



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญา

วิศวกรรมวัสดุ

วิศวกรรมวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การผลิตวัสดุรูพรุนทองแดงแนวใหม่ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในสารละลายคอลลอยด์
โพลีเอทิลีนไกลคอลและกระบวนการทางความร้อน

Novel Fabrication of Porous Copper Layers Using Electrochemical Deposition from
Poly Ethylene Glycol (PEG)-Colloidal Suspension and Combustion

นามผู้วิจัย นายวงศกร มุขสิทธิ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ชัชชาติ โจนโรวรรณ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเจตน์ พชรพันธ์, Dr.-Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การผลิตวัสดุรูพรุนทองแดงแนวใหม่ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในสารละลายคอลลอยด์
โพลีเอทิลีนไกลคอลและกระบวนการทางความร้อน

Novel Fabrication of Porous Copper Layers Using Electrochemical Deposition from
Poly Ethylene Glycol (PEG)-Colloidal Suspension and Combustion

โดย

นายวงศกร มุรุสัทธา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วงศกร มุขสิทธิ 2556: การผลิตวัสดุรูพรุนทองแดงแนวใหม่ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า
ในสารละลายคอลลอยด์โพลิเอทิลีนไกลคอลและกระบวนการทางความร้อน
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชา
วิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์อภิชาติ โรจนโรวรรณ, Ph.D.
107 หน้า

การชุบไฟฟ้าเคมีเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่ายและต้นทุนต่ำ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมีแบบร่วมและการบวนการทางความร้อนในการผลิตวัสดุรูพรุนตัวขึ้นแรกทำการชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบร่วม เพื่อให้โพลิเอทิลีนไกลคอล เกิดการฝังตัวลงบนพื้นผิวทองแดง ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (ปริมาณทองแดง 35 กรัมต่อลิตร) โดยมีโพลิเอทิลีนไกลคอลกระจายตัวอยู่ จากนั้นจะผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดโพลิเอทิลีนไกลคอล ให้เกิดรูพรุน โพลิเอทิลีนไกลคอลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 100 ไมครอน ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปริมาณ โพลิเอทิลีนไกลคอล (0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร) ความหนาแน่นกระแส (1 1.5 และ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) ระยะเวลาที่ใช้ในการชุบ (15 30 และ 60 นาที) และสารเติมแต่งเจลาติน (ความเข้มข้น 250 กรัมต่อลิตร) จากนั้นวิเคราะห์สมบัติและลักษณะของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) วิเคราะห์ภาพตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) และวิเคราะห์ธาตุโดยการวาวรังสีเอ็กซ์ (XRF) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าลักษณะ โครงสร้างจุลภาคและพื้นผิวมีความพรุนตัว มีอิทธิพลมาจากปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอล ในขณะที่ความหนาแน่นกระแส ระยะเวลาที่ชุบและสารเติมแต่งเจลาตินมีแนวโน้มไม่ชัดเจน

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Wongsakorn Muthusith 2013: Novel Fabrication of Porous Copper Layers Using Electrochemical Deposition from Poly Ethylene Glycol (PEG)-Colloidal Suspension and Combustion. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Mr. Aphichart Rodchanarowan, Ph.D. 107 pages.

The electrochemical deposition was conveniently processed and a low cost. This research focused on a novel fabrication of porous copper layers using a two-step process: the electrochemical codeposition technique and combustion. In the first step, the electrodeposition of copper was simultaneously embedded with polyethylene glycol (PEG) using copper sulfate base solution (35 g/l) containing PEG under the ultrasonication. In the second step, the obtained deposit was subject to the heat at 500 °C for 30 minutes to remove the embedded PEG in the copper deposits. The average particle size of PEG using in experiments is 100 µm in diameter. The parameters used in this study include the quantity of PEG (0.05, 0.1 and 0.2 g/ml), level of current density (1, 1.5 and 3 mA/cm²), plating duration time (15, 30 and 60 min) and concentration of gelatin (250 g/l) The embedded PEG copper deposits and copper porous layers were characterized by x-ray diffractometer (XRD), Optical microscope (OM), x-ray fluorescence (XRF) and scanning electron microscope (SEM). The experimental results showed the effect of PEG quantity resulted in the formation of porous copper layers; yet the effects of current density plating duration time and concentration of gelatin are not significantly pronounced.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อ.ดร.อภิชาติ โรจนโรวรรณ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์และสนับสนุนผู้วิจัยทุกๆด้านด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ดร.ชุตินทร โชติสุวรรณ ของศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่เป็น ผู้ทรงคุณวุฒิจากนอกสถาบันมาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน มอบความรู้อันมีค่ายิ่งในการเรียน การทำงาน และสนับสนุนการดำเนินโครงการวิจัยนี้ด้วยดีตลอดมา รวมถึงพี่น้องภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและผู้เกี่ยวข้องทุกท่านซึ่งมีอาจเอ่ยนามได้อย่างครบถ้วน

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยอบรม ให้โอกาสทางการศึกษา ให้กำลังใจ รวมถึงพี่ๆและเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความเอาใจใส่และห่วงใยผู้วิจัยเสมอมา ซึ่งนำมาสู่ความสำเร็จในวันนี้

วงศกร มุธุสิทธิ
สิงหาคม 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(11)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	28
อุปกรณ์	28
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	37
ผล	37
วิจารณ์	73
สรุปและข้อเสนอแนะ	79
สรุป	79
ข้อเสนอแนะ	81
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	82
ภาคผนวก	87
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์ TGA ของ PEG	88
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าเคมีของทองแดง	90
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ XRF ของชิ้นงาน	94
ภาคผนวก ง ภาพ SEM ก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน	96
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ภาพ SEM ก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	100
ภาคผนวก ฉ ภาพ OM ก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน	104
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	107

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตารางเปรียบเทียบกระบวนการผลิตวัสดุพุนตัวและวัสดุพุนตัวที่ผิว	26
2	ความเข้มข้นของสารเคมีในสารละลายอิเล็กโทรไลต์	31
3	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา	33
ตารางผนวกที่		
ก1	ปริมาณร้อยละของทองแดง (โดยมวล) หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน	95
จ1	ร้อยละของพื้นที่อนุภาค PEG ของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบร่วมในสภาวะที่แตกต่างกัน	101
จ2	ร้อยละของความพุนตัว ของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบร่วมในสภาวะที่แตกต่างกัน	101
จ3	ร้อยละของพื้นที่อนุภาค PEG ของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบร่วมที่ระยะเวลาแตกต่างกัน	102
จ4	ร้อยละของความพุนตัว ของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบร่วมที่ระยะเวลาแตกต่างกัน	102
จ5	ร้อยละของพื้นที่อนุภาค PEG ของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบร่วมที่ระยะเวลาแตกต่างกันด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่งเจลาติน	102
จ6	ร้อยละของความพุนตัว ของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบร่วมที่ระยะเวลาแตกต่างกันด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่งเจลาติน	103

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	หลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี	4
2	สมดุลของปฏิกิริยาบริเวณผิวของโลหะที่ชุบด้วยสารละลายโลหะ	5
3	ลักษณะการโตของอะตอมในลักษณะ 2 มิติและ 3 มิติ	7
4	ลักษณะของการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าในบริเวณต่างๆ ของชิ้นงาน	7
5	การเปรียบเทียบระหว่าง (a) ภาพตัดขวางชิ้นงานก่อนชุบกับ (b) ภาพตัดขวางของชิ้นงานหลังผ่านการชุบเวลา 2 ชั่วโมงที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์	9
6	การชุบชิ้นงานโดยใช้การแทนที่ของทองแดงบนชิ้นงานด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี	10
7	ลักษณะความหนาของชั้นฟิล์มที่เคลือบเมื่อกำหนดความต่างศักย์ที่ใช้ในการชุบแตกต่างกัน	11
8	ลักษณะพื้นผิวของชั้นฟิล์มที่เคลือบเมื่อกำหนดความต่างศักย์ที่ใช้ในการชุบที่แตกต่างกัน	11
9	การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์อยู่บนพื้นผิวนิกเกิล	12
10	กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีแบบร่วมและลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการชุบ	13
11	กลไกที่เกิดขึ้นในการสะสมทางไฟฟ้าเคมีแบบร่วม	14
12	เทคนิคการกวนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้อนุภาคเกิดการแขวนลอยสำหรับเทคนิคที่เป็นที่นิยมใช้ในอ่างชุบหรือบ่อชุบแบบเปิด	16
13	ภาพถ่ายจุลภาคพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ผ่านการชุบ Ni-SiC โดยผ่านการชุบด้วยฟังก์ชันคลื่นของกระแสที่แตกต่างกัน	18
14	ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยความหนาแน่นของกระแสที่แตกต่างกัน	19
15	องค์ประกอบของการเกิดโพลีเมอร์และการเกิดโพลีเมอร์ของแข็ง	20
16	แผนภาพการผลิตวัสดุรูพรุน โดยจำแนกตามลักษณะการผลิต	21
17	การผลิตวัสดุรูพรุนตัวด้วยวิธีการหล่อโดยอาศัยวัสดุสร้างรูพรุน	22

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	การผลิตวัสดุพูนตัวด้วยวิธี Gas injection	22
19	เทคนิคการผลิตวัสดุพูนตัวแบบ Gas entrapment	23
20	ขั้นตอนการผลิตวัสดุพูนตัวด้วยเทคนิคไฟฟ้าเคมี	24
21	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างประเภทของวัสดุพูนตัวกับลักษณะการใช้งาน	25
22	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการชุบเพื่อการผลิตวัสดุพูนทองแดง	32
23	ขั้นตอนของกระบวนการทางความร้อนในการกำจัดวัสดุสร้างรูพูน	33
24	แผนภาพการศึกษาเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	35
25	แผนภาพขั้นตอนการทำงานวิจัย	36
26	อุณหภูมิที่โพลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนัก 10.35 มิลลิกรัม เกิดการสลายตัวหมด	38
27	ระยะเวลาที่โพลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนัก 10.35 มิลลิกรัม เกิดการสลายตัว	39
28	ค่าออกซิเดชันและรีดักชันของทองแดงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ต่างกัน	40
29	ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อ มิลลิลิตร (ก ข และ ค ตามลำดับ)	42
30	อิทธิพลของปริมาณ โพลิเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยชุบที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรที่ชุบเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยส่งผลต่อร้อยละพื้นที่อนุภาคที่กระจายตัวบนพื้นผิวชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน	43
31	ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อ มิลลิลิตร (ก ข และ ค ตามลำดับ)	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
32	อิทธิพลของปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยซุบที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ซุบเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยส่งผลต่อร้อยละความพรุนตัวบนพื้นผิวชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน	46
33	ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยซุบที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1 1.5 และ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (ก ข และ ค ตามลำดับ) ปริมาณโพลิเอทิลีน-ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร	48
34	อิทธิพลของความหนาแน่นกระแส 0.1 0.15 และ 0.3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีปริมาณ โพลิเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ซุบเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยส่งผลต่อร้อยละพื้นที่อนุภาคบนพื้นผิวชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน	49
35	ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยซุบที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1 1.5 และ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (ก ข และ ค ตามลำดับ) ปริมาณโพลิเอทิลีน-ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร	50
36	อิทธิพลของความหนาแน่นกระแส 0.1 0.15 และ 0.3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีปริมาณ โพลิเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ซุบเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยส่งผลต่อร้อยละความพรุนตัวบนพื้นผิวชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน	51
37	ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยซุบที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
38	อิทธิพลระยะเวลาที่ใช้ในการชุบที่ 15 30 และ 60 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยส่งผลกระทบต่อร้อยละพื้นที่อนุภาคที่กระจายตัวบนพื้นผิวชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน	54
39	ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาชุบ 15 และ 30 นาที (ก และ ข ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน	55
40	ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร	57
41	อิทธิพลระยะเวลาที่ใช้ในการชุบที่ 15 30 และ 60 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยส่งผลกระทบต่อร้อยละความพรุนตัวบนพื้นผิวชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน	58
42	ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาชุบ 15 และ 30 นาที (ก และ ข ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน-ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร หลังผ่านกระบวนการทางความร้อน	60
43	ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร และสารเติมแต่งเจลาติน	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
44	อิทธิพลของสารเติมแต่งเจลาติน ระยะเวลาที่ใช้ในการชุบที่ 15 30 และ 60 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยส่งผลกระทบต่อร้อยละพื้นที่อนุภาคที่กระจายตัวบนพื้นผิวชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน	62
45	ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร และสารเติมแต่งเจลาติน	63
46	อิทธิพลของสารเติมแต่งเจลาติน ระยะเวลาที่ใช้ในการชุบที่ 15 30 และ 60 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยส่งผลกระทบต่อร้อยละความพรุนตัวบนพื้นผิวชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน	64
47	ผล XRD ของชิ้นเคลือบก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน-ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ระยะเวลาในการชุบ 30 นาที	65
48	ผล XRD ของชิ้นเคลือบหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน-ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ระยะเวลาในการชุบ 30 นาที	66
49	ผล XRD ของชิ้นเคลือบก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน-ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตรและสารเติมแต่งเจลาติน ที่ระยะเวลาในการชุบ 30 นาที	67
50	ผล XRD ของชิ้นเคลือบก่อนหลังกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน-ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร และสารเติมแต่งเจลาติน ที่ระยะเวลาในการชุบ 30 นาที	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
51	อิทธิพลของความหนาแน่นกระแส 1 1.5 และ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรและปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ชุบเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยส่งผลต่อร้อยละปริมาณทองแดงโดยมวลหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน	69
52	อิทธิพลของเวลา 15 30 และ 60 นาที ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรและปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ชุบเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยส่งผลต่อร้อยละปริมาณทองแดงโดยมวลหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน	71
53	อิทธิพลของสารเติมแต่ง ที่ชุบด้วยระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรและปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ชุบเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยส่งผลต่อร้อยละปริมาณทองแดงโดยมวลหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน	72
54	ค่าออกซิเดชันและรีดักชันของทองแดงภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีโพลิเอทิลีนไกลคอลกระจายตัวอยู่ และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เติมเจลาติน โดยมีโพลิเอทิลีนไกลคอลกระจายตัวอยู่	74
55	เปรียบเทียบระหว่างลักษณะการชุบภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีเจลาติน โดยที่ (ก) ที่สภาวะปกติ และ (ข) ลักษณะการชุบภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีเจลาตินที่สภาวะอัลตราโซนิก	75
56	กลไกการเกิดลักษณะพรุณตัวที่ผิวโดยวัสดุสร้างรูพรุณโพลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)	76
57	เปรียบเทียบลักษณะการฝังตัวของโพลิเอทิลีนไกลคอลโดยที่ (ก) ปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอลน้อย และ (ข) ปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอลมาก	77
58	กลไกที่เป็นไปได้ของระยะเวลาชุบที่แตกต่างกันกับลักษณะความพรุณตัวที่ผิว	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ผลการวิเคราะห์ TGA ของ PEG	89
ข1 การวิเคราะห์เคมีไฟฟ้าของทองแดงภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (ปริมาณความเข้มข้น Cu 35 กรัมต่อลิตร)	91
ข2 การวิเคราะห์เคมีไฟฟ้าของทองแดงภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (ปริมาณความเข้มข้น Cu 35 กรัมต่อลิตร) ที่มี	
โพลีเอทิลีน ไกลคอลกระจายตัวอยู่ (ปริมาณ PEG 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตร)	92
ข3 การวิเคราะห์เคมีไฟฟ้าของทองแดงภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (ปริมาณความเข้มข้น Cu 35 กรัมต่อลิตร) ที่มีโพลีเอทิลีน-ไกลคอลกระจายตัวอยู่ (ปริมาณ PEG 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตร) และสารเติมแต่ง	
เจลาติน (ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตรถูกเติมในปริมาณ 5 มิลลิลิตรต่อลิตร)	93
ง1 ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร (ง จ และ ฉ ตามลำดับ) และที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร (ช ซ และ ญ ตามลำดับ)	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ง2	ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อ มิลลิลิตร (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อ มิลลิลิตร (ง จ และ ฉ ตามลำดับ) และที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร (ซ ซ และ ฉ ตามลำดับ)	98
ง3	ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร และสารเติมแต่งเจลาติน	99
ง4	ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร และสารเติมแต่งเจลาติน	99
ฉ1	ลักษณะภาพตัดขวางของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 15 และ 30 นาที (ก และ ข ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิ-แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อ มิลลิลิตร	105
ฉ2	ลักษณะภาพตัดขวางของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 15 และ 30 นาที (ก และ ข ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิ-แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อ มิลลิลิตร	106

คำอธิบายและสัญลักษณ์ย่อ

BaTiO ₃	=	แบเรียมไททานेट
Ba(CH ₃ COO)	=	แบเรียมอะซิเตท
Cu	=	คอปเปอร์ (ทองแดง)
CuO	=	คอปเปอร์ออกไซด์
Cu ₂ P ₂ O	=	คอปเปอร์ฟอสเฟต
C ₆ H ₁₁ O ₇ Na	=	โซเดียมกลูโคเนต
F ₂ SO ₄	=	ฟลูออโรซัลเฟต
g/ml	=	กรัมต่อมิลลิลิตร
KOH	=	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
Log i (mA)/Area (cm ²)	=	ค่ากระแสฐานสิบ (มิลลิแอมป์) ต่อพื้นที่ (ตารางเซนติเมตร)
mA/cm ²	=	มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร
NaOH	=	โซเดียมไฮดรอกไซด์
Ni-YSZ	=	นิกเกิล-ยทรีียม สเตบิลไลซ์ เซอร์โคเนีย (Ni-Yttria stabilized zirconia)
NiCoSiC	=	นิกเกิลโคบอลต์ซิลิกอนคาร์ไบด์
NiSiC	=	นิกเกิลซิลิกอนคาร์ไบด์
Potential applied (V) VS. SCE	=	ความต่างศักย์ (โวลต์) เทียบกับ Saturated Calomel Electrode
SEM	=	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
TiN/Si	=	ไทเทเนียมไนไตรด์/ซิลิกอนไนไตรด์
Area fraction of embedded PEG (%)	=	ร้อยละพื้นที่อนุภาค PEG ผั่งตัว
Area fraction of porosity (%)	=	ร้อยละพื้นที่รูพรุน
XRD	=	เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer)
XRF	=	เครื่องวัดการวาวของอิเล็กตรอน (X-Ray Fluorescence Spectrometer)

**การผลิตวัสดุรูพรุนทองแดงแนวใหม่ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า
ในสารละลายคอนลอยด์โพลีเอทิลีนไกลคอลและกระบวนการทางความร้อน**

**Novel Fabrication of Porous Copper Layers Using Electrochemical Deposition
from Poly Ethylene Glycol (PEG)-Colloidal Suspension and Combustion**

คำนำ

วัสดุรูพรุนตัวเป็นวัสดุที่มีช่องว่างแทรกตัวอยู่ภายในเนื้อวัสดุ โดยพบว่าวัสดุรูพรุนตัวมีความหลากหลายลักษณะตามการใช้งานซึ่งแบ่งได้ตามประเภทของการใช้งานไม่ว่าจะเป็นงานในระดับจุลภาคจนถึงงาน โครงสร้าง ซึ่งมีลักษณะรูพรุนเปิดไปจนถึงรูพรุนปิด (Smith *et al.*, 2012) ซึ่งการผลิตวัสดุรูพรุนตัวล้วนจะต้องอาศัยวัสดุสร้างรูพรุนทั้งสิ้นไม่ว่าจะเป็น หินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต แป้งมันสำปะหลัง ผงโพลีเมอร์ (Cambronero *et al.*, 2009; Mansourighari *et al.*, 2012; Manonukul *et al.*, 2010) เป็นต้น ซึ่งความพรุนตัว ลักษณะความพรุนตัวและปริมาณรูพรุนของวัสดุ โดยทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุสร้างรูพรุน อย่างไรก็ตามการผลิตวัสดุรูพรุนตัวหรือวัสดุรูพรุนตัวที่ผิวจะมีลักษณะของอนุภาคที่เกิดการยึดติดกันอย่างไม่เป็นระเบียบหรือยากที่จะควบคุมลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้น ดังนั้นการใช้กระบวนการชุบด้วยไฟฟ้าจึงเป็นการประยุกต์ใช้การชุบด้วยไฟฟ้ามาทำการผลิตวัสดุรูพรุนที่มีการผสมผสานระหว่างรูพรุนเปิดและรูพรุนปิดโดยอาศัยสร้างรูพรุนที่เป็นโพลีเมอร์คือ โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethyleneglycol: PEG) ผสมลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อทำการชุบวัสดุและผ่านกระบวนการทางความร้อน

การชุบด้วยไฟฟ้าเคมี (Electroplating) เป็นการปรับปรุงผิววัสดุโดยอาศัยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (สารโรซ และอภิชาติ, 2526) โดยการชุบด้วยไฟฟ้าเคมีสามารถนำมาชุบผิวเพื่อให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เช่น การชุบเพื่อปรับปรุงพื้นผิวให้มีความสามารถทนต่อการถูกกัดกร่อน การชุบเพื่อทนต่อการขีดข่วนที่ผิว (Carpenter *et al.*, 2011) เป็นต้น การนำการชุบด้วยไฟฟ้าเคมีมาประยุกต์เป็นการชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม (Electro codiposition) คือการเติมอนุภาคของแข็งลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ส่งผลให้เกิดเฟสบนผิวชิ้นงานมากกว่าหนึ่งเฟส (Low *et al.*, 2006) โดยมีความพยายามหลายวิธีเพื่อจะให้อนุภาคของแข็งเกิดการกระจายตัวในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไม่ว่าจะเป็นการทดลองใช้แท่งแม่เหล็กกวนสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อผลิตชั้นฟิล์มเชิงประกอบที่เป็น

Ni-SiC (Narasimmam *et al.*, 2011) หรือการใช้ใบพัดกวนสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อผลิตฟิล์มเชิงประกอบ Ni-SiC ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม (Cai *et al.*, 2011)

ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุพอร์นที่ผิวทองแดงด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมภายใต้สภาวะอัลตราโซนิกเพื่อให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวและกระบวนการทางความร้อน โดยศึกษาอิทธิพลในการผลิตวัสดุพอร์นตัวที่ผิวภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความหนาแน่นกระแส ปริมาณอนุภาคที่กระจายตัวในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เวลาที่ใช้ในการชุบ และอิทธิพลของสารเติมแต่งเจลาตินที่มีผลต่อลักษณะพื้นผิวของทองแดงหลังจากทำการชุบ เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการสร้างวัสดุพอร์นตัวที่ผิวต่อไป

วัตถุประสงค์

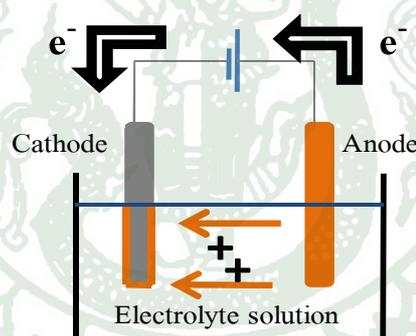
งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ใช้กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีในสารละลายคอลลอยด์ และกระบวนการทางความร้อนเพื่อผลิตวัสดุพอร์นตัวที่ผิว โดยมีขอบเขตการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ศึกษาความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ในการชุบที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวของชั้นเคลือบ
2. ศึกษาปริมาณอนุภาคที่เติมลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการชุบว่ามีผลต่อการกระจายตัวของรูพอร์น ตลอดจนปริมาณของรูพอร์นที่ปรากฏอยู่บนผิวของชั้นเคลือบ
3. ศึกษาความแตกต่างกันของระยะเวลาที่ใช้ในการชุบที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวของชั้นเคลือบ
4. ศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งเจลาตินที่มีผลต่อลักษณะความพอร์นตัวที่ผิวของวัสดุที่ผ่านการชุบ

การตรวจเอกสาร

1. การชุบเคลือบด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

สาโรช และ อภิชาติ (2526) ได้ศึกษาการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่นำเอาชิ้นงานหรือวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้มาผ่านการชุบผิว เคลือบผิว ซึ่งอาศัยกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงเข้ามาช่วยโดยอาศัยแรงเคลื่อนทางไฟฟ้าส่งผลให้อิออนของโลหะที่จะเคลือบบนผิวชิ้นงานวิ่งไปยังผิวของชิ้นงานที่ต้องการชุบ ซึ่งชิ้นงานที่ต้องการชุบจะเป็นแคโทด(Cathode) โดยวัสดุที่ต้องการให้จับตัวบนผิวของวัสดุที่ต้องการชุบจะเป็นแอโนด (Anode) หรือเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวก เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปสู่แคโทดจะทำให้ไอออนบวกจากขั้วแอโนดหรือจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไปยึดติดกับผิวของชิ้นงานที่แคโทด ส่งผลให้เกิดการชุบผิวเกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 1



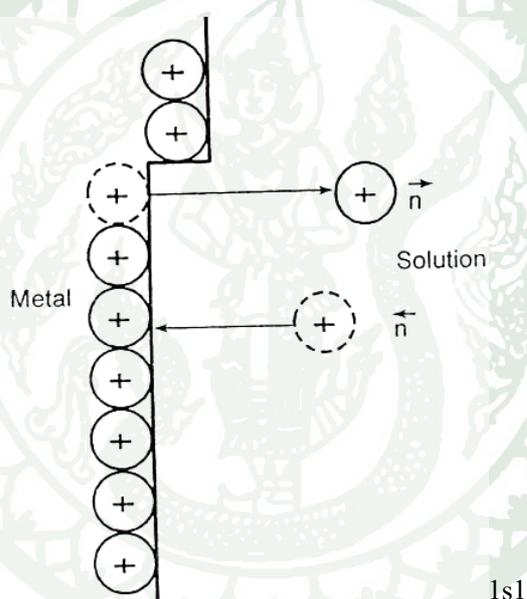
ภาพที่ 1 หลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี

Schlesinger and Paunovic (2000) ทำการศึกษาโดยให้โลหะ M ถูกจุ่มอยู่ในสารละลายที่ประกอบด้วยโลหะ M^{z+} เมื่อทำการให้กระแสไฟฟ้าจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโลหะที่ต้องการชุบกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมี M^{z+} บางไอออนของ M^{z+} จะเข้าไปก่อตัวเกิดเป็นผลึกในชั้นเริ่มต้นนี้จะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดได้เร็วกว่าปฏิกิริยาอื่นๆ ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีผลต่อการชุบในแต่ละครั้ง เมื่อผ่านชั้นเริ่มต้นไปแล้วไอออนภายในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงจากไอออน M^{z+} เป็น q^{-M} ซึ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่รอบโลหะ M จะมีสภาพเป็นไอออนลบทั้งสิ้น จากนั้นไอออนลบ q^{-M} ที่อยู่ภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะ

วิ่งเข้าหาขั้วบวกและไอออนบวกภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ M^{Z+} จะเข้ามาแทนที่ที่เกิดเป็นปฏิกิริยาต่อไปดังสมการ (1)



เมื่อ Z คือจำนวนของอิเล็กตรอนภายในปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดจากขวาไปทางซ้ายจะเรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่จุดสมดุลของปฏิกิริยาจำนวนไอออนบวก M^{Z+} ที่เข้าไปยึดจับกับที่ผิวโลหะ M จะมีค่าเท่ากับจำนวนของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา ซึ่งแสดงในภาพที่ 2



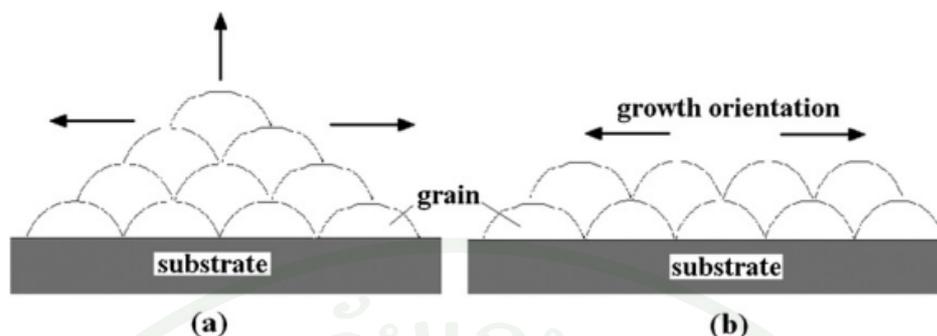
ภาพที่ 2 สมดุลของปฏิกิริยาบริเวณผิวของโลหะที่ชุบด้วยสารละลายโลหะ

ที่มา: Schlesinger and Paunovic (2000)

สาโรช และอภิชาติ (2526) ในการชุบโลหะเพื่อให้ผิวที่ผ่านการชุบให้ออกมามีคุณภาพตามที่ต้องการจะต้องมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งก่อนชุบและหลังชุบ เพื่อให้การชุบโลหะหรือชิ้นงานที่ออกมาตรงตามความต้องการ อิทธิพลที่มีผลต่อการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าเบื้องต้นมีดังต่อไปนี้

ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบและขั้วบวก หรือประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า การชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าจะมีความแตกต่างกันทั้งประสิทธิภาพขั้วลบและขั้วบวก ซึ่งสามารถ นิยามได้ 2 ลักษณะคือ ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ถูก นำไปใช้ในกระบวนการชุบที่ผิวจริงๆ ต่อปริมาณกระแสที่ผ่านลงไปทั้งหมดในสภาวะปกติของการ ชุบด้วยกระแสไฟฟ้าจะมีค่าไม่ถึงร้อยละ 100 ของทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ทั้งนี้เพราะกระแสไฟฟ้าที่ ผ่านเข้าไปยังสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไม่ได้ทำให้ไอออนบวกของโลหะไปยึดเกาะที่ขั้วลบเพียง อย่างเดียว แต่ถูกนำไปใช้ในกระบวนการอื่นๆ เช่น กระบวนการแยกสลายโมเลกุลของน้ำทำให้เกิด ฟองก๊าซขณะชุบ หรือถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนขณะชุบ เป็นต้น โดยแนวทางการแก้ปัญหาสามารถ ทำได้หลายวิธี เช่น อาจใช้พื้นที่ผิวของขั้วบวกและขั้วลบไม่เท่ากันเข้าช่วย หรืออาจใช้สารเคมีเติม แต่งเพื่อช่วยลดหรือเพิ่มการละลายของขั้วบวกเข้าช่วย เป็นต้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะช่วยปรับให้ ประสิทธิภาพขั้วบวกและขั้วลบมีความใกล้เคียงกัน

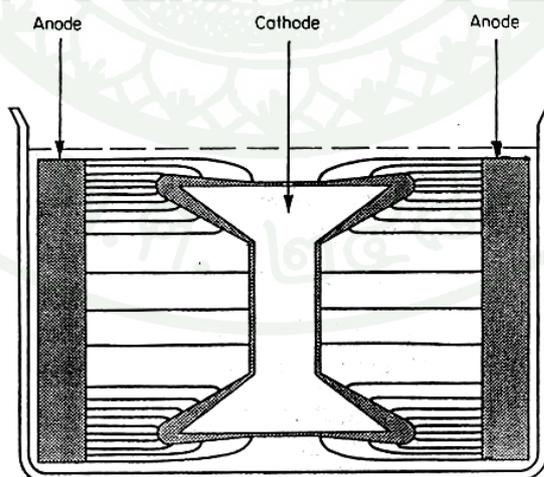
ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า โดยความหมายคือ ปริมาณของกระแสไฟฟ้าต่อหนึ่ง หน่วยพื้นที่ ซึ่งการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าที่ได้ผลดีจะต้องเลือกช่วงค่าความหนาแน่นของ กระแสในการชุบ ซึ่งสามารถหาได้จากการวัดค่ารีดักชันของโลหะชนิดนั้นๆด้วยกระแสไฟฟ้าผ่าน เครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat) โดยที่ค่ารีดักชันของโลหะจะ บอกระดับความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของโลหะชนิดนั้นๆ ดังนั้นการเลือกช่วงกระแสที่ เหมาะสมจะอยู่ระหว่างค่าจำกัดของกระแส (Limiting current density) กับค่าจำกัดของปฏิกิริยา ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction limit) ซึ่งโลหะแต่ละชนิดจะมีค่าที่แตกต่างกัน (Li *et al.*, 2011) ในสภาวะปกติทำการชุบที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่ำจะมีการจัดเรียงอะตอมได้ ดีกว่ารวมไปถึงการยึดเกาะของอะตอมจะเกิดขึ้นในแนวระนาบ 2 มิติ ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานมีความ สวยงามมากกว่าและการยึดเกาะของอะตอมได้คิดว่า ในทางตรงกันข้ามที่ความหนาแน่นของ กระแสที่สูงจะส่งผลให้อะตอมจะเกิดขึ้นในทิศทาง 3 มิติ ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของอะตอมได้ไม่ ดี ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ลักษณะการโตของอะตอมในลักษณะ 2 มิติและ 3 มิติ

