อระหว่างชั้นเคลือบกับชิ้นงาน จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS) ทำให้พบว่ามีชั้นของโลหะเงินปรากฏอยู่ตามแนวรอยต่อ และกระจายอยู่ทั่ว

ชิ้นงานทดสอบทั้งในกรณีของ ABS และ PLA โดยมีปริมาณของโลหะเงินร้อยละ 0.14 และ 0.07 โดยมวล ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าหลงเหลือมาจากขั้นตอนการเตรียมผิว และเกิดการกระจายตัวอยู่ที่ผิวชิ้นงาน จากกระบวนการขัดเพื่อเปิดผิวชิ้นงาน โดยชั้นโลหะของเงินเหล่านี้ คือ ชั้นอนุภาคนาโนของเงินที่ถูกยึดเหนี่ยวไว้ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ [41, 42] ระหว่างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกของโพลีเอทิลีนไดอ็อกไซด์ที่ล้อมรอบอนุภาคนาโนของเงิน และควอเทอร์นารีเอมีน (Quaternary amine) ของ PDAMAC (Polycation) จากกระบวนการสร้างชั้นเคลือบพอลิอิเล็กโทรไลต์ (PEMs⁺) [51] ผลจากการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 2 ทำให้ทราบว่าชั้นเคลือบสามารถยึดติดบนผิวชิ้นงานได้โดยไม่ต้องทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเนื้อพอลิเมอร์ แต่จำเป็นต้องปรับสภาพผิวด้วยรังสียูวีก่อนการเตรียมผิว เพื่อเพิ่มความเป็นไฮโดรฟิลิก โดยสามารถทำให้พื้นผิวมีความเป็นไฮโดรฟิลิกได้สูงขึ้นถึงร้อยละ 40-60 จากการเกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (COOH) และหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (OH) ที่สายโซ่พอลิเมอร์ โดยพบว่า ABS ตอบสนองต่อการปรับสภาพพื้นผิวด้วยรังสียูวีได้ดีกว่า PLA จึงจะเห็นได้ว่าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเคลือบทองแดงกับผิวชิ้นงานมีผิวที่ค่อนข้างเรียบ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

จากภาคตัดขวางของชั้นเคลือบทองแดงที่ได้จากการชุบไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน ABS และ PLA ที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 3 แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบทั้งสองกลุ่มมีความหนาของชั้นโลหะทองแดงที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยชั้นเคลือบทองแดงมีความหนา 26.48 และ 25.39 ไมโครเมตร ตามลำดับ และมีการชุบเคลือบที่ตีปราศจากตำหนิตลอดแนวรอยต่อระหว่างชั้นเคลือบกับชิ้นงาน อย่างไรก็ตามสังเกตได้ว่าชั้นทาสีนำไฟฟ้าบนพื้นผิวชิ้นงานมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ โดยพบว่าความหนาของชั้นสีนำไฟฟ้าบน ABS และ PLA มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 5.91 และ 5.77 ตามลำดับ จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าความหนาของชั้นเคลือบทองแดงไม่มีความสัมพันธ์กับความหนาของชั้นสีนำไฟฟ้าอย่างเด่นชัด นอกจากนี้ได้พบว่าชั้นสีนำไฟฟ้า และชั้นเคลือบทองแดงมีการแยกออกจากกันอย่างชัดเจนโดยไม่มีการแพร่ของธาตุทั้งสองชนิดเกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS ทำให้ทราบว่าชิ้นงาน ABS และ PLA มีปริมาณของโลหะเงินร้อยละ 23.59 และ 27.64 โดยมวล ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 2 จะเห็นว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 3 มีการใช้โลหะเงินปริมาณที่มากกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 2 หลายเท่า เนื่องจากจำเป็นต้องใช้โลหะเงินในปริมาณที่มากพอเพื่อที่จะทำให้พื้นผิวชิ้นงานสามารถนำไฟฟ้าได้ แต่สำหรับการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 2 นั้น สามารถใช้โลหะเงินในปริมาณเงินเพียงเล็กน้อยเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาการชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถประหยัดต้นทุนได้มากกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 3

ตารางที่ 4.3 ภาคนตัดขวางของชิ้นงาน ABS และ PLA ภายหลังจากชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าลงบนชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการเตรียมผิว	พอลิเมอร์	ภาคนตัดขวางของชั้นเคลือบทองแดง	EDS mapping	
			Cu	Ag
มาตรฐาน	ABS			-
1	PLA			-
2	ABS			
	PLA			
3	ABS			
	PLA			

4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค, ความหนาผิว และความสามารถในการเปื่อยของชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีที่ 1 ก่อน-หลังการกัดผิวด้วยสารเคมี

เมื่อเปรียบเทียบสัณฐานบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเคลือบและผิวชิ้นงาน ABS และ PLA จะเห็นได้ชัดว่ารอยต่อมีความแตกต่างกัน โดยรอยต่อของชิ้นงาน PLA มีความขรุขระมากกว่า ABS ทั้งนี้เป็นผลมาจากกลไกการกัดผิวชิ้นงานที่ต่างกัน จากการตรวจสอบพื้นผิวภายหลังกระบวนการกัดผิว (Etching) ของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 1000 เท่า พบว่าให้ผลดังแสดงตารางที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะสัณฐานของรูพรุนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง เนื่องจากการกัดผิวอาศัยการทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อทำให้เนื้อพื้นเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดนั้นมีการเสื่อมสภาพและกลไกการตอบสนองต่อสารเคมีที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาพบว่า การเสื่อมสภาพของ ABS [71] เกิดจากการใช้สารเคมีประเภทกรดแก่ที่มีฤทธิ์ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรุนแรง (Strong oxidizing agent) เช่น สารละลายกรดซัลฟูริกผสมกับกรดโครมิกเข้าทำปฏิกิริยากับพื้นผิว โดยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ตำแหน่งพันธะคู่ของบิวทาไดอีน ส่งผลให้เกิดการสลายพันธะและทำให้เฟสบิวทาไดอีนถูกสลายนอกจากเนื้อพื้นบริเวณที่เฟสบิวทาไดอีนถูกสลายนอกจะเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กที่มีขนาดเฉลี่ยอยู่ในระดับนาโนเมตร จากการตรวจสอบพื้นผิวพบว่า การกัดผิวทำให้ชิ้นงาน ABS มีความหนาผิวเพิ่มขึ้นเป็น 0.56 ไมโครเมตร และทำให้พื้นที่ผิว (Surface area, Sa) เพิ่มมากขึ้นถึง 2.48 เท่า

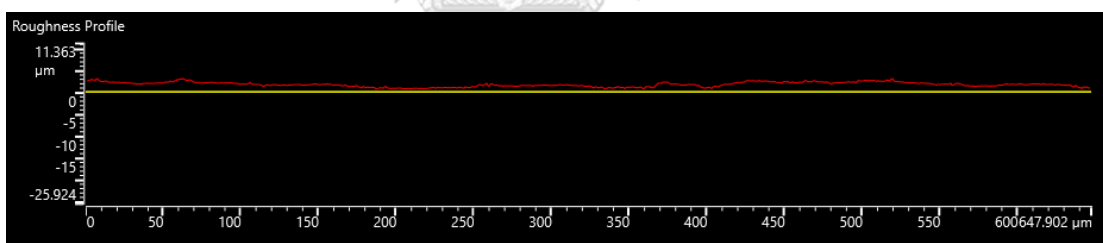
สำหรับกรณีของ PLA จะอาศัยกลไกการเสื่อมสภาพจากสารเคมีประเภทเบสแก่ ได้แก่ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ตำแหน่งพันธะเอสเทอร์ (Ester bond) ของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยพันธะเอสเทอร์จะถูกสลายนอกเป็นหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) และหมู่แอลคอกซิล (Alkoxy) ดังแสดงในสมการที่ (4.1) [72] ซึ่งจะก่อให้เกิดเป็นรูพรุนกระจายตัวบนพื้นผิวของ PLA โดยพบว่ารูพรุนมีขนาดประมาณ 3-5 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า ABS หลายเท่า จึงทำให้เห็นว่าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเคลือบกับชิ้นงาน PLA มีความขรุขระมากกว่าชิ้นงาน ABS จากการตรวจสอบพื้นผิวพบว่า การกัดผิวทำให้ชิ้นงาน PLA มีความหนาผิวเพิ่มขึ้นเป็น 1.39 ไมโครเมตร และทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นถึง 1.18 เท่า



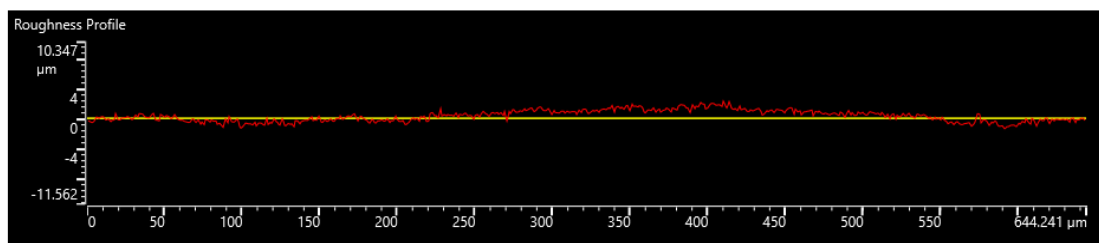
นอกจากนี้ได้ทำการตรวจสอบรูปแบบความหยาบผิว (Profile roughness) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบเลเซอร์คอนโฟคอล ทำให้สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบความหยาบผิวบนชิ้นงานในขณะก่อน-หลังการกัดผิวได้อย่างชัดเจน โดยจะเห็นได้ว่าภายหลังการกัดผิวทำให้พื้นผิวของพอลิเมอร์มีการเกิดยอดแหลม (Asperity) และมีความขรุขระเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.7

ความสามารถในการเปียกของชิ้นงานภายหลังการกัดผิว (Wettability)

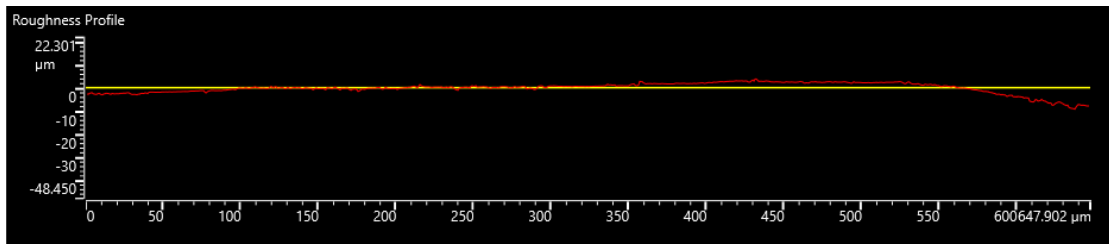
นอกจากการกัดผิวจะเป็นการสร้างรูพรุนบนพื้นผิวแล้ว ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการกัดผิวสามารถทำให้พื้นผิวของมีพฤติกรรมความเป็นไฮโดรฟิลิกสูงขึ้นได้อีกด้วย [72] จากการเกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (COOH) และหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (OH) ขึ้นที่สายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งจะช่วยให้การเตรียมผิวและการชุบเคลือบมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น โดยพบว่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวชิ้นงาน ABS และ PLA หลังทำการกัดผิวมีค่า 88.98 และ 65.96 องศา ตามลำดับ โดยได้แสดงผลการทดลองไว้ในตารางที่ 4.4



