

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของสารกลุ่มทีโอเลต
บนพื้นผิวทองแดง

นางสาวสุพิศรา เฮากระโทก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

OPTIMUM CONDITION FOR THIOLATE SELF-ASSEMBLED MONOLAYERS COATING
ON COPPER SURFACE

Miss Supattra Haokratoke

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเคลือบผิวแบบเรียงตัว ชั้นเดียวของสารกลุ่มทีโอเลตบนพื้นผิวทองแดง
โดย	นางสาวสุพัตรา เฮากระโทก
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.พิมพ์พร พลเพชร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.พรชัย บำรุงศรี)

สุพัตรา เฮากระโทก : สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของสารกลุ่มไทโอเลตบนพื้นผิวทองแดง. (OPTIMUM CONDITION FOR THIOLATE SELF-ASSEMBLED MONOLAYERS COATING ON COPPER SURFACE)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.สุรเทพ เขียวหอม, 73 หน้า.

การเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของสารออกแกโนไทออลเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อน สามารถประยุกต์ใช้ได้ในงานหลายๆ ด้าน ซึ่งสภาวะในการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวนั้น ส่งผลต่อคุณภาพของชั้นเคลือบที่ได้ และมีผลต่อประสิทธิภาพของการป้องกันการกัดกร่อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาสภาวะของอุณหภูมิในช่วงตั้งแต่ -15 ถึง 50 องศาเซลเซียส สำหรับการเคลือบผิวของสารกลุ่มไทโอเลตบนพื้นผิวทองแดงที่ความเข้มข้น 0.005 ถึง 0.02 โมลต่อลิตร โดยศึกษาสารเคลือบสามชนิดด้วยกัน คือ ออกเทนไทออล (OTT) อีทิลเฮกเซนไทออล (2-EHT) และฟีนิลอีเทนไทออล (2-PET) ซึ่งสารเคมีทั้งสามชนิดมีจำนวนคาร์บอนในโครงสร้างเท่ากัน แต่มีลักษณะทางโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยใช้ contact angle SEM/EDX AFM และ potentiodynamic polarization เพื่อวิเคราะห์สมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ สัดส่วนของคาร์บอนต่อทองแดง ลักษณะของพื้นผิว ความขรุขระ และความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน ผลจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า การเคลือบผิวของสารเคลือบ OTT และ 2-EHT ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และการเคลือบผิวของสารเคลือบ 2-PET ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส โดยสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มไทโอเลตทั้งสามชนิดที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.01 โมลต่อลิตร ส่งผลให้พื้นผิวของทองแดงมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงที่สุด ซึ่งมีมุมสัมผัส 124.79° , 130.66° และ 120.58° ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนสูงที่สุดเท่ากับ 96.24%, 99.37% และ 98.90% ตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2556.....

5370613921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : COPPER / SELF-ASSEMBLED MONOLAYERS / THIOLATE / OPTIMUM
CONDITION

SUPATTRA HAOKRATOKE : OPTIMUM CONDITION FOR THIOLATE
SELF-ASSEMBLED MONOLAYERS COATING ON COPPER SURFACE.
ADVISOR : ASST. PROF. SOORATHEP KHEAWHOM, Ph.D., 73 pp.

Self-Assembled Monolayers (SAMs) coating of organothiol is one of the excellent methods for corrosion protection being able to be used in various applications. The condition of SAMs formation affects the quality of organothiol-SAMs and the efficiency of corrosion protection. Therefore, this research studies the condition of temperature ranging from -15 to 50 °C for thiolate SAMs coating on a copper surface at concentrations ranging from 0.005 to 0.02 M. Three types of thiolate SAMs including 1-octanethiol (OTT), 2-ethylhexanethiol (2-EHT) and 2-phenylethanethiol (2-PET) are investigated. These chemicals are similar in terms of the number of carbon atoms but different in chemical structure. Contact angle, SEM/EDX, AFM and potentiodynamic polarization are used to analyze hydrophilic and hydrophobic, carbon to copper ratio, features, roughness and corrosion inhibition efficiency, respectively. The results show that the SAMs formed at 40 °C with 0.01 M OTT and 2-EHT and at 0 °C with 0.01 M 2-PET SAMs are the most favorable conditions in terms of hydrophobic features with the water contact angle of 124.79°, 130.66° and 120.58°, respectively, and the corrosion inhibition efficiency of 96.24%, 99.37% and 98.90%, respectively.

Department :Chemical Engineering..... Student's Signature.....
Field of Study :Chemical Engineering..... Advisor's Signature.....
Academic Year : 2013.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการอบรมสั่งสอนและให้คำแนะนำในการปฏิบัติงาน และการดูแลให้ความช่วยเหลือในอีกหลายๆด้าน ตลอดจนข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.พิมพ์พร พลเพชร และ อาจารย์ ดร.พรชัย บำรุงศรี กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาใช้เวลาเพื่อให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ และประสบการณ์ทางวิชาชีพตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาเล่าเรียนมา

ขอขอบคุณ คุณครู อาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ ความเข้าใจในสรรพวิชา และอบรมสั่งสอนในเรื่องต่างๆ

ขอบคุณเพื่อนพ้องพี่น้องในห้องปฏิบัติการ รวมถึงบุคคลท่านอื่นอีกมากมาย ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือเสมอมา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 ตารางแผนการดำเนินงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
3.1 กระบวนการกัดร่อนของโลหะทองแดง.....	12
3.2 การเตรียมผิวโดยการขัดด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้า (electropolishing).....	12
3.3 การกระตุ้นให้เกิดออกไซด์ของโลหะทองแดงโดยใช้ออกซิเจนพลาสมา.....	14
3.4 การเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวบนพื้นผิวโลหะ.....	16
3.5 เทคนิคในการวิเคราะห์ผล.....	17
3.5.1 เครื่องวัดมุมสัมผัส (contact angle meter).....	17
3.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	19
3.5.3 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM).....	20
3.5.4 เครื่องทดสอบทางไฟฟ้าเคมี (potentiostats/galvanostats).....	22

	หน้า
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
4.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้.....	25
4.2 ขั้นตอนการเตรียมพื้นผิวของทองแดงก่อนการเคลือบผิว.....	26
4.3 ขั้นตอนการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของสารกลุ่มทีโอเลตบน พื้นผิวทองแดง.....	26
4.4 เครื่องมือในการวิเคราะห์ผล.....	26
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	28
5.1 สภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการเคลือบผิว แบบเรียงตัวชั้นเดียวของสารกลุ่มทีโอเลต (ออกเทนทีออล, อีทิลเฮกเซนทีออล และฟีนิลอีเทนทีออล) บนพื้นผิวทองแดง.....	28
5.1.1 สมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ.....	28
5.1.2 ลักษณะของชั้นเคลือบและปริมาณของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต ที่เกาะตัวบนพื้นผิวทองแดง.....	31
5.1.3 ลักษณะและความขรุขระของชั้นเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่เกาะตัวบน พื้นผิวทองแดง.....	37
5.1.4 ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน.....	43
5.1.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามุมสัมผัส, สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง, ความขรุขระของชั้นเคลือบ และประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน ของทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบกลุ่มทีโอเลต ที่สภาวะความ เข้มข้นต่างๆ.....	45
5.2 สภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียว ของสารกลุ่มทีโอเลต (ออกเทนทีออล, อีทิลเฮกเซนทีออล และฟีนิลอีเทนทีออล) บนพื้นผิวทองแดง.....	48
5.2.1 สมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ.....	48
5.2.2 ลักษณะของชั้นเคลือบและปริมาณของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต ที่เกาะตัวบนพื้นผิวทองแดง.....	51

5.2.3	ลักษณะและความขรุขระของชั้นเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่เกาะตัวบน พื้นผิวทองแดง.....	57
5.2.4	ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน.....	64
5.2.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามุมสัมผัส, สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง, ความขรุขระของชั้นเคลือบ และประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน ของทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบกลุ่มทีโอเลต ที่สภาวะ อุณหภูมิต่างๆ.....	65
บทที่ 6	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	68
6.1	สรุปผลการทดลอง.....	68
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	69
	รายการอ้างอิง.....	70
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	73

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงมุมมองสัมพัทธ์ค่าต่างๆและปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง.....	18
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางโครงสร้างของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	25
ตารางที่ 5.1 อิทธิพลของสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต ที่ส่งผลต่อสัดส่วนของคาร์บอนต่อทองแดง หรือปริมาณการเกาะตัวของ สารเคลือบผิวบนพื้นผิวทองแดง.....	36
ตารางที่ 5.2 อิทธิพลของสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต ที่ส่งผลต่อ ค่าความขรุขระ (roughness) ของพื้นผิวทองแดงหลังการเคลือบผิว.....	42
ตารางที่ 5.3 อิทธิพลของสภาวะความเข้มข้น ที่ส่งผลต่อสมบัติด้านความสามารถในการ ป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบผิว ด้วยสารกลุ่มทีโอเลต.....	44
ตารางที่ 5.4 อิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว ที่ส่งผลต่อสัดส่วนของคาร์บอน ต่อทองแดง หรือปริมาณการเกาะตัวของสารเคลือบผิวบนพื้นผิวทองแดง.....	56
ตารางที่ 5.5 อิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว ที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระ (roughness) ของพื้นผิวทองแดงหลังการเคลือบผิว.....	63
ตารางที่ 5.6 อิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว ที่ส่งผลต่อสมบัติด้านความ สามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบผิว ด้วยสารกลุ่มทีโอเลต.....	64

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 3.1	การติดตั้งวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการขัดผิวด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้า.....	14
ภาพที่ 3.2	วิธีการเตรียมผิวโดยใช้ออกซิเจนพลาสมา แบบ plasma etching.....	15
ภาพที่ 3.3	วิธีการเตรียมผิวโดยใช้ออกซิเจนพลาสมา แบบ reactive ion etching.....	15
ภาพที่ 3.4	การเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวบนพื้นผิวโลหะ.....	16
ภาพที่ 3.5	ลักษณะการยึดเกาะของสารเคลือบผิวบนพื้นผิวโลหะ.....	17
ภาพที่ 3.6	มุมสัมผัสระหว่างของแข็ง ของเหลว และแก๊ส.....	17
ภาพที่ 3.7	การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	20
ภาพที่ 3.8	การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....	21
ภาพที่ 3.9	เครื่องทดสอบทางไฟฟ้าเคมี ที่มีเซลล์ไฟฟ้าเคมี 3 ขั้ว โดยจัดเซลล์แบบ อิเล็กโทรไลต์.....	22
ภาพที่ 3.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า จากการทดสอบ ทางไฟฟ้าเคมี.....	23
ภาพที่ 3.11	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน จากจุดตัดของ anodic polarization กับ cathodic polarization.....	24
ภาพที่ 5.1	เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ.....	29
ภาพที่ 5.2	เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ.....	29
ภาพที่ 5.3	เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ.....	30
ภาพที่ 5.4	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ไม่ได้ เคลือบผิว.....	31
ภาพที่ 5.5	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ผ่าน การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 °C และที่สภาวะ ความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0.005 M (ข) 0.01 M และ (ค) 0.02 M.....	33