ที่มา: Li *et al.* (2011)

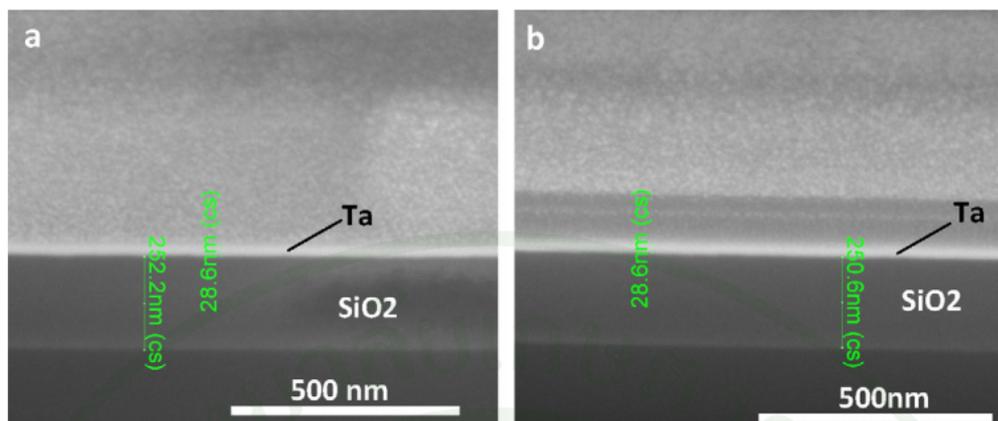
สาโรช และ อภิชาติ (2526) พบว่าการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าและลักษณะของชิ้นงานที่ทำกรชุบมีผลต่อการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าโดยตรง พบว่าจุดต่างๆ บนชิ้นงานจะมีระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าเท่ากับกับจุดใดที่อยู่ใกล้ขั้วลบ กระแสไฟฟ้าจะเดินทางได้สะดวกทำให้มีลักษณะการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าบริเวณจุดที่อยู่ใกล้มากกว่าจุดที่อยู่ใด บริเวณที่มีลักษณะเป็นมุมหรือจุดแหลมจะมีการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้ามากกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่งอาจจะแสดงลักษณะการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าและความหนาที่เคลือบบนชิ้นงานดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ลักษณะของการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าในบริเวณต่างๆ ของชิ้นงาน

ที่มา: สาโรช และ อภิชาติ (2526)

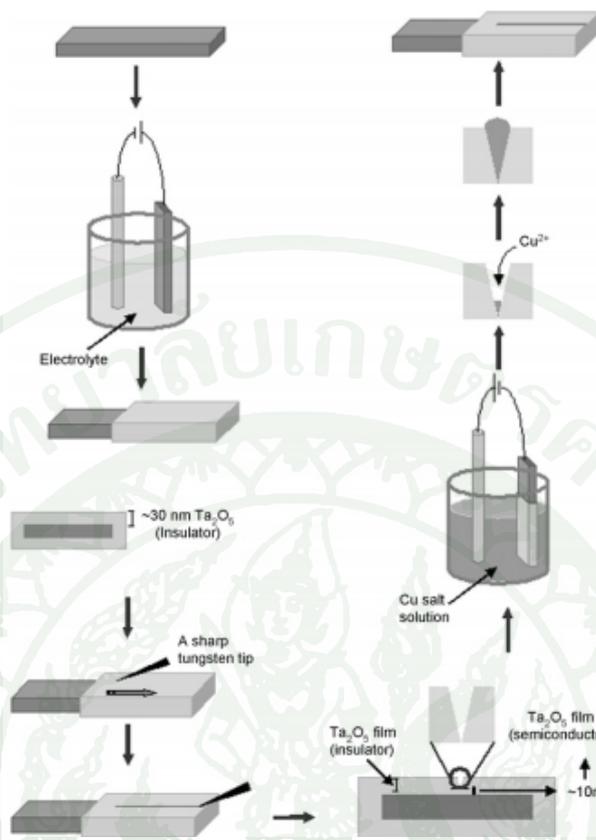
การชุบชิ้นงานด้วยไฟฟ้าเคมีสามารถประยุกต์ใช้งานได้ในหลายๆ พื้นผิวทั้งวัสดุที่นำไฟฟ้าหรือวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า จุดประสงค์หลักของการชุบผิวด้วยไฟฟ้าเคมีเพื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวให้ตรงตามความต้องการ โดยงานวิจัย (Park *et al.*, 2009) ได้ทำการใช้วิธีการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุพอร์ซิวที่เป็น Ni-YSZ ให้ผิวของวัสดุเคลือบด้วยชั้นของทองแดง ซึ่งในงานวิจัยได้กำหนดปัจจัยในการชุบหลายๆ ปัจจัยด้วยไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการชุบเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาของชั้นทองแดงให้ตรงตามความต้องการ หลังจากการชุบพบว่า การชุบชิ้นงานด้วยสารอิเล็กโทรไลต์ คือ คอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ที่ความเข้มข้น 0.075 โมลต่อลิตรที่ระยะเวลา 30 นาที โดยให้ความหนาแน่นของกระแสที่ 0.1 แอมป์ต่อตารางเดซิเมตร หลังจากชิ้นงานผ่านการชุบที่ระยะเวลาแตกต่างกันคือ 30 60 และ 180 นาที พบว่าปริมาณของคอปเปอร์จะมีค่าลดลงตามความลึกจากผิวของชิ้นงาน โดยความหนาของชั้นเคลือบที่ 400 200 และ 100 ไมครอน ตามสัดส่วนของระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งอาจนำกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการชุบไปประยุกต์ใช้ทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนที่จะทำการชุบได้ (Starosvetsky *et al.*, 2010) ได้ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการชุบทองแดงบนแทนทาลัม (Ta) โดยเป็นส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกใช้ไฟฟ้าเคมีในการทำความสะอาดพื้นผิวและส่วนที่สองคือการใช้ไฟฟ้าเคมีในการชุบแทนทาลัมด้วยทองแดง สิ่งที่ศึกษาคือความสัมพันธ์ในด้านของความเข้มข้นของสารละลาย KOH ที่ใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิว และช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำความสะอาดชิ้นงานก่อนทำการชุบ ในการชุบได้ศึกษาความหนาว่ามี ความสัมพันธ์กับระยะเวลาและความต่างศักย์ที่ใช้ชุบชิ้นงานอย่างไร พบว่าสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะสามารถทำความสะอาดชิ้นงานได้มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบได้จากค่าออกซิเดชันของชิ้นงาน และเมื่อทำการเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการชุบเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ (ความเข้มข้น 0.03 โมลของ Cu^+) ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบระหว่าง (a) ภาพตัดขวางชิ้นงานก่อนชุบกับ (b) ภาพตัดขวางของชิ้นงานหลังผ่านการชุบเวลา 2 ชั่วโมงที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์

ที่มา: Starosvetsky *et al.* (2010)

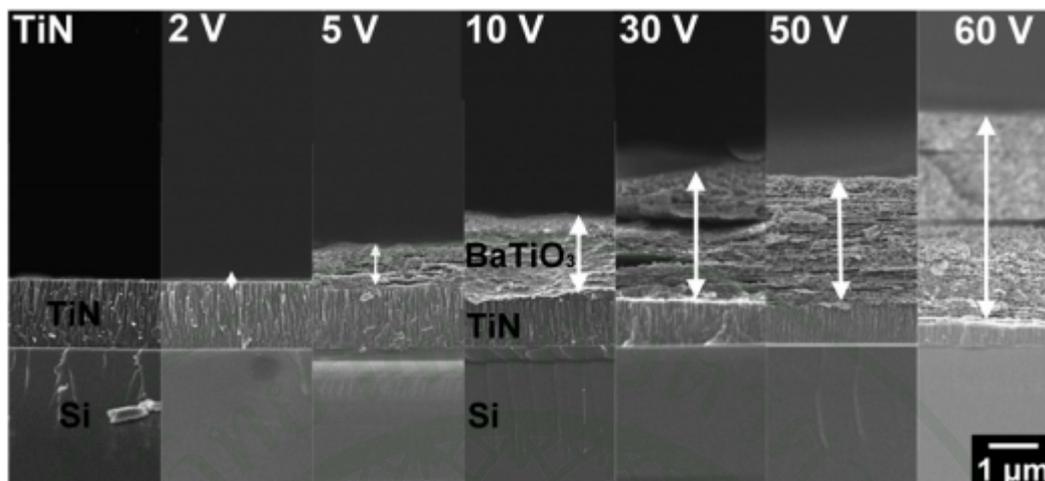
การประยุกต์ใช้การชุบไฟฟ้าเคมีไม่จำเป็นจะต้องใช้การเคลือบที่ผิวเพียงอย่างเดียว แต่สามารถใช้การชุบด้วยเคมีไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ให้เกิดการแทนที่ของอะตอมอยู่ในบริเวณที่ต้องการได้ (El-Sayed *et al.*, 2007) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้การชุบผิวด้วยเคมีไฟฟ้าทำการชุบโลหะบนวัสดุกึ่งตัวนำเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการการแทนที่ของอนุภาคที่ชุบ ซึ่งในการศึกษาได้เลือกทองแดงเป็นวัสดุแทนที่ซึ่งมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดีและสามารถเตรียมได้ง่ายไม่มีความยุ่งยากในขั้นตอนการเตรียม ซึ่งทองแดงสามารถเตรียมได้จากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 0.05 โมล หลังจากได้ชิ้นงานแล้ว ผู้ทดลองได้นำมาทดสอบความหนาของชิ้นงานเพื่อให้ตรงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยเป็นการทดลองในระดับจุลภาคก่อนที่จะนำค่าตัวแปรตลอดจนกระบวนการผลิตไปประยุกต์ใช้ในระดัมหัพภาคต่อไป จากผลการทดลองพบว่าสามารถผลิตชั้นทองแดงที่มีความหนาได้ประมาณ 30 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยทำการชุบในรูปแบบ Cyclic voltammograms ที่ความต่างศักย์ 0.8 จนถึง -0.8 โวลต์



ภาพที่ 6 การชุบชั้นงานโดยใช้การแทนที่ของทองแดงบนชั้นงานด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

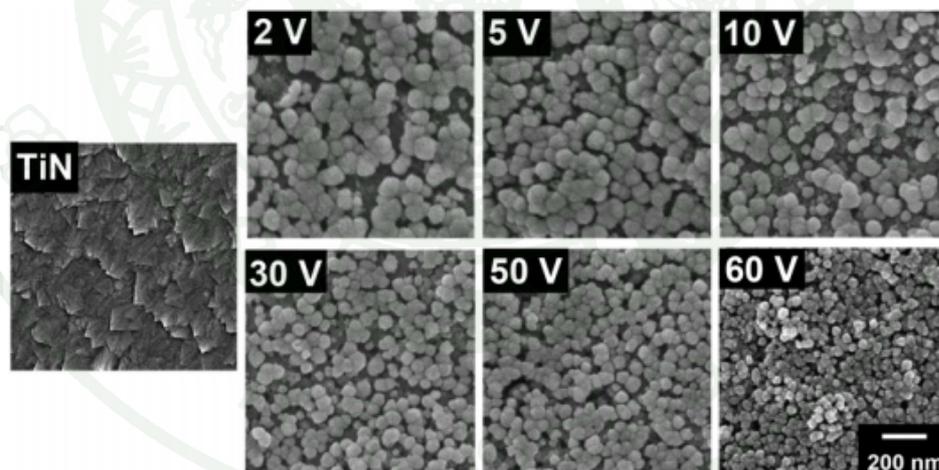
ที่มา: El-Sayed *et al.* (2007)

นอกจากนี้ยังสามารถใช้เคมีไฟฟ้าในการปรับปรุงพื้นผิวให้มีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น (Rehim *et al.*, 2000) ทำการชุบผิวเหล็กกล้าด้วยทองแดง อาศัยกระบวนการชุบด้วยกระแสไฟฟ้า จากกรด $C_6H_{11}O_7Na$ สารละลาย $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ และ สารละลาย F_2SO_4 ที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถชุบผิวของเหล็กกล้าด้วยทองแดงได้ทั้งหมด โดยที่ไม่ส่งผลต่อผิวของเหล็กกล้า โดยงานวิจัยนี้มีผลการทดลองที่สอดคล้องกับที่ศึกษาการชุบ TiN/Si ด้วยฟิล์มที่เป็น $BaTiO_3$ ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า ผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็น $Ba(CH_3COO)_2$ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรและสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร โดยใช้ระยะเวลาในการชุบครั้งที่ 1 นาที และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยกำหนดความแตกต่างของความต่างศักย์ที่ 2 5 10 30 50 และ 60 โวลต์ พบว่าเมื่อความต่างศักย์เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความหนาของชั้นฟิล์มมีความหนาเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 7 ทำให้สอดคล้องกันกับลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นเมื่อความต่างศักย์เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดของเกรนมีความเล็กลงดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 7 ลักษณะความหนาของชั้นฟิล์มที่เคลือบเมื่อกำหนดความต่างศักย์ที่ใช้ในการชุบแตกต่างกัน

ที่มา: Rehim *et al.* (2000)



ภาพที่ 8 ลักษณะพื้นผิวของชั้นฟิล์มที่เคลือบเมื่อกำหนดความต่างศักย์ที่ใช้ในการชุบที่แตกต่างกัน

ที่มา: Rehim *et al.* (2000)

2. การชุบเคลือบทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม

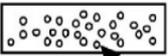
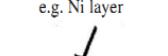
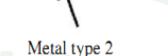
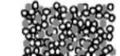
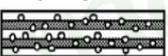
การชุบเคลือบทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมเป็นกระบวนการผลิตชั้นเคลือบให้เป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composites coating) ทำให้ได้ชั้นเคลือบที่มีเพสมากกว่าหนึ่งเพส เช่น ชั้นเคลือบนิกเกิลที่มีซิติเนียมออกไซด์กระจายตัวอยู่ (Hasannejad *et al.*, 2011) ชั้นเคลือบ NiCoSiC กระจายตัวอยู่บนผิวเหล็กกล้าคาร์บอน (Yang and Cheng, 2013) หรือชั้นเคลือบซิลิกอนคาร์ไบด์ กระจายตัวอยู่บนผิวนิกเกิล (Kyu and Jae, 1998) ดังแสดงในภาพที่9



ภาพที่ 9 การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์อยู่บนพื้นผิวนิกเกิล

ที่มา: Kyu and Jae (1998)

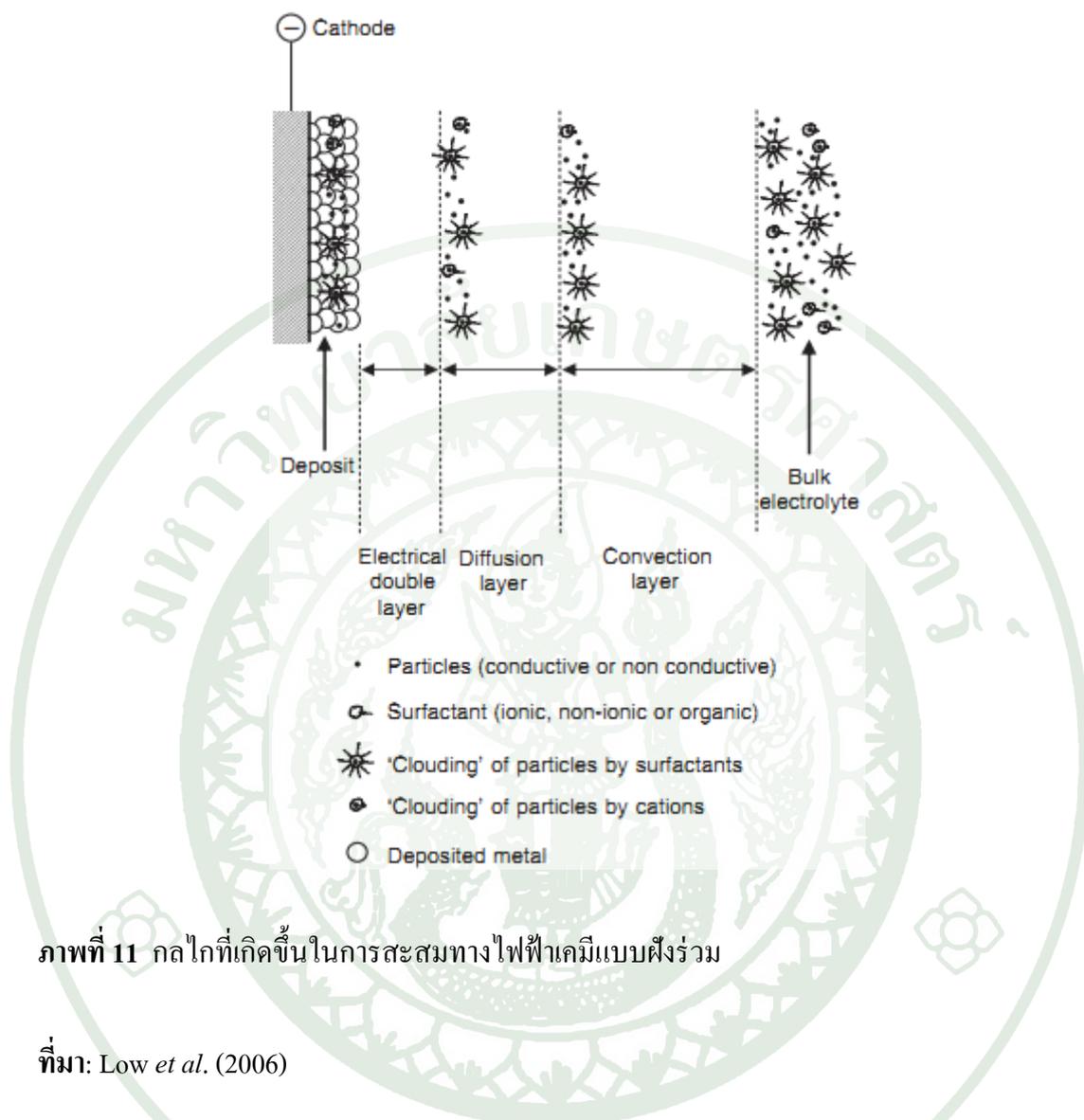
จากงานวิจัยที่กล่าวไปข้างต้นเป็นเทคนิคการชุบด้วยเคมีไฟฟ้าที่ถูกเรียกว่า การชุบเคลือบทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม (Codeposition) ซึ่งเป็นการชุบผิวที่ทำให้สามารถปรับปรุงพื้นผิวได้หลายลักษณะตามที่ต้องการ เช่น ปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล ปรับปรุงคุณสมบัติต้านทานต่อการถูกกัดกร่อน ตลอดจนปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมกับงานที่ใช้ เป็นต้น ซึ่งลักษณะของชั้นเคลือบขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ปัจจัยดังแสดงในภาพที่10

Methods of electrodeposition	Types of nanostructure materials			
	Nanoparticles in a metal deposit	Nanomultilayers	Nanotubes/nanowires	Nanocrystalline materials
Direct current (DC)	Single metal deposit 	Metal type 1 e.g. Ni layer 	Nanotubes 	Single metal 
Pulsed direct current (PDC)	Alloy deposit 	Metal type 2 e.g. Cu layer 	Nanowires 	Alloy 
Pulsed reverse current (PRC)				
Potentiostatic (P)	Multilayer deposit 		Tree-like nanowires 	Fe Co 
Pulsed potentiostatic (PP)				

ภาพที่ 10 กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมและลักษณะของชั้นงานที่ได้จากการชุบ

ที่มา: Low *et al.* (2006)

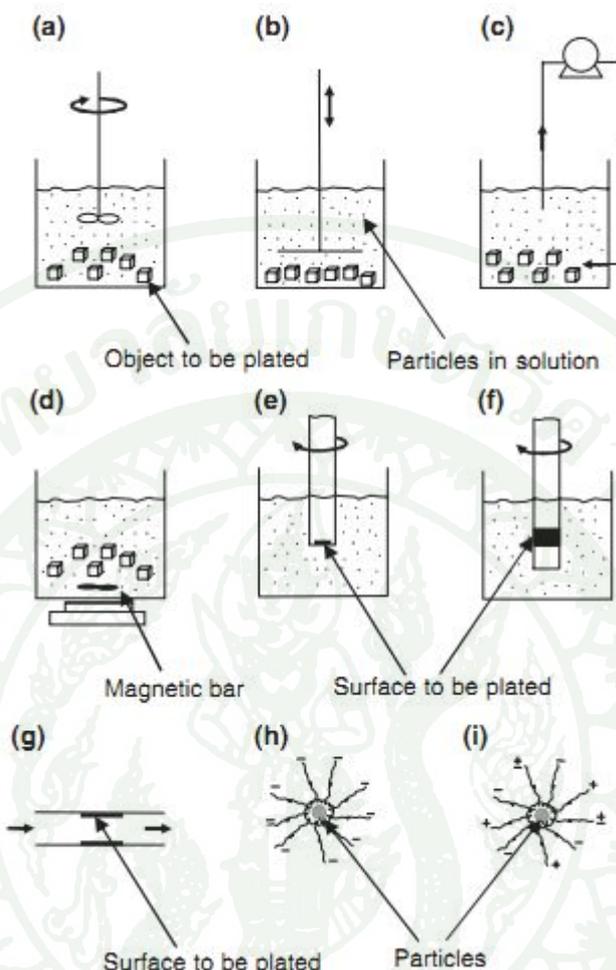
การชุบเคลือบทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม (Low *et al.*, 2006) ถูกพัฒนาเริ่มต้นมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1950 โดยเป้าหมายของการพัฒนาเพื่อต้องการพัฒนาสมบัติของชั้นเคลือบให้ดียิ่งขึ้นกว่าเดิม ในยุคเริ่มแรกได้ทดลองเติมอนุภาคที่เป็นลักษณะของแข็งลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้ อนุภาคเกิดการกระจายตัวภายในเนื้อของวัสดุที่ทำการชุบ ส่งผลให้วัสดุมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ในทางที่ดีขึ้นในด้านทางกลรวมถึงสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้ดี สมบัติทางความร้อนและ สมบัติอื่นๆ ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การชุบทางเคมีไฟฟ้าแบบทั่วไป กลไกการเกิดการชุบเคลือบ ทางไฟฟ้าเคมีสำหรับการใส่อนุภาคเข้าไปสู่ผิววัสดุที่ชุบเป็นโลหะมีการพัฒนามาจากอนุภาคที่มี ขนาดระดับไมครอน เทคนิคเริ่มแรกจะประกอบด้วยกลไกการเกิดทั้งหมด 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอน ที่ 1:เกิดสนามไฟฟ้า ขั้นตอน ที่ 2:เกิดการดักจับอนุภาค ขั้นตอน ที่ 3:เกิดการดูดซับอนุภาคลงพื้นผิว และขั้นตอนที่ 4 :เกิดการไหลเวียนของอนุภาค แต่ทฤษฎีที่ได้รับการยอมรับคือทฤษฎีของ Guglielmi ประกอบด้วยขั้นตอนของกลไกที่เกิดขึ้นทั้งหมด 5 ขั้นตอนคือ ขั้นตอน ที่ 1:เกิดการก่อตัว ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนรอบๆ อนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้นตอน ที่ 2: เกิดการพัดพาของอนุภาคซึ่งถูกล้อมรอบด้วยกลุ่มไอออนนิคคู่ขั้วแคโทด ขั้นตอน ที่ 3:เกิดการแพร่ ของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ถูกล้อมรอบด้วยกลุ่มหมอกไอออนนิค ผ่าน Hydranamic boundary layers และเคลื่อนเข้าหาขั้วแคโทด ขั้นตอน ที่ 4:การแพร่เนื่องจากแรง ของสนามไฟฟ้า ผ่านชั้น Electrical double layers และขั้นตอนที่ 5:การยึดเกาะของอนุภาคระหว่าง ขั้วแคโทดกับการสร้างชั้นของอนุภาคซึ่งช่วยยึดอนุภาคไว้กับขั้วแคโทด ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 กลไกที่เกิดขึ้นในการสะสมทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม

ที่มา: Low *et al.* (2006)

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ หรือเกิดการแขวนลอย จะต้องอาศัยเทคนิคให้อนุภาคเกิดการกระจายตัว ซึ่งมี 2 เทคนิค คือ 1:เทคนิคการกระจายตัวทางกายภาพ (Physical) และ 2:เทคนิคการกระจายตัวทางเคมี (Chemical) ซึ่งทั้งสองเทคนิคล้วนจะทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัว ลดแรงดึงดูด ตลอดจนลดการรวมตัวกันของประจุบวกและประจุลบรวมไปถึงอนุภาคที่ไม่มีประจุไม่ให้เกิดการรวมตัวกัน ในงานชุบเคลือบทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมในด้านอุตสาหกรรม อ่างหรือบ่อชุบที่ใช้สำหรับบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อทำการชุบจะเป็นลักษณะเปิดและมีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงนิยมทำการควบคุมให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เกิดการแขวนลอยโดยใช้ใบพัดหรือใบมีดในการกวนในรูปแบบที่แตกต่างกัน เช่น การใช้ใบพัดหมุนกวนหรือใช้ใบมีดกวนในลักษณะขึ้นและลง เป็นต้น หรือการสร้างกระแสหมุนเวียนให้เกิดขึ้นโดยอาศัย



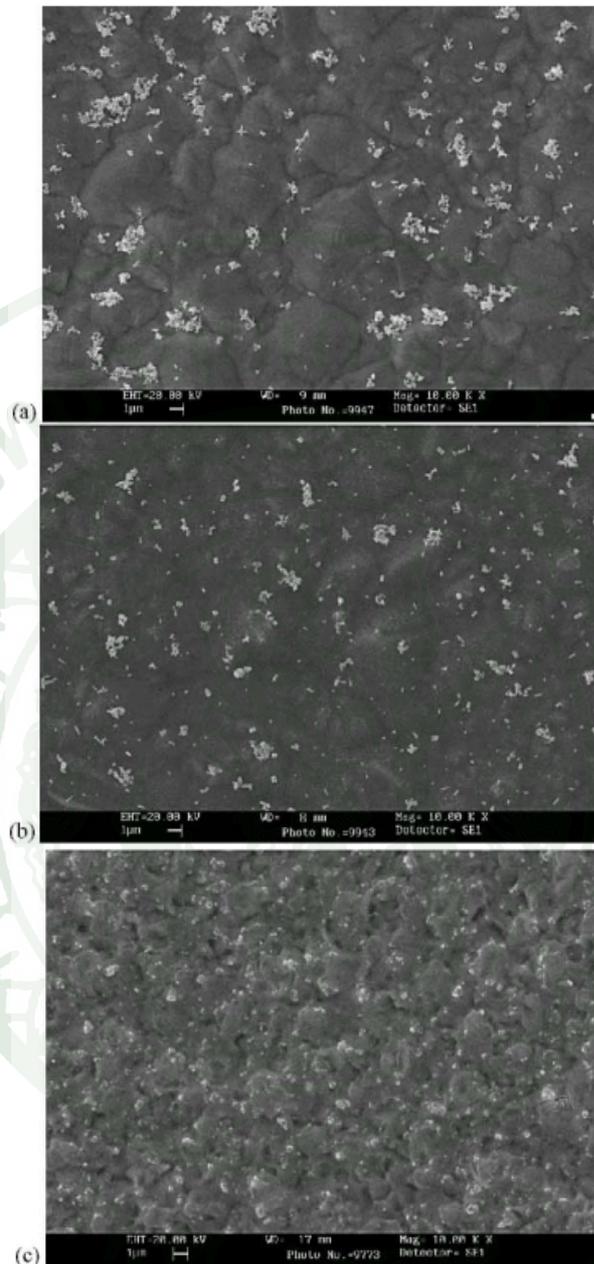
ภาพที่ 12 เทคนิคการกวนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในห้องปฏิบัติการเพื่อให้เกิดการแขวนลอย สำหรับเทคนิคที่เป็นที่นิยมใช้อ่างชุบหรือบ่อชุบแบบเปิด (a) การใช้ใบพัดกวน (b) การใช้ใบมีดกวนในลักษณะขึ้นและลง (c) การสร้างกระแสไหลวนให้กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยการปั๊มสำหรับเทคนิคในห้องปฏิบัติการ (d) การใช้แท่งแม่เหล็กกวน (e) การใช้ใบพัดลักษณะแท่งยาวกวน (f) การใช้ใบพัดที่เป็นขั้วไฟฟ้ากวน (g) การให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ไหลผ่านพื้นผิวที่เป็นขั้วไฟฟ้า โดยพื้นที่สีดำจะเป็นที่แคโทดเมื่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไหลผ่านจะเกิดแอนไอออนล้อมรอบอนุภาคในภาพ (h) และ (i) เป็นอนุภาคที่ไม่เป็นไอออนทางไฟฟ้าทำให้เกิดการรวมตัวของทั้งแอนไอออนและแคโทดไอออน

ที่มา: Low et al. (2006)

ค่าความแข็งของชิ้นงานหลังจากทำการชุบเมื่อให้กระแสที่แตกต่างกันคือ 1 2 3 และ 4 แอมป์ต่อตารางเดซิเมตร พบว่าเมื่อให้กระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นจะทำให้ชิ้นงานมีขนาดของเกรนที่เล็กลง ซึ่งเป็นผลมาจากพลังงานที่ใส่เข้าไปให้กับระบบส่งผลให้อะตอมเกิดการแพร่ได้เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการให้กระแสที่ต่ำกว่าส่งผลให้เกรนมีขนาดที่ใหญ่เมื่อให้ปริมาณกระแสที่น้อยดังแสดงในภาพที่ 13

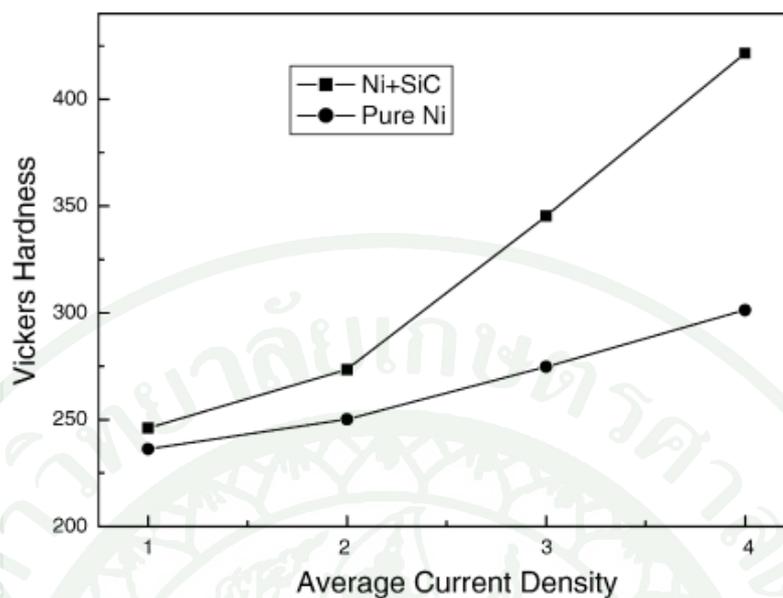
ลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวที่มีความสอดคล้องกับคุณสมบัติเชิงกลที่ผิวคือ ค่าความแข็งเมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยกระแสที่แตกต่างกันมาวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยกระแสที่มากกว่าจะมีค่าความแข็งที่เพิ่มมากขึ้นภายใต้ระยะเวลาที่เท่ากันคือ 5 ชั่วโมง มีความสอดคล้องกับลักษณะเกรนที่มีขนาดที่เล็กจะมีค่าความแข็งที่มากกว่าชิ้นงานที่มีเกรนขนาดใหญ่กว่า ดังแสดงในภาพที่ 14

He *et al.* (2002) ทำการใช้น้ำชุบเคลือบทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมยังสามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับวัสดุเซรามิกชีวภาพได้ (Pang *et al.*, 2010) นำไปสู่การปรับปรุงอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในพาสติก โดยการปรับเปลี่ยนขนาดของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Gul *et al.*, 2009) ซึ่งอนุภาคที่กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวหลังจากชุบยังเป็นวัสดุเสริมแรงให้กับวัสดุอื่นๆ ที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม



ภาพที่ 13 ภาพถ่ายจุลภาคพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ผ่านการชุบ Ni-SiC โดยผ่านการชุบด้วยฟังก์ชั้นกลืนของกระแสที่แตกต่างกัน (a) 2 แอมป์ต่อตารางเดซิเมตร (b) 3 แอมป์ต่อตารางเดซิเมตร และ (c) 4 แอมป์ต่อตารางเดซิเมตร

ที่มา: Hu *et al.* (2005)