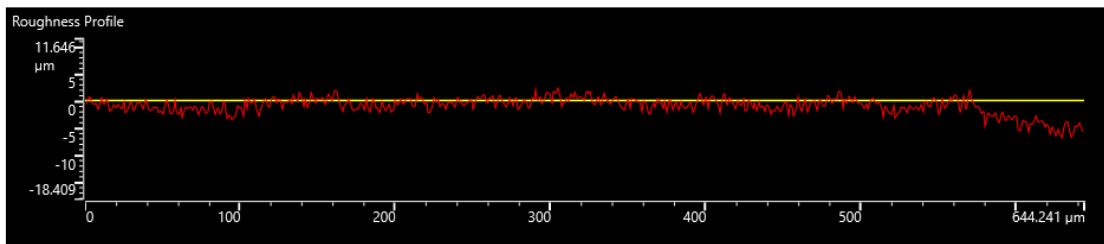
รูปที่ 4.4 รูปแบบความหยาบผิวของชิ้นงาน ABS ก่อนการกัดผิว



รูปที่ 4.5 รูปแบบความหยาบผิวของชิ้นงาน ABS หลังการกัดผิวด้วยกรดโครมิคผสมกรดซัลฟูริกที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที



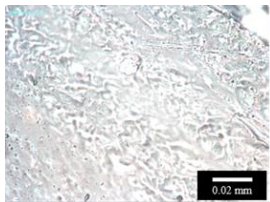
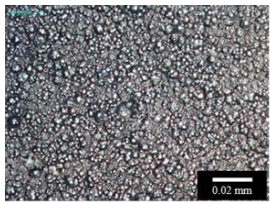
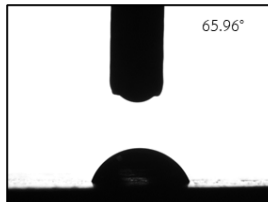
รูปที่ 4.6 รูปแบบความหยาบผิวของชิ้นงาน PLA ก่อนการกัดผิว



รูปที่ 4.7 รูปแบบความหยาบผิวของชิ้นงาน PLA หลังการกัดผิวด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที

ตารางที่ 4.4 พื้นผิวของชิ้นงาน ABS และ PLA ขณะก่อน-หลังการกัดผิวด้วยสารเคมี และแสดงมุมสัมผัสของหยดน้ำภายหลังการกัดผิวด้วยสารเคมี

พอลิเมอร์	ก่อนการกัดผิว	หลังการกัดผิว	มุมสัมผัสของหยดน้ำ หลังการกัดผิว
ABS			
	$R_{rms} = 0.54$ ไมโครเมตร	$R_{rms} = 0.56$ ไมโครเมตร	
	$S_a = 0.49$ ไมโครเมตร	$S_a = 1.71$ ไมโครเมตร	

พอลิเมอร์	ก่อนการกัดผิว	หลังการกัดผิว	มุมสัมผัสของหยดน้ำ หลังการกัดผิว
PLA			
	$R_{rms} = 1.12$ ไมโครเมตร $S_a = 0.62$ ไมโครเมตร	$R_{rms} = 1.39$ ไมโครเมตร $S_a = 1.35$ ไมโครเมตร	

4.5 ประสิทธิภาพในการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า

จากการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมป์/ตารางเดซิเมตร เป็นระยะเวลา 15-20 นาที พบว่าความหนาเฉลี่ยของชั้นทองแดงที่ได้จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด มีขนาดอยู่ในช่วง 25-30 ไมโครเมตร ซึ่งพบว่ามีความหนาแตกต่างไปจากค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี เนื่องจากในการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าเป็นเวลา 15 นาที ควรได้ความหนาประมาณ 33.05 ไมโครเมตร และการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าเป็นเวลา 20 นาที ควรได้ความหนาประมาณ 44.07 ไมโครเมตร

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่ากระบวนการเตรียมผิวที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ชิ้นงานมีความสามารถในการชุบไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยความสามารถในการชุบไฟฟ้านี้ได้พิจารณาถึง 2 ปัจจัย คือ ค่าประสิทธิภาพของแคโทด (Cathodic efficiency, C.E.) และอัตราเร็วในการชุบไฟฟ้า (Plating rate) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.2) และ (4.3)

$$h = \frac{I \times t \times A_w}{Z \times F \times \rho \times A} \times C.E. \quad (4.2)$$

$$r = \frac{h}{t} \quad (4.3)$$

โดย h = ความหนาของชั้นเคลือบได้จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

I = กระแสไฟฟ้า

t = ระยะเวลาในการชุบไฟฟ้า

A_w = มวลอะตอมของโลหะที่เกิดขึ้น (ทองแดง = 65.546 กรัม/โมล)

Z = จำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอน

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,485 คูลอมป์/โมล)

ρ = ความหนาแน่นของโลหะ (ทองแดง = 9.92 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

A = พื้นที่ผิว

C.E. = ค่าประสิทธิภาพของแคโทด

r = อัตราเร็วในการชุบไฟฟ้า

จากสมการจะเห็นได้ว่าความหนาของชั้นเคลือบที่ได้จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า มีความเกี่ยวข้องกับค่าประสิทธิภาพของแคโทด (C.E.) โดยตรง ซึ่งค่าประสิทธิภาพของแคโทดนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ความหนาของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าในการทดลองมีค่าเบี่ยงเบนไปจากทฤษฎี [73, 74] ในทางทฤษฎีได้กำหนดให้ประสิทธิภาพของแคโทดมีค่าร้อยละ 100 แต่จากการทดลองพบว่าชิ้นงานมีค่าประสิทธิภาพของแคโทดต่ำกว่าทฤษฎี โดยมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพของแคโทดของชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1 มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีและชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีมาตรฐานมากที่สุด โดยมีค่าร้อยละ 80-90 ทำให้ชิ้นงานมีอัตราเร็วในการชุบโลหะค่อนข้างสูง ในขณะที่ชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีที่ 2 และ 3 มีค่าประสิทธิภาพของแคโทดเพียงร้อยละ 50-60 ทำให้ชิ้นงานมีอัตราเร็วในการชุบโลหะที่ลดลง

จากตารางที่ 4.5 ทำให้ทราบว่าชิ้นงาน PLA ที่เตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1 มีประสิทธิภาพในการชุบโลหะไฟฟ้าสูงกว่าชิ้นงาน ABS ที่เตรียมผิวด้วยวิธีมาตรฐานเล็กน้อย เนื่องจากภายหลังกระบวนการกัดผิวด้วยสารเคมีทำให้ชิ้นงาน PLA มีความสามารถในการเปียกมากกว่า ABS ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น จึงทำให้สารละลายต่าง ๆ เข้าทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวได้ดีกว่า ABS ส่งผลให้การชุบเคลือบมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

แต่สำหรับการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 2 และ 3 พบว่าชิ้นงาน ABS มีประสิทธิภาพในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าสูงกว่าชิ้นงาน PLA โดยมีอัตราเร็วในการชุบไฟฟ้าสูงกว่าชิ้นงาน PLA และมีประสิทธิภาพของแคโทดสูงกว่าชิ้นงาน PLA ร้อยละ 2-4

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน ABS และ PLA ที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1, 2 และ 3

พอลิเมอร์	วิธีการเตรียมผิว	ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบทองแดง (ไมโครเมตร)	ประสิทธิภาพของแคโทด (%)	อัตราเร็วในการชุบไฟฟ้า (ไมโครเมตร/นาท)
-----------	------------------	--	-------------------------	--

พอลิเมอร์	วิธีการเตรียมผิว	ความหนาเฉลี่ยของ ชั้นเคลือบทองแดง (ไมโครเมตร)	ประสิทธิภาพ ของแคโทด (%)	อัตราเร็วในการชุบไฟฟ้า (ไมโครเมตร/นาที่)
	มาตรฐาน	27.72	83.86	1.85
ABS	2	26.52	60.18	1.33
	3	26.48	60.08	1.32
PLA	1	28.50	86.22	1.90
	2	25.90	56.50	1.25
	3	25.39	57.61	1.27

4.6 ความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบ

4.6.1 ผลการทดสอบความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบด้วยเทปกาว

ผลการทดสอบเชิงคุณภาพในตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบทองแดงที่ได้จากการชุบไฟฟ้าของชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1 และ 3 มีความสามารถในการยึดติดอยู่ในระดับดีเยี่ยม โดยจัดอยู่ในระดับ 4B-5B ตามมาตรฐาน ASTM D3359-02 ซึ่งแสดงถึงการหลุดร่อนของชั้นเคลือบที่มีปริมาณเพียงร้อยละ 0-5 เนื่องจากกระบวนการเตรียมผิวมีส่วนช่วยในการเสริมสร้างให้เกิดกลไกการยึดติดที่แข็งแรง โดยการเตรียมผิวชิ้นงานด้วยวิธีที่ 1 ทำให้เกิดกลไกการยึดติดแบบทางกล จากผลของการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ร่วมกับผลจากการกัดผิวชิ้นงานด้วยสารเคมี ส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีความขรุขระและมียอดแหลม (Asperity) เกิดขึ้นในระดับไมโครเมตร จากการศึกษาพบว่าแต่ละยอดแหลมจะทำหน้าที่เป็นจุดยึดเกาะ (Anchor site) ให้กับชั้นเคลือบทำให้ชั้นเคลือบเกิดการประสานติดกับแต่ละยอดแหลม ซึ่งช่วยให้ชั้นเคลือบมีความสามารถในการยึดติดที่ดีขึ้น [33, 34] สำหรับการเตรียมผิวชิ้นงานด้วยวิธีที่ 3 พบว่า ชั้นเคลือบมีกลไกการยึดติดเกิดขึ้น 2 แบบ คือ การยึดติดระหว่างผิวชิ้นงานกับชั้นสีนำไฟฟ้า (ชั้นที่ 1) และการยึดติดระหว่างชั้นสีนำไฟฟ้ากับชั้นเคลือบทองแดงที่ได้จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (ชั้นที่ 2) โดยในชั้นที่ 1 มีการเกิดกลไกการยึดติดแบบทางกล จากผลของการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ร่วมกับการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (Intermolecular

interaction) ของพอลิเมอร์ที่ผสมอยู่ในสื่อนำไฟฟ้ากับผิวชิ้นงาน และในชั้นที่ 2 มีการเกิดกลไกการยึดติดแบบทางกลขึ้นจากชั้นสื่อนำไฟฟ้ามีความขรุขระ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ชั้นเคลือบมีความสามารถในการยึดติดที่แข็งแรงมาก แต่สำหรับการเตรียมผิวชิ้นงานด้วยวิธีที่ 2 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบมีความสามารถในการยึดติดค่อนข้างต่ำ โดยจัดอยู่ในระดับ 1B ตามมาตรฐาน ASTM D3359-02 ซึ่งแสดงถึงการหลุดร่อนของชั้นเคลือบที่มีปริมาณมากถึงร้อยละ 35-65 แม้ว่าชิ้นงานจะมีพื้นผิวที่ขรุขระจากผลของการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แต่ชั้นเคลือบกับชิ้นงานยึดติดกันด้วยแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) เป็นหลัก โดยมีชั้น PEMS⁺ จากกระบวนการเตรียมผิวเป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงานกับชั้นโลหะทองแดง [48] แต่เนื่องจากชั้น PEMS⁺ นี้มีบางเพียงระดับนาโนเมตร จึงทำให้แรงที่ใช้ในการยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเคลือบกับชิ้นงานไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการยึดติดที่แข็งแรงได้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบเมื่อทดสอบด้วยวิธีเทปกาวตามมาตรฐาน ASTM D3359-02