ภาพที่ 5.6	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 °C และที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0.005 M (ข) 0.01 M และ (ค) 0.02 M.....	34
ภาพที่ 5.7	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะอุณหภูมิ 0 °C และที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0.005 M (ข) 0.01 M และ (ค) 0.02 M.....	35
ภาพที่ 5.8	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ไม่ได้เคลือบผิว....	37
ภาพที่ 5.9	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 °C และที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0.005 M (ข) 0.01 M และ (ค) 0.02 M.....	39
ภาพที่ 5.10	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 °C และที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0.005 M (ข) 0.01 M และ (ค) 0.02 M.....	40
ภาพที่ 5.11	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะอุณหภูมิ 0 °C และที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0.005 M (ข) 0.01 M และ (ค) 0.02 M.....	41
ภาพที่ 5.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามุมสัมผัส/สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง/ค่าความขรุขระของพื้นผิว/ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 °C เพื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะความเข้มข้น.....	46
ภาพที่ 5.13	ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามุมสัมผัส/สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง/ค่าความขรุขระของพื้นผิว/ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 °C เพื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะความเข้มข้น.....	46
ภาพที่ 5.14	ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามุมสัมผัส/สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง/ค่าความขรุขระของพื้นผิว/ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะอุณหภูมิ 0 °C เพื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะความเข้มข้น.....	47

ภาพที่ 5.15	เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ.....	48
ภาพที่ 5.16	เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ.....	49
ภาพที่ 5.17	เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ.....	50
ภาพที่ 5.18	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ไม่ได้เคลือบผิว.....	51
ภาพที่ 5.19	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M และที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (ก) -15 °C (ข) 40 °C และ (ค) 50 °C.....	53
ภาพที่ 5.20	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M และที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (ก) -15 °C (ข) 40 °C และ (ค) 50 °C.....	54
ภาพที่ 5.21	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M และที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (ก) -15 °C (ข) 0 °C และ (ค) 50 °C.....	55
ภาพที่ 5.22	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ไม่ได้เคลือบผิว....	57
ภาพที่ 5.23	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M และที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (ก) -15 °C (ข) 40 °C และ (ค) 50 °C.....	59
ภาพที่ 5.24	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M และที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (ก) -15 °C (ข) 40 °C และ (ค) 50 °C.....	60
ภาพที่ 5.25	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M และที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (ก) -15 °C (ข) 0 °C และ (ค) 50 °C.....	61

ภาพที่ 5.26	ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามูมสัมพัทธ์/สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง/ ค่าความขรุขระของพื้นผิว/ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน ของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M เพื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว.....	66
ภาพที่ 5.27	ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามูมสัมพัทธ์/สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง/ ค่าความขรุขระของพื้นผิว/ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน ของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M เพื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว.....	66
ภาพที่ 5.28	ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามูมสัมพัทธ์/สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง/ ค่าความขรุขระของพื้นผิว/ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน ของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M เพื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว.....	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ทองแดง จัดเป็นโลหะประเภทหนึ่งที่ถูกนิยมนำมาใช้เป็นอย่างมากในอุตสาหกรรม อาทิเช่น ใช้ผลิตท่อในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และระบบหล่อเย็น เป็นต้น เนื่องจากทองแดงมีคุณสมบัติในการนำความร้อนและนำไฟฟ้าที่ดี และราคาถูก อย่างไรก็ตาม ทองแดงเป็นโลหะที่ง่ายต่อการถูกกัดกร่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้น ซึ่งวิธีในการป้องกันการกัดกร่อน หรือการป้องกันการเกิดออกไซด์ของพื้นผิวโลหะทองแดงนั้นมีหลากหลายวิธี วิธีหนึ่งซึ่งง่ายและมีประสิทธิภาพสูง คือ วิธีการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของโมเลกุลสารอินทรีย์ (self-assembled monolayers; SAMs) [1]

วิธีการเคลือบผิวโลหะแบบเรียงตัวชั้นเดียวด้วยสารออกแกโนทีออลนั้น มีการพัฒนาไปอย่างมากและรวดเร็ว ซึ่งวิธีการเคลือบผิว ประกอบด้วยสองขั้นตอนหลักๆที่สำคัญคือ ขั้นตอนแรกคือการเตรียมพื้นผิวของทองแดงก่อนการเคลือบผิว และขั้นตอนที่สองคือการเคลือบผิวของทองแดงด้วยสารออกแกโนทีออล โดยหลายงานวิจัยจะเน้นการศึกษาด้านการเปรียบเทียบชนิดของสารเคลือบผิว เช่น H. Y. Ma และคณะ ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลของความยาวของสายโซ่ของสารเคลือบในกลุ่มอัลเคนทีออล (alkanethiol) คือ 1-octadecanethiol ($C_{18}H_{38}SH$), 1-dodecanethiol ($C_{12}H_{25}SH$) และ 1-hexanethiol ($C_6H_{13}SH$) ที่มีต่อสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน ผลปรากฏว่าสายโซ่ของสารเคลือบในกลุ่มอัลเคนทีออลที่ยาวกว่า สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่า [2] เน้นการศึกษาด้านการเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบ ซึ่งการเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบผิวนั้นมีหลากหลายวิธี อาทิเช่น การแช่ในสารละลายกรดต่างๆ การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต หรือพลาสมา เป็นต้น W. Suthipongkiat ได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการเตรียมพื้นผิวของทองแดงก่อนการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ octadecanethiol (ODT) โดยวิธีการทำออกซิเจนพลาสมา กับวิธีการต่างๆ เช่น การขัดด้วยกระดาษทราย การแช่ในสารละลายกรดต่างๆ ผลปรากฏว่า วิธีการเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบโดยใช้วิธีการทำออกซิเจนพลาสมา สามารถช่วยเพิ่มการดูดซับสารเคลือบผิวได้มากที่สุด ซึ่งทำให้สามารถช่วยป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น [3] และเน้นการศึกษาด้านเสถียรภาพทางความร้อนของสารเคลือบผิว เช่น M. M. Sung และคณะ ได้ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของสารเคลือบผิวในกลุ่มอัลเคนทีออลที่มีความยาวของสายโซ่แตกต่างกัน คือ butanethiol (BTT), octanethiol (OTT) และ hexadecanethiol (HDT) โดยนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวไปอบ

ที่อุณหภูมิในช่วงตั้งแต่ 25 ถึง 220 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่า สารเคลือบผิวกลุ่มอัลเคนทีออล ทั้งสามชนิดสามารถเกาะอยู่ได้อย่างแข็งแรงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 140 องศาเซลเซียส และจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส [4]

อย่างไรก็ตาม การศึกษาอิทธิพลของสภาวะในการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวนั้นมีน้อยมาก ซึ่งงานวิจัยโดยส่วนมากจะเคลือบผิวภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาอิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิวและอิทธิพลของสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต โดยศึกษาสารเคลือบสามชนิดด้วยกัน คือ ออคเทนทีออล (OTT), อีทิลเฮกเซนทีออล (2-EHT) และฟีนิลอีเทนทีออล (2-PET) ซึ่งสารเคมีทั้งสามชนิดมีจำนวนคาร์บอนในโครงสร้างเท่ากัน แต่มีลักษณะทางโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งสภาวะในการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวนั้น จะส่งผลต่อคุณภาพของชั้นเคลือบที่ได้ และมีผลต่อประสิทธิภาพของการป้องกันการกัดกร่อน โดยงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์คุณสมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ สัดส่วนของคาร์บอนต่อทองแดง ลักษณะของพื้นผิว ความขรุขระ และความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อหาสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของสารกลุ่มทีโอเลต (ออคเทนทีออล, อีทิลเฮกเซนทีออล และฟีนิลอีเทนทีออล) บนพื้นผิวทองแดง

1.2.2 เพื่อหาสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของสารกลุ่มทีโอเลต (ออคเทนทีออล, อีทิลเฮกเซนทีออล และฟีนิลอีเทนทีออล) บนพื้นผิวทองแดง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 กระดาษทรายที่ใช้ในการเตรียมพื้นผิว ประกอบไปด้วย กระดาษทรายเบอร์ 240, 600, 1000, 1500 และ 2000 ตามลำดับ

1.3.2 กระบวนการขัดผิวของโลหะทองแดง ในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีเคมีไฟฟ้า (electropolishing) ในสารละลายกรดฟอสฟอริก 59.5% โดยใช้ทองแดงเป็นขั้วแคโทด (ขั้วลบ) และชิ้นงานเป็นขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ให้ไฟฟ้ากระแสตรง 1.5 โวลต์ เป็นระยะเวลา 15 นาที

1.3.3 กระบวนการที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดออกไซด์ของโลหะทองแดง ในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีออกซิเจนพลาสมา (Model PC1100, Semiconductor and Materials Company, Kyoto,

Japan) ที่ 200 วัตต์ ภายใต้สภาวะความดันก๊าซ 15 ปาสกาล อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 40 sccm เป็นระยะเวลา 15 วินาที [5]

1.3.4 สารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่ศึกษา ประกอบไปด้วย

(1) สารละลายออกเทนทีออล ในไอโซโพรพานอล ที่มีสภาวะความเข้มข้น ในช่วงระหว่าง 0.005 ถึง 0.02 โมลาร์ ที่สภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว ในช่วงระหว่าง -15 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

(2) สารละลายอีทิลเฮกเซนทีออล ในไอโซโพรพานอล ที่มีสภาวะความเข้มข้น ในช่วงระหว่าง 0.005 ถึง 0.02 โมลาร์ ที่สภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว ในช่วงระหว่าง -15 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

(3) สารละลายฟีนิลอีเทนทีออล ในไอโซโพรพานอล ที่มีสภาวะความเข้มข้น ในช่วงระหว่าง 0.005 ถึง 0.02 โมลาร์ ที่สภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว ในช่วงระหว่าง -15 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