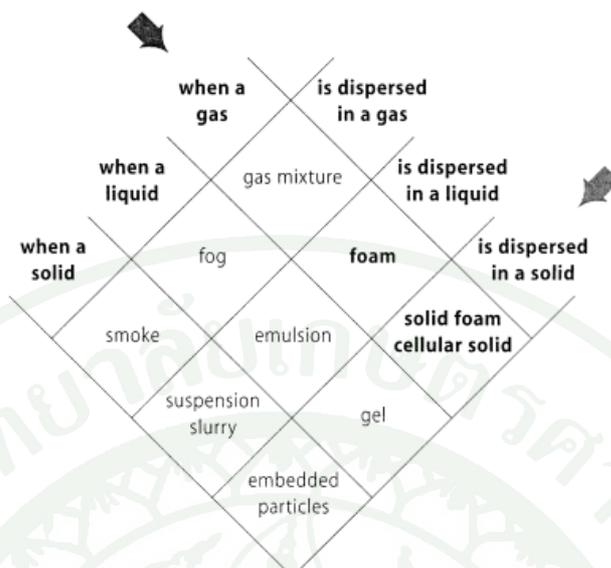
ภาพที่ 14 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยความหนาแน่นของกระแสที่แตกต่างกัน

ที่มา: Hu *et al.* (2005)

3. วัสดุพุนตัว

โฟมหรือวัสดุพุนตัวเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างที่มีความพุนตัวหรือกล่าวคือเป็นวัสดุที่มีอากาศหรือช่องว่างอยู่ในเนื้อวัสดุชนิดนั้นๆ มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลคือ มีความเหนียวสูงเมื่อวัสดุรวมตัวกัน โดยที่มีค่าความแข็งแรงต่อความหนาแน่นที่สูง มีคุณสมบัติที่มีช่องว่างอากาศอยู่ภายในตัวเองที่สูง ส่งผลให้สามารถนำความร้อนได้ดี สำหรับการประยุกต์ใช้งานสามารถใช้ได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม วัสดุพุนตัวสามารถผลิตได้จากวัสดุที่เป็นโลหะและวัสดุที่เป็นโพลิเมอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบการใช้งาน (Banhart *et al.*, 2001)

การเกิดวัสดุพุนตัวสามารถเรียกได้หลายรูปแบบตามลักษณะการผลิต ในกรณีที่เกิดจากการแทรกตัวของเหลวจะเรียกว่าโฟมและอีกกรณีหนึ่งถ้าเกิดจากการแทรกตัวของแข็งจะเรียกว่าโฟมของแข็งซึ่งลักษณะที่เกิดเฟสของแข็งจะเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้าง โดยมีอากาศแทรกตัวอยู่ ดังแสดงในภาพที่ 15



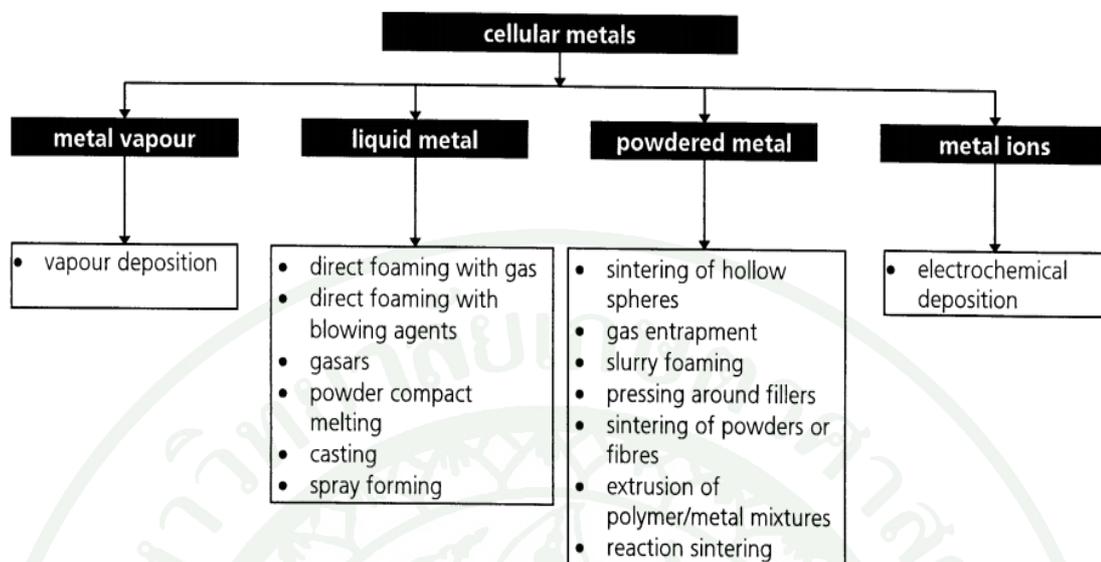
ภาพที่ 15 องค์ประกอบของการเกิดโฟมและการเกิดโฟมของแข็ง

ที่มา: Banhart (2001)

ในกรณีที่เกิด โฟมแล้วของเหลวเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งโดยมีอากาศแทรกตัวอยู่ก็จะกลายเป็นโฟมของแข็ง ซึ่งการแทรกตัวของก๊าซที่กระจายตัวอยู่หรืออาจเกิดการละลายตัวอยู่จะมีความพรุนตัวสูงหรือต่ำ จะขึ้นอยู่กับหลายๆปัจจัย เช่น ชนิดของของเหลว ชนิดของก๊าซ เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถให้เกิดการแทรกตัวของก๊าซในของแข็งได้โดยที่ไม่ต้องใช้ก๊าซเสมอไปแต่จะใช้ของแข็งที่เรียกว่า วัสดุสร้างรูพรุน (Space holder) เป็นตัวทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงภายในเฟสของแข็งนั้นได้

การขึ้นรูปวัสดุรูพรุนสามารถทำได้หลายวิธีการ แต่ละเทคนิคมีความเหมือนหรืออาจมีความแตกต่างกันออกไป แต่ละเทคนิคมีจุดประสงค์เดียวกันคือ การสร้างช่องว่าง โพรงอากาศ หรือเกิดโครงข่ายภายในวัสดุ โดยสามารถจำแนกเทคนิคต่างๆในการผลิตวัสดุรูพรุนตัวได้ดังนี้

1. ผลิตได้จากไอของโลหะหรือโลหะที่อยู่ในสถานะของไอ
2. ผลิตได้จากโลหะหลอมเหลว
3. ผลิตได้จากการขึ้นรูปผงโลหะ
4. ผลิตได้จากไอออนของโลหะในสารละลาย



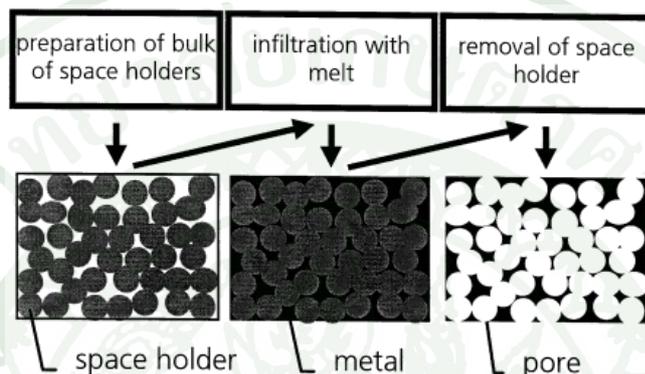
ภาพที่ 16 แผนภาพการผลิตวัสดุรูพรุนโดยจำแนกตามลักษณะการผลิต

ที่มา: Banhart (2001)

การผลิตวัสดุรูพรุนตัวจากโลหะที่อยู่ในสถานะไอจะอาศัยวัสดุประเภทโพลิเมอร์หรือวัสดุที่สามารถกำจัดออกได้ง่ายเป็นวัสดุสร้างรูพรุน โดยนำวัสดุที่ต้องการผลิตให้เป็นวัสดุรูพรุนตัวเข้าสู่เครื่องมือที่ทำให้โลหะเปลี่ยนเฟสจากแข็งให้เป็นเฟสสถานะของไอ (Chemical vapor deposition: CVD) หลังจากที่ไอของวัสดุจับตัวบนวัสดุสร้างรูพรุนจนได้ความหนาที่ต้องการแล้วจะนำไปกำจัดวัสดุสร้างรูพรุน โดยสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งการแช่สารละลายเพื่อให้เกิดการละลายวัสดุสร้างรูพรุนที่เป็นโพลิเมอร์หรือใช้วิธีการบวนการทางความร้อนซึ่งขึ้นอยู่กับความเหมาะสมการนำไปใช้งานของวัสดุรูพรุนตัวที่ผลิตได้จากไอของวัสดุชนิดนั้นๆ กระบวนการนี้นิยมใช้ในการผลิตวัสดุรูพรุนตัวที่เป็นโลหะ นำไปใช้งานในด้านพลังงาน ผลิตเป็นส่วนประกอบภายในแบตเตอรี่เซลล์เชื้อเพลิง

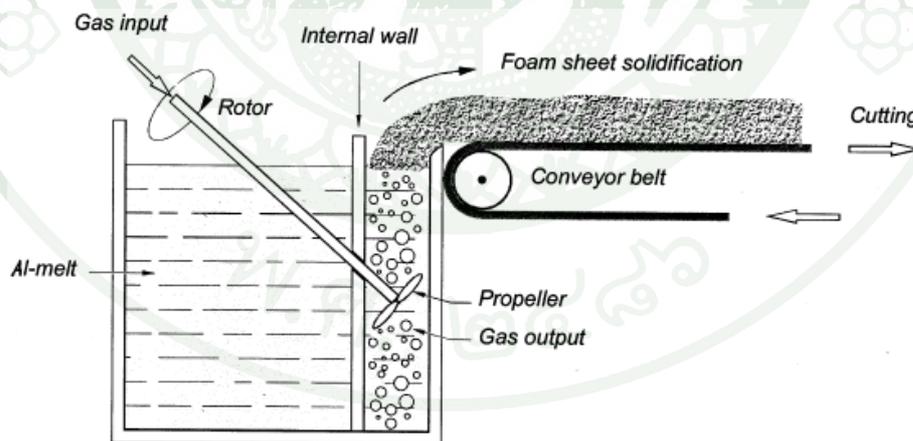
การผลิตวัสดุรูพรุนตัวจากโลหะหลอมเหลวเป็นวิธีการแรกเริ่มในการผลิตวัสดุรูพรุนตัวที่ถูกใช้มา วิธีนี้มีหลักการคล้ายคลึงกันกับวิธีการหล่อโลหะทั่วไป แต่วัสดุรูพรุนตัวจะอาศัยวัสดุสร้างรูพรุน (Manonukul *et al.*, 2010) ดังแสดงในภาพที่ 17 การเทโลหะหลอมเหลวลงในแม่แบบที่มีวัสดุสร้างรูพรุนอยู่ เมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงก็จะทำการกำจัดวัสดุสร้างรูพรุน หรือการประยุกต์นำวัสดุที่มีราคาถูกมาใช้เป็นวัสดุสร้างรูพรุน Mansourighari *et al.* (2012) ได้นำแป้งมันสำปะหลังมาเป็นวัสดุสร้างรูพรุนในการผลิตโฟมโลหะ การผลิตวัสดุรูพรุนตัวไม่จำเป็นต้องอาศัยวัสดุสร้างรูพรุนเสมอไป

แต่ถ้าสามารถทำให้ก๊าซเกิดการกระจายตัวในขณะที่โลหะอยู่ในสถานะของเหลวอยู่ Asholt *et al.* (1999) ได้ใช้วิธีการทำให้เกิดฟองโดยอาศัยใบพัดเพื่อให้เกิดฟองก๊าซหรือช่องว่างเกิดขึ้นภายในวัสดุพูนตัว วิธีนี้สามารถผลิตวัสดุพูนตัวที่เป็นโลหะได้ในลักษณะที่เป็นแผ่นยาวดังแสดงในภาพที่ 18 ซึ่งวิธีการนี้จะเรียกว่า Gas injection



ภาพที่ 17 การผลิตวัสดุพูนตัวด้วยวิธีการหล่อโดยอาศัยวัสดุสร้างรูพูน

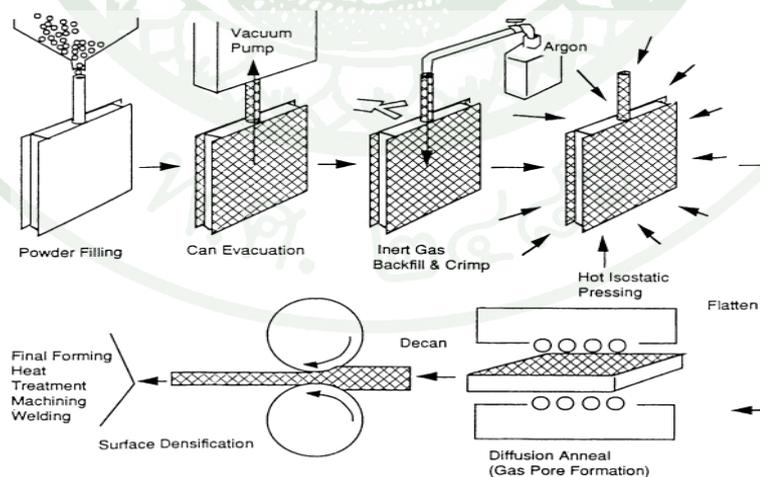
ที่มา: Banhart (2001)



ภาพที่ 18 การผลิตวัสดุพูนตัวด้วยวิธี Gas injection

ที่มา: Banhart (2001)

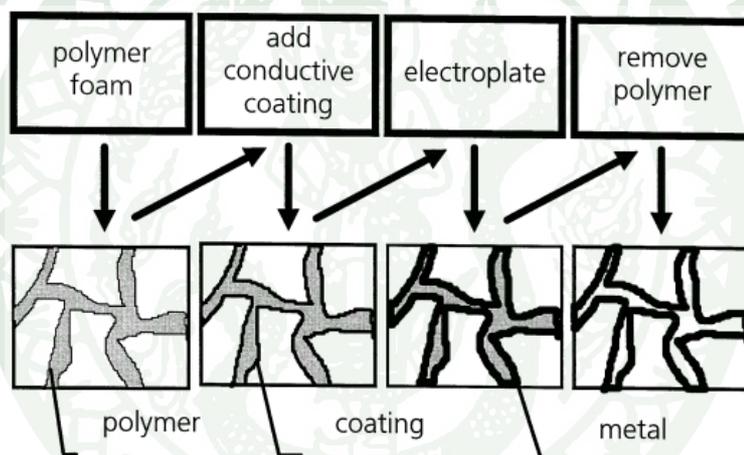
หลังจากที่วิธีการผลิตวัสดุพอร์นด้วยการหล่อโลหะได้ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายจึงได้มีความพยายามที่จะคิดค้นวิธีการใหม่เพื่อลดข้อจำกัดขณะที่ทำการหล่อ เพราะวิธีการผลิตวัสดุพอร์นด้วยการหล่อก็มีข้อจำกัดในด้านลักษณะของชิ้นงานที่จะต้องไม่มีความซับซ้อน ทำให้เกิดการผลิตวัสดุพอร์นตัวจากการขึ้นรูปผงโลหะ การขึ้นรูปผงโลหะสามารถทำได้หลายวิธีการ เช่น การอัดขึ้นรูปโดยตรง การฉีดขึ้นรูป การใช้เทคนิค Gas entrapment (Martin and RJ., 1992) เป็นต้น โดยจะมีการผสมผงโลหะเข้ากับวัสดุสร้างรูพอร์นและเผาผนึกต่อไป ในขั้นตอนทุกขั้นตอนตั้งแต่การเลือกลักษณะผงโลหะ ลักษณะของวัสดุสร้างรูพอร์น จนกระทั่งการเลือกช่วงอุณหภูมิ ระยะเวลาในการเผาผนึกล้วนมีส่วนในการกำหนดลักษณะของรูพอร์น ความพอร์นตัว การกระจายตัวของรูพอร์นบนชิ้นงาน กระบวนการผลิตวัสดุพอร์นตัวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุหลากหลายประเภท Liang-jian *et al.* (2009) ได้ทำการผลิตวัสดุทางชีวภาพที่เป็นโลหะสำหรับตามกระดูก ที่ผลิตจากโลหะไททาเนียม หนึ่งในคุณสมบัติที่ต้องการนอกจากการเข้ากันได้ทางชีวภาพ ความเหนียว ความไม่เป็นพิษแล้ว ก็คือความพอร์นตัวของวัสดุเพื่อรองรับการเจริญเติบโตของเซลล์ที่เกิดขึ้น ความพอร์นตัวของชิ้นงานถูกสร้างจากผง NaCl ที่มีขนาดต่ำกว่า 290 ไมครอน ผสมกับผงไททาเนียมที่มีขนาดผบน้อยกว่า 77 ไมครอน ผู้วิจัยได้ทดลองเปลี่ยนปริมาณสารสร้างรูพอร์นที่ร้อยละ 30 40 50 60 และ 70 โดยปริมาตร เพื่อศึกษาลักษณะของรูพอร์นที่เกิดขึ้น พบว่าที่ปริมาณสารสร้างรูพอร์นร้อยละ 30 โดยปริมาตรจะให้ค่าความแข็งแรงสูงที่สุด Guo-fa *et al.* (2009) ยังนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุพอร์นตัวที่เป็นนิกเกิลบนพื้นฐานวัสดุที่เป็น Superalloy



ภาพที่ 19 เทคนิคการผลิตวัสดุพอร์นตัวแบบ Gas entrapment

ที่มา: Martin and RJ (1992)

Banhart, 2001 การผลิตวัสดุพรุนตัวด้วยเทคนิคการชุบด้วยไฟฟ้าเคมีเป็นเทคนิคที่อาศัยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเข้ามาช่วยในกระบวนการโดยจะต้องอาศัยวัสดุสร้างรูพรุนที่เป็นโพลิเมอร์ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงข่าย จากนั้นจะทำการชุบโพลิเมอร์ที่เป็นวัสดุสร้างรูพรุนด้วย Graphite หรือ Carbon black เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า หลังจากนั้นจะนำชิ้นงานไปชุบด้วยไฟฟ้าเคมี และขั้นตอนสุดท้ายคือการกำจัดวัสดุสร้างรูพรุนดังแสดงในภาพที่ 20 วิธีการนี้สามารถผลิตวัสดุพรุนตัวได้หลายชนิด เช่น ทองแดง นิกเกิล สังกะสี เป็นต้น จากวิธีการนี้จะทำให้ผลิตวัสดุพรุนตัวที่มีความหนาที่อยู่ระหว่าง 2 มิลลิเมตร ไปจนถึง 20 ไมครอน ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต ความได้เปรียบของวิธีการผลิตด้วยวิธีนี้คือ ลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมที่เกิดขึ้นจะมีความเป็นระเบียบสูง สามารถกำหนดลักษณะเกรนที่เกิดขึ้นได้จากค่าความหนาแน่นของกระแสที่ทำการชุบ



ภาพที่ 20 ขั้นตอนการผลิตวัสดุพรุนตัวด้วยเทคนิคไฟฟ้าเคมี

ที่มา: Banhart (2001)

การใช้งานวัสดุพรุนตัว จะต้องคำนึงถึงการเลือกใช้ให้ตรงกับการใช้งานและอีกหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องโดยสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

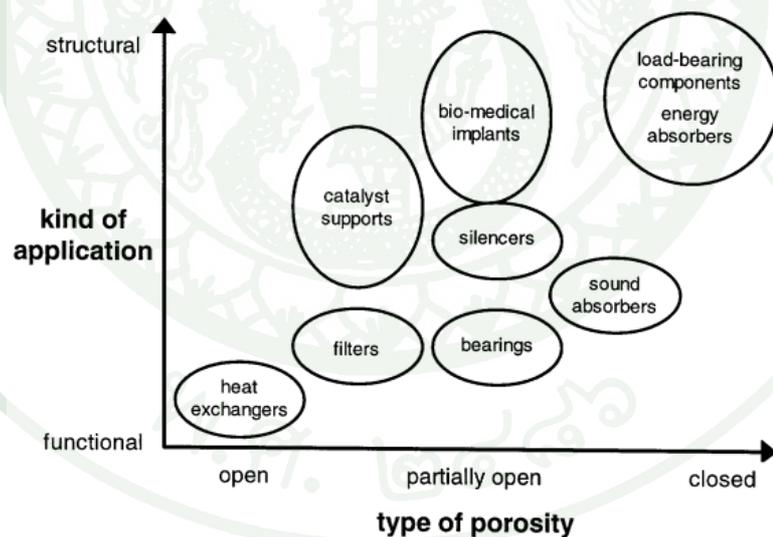
1. ลักษณะทางกายภาพ: ลักษณะของรูพรุนหรือความพรุนตัว (รูพรุนแบบเปิดหรือรูพรุนแบบปิด) ปริมาณของรูพรุน ขนาดของรูพรุน ลักษณะความพรุนตัวเฉพาะที่ผิวหรือมีความพรุนตัวทั่วทั้งชิ้นงาน

2. ลักษณะทางโลหะวิทยา: ชนิดของโลหะที่ต้องการ ตลอดจนลักษณะทางจุลภาคของโครงสร้างโลหะชนิดนั้นๆ

3. กระบวนการผลิต: การเลือกใช้กระบวนการผลิตให้เหมาะสมกับชิ้นงาน ความสลับซับซ้อนของชิ้นงาน องค์กรประกอบของชิ้นงาน ตลอดจนลักษณะของชิ้นงานว่ามีลักษณะมิติของชิ้นงาน ซึ่งจะต้องมีความสอดคล้องกับกระบวนการผลิตที่เลือก

4. หลักเศรษฐศาสตร์: คำนึงถึงต้นทุนการผลิต การเลือกใช้วัสดุและกระบวนการให้เหมาะสมกับต้นทุน ตลอดจนปริมาณการผลิตที่จะมีความคุ้มค่าถึงจุดคุ้มทุน

จากหลักการทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถนำมาสู่การวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของรูพรุนกับลักษณะการใช้งานตั้งแต่ ฟังก์ชัน ไปจนถึง โครงสร้างของวัสดุพรุนตัวดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างประเภทของวัสดุพรุนตัวกับลักษณะการใช้งาน

ที่มา: Banhart (2001)

โดยจากการวิจัยแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะสร้างวัสดุพูนตัวที่ผิวโดยอาศัยการผลิตวัสดุพูนตัว ผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมและกระบวนการทางความร้อนเพื่อให้ได้วัสดุพูนตัวที่ผิว ในขณะที่เดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพูนตัวที่ผิวที่นำไปใช้งานในด้านกระดูกซึ่งผลิตด้วยวิธีที่แตกต่างกัน (Ryan *et al.*, 2006) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการผลิตวัสดุพูนตัวและวัสดุพูนตัวที่ผิว

ปัจจัย	วิธีการผลิต					การสะสมทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม
	กระบวนการหล่อโลหะ	Plasma spray	โลหะเชิงผง	PVD	Rapid prototyping	
ต้นทุนการผลิต	ต่ำ	สูง	ปานกลาง	สูง	สูง	ต่ำ
อุณหภูมิสถานะบรรยากาศ	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
บรรยากาศ	อากาศ	สุญญากาศ	อากาศ	สุญญากาศ	อากาศ	อากาศ
ระยะเวลา	เร็ว	ช้า	ปานกลาง	ช้า	ปานกลาง	เร็ว
ขนาดของชิ้นงาน	10^{-2} เมตร	10^{-9} เมตร 10^{-6} เมตร	10^{-3} เมตร 10^{-2} เมตร	10^{-9} เมตร 10^{-6} เมตร	10^{-6} เมตร 10^{-2} เมตร	10^{-6} เมตร 10^{-2} เมตร
รูปร่างของชิ้นงาน	3 มิติ	2 มิติ	3 มิติ	2 มิติ	2 และ 3 มิติ	2 และ 3 มิติ
การจัดเรียงรูพรุน	แบบสุ่ม	เป็นระเบียบ	แบบสุ่ม	เป็นระเบียบ	ตามความต้องการ	แบบสุ่ม
ปริมาณรูพรุน	ต่ำ	ควบคุมได้	ควบคุมได้	-	-	ควบคุมได้
ลักษณะรูพรุน	แบบปิด	แบบปิดและแบบเปิด	แบบปิด	-	แบบปิด	-

จากตารางจะเห็นได้ว่าการผลิตวัสดุพูนตัวที่ผิวโดยวิธีการสะสมทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมนั้นมีข้อได้เปรียบมากกว่าวิธีอื่นๆ ในหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นต้นทุนการผลิต อุณหภูมิการผลิต ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิต รูปแบบของชิ้นงาน แต่ยังคงมีข้อด้อยกว่าวิธีอื่นๆ เช่น จะต้องอาศัยอุณหภูมิที่สูงในสถานะสูญญากาศในช่วงระยะเวลาสั้นเพื่อกำจัดวัสดุสร้างรูพูนออก แต่ก็เพียงช่วงระยะเวลาที่สั้นกว่าวิธีอื่นๆ วิธีการสะสมทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมนั้นยังคงต้องอาศัยการพัฒนาวิธีการเพื่อปรับปรุงให้สามารถควบคุมลักษณะรูพูนให้ตรงตามความต้องการที่จะนำไปใช้งาน ไม่ว่าจะพัฒนาความพูนตัวให้เหมาะสมกับงานทางแพทย์ (Ramsden *et al.*, 2007) หรือในงานด้านอื่นๆ ต่อไป



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและอุปกรณ์

1.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้สำหรับเตรียมชิ้นงานวัสดุพื้นทองแดงเพื่อหาค่ารีดักชัน

1.1.1 แผ่นทองแดงขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร และยาว 3 เซนติเมตร

1.1.2 กระดาษทรายเบอร์ 120 180 360 และ 400

1.1.3 สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (ปริมาณความเข้มข้นของ Cu ที่ 35 กรัมต่อลิตร)

1.1.4 เรซินสำหรับหล่อขึ้นรูปชนิด Cold mount

1.1.5 สายไฟ

1.1.6 อุปกรณ์บัดกรีและตะกั่วบัดกรี

1.1.7 บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิเมตร

1.1.8 หลอดแก้ว

1.1.9 เครื่องอัลตราโซนิค

1.1.10 เครื่อง Potentiostat/Galvanostat (Autolab :320N)

1.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ทางอนุกรมวิธาน

1.2.1 เครื่องวิเคราะห์ทางอนุกรมวิธานด้วยเครื่อง Thermo gravimetric analysis (Mettler Toledo :TGA 1 Module)

1.2.2 พอลิเอทิลีน ไกลคอล (Polyethyleneglycol)

1.2.3 อลูมิเนียมที่สำหรับใส่สารตัวอย่าง

1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ชุบไฟฟ้า

1.3.1 ตะแกรงแพลตตินัม (Platinum)

1.3.2 แผ่นทองแดงสำหรับชุบขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร

- 1.3.3 สายไฟพร้อมปากคีบ
- 1.3.4 เทปพันสายไฟ
- 1.3.5 ชุด Reference electrode
- 1.3.6 ชุด Working electrode
- 1.3.7 พงโพลิเอทิลีน ไกลคอล (Polyethyleneglycol) ที่อุณหภูมิขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำกว่า 100 ไมครอน
- 1.3.8 เครื่องอัลตราโซนิค
- 1.3.9 เครื่อง Potentiostat/Galvanostat (Autolab :320N)
- 1.3.10 ชุดขาตั้งหลอดทดลอง
- 1.3.11 บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 1.3.12 สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (ปริมาณความเข้มข้นของ Cu ที่ 35 กรัมต่อลิตร)
- 1.3.13 เจลลาติน (ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร)
- 1.4 เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อน
 - 1.4.1 เตาเผาอุณหภูมิสูง
- 1.5 เครื่องมือวิเคราะห์และตรวจสอบวัสดุ
 - 1.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) (Philips :XL30)
 - 1.5.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM) (Nikon :eclipse e600)
 - 1.5.4 เครื่องวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) (Philips :X'Pert)
 - 1.5.3 เครื่องวิเคราะห์การวางของรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence spectrometer, XRF) (Horiba X-ray analytical microscope :XGT-2000W)

วิธีการ

1. การเตรียมวัสดุสำหรับการศึกษาและการศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการชูปิววัสดุ

1.1 การเตรียมวัสดุทองแดง สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเจลลาติน

ในการชูปิววัสดุทองแดงจำเป็นต้องมีการศึกษาค่ารีดักชันที่เหมาะสมเพื่อนำไปสู่การเลือกใช้ค่ากระแสที่เหมาะสมสำหรับวัสดุทองแดงชนิดนั้นๆ ซึ่งในการวิเคราะห์จะต้องเตรียมชิ้นงานและเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อที่จะทดสอบ โดยเริ่มจากการตัดแผ่นทองแดงให้มีขนาดประมาณ 1x3 เซนติเมตร จากนั้นบัดกรีแผ่นทองแดงเข้ากับสายไฟพร้อมสวมสายไฟเข้าสู่หลอดแก้ว หล่อแบบชิ้นงานด้วยเรซินเพื่อควบคุมผิวสัมผัสระหว่างทองแดงกับสารละลายให้มีพื้นที่ผิวประมาณ 3 ตารางเซนติเมตร จากนั้นขัดผิวชิ้นงานให้มีความเรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120 180 360 และ 400 ตามลำดับ หลังจากนั้นทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดสอบจะใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นเดียวกันกับที่ใช้ชูปิวคือ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (ความเข้มข้นของคอปเปอร์ 35 กรัมต่อลิตร) โพลีเอทิลีนไกลคอลที่ผสมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตร และสารละลายเจลลาตินที่เป็นสารเติมแต่งเจลลาตินโดยมีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร ปริมาณ 5 มิลลิลิตรต่อลิตร

1.2 การศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับชูปิว

ในการศึกษาการชูปิวจะใช้เครื่องมือในการวัดและวิเคราะห์ค่ารีดักชันของทองแดง โดยจะหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการชูปิวเพื่อให้อนุภาคทองแดงและอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลเกิดการยึดติดบนแผ่นทองแดงที่ทำการชูปิวให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการศึกษาค่ารีดักชันของแผ่นทองแดงภายใต้สารอิเล็กโทรไลต์สามชนิดคือ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นคอปเปอร์ 35 กรัมต่อลิตร สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นคอปเปอร์ 35 กรัมต่อลิตร ผสมกับอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลปริมาณ 0.1 กรัมต่อลิตร และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นคอปเปอร์ 35 กรัมต่อลิตร ผสมกับอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลปริมาณ 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตรผสมกับสารเติมแต่งเจลลาตินความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร ปริมาณ 5 มิลลิลิตรต่อลิตร เพื่อศึกษาค่ารีดักชันของทองแดง ซึ่งนำไปสู่การเลือกใช้ค่ากระแสในการชูปิวที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุพูนตัวที่ผิวด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีต่อไป

2. การเตรียมและการศึกษาช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวของโพลีเอทิลีนไกลคอล

การสร้างวัสดุพูนตัวโดยอาศัยวัสดุสร้างรูพูนที่เป็นโพลิเมอร์ เมื่อวัสดุผ่านการชุบแล้ว จะต้องเข้าสู่กระบวนการทางความร้อนเพื่อกำจัดวัสดุสร้างรูพูน ดังนั้นจึงต้องศึกษาช่วงอุณหภูมิ และช่วงเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการกำจัดวัสดุสร้างรูพูน โดยอาศัยเครื่องมือการวิเคราะห์ทาง อุณหภูมิ ทำการเตรียมได้จากผงโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนัก 10 มิลลิกรัม ทำการเผาเพื่อวัดน้ำหนัก ที่ลดลงเทียบกับเวลาและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อหาช่วงอุณหภูมิและเวลาที่โพลีเอทิลีน ไกลคอลเกิดการเผาไหม้จนหมดไป

3. การผลิตวัสดุพูนทองแดงแนวใหม่ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในสารละลายคอลลอยด์

3.1 การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์คอปเปอร์ซัลเฟต

เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์คอปเปอร์ซัลเฟตที่มีความเข้มข้นคอปเปอร์ที่ 35 กรัม ต่อลิตร ซึ่งเตรียมได้จากการเติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่มีขนาด 400 มิลลิลิตร ซึ่งมีผงคอปเปอร์ซัลเฟตน้ำหนัก 13.752 กรัม โดยคนสารละลายตลอดเวลา

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของสารเคมีในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