พอลิเมอร์	วิธีการเตรียมผิว	ระดับความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบ	ปริมาณการหลุดร่อนของชั้นเคลือบ (%)
ABS	มาตรฐาน	5B	0
	2	1B	35-65
	3	5B	0
PLA	1	4B	<5
	2	1B	35-65
	3	5B	0

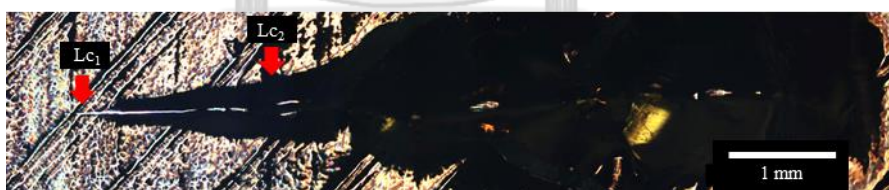
4.6.2 ผลการทดสอบความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบด้วยเครื่องทดสอบบรอยซีดช่วน

เนื่องจากชั้นเคลือบโลหะทองแดงที่ได้จากการชุบไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน ABS และ PLA ที่เตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1 และ 3 มีความสามารถในการยึดติดที่แข็งแรง จึงได้ทำการทดสอบความสามารถในการยึดติดโดยใช้เครื่องทดสอบบรอยซีดช่วนเพิ่มเติม จากผลการทดสอบเชิงปริมาณทำให้ทราบค่าแรงวิกฤติที่ 1 (Critical load 1, Lc_1) ซึ่งแสดงถึงจุดแรกที่เกิดความเสียหายแบบเชื่อมแน่น (Cohesive failure) และแรงวิกฤติที่ 2 (Critical load 2, Lc_2) ซึ่งแสดงถึงจุดแรกที่เกิดความเสียหายแบบยึดติด

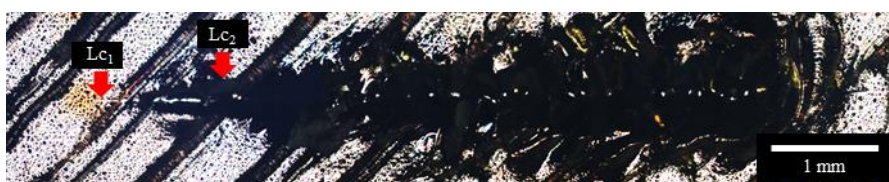
(Adhesive failure) รวมถึงแสดงให้เห็นถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction) ณ ตำแหน่งที่เกิดการเสียหายในแต่ละจุดของชั้นเคลือบทองแดง ผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าการเตรียมผิวชิ้นงานด้วยวิธีที่ 3 ทำให้ได้ชั้นเคลือบมีความสามารถในการยึดติดดีกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีที่ 1 โดยการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 3 ทำให้ได้ค่า Lc_1 และ Lc_2 สูงกว่าชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีที่ 1 ประมาณ 1-2 เท่า เนื่องจากชั้นเคลือบของชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีที่ 3 มีความหนาแน่นมากกว่า อีกทั้งกระบวนการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 3 นั้น สามารถกระทำได้ที่อุณหภูมิห้อง จึงไม่มีความเค้นตึงจากอุณหภูมิ (Thermal stress) และไม่มีการทำให้เนื้อพอลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาเคมี ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ชิ้นงานความสมบัติทางกลที่สูงกว่าสามารถรับแรงกระทำได้มากกว่าชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1 โดยพบว่าร่องรอยการขีดข่วน (Scratch mark) ที่เกิดขึ้นมีลักษณะความเสียหายที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8-4.11 ซึ่งเป็นผลจากสมบัติของเนื้อวัสดุและกระบวนการเตรียมผิว และได้แสดงผลการทดสอบไว้ในตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.8 รอยขีดข่วนของชั้นเคลือบโลหะทองแดงบนชิ้นงาน ABS ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม (วิธีมาตรฐาน)



รูปที่ 4.9 รอยขีดข่วนของชั้นเคลือบโลหะทองแดงบนชิ้นงาน ABS ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการทาสีนำไฟฟ้า (วิธีที่ 3)



รูปที่ 4.10 รอยขีดข่วนของชั้นเคลือบโลหะทองแดงบนชิ้นงาน PLA ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม (วิธีที่ 1)



รูปที่ 4.11 รอยขีดข่วนของชั้นเคลือบโลหะทองแดงบนชิ้นงาน PLA ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการทาสีนำไฟฟ้า (วิธีที่ 3)

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบเมื่อทดสอบด้วยวิธีการ scratch test ตามมาตรฐาน ASTM C 1624-05

พอลิเมอร์	วิธีการเตรียมผิว	Lc ₁ (N)	COF ₁	Lc ₂ (N)	COF ₂
ABS	มาตรฐาน	8.37	0.2	26.69	0.3
	3	8.26	0.3	39.95	0.4
PLA	1	6.14	0.2	19.49	0.3
	3	11.52	0.3	42.65	0.4

4.7 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบของกระบวนการเตรียมผิวทั้ง 3 วิธี

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอกระบวนการเตรียมผิวที่อุณหภูมิต่ำเพื่อชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า 3 วิธี สำหรับพอลิเมอร์ชนิด ABS และ PLA ประกอบไปด้วยกระบวนการเตรียมผิวโดยใช้การกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม (วิธีที่ 1), กระบวนการเตรียมผิวโดยการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิเล็กโทรไลต์และแอคติเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน (วิธีที่ 2) และกระบวนการเตรียมผิวโดยการทาสีนำไฟฟ้า (วิธีที่ 3) จากผลการทดลองทำให้ทราบว่ากระบวนการเตรียมผิวแต่ละวิธีมีข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบที่แตกต่างกัน โดยสามารถเรียบเรียงได้ดังนี้

4.7.1 วิธีการเตรียมผิวโดยใช้การกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม (วิธีที่ 1)

กระบวนการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1 ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ การกัดผิวด้วยสารเคมี เพื่อให้เกิดรูพรุน (Etching), การกระตุ้นและการเร่งผิวด้วยแพลเลเดียม (Sensitizing and Palladium activation) และการชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า (Electroless copper plating) ซึ่งมีขั้นตอนที่คล้ายคลึงกับกระบวนการเตรียมผิวแบบมาตรฐานที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรม แต่มีความแตกต่างกันในแง่ของสารเคมี ระยะเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดผิวสำหรับ PLA

จากการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าลงบนชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีที่ 1 ทำให้ทราบว่า การเตรียมผิวพอลิเมอร์ PLA ต้องทำการควบคุมอุณหภูมิอย่างเคร่งครัด เนื่องจาก PLA มีอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสต่ำ สามารถทนอุณหภูมิได้ไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส จึงต้องระมัดระวังไม่ให้ชิ้นงานเกิดการเสีรูประหว่างกระบวนการเตรียมผิว

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเตรียมผิวชิ้นงานด้วยวิธีที่ 1 จะทำให้การชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้ามีค่าประสิทธิภาพของแคโทด และอัตราการชุบสูงสุด รวมถึงทำให้ชิ้นงานมีผิวเคลือบที่เงางาม สม่ำเสมอ ตลอดจนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีมาก และมีความสามารถในการยึดติดระหว่างชั้นเคลือบกับชิ้นงานที่แข็งแรง นอกจากนี้ยังมีความได้เปรียบในเชิงของอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถทำการผลิตแบบจำนวนมาก (mass production) ได้ อีกทั้งกระบวนการเตรียมผิวนี้อาจใช้กับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ และอุตสาหกรรมสามารถปรับเปลี่ยนสายการผลิตจาก ABS ไปเป็น PLA ได้โดยง่าย ส่งผลให้ไม่ต้องใช้เงินลงทุนสูง รวมถึงชิ้นงานที่ได้จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้ายังคงมีขนาดที่ค่อนข้างแม่นยำ เนื่องจากกระบวนการเตรียมผิวไม่ส่งผลต่อความหนาของชิ้นงานมากนัก

อย่างไรก็ตามการเตรียมผิวด้วยวิธีนี้ยังคงเป็นการเตรียมผิวในสารละลายที่ประกอบไปด้วยสารเคมีที่มีความเป็นพิษค่อนข้างสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสิ่งแวดล้อมที่ค่อนข้างรุนแรง ทั้งยังจำเป็นต้องใช้โลหะหนัก และโลหะมีค่าในกระบวนการกระตุ้นผิวและเร่งผิว ทำให้มีต้นทุนค่อนข้างสูง [1-6] นอกจากนี้ยังต้องใช้น้ำปริมาณมากในการล้างชิ้นงานระหว่างกระบวนการเตรียมผิว ทำให้มีการปนเปื้อนของสารเคมีในน้ำ และมีน้ำเสียที่ต้องได้รับการบำบัดเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก [5, 7, 8] จึงจำเป็นต้องมีขั้นตอน และค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น กระบวนการเตรียมผิวด้วยวิธีนี้จึงมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (environmentally-friendly) น้อยกว่ากระบวนการเตรียมผิวด้วยวิธีอื่น ๆ

4.7.2 วิธีการเตรียมผิวโดยการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอิลเล็กโทรไลต์ และแอคติเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน (วิธีที่ 2)

กระบวนการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 2 ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ การเคลือบผิวด้วยสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte multilayers coating) เพื่อให้เกิดประจุไฟฟ้า, การเร่งผิวด้วยอนุภาคนาโนของเงิน และการชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า (Electroless copper plating) ดังจะเห็นได้ว่ามีขั้นตอน และวิธีการที่แตกต่างไปจากกระบวนการเตรียมผิวแบบมาตรฐานที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมอย่างมาก

จากการทดลองทำให้ทราบว่า การเตรียมผิวด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่เหมาะสมกับวัสดุประเภทพอลิเมอร์ โดยเฉพาะพอลิเมอร์ชีวภาพ PLA เนื่องจากสามารถทำการเตรียมผิวได้ที่อุณหภูมิห้อง จึงไม่ต้องระมัดระวังเกี่ยวกับการเสียรูปของชิ้นงาน และไม่มีผลจากความเค้นตึงของอุณหภูมิ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 2 ทำให้การชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้ามีค่าประสิทธิภาพของแคโทด และอัตราการชุบปานกลาง แต่ชิ้นงานยังคงมีผิวเคลือบที่เงางาม สม่ำเสมอตลอดจนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีมาก อย่างไรก็ตาม พบว่าชั้นเคลือบโลหะทองแดงมีความสามารถในการยึดติดกับชิ้นงานที่ค่อนข้างต่ำ

ในเชิงของอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนพลาสติก พบว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีนี้ต้องทำการปรับเปลี่ยนสายการผลิตไปจากเดิมมากพอสมควร แต่ยังคงมีความคุ้มค่าในระยะยาว เนื่องจากการปรับเปลี่ยนโลหะคะตะลิสต์จากแพลเลเดียมไปเป็นอนุภาคนาโนของเงินสามารถลดต้นทุนได้อย่างมาก โดยใช้โลหะเงินเพียงปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในการกระตุ้นพื้นผิว อีกทั้งชั้นผิวเคลือบจากกระบวนการเตรียมผิวมีความบางในระดับนาโนเมตร จึงไม่ส่งผลกระทบต่อขนาด และรูปทรงของชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีขนาดค่อนข้างแม่นยำมากกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีอื่น ๆ รวมถึงสามารถใช้กับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 2 มีความได้เปรียบในเชิงความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่ต้องใช้สารเคมีที่มีความเป็นพิษสูงเพื่อกัดผิวชิ้นงาน และสามารถหลีกเลี่ยงการใช้โลหะหนักได้ จึงสามารถลดปริมาณน้ำเสีย และค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียได้อีกด้วย

4.7.3 วิธีการเตรียมผิวโดยการทาสีนำไฟฟ้า (วิธีที่ 3)

การเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 3 เป็นวิธีที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน และสามารถเตรียมผิวได้ในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากการเตรียมผิวมีเพียง 1 ขั้นตอนเท่านั้น คือ การทาสีนำไฟฟ้าลงบนผิวชิ้นงาน จึงเป็นวิธีการเตรียมผิววิธีเดียวที่ไม่ต้องทำการชุบโลหะทองแดงแบบไม่อาศัยไฟฟ้า ซึ่งสามารถประหยัดระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการเตรียมผิวได้เป็นอย่างมาก อีกทั้งยังสามารถลดความเป็นพิษของสารเคมี

และปริมาณน้ำเสียได้ค่อนข้างมาก จึงส่งผลให้กระบวนการเตรียมผิวด้วยวิธีนี้มีความได้เปรียบในแง่ของความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด

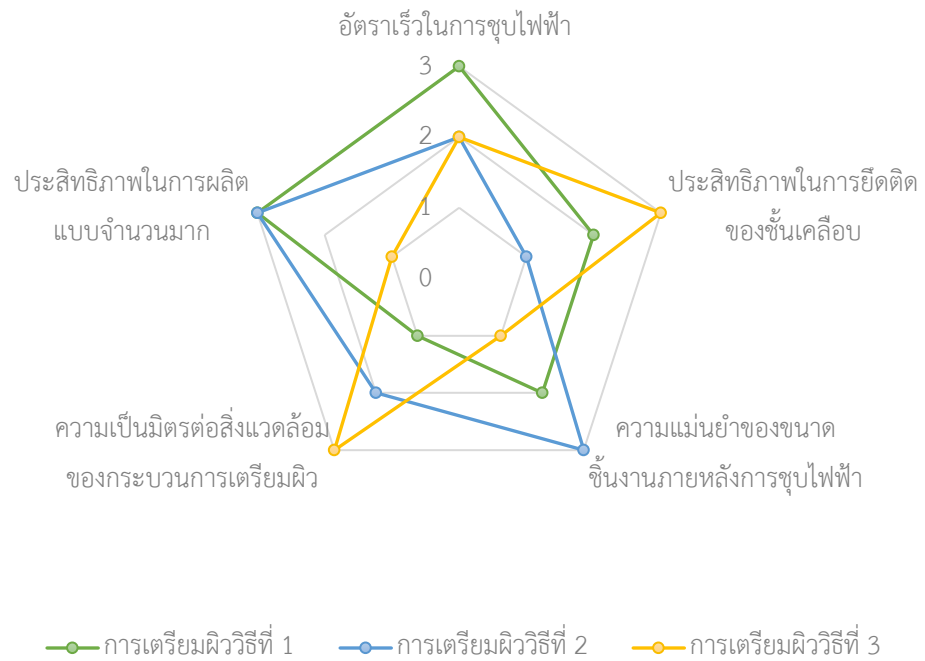
จากการทดลองทำให้ทราบว่า การเตรียมผิวด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่เหมาะสมกับวัสดุประเภทพอลิเมอร์ โดยเฉพาะพอลิเมอร์ชีวภาพ PLA เนื่องจากสามารถทำการเตรียมผิวได้ที่อุณหภูมิห้อง จึงไม่ต้องระมัดระวังเกี่ยวกับการเสียรูปของชิ้นงาน และไม่มีผลจากความเค้นตกค้างของอุณหภูมิ เนื่องจากสามารถเตรียมผิวได้ที่อุณหภูมิห้อง และผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีที่ 3 จะทำให้การชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้ามีค่าประสิทธิภาพของแคโทด และอัตราการชุบปานกลาง แต่ชิ้นงานยังคงมีผิวเคลือบที่เงางาม สม่ำเสมอ ตลอดจนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีมาก และมีความสามารถในการยึดติดระหว่างชั้นเคลือบกับชิ้นงานที่แข็งแรงมาก

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าชั้นเคลือบโลหะทองแดงที่ได้จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจะมีความสม่ำเสมอดี แต่ก็พบว่าที่ผิวเคลือบยังคงมีร่องรอยของการทาสีนำไฟฟ้าด้วยแปรงซึ่งทำให้ได้พื้นผิวที่มีความหยาบสูง จึงทำให้ผิวเคลือบมีความแตกต่างไปจากชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีการอื่น ๆ อีกทั้งยังไม่สามารถควบคุมความหนาของชั้นสีนำไฟฟ้าได้ และต้องใช้โลหะเงินปริมาณมากในการเคลือบผิวทำให้มีความสิ้นเปลืองค่อนข้างมาก ในแง่ของการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนพลาสติก พบว่ากระบวนการเตรียมผิวด้วยวิธีการทาสีนำไฟฟ้ายังไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง เนื่องจากไม่สามารถใช้ในการเตรียมผิวชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ และไม่เหมาะกับการผลิตแบบจำนวนมาก (Mass production) แม้ว่าจะสามารถทำการเตรียมผิวได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งการเตรียมผิวด้วยวิธีนี้ควรมีการศึกษา และพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อลดความสิ้นเปลืองของการทาสีนำไฟฟ้า และควบคุมความหนาของชั้นสีนำไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาด และรูปทรงที่แม่นยำมากขึ้นด้วย

โดยได้ทำการเปรียบเทียบประเด็นต่าง ๆ ที่สำคัญของการเตรียมผิวชิ้นงาน ABS และ PLA ด้วยวิธีที่ 1, 2 และ 3 เพื่อชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าไว้ในตารางที่ 4.8 และได้แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของกระบวนการเตรียมผิวแต่ละวิธี

	วิธีการเตรียมผิว			
	มาตรฐาน	1	2	3
อัตราเร็วในการชุบไฟฟ้า (Plating rate)	สูง	สูง	ปานกลาง	ปานกลาง
ประสิทธิภาพในการยึดติดของชั้นเคลือบ (Adhesion performance)	สูง	ปานกลาง	ต่ำ	สูง
ความแม่นยำของขนาดชิ้นงานภายหลังการชุบไฟฟ้า (Part's tolerance of plated sample)	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	ต่ำ
ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการเตรียมผิว (Environmentally-friendly of metallizing process)	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
ประสิทธิภาพในการผลิตแบบจำนวนมาก (Mass production capability)	สูง	สูง	สูง	ต่ำ



รูปที่ 4.12 แผนภูมิเปรียบเทียบกระบวนการเตรียมผิวด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า (โดย 3=สูง, 2=ปานกลาง และ 1=ต่ำ)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถทำการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าลงบนชิ้นงาน อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน และพอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวและ แอคติเวทด้วยแพลเลเดียม, วิธีการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอีเล็กโทรไลต์และแอคติเวทด้วย อนุภาคนาโนของเงิน และวิธีการทาสีนำไฟฟ้าได้ โดยให้ผิวเคลือบทองแดงที่มีความเงาและสม่ำเสมอดี อีกทั้งยังมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีมาก อย่างไรก็ตามพบว่ากระบวนการเตรียมผิวแต่ละวิธีมี จุดเด่นที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังส่งผลให้ชิ้นงานมีสมบัติที่แตกต่างกัน โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 วิธีการเตรียมผิวชิ้นงานด้วยการกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม

กระบวนการเตรียมผิวนี้นี้มีขั้นตอนที่คล้ายกับวิธีการที่ได้รับการยอมรับในอุตสาหกรรม (วิธี มาตรฐาน) จากการศึกษาพบว่าสารเคมีและสภาวะที่ใช้ในการเตรียมผิวก่อนข้างมีความจำเพาะ สำหรับโครงสร้างของพอลิเมอร์แต่ละชนิด และมีต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการเตรียมผิวก่อนข้างสูง เนื่องจากมีการใช้แพลเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามการเตรียมผิวด้วยวิธีนี้มีจุดเด่น คือ สามารถใช้ในการเตรียมผิวชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ โดยภายหลังการเตรียมผิวสามารถลดความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงานได้อย่างมาก ส่งผลให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพในการชุบไฟฟ้าสูง จากผลการ ทดลองพบว่าชิ้นงานมีค่าประสิทธิภาพแคโทดสูงกว่าร้อยละ 80 และชั้นเคลือบที่ได้จากการชุบไฟฟ้ามี ความสามารถในการยึดติดบนผิวชิ้นงานที่ค่อนข้างแข็งแรง โดยให้ผลการทดลองที่มีความใกล้เคียงกับ ชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีมาตรฐาน

5.1.2 วิธีการเตรียมผิวชิ้นงานด้วยการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิอีเล็กโทรไลต์และแอ คติเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน

กระบวนการเตรียมผิวนี้นี้มีจุดเด่น คือ สามารถทำการเตรียมผิวชิ้นงานได้ที่อุณหภูมิห้อง และ สามารถเตรียมผิวชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ มีการลดต้นทุนที่ใช้ในการเตรียมผิวโดยการเปลี่ยนไปใช้ เงินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทนแพลเลเดียม ภายหลังการเตรียมผิวพบว่าสามารถลดความต้านทานไฟฟ้า ของชิ้นงานได้ดี แต่ชิ้นงานมีประสิทธิภาพในการชุบไฟฟ้าปานกลาง โดยมีค่าประสิทธิภาพแคโทดอยู่

ในช่วงร้อยละ 55-60 อย่างไรก็ตาม กระบวนการเตรียมผิวนี้อย่างจำเป็นต้องศึกษาและปรับปรุงสมบัติด้านความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบให้แข็งแรงขึ้น

5.1.3 วิธีการเตรียมผิวจีนงานด้วยการทาสีนำไฟฟ้า

กระบวนการนี้มีจุดเด่น คือ สามารถเตรียมผิวจีนงานได้โดยง่ายที่อุณหภูมิห้อง และใช้ระยะเวลาในการเตรียมผิวนั้นกว่ากระบวนการอื่น ๆ อีกทั้งยังสามารถลดปริมาณน้ำเสีย และความเป็นพิษของสารเคมีลงได้ค่อนข้างมาก ภายหลังจากการทาสีนำไฟฟ้า พบว่าชิ้นงานมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างดี แต่ชิ้นงานมีประสิทธิภาพในการชุบไฟฟ้าปานกลาง โดยมีค่าประสิทธิภาพแคโทดในช่วงร้อยละ 57-60 และชั้นเคลือบที่ได้จากการชุบไฟฟ้ามีความสามารถในการยึดติดบนผิวจีนงานที่แข็งแรงกว่าชิ้นงานที่เตรียมผิวดังวิธีมาตรฐาน 1-2 เท่า อย่างไรก็ตามการเตรียมผิวดังวิธีการทาสีนำไฟฟ้า ไม่สามารถใช้ในการเตรียมผิวจีนงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ อีกทั้งยังไม่สามารถควบคุมความหนาและความสม่ำเสมอของการทาสีได้ จึงจำเป็นต้องศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติม

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทดลองในอนาคต

1. ควรศึกษาความสัมพันธ์ของระยะเวลาที่ใช้ในการกัดผิวและความสามารถในการยึดติดของชั้นเคลือบ สำหรับวิธีการเตรียมผิวแบบใช้การกัดผิวและแอคทีเวทด้วยแพลเลเดียม
2. ควรศึกษาสมบัติทางกลเพิ่มเติม เช่น ความแข็ง ความต้านทานต่อการดึง
3. ควรศึกษาศึกษาและเปรียบเทียบต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการเตรียมผิวเพิ่มเติม

บรรณานุกรม

1. Teixeira, L.A.C. and M.C. Santini, *Surface conditioning of ABS for metallization without the use of chromium baths*. Journal of Materials Processing Technology, 2005. **170**(1): p. 37-41.
2. Li, D. and C.-L. Yang, *Acidic electroless copper deposition on aluminum-seeded ABS plastics*. Surface and Coatings Technology, 2009. **203**(23): p. 3559-3568.
3. Horiuchi, S. and Y. Nakao, *Platinum colloid catalyzed etchingless gold electroless plating with strong adhesion to polymers*. Surface and Coatings Technology, 2010. **204**(23): p. 3811-3817.
4. Bazzaoui, M., et al., *A simple method for acrylonitrile butadiene styrene metallization*. Surface and Coatings Technology, 2013. **224**: p. 71-76.
5. Luo, L.-M., et al., *Electroless copper plating on PC engineering plastic with a novel palladium-free surface activation process*. Surface and Coatings Technology, 2014. **251**: p. 69-73.
6. Tang, X., et al., *A new palladium-free surface activation process for Ni electroless plating on ABS plastic*. Materials Letters, 2009. **63**(11): p. 840-842.
7. Tengsuwan, S. and M. Ohshima, *Electroless nickel plating on polypropylene via hydrophilic modification and supercritical carbon dioxide Pd-complex infusion*. The Journal of Supercritical Fluids, 2012. **69**: p. 117-123.
8. Tang, X., et al., *Research on a new surface activation process for electroless plating on ABS plastic*. Materials Letters, 2008. **62**(6): p. 1089-1091.
9. Skelly, J., *Decorative plating processes for common plastic resins: Resin selection as well as plastic part design is critical to matching the right finishing method with the intended application*. Metal Finishing, 2008. **106**(6): p. 61-65.
10. Equbal, A., A. Equbal, and A.K. Sood, *Metallization on FDM Processed Parts Using Electroless Procedure*. Procedia Materials Science, 2014. **6**: p. 1197-1206.
11. López Rocha, C.J., et al., *Development of bioplastics from a microalgae consortium from wastewater*. Journal of Environmental Management, 2020. **263**: p. 110353.

12. Shen, M., et al., *Are biodegradable plastics a promising solution to solve the global plastic pollution?* Environmental Pollution, 2020. **263**: p. 114469.
13. Viera, J.S.C., et al., *On replacing single-use plastic with so-called biodegradable ones: The case with straws.* Environmental Science & Policy, 2020. **106**: p. 177-181.
14. Bugnicourt, E., et al., *Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging.* eXPRESS Polymer Letters, 2014. **8**: p. 791-808.
15. Shafqat, A., et al., *A review on environmental significance carbon foot prints of starch based bio-plastic: A substitute of conventional plastics.* Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2020. **27**: p. 101540.
16. RameshKumar, S., et al., *Bio-based and biodegradable polymers - State-of-the-art, challenges and emerging trends.* Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2020. **21**: p. 75-81.
17. Khan, M.S., et al., *Optimizing Surface Texture and Coating Thickness of Nickel Coated ABS-3D Parts.* Materials Today: Proceedings, 2018. **5**(9, Part 3): p. 19011-19018.
18. de Vargas Mores, G., et al., *Sustainability and innovation in the Brazilian supply chain of green plastic.* Journal of Cleaner Production, 2018. **177**: p. 12-18.
19. Armillotta, A., M. Bellotti, and M. Cavallaro, *Warpage of FDM parts: Experimental tests and analytic model.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018. **50**: p. 140-152.
20. Oosthuizen, G.A., D. Hagedorn-Hansen, and T. Gerhold³, *EVALUATION OF RAPID PRODUCT DEVELOPMENT TECHNOLOGIES FOR PRODUCTION OF PROSTHESIS IN DEVELOPING COMMUNITIES.* 2013.
21. Spoerk, M., C. Holzer, and J. Gonzalez-Gutierrez, *Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage.* Journal of Applied Polymer Science, 2020. **137**(12): p. 48545.
22. Fitzharris, E.R., et al., *Effects of material properties on warpage in fused deposition modeling parts.* The International Journal of Advanced

- Manufacturing Technology, 2018. **95**(5): p. 2059-2070.
23. Mishra, S.B., et al., *Parametric Appraisal of Compressive Strength of FDM Build Parts*. Materials Today: Proceedings, 2017. **4**(9): p. 9456-9460.
 24. Angel, K., et al., *Selective electroplating of 3D printed parts*. Additive Manufacturing, 2018. **20**: p. 164-172.
 25. Reyes-Rodríguez, A., R. Dorado-Vicente, and R. Mayor-Vicario, *Dimensional and form errors of PC parts printed via Fused Deposition Modelling*. Procedia Manufacturing, 2017. **13**: p. 880-887.
 26. Popescu, D., et al., *FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review*. Polymer Testing, 2018. **69**: p. 157-166.
 27. Gomez-Gras, G., et al., *Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens*. Materials & Design, 2018. **140**: p. 278-285.
 28. Equbal, A. and A.K. Sood, *Investigations on metallization in FDM build ABS part using electroless deposition method*. Journal of Manufacturing Processes, 2015. **19**: p. 22-31.
 29. Dixit, N.K., R. Srivastava, and R. Narain, *Electroless Metallic Coating on Plastic Parts Produced by Rapid Prototyping Technique*. Materials Today: Proceedings, 2017. **4**(8): p. 7643-7653.
 30. Flowers, P.F., et al., *3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament*. Additive Manufacturing, 2017. **18**: p. 156-163.
 31. Arun, K., et al., *Metallization of PLA plastics prepared by FDM-RP process and evaluation of corrosion and hardness characteristics*. Materials Today: Proceedings, 2018. **5**(5, Part 2): p. 13107-13110.
 32. Lee, S., et al., *Electroless Deposition-Assisted 3D Printing of Micro Circuitries for Structural Electronics*. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019. **11**(7): p. 7123-7130.
 33. McCaskie, J.E., *Plating on plastics: A survey of mechanisms for adhering metal films to plastic surfaces*. Metal Finishing, 2006. **104**(5): p. 31-39.
 34. Olivera, S., et al., *Plating on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) plastic: a*

- review. *Journal of Materials Science*, 2016. **51**(8): p. 3657-3674.
35. Moore, J.D., *Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) - a review*. *Composites*, 1973. **4**(3): p. 118-130.
36. Ghosh, S., *Electroless copper deposition: A critical review*. *Thin Solid Films*, 2019. **669**: p. 641-658.
37. Jammes, A., M. Petisme, and K. Staelens, *Metallization and selective metallization of silver by spraying*. *Surface and Coatings Technology*, 2017. **332**: p. 560-563.
38. Shu, Z. and X. Wang, *Environment-friendly Pd free surface activation technics for ABS surface*. *Applied Surface Science*, 2012. **258**(14): p. 5328-5331.
39. Wang, Y., C. Bian, and X. Jing, *Adhesion improvement of electroless copper plating on phenolic resin matrix composite through a tin-free sensitization process*. *Applied Surface Science*, 2013. **271**: p. 303-310.
40. Chen, D. and Z. Kang, *ABS plastic metallization through UV covalent grafting and layer-by-layer deposition*. *Surface and Coatings Technology*, 2017. **328**: p. 63-69.
41. Tamai, T., et al., *Surface modification of PEN and PET substrates by plasma treatment and layer-by-layer assembly of polyelectrolyte multilayer thin films and their application in electroless deposition*. *RSC Advances*, 2017. **7**(53): p. 33155-33161.
42. Tamai, T., et al., *Surface modification of polyethylene naphthalate substrates by ultraviolet light-irradiation and assembling multilayers and their application in electroless deposition: The chemical and physical properties of the stratified structure*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019. **575**: p. 230-236.
43. Hwang, T., et al., *One-step metal electroplating and patterning on a plastic substrate using an electrically-conductive layer of few-layer graphene*. *Carbon*, 2012. **50**(2): p. 612-621.
44. Oh, J.-S., et al., *Chemically-modified graphene sheets as an active layer for eco-friendly metal electroplating on plastic substrates*. *Thin Solid Films*, 2012. **521**: p. 270-274.