1.3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต มีดังนี้

(1) สมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ โดยใช้เครื่องวัดมุมสัมผัส (Model no. 2500702, Tanteo Inc., Schaumburg, Germany) ทดสอบโดยหยดน้ำปราศจากไอออน (deionized (DI) water) ขนาด 10 μ L และทดสอบภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติ

(2) ลักษณะของชั้นเคลือบ และปริมาณของสารเคลือบที่เกาะตัวบนพื้นผิวทองแดง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope analysis with energy dispersive x-ray spectroscopy; SEM/EDX) (Model JSM-5800 LV)

(3) ลักษณะและความขรุขระของชั้นเคลือบบนพื้นผิวทองแดง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (atomic force microscope analysis; AFM) (Nano scope IV with tapping mode Si-Probe)

(4) สมบัติด้านความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน โดยใช้เครื่องทดสอบทางไฟฟ้าเคมี (potentiostats/ galvanostats) (Model no. PGSTAT 302 N, Metrohm Autolab company) ทดสอบโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ขั้ว โดยให้แผ่นทองแดงที่ยังไม่เคลือบผิวและแผ่นทองแดงที่เคลือบผิวแล้วเป็นขั้วทำงาน แพลตินัม (platinum; Pt) เป็นขั้วให้พลังงาน และ silver/silver chloride (Ag/AgCl) เป็นขั้วอ้างอิง ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และ

ทำการทดสอบในช่วงค่าความต่างศักย์อยู่ในช่วงระหว่าง -1.0 ถึง $+1.4$ โวลต์ เมื่อเทียบกับ Ag/AgCl ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ [6]

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวิธีการเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบผิว และการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของสารออกแกโนทีออกอล

1.4.2 เตรียมพื้นผิวของทองแดงก่อนการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต โดยการขัดด้วยกระดาษทราย ขัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า และกระตุ้นให้เกิดออกไซด์ของโลหะทองแดงโดยใช้ออกซิเจนพลาสมา ตามลำดับ

1.4.3 เคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวบนพื้นผิวทองแดงด้วยสารกลุ่มทีโอเลต (สารละลายออกเทนทีออกอล, อีทิลเฮกเซนทีออกอล และฟีนิลอีเทนทีออกอล ในไอโซโพรพานอล)

1.4.4 ทดสอบสมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ ของพื้นผิวทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส

1.4.5 วิเคราะห์ลักษณะของชั้นเคลือบ และปริมาณของสารเคลือบที่เกาะตัวบนพื้นผิวทองแดง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.4.6 วิเคราะห์ลักษณะและความขรุขระของชั้นเคลือบบนพื้นผิวทองแดง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

1.4.7 ทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต โดยใช้เครื่องทดสอบทางไฟฟ้าเคมี

1.4.8 วิเคราะห์ผล สรุปผล และจัดทำรายงานการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ทราบถึง อิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียว และอิทธิพลของสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต ที่ส่งผลต่อคุณภาพของชั้นเคลือบที่ได้ และมีผลต่อประสิทธิภาพของการป้องกันการกัดกร่อนของทองแดง

1.6 ตารางแผนการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	←—————→											
2. เตรียมพื้นผิวของทองแดงก่อนการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต		←—————→										
3. เคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวบนพื้นผิวทองแดงด้วยสารกลุ่มทีโอเลต		←—————→										
4. ทดสอบสมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ ของพื้นผิวทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส			←————→									
5. วิเคราะห์ลักษณะของชั้นเคลือบ และปริมาณของสารเคลือบที่เกาะตัวบนพื้นผิวทองแดง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด					←————→							
6. วิเคราะห์ลักษณะและความขรุขระของชั้นเคลือบบนพื้นผิวทองแดง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม						←————→						
7. ทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต โดยใช้เครื่องทดสอบทางไฟฟ้าเคมี							←————→					
8. วิเคราะห์ผล สรุปผล และจัดทำรายงานการวิจัย					←—————→							

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทองแดงเป็นโลหะประเภทหนึ่งที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม อาทิเช่น ใช้ผลิตท่อในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และระบบหล่อเย็น เป็นต้น แต่ทองแดงเป็นโลหะที่ง่ายต่อการถูกกัดกร่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้น จึงมีการเคลือบผิวทองแดงด้วยโมเลกุลของสารอินทรีย์ เพื่อป้องกันการกัดกร่อน หรือป้องกันการเกิดออกไซด์ของพื้นผิวโลหะทองแดง

G.K. Jennings และคณะ [7] จึงทำการศึกษาการเคลือบผิวของทองแดงด้วยโมเลกุลของสารอินทรีย์กลุ่มอัลเคนทiol เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของการเคลือบผิว ที่ใช้วิธีการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียว (SAM) กับวิธีการเคลือบผิวแบบเรียงตัวสองชั้น (bilayer assemblies) ที่มีผลต่อการป้องกันการเกิดสนิมของทองแดงในสภาพบรรยากาศที่มีความชื้น (100% humidity) ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจาก เตรียมพื้นผิวทองแดงก่อนการเคลือบผิว โดยทำให้โมเลกุลของทองแดงเกิดการระเหยด้วยความร้อนจากขดลวดทั้งสแตนภายในเครื่องระเหย (evaporator) ภายใต้สภาวะความดัน 2×10^{-6} torr และไปตัวจับเป็นชั้นบางๆ (1000 \AA) บนพื้นผิวของซิลิคอน จากนั้นทำการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวด้วยสารกลุ่มอัลเคนทiol (octadecanethiol ($C_{18}H_{37}SH$), docosanethiol ($C_{22}H_{45}SH$)) ที่มีความยาวของสายโซ่โมเลกุลต่างกัน โดยป้อนสารละลายของสารกลุ่มอัลเคนทiolที่มีความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ เข้าไปในเครื่องระเหย เพื่อให้โมเลกุลของสารเคลือบไปเกาะตัวบนพื้นผิวทองแดงที่ผ่านการเตรียมผิวก่อนการเคลือบแล้ว เป็นระยะเวลา 40 นาที จากนั้นล้างด้วยเอทานอล และทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ส่วนวิธีการเคลือบผิวแบบเรียงตัวสองชั้น จะเตรียมพื้นผิวของทองแดงก่อนการเคลือบผิวเช่นเดียวกัน ในการสร้างการเรียงตัวชั้นแรกนั้นจะป้อนสารละลายของสาร 22-hydroxydocosanethiol ($HSC_{22}H_{44}OH$) ที่มีความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ เข้าไปในเครื่องระเหย เป็นระยะเวลา 40 นาที จากนั้นล้างด้วยเอทานอล และทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ต่อมาจะสร้างการเรียงตัวชั้นที่สอง โดยป้อนของผสมระหว่างสารละลายของ octadecyltrichlorosilane ($C_{18}H_{37}SiCl_3$) กับโซเดียมคาร์บอเนตหรือโซดาแอช (Na_2CO_3) ที่มีความเข้มข้น 0.005 โมลาร์ เข้าไปในเครื่องระเหย เป็นระยะเวลา 5 นาที (ถ้าใช้เวลานานไป จะส่งผลให้ชั้นเคลือบผิวที่ได้มีคุณภาพลดลง) จากนั้นล้างด้วย isooctane และทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลโดยนำไปทดสอบด้วยการวัดมุมสัมผัสและ x-ray photoelectron spectroscopy (XPS) เพื่อดูปริมาณของการเกิดสารประกอบออกไซด์ของ

โลหะทองแดงหรือสนิมทองแดง ผลปรากฏว่าสารเคลือบผิวกลุ่มอัลเคนทืออลที่มีสายโซ่โมเลกุลยาวกว่าจะป้องกันการเกิดสนิมทองแดงได้ดีกว่าสายโซ่โมเลกุลสั้น และวิธีการเคลือบผิวแบบเรียงตัวสองชั้นสามารถช่วยป้องกันการเกิดสนิมทองแดงได้น้อยกว่าวิธีการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียว

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [7] ทำให้ทราบว่าวิธีการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของโมเลกุลสารอินทรีย์ (self-assembled monolayers; SAMs) เป็นวิธีหนึ่งซึ่งง่ายและมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการป้องกันการกัดกร่อน หรือการป้องกันการเกิดออกไซด์ของพื้นผิวโลหะทองแดง

H. Y. Ma และคณะ [2] จึงใช้วิธีการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวบนพื้นผิวทองแดงด้วยสารกลุ่มอัลเคนทืออล เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของความยาวของสายโซ่ของสารเคลือบในกลุ่มอัลเคนทืออล ประกอบไปด้วย 1-octadecanethiol ($C_{18}H_{38}SH$), 1-dodecanethiol ($C_{12}H_{25}SH$) และ 1-hexanethiol ($C_6H_{13}SH$) ที่มีต่อสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจาก เตรียมพื้นผิวทองแดงก่อนการเคลือบผิว โดยการขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 2000 จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ตามด้วยอะซีโตน และเป่าให้แห้ง ต่อมานำแผ่นทองแดงที่ขัดเรียบร้อยแล้ว มาแช่ในสารละลายกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 7 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 20 วินาที เพื่อกระตุ้นให้พื้นผิวของทองแดงเกิดสารประกอบออกไซด์ จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและตามด้วยเอทานอล ขั้นตอนต่อมาทำการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียว โดยนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการเตรียมผิวมาแช่ในสารละลายของสารอัลเคนทืออลทั้ง 3 ชนิด ที่ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ ในเอทานอล เป็นระยะเวลา 1, 4 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาในการเคลือบผิวอีกด้วย จากนั้นทำการวิเคราะห์ผล โดยใช้เครื่องมือทดสอบทางไฟฟ้าเคมี เพื่อทดสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของทองแดงหลังการเคลือบผิว ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ผลปรากฏว่า การเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวด้วยสารกลุ่มทือโอเลตทั้ง 3 ชนิด ส่งผลให้ทองแดงมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนสูงกว่า 90% ทั้งสิ้น และสารเคลือบในกลุ่มอัลเคนทืออลที่มีความยาวของสายโซ่ที่ยาวกว่า จะสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่า และผลของระยะเวลาในการเคลือบผิวที่ 24 ชั่วโมง ส่งผลให้ทองแดงมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนสูงสุดอีกด้วย

และ B.V. Appa Rao และคณะ [8] ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการเคลือบผิวทองแดงแบบเรียงตัวชั้นเดียวด้วยสารประกอบ 5-methoxy-2-(octadecylthio)benzimidazole (MOTBI) เพื่อป้องกันการกัดกร่อน ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจาก เตรียมพื้นผิวทองแดงก่อนการเคลือบผิว โดยการขัดด้วยกระดาษทรายและขัดด้วยผงอลูมินาบนเครื่องขัดแบบจานหมุน ตามลำดับ