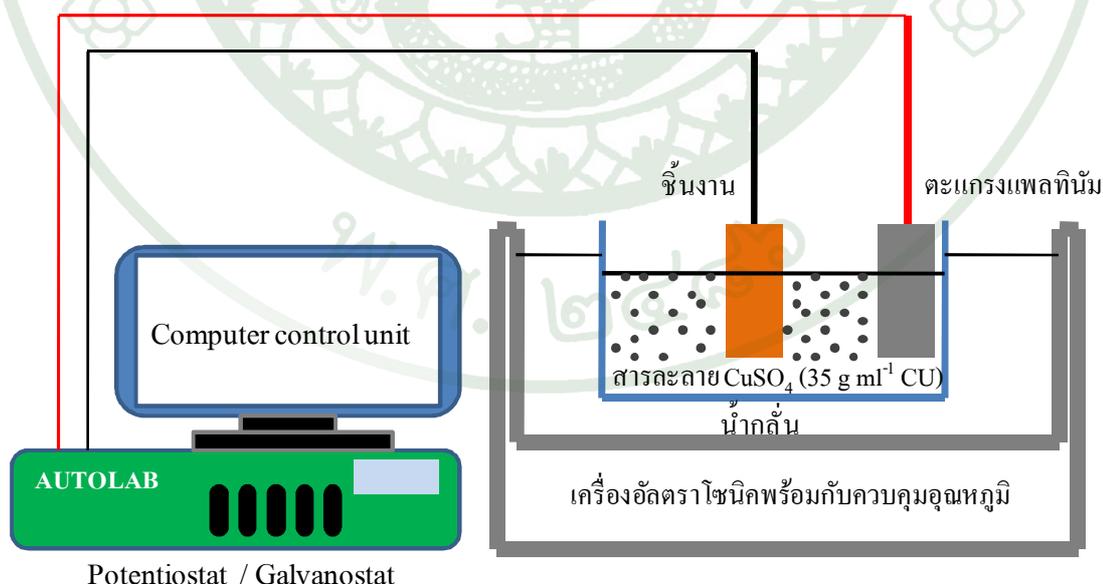
สารเคมี	ปริมาณ (กรัมต่อลิตร)
Copper sulfate ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	35
Polyethyleneglycol (PEG)	50 100 และ 200
Gelatin	100

3.2 การติดตั้งอุปกรณ์และเงื่อนไขในการทดลอง

การชุบวัสดุทองแดงจะอาศัยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat ในการให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงาน ชิ้นงานจะถูกจุ่มอยู่ในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งบีกเกอร์จะถูกแช่อยู่ในอ่างของเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อให้อนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลเกิดการกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในภาพที่ 22

ในการผลิตวัสดุรูพรุนทองแดงจะต้องให้ชิ้นงานอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำที่อยู่ในเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อให้อนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลกระจายตัวแล้วเกิดการยึดติดกับชิ้นงานได้ทั่วทั้งผิว ในขณะที่ทำการชุบ หลังจากชุบเสร็จจะทำความสะอาดชิ้นงานด้วยน้ำกลั่นและปาล์มให้แห้ง

จากการศึกษาค่ากระแสที่เหมาะสมสำหรับการชุบทองแดงพบว่าค่ารีดักชันของชิ้นงานอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ถึง 0.0004 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นจึงเลือกช่วงค่ากระแสที่ใช้ในการชุบทองแดงคือ 1 1.5 และ 2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร รวมไปถึงค่าตัวแปรอื่นๆ ที่ใช้ในการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3 ทำการชุบในโหมด Chrono potentiometry ($\Delta t > 1$ ms)



ภาพที่ 22 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการชุบเพื่อการผลิตวัสดุรูพรุนทองแดง

ตารางที่ 3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

ตัวแปร	ช่วงค่าที่ศึกษา
ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	1 1.5 และ 2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร
ปริมาณอนุภาค	50 100 และ 200 กรัมต่อลิตร
ระยะเวลาที่ใช้ชุบ	15 30 และ 60 นาที
สารเติมแต่งเจลาติน	ปริมาณ 5 มิลลิลิตรต่อลิตร และไม่เติม

4. กระบวนการทางความร้อนเพื่อกำจัดสารสร้างรูพรุน

ผลของการศึกษาช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวของ โพลีเอทิลีน ไกลคอลพบว่า โพลีเอทิลีน ไกลคอลเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และสลายตัวไปหมด (ถูกเผาไหม้หมด) ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนเกิดการเผาไหม้หมดไปจะใช้เวลาทั้งสิ้น 42 นาที ที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังนั้นกระบวนการทางความร้อนในการกำจัดสารสร้างรูพรุนจะนำชิ้นงานที่ผ่านการชุบไปผ่านกระบวนการทางความร้อนภายในเตาเผาที่มีบรรยากาศเป็นก๊าซอาร์กอน โดยแบ่งช่วงอุณหภูมิออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกจะเพิ่มจากอุณหภูมิห้องจนไปถึง 500 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงที่สองจะคงอุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียสไว้เป็นเวลา 30 นาที และในช่วงสุดท้ายจึงปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ จนถึงอุณหภูมิห้อง ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ขั้นตอนของกระบวนการทางความร้อนในการกำจัดวัสดุสร้างรูพรุน

5. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะพื้นผิวของเฟสที่เกิดขึ้น

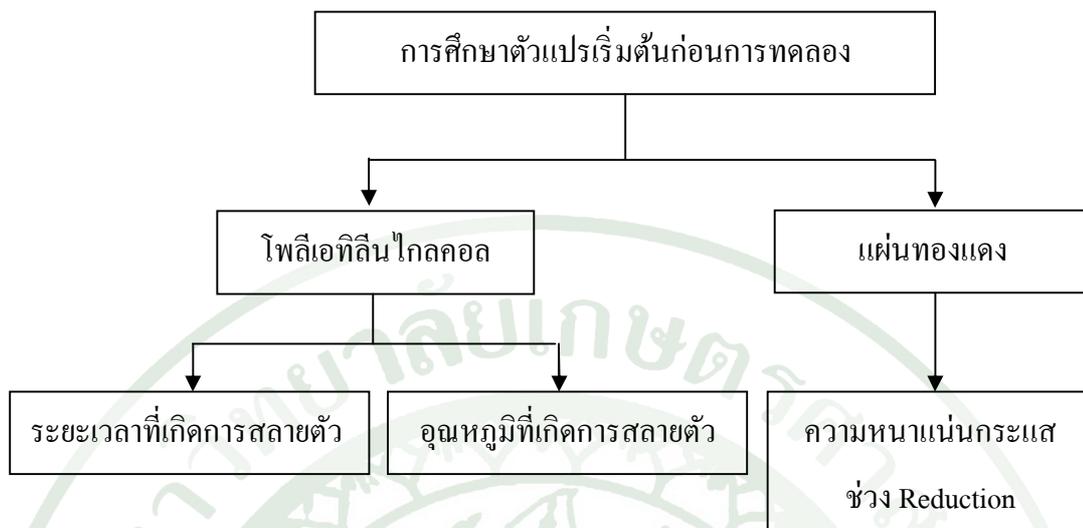
5.1 ศึกษาลักษณะพื้นผิวของชั้นเคลือบ ทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

5.2 ศึกษาลักษณะภาคตัดขวางของชั้นเคลือบ ทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)

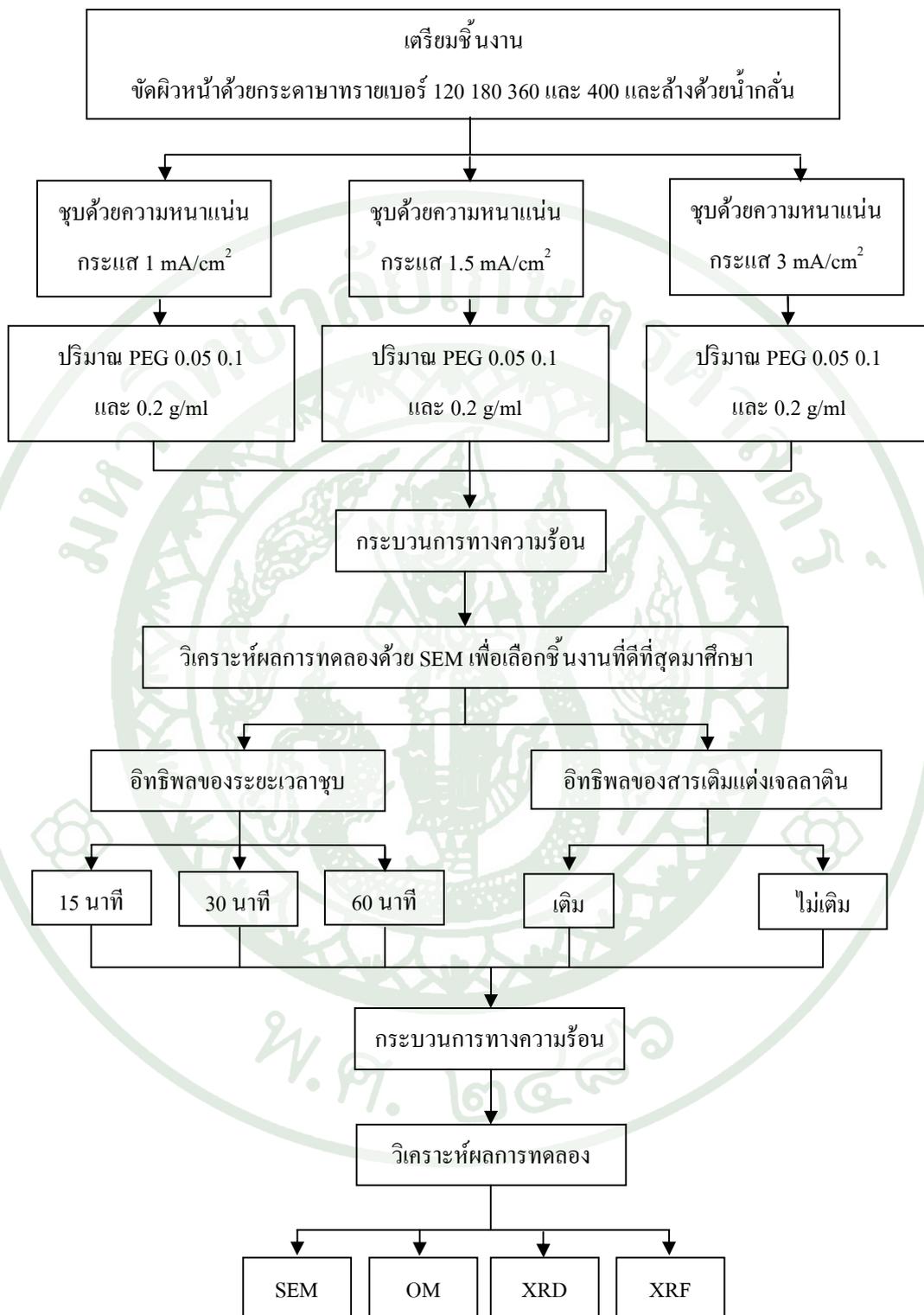
5.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและตรวจสอบสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นในชั้นเคลือบ ทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

5.4 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบบนผิวหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยใช้เครื่องวัดการวาวของอิเล็กตรอน (X-ray fluorescence spectrometer, XRF)

ในงานวิจัยได้แบ่งการศึกษาออกไป 2 ช่วงคือ ช่วงการศึกษาค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่จะนำไปใช้ในการทดลองดังแสดงในภาพที่ 24 และ ช่วงการทดลองผลิตวัสดุพูนตัวที่ผิวทองแดง ดังแสดงในภาพที่ 25 โดยศึกษาตัวแปรที่แตกต่างกัน ได้แก่ ค่าความหนาแน่นกระแสที่ชุบ ปริมาณอนุภาคโพสิเอทิลีน ไกลคอล ระยะเวลาชุบและ สารเติมแต่งเจลลาติน ซึ่งส่งผลต่อลักษณะความพูนตัว การกระจายตัวของรูพูน และ ปริมาณรูพูนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว



ภาพที่ 24 แผนภาพการศึกษาเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 25 แผนภาพขั้นตอนการทำงานวิจัย

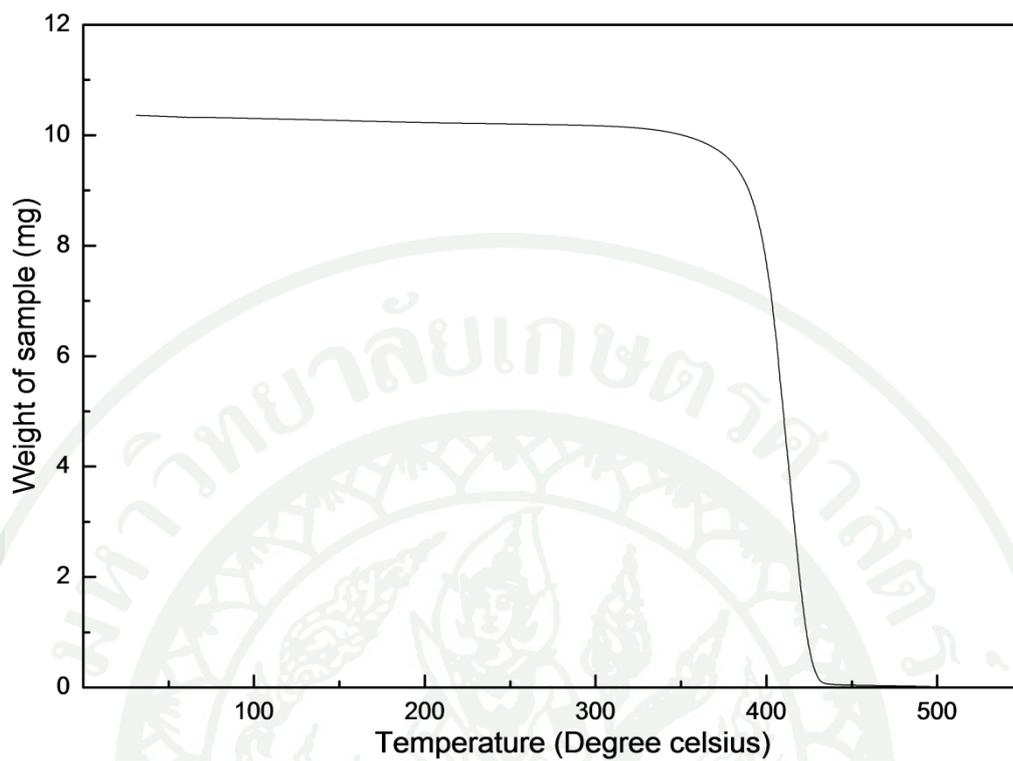
ผลและวิจารณ์

ผล

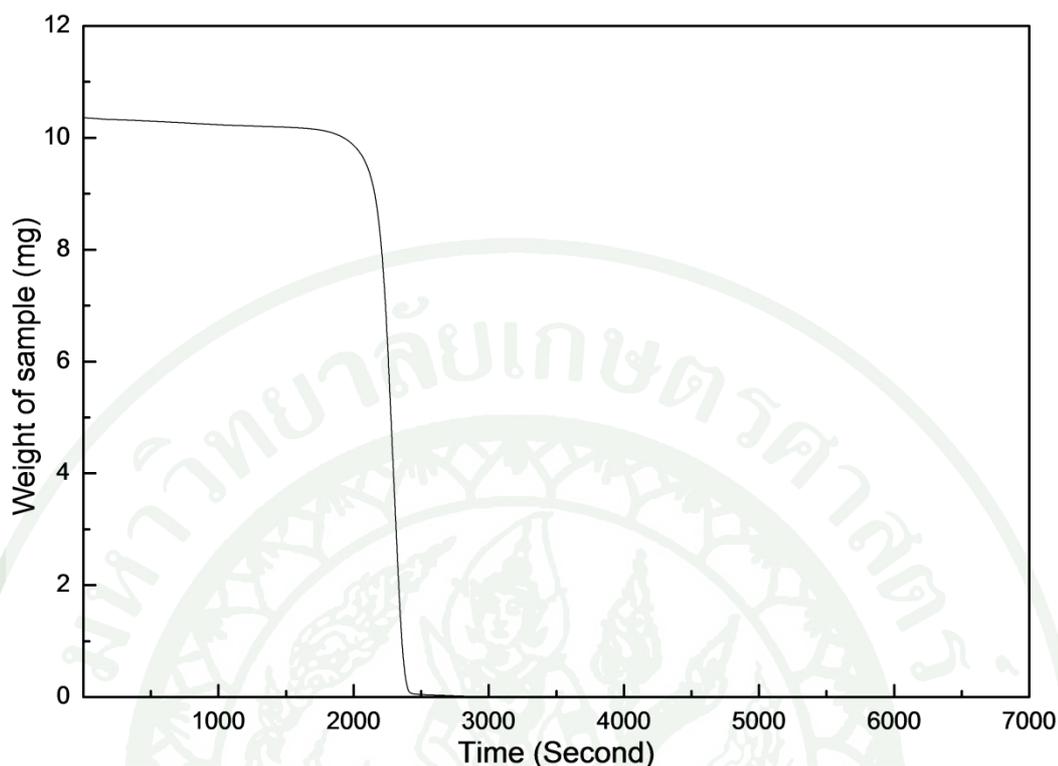
1. ผลการศึกษาเริ่มต้นของค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

1.1 การสลายตัวโดยความร้อนของโพลีเอทิลีน ไกลคอล

การศึกษาอุณหภูมิและระยะเวลาที่โพลีเอทิลีน ไกลคอลเกิดการสลายตัวโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ทางอุณหภูมิด้วยเครื่อง (Thermo gravimetric analysis) กำหนดอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีกับโพลีเอทิลีน ไกลคอลน้ำหนัก 10.35 มิลลิกรัม พบว่าโพลีเอทิลีน ไกลคอลสลายตัวไปหมดที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 26 และใช้ระยะเวลาในการสลายตัวไปหมดที่ 2500 วินาที หรือประมาณ 42 นาที ดังแสดงในภาพที่ 27 จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า โพลีเอทิลีน ไกลคอลสามารถสลายตัวไปหมดที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 42 นาที ซึ่งนำไปสู่การเลือกใช้อุณหภูมิและระยะเวลาในกระบวนการทางความร้อนคือ แบ่งช่วงอุณหภูมิต่อออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกจะเพิ่มจากอุณหภูมิห้องจนถึง 500 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงที่สองจะคงอุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียสไว้เป็นเวลา 30 นาที และในช่วงสุดท้ายจึงปล่อยให้เย็นตัว



ภาพที่ 26 อุณหภูมิที่โพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนัก 10.35 มิลลิกรัม เกิดการสลายตัว

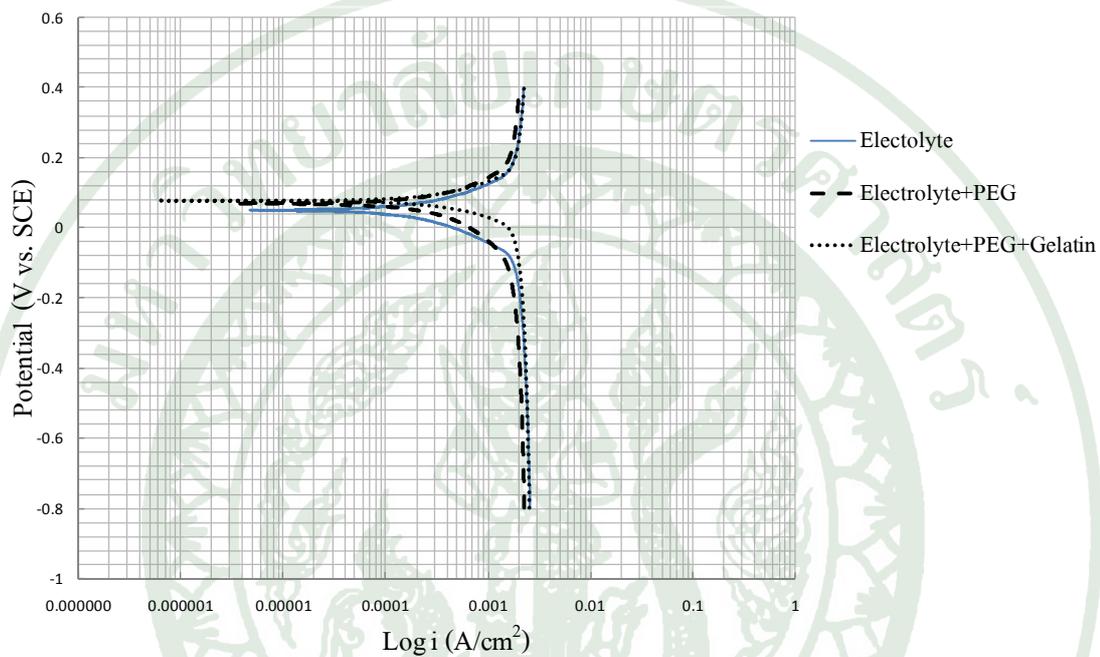


ภาพที่ 27 ระยะเวลาที่โพลีเอทิลีน ไกลคอลน้ำหนัก 10.35 มิลลิกรัม เกิดการสลายตัว

1.2 พฤติกรรมออกซิเดชันและรีดักชันของทองแดง

การศึกษาพฤติกรรมออกซิเดชันและรีดักชันของทองแดงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพราะจะเป็นตัวกำหนดค่าของความหนาแน่นกระแสที่จะใช้ในการชุบให้ได้ผลดีที่สุด ในการศึกษาจะใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่อศึกษาช่วงกระแสที่เกิดออกซิเดชันและรีดักชันของทองแดงภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ 3 ประเภทคือ 1: สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ที่มีความเข้มข้นของคอปเปอร์ 35 กรัมต่อลิตร 2: สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ที่มีความเข้มข้นของคอปเปอร์ 35 กรัมต่อลิตร ที่มีอนุภาคโพลีเอทิลีน ไกลคอลกระจายตัวอยู่ในปริมาณ 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตร และ 3: สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ที่มีความเข้มข้นของคอปเปอร์ 35 กรัมต่อลิตร ที่มีอนุภาคโพลีเอทิลีน ไกลคอลกระจายตัวอยู่ในปริมาณ 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตร และมีสารเติมแต่งที่เป็นเจลาตินความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาในช่วงที่เกิดรีดักชันของทองแดง ซึ่งเป็นช่วงกระแสที่เหมาะสมที่ทองแดงเกิดการรับอิเล็กตรอน

พบว่าช่วงกระแสที่เริ่มเกิดการรับอิเล็กตรอนไปจนถึงจุดสิ้นสุดที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้แสดงดังรูปที่ 28 ทำให้นำไปสู่การเลือกค่าความหนาแน่นกระแส 3 ช่วงคือ 0.1 0.15 และ 0.3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร



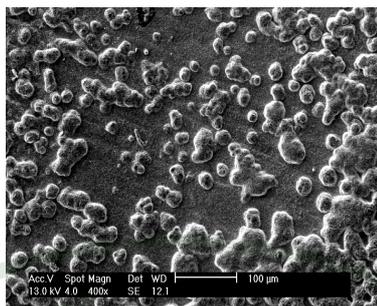
ภาพที่ 28 ค่าออกซิเดชันและรีดักชันของทองแดงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ต่างกัน

2. ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเชิงประกอบที่ผ่านกระบวนการสร้างด้วยเทคนิคการสะสมทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม

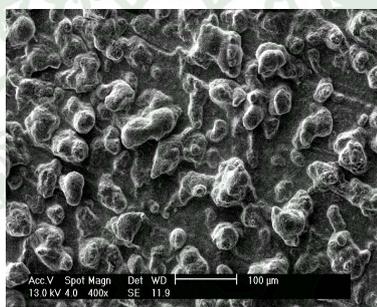
2.1 อิทธิพลของปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอลที่มีผลต่อลักษณะผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบ

2.1.1 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน

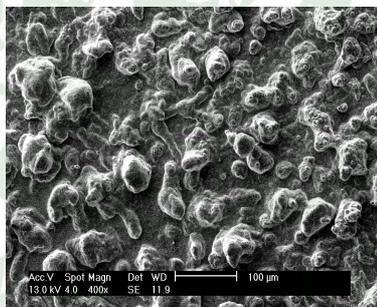
ภาพที่ 29 แสดงลักษณะของชั้นเคลือบวัสดุซึ่งประกอบด้วยชั้นของทองแดงและอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอล ซึ่งกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน โดยขนาดของโพลีเอทิลีนไกลคอลมีขนาดของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 ไมครอน ไปจนถึง 100 ไมครอน กระจายตัวอยู่บนชิ้นงานมีความหนาแน่นแตกต่างกันไปตามปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอลที่ใช้ โดยสรุปที่ค่าความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้ระยะเวลาที่ใช้ในการชุบ 30 นาที ดังแสดงในภาพที่ 29 การวิเคราะห์ลักษณะผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบก่อนเผา เป็นการวิเคราะห์พื้นที่อนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลทั้งหมดที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หนึ่งหน่วย โดยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลจากการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 30 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอลแล้ว ส่งผลให้ร้อยละของพื้นที่อนุภาคที่กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามไปด้วยภายใต้ระยะเวลาที่ใช้ในการชุบ 30 นาที



(ก)



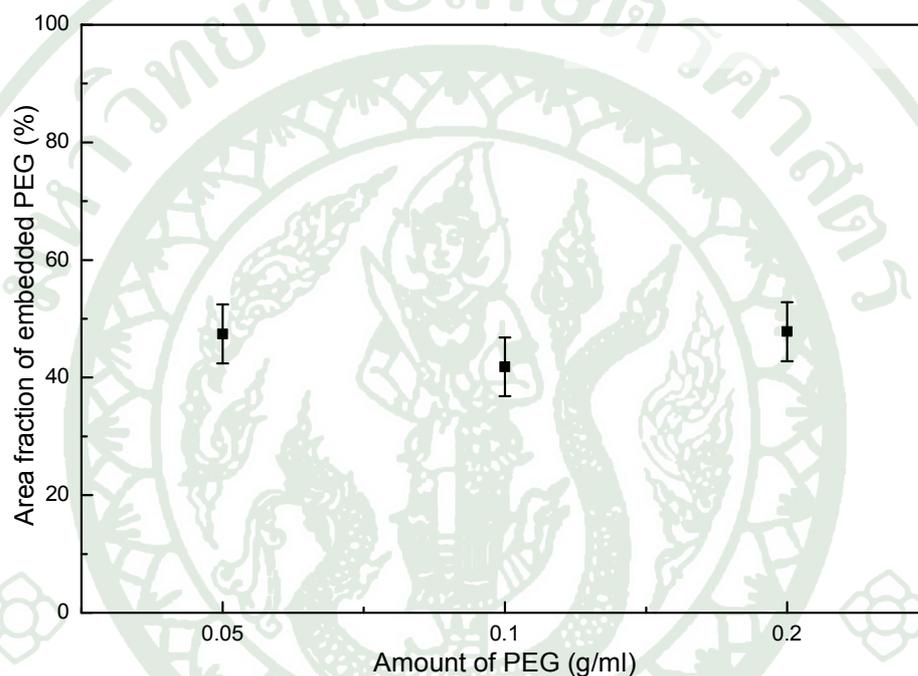
(ข)



(ค)

ภาพที่ 29 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร (ก ข และ ค ตามลำดับ)

จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายลักษณะทางจุลภาคของชั้นเคลือบก่อนเผาด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ จะพบว่าภายใต้เวลาที่ใช้ในการชุบที่เท่ากันคือ 30 นาที พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณโพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร จะมีร้อยละของพื้นที่ที่โพลีเอทิลีน ไกลคอลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่สูงที่สุดคือประมาณร้อยละ 47.80 ของพื้นที่ทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 30

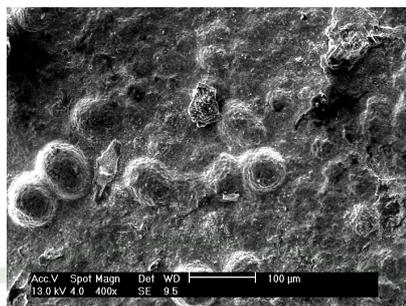


ภาพที่ 30 อิทธิพลของปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยชุบที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรที่ชุบเป็น ระยะเวลา 30 นาที โดยส่งผลต่อร้อยละพื้นที่อนุภาคที่กระจายตัวบนพื้นผิวชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน

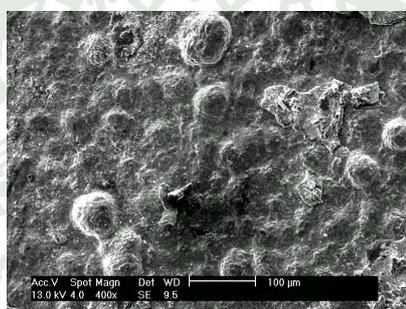
2.1.2 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบพูนตัวหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน

ภาพที่ 31 แสดงลักษณะของชั้นเคลือบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ส่งผลให้วัสดุสร้างพูนตัวคือ โพลีเอทิลีนไกลคอลถูกกำจัดออกไป ทำให้เกิดพื้นผิวที่มีความพูนตัวที่ผิวแตกต่างกันออกไปดังแสดงในภาพที่ 29 โดยแต่ละภาพมีความพูนตัวที่มีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับปริมาณ โพลีเอทิลีนไกลคอลที่ถูกเติมลงในสารละลายอีเล็กโทรไลต์ พบว่าเมื่อปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอลที่อยู่ในสารละลายอีเล็กโทรไลต์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้รอยละความพูนตัวมีมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 31

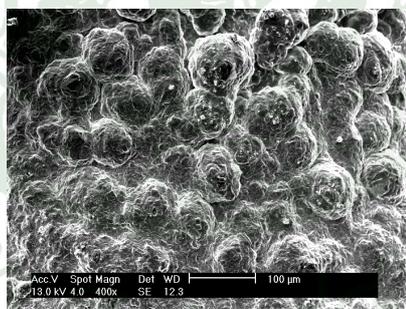




(ก)



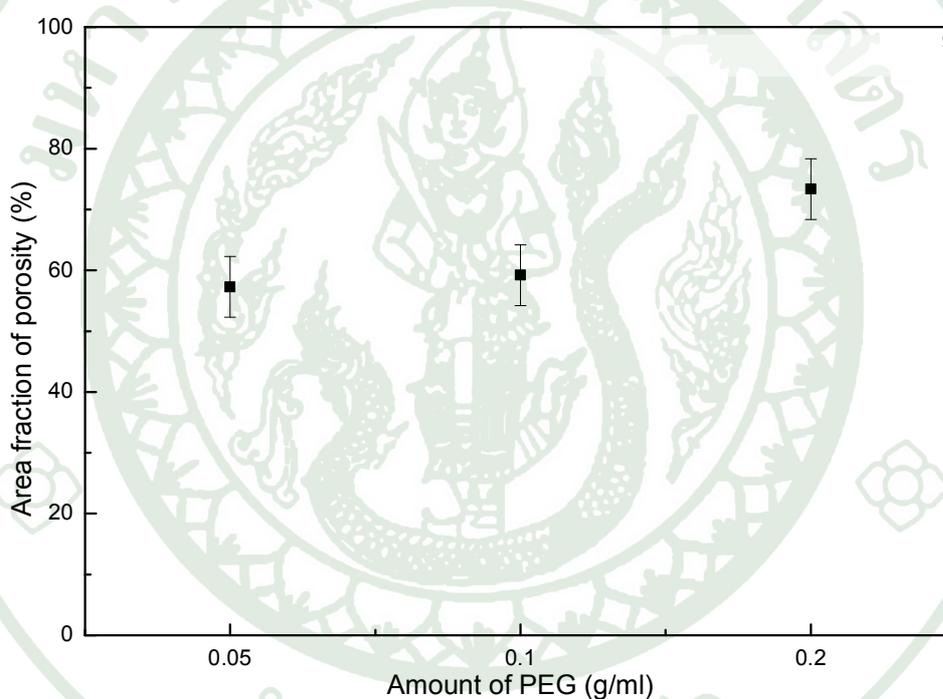
(ข)



(ค)

ภาพที่ 31 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร (ก ข และ ค ตามลำดับ)

อิทธิพลของปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอลที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีผลต่อร้อยละความพรุนตัวของชั้นเคลือบที่ผ่านการชุบด้วยความหนาแน่นกระแสที่เท่ากัน โดยที่ชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอลกระจายตัวอยู่ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ส่งผลให้เกิดความพรุนตัวที่ผิวร้อยละ 73.36 ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งเป็นสถานะที่มีความพรุนตัวที่ผิวสูงที่สุดและเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.05 และ 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตรจะมีค่าร้อยละความพรุนตัวลดลงที่ร้อยละ 57.28 และ 59.20 ของพื้นที่ทั้งหมด ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 32

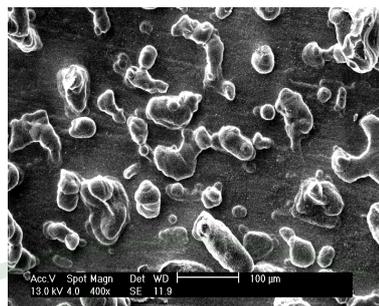


ภาพที่ 32 อิทธิพลของปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ชุบเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยส่งผลต่อร้อยละความพรุนตัวบนพื้นผิวชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน

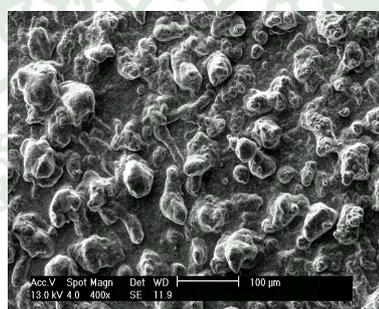
2.2 อิทธิพลของความหนาแน่นกระแสที่มีผลต่อลักษณะผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบ

2.2.1 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน

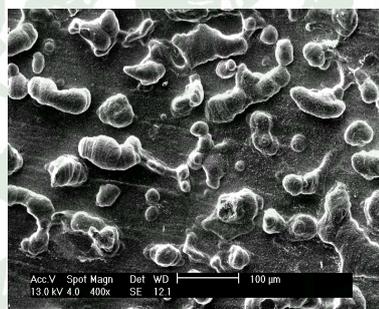
ภาพที่ 33 แสดงลักษณะของชั้นเคลือบวัสดุซึ่งประกอบด้วยชั้นของทองแดง โดยมีอนุภาคโพลิเอทิลีนไกลคอลฝังตัวอยู่ในชั้นทองแดง การกระจายฝังตัวอยู่บนชิ้นงานมีความมากน้อยแตกต่างกันไปตามความหนาแน่นกระแสที่ใช้คือ 1 1.5 และ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ภายใต้ระยะเวลาที่ใช้ในการชุบ 30 นาที ดังแสดงในภาพที่ 33 การวิเคราะห์ลักษณะผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบก่อนเผาเป็นการวิเคราะห์พื้นที่อนุภาคโพลิเอทิลีนไกลคอลทั้งหมดที่กระจายฝังตัวอยู่บนพื้นที่หนึ่งหน่วย ด้วยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลจากการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 34 พบว่า ที่ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร การฝังตัวร้อยละ 34.33 ของพื้นที่ทั้งหมด ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร การฝังตัวโพลิเอทิลีนไกลคอล จะมีร้อยละพื้นที่อนุภาคฝังตัว 47.80 ของพื้นที่ทั้งหมด และที่ความหนาแน่นกระแส 2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร จะมีร้อยละพื้นที่การฝังตัวที่ 32.33 ของพื้นที่ทั้งหมด ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณความหนาแน่นกระแสส่งผลให้ร้อยละของพื้นที่อนุภาคที่กระจายฝังตัวอยู่บนพื้นผิวไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ภายใต้ระยะเวลาที่ใช้ในการชุบ 30 นาที



(ก)

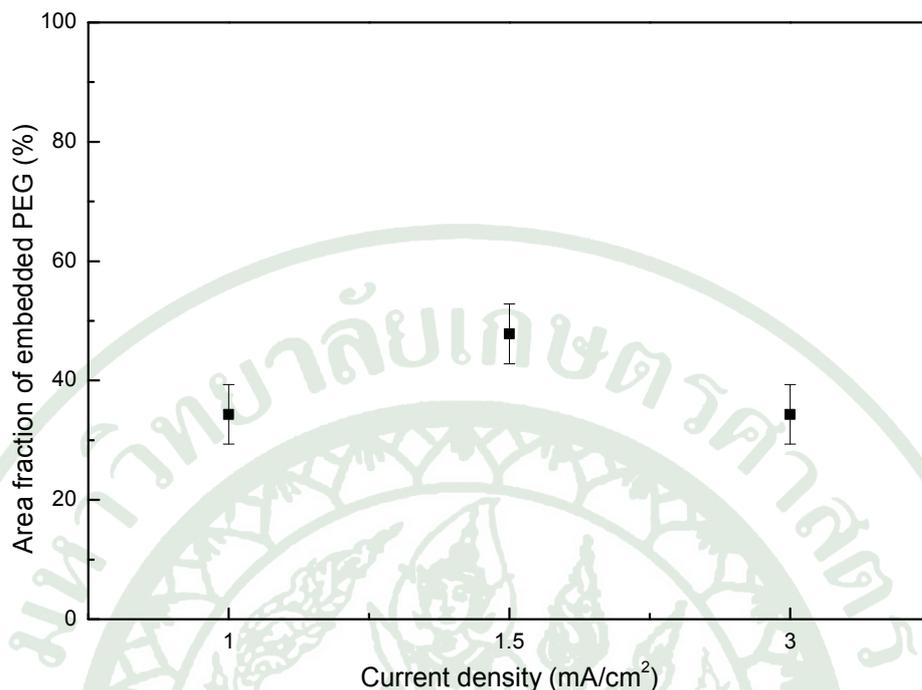


(ข)



(ค)

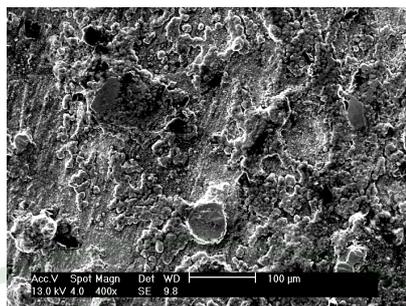
ภาพที่ 33 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1 1.5 และ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (ก ข และ ค ตามลำดับ) ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร



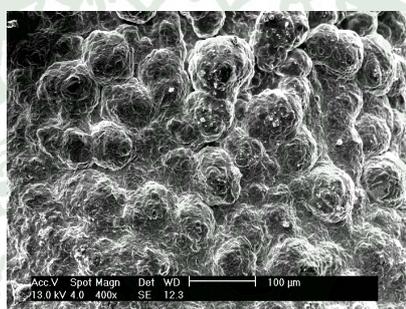
ภาพที่ 34 อิทธิพลของความหนาแน่นกระแส 1 1.5 และ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ชุบเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยส่งผลต่อร้อยละพื้นที่อนุภาคบนพื้นผิวชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน

2.2.2 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบพูนตัวหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน

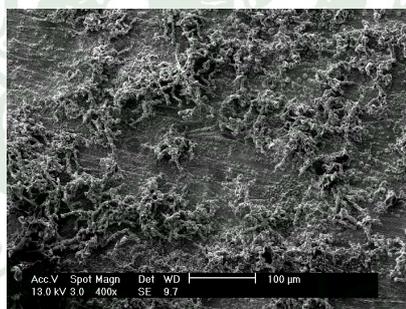
ภาพที่ 35 แสดงลักษณะของชั้นเคลือบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ส่งผลให้วัสดุสร้างรูพูน โพลีเอทิลีนไกลคอลถูกกำจัดออกไป ทำให้เกิดพื้นผิวมีความพูนตัวที่ผิวแตกต่างกันออกไปดังแสดงในภาพที่ 35 โดยแต่ละภาพมีลักษณะความพูนตัวที่แตกต่างกันออกไป พบว่าเมื่อปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอลที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีปริมาณเท่ากัน คือ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยชิ้นงานที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1 1.5 และ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร พื้นที่โพลีเอทิลีนไกลคอลฝังตัวบนชั้นทองแดงร้อยละ 34.33 47.80 และ 34.33 ของพื้นที่ทั้งหมดตามลำดับ ค่าความหนาแน่นกระแสมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะไม่ส่งผลให้ค่าความพูนตัวบนพื้นผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 36



(ก)

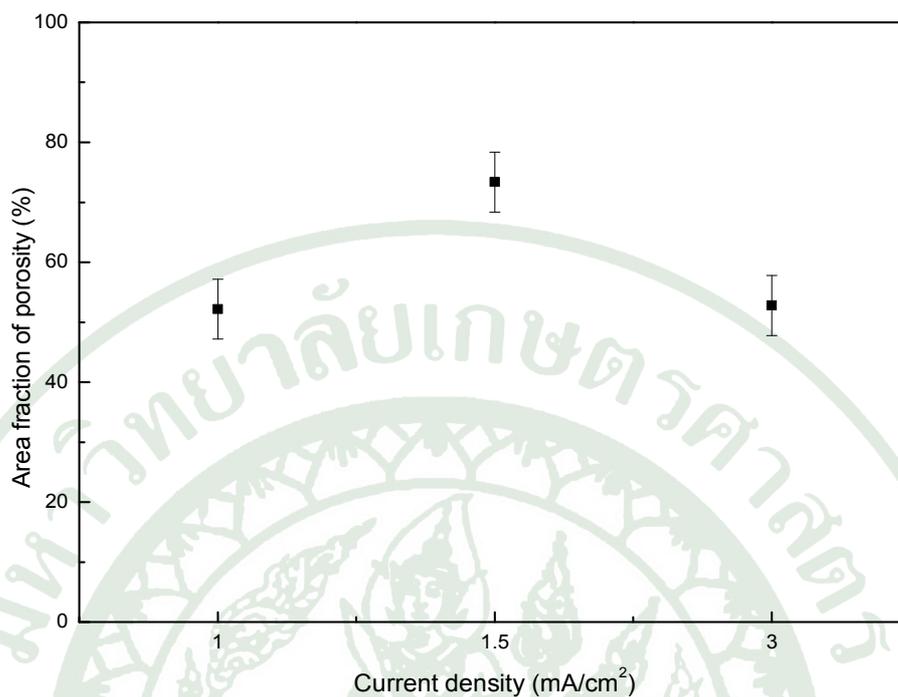


(ข)



(ค)

ภาพที่ 35 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1 1.5 และ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (ก ข และ ค ตามลำดับ) ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร



ภาพที่ 36 อิทธิพลของความหนาแน่นกระแส 1 1.5 และ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยมีปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ซุบเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยส่งผลต่อร้อยละความพรุนตัวบนพื้นผิวชิ้นงานหลังจากกระบวนการทางความร้อน

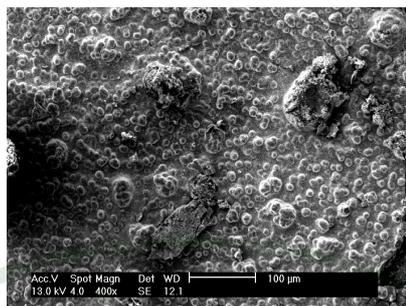
2.3 อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบ

จากอิทธิพลของความหนาแน่นกระแสและปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอลในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์พบว่าที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้สารละลาย อิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตรจะให้ชั้นเคลือบที่มีความพรุนตัว สูงที่สุด ทำให้นำไปสู่การศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อลักษณะชั้นเคลือบอย่างไร โดยในการศึกษาได้กำหนดตัวแปรของระยะเวลาที่ใช้ชุบคือ 15 30 และ 60 นาที เพื่อเปรียบเทียบช่วงเวลาที่ว่ามีอิทธิพลต่อลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคเป็นอย่างไร

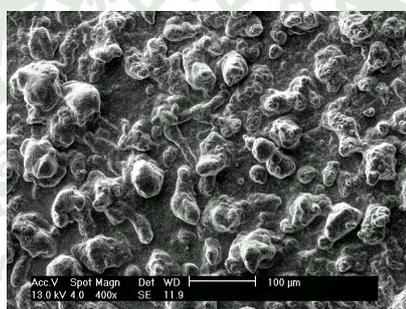
2.3.1 อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบ ก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน

- ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบ

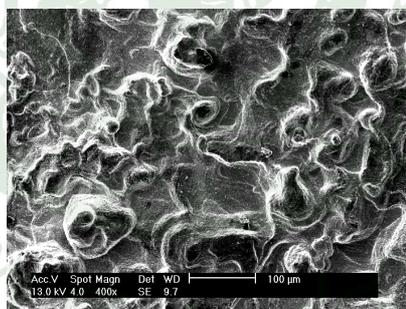
ลักษณะชิ้นงานหลังจากผ่านการชุบ โดยอาศัยเทคนิคการสะสมทางไฟฟ้าเคมี ผังแบบผังร่วมที่ระยะเวลา 15 นาที ลักษณะพื้นผิวมีการกระจายตัวของอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลทั่วทั้งบริเวณพื้นที่ผิว ดังแสดงในภาพที่ 37 เมื่อทำการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าที่เวลา 15 นาที พื้นที่ของอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลเป็นร้อยละ 36.33 ของพื้นที่ทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ชุบด้วยระยะเวลา 60 นาที ชิ้นงานมีลักษณะเสียรูปไปเนื่องจากอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพไปเป็นวุ้น ซึ่งเป็นผลมาจากสภาวะการสั้นของโมเลกุล สารละลายอิเล็กโทรไลต์ส่งผลให้เกิดความร้อนมากขึ้น ประกอบกับช่วงเวลาที่มากส่งผลให้อนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลรวมตัวกันดังในภาพที่ 37 เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากลักษณะพื้นผิวเกิดการเสียสภาพไป ดังแสดงในภาพที่ 38



(ก)

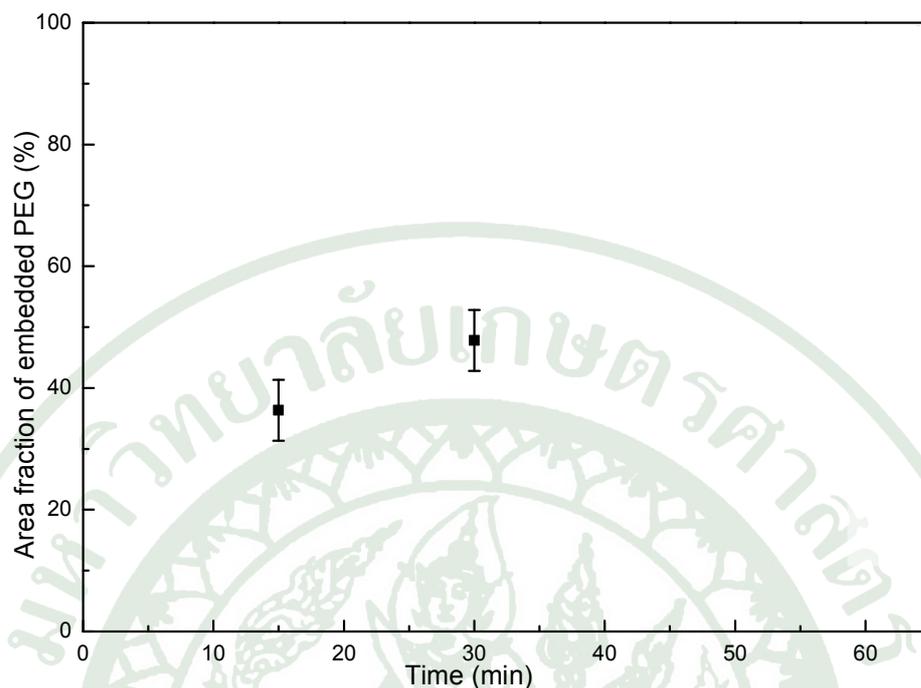


(ข)



(ค)

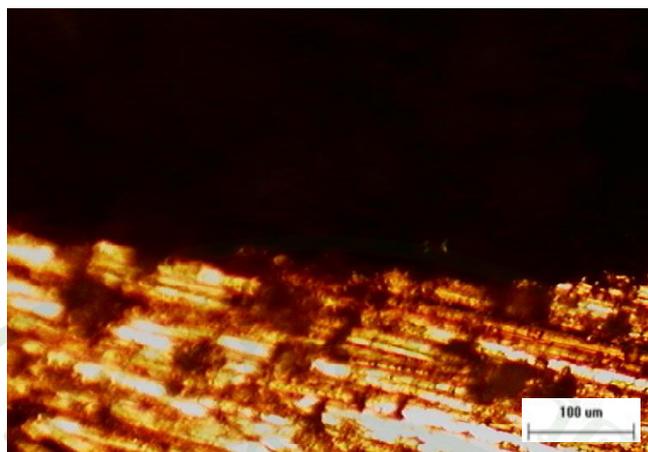
ภาพที่ 37 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร



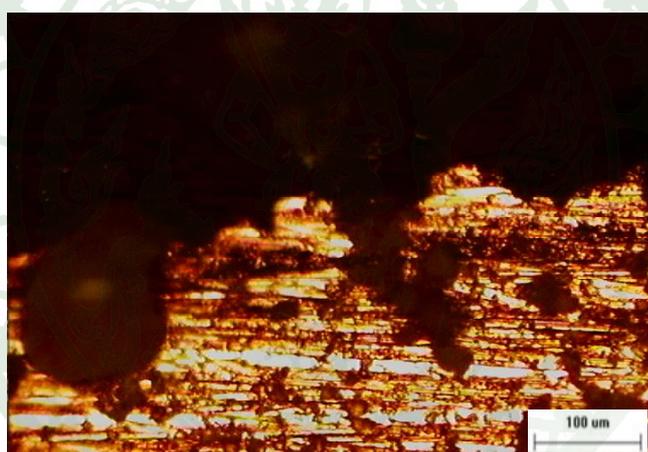
ภาพที่ 38 อิทธิพลระยะเวลาที่ใช้ในการชุบที่ 15 และ 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยส่งผลต่อร้อยละพื้นที่อนุภาคที่กระจายตัวบนพื้นผิวชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน

- ลักษณะภาคตัดขวางของชิ้นเคลือบ

จากภาพที่ 39 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ระยะเวลาที่ใช้ในการชุบแตกต่างกันคือ 15 และ 30 นาที พบว่าอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลที่ฝังตัวอยู่ในชั้นเคลือบทองแดงการกระจายตัวในลักษณะที่แตกต่างกัน คือ เมื่อเพิ่มระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้นลักษณะของอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลที่ฝังตัวในชั้นเคลือบมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น



(ก)



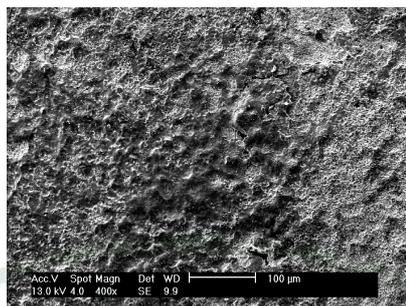
(ข)

ภาพที่ 39 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาชุบ 15 และ 30 นาที (ก และ ข ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน

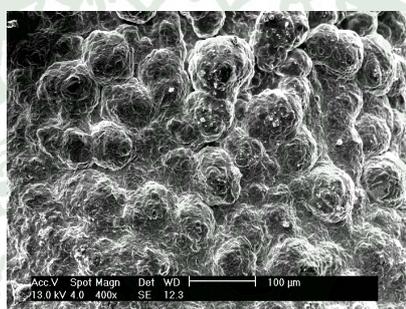
2.3.2 อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบ หลังผ่านกระบวนการทางความร้อน

- ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบพรุณตัว

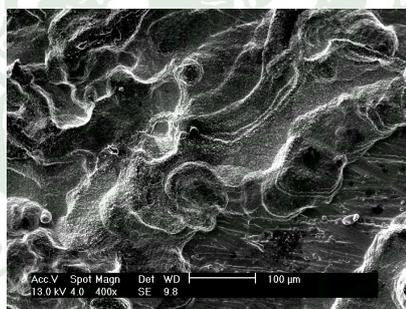
เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อสลายวัสดุสร้างพรุณคือ โพลีเอทิลีนไกลคอล พบว่าเมื่อวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยระยะเวลา 15 นาที มีลักษณะที่แตกต่างจากชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยระยะเวลา 60 นาที ดังแสดงในภาพที่ 40 ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยระยะเวลา 60 นาที จะเสียดสภาพของผิวชิ้นงานเนื่องจากผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของอัลตราโซนิกส่งผลให้โพลีเอทิลีนไกลคอลที่ฝังตัวบนพื้นผิวเกิดการเสียดสภาพส่งผลให้ชิ้นงานไม่มีลักษณะความพรุณตัวหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยระยะเวลา 15 และ 30 นาที ตามลำดับจะมีลักษณะพรุณตัวที่ผิว ดังแสดงในภาพที่ 41



(ก)



(ข)

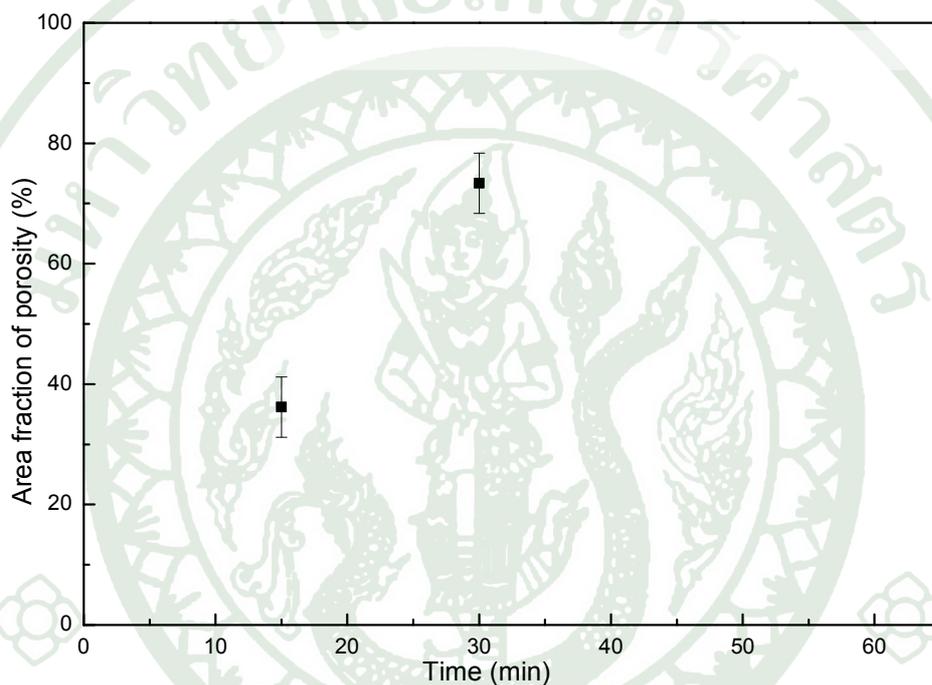


(ค)

ภาพที่ 40 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากกระบวนการทางความร้อนโดยชุบที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร

ระยะเวลาที่ใช้ในการซุบที่แตกต่างกันย่อมส่งผลให้ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบมีความแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบความพรุนตัวของชั้นเคลือบพบว่า ชั้นงานที่ซุบภายใต้ระยะเวลา 15 นาที มีความพรุนตัวร้อยละ 36.19 ของพื้นที่ทั้งหมด และชั้นงานที่ซุบภายใต้ระยะเวลา 60 นาที ลักษณะพื้นผิวเกิดการเสียสภาพไม่สามารถวัดได้ ดังในภาพที่

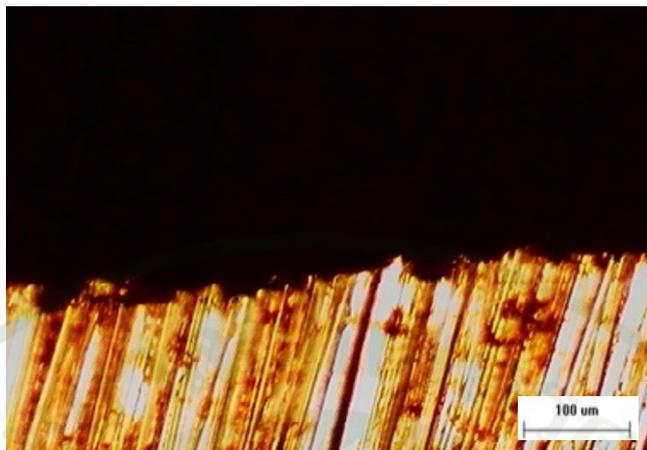
41



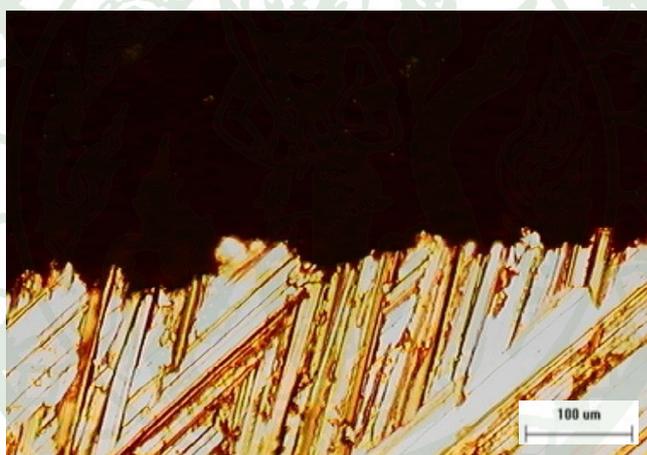
ภาพที่ 41 อิทธิพลระยะเวลาที่ใช้ในการซุบที่ 15 และ 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยส่งผลต่อร้อยละความพรุนตัวบนพื้นผิวชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน

- ลักษณะภาคตัดขวางของชั้นเคลือบ

จากภาพที่ 42 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน ที่ซุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ซุบด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกันคือ 15 และ 30 นาที พบว่า ขนาดของรูพรุนที่ผิวรวมไปถึงจำนวนของรูพรุนมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการซุบที่เพิ่มมากขึ้น โดยสอดคล้องกับลักษณะภาพตัดขวางของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน



(ก)



(ข)

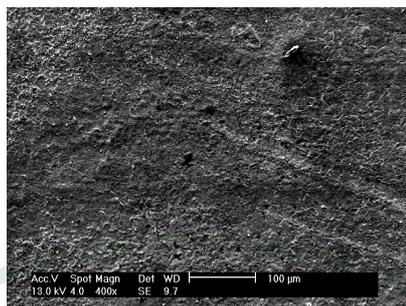
ภาพที่ 42 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาในการชุบ 15 และ 30 นาที (ก และ ข ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร หลังผ่านกระบวนการทางความร้อน

2.4 อิทธิพลของสารเติมแต่งเจลาตินที่มีผลต่อลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบ

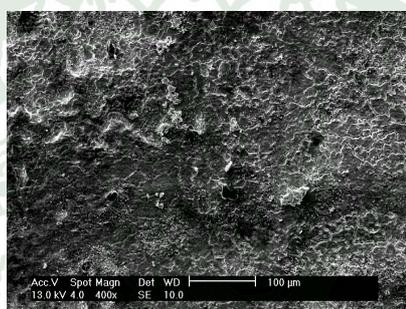
เจลาตินเป็นสารเติมแต่งที่ถูกเติมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการชุบเพื่อช่วยให้สร้างวัสดุพอรุนตัวที่ผิวให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นกว่าเดิมซึ่งเจลาตินเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการชุบด้วยไฟฟ้าเคมี โดยเจลาตินความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตรถูกเติมในปริมาณ 5 มิลลิลิตรต่อลิตร จุดประสงค์ของการเติมสารเติมแต่งเจลาตินเพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลให้อนุภาคทองแดงและอนุภาคโพสิเอทีลินไกลคอลลเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และพื้นผิวมีลักษณะที่เรียบกว่าชิ้นงานที่ไม่มีสารเติมแต่งอิเล็กโทรไลต์

2.4.1 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน

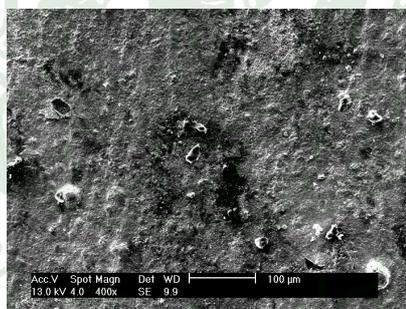
ลักษณะของพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ถูกชุบด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีสารเติมแต่งเจลาติน ด้วยระยะเวลาการชุบที่แตกต่างกันคือ 15 30 และ 60 นาที ภายใต้เงื่อนไขความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และปริมาณโพสิเอทีลินไกลคอลลในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร พบว่าชิ้นงานทั้งหมดไม่มีอนุภาคโพสิเอทีลินไกลคอลลกระจายตัวอยู่ทั้งสามช่วงระยะเวลาที่ชุบ ดังแสดงในภาพที่ 43 เมื่อนำภาพมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าชิ้นงานทั้งหมดไม่มีพื้นที่อนุภาคโพสิเอทีลินไกลคอลลปรากฏอยู่บนพื้นผิวชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 44



(ก)

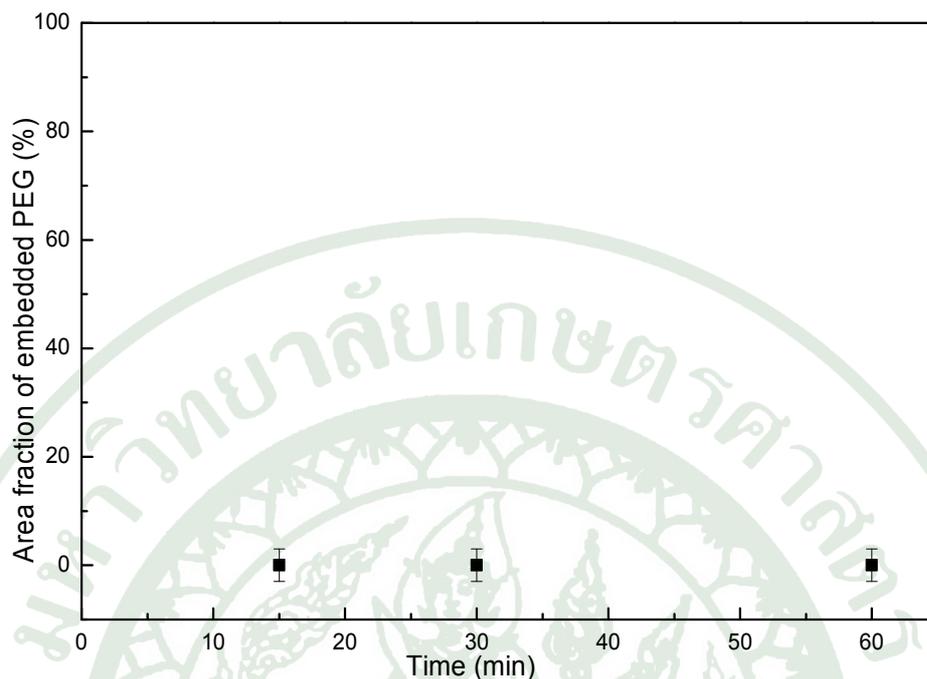


(ข)



(ค)

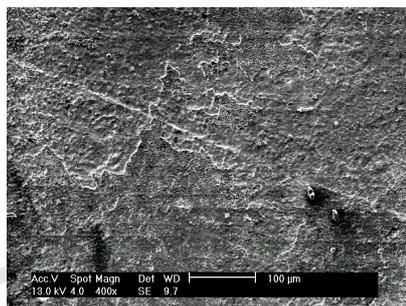
ภาพที่ 43 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร และสารเติมแต่งเจลาติน



ภาพที่ 44 อิทธิพลของสารเติมแต่งเจลาตินin ระยะเวลาที่ใช้ในการชุบที่ 15 30 และ 60 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยส่งผลต่อร้อยละพื้นที่อนุภาคที่กระจายตัวบนพื้นผิวชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน

2.4.2 ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบพรุณตัวหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน

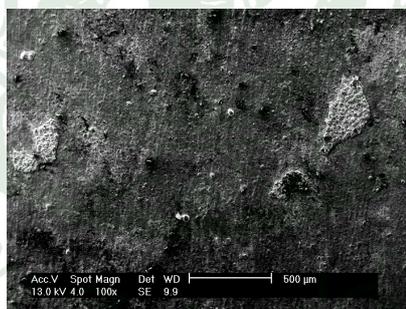
หลังจากที่ชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกันคือ 15 30 และ 60 นาที เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อกำจัดโพลีเอทิลีนไกลคอล พบว่าชิ้นงานทั้งสามชิ้นไม่ปรากฏลักษณะพรุณตัว ดังแสดงในภาพที่ 45 เมื่อนำภาพมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนไม่ปรากฏลักษณะพรุณตัวที่ผิวเหมือนกับชิ้นงานก่อนที่จะผ่านกระบวนการทางความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 46



(ก)