45. Bazzaoui, M., et al., *Environmentally friendly process for nickel electroplating of ABS*. Applied Surface Science, 2012. **258**(20): p. 7968-7975.
46. O'Connell, C., et al., *Investigation of the hydrophobic recovery of various polymeric biomaterials after 172nm UV treatment using contact angle, surface free energy and XPS measurements*. Applied Surface Science, 2009. **255**(8): p. 4405-4413.
47. Gotoh, K., et al., *Wettability control of PET surface by plasma-induced polymer film deposition and plasma/UV oxidation in ambient air*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018. **556**: p. 1-10.
48. Iamsamai, C., et al., *Simple method for the layer-by-layer surface modification of multiwall carbon nanotubes*. Carbon, 2011. **49**(6): p. 2039-2045.
49. Liu, L., et al., *Preparation and Characterization of AgNPs In Situ Synthesis on Polyelectrolyte Membrane Coated Sericin/Agar Film for Antimicrobial Applications*. Materials, 2018. **11**(7).
50. Dubas, S.T. and J.B. Schlenoff, *Polyelectrolyte Multilayers Containing a Weak Polyacid: Construction and Deconstruction*. Macromolecules, 2001. **34**(11): p. 3736-3740.
51. Zan, X. and Z. Su, *Polyelectrolyte multilayer films containing silver as antibacterial coatings*. Thin Solid Films, 2010. **518**(19): p. 5478-5482.
52. Limsavarn, L., V. Sritaveesinsub, and S.T. Dubas, *Polyelectrolyte assisted silver nanoparticles synthesis and thin film formation*. Materials Letters, 2007. **61**(14): p. 3048-3051.
53. Rivero, P.J., et al., *Multicolor Layer-by-Layer films using weak polyelectrolyte assisted synthesis of silver nanoparticles*. Nanoscale Research Letters, 2013. **8**(1): p. 438.
54. Schlenoff, J.B. and S.T. Dubas, *Mechanism of Polyelectrolyte Multilayer Growth: Charge Overcompensation and Distribution*. Macromolecules, 2001. **34**(3): p. 592-598.
55. Zielińska, A., et al., *Preparation of silver nanoparticles with controlled particle size*. Procedia Chemistry, 2009. **1**(2): p. 1560-1566.

56. Khan, Z., et al., *Preparation and characterization of silver nanoparticles by chemical reduction method*. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2011. **82**(2): p. 513-517.
57. Mavani, K. and M. Shah, *Synthesis of Silver Nanoparticles by using Sodium Borohydride as a Reducing Agent*. 2013.
58. Mehr, F., M. Khanjani, and P. Vatani, *Synthesis of Nano-Ag particles using Sodium Borohydride*. Oriental Journal of Chemistry, 2015. **31**: p. 1831-1833.
59. Cai, R., et al., *In Situ Synthesis of Silver Nanoparticles on the Polyelectrolyte-Coated Sericin/PVA Film for Enhanced Antibacterial Application*. Materials, 2017. **10**(8).
60. Dubas, S.T. and V. Pimpan, *Humic acid assisted synthesis of silver nanoparticles and its application to herbicide detection*. Materials Letters, 2008. **62**(17): p. 2661-2663.
61. Dubas, S.T. and V. Pimpan, *Green synthesis of silver nanoparticles for ammonia sensing*. Talanta, 2008. **76**(1): p. 29-33.
62. Buasri, A., et al., *Synthesis of PET-PLA copolymer from recycle plastic bottle and study of its applications in the electrochromic devices with graphene conductive ink*. Materials Today: Proceedings, 2018. **5**(5, Part 1): p. 11060-11067.
63. Azim, S.S., et al., *Studies on graphite based conductive paint coatings*. Progress in Organic Coatings, 2006. **55**(1): p. 1-4.
64. Di Bartolomeo, A., et al., *Graphite platelet films deposited by spray technique on low density polyethylene substrates*. Materials Today: Proceedings, 2020. **20**: p. 87-90.
65. Sun, X., et al., *Efficient microwave welding of polypropylene using graphite coating as primers*. Materials Letters, 2018. **220**: p. 245-248.
66. de Araujo Andreotti, I.A., et al., *Disposable and flexible electrochemical sensor made by recyclable material and low cost conductive ink*. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2019. **840**: p. 109-116.
67. Ackermann, S., et al., *A complementary Raman and SECM study on electrically conductive coatings based on graphite sol-gel composite electrodes for the electrochemical antifouling*. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2017. **795**:

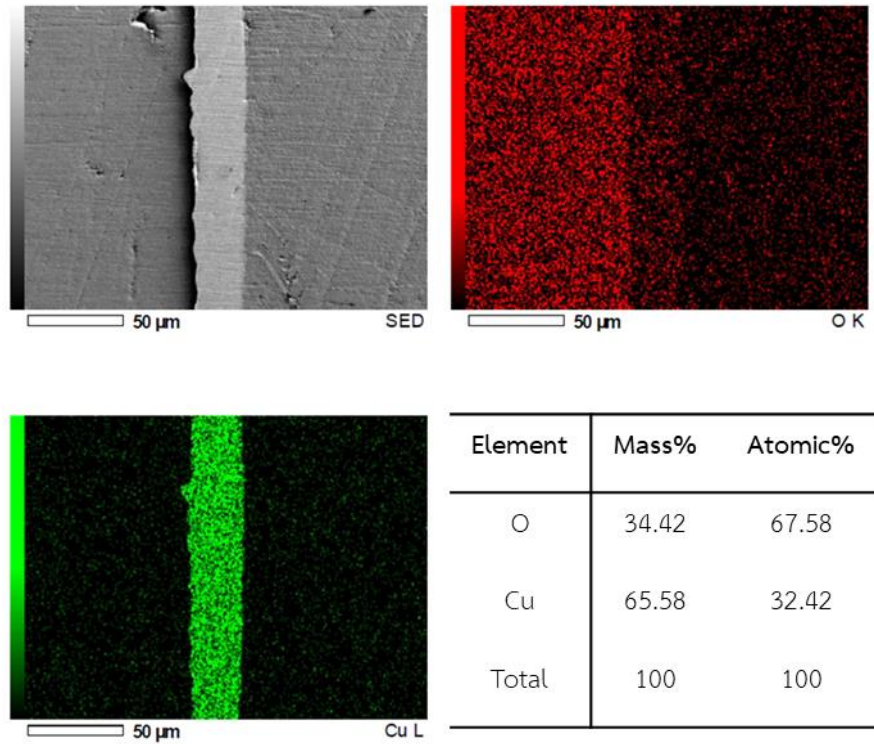
- p. 68-74.
68. Walsh, F., *Electrode Reactions in Metal Finishing*. Transactions of the Institute of Metal Finishing, 1991. **69**: p. 107-111.
 69. Dennis, J.K. and T.E. Such, *Chapter 12 - Electroplating onto plastics*, in *Nickel and Chromium Plating (Third Edition)*, J.K. Dennis and T.E. Such, Editors. 1993, Woodhead Publishing. p. 330-362.
 70. Alsoufi, M. and A. El-Sayed, *How Surface Roughness Performance of Printed Parts Manufactured by Desktop FDM 3D Printer with PLA+ is Influenced by Measuring Direction*. American Journal of Mechanical Engineering, 2017. **5**: p. 221-222.
 71. Inagaki, N. and H. Kimura, *Electroless copper plating on acrylonitrile butadiene styrene material surfaces without chromic acid etching and a palladium catalyst*. Journal of Applied Polymer Science, 2009. **111**(2): p. 1034-1044.
 72. Bernasconi, R., et al., *Electroless Plating of NiP and Cu on Polylactic Acid and Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified for 3D Printed Flexible Substrates*. Journal of The Electrochemical Society, 2016. **163**(9): p. D526-D531.
 73. Rehrig, D.L. and N.V. Mandich, *Throwing power & cathode efficiencies of gold electroplating solutions under pulse regimes*. Plating and surface finishing, 1999. **86**(12): p. 89-93.
 74. Lelevic, A. and F.C. Walsh, *Electrodeposition of NiP alloy coatings: A review*. Surface and Coatings Technology, 2019. **369**: p. 198-220.



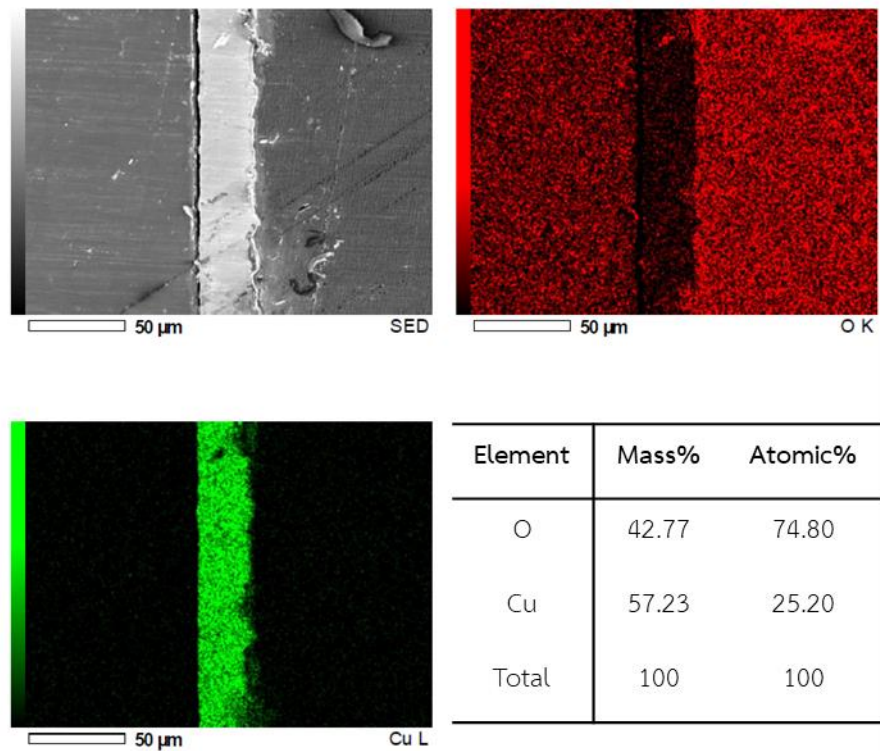
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