จากนั้นล้างด้วยอะซีโตน ตามด้วยน้ำกลั่น ทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นระยะเวลา 20 นาที ต่อมานำแผ่นทองแดงที่ขัดเรียบเรียบร้อยแล้ว มาแช่ในสารละลายกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 7 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 30 วินาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น ขั้นตอนต่อมาทำการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียว โดยนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการเตรียมผิวมาแช่ในสารละลายของ MOTBI ที่ความเข้มข้น 0.001 ถึง 0.01 โมลาร์ ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ คือ อะซีโตน, คลอโรฟอร์ม, เมทานอล, เฮกเซน และเอทิลอะซีเตต ตามลำดับ เป็นระยะเวลา 3 ถึง 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปทดสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 8.4×10^{-3} โมลาร์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ การนำแผ่นทองแดงไปแช่ในสารละลายของ MOTBI ที่ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ในเมทานอล เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

ต่อมาได้ศึกษาผลของสภาวะความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยนำไปทดสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้นในช่วงระหว่าง 0.02 ถึง 0.20 โมลาร์ (ทดสอบเป็นระยะเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส) พบว่าทุกค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวมีค่าความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนมากกว่า 98% ทั้งสิ้น และศึกษาผลของระยะเวลาในการทดสอบ ในช่วงระยะเวลาระหว่าง 30 นาที ถึง 24 ชั่วโมง (ทดสอบที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส) พบว่าทุกช่วงเวลาที่ทดสอบ ทองแดงมีค่าการป้องกันการกัดกร่อนมากกว่า 98% ทั้งสิ้น และศึกษาผลของสภาวะอุณหภูมิในการทดสอบ ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส (ทดสอบที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 30 นาที) พบว่าทุกช่วงอุณหภูมิที่ทดสอบ ทองแดงมีค่าการป้องกันการกัดกร่อนมากกว่า 97% ทั้งสิ้น

จะเห็นได้ว่า วิธีการเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งการเตรียมพื้นผิวของทองแดงก่อนการเคลือบผิว ก็เพื่อจะกระตุ้นให้พื้นผิวของทองแดงเกิดสารประกอบออกไซด์ของทองแดงขึ้น ซึ่งสารประกอบนี้จะไปทำปฏิกิริยากับสารเคลือบผิว ทำให้สารเคลือบผิวสามารถเกาะตัวบนพื้นผิวของทองแดงได้ดีขึ้น ซึ่งการเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบผิวนั้นมีหลากหลายวิธีด้วยกัน

J.R. Koo และคณะ [9] ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลของวิธีการเตรียมพื้นผิวของแพลทินัมก่อนการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวด้วยสาร octadecanethiol ($C_{18}H_{37}SH$) เพื่อใช้เป็นฉนวนในการป้องกันกระแสไฟฟ้าข้ามผ่านในวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์ ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจาก นำแผ่นแพลทินัมมาผ่านการสปัตเตอร์ริง (sputtering) บนพื้นผิวซิลิคอน จากนั้นนำมาเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบ โดยวิธีแรก เตรียมผิวโดยการนำแผ่นแพลทินัมไปแช่ในสารละลายปิรันยา (สารละลาย

H_2SO_4/H_2O_2 ซึ่งมีอัตราส่วนของความเข้มข้น 5:1) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ส่วนวิธีที่สอง เตรียมผิวโดยการนำแผ่นแพลทินัมไปใส่ในเครื่องสร้างยูวีโอโซน ใช้กำลังไฟ 110 วัตต์ เป็นระยะเวลา 5 นาที ขั้นตอนต่อมาจึงนำแผ่นแพลทินัมที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการทั้งสองวิธี ไปแช่ในสารละลายของ octadecanethiol ที่ความเข้มข้น 0.002 โมลาร์ ในเอทานอล เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง จากนั้นล้างด้วยเอทานอล 3 รอบ และทำให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำแผ่นแพลทินัมที่ผ่านการเคลือบผิวแล้ว ไปเคลือบผิวด้วยตัวนำไฟฟ้าอีกชั้นหนึ่ง โดยการทำให้โมเลกุลของไทเทเนียมระเหยมาเคลือบที่ผิว ที่ความดัน 10^{-6} torr เพื่อให้ได้ชั้นตัวนำที่มีขนาดความหนา 5 นาโนเมตร จากนั้นนำไปทดสอบการซึมผ่านของกระแสไฟฟ้าระหว่างชั้นแพลทินัมและไทเทเนียม ผลปรากฏว่า การเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบโดยการแช่ในสารละลายปิรันยานั้น ทำให้สารเคลือบผิวสามารถเกาะตัวบนพื้นผิวแพลทินัมได้ดีกว่าการเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบโดยใช้เครื่องสร้างรังสียูวีโอโซน แสดงให้เห็นว่า การเตรียมผิวด้วยการแช่ในสารละลายปิรันยา มีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของกระแสไฟฟ้าได้มากกว่าการเตรียมผิวโดยใช้เครื่องสร้างรังสียูวีโอโซน

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2][8][9] จะเห็นว่า การเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบผิวนั้นมีหลากหลายวิธี อาทิเช่น การแช่ในสารละลายกรดต่างๆ การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น โดยวิธีการเตรียมพื้นผิวในแต่ละวิธี ก็จะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของสารเคลือบบนพื้นผิวที่แตกต่างกัน

W. Suthipongkiat [3] จึงได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการเตรียมพื้นผิวของทองแดงก่อนการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวด้วยสารเคลือบ octadecanethiol (ODT) เพื่อการป้องกันการกัดกร่อนสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเปรียบเทียบวิธีการเตรียมผิวแบบต่างๆ คือ ขัดผิวด้วยกระดาษทราย, การทำออกซิเจนพลาสมา, แช่ในสารละลาย ปิรันยา, แช่ในกรดไนตริก, แช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, แช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และกรดไนตริก, แช่ในกรดไฮโดรคลอริก และแช่ในกรดฟอสฟอริก ตามลำดับ ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจาก นำแผ่นทองแดงมาเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบด้วยวิธีการต่างๆข้างต้น จากนั้นนำแผ่นทองแดงมาแช่ในสารละลายของ octadecanethiol ที่ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ในไอโซโพรพานอล เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง จากนั้นล้างด้วยไอโซโพรพานอล และทำให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลโดยทดสอบคุณสมบัติของการเปียก (wettability) ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส และทดสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี (potentiostat) ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ นอกจากนี้ยังศึกษาการเรียงตัวของสาร

เคลือบบนพื้นผิวทองแดง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ผลปรากฏว่า วิธีการเตรียมพื้นผิวทองแดงก่อนการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของสาร octadecanethiol เพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมที่สุด คือ การใช้ออกซิเจนพลาสมาในการเตรียมผิว ที่ความดัน -400 มิลลิเมตรปรอท และระยะเวลาในการเตรียมผิว 20 นาที

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [3] แสดงให้เห็นว่า วิธีการเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบโดยใช้วิธีการทำออกซิเจนพลาสมานั้น สามารถช่วยเพิ่มการดูดซับสารเคลือบผิวได้มากที่สุด ซึ่งทำให้สามารถช่วยป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น

P. Kongsumrit [5] ได้ศึกษาหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเตรียมพื้นผิวโดยวิธีการทำออกซิเจนพลาสมา ก่อนการเคลือบผิวทองแดงแบบเรียงตัวชั้นเดียวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต คือ 1-octanethiol (OTT), 2-ethylhexanethiol (2-EHT) และ 2-phenylethanethiol (2-PET) ผลปรากฏว่า เวลาในการทำออกซิเจนพลาสมาที่เหมาะสมคือ 15 วินาที ซึ่งการทำออกซิเจนพลาสมา จะเพิ่มความขรุขระให้กับพื้นผิวทองแดง และเหนี่ยวนำให้เกิดสมบัติความชอบน้ำ ซึ่งเหมาะต่อการจับตัวของสารเคลือบบนพื้นผิวทองแดง จากนั้นได้ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของสารกลุ่มทีโอเลตที่เคลือบบนพื้นผิวทองแดง ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจาก เตรียมพื้นผิวทองแดงก่อนการเคลือบผิว โดยการขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 2000 จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น ตามด้วยอะซีโตน และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ต่อมานำแผ่นทองแดงมาขัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า (electropolishing) ในสารละลายกรดฟอสฟอริก 59.5% ให้ไฟฟ้ากระแสตรง 1.5 โวลต์ เป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน และนำแผ่นทองแดงที่ได้ไปทำออกซิเจนพลาสมา เป็นระยะเวลา 15 วินาที ขั้นตอนต่อมานำแผ่นทองแดงที่ผ่านการเตรียมผิวมา แช่ในสารละลายของสารกลุ่มทีโอเลต ที่ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ในไอโซโพรพานอล เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง จากนั้นล้างด้วยไอโซโพรพานอล และทำให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน ขั้นตอนสุดท้ายจึงนำแผ่นทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลตแต่ละชนิด ข้างต้นไปอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25 ถึง 250 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้ contact angle, SEM, AFM, FT-IR, XPS และ potentiodynamic polarization เพื่อวิเคราะห์สมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ, ลักษณะของพื้นผิว, ความขรุขระ, การสลายตัวของสารเคลือบ และความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน ผลปรากฏว่า สารเคลือบ OTT จะสลายตัวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ขณะที่สารเคลือบ 2-EHT จะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าคือ 140 องศาเซลเซียส ส่วนสารเคลือบ 2-PET ไม่เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 140 องศาเซลเซียส และ

สารเคลือบทั้ง 3 ชนิดนี้จะสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า สารเคลือบ 2-PET มีความเหมาะสมที่สุดในด้านเสถียรภาพทางความร้อน