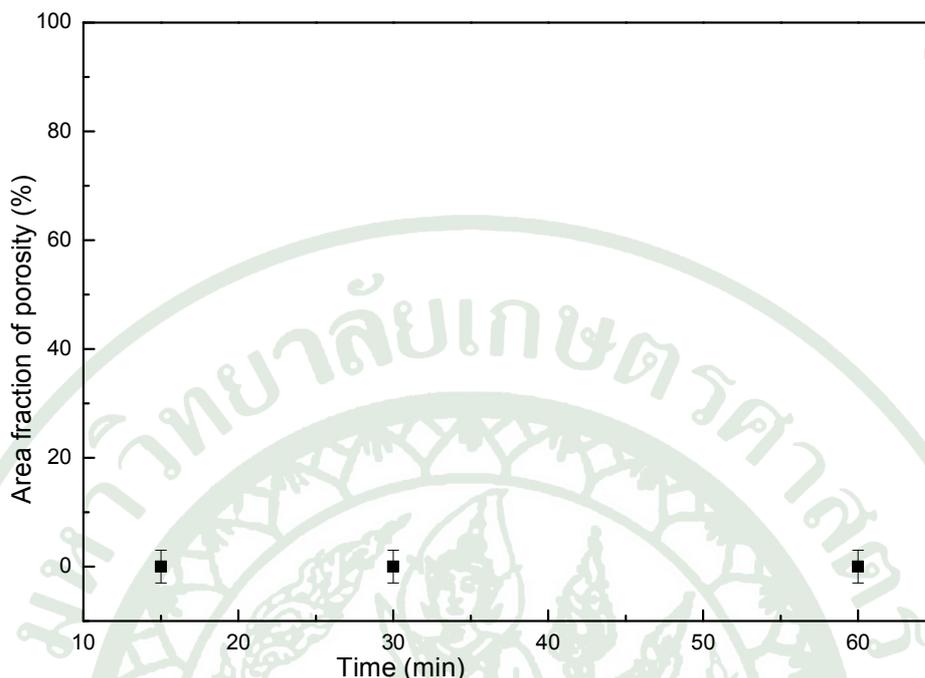


(ข)



(ค)

ภาพที่ 45 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร และสารเติมแต่งเจลาติน



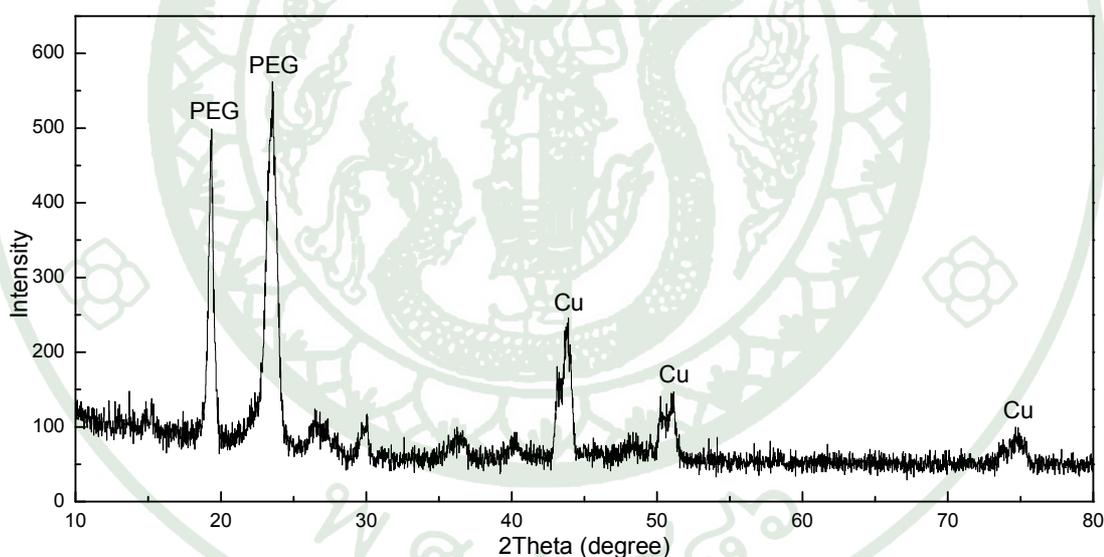
ภาพที่ 46 อิทธิพลของสารเติมแต่งเจลาติน ระยะเวลาที่ใช้ในการชุบที่ 15 30 และ 60 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยส่งผลต่อร้อยละความพรุนตัวบนพื้นผิวชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากเจลาติน ซึ่งเป็นสารเติมแต่งที่ถูกเติมเข้าไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการชุบให้ได้ผลดียิ่งขึ้น แต่สิ่งที่เกิดขึ้นกลับส่งผลให้ประสิทธิภาพการชุบไม่ได้ผลที่ดีขึ้นและส่งผลให้ชิ้นงานไม่เกิดลักษณะพรุณตัวที่ผิวหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนตามที่ต้องการ เนื่องจากเจลาตินมีลักษณะเป็นสายโซ่ยาว ในสภาวะการชุบปกติ โมเลกุลของเจลาตินจะช่วยให้อะตอมของทองแดงเกิดการจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบ ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการชุบภายใต้สภาวะอัลตราโซนิคส่งผลให้สายโซ่เจลาตินเกิดการแกว่งตัวทำให้อนุภาคทองแดงไม่สามารถยึดเกาะบนพื้นผิวได้ รวมไปถึงความสามารถนำพาอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลไปจับตัวกับพื้นผิวหรือจับตัวกับอนุภาคทองแดงด้วยกันได้ ส่งผลให้พื้นผิวไม่ปรากฏลักษณะพรุณตัวทั้งก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อนและหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนดังแสดงในภาพที่ 44 และภาพที่ 46 ตามลำดับ

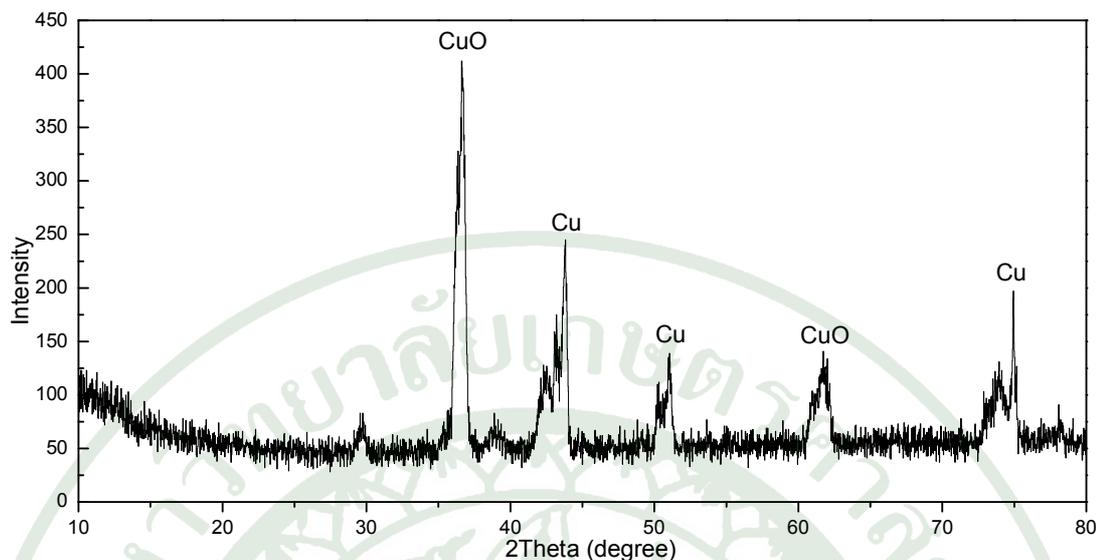
3. องค์ประกอบของเฟสในชั้นเคลือบทองแดง

3.1 องค์ประกอบของเฟสในชั้นเคลือบ

ภาพที่ 47 แสดงผล XRD ของชั้นเคลือบทองแดงก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยพบว่าชั้นเคลือบที่ผ่านการชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีโพลีเอทิลีนไกลคอลอยู่ปริมาณ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ระยะเวลาในการชุบ 30 นาที จะปรากฏเฟส 2 เฟส คือ เฟสของโพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) และเฟสของทองแดง (Cu) เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อกำจัดวัสดุสร้างความพรุนตัว แล้วนำมาวิเคราะห์ XRD ของชั้นเคลือบพรุนตัว พบว่าเฟส PEG เกิดการหายไป และมีเฟสของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เกิดขึ้นเป็นเฟสรอง โดยมีเฟสของ Cu เป็นเฟสหลัก ดังแสดงในภาพที่ 48



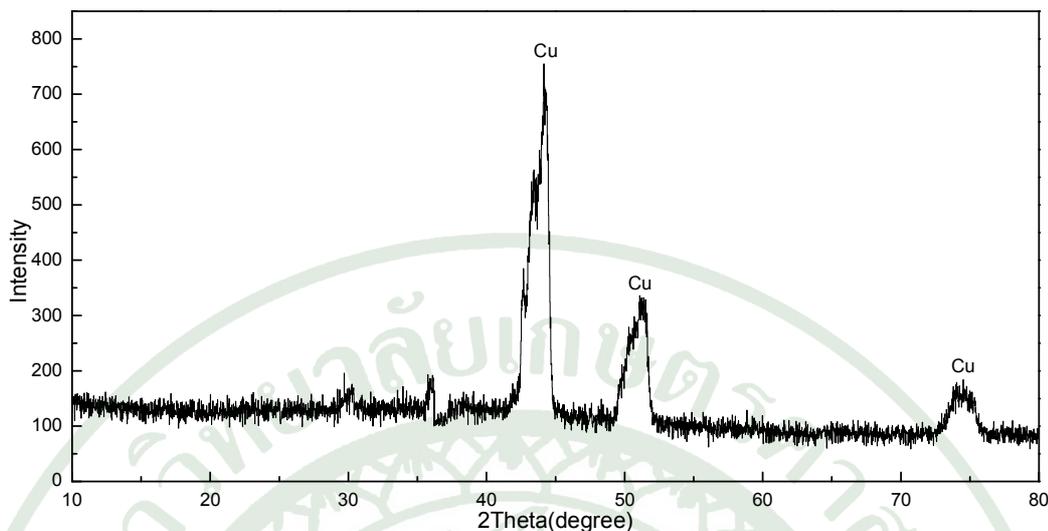
ภาพที่ 47 ผล XRD ของชั้นเคลือบก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ระยะเวลาในการชุบ 30 นาที



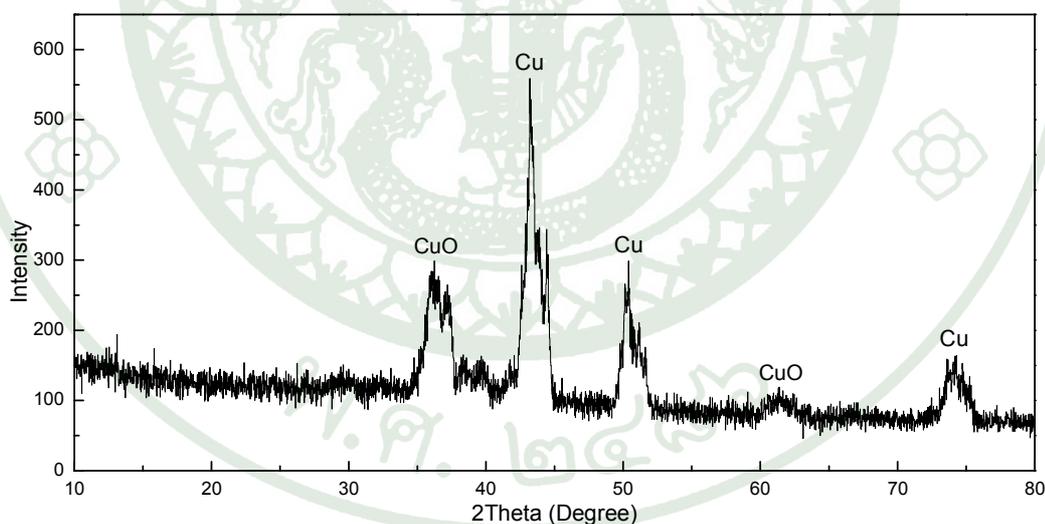
ภาพที่ 48 ผล XRD ของชั้นเคลือบหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยความหนาแน่น กระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อ มิลลิลิตรที่ระยะเวลาในการชุบ 30 นาที

3.2 อิทธิพลของสารเติมแต่งเจลาตินที่มีผลต่อองค์ประกอบของเฟสในชั้นเคลือบ

ชิ้นงานที่ผ่านการชุบ โดยมีสารเติมแต่งที่เป็นเจลาตินภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่าองค์ประกอบของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน ปรากฏเพียงเฟสเดียวคือ เฟสของ Cu ดังแสดงในภาพที่ 49 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน หลังจากที่น่าชิ้นงานไปผ่านกระบวนการทางความร้อน แล้วนำมาวิเคราะห์ องค์ประกอบของเฟสชั้นเคลือบพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเฟส มีเพียงเฟสของ CuO ที่ปรากฏขึ้นมา ดังแสดงในภาพที่ 50 ซึ่งเฟสของ CuO เกิดจากในขณะที่ชิ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อน ขณะที่ชิ้นงานถูกให้ความร้อนแล้วเกิดการสัมผัสกับบรรยากาศส่งผลให้เกิดออกไซด์บนชั้นเคลือบ เช่นเดียวกับเฟส CuO ที่ปรากฏในผล XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการชุบโดยไม่มีสารเติมแต่งเจลาตินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์



ภาพที่ 49 ผล XRD ของชั้นเคลือบก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยความหนาแน่น กระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อ มิลลิลิตรและสารเติมแต่งเจลาตินระยะเวลาในการชุบ 30 นาที



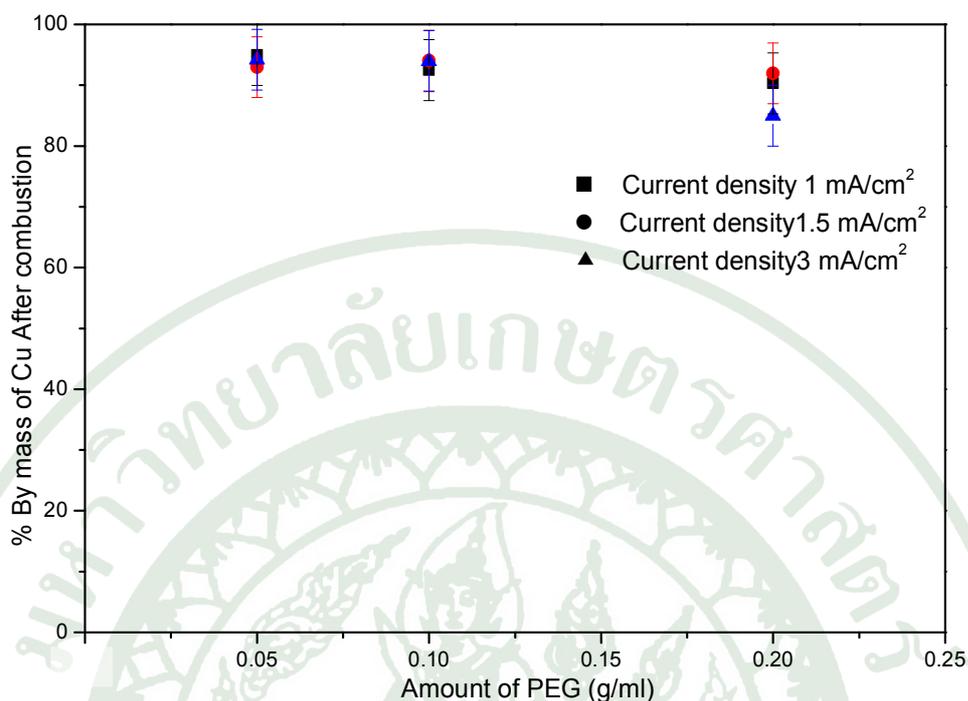
ภาพที่ 50 ผล XRD ของชั้นเคลือบก่อนหลังกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยความหนาแน่น กระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อ มิลลิลิตร และสารเติมแต่งเจลาตินระยะเวลาในการชุบ 30 นาที

4. สมบัติทางเคมีของชั้นเคลือบที่เป็นวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านกระบวนการสร้างด้วยเทคนิคการสะสมทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม

4.1 การสร้างชั้นเคลือบพูนตัวบนวัสดุพื้นทองแดง

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบพูนตัวทองแดงหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน

องค์ประกอบทางเคมีที่แสดงให้เห็นลักษณะของร้อยละทองแดงบนชั้นเคลือบที่ผ่านการชุบด้วยค่าความหนาแน่นกระแสที่แตกต่างกันคือ 1 1.5 และ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอลที่แตกต่างกันคือ 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ระยะเวลาในการชุบนาน 30 นาที พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่มีปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอล 0.05 กรัมต่อลิตร จะมีปริมาณทองแดงร้อยละ 94.94 โดยมวล ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด และปริมาณธาตุอื่นๆ ร้อยละ 5.06 โดยมวล ดังแสดงภาพที่ 51

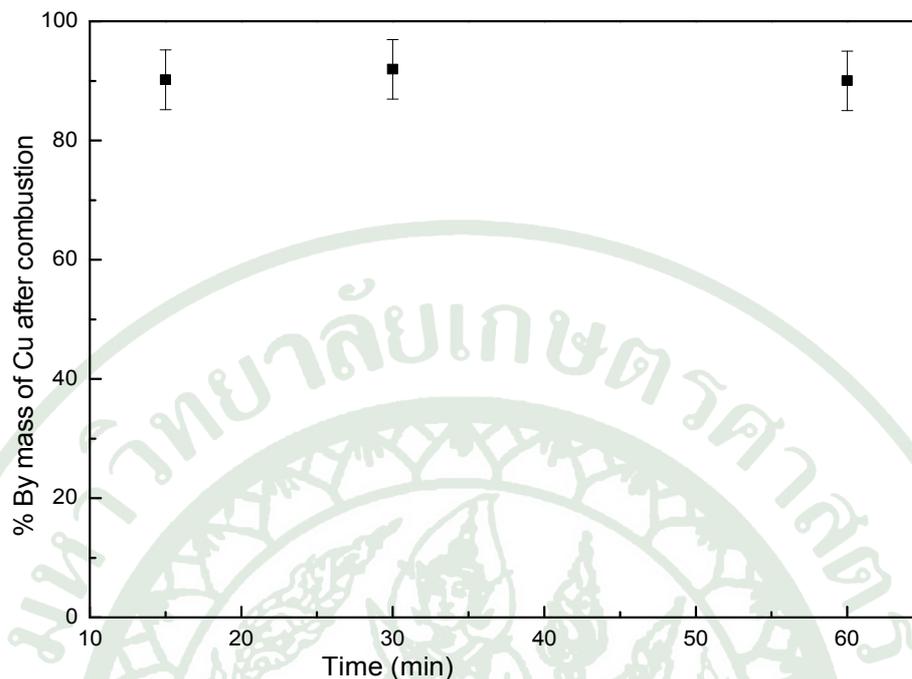


ภาพที่ 51 อิทธิพลของความหนาแน่นกระแส 1 1.5 และ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรและปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ชุบเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยส่งผลต่อร้อยละปริมาณทองแดงโดยมวลหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน

เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่มีปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร จะมีปริมาณทองแดงร้อยละ 84.96 โดยมวล และปริมาณธาตุอื่นๆ ร้อยละ 15.04 โดยมวล ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 51

4.2 อิทธิพลของเวลาต่อองค์ประกอบทางเคมีกับการสร้างชั้นเคลือบพูนตัวบนวัสดุทองแดงหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของวัสดุพูนตัวที่ผ่านการชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมฝัง พบว่า ชั้นงานที่ผ่านการชุบด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณโพธิเอทิสีนไกลคอลประมาณ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ชั้นงานจะมีค่าความพูนตัวต่อพื้นที่มากที่สุด ทำให้นำไปสู่การทดลองในปัจจุบันในเรื่องของอิทธิพลของระยะเวลาที่ใช้ชุบกับการสร้างชั้นเคลือบพูนตัวทองแดง ช่วงของระยะเวลาที่เลือกใช้ในการทดลองคือ 15 และ 60 นาที พบว่าชั้นงานที่ถูกชุบด้วยระยะเวลา 15 นาที มีปริมาณทองแดงร้อยละ 90.91 โดยมวล และชั้นงานที่ผ่านการชุบด้วยระยะเวลา 60 นาที มีปริมาณทองแดงร้อยละ 90.01 โดยมวล ดังนั้นเมื่อนำชั้นงานที่ผ่านการชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบฝังรวมทั้ง 3 ช่วงเวลามาเปรียบเทียบกัน คือ 15 30 และ 60 นาที ดังแสดงในภาพที่ 52 พบว่าปริมาณร้อยละของทองแดงโดยมวลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมที่ระยะเวลาแตกต่างกันจะไม่ส่งผลถึงความแตกต่างของปริมาณทองแดงที่ผ่านการชุบ

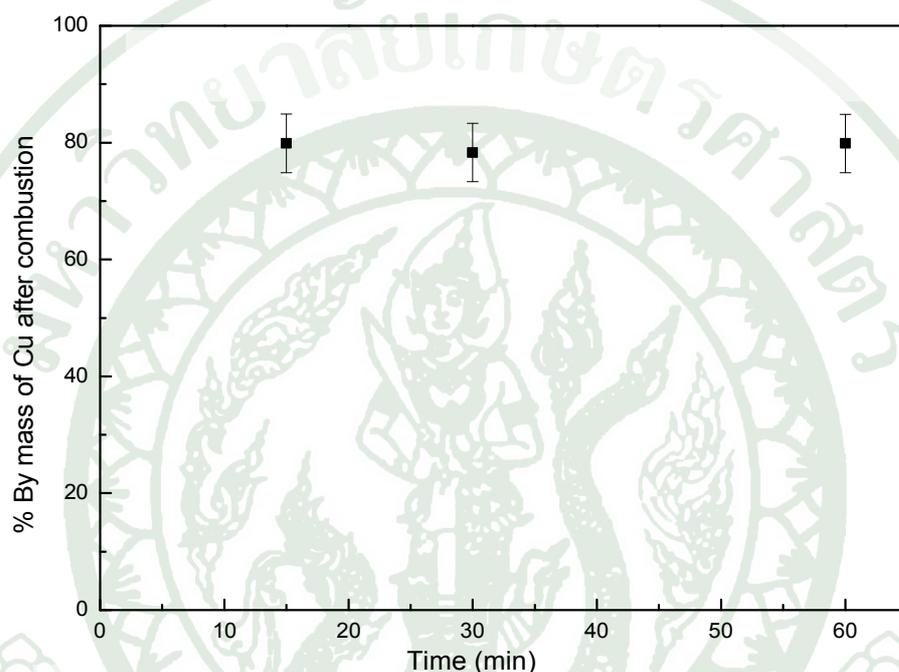


ภาพที่ 52 อิทธิพลของเวลา 15 30 และ 60 นาที ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรและปริมาณโพลิเอทิลีน ไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ชุบเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยส่งผลต่อร้อยละปริมาณทองแดงโดยมวลหลังจากกระบวนการทางความร้อน

4.3 อิทธิพลของสารเติมแต่งเจลาตินต่อองค์ประกอบทางเคมีกับการสร้างชั้นเคลือบพูนตัวบนวัสดุทองแดงหลังจากกระบวนการทางความร้อน

สารเติมแต่งเจลาตินที่ถูกเติมลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อให้เกิดการยึดติดของอะตอมทองแดงให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของเจลาตินที่อยู่ในสารเติมแต่งเจลาตินจะเป็นตัวกลางในการจัดเรียงตัวของอะตอมให้เกิดการจัดเรียงตัวได้ดีและได้มากขึ้น แต่เนื่องจากการชุบผิวได้ทำการชุบภายใต้สภาวะอัลตราโซนิกที่เกิดการสั่นของโมเลกุลของเหลวซึ่งเป็นผลมาจากสภาวะแวดล้อมที่เกิดการสั่น ส่งผลให้การยึดติดของอะตอมทองแดงที่ผิวทำได้ยากเนื่องจากโมเลกุลสายโซ่เจลาตินเกิดการสั่นอยู่ตลอดเวลา ประสิทธิภาพการชุบที่ได้จึงน้อยกว่าการชุบในสถานะที่ไม่มีสารเติมแต่งเจลาติน ดังแสดงในภาพที่ 53 พบว่าปริมาณทองแดงร้อยละ 79.88 โดยมวล เมื่อทำการชุบเป็นเวลา 15 นาทีเมื่อเพิ่มเวลามากขึ้นเป็นสองเท่าคือ 30 และ 60 นาที จะมีปริมาณทองแดงร้อยละ 78.30 และ 79.85 โดยมวลตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับอิทธิพลของระยะเวลาที่ใช้ชุบต่อองค์ประกอบทางเคมีกับการสร้างชั้นเคลือบพูนตัวบนวัสดุทองแดงว่าเมื่อ

ระยะเวลาในการชุบเพิ่มมากขึ้นจะไม่ส่งผลให้ปริมาณทองแดงมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การชุบในสถานะที่ไม่มีสารเติมแต่งเจลาติน จะมีความแตกต่างของปริมาณทองแดงร้อยละ 10 โดยมวลซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าสารเติมแต่งเจลาตินที่เติมเข้าไปมีผลต่อปริมาณทองแดงหลังจากผ่านการชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม



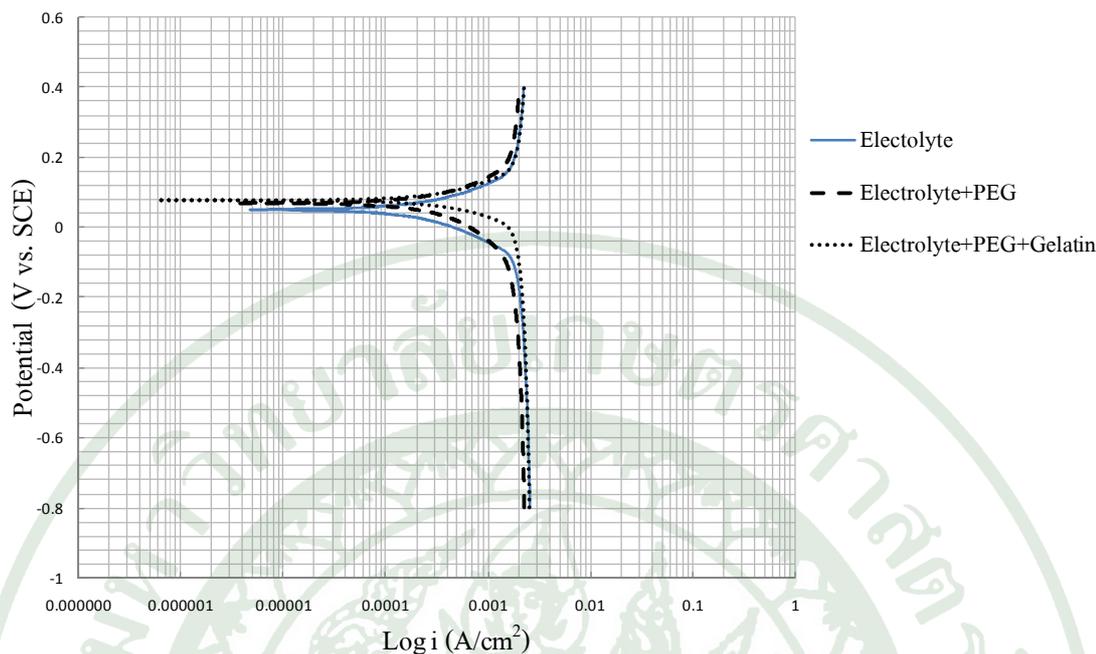
ภาพที่ 53 อิทธิพลของสารเติมแต่งเจลาติน ที่ชุบด้วยระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรและปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ชุบเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยส่งผลต่อร้อยละปริมาณทองแดงโดยมวลหลังจากกระบวนการทางความร้อน

อภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองสร้างวัสดุพูนตัวที่ผิวแนวใหม่โดยอาศัยเทคนิคการสะสมไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม เพื่อสร้างความรู้และทักษะสำหรับใช้ในการชุบผิววัสดุรวมไปถึงอาศัยวิธีทางไฟฟ้าเคมีสำหรับชุบผิว ปรับปรุงพื้นผิววัสดุที่เป็น โลหะ ซึ่งในงานวิจัยได้เลือกใช้วัสดุทองแดงสร้างเป็นวัสดุพูนตัวที่ผิว โดยทองแดงมีข้อดีคือหาได้ง่ายและมีราคาถูก หลังจากชุบด้วยเทคนิคการสะสมไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม โดยอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลเป็นวัสดุสร้างรูพูนในสภาวะอัลตราโซนิก จะถูกนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อกำจัดวัสดุสร้างรูพูนต่อไป อย่างไรก็ตามหลังจากได้ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทั้งหมดแล้วจะถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นบนชิ้นเคลือบเพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตวัสดุที่แตกต่างกัน

1. ประสิทธิภาพของทองแดงในการผลิตวัสดุพูนตัวที่ผิวด้วยเทคนิคไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม

จากการศึกษาค่าออกซิเดชันและรีดักชันของทองแดงด้วยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat พบว่ามีความสอดคล้องกับการทดลองโดยช่วงการเลือกใช้ความหนาแน่นของกระแสใน 3 ช่วงที่แตกต่างกัน ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร จะให้ผลดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งหมด ซึ่งจากการศึกษาค่าออกซิเดชันและรีดักชันของทองแดงพบว่าช่วงรีดักชันที่เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของโลหะชนิดนั้นๆ ในการรับอิเล็กตรอนหรือกล่าวได้ว่าเป็นค่าที่เหมาะสมในการชุบโลหะชนิดนั้นๆ พบว่าความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร จะอยู่ในช่วงที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 54 ทำให้ชิ้นงานที่ชุบด้วยวิธีสะสมไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรให้ค่าความพูนตัวที่ผิวดีที่สุด เป็นที่น่าสังเกตเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นของกระแส ที่ความหนาแน่นกระแส 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรจะพบว่าเป็นช่วงที่เกินจุดสูงสุดที่วัสดุทองแดงจะสามารถรับอิเล็กตรอนได้หรือเรียกว่าเกินค่าจำกัดของกระแส (Limiting current density) ทำให้ประสิทธิภาพในการรับอิเล็กตรอนลดลง ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการชุบรวมไปถึงการนำพาอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลไปฝังตัวบนพื้นผิวลดลงทำให้ความพูนตัวที่ปรากฏบนพื้นผิวลดลงตามไปด้วย

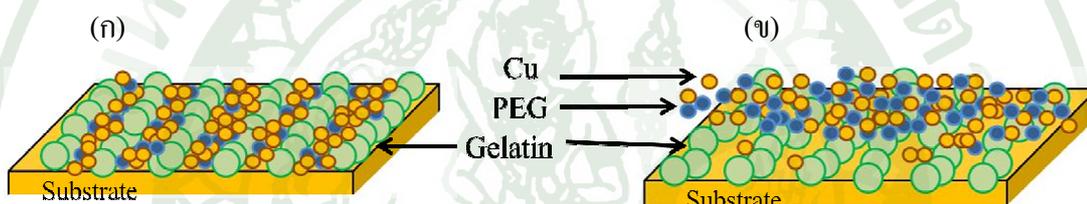


ภาพที่ 54 ค่าออกซิเดชันและรีดักชันของทองแดงภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีโพลีเอทิลีน ไกลคอลกระจายตัวอยู่ และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่งเจลาติน โดยมีโพลีเอทิลีน ไกลคอลกระจายตัวอยู่

2. อิทธิพลของอัลตราโซนิคที่มีอิทธิพลต่อความพรุนตัวของชั้นเคลือบ

จากผลการทดลองในทุกตัวแปรได้แสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นกระแส ปริมาณโพลีเอทิลีน ไกลคอลที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ระยะเวลาที่ใช้ในการชุบ และสารเติมแต่งเจลาติน ล้วนมีผลต่อความพรุนตัวแทบทั้งสิ้น ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยที่แตกต่างกันออกไป แต่ผลที่เกิดขึ้นที่มีความแตกต่างจากค่าตัวแปรการทดลองตัวแปรอื่นคือ ชิ้นงานที่มีสารเติมแต่งเจลาตินหรือเจลาตินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อผ่านกระบวนการชุบแล้ว ชิ้นงานจะไม่มี ความพรุนตัว ซึ่งเป็นผลมาจากสภาวะแวดล้อมที่ทำการชุบคือ การสั่นของอนุภาคด้วยคลื่นอัลตราโซนิค จากปกติแล้วเจลาตินที่ถูกเติมเข้าไปจะไปช่วยในการจัดเรียงตัวอะตอมให้มีความเป็นระเบียบมากขึ้น ตามงานของ (Goh *et al.*, 2013) พบว่าเมื่อเติมเจลาตินแล้วจะส่งผลให้ลักษณะพื้นผิวมีความเรียบ ลักษณะอะตอมจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ โดย (Wang *et al.*, 2011) ได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเจลาตินที่เป็นโมเลกุลและเมื่อทำการชุบด้วยกระแสไฟฟ้าแล้วอะตอมจะเกิดการยึดติดกันตามแนวของเจลาติน ดังนั้นเมื่อสภาวะแวดล้อมเกิดแรงสั่นสะเทือน ทำให้ส่งผลโดยตรงต่อโมเลกุลสายโซ่ของเจลาตินเกิดการสั่น ส่งผลให้อนุภาคโพลีเอทิลีน ไกลคอลไม่