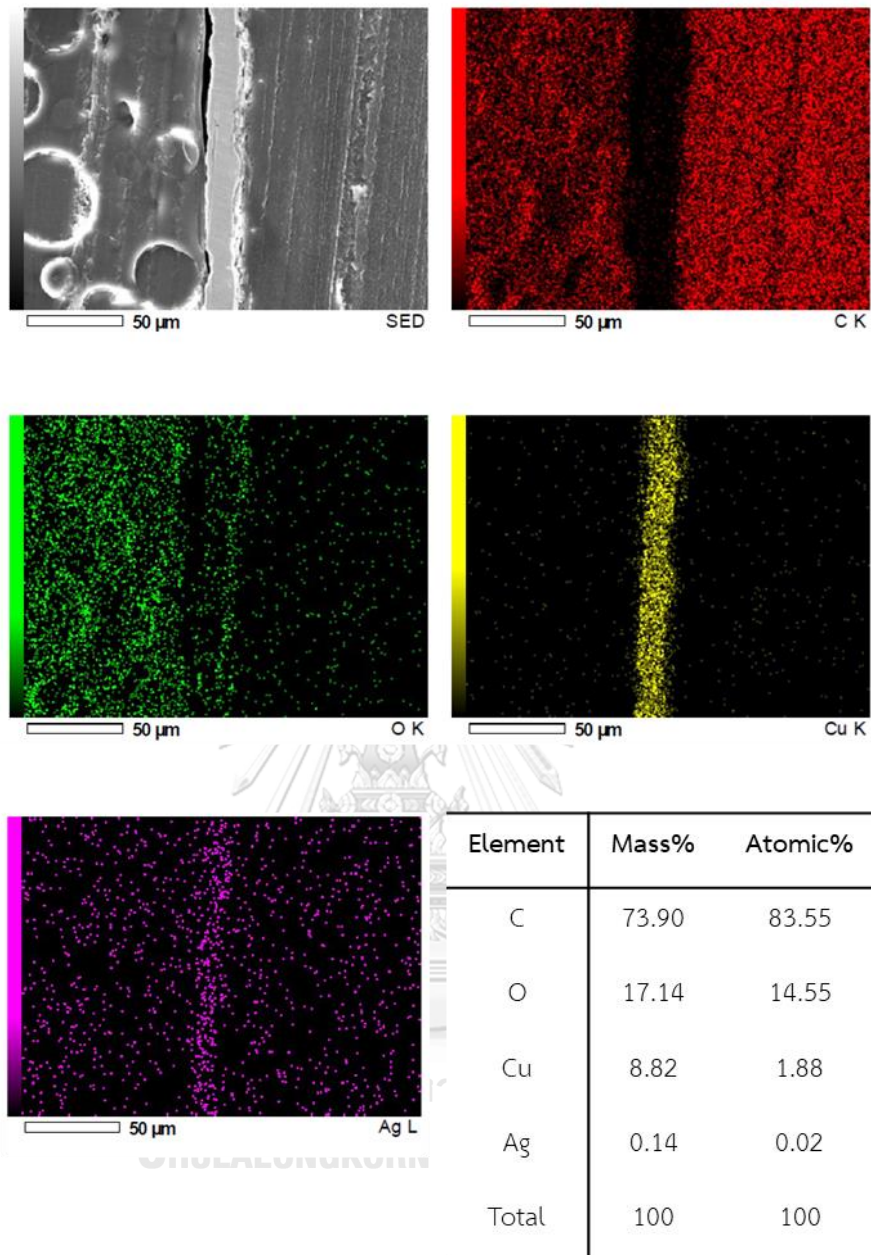
ภาคผนวก ก ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงาน



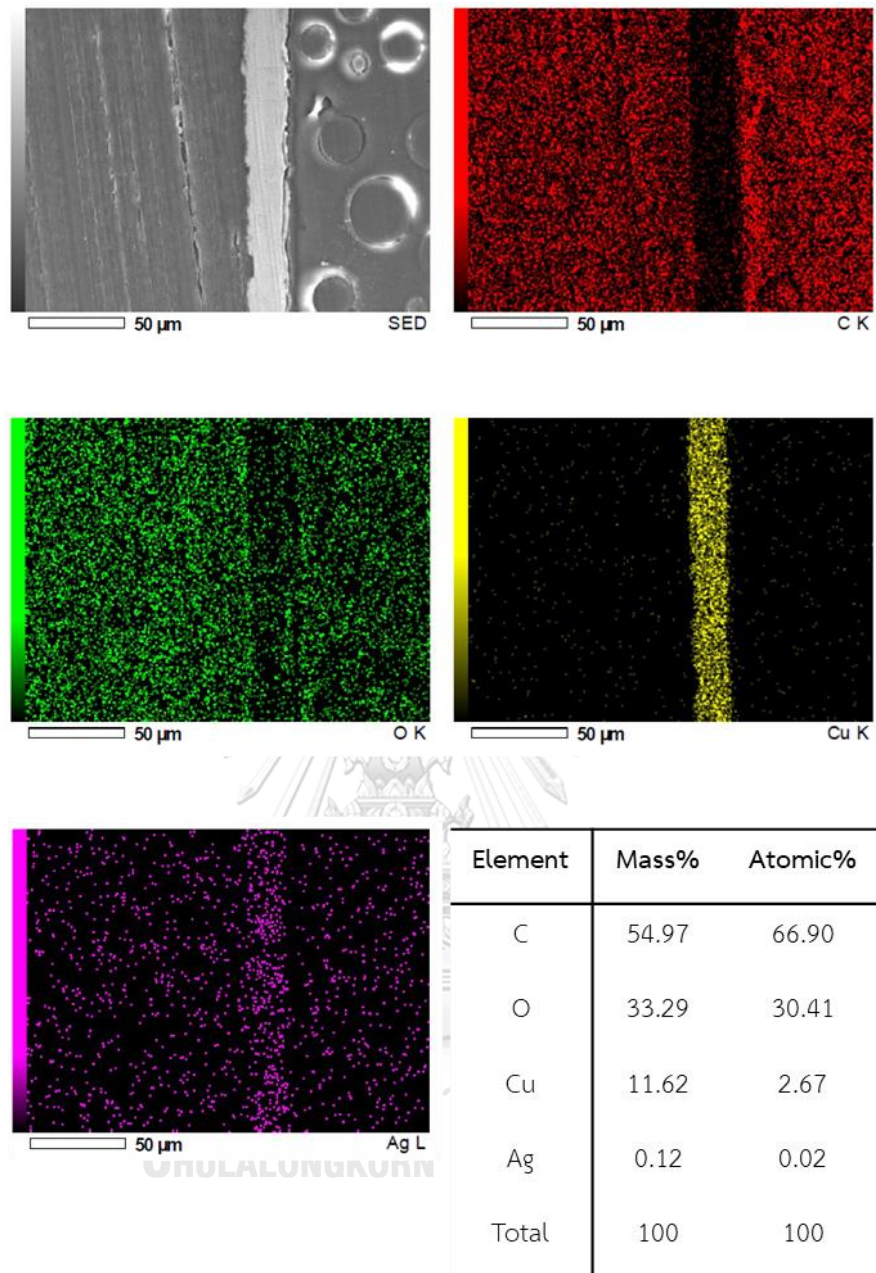
รูปที่ 5.1 โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน ABS ที่เตรียมผิวด้วยวิธีมาตรฐาน



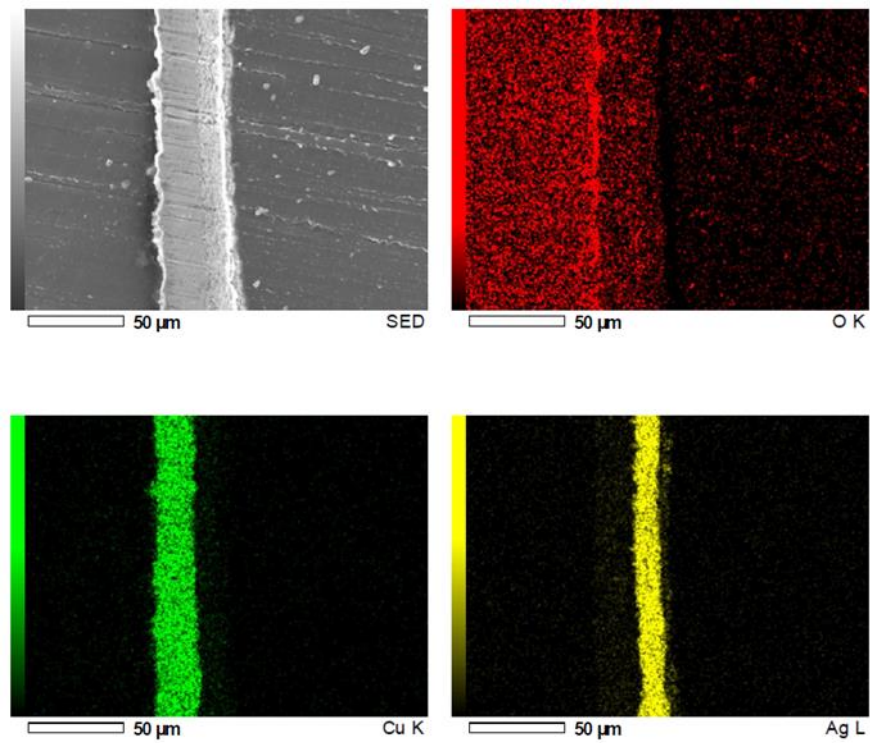
รูปที่ 5.2 โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน PLA ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม



รูปที่ 5.3 โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน ABS ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิโพลีเอทิลีนและแอคทีเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน

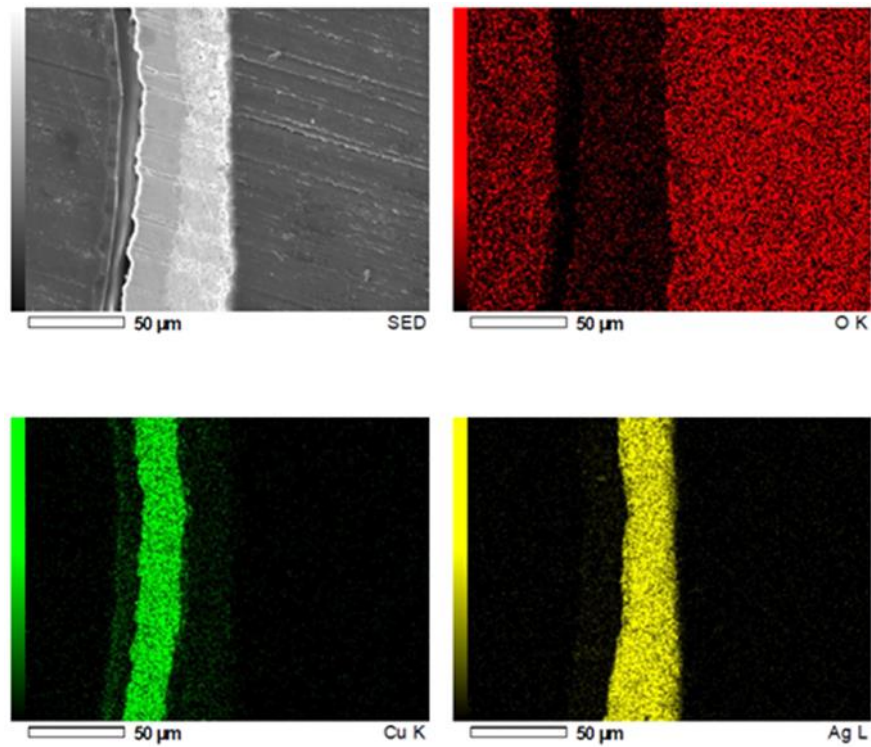


รูปที่ 5.4 โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน PLA ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิเอทิลีนเทราฟลูออไรด์และแอคทีเวทด้วยอนุภาคนาโนของเงิน