และ M.M. Sung และคณะ [4] ได้ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของสารเคลือบผิวในกลุ่มอัลเคนทiolที่มีความยาวของสายโซ่แตกต่างกัน คือ butanethiol (BTT), octanethiol (OTT) และ hexadecanethiol (HDT) แต่ใช้วิธีการเตรียมพื้นผิวของทองแดง โดยการแช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ก่อนการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียว ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจาก นำแผ่นทองแดงมาขัดด้วยผงลูมินา จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน และตามด้วยอะซีโตน โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% เป็นระยะเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปแช่ในสารละลายกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 7 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 1 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ตามด้วยเอทานอล และทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ขั้นตอนต่อมา นำแผ่นทองแดงที่ผ่านการเตรียมผิวไปแช่ในสารละลายของสารกลุ่มอัลเคนทiol ที่ความเข้มข้น 0.0025 โมลาร์ ในเอทานอล เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง จากนั้นล้างด้วยเอทานอลโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก และทำให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส ผลปรากฏว่า การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวในกลุ่มอัลเคนทiolที่มีความยาวของสายโซ่มากกว่า ส่งผลให้พื้นผิวมีสมบัติความชอบน้ำสูงกว่าสารเคลือบที่มีสายโซ่สั้น ทำให้สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่า และวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของสารกลุ่มอัลเคนทiolที่เคลือบบนพื้นผิวทองแดง โดยการนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวไปอบที่อุณหภูมิในช่วงตั้งแต่ 25 ถึง 220 องศาเซลเซียส และใช้ x-ray photoelectron spectroscopy (XPS) เพื่อดูปริมาณสารเคลือบที่เหลืออยู่ ผลปรากฏว่า สารเคลือบผิวกลุ่มอัลเคนทiolทั้งสามชนิดสามารถเกาะอยู่ได้อย่างแข็งแรงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 140 องศาเซลเซียส และจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส

จากงานวิจัยที่ผ่านมา การศึกษาในด้านอิทธิพลของสภาวะในการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวนั้นมีน้อยมาก ซึ่งงานวิจัยโดยส่วนมากจะเคลือบผิวภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาอิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว และอิทธิพลของสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต ซึ่งสภาวะในการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวนั้น จะส่งผลต่อคุณภาพของชั้นเคลือบที่ได้ และมีผลต่อประสิทธิภาพของการป้องกันการกัดกร่อน

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

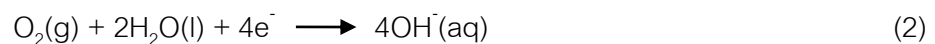
3.1 กระบวนการกัดกร่อนของโลหะทองแดง [10][11]

การผุกร่อนของโลหะทองแดง (corrosion) คือ กระบวนการของปฏิกิริยารีดอกซ์ ที่เกิดจากโลหะทองแดงถูกออกซิไดซ์เป็นสารประกอบออกไซด์ของทองแดง หรือสนิมของทองแดง ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้น หรือเมื่อสัมผัสกับก๊าซออกซิเจนที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ เมื่อโลหะทองแดงอยู่ในสภาวะแวดล้อมดังกล่าว จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) และปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) ที่ผิวของโลหะทองแดง ซึ่งอธิบายในรูปเซลล์กัลวานิก ได้ดังนี้คือ

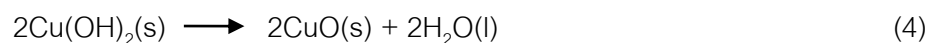
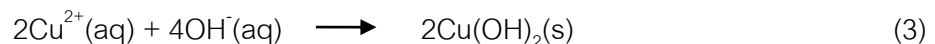
โลหะทองแดงทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด และแคโทดอิเล็กตรอนไหลในวงจร ที่จุดหนึ่งของผิวโลหะทองแดงจะถูกออกซิไดซ์เป็น Cu^{2+} ไอออน เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นปฏิกิริยาที่ทองแดงสูญเสียอิเล็กตรอน ดังสมการ



โดยแคโทดอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากปฏิกิริยานี้ จะไหลผ่านโลหะทองแดงที่สัมผัสกับก๊าซออกซิเจนที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ ซึ่งก๊าซออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์เป็น OH^- ไอออน เรียกว่าปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่รับอิเล็กตรอน ดังสมการ



ซึ่ง Cu^{2+} ไอออน และ OH^- ไอออน ที่เกิดขึ้นจากสมการที่ (1) และ (2) จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกันไป เกิดเป็นตะกอนของคอปเปอร์ (II) ไฮดรอกไซด์ และถูกออกซิไดซ์เป็นสนิมของทองแดง (CuO) ในที่สุด ดังสมการ



3.2 การเตรียมพื้นผิวโดยการขัดด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้า (electropolishing) [12]

การขัดผิวโลหะด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้า นับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการขัดผิวของโลหะ นอกเหนือจากการขัดผิวด้วยวิธีทางกล เช่น การขัดผิวด้วยกระดาษทราย เป็นต้น การขัดผิวด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้านี้ นอกจากจะเหมาะกับงานโลหะที่มีรูปร่างเฉพาะตัว ที่ไม่สามารถทำการขัดผิวด้วยวิธีทางกลได้แล้ว ยังเหมาะกับงานโลหะที่ต้องการพื้นผิวที่มีความเรียบสูง, ผิวหน้าชิ้นงานที่ได้

มีความสะอาด และมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี ยิ่งไปกว่านั้นการขัดผิวด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้านี้ นับว่ามีประโยชน์อย่างมากกับงานโลหะที่ต้องการความสวยงาม หรือความเงางามเป็นพิเศษ

โลหะที่สามารถขัดผิวด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้าได้นั้น ควรเป็นโลหะประเภทที่มีเฟสเดียว (single-phase alloy) ถ้าหากเป็นโลหะประเภทที่มีหลายเฟส (multi-phase alloy) จะทำการขัดผิวด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้าได้ยากมาก หรือบางครั้งอาจใช้วิธีการเคมีไฟฟ้าขัดผิวไม่ได้เลย เนื่องจากในแต่ละเฟสจะมีความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันไปเฉพาะเฟส ซึ่งตัวอย่างโลหะประเภทที่มีเฟสเดียว ที่สามารถขัดผิวด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้าได้นั้น ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel), อะลูมิเนียม (aluminium), ทองแดง (copper), แมกนีเซียม (magnesium), เซอร์โคเนียม (zirconium) และไททาเนียม (titanium) เป็นต้น

อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการขัดผิวด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้า ประกอบไปด้วย

เครื่องจ่ายไฟ (power supply) ต้องเป็นเครื่องที่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น หรืออาจต้องมีตัวแปลงกระแส (rectifier) เพื่อเปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงก่อน

ภาชนะบรรจุ (electropolishing bath) เช่น แก้ว, เหล็กกล้าไร้สนิม และโพลีเอทิลีน เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ และระดับของการขัดผิว

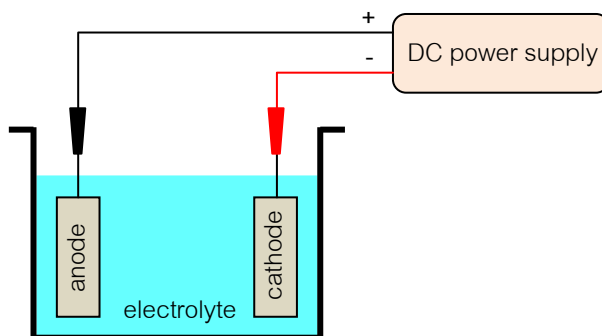
ขั้วแอโนด (anode) หรือขั้วบวก ทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนในระบบ ซึ่งหมายถึงชิ้นงานโลหะที่ต้องการขัดพื้นผิว

ขั้วแคโทด (cathode) หรือขั้วลบ ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนในระบบ โดยส่วนมากจะเลือกใช้โลหะที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายเคมีที่ใช้ในการขัดผิว หรือเลือกโลหะประเภทที่สูญเสียอิเล็กตรอนได้ยาก (ความสามารถในการสูญเสียอิเล็กตรอน สามารถดูได้จากค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของโลหะนั้นๆ) ขั้วแคโทดที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ แพลทินัม, ตะกั่ว, ทองแดง และเหล็กกล้าไร้สนิม เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับราคา และลักษณะของการใช้งาน

สารละลายเคมีที่ใช้ในการขัดผิว (electrolyte) ต้องมีสมบัติเป็นกรดหนืด (viscous acid) เช่น กรดไฮเปอร์คลอริก (HClO_4), กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น หรืออาจเพิ่มความหนืดด้วยการเติมกลีเซอรอล (glycerol)

ปัจจัยอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นชนิดหรือรูปร่างของชิ้นงานโลหะ, ความหนาของผิวชิ้นงานโลหะก่อนการขัดผิว, ชนิดของขั้วแคโทด, อัตราส่วนระหว่างขนาดของชิ้นงานโลหะกับขนาดของขั้วแคโทด, ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายเคมีที่ใช้ในการขัดผิว, ค่าความต่างศักย์หรือกระแสไฟฟ้าที่ป้อนสู่ระบบ, อุณหภูมิของสารละลายเคมีที่ใช้ในการขัดผิว, ระยะเวลาในการขัดผิว

หรือแม้กระทั่งการจัดระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทด ล้วนแล้วแต่ส่งผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงานโลหะภายหลังการขัดผิวด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้าทั้งสิ้น



ภาพที่ 3.1 การติดตั้งวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการขัดผิวด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้า

3.3 การกระตุ้นให้เกิดออกไซด์ของโลหะทองแดงโดยใช้ออกซิเจนพลาสมา

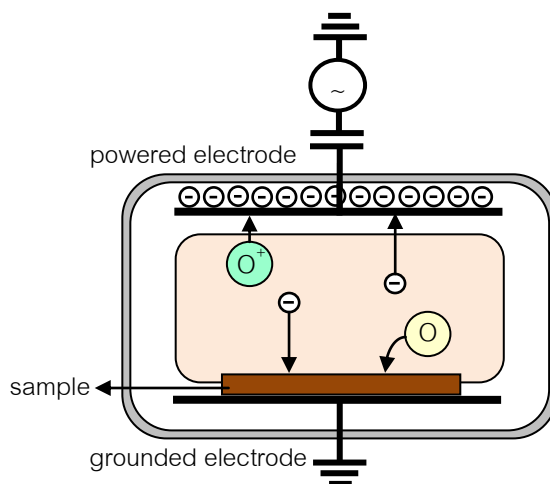
การเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะทองแดง สามารถทำได้โดยการทำให้พื้นผิวทองแดงเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของทองแดง (CuO) ซึ่งสารประกอบนี้จะทำปฏิกิริยากับสารเคลือบผิว ทำให้สารเคลือบผิวสามารถเกาะตัวบนพื้นผิวของทองแดงด้วยการสร้างพันธะเคมีได้ดีขึ้น วิธีการใช้ออกซิเจนพลาสมานั้น นับว่าเป็นวิธีการหนึ่งในการเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบ ที่สามารถกระตุ้นให้พื้นผิวทองแดงเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะทองแดง

เครื่องสร้างพลาสมา ประกอบไปด้วยเซลล์ไฟฟ้า 2 เซลล์ คือ ขั้วพลังงาน (powered electrode) และขั้วกราวด์หรือขั้วดิน (grounded electrode) มีหลักการทำงาน คือ จะกระตุ้นให้เกิดลำพลาสมาโดยอาศัยการสปาร์คจากไฟฟ้าแรงดันสูงผ่านตัวกลางที่เป็นก๊าซออกซิเจน โดยลำพลาสมาจะทำให้โมเลกุลของก๊าซออกซิเจนเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอน ได้ออกซิเจนไอออนบวกและอิเล็กตรอนเหล่านี้จะทำให้พันธะระหว่างอะตอมของก๊าซออกซิเจนแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งอนุมูลอิสระบางตัวอาจจะรวมตัวกันเป็นก๊าซโอโซน โดยออกซิเจนไอออนบวกและอนุมูลอิสระเหล่านี้ จะไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของทองแดงเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของทองแดง

ซึ่งวิธีการเตรียมผิวโดยใช้ออกซิเจนพลาสมานั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

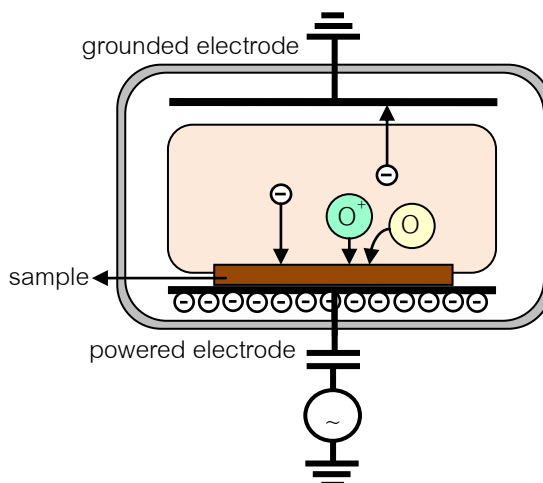
1. แบบ plasma etching แสดงดังภาพที่ 3.2 โดยวางแผ่นทองแดงไว้บนขั้วกราวด์หรือขั้วดิน และให้ขั้วพลังงานเป็นขั้วตรงกันข้าม จากนั้นเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ระบบ ออกซิเจน

ไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้วพลังงาน ในทางกลับกัน อนุภาคอิสระจะวิ่งเข้าหาขั้วกราวด์ และเข้าทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของทองแดงเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของทองแดง



ภาพที่ 3.2 วิธีการเตรียมผิวโดยใช้ออกซิเจนพลาสมา แบบ plasma etching

2. แบบ reactive ion etching แสดงดังภาพที่ 3.3 โดยวางแผ่นทองแดงไว้บนขั้วพลังงาน และให้ขั้วกราวด์หรือขั้วดินเป็นขั้วตรงกันข้าม จากนั้นเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ระบบ ทั้งออกซิเจนไอออนบวกและอนุภาคอิสระจะวิ่งเข้าหาขั้วพลังงาน และเข้าทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของทองแดงเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของทองแดง



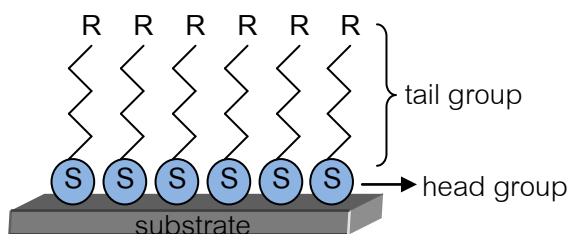
ภาพที่ 3.3 วิธีการเตรียมผิวโดยใช้ออกซิเจนพลาสมา แบบ reactive ion etching

3.4 การเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวบนพื้นผิวโลหะ [13]

วิธีการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียว (self-assembled monolayer; SAMs) คือ การทำให้โมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ชนิดหนึ่งมาเรียงตัวกันเป็นชั้นฟิล์มบางๆบนพื้นผิวของโลหะ (substrate) โดยโมเลกุลของสารเคลือบผิว แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนหัว (head group) และส่วนหาง (tail group) แสดงดังภาพที่ 3.4

ส่วนหัว ต้องเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สามารถยึดเกาะกับพื้นผิวตัวดูดซับได้ดีและขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ ซึ่งโลหะแต่ละชนิดจะสามารถยึดเกาะกับหมู่ฟังก์ชันต่างๆได้แตกต่างกัน โดยชนิดของหมู่ฟังก์ชันในส่วนหัว เช่น หมู่เอโซ (azoles group), หมู่เอมีน (amines group), หมูกรดอะมิโน (amino acids group) และหมู่ทืออล (thiol group) เป็นต้น เหมาะสมจะนำมาเลือกใช้สำหรับการเคลือบผิวของโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

ส่วนหาง ควรเลือกหมู่ฟังก์ชันจากลักษณะของกาการใช้งาน เช่น หากต้องการไม่ให้น้ำเกาะพื้นผิว ก็ต้องเลือกสารเคลือบผิวที่ส่วนหางเป็นสารไม่มีขั้ว เนื่องจากน้ำเป็นสารมีขั้ว ดังนั้นถ้าใช้สารเคลือบผิวที่ส่วนหางเป็นสารไม่มีขั้ว น้ำก็ไม่สามารถเกาะที่พื้นผิวได้ และหากต้องการป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดจากน้ำ ชนิดของหมู่ฟังก์ชันในส่วนหางที่เหมาะสม เช่น หมู่แอลคิล (alkyl group) และหมู่แอริล (aryl group) เป็นต้น

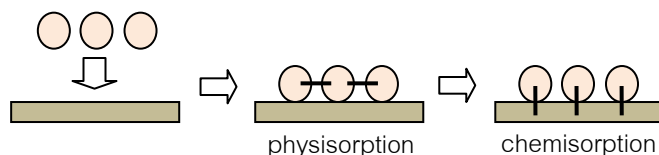


ภาพที่ 3.4 การเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวบนพื้นผิวโลหะ

การเคลือบผิวโลหะนั้น สารเคลือบผิวสามารถยึดเกาะกับพื้นผิวของโลหะได้ 2 ลักษณะคือ

1. การยึดเกาะด้วยแรงระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน (physisorption) คือ สารเคลือบผิวจะสามารถยึดเกาะกับพื้นผิวของโลหะ โดยที่โมเลกุลของสารเคลือบผิวไม่ได้สร้างพันธะเคมีกับพื้นผิวของโลหะ โดยสารเคลือบผิวจะยึดเกาะกับพื้นผิวของโลหะด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ซึ่งเป็นการเกาะตัวบนพื้นผิวอย่างอ่อน

2. การยึดเกาะด้วยพันธะทางเคมี (chemisorption) คือ สารเคลือบผิวจะยึดเกาะกับพื้นผิวของโลหะ โดยที่โมเลกุลของสารเคลือบผิวจะสร้างพันธะเคมีกับพื้นผิวของโลหะ ทั้งการสร้างพันธะไอออนิก และพันธะโควาเลนต์ ซึ่งเป็นการเกาะติดบนพื้นผิวดังด้วยพันธะที่แข็งแรงกว่า

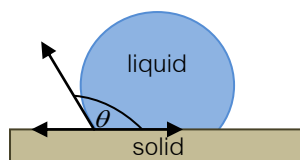


ภาพที่ 3.5 ลักษณะการยึดเกาะของสารเคลือบผิวบนพื้นผิวโลหะ

3.5 เทคนิคในการวิเคราะห์ผล

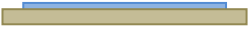
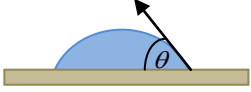
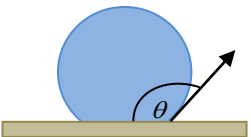
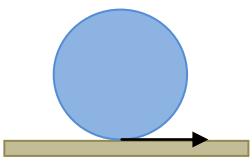
3.5.1 เครื่องวัดมุมสัมผัส (contact angle meter) [14] เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดมุมระหว่างระนาบของปฏิสัมพันธ์ของของเหลว-ก๊าซ กับระนาบของปฏิสัมพันธ์ของเหลว-ของแข็ง แสดงดังภาพที่ 3.6 การวัดมุมสัมผัสนั้นจะใช้ของเหลวเพื่อบ่งบอกถึงคุณสมบัติของการเปียก (wettability) ของพื้นผิวของแข็ง โดยลักษณะของของเหลวที่จะเปียกหรือยึดเกาะอยู่บนผิวของของแข็งได้ดีหรือไม่ดีนั้น ขึ้นอยู่กับแรง 2 แรงหลักๆ คือ

1. แรงเชื่อมแน่น (cohesive force) คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารชนิดเดียวกัน หรือแรงที่พยายามทำให้โมเลกุลของของเหลวเกาะตัวรวมกันเป็นหยดทรงกลม และไม่กระจายตัวแนบกับพื้นผิวของของแข็ง
2. แรงยึดติด (adhesive force) คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารต่างชนิดกัน หรือแรงระหว่างโมเลกุลของของเหลวและของแข็ง ซึ่งเป็นแรงที่ตรงข้ามกับแรงเชื่อมแน่น คือ แรงยึดติดจะพยายามทำให้หยดของของเหลวแยกออกจากกัน และกระจายตัวแนบไปกับพื้นผิวของของแข็ง



ภาพที่ 3.6 มุมสัมผัสระหว่างของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

ตารางที่ 3.1 แสดงมุมสัมผัสค่าต่างๆและปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง

ความสามารถในการกระจายตัวของเหลว	ค่ามุมสัมผัส (องศา)	ภาพลักษณะของหยดของเหลว	คำอธิบาย
ของเหลวกระจายตัวได้ดีอย่างยิ่งวด (superhydrophilic)	$\theta = 0$		เนื่องจากแรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ ของเหลวจะกระจายตัวไปตามพื้นผิวของของแข็ง จนกลายเป็นชั้นของของเหลวบางๆคลุมพื้นผิวของของแข็งเป็นบริเวณกว้างที่สุด
ของเหลวกระจายตัวได้ดี (hydrophilic)	$\theta = 0 - 90$		ของเหลวจะกระจายตัวไปบนพื้นผิวของของแข็งได้เป็นบริเวณกว้าง แต่ก็ยังคงยึดเกาะกันเป็นหยดนูนขึ้นเล็กน้อยจากพื้นผิวของของแข็ง
ของเหลวกระจายตัวได้ไม่ดี (hydrophobic)	$90 \leq \theta < 180$		ของเหลวจะรวมตัวกันเป็นหยดรูปทรงค่อนข้างกลม และจะมีบริเวณเล็กๆที่ฐานของหยดของเหลวที่ยังคงแตะกับพื้นผิวของของแข็ง
ของเหลวกระจายตัวได้ไม่ดียิ่งยวด (superhydrophobic)	$\theta = 180$		เนื่องจากแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ ของเหลวจึงรวมตัวกันเป็นหยดทรงกลม และบริเวณที่ฐานของทรงกลมของของเหลวจะแตะกับพื้นผิวของของแข็งน้อยมากจนแทบจะเป็นจุด ทำให้ของเหลวสามารถกลิ้งไปมาบนพื้นผิวของของแข็งได้อย่างอิสระ