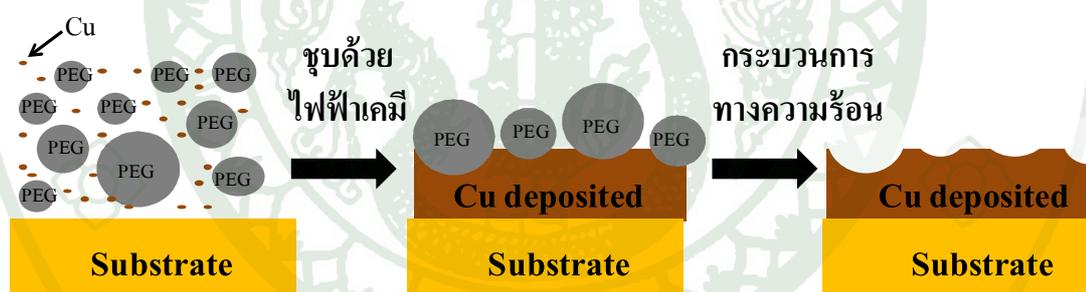
สามารถฝังตัวบนพื้นผิวได้ โดยมีเฉพาะอนุภาคทองแดงบางส่วนที่เกิดการยึดเกาะบนผิวชิ้นงาน ทำให้การสร้างวัสดุพอร์นตัวที่ผิวโดยเติมสารเติมแต่งเจลาตินลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ล้มเหลว ดังกลไกการเกิดที่แสดงดังภาพที่ 55 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการทดลองในสภาวะที่ไม่มีสารเติมแต่งเจลาตินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่าเกิดลักษณะพื้นผิวที่มีความพอร์นตัวในทุกสภาวะการทดลอง ซึ่งมากหรือน้อยแตกต่างกันตามสภาวะการทดลอง โดยในการทดลองได้ทำการชุบชิ้นงานภายใต้สภาวะอัลตราโซนิก เพื่อต้องการที่จะให้อนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลเกิดการกระจายตัวยึดเกาะได้ทั่วทั้งชิ้นงาน ส่งผลให้วัสดุเกิดลักษณะพอร์นตัวที่ผิวชิ้นงานภายใต้สภาวะอัลตราโซนิก โดยสภาวะอัลตราโซนิกมีอิทธิพลส่งผลให้ไม่เกิดลักษณะพอร์นตัวที่ผิวภายใต้การในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีสารเติมแต่งเจลาติน



ภาพที่ 55 เปรียบเทียบระหว่างลักษณะการชุบภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีสารเติมแต่งเจลาติน (ก) ที่สภาวะปกติ และ (ข) ลักษณะการชุบภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีสารเติมแต่งเจลาตินในสภาวะอัลตราโซนิก

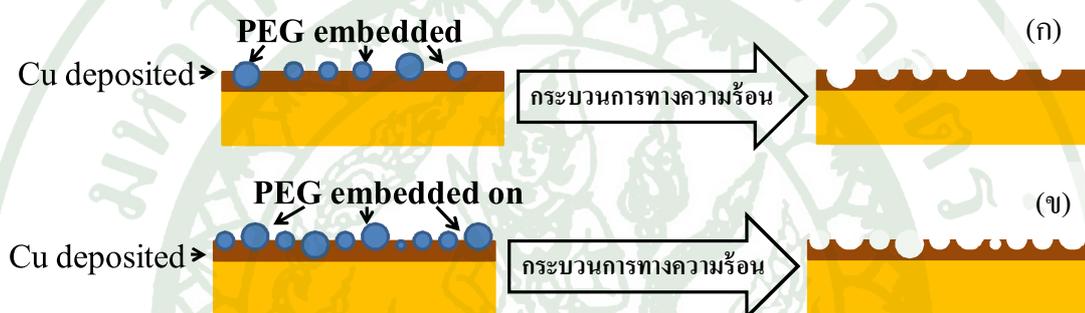
3. อิทธิพลของโพลีเอทิลีนไกลคอลที่มีผลต่อลักษณะและปริมาณความพรุนตัว

การเพิ่มปริมาณรูพรุนในกระบวนการผลิตวัสดุพรุนตัวพบว่า วัสดุพรุนตัวที่ผลิตโดยอาศัยวัสดุอื่นในการสร้างรูพรุนเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุสร้างรูพรุนแล้วจะส่งผลโดยตรงต่อจำนวนรูพรุนหรือความพรุนตัวภายในเนื้อวัสดุซึ่งจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน (Shimiza *et al.*, 2012, Hasan and Habibolahzadeh, 2010, Manonukul *et al.*, 2010) โดยปกติแล้วความพรุนตัวหรือจำนวนรูพรุนย่อมจะแปรผันตรงกัน กล่าวคือ เมื่อวัสดุสร้างรูพรุนมีแนวโน้มสูงขึ้นก็จะสอดคล้องกับความพรุนตัวหรือจำนวนรูพรุนก็จะสูงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย จากการสังเกตพบว่าลักษณะรูพรุนบนพื้นผิววัสดุไม่มีความสอดคล้องกับขนาดของอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลซึ่งเป็นผลมาจากการยึดเกาะอนุภาคลงบนพื้นผิวที่หุบ อนุภาคเกิดการฝังตัวได้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพหรือกล่าวได้ว่าอนุภาคเกิดการฝังตัวลงบนพื้นผิวได้เพียงร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 40 ของขนาดอนุภาค เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อนแล้วส่งผลให้ลักษณะตลอดจนขนาดของรูพรุนที่ผิวไม่มีความสัมพันธ์กับวัสดุสร้างรูพรุนที่ผิวก็คือขนาดของโพลีเอทิลีนไกลคอลดังแสดงในภาพที่ 56



ภาพที่ 56 กลไกการเกิดลักษณะพรุนตัวที่ผิวโดยวัสดุสร้างรูพรุนโพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG)

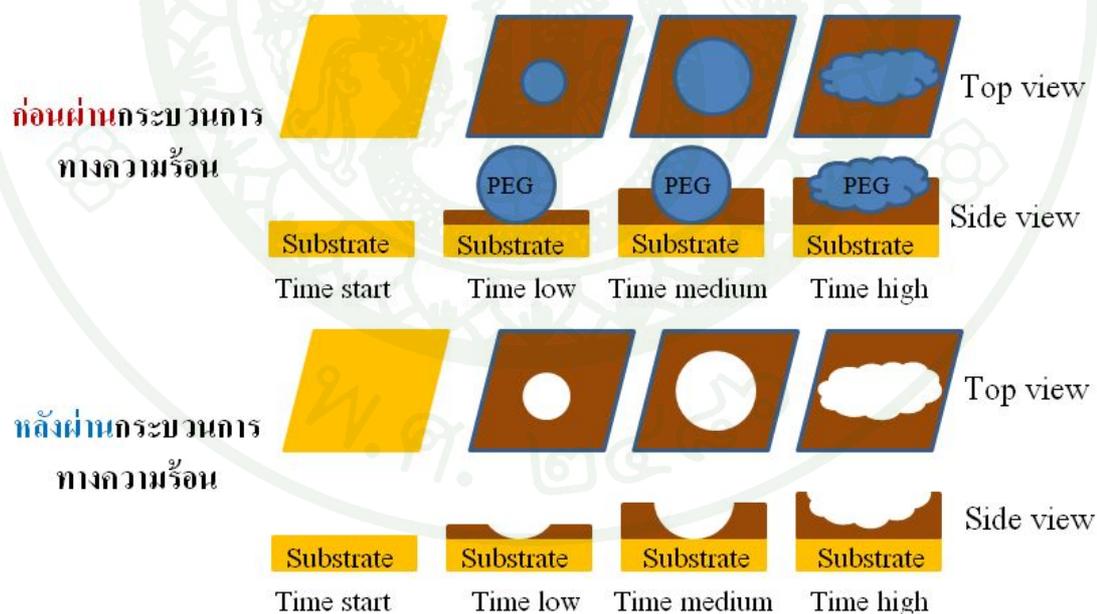
จากผลการทดลองพบว่า เมื่อชุบด้วยความหนาแน่นกระแสที่เท่ากันคือ 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอลในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ ร้อยละความพรุนตัวที่ผิวมีมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM เพื่อวิเคราะห์ความพรุนตัวพบว่าร้อยละความพรุนตัวที่ผิวจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอลที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ลักษณะของชั้นเคลือบมีความพรุนตัวที่ไม่สม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน หรือเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ทดลองในสภาวะการทดลองที่แตกต่างกันมาก การกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่กว้างย่อมส่งผลต่อลักษณะความพรุนตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 57



ภาพที่ 57 เปรียบเทียบลักษณะการฝังตัวของโพลีเอทิลีน ไกลคอล โดยที่ (ก) ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอลน้อย และ (ข) ปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอลมาก

4. อิทธิพลของระยะเวลาชุบที่ส่งผลต่อลักษณะความพรุนตัวบนพื้นผิว

ระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้นในกระบวนการชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมพบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความหนาของชั้นเคลือบมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในระยะเวลาดั้ง ชั้นเคลือบยังมีความหนาไม่มากส่งผลให้อนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลสามารถฝังตัวได้เพียงบางส่วน เมื่อระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้นชั้นเคลือบมีความหนาเพิ่มขึ้น อนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลสามารถฝังตัวได้มากขึ้น คือประมาณร้อยละ 40 ของขนาดอนุภาค และที่ระยะเวลาสูงที่สุดอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลสูญเสียสภาพกลายเป็นฝุ่นทำให้ชั้นเคลือบสูญเสียลักษณะไปตามการเปลี่ยนแปลงสภาพโพลีเอทิลีนไกลคอล หลังผ่านกระบวนการทางความร้อนลักษณะรูพรุนมีลักษณะแตกต่างกันออกไปตามระยะเวลาที่ชุบ โดยระยะเวลาดั้ง ขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กและตื้น เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นลักษณะของรูพรุนมีความลึกและกว้างมากขึ้น ที่ระยะเวลาสูงที่สุดลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเกิดการเสียหายเนื่องจากวัสดุสร้างรูพรุนคือโพลีเอทิลีนไกลคอลเกิดการเสียหายกลายเป็นฝุ่นในขั้นตอนการชุบก่อนการผ่านกระบวนการทางความร้อนดังภาพที่ 58



ภาพที่ 58 กลไกที่เป็นไปได้ของระยะเวลาชุบที่แตกต่างกับลักษณะความพรุนตัวที่ผิว

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาการผลิตวัสดุพรุณตัว โดยมีจุดมุ่งหมายในการสร้างวัสดุพรุณตัวซึ่งอาศัยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมและกระบวนการทางความร้อน โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลที่ 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิเมตร ที่ความหนาแน่นกระแส 1 1.5 และ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาที่ใช้ในการชุบที่แตกต่างกันคือ 15 30 และ 60 นาที รวมไปถึงศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งเจลาตินที่มีผลต่อลักษณะพรุณตัวพบว่า ปริมาณอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลและสารเติมแต่งเจลาตินเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อแนวโน้มความพรุณตัวของพื้นผิว ซึ่งในขณะที่ความหนาแน่นกระแสและเวลาไม่มีแนวโน้มต่อความพรุณตัว

1. ปริมาณอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลมีผลต่อลักษณะความพรุณตัวของพื้นผิวเนื่องจากอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลเป็นวัสดุสร้างความพรุณตัวที่ผิวในชั้นเคลือบ กล่าวคือ ปริมาณอนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่น้อยจะส่งผลให้ลักษณะพรุณตัวลดลง ลักษณะของความขรุขระต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะต่ำ ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณของโพลีเอทิลีนไกลคอลในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ลักษณะพรุณตัวเพิ่มมากขึ้น

2. สารเติมแต่งเจลาตินที่ถูกเติมลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อจุดประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการชุบระหว่างการสร้างวัสดุพรุณตัวด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมนั้นเป็นสิ่งที่ส่งผลโดยตรงทำให้ไม่เกิดความพรุณตัวเนื่องจาก ได้รับอิทธิพลจากสถานะแวดล้อมที่เป็นอัลตราโซนิกส่งผลให้ไม่เกิดลักษณะพรุณตัว เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการชุบที่ไม่มีสารเติมแต่งเจลาติน พบว่าสถานะอัลตราโซนิกเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้อนุภาคโพลีเอทิลีนไกลคอลเกิดการกระจายตัวและถูกอิเล็กตรอนนำพาไปฝังตัวอยู่บนชั้นเคลือบหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนแล้วทำให้เกิดลักษณะพรุณตัวบนพื้นผิวที่เกิดขึ้น

3. ความหนาแน่นกระแส เป็นสิ่งที่เพิ่มมากขึ้นแต่ส่งผลให้ความพรุณตัวลดลง ซึ่งความหนาแน่นกระแสที่เพิ่มขึ้นในการทดลองเป็นค่าที่เกินความสามารถของทองแดงที่จะรับอิเล็กตรอนได้ทำให้ประสิทธิภาพในการชุบมีประสิทธิผลลดลง ไม่ว่าจะเป็นการนำพาอิเล็กตรอน การยึด

ตัวการจับตัวกันของอะตอมทองแดงที่พื้นผิวทองแดงตลอดจนประสิทธิภาพการนำพาอนุภาคโพลีเอทิลีน ไกล-คอลลดลง ส่งผลถึงลักษณะความพรุนตัวที่ผิวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยความหนาแน่นกระแสที่ต่ำกว่า

4. ระยะเวลาในการชุบที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้โพลีเอทิลีน ไกลคอลที่ฝังตัวบนชั้นเคลือบและโพลีเอ-ทิลีน ไกลคอลที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นรูปร่างส่งผลให้ชิ้นงานชิ้นงานที่ชุบด้วยระยะเวลาที่มากกว่า 30 นาที ชั้นเคลือบเกิดการเสียหายและหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนแล้วลักษณะพื้นผิวไม่ปรากฏลักษณะพรุนตัวเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ชุบด้วยระยะเวลาที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 นาที ที่พบว่าปรากฏลักษณะพรุนตัวที่ผิว

5. กระบวนการผลิตวัสดุพรุนตัวที่ผิวแนวใหม่ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าแบบฝังร่วมและกระบวนการทางความร้อนเป็นวิธีสร้างวัสดุพรุนตัวที่ผิวที่อาศัยกระบวนการผลิตหลายกระบวนการมาประยุกต์ร่วมกัน และมีความโดดเด่นในเรื่องของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาถูกลงสามารถผลิตได้ในบรรยากาศปกติและระยะเวลาที่ใช้สั้น สามารถผลิตชิ้นงานให้มีขนาดรูพรุนได้ตามความต้องการ ซึ่งถ้าเกิดการพัฒนกระบวนการผลิตให้สามารถควบคุมขนาดของรูพรุนได้ ก็จะสามารถนำไปสู่การประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตวัสดุทางการแพทย์ หรือประยุกต์ใช้ในด้านพลังงานได้โดยจะต้องมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้วัสดุพรุนตัวที่ผิวตามที่ต้องการ

ข้อเสนอแนะ

ในการสร้างวัสดุพอร์ซิวหรือวัสดุพอร์ซิวที่ผิวของวัสดุที่เป็นทองแดงจะเห็นได้ว่าอุปสรรคที่เกิดขึ้นคือ ลักษณะของความพอร์ซิวที่เกิดขึ้นอย่างไม่เป็นระเบียบ รวมไปถึงชิ้นงานที่ถูกชุบแต่ละครั้งมีการจัดเรียงตัวของรูพอร์ซิวที่แตกต่างกันออกไปหลายลักษณะ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นผู้วิจัยพบว่ายังมีความเป็นไปได้ที่จะแก้ปัญหที่เกิดขึ้น โดยอาศัยวิธีการและเทคนิคอื่นเข้ามาแก้ไขปัญหาคือ การเพิ่มปริมาณ โพลีเอทิลีน ไกลคอล การเปลี่ยนชนิดของวัสดุสร้างรูพอร์ซิวให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่า สารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อให้เกิดการกระจายตัวได้มากขึ้น ตลอดจนอาศัยสารบางชนิดเพื่อให้อนุภาคหรือวัสดุสร้างรูพอร์ซิวเกิดการแขวนลอยในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ (Deflocculate) ซึ่งจะต้องมีการศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการชุบต่อไป และการอาศัยเทคนิคการชุบด้วยไฟฟ้าแบบ กระแสสลับ (Pulse codeposition) โดยการอาศัยไฟฟ้ากระแสสลับเป็นเทคนิคที่น่าสนใจและกำลังเป็นที่นิยมศึกษาอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถควบคุมความช้าเร็วของกลไกและกลไกอื่นๆ ขณะที่ชั้นเคลือบค่อยๆ เกิดการเรียงตัวบนพื้นผิวของวัสดุได้ ทำให้สามารถนำไปพัฒนาต่อไปได้

วัสดุพื้นที่เป็นทองแดงเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายและราคาถูกจึงเหมาะสมที่จะนำมาเริ่มต้นศึกษาเพื่อสร้างวัสดุพอร์ซิวที่ผิวด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วม เมื่อสร้างวัสดุพอร์ซิวที่ผิวตรงตามความต้องการได้แล้ว จึงนำไปสู่การประยุกต์กับวัสดุที่มีราคาสูงขึ้นเพื่อให้เกิดความชำนาญและลดต้นทุนในการทำงานวิจัย รวมไปถึงสามารถประยุกต์ใช้ได้จริงกับวัสดุทางการแพทย์ วัสดุชีวภาพ ซึ่งโดยส่วนมากจะถูกผลิตมาจากวัสดุตั้งต้นที่มีราคาที่สูง ตลอดจนสามารถประยุกต์เพื่อสร้างวัสดุที่มีความพอร์ซิวสูงและต้องการรูพอร์ซิวที่มีขนาดเล็ก เพื่อใช้ในงานด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมต่อไปในอนาคตได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- สาโรช พันธุ์แพ และ อภิชาติ ธรรมวิทย์กุล. 2526. การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า. ภาควิชาเคมี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- Abd El Rehim, S.S., S.M. Sayyah and M.M. El Deeb. 2000. Electroplating of copper films on steel substrates from acidic gluconate baths. **Applied Surface Science** 165: 249-254.
- Asholt, P. 1999. Metal foam and porous metal structures. **MIT Press-Verlag**: 133
- Banhart, J. 2001. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. **Progress in Materials Science** 46: 559-632.
- Cai, C., X.B. Zhu, G.Q. Zheng, Y.N. Yuan, X.Q. Huang, F.H. Cao, J.F. Yang and Z. Zhang. 2011. Electrodeposition and characterization of nano-structured Ni –SiC composite films. **Surface and Coatings Technology**. 205: 3448-3454.
- Cambroner, L.E.G., J.M. Ruiz-Roman, F.A. Corpas and J.M. Ruiz Prieto. 2009. Manufacturing of Al–Mg–Si alloy foam using calcium carbonate as foaming agent. **Journal of Materials Processing Technology** 209: 1803-1809.
- Carpenter, C.R., P.H. Shipway and Y.Zhu. 2011. Electrodeposition of nickel-carbon nanotube nanocomposite coatings for enhanced wear resistance. **Wear** 271: 2100-2105.
- Goh, Y., A.S.M.A. Haseeb and M.F.M. Sabri. 2013. Effects pf hydroquinone and gelatin on the electrodeposition of Sn-Bi low temperature Pb-free solder. **Electrochimica Acta** 90: 265-273.

- Gül, H., F. Kılıç, S. Aslan, A. Alp and H. Akbulut. 2009. Characteristics of electro-co-deposited Ni–Al₂O₃ nano-particle reinforced metalmatrix composite (MMC) coatings. **Wear** 267: 976-990.
- Guo-fa, M., L. Hong-yu, L. Xiang-yu and W. Kuang-Iei. 2009. Preparation, Structure and Mechanical Properties of Nickel Based Porous Spherical Superalloy. **Journal of Iron and Steel Research International** 16: 92-96.
- El-Sayed, H., M.T. Greiner and P. Kruse. 2007. Selective electroplating of copper lines on pre-patterned tantalum oxide thin films. **Applied Surface Science** 253: 8962–8968.
- Hasan, B, and A. Habibolahzadeh. 2010. Production of aluminum foam by spherical carbamide space holder technique-processing parameters. **Materials and Design** 31: 41224129.
- Hasannejad, H., T. Shahrabi, M. Jafarian and A. Sabour Rouhaghdam. 2011. EIS study of nano crystalline Ni-cerium oxide coating electrodeposition mechanism. **Journal of Alloys and Compounds** 509: 1924-1930.
- He, L., H. Liu, D. Chen, Z. Chen and X. Bai. 2002. Fabrication of Hap/ Ni biomedical coatings using an electro-codeposition technique. **Surface and Coatings Technology** 160: 109113.
- Hu, F. and K.C. Chan. 2005. Deposition behaviour and morphology of Ni–SiC electrocomposites under triangular waveform. **Applied Surface Science** 243: 251-258.
- Kyu , S. and H. Jae Yoo. 1998. Formation of bilayer Ni–SiC composite coatings by electrodeposition. **Surface and Coatings Technology** 109: 564-569.

- Li, X., X. Wang, R. Gao and L. Sun. 2011. Study of deposition patterns of plating layers in SiC/Cu composites by electro-brush plating. **Applied Surface Science** 257: 10294-10299.
- Liang-jian, C., L. Ting, L. Yi-min, H. Hao and H.U. You-hua. 2009. Porous titanium implants fabricated by metal injection molding. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China** 19: 1174-1179.
- Low, C.T.J., R.G.A. Wills and F.C. Walsh. 2006. Electrodeposition of composite coatings containing nanoparticles in a metal deposit. **Surface and Coatings Technology** 201: 371-383.
- Manonukul, A., N. Muenga, F. leaux. and S. Amaranan. 2010. Effect of replacing metal powder with powder space holder on metal foam produced by metal injection molding. **Journal of Materials Processing Technology** 210: 529-535.
- Mansourighari, A., N. Muhamad and A.B. Sulong. 2012. Procrssing titanium foams using tapioca starch as space holding. **Journal of Materials Processing Technology** 121: 83-89.
- Martin, R., L. R.J., S. Miura and H. Honma. 2003. Advanced copper electroplating for application of electronics. **Surface and Coatings Technology** 169: 91-95.
- Pang, Y., Q. Chen, X. Shen, L. Tang and H. Qian. 2010. Size-controlled Ag nanoparticle modified WO₃ composite films for adjustment of electrochromic properties. **Thin Solid Films** 518: 1920-1924.
- Park, E.W., H. Moon, M.S. Park and S.H. Hyun. 2009. Fabrication and characterization of Cu–Ni–YSZ SOFC anodes for direct use of methane via Cu-electroplating. **International Journal of Hydrogen Energy** 34: 5537-5545.

Ramsden, J.J., D.M. Allen, D.J. Stephenson, J.R. Alcock, G.N. Peggs, G. Fuller and G. Goch. 2007. The Design and Manufacture of Biomedical Surfaces. **Annual of the CIRP** 56: 687-711.

Rodchanarowan, A. 2008. **The effect of organic additive properties on microroughness of copper electrodeposited from chloride media**, Doctor of Philosophy, The University of Utah.

Ryan, G., A. Pandit and D.P. Apatsidis. 2006. Fabrication methods of porous metals for use in orthopaedic applications. **Biomaterials** 27: 2651-2670.

Shimizu, T., K. Matsuzaki, H. Nagai and N. Kanetake. 2012. Production of high porosity metal foams using EPS beads as space holders. **Materials Science and Engineering A558**: 343-348.

Smith, B.H., S. Szytniszewski, J.F. Hajjar, B.W. Schafer and S.R. Arwade. 2012. Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties. **Journal of Constructional Steel Research** 71: 1-10.

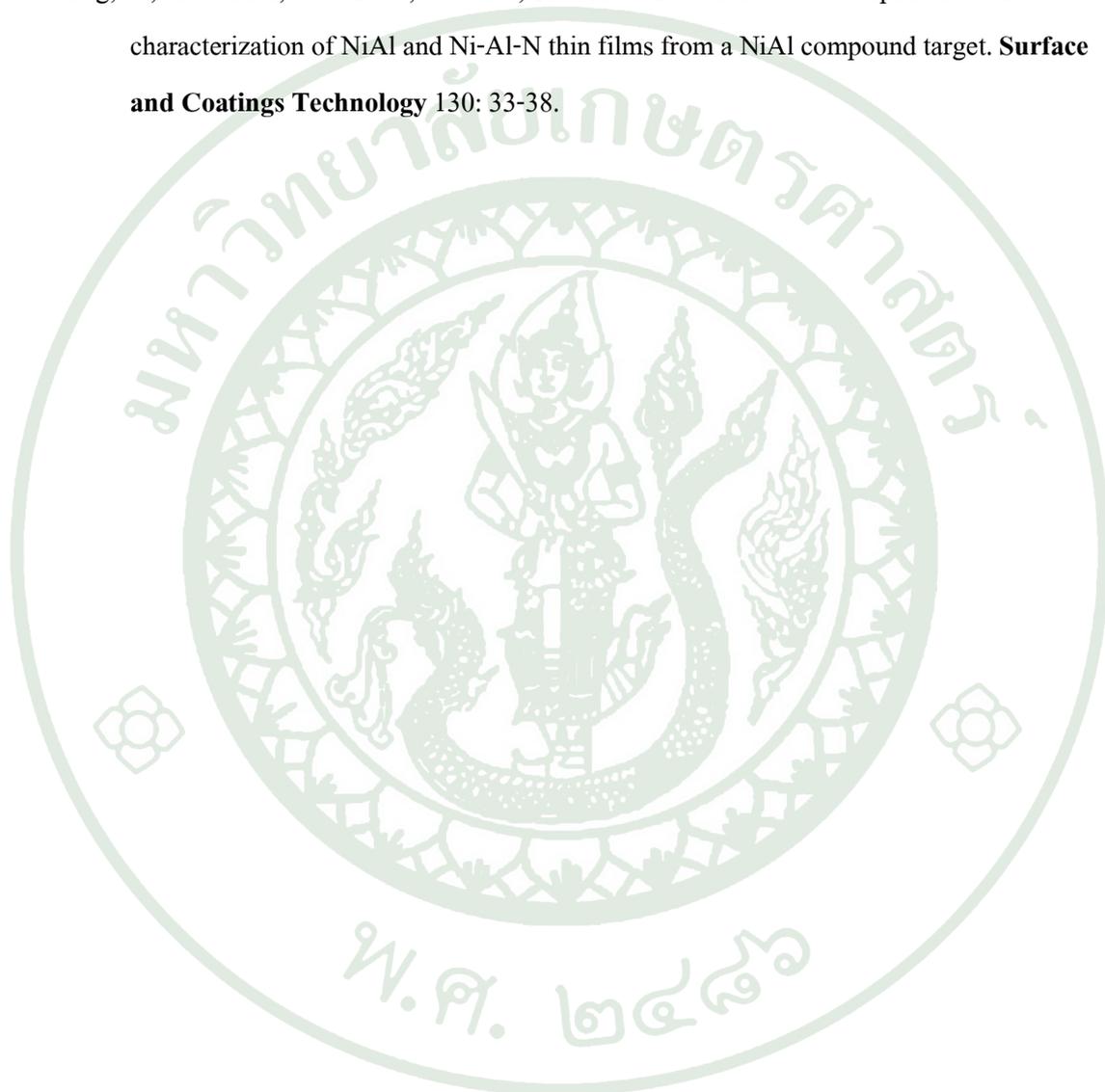
Starosvetsky, D., N. Sezin and Y. Ein-Eli. 2010. Seedless copper electroplating on Ta from a "single" electrolytic bath. **Electrochimica Acta** 55: 1656-1663.

Wang, X, B. Ding, J. Yu and J. Yang. 2011. Large-scale fabrication of two-dimensional spider-web-like gelatin nano-nets via electro-netting. **Colloids and Surfaces** 86: 345-352.

Yang, Y. and Y.F. Cheng. 2013. Fabrication of Ni–Co–SiC composite coatings by pulse electrodeposition Effects of duty cycle and pulse frequency. **Surface and Coatings Technology** 216: 282–288.

Zeng, J.L., H.P. Teng and F.H. Lu. 2012. Electrochemical deposition of barium titanate thin films on TiN/Si substrates. **Surface and Coatings Technology** 231: 237-300.

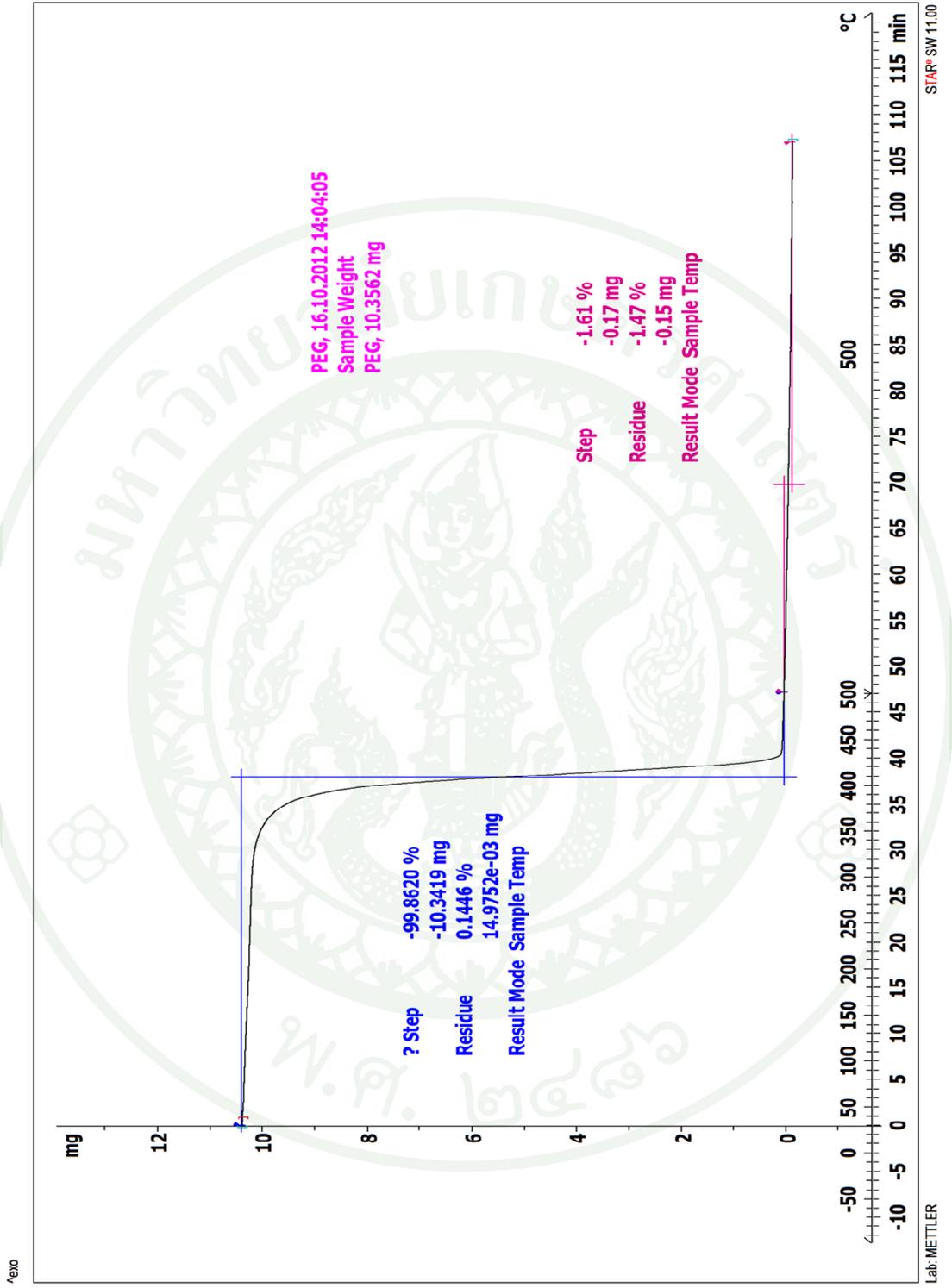
Zhong, D., J.J. Moore, T.R. Ohno, J. Disam, S. Thiel and I. Dahan. 2000. Deposition and characterization of NiAl and Ni-Al-N thin films from a NiAl compound target. **Surface and Coatings Technology** 130: 33-38.