Element	Mass%	Atomic%
O	31.99	68.59
Cu	44.06	23.79
Ag	23.95	7.62
Total	100	100

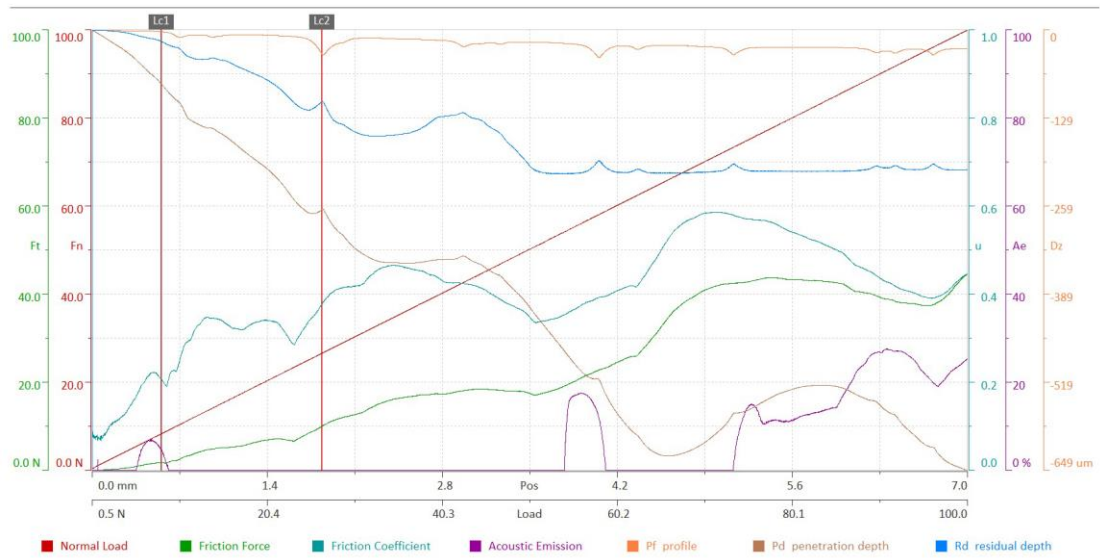
รูปที่ 5.5 โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน ABS ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการทาสีเงินนำไฟฟ้า



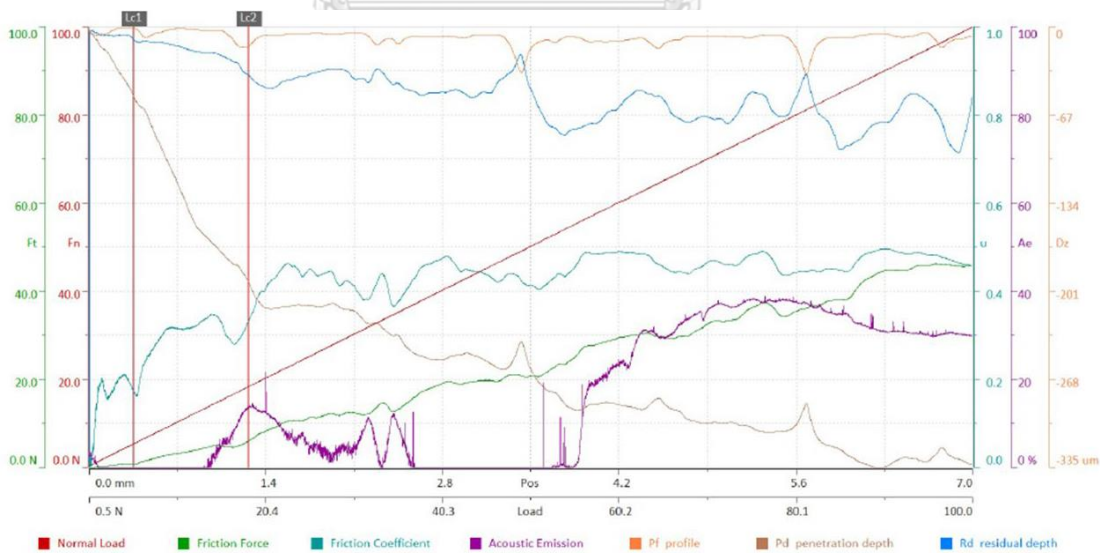
Element	Mass%	Atomic%
O	39.22	77.64
Cu	26.40	13.16
Ag	27.64	8.12
Au	6.74	1.08
Total	100	100

รูปที่ 5.6 โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน PLA ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการทาสีเงินนำไฟฟ้า

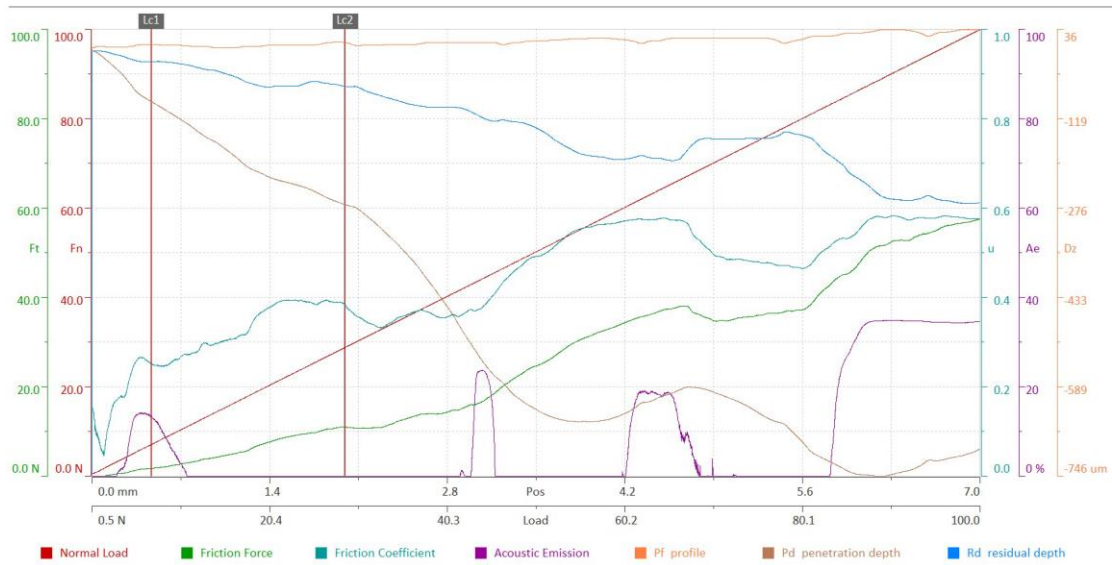
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบรอยขีดข่วน



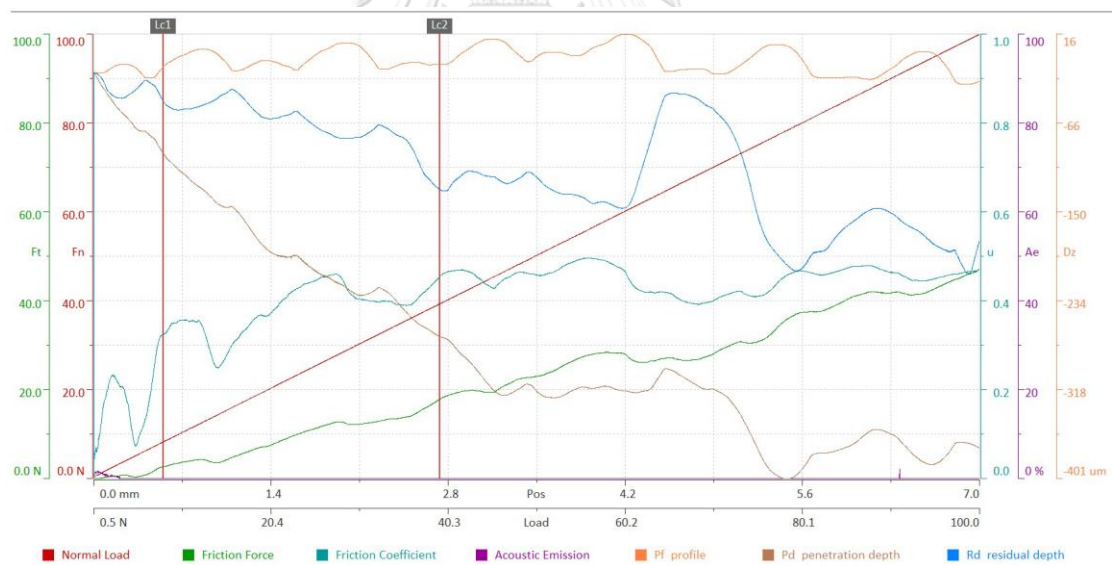
รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบรอยขีดข่วนของชั้นเคลือบทองแดงบนชิ้นงาน ABS ที่เตรียมผิวด้วยวิธีมาตรฐาน



รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบรอยขีดข่วนของชั้นเคลือบทองแดงบนชิ้นงาน PLA ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวและแอคติเวทด้วยแพลเลเดียม



รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบรอยขีดข่วนของชั้นเคลือบทองแดงบนชิ้นงาน ABS ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการ ทาสีเงินนำไฟฟ้า



รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบรอยขีดข่วนของชั้นเคลือบทองแดงบนชิ้นงาน PLA ที่เตรียมผิวด้วยวิธีการ ทาสีเงินนำไฟฟ้า

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วริณธร ศรีสุพรวิชัย
วัน เดือน ปี เกิด	25 ตุลาคม 2538
สถานที่เกิด	สมุทรปราการ
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษา โรงเรียนเซนต์โยเซฟ บางนา ปีการศึกษา 2556 ปริญญาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2560 เข้าศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	1168 ม.6 ถ.สุขุมวิท ต.สำโรงเหนือ อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10270
ผลงานตีพิมพ์	Strategies for Metallizing and Electroplating Biodegradable Polylactic acid