มูมส์มีผลจะบอกแนวโน้มที่หยดของของเหลวจะกระจายตัวบนพื้นผิวของของแข็ง โดยมูมส์มีผลจะแปรผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลว ซึ่งมูมส์มีผลนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของของแข็ง เช่น ความขรุขระของพื้นผิว, ความสกปรก, การทำปฏิกิริยาระหว่างของเหลวกับพื้นผิวของแข็ง หรือความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของของแข็ง เป็นต้น

ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องวัดมูมส์มีผล ประกอบไปด้วย

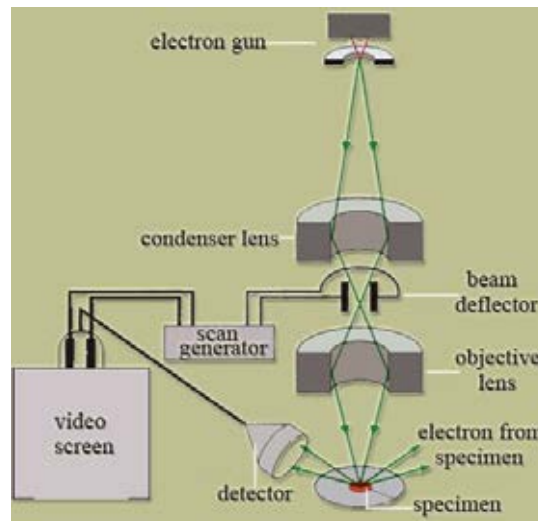
เข็มหยดของเหลว ทำหน้าที่กำหนดขนาดของหยดของเหลว โดยปกติแล้วจะใช้หยดของเหลวขนาดเล็กๆ (ไมโครลิตร)

แท่นวางชิ้นงาน ทำหน้าที่วางชิ้นงานและสามารถปรับเลื่อนขึ้น-ลงได้ โดยจะเลื่อนชิ้นงานขึ้นไปสัมผัสกับหยดของเหลวที่ปลายเข็มหยดของเหลว เนื่องจากถ้าหากปล่อยให้หยดของเหลวหยดลงมาบนชิ้นงานเองนั้น จะทำให้ของเหลวกระจายตัวออก ไม่รวมกันเป็นหยดเดียว

กล้องความละเอียดสูง ทำหน้าที่ถ่ายภาพรูปร่างของหยดของเหลวกับชิ้นงาน เพื่อนำไปวัดค่ามูมส์มีผล

หลอดไฟ ทำหน้าที่ส่องผ่านหยดของเหลว เพื่อให้กล้องความละเอียดสูงสามารถถ่ายเห็นขอบของหยดของเหลวได้ชัดเจนขึ้น

3.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope analysis with energy dispersive x-ray spectroscopy; SEM/EDX) [15] เป็นเครื่องมือที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพสามารถทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น และสามารถคำนวณธาตุเชิงปริมาณ (EDX) ได้อีกด้วย



ภาพที่ 3.7 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

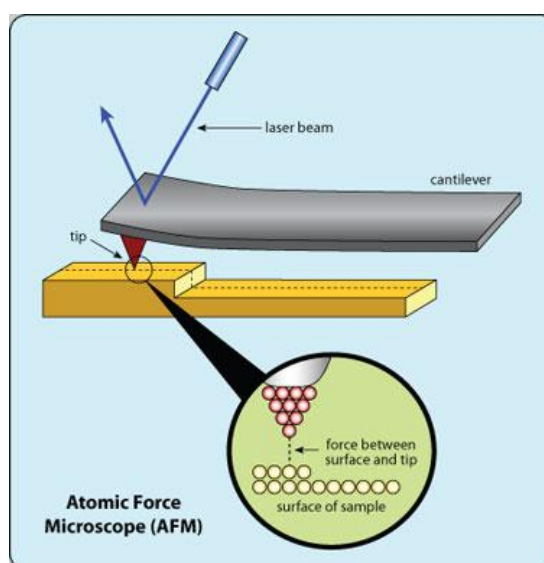
หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ที่อยู่ปลายด้านบนสุดของคอลัมน์ ทำหน้าที่ผลิตกลุ่มอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) เพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิถูกกราดลงบนชิ้นงาน จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวชิ้นงาน ทำให้เกิดเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอรับภาพ (CRT) ต่อไป

3.5.3 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (atomic force microscope analysis; AFM)
 [16] เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิว และจะทำการประมวลผลออกมาในลักษณะของภาพพื้นผิว

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม เป็นเครื่องมือที่ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน โดยเฉพาะ ทำงานโดยการใช้อุปกรณ์ตรวจหรือโพรบ (probe) ที่มีปลายแหลมเล็ก ซึ่งติดอยู่กับ

คานยื่น (cantilever) ที่สามารถโก่งงอตัวได้ เคลื่อนที่สัมผัสไปบนพื้นผิวของวัตถุ (ซึ่งสามารถวัดแรงกระทำที่ปลายแหลมของโพรบได้ แม้จะมีขนาดน้อยมากในระดับนาโนก็ตาม) ซึ่งประโยชน์ของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม คือ สามารถใช้ตรวจวัดลักษณะพื้นผิวที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ อาทิเช่น พอลิเมอร์, เซรามิก, คอมโพสิต, กระจกหรือแก้ว หรือแม้แต่โมเลกุลทางชีวภาพต่างๆ แต่มีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ วิธีการทำงานโดยการเลื่อนโพรบไปสัมผัสบนชิ้นงานที่พื้นผิวมีความขรุขระมาก อาจทำให้โพรบเกิดความเสียหายได้ เนื่องจากปลายโพรบที่มีขนาดเล็กมาก จะเคลื่อนเข้าไปสัมผัสในหลุมบนพื้นผิว หลังจากนั้นจะเลื่อนไปชนกับขอบของหลุม ทำให้เกิดแรงกระทำต่อโพรบซึ่งอาจจะทำให้โพรบหักได้

หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม คือ ผ่านแสงเลเซอร์ให้กับส่วนปลายแหลม (tip) ของคานยื่นที่มีขนาดในระดับอะตอมในระยะใกล้ ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานยื่นนั้นจะไปสัมผัสกับพื้นผิวของวัตถุแบบกระดก (tapping) ในทิศทางขึ้นและลง และเมื่อลากส่วนปลายแหลมสัมผัสผ่านโครงสร้างในระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉาก ที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลม จะดึงคานยื่นทำให้คานยื่นโก่งงอตัว ทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิกิริสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัตถุ (ทำให้ทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้) จากนั้นจะถูกนำมาแปรสัญญาณร่วมกัน เพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะเชิงโครงสร้างระดับอะตอมที่มีกำลังขยายสูง ไปแสดงบนจอภาพที่เป็นมอริเตอร์ (หลักการเดียวกันนี้ สามารถใช้ปลายแหลมของคานยื่นในการสร้างแรงผลักดัน เพื่อเคลื่อนย้ายอะตอมแต่ละตัวของโครงสร้างวัสดุได้)



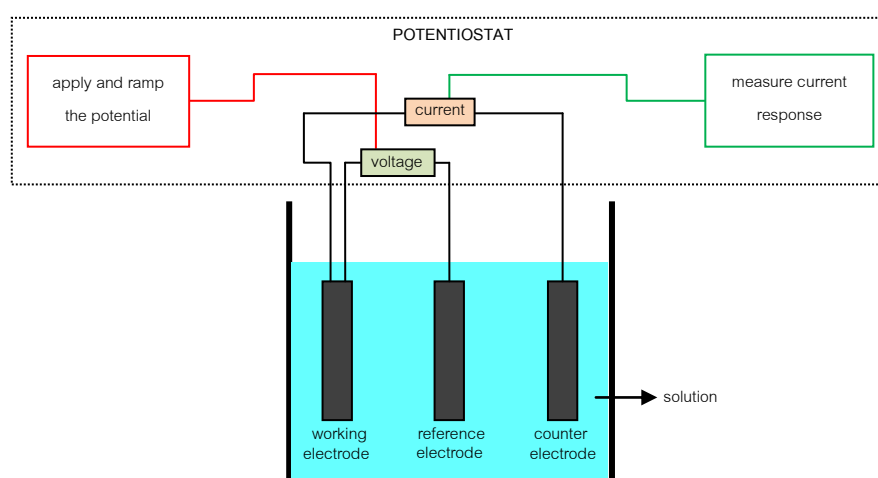
ภาพที่ 3.8 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

ซึ่งวิธีการทำงานของกล่องจูลทรศน์แบบแรงอะตอม สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1. วิธีการสัมผัสพื้นผิวพร้อมกับการลากปลายแหลมไปบนพื้นผิวนั้นๆตลอดเวลา มีข้อเสียคือ จะทำให้เกิดแรงต้านในแนวของการเคลื่อนที่ในทิศทางขนานกับพื้นผิว ซึ่งอาจทำให้คานยื่นของโพรบเกิดการโก่งงอหรืออาจบิดเบี้ยวได้ โดยที่ไม่ได้เกิดจากแรงดึงดูดที่ปลายแหลมเนื่องจากแรงในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว ส่งผลทำให้ข้อมูลความสูงของพื้นผิวที่วัดได้นั้นผิดไปจากความสูงที่แท้จริง

2. วิธีการสัมผัสพื้นผิวโดยให้ปลายแหลมสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะเวลาสั้นๆในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (คล้ายกับการใช้ปลายนิ้วเคาะโต๊ะเป็นจังหวะ) ลักษณะการสัมผัสแบบนี้จะไม่เกิดแรงต้านในแนวตั้งฉากขึ้น แต่เนื่องจากปลายแหลมสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะสั้นๆ จึงทำให้เกิดการสั่นของคาน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้นั้นไม่คงที่หรือไม่แม่นยำได้

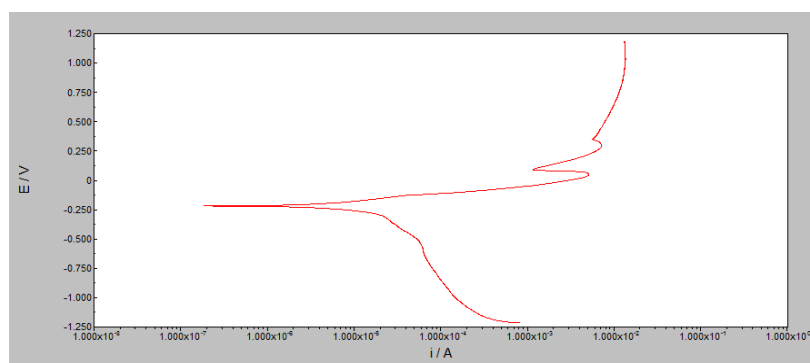
3.5.4 เครื่องทดสอบทางไฟฟ้าเคมี (potentiostats/galvanostats) [17][18][19] เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีเชิงไฟฟ้าวิธีหนึ่ง ซึ่งมีการจัดเซลล์แบบอิเล็กโทรไลต์ ที่มีเซลล์ไฟฟ้าเคมี 3 ขั้ว คือ ขั้วทำงาน (working electrode) ขั้วให้พลังงาน (counter electrode) และขั้วอ้างอิง (reference electrode) แสดงดังภาพที่ 3.9 โดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่คงที่จากภายนอกเข้าไประหว่างขั้วทำงานและขั้วอ้างอิง และเพิ่มความต่างศักย์ที่ให้กับเซลล์ขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดสภาวะ anodic polarization ซึ่งเป็นการเร่งให้ขั้วทำงานเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) และจะทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น



ภาพที่ 3.9 เครื่องทดสอบทางไฟฟ้าเคมี ที่มีเซลล์ไฟฟ้าเคมี 3 ขั้ว โดยจัดเซลล์แบบอิเล็กโทรไลต์

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้จะต้องให้ค่าศักย์ที่คงที่และไม่มีปฏิกิริยาตอบสนองต่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นต้น ส่วนขั้วให้พลังงานที่ใช้จะต้องเป็นวัสดุที่มีความเฉื่อย เช่น แพลตินัม เป็นต้น

การวิเคราะห์ผลของการทดสอบทางไฟฟ้าเคมีนั้น ได้จากการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างขั้วทำงานและขั้วให้พลังงานเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ หลังจากนั้นนำข้อมูลที่วัดได้มาพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า จากการทดสอบทางไฟฟ้าเคมี [3]

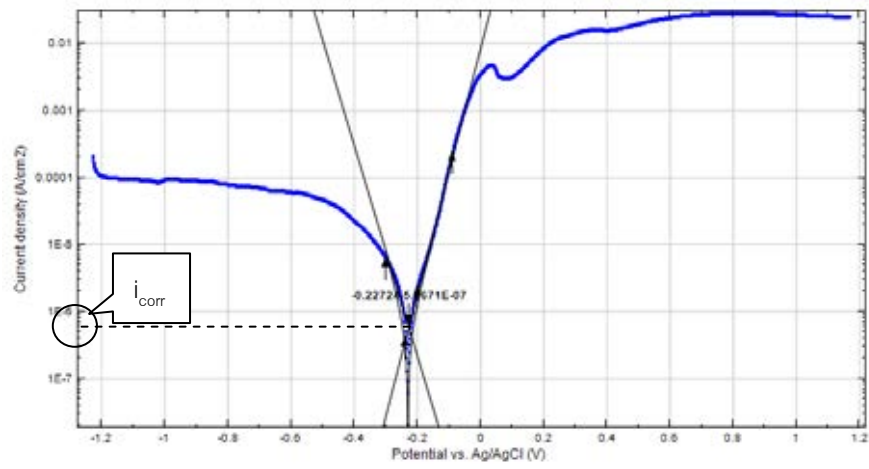
จากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเทียบกับความต่างศักย์ ทำให้ทราบค่าของกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น โดยได้จากจุดตัดของ anodic polarization กับ cathodic polarization ตามภาพที่ 3.11 และสามารถนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบผิวได้ ดังสมการ

$$IE(\%) = \frac{(i_{corr} - i'_{corr})}{i_{corr}} \times 100 \quad (5)$$

โดยที่ IE คือ ประสิทธิภาพของการยับยั้งการกัดกร่อน
(corrosion inhibitor efficiencies)

i_{corr} คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ของทองแดงที่ไม่ได้เคลือบผิว

i'_{corr} คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิว



ภาพที่ 3.11 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน จากจุดตัดของ anodic polarization กับ cathodic polarization [5]

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้

1. แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ ~ 99.9% หนา 1 มิลลิเมตร ใช้สำหรับเป็นชิ้นงานที่จะนำมาเคลือบสารกลุ่มทิโอเลต

2. กระดาษทรายเบอร์ 240, 600, 1000, 1500 และ 2000 (ผลิตโดยบริษัท 3M ประเทศไทย)

3. อะซีโตน 99.5% (ผลิตโดยบริษัท QRëCTM ประเทศนิวซีแลนด์)

4. กรดฟอสฟอริก 85% (ผลิตโดยบริษัท QRëCTM ประเทศนิวซีแลนด์)

5. น้ำแข็งแห้ง (ผลิตโดยบริษัท กรุงเทพ ดรายไอซ์ ประเทศไทย)

6. เอทิลีนไกลคอล 99.5% (ผลิตโดยบริษัท QRëCTM ประเทศนิวซีแลนด์)

7. ไอโซโพรพานอล 99.5% (ผลิตโดยบริษัท QRëCTM ประเทศนิวซีแลนด์)

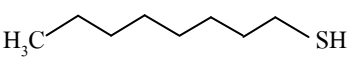
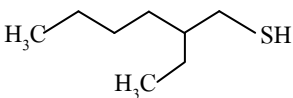
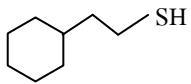
8. ออกเทนทีออล 99.4% (ผลิตโดยบริษัทโตเกียวเคมีคอลอินดัสทรี ประเทศญี่ปุ่น)

9. อีทิลเฮกเซนทีออล 97% (ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสิงคโปร์)

10. ฟีนิลอีเทนทีออล 99.5% (ผลิตโดยบริษัทโตเกียวเคมีคอลอินดัสทรี ประเทศญี่ปุ่น)

11. โซเดียมคลอไรด์ 99.5% (ผลิตโดยบริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย)

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางโครงสร้างของสารเคลือบผิวกลุ่มทิโอเลต ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ชนิดของสารเคลือบผิวกลุ่มทิโอเลต	ลักษณะโครงสร้างโมเลกุล
ออกเทนทีออล (1-octanethiol; OTT)	
อีทิลเฮกเซนทีออล (2-ethylhexanethiol; 2-EHT)	
ฟีนิลอีเทนทีออล (2-phenylethanethiol; 2-PET)	

4.2 ขั้นตอนการเตรียมพื้นผิวของทองแดงก่อนการเคลือบผิว

นำแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ ~ 99.9% หนา 1 มิลลิเมตร มาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 240, 600, 1000, 1500 และ 2000 ตามลำดับ จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น และอะซิโตน ตามลำดับ และทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ขั้นตอนต่อมา นำแผ่นทองแดงมาขัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า (electropolishing) ในสารละลายกรดฟอสฟอริก 59.5% โดยใช้ทองแดงเป็นขั้วแคโทด (ขั้วลบ) และชิ้นงานเป็นขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ให้ไฟฟ้ากระแสตรง 1.5 โวลต์ เป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปล้างด้วยกรดฟอสฟอริก 20% ตามด้วยน้ำกลั่น และอะซิโตน ตามลำดับ และทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

จากนั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการขัดข้างต้นมาทำออกซิเจนพลาสมา (Model PC1100, Semiconductor and Materials Company, Kyoto, Japan) ที่ 200 วัตต์ ภายใต้สภาวะความดันก๊าซ 15 ปาสกาล อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 40 sccm เป็นระยะเวลา 15 วินาที [5]

4.3 ขั้นตอนการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของสารกลุ่มทีโอเลตบนพื้นผิวทองแดง

เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะในการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของสารกลุ่มทีโอเลตบนพื้นผิวทองแดง โดยนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการเตรียมผิว (ขั้นตอนที่ 4.2) มาแช่ในสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต (สารละลายออกเทนทีออล, อีทิลเฮกเซนทีออล และฟีนิลอีเทนทีออล ที่ความเข้มข้น 0.005 ถึง 0.02 โมลาร์ ในไอโซโพรพานอล) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิในช่วงระหว่าง -15 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปล้างด้วยไอโซโพรพานอล และทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

4.4 เครื่องมือในการวิเคราะห์ผล

1. เครื่องวัดมุมสัมผัส (contact angle meter) (Model no. 2500702, Tanteq Inc., Schaumburg, Germany) เพื่อทดสอบสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของพื้นผิว ทดสอบโดยหยดน้ำปราศจากไอออน (deionized (DI) water) ขนาด 10 μ L ลงบนพื้นผิวทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิว และทดสอบภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติ

2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope analysis with energy dispersive x-ray spectroscopy; SEM/EDX) (Model JSM-5800 LV) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของชั้นเคลือบและปริมาณของสารเคลือบผิวบนพื้นผิวทองแดง

3. กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (atomic force microscope analysis; AFM) (Nano scope IV with tapping mode Si-Probe) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะและความขรุขระของชั้นเคลือบ บนพื้นผิวทองแดง

4. เครื่องทดสอบทางไฟฟ้าเคมี (potentiostats/galvanostats) (Model no.PGSTAT 302 N, Metrohm Autolab company) เพื่อทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของทองแดงหลังการเคลือบผิว ทดสอบโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ขั้ว โดยให้แผ่นทองแดงที่ยังไม่เคลือบผิวและแผ่นทองแดงที่เคลือบผิวแล้วเป็นขั้วทำงาน แพลทินัม (platinum; Pt) เป็นขั้วให้พลังงาน และ silver-silver chloride (Ag/AgCl) เป็นขั้วอ้างอิง ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และทำการทดสอบในช่วงค่าความต่างศักย์อยู่ในช่วงระหว่าง -1.0 ถึง +1.4 โวลต์ เมื่อเทียบกับ Ag/ AgCl ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ [6]

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 สภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของสารกลุ่มทีโอเลต (ออกเทนทีโอล, อีทิลเฮกเซนทีโอล และ ฟีนิลอีเทนทีโอล