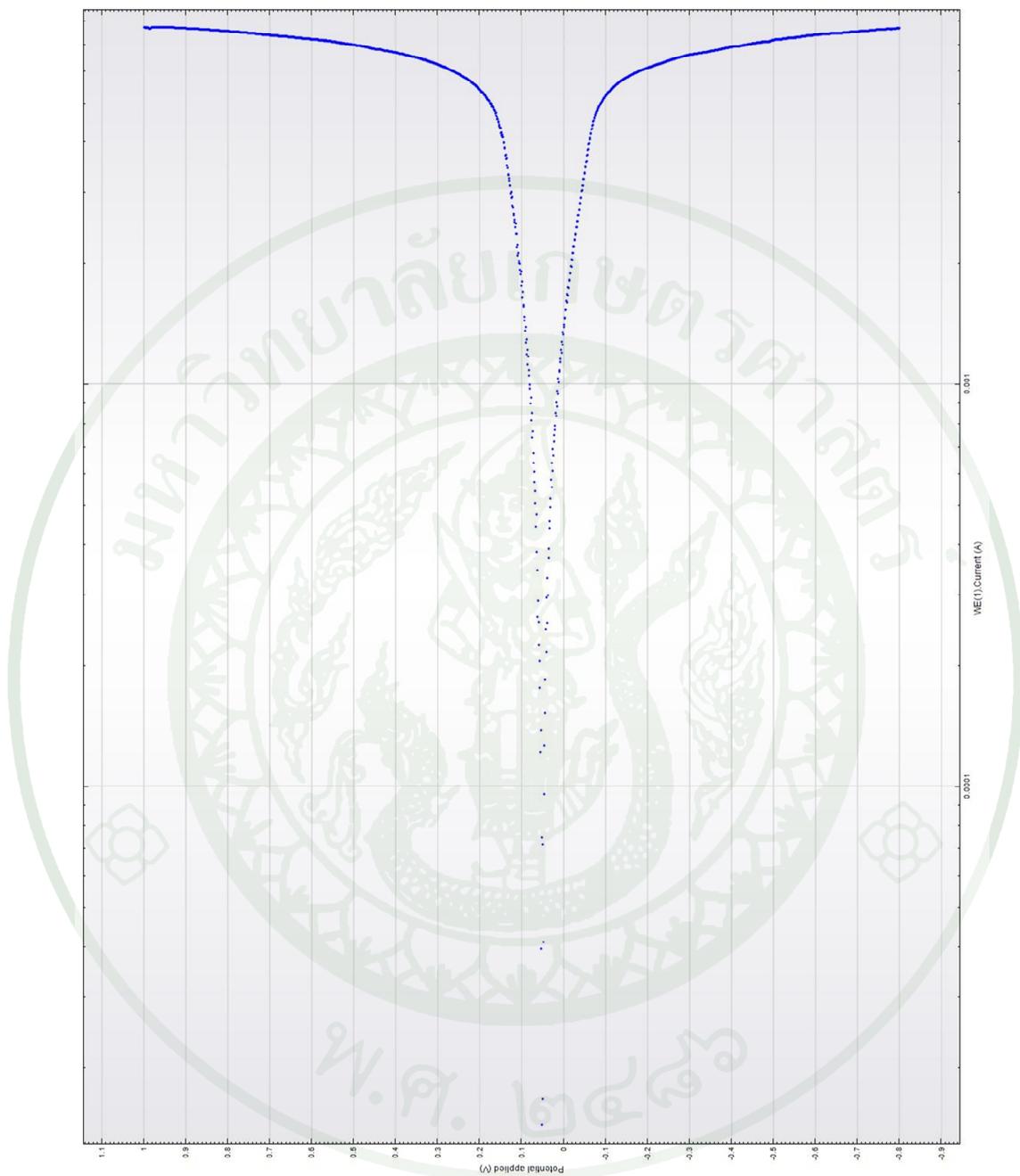


ภาคผนวก ก
ผลการวิเคราะห์ TGA ของ PEG

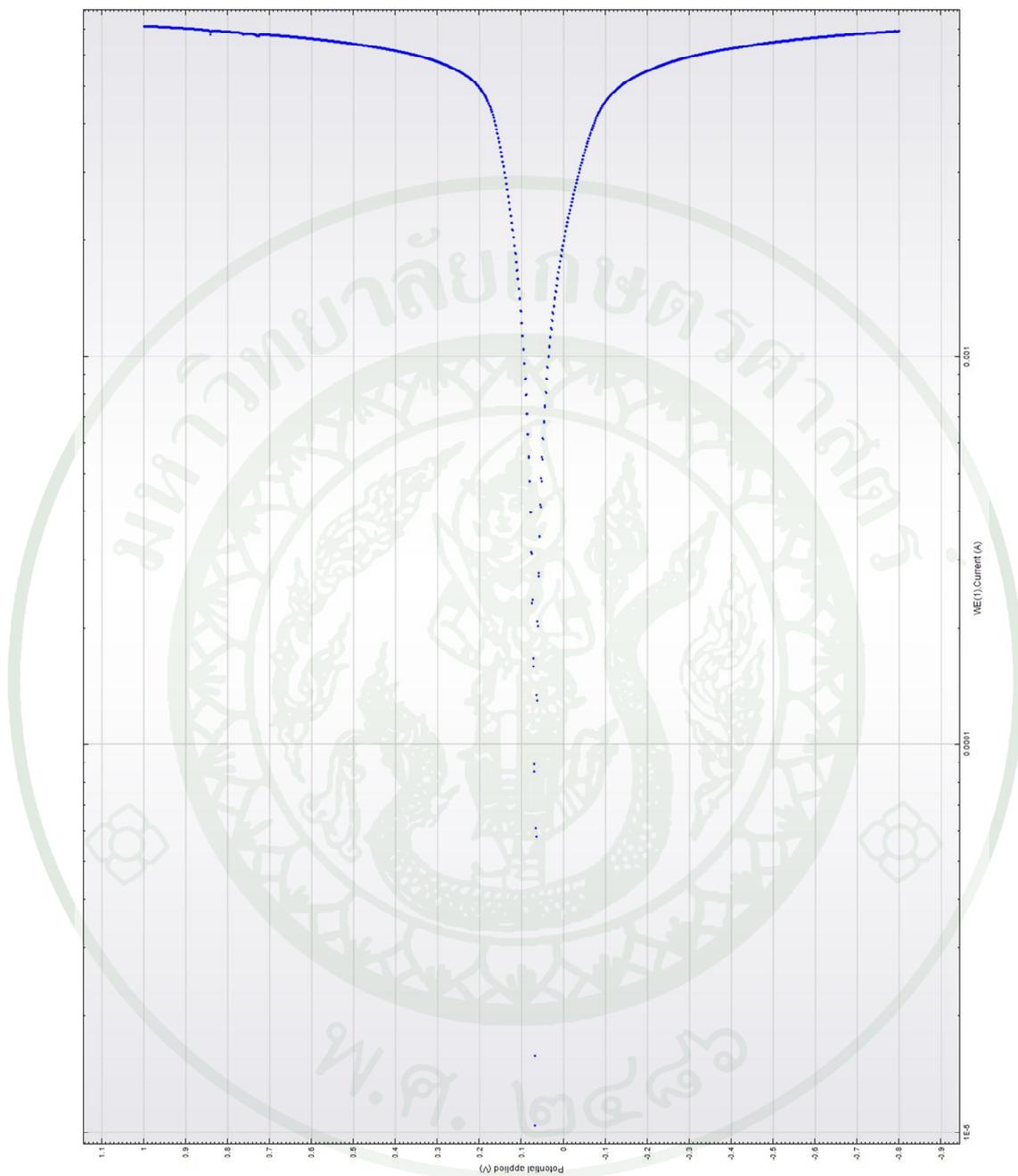


ภาพผนวกที่ ก1 ผลการวิเคราะห์ TGA ของ PEG

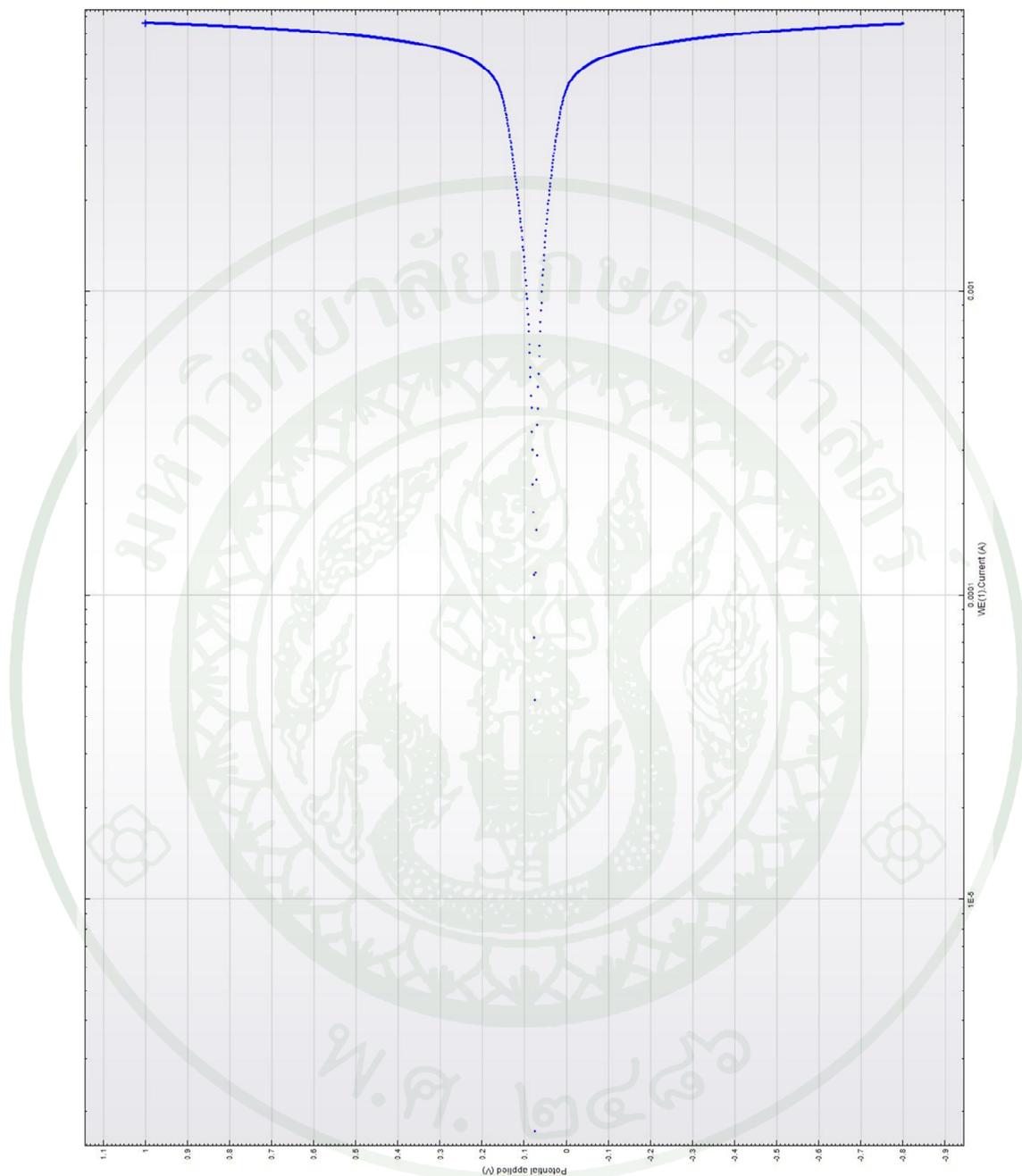




ภาพผนวกที่ ข1 การวิเคราะห์เคมีไฟฟ้าของทองแดงภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
(ปริมาณความเข้มข้น Cu 35 กรัมต่อลิตร)



ภาพผนวกที่ ข2 การวิเคราะห์เคมีไฟฟ้าของทองแดงภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (ปริมาณความเข้มข้น Cu 35 กรัมต่อลิตร) ที่มีโพลีเอทิลีนไกลคอลกระจายตัวอยู่ (ปริมาณ PEG 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตร)



ภาพผนวกที่ ข3 การวิเคราะห์เคมีไฟฟ้าของทองแดงภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (ปริมาณความเข้มข้น Cu 35 กรัมต่อลิตร) ที่มีโพลีเอทิลีน ไกลคอลกระจายตัวอยู่ (ปริมาณ PEG 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตร) และสารเติมแต่งเจลลาติน (ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตรถูกเติมในปริมาณ 5 มิลลิลิตรต่อลิตร)

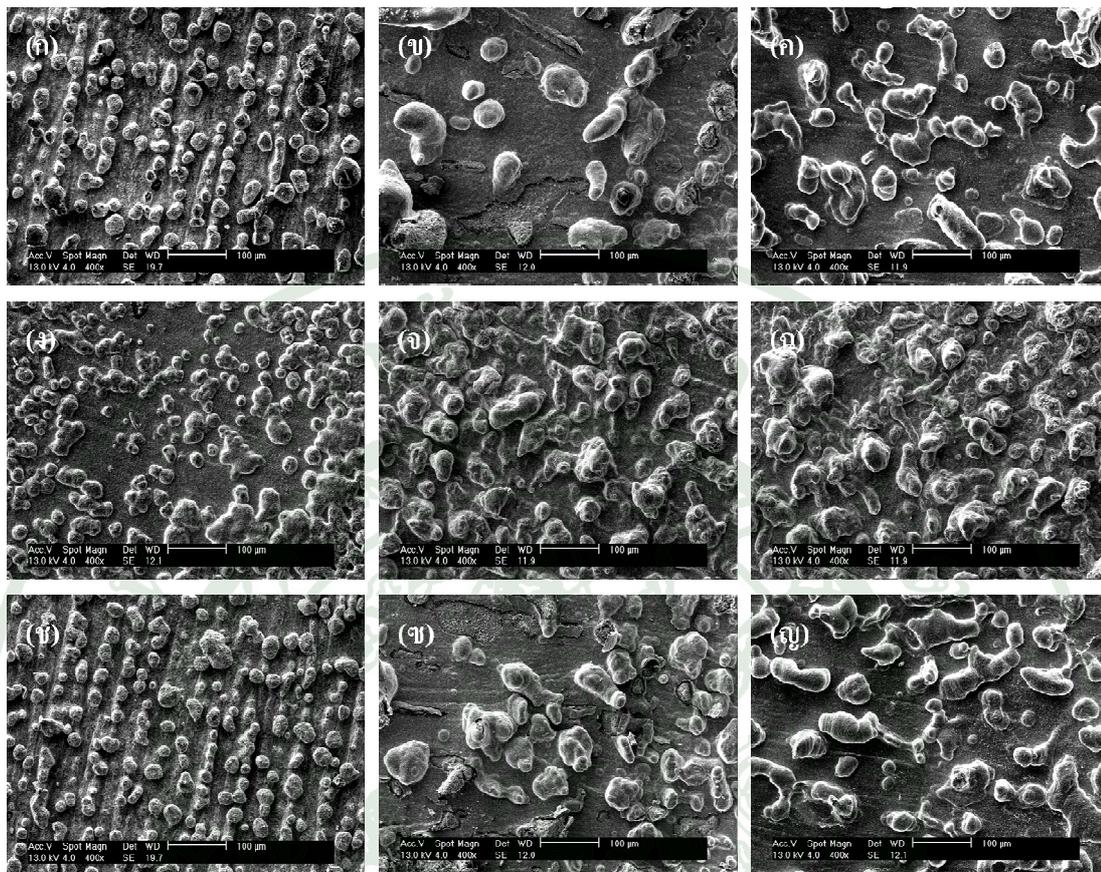


ตารางผนวกที่ ค1 ปริมาณร้อยละของทองแดง (โดยมวล) หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน

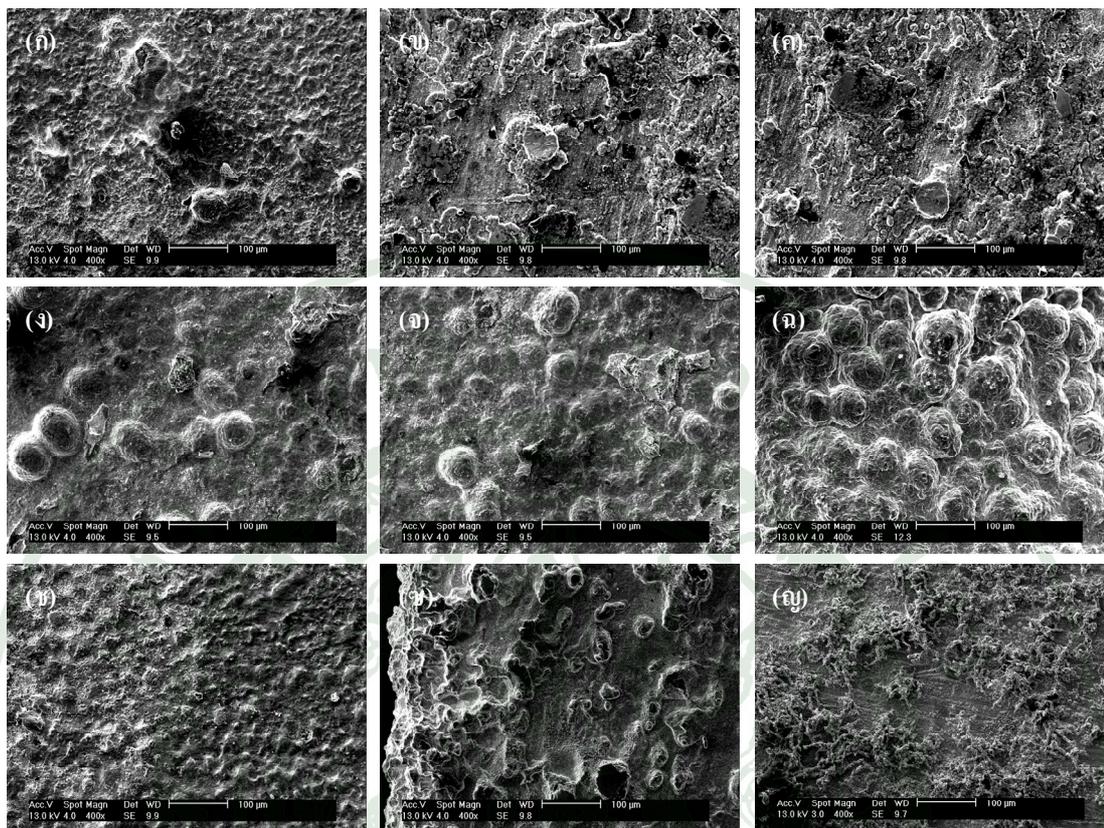
Sample NO.	Time	Current density	Amount of PEG	% Cu (Mass)	Other
1	30 min	1 mA/cm ²	0.05	94.94	≤5.06
2	30 min	1 mA/cm ²	0.1	92.49	≤7.51
3	30 min	1 mA/cm ²	0.2	90.3	≤9.70
4	30 min	1.5 mA/cm ²	0.05	92.97	≤7.03
5	30 min	1.5 mA/cm ²	0.1	94.05	≤5.95
6	30 min	1.5 mA/cm ²	0.2	91.94	≤8.06
7	30 min	3 mA/cm ²	0.05	94.2	≤5.80
8	30 min	3 mA/cm ²	0.1	93.96	≤6.04
9	30 min	3 mA/cm ²	0.2	84.96	≤15.04
Time					
10	15 min	1.5 mA/cm ²	0.2	90.19	≤9.81
11	60 min	1.5 mA/cm ²	0.2	90.01	≤9.99
Additive					
12	15 min	1.5 mA/cm ²	0.2	79.88	≤20.12
13	30 min	1.5 mA/cm ²	0.2	78.3	≤21.70
14	60 min	1.5 mA/cm ²	0.2	79.85	≤20.15



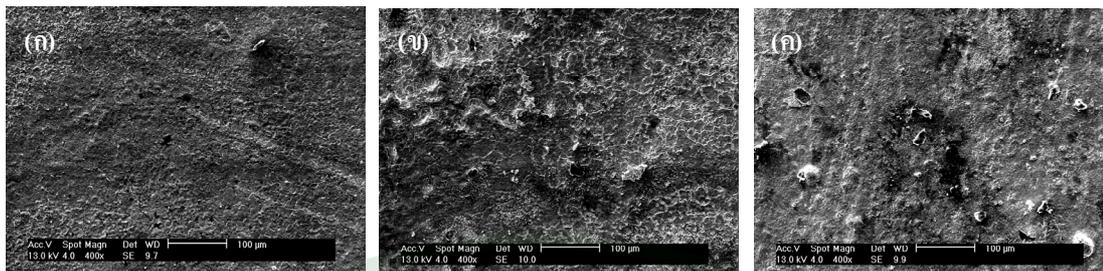
ภาคผนวก ง
ภาพ SEM ก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน



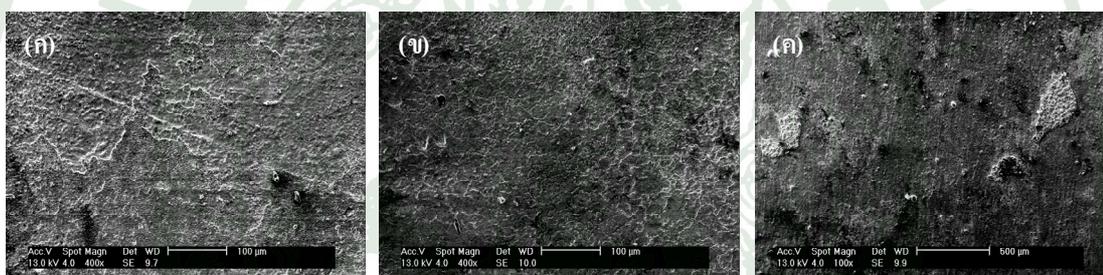
ภาพผนวกที่ ง1 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร (ง จ และ ฉ ตามลำดับ) และที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร (ช ซ และ ญ ตามลำดับ)



ภาพผนวกที่ 2 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร (ง จ และ ฉ ตามลำดับ) และที่ชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.05 0.1 และ 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร (ซ ช และ ญ ตามลำดับ)



ภาพผนวกที่ 33 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร และสารเติมแต่งเจลาติน



ภาพผนวกที่ 34 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที (ก ข และ ค ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร และสารเติมแต่งเจลาติน



ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ภาพ SEM ก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตารางผนวกที่ จ1 ร้อยละของพื้นที่อนุภาค PEG ของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมในสถานะที่แตกต่างกัน

Current density	Amount of PEG	Area fraction of embedded (%)
1 mA/cm ²	0.05 g/ml	32.253
	0.1 g/ml	30.036
	0.2 g/ml	34.331
1.5 mA/cm ²	0.05 g/ml	47.42
	0.1 g/ml	41.833
	0.2 g/ml	47.806
3 mA/cm ²	0.05 g/ml	30.456
	0.1 g/ml	27.045
	0.2 g/ml	34.332

ตารางผนวกที่ จ2 ร้อยละของความพรุนตัว ของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมในสถานะที่แตกต่างกัน

Current density	Amount of PEG	Area fraction of porosity (%)
1 mA/cm ²	0.05 g/ml	44.166
	0.1 g/ml	45.13
	0.2 g/ml	52.191
1.5 mA/cm ²	0.05 g/ml	57.285
	0.1 g/ml	59.2
	0.2 g/ml	73.365
3 mA/cm ²	0.05 g/ml	50.405
	0.1 g/ml	56.302
	0.2 g/ml	61.564

ตารางผนวกที่ จ3 ร้อยละของพื้นที่อนุภาค PEG ของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

Time	Current density	Amount of PEG	Area fraction of embedded (%)
15	1.5 mA/cm ²	0.2 g/ml	36.33
30	1.5 mA/cm ²	0.2 g/ml	47.803
60	1.5 mA/cm ³	0.2 g/ml	21.503

ตารางผนวกที่ จ4 ร้อยละของความพรุนตัว ของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

Time	Current density	Amount of PEG	Area fraction of porosity (%)
15	1.5 mA/cm ²	0.2 g/ml	36.192
30	1.5 mA/cm ³	0.2 g/ml	73.365
60	1.5 mA/cm ⁴	0.2 g/ml	34.484

ตารางผนวกที่ จ5 ร้อยละของพื้นที่อนุภาค PEG ของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมที่ระยะเวลาแตกต่างกันด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่งเจลลาติน

Time	Current density	Amount of PEG	Area fraction of embedded (%)
15	1.5 mA/cm ²	0.2 g/ml	-
30	1.5 mA/cm ²	0.2 g/ml	-
60	1.5 mA/cm ³	0.2 g/ml	-

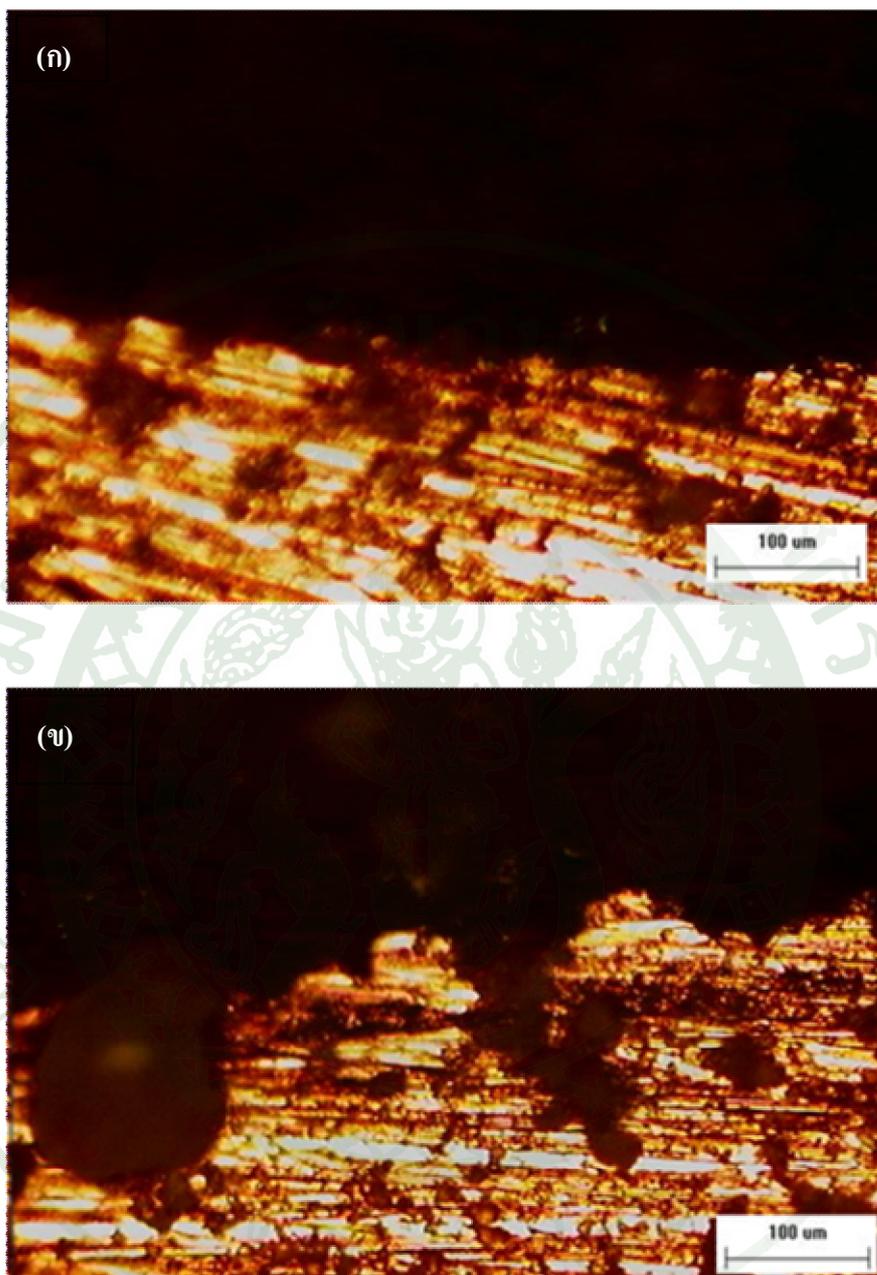
ตารางผนวกที่ ๖ ร้อยละของความพรุนตัว ของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนที่
 ชุบด้วยไฟฟ้าเคมีแบบฝังร่วมที่ระยะเวลาแตกต่างกันด้วยสารละลาย
 อิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่งเจลาติน

Time	Current density	Amount of PEG	Area fraction of porosity (%)
15	1.5 mA/cm ²	0.2 g/ml	-
30	1.5 mA/cm ³	0.2 g/ml	-
60	1.5 mA/cm ⁴	0.2 g/ml	-

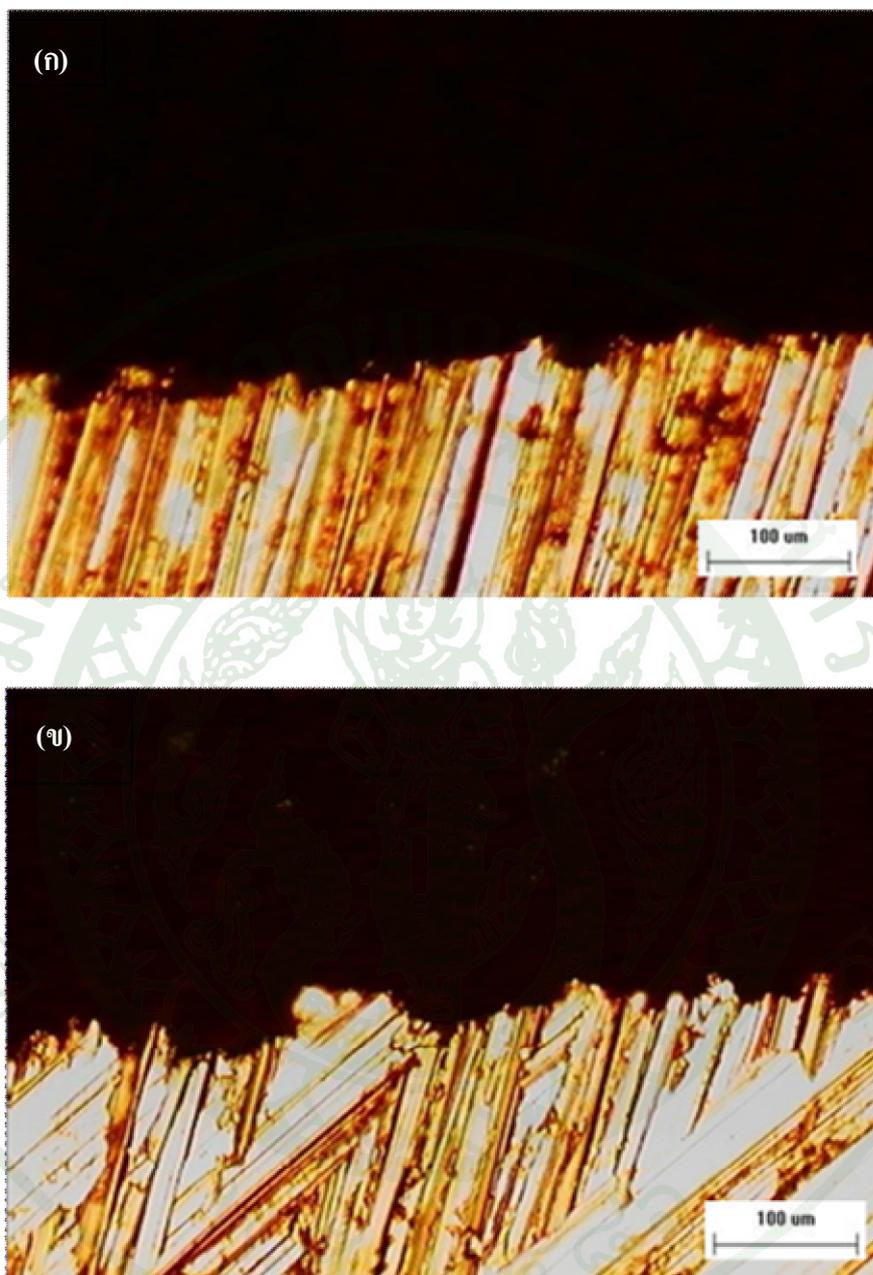


ภาคผนวก จ

ภาพ OM ก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน



ภาพผนวกที่ ๑1 ลักษณะภาพตัดขวางของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 15 และ 30 นาที (ก และ ข ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร



ภาพผนวกที่ ๓2 ลักษณะภาพตัดขวางของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชุบที่ระยะเวลา 15 และ 30 นาที (ก และ ข ตามลำดับ) ที่ความหนาแน่นกระแส 1.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณ โพลีเอทิลีนไกลคอล 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายวงศกร มุขสิทธิ
เกิดวันที่	29 กุมภาพันธ์ 2531
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์บัณฑิต วัสดุศาสตร์) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	- การประชุมวิชาการ The Sixth Thailand Materials Science and Technology Conference ครั้งที่ 6 ปี 2010 จัดที่จังหวัดกรุงเทพฯ ประเทศไทย ประเภทโปสเตอร์ เรื่อง Characteristics of Activated Carbon Prepared from Physic Nut (<i>Jatropha Curcas</i> L.) Waste by Magnesium Chloride Activation - การประชุมวิชาการ International Conference on Multi-Functional Materials and Structures ครั้งที่ 4 ปี 2013 จัดที่จังหวัดกรุงเทพฯ ประเทศไทย ประเภทโปสเตอร์ เรื่อง Fabrication of Porous Copper Layers by Two-Steps Process: Electrodeposition and Combustion และได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ Advanced Materials Research 747 (2013) หน้า 757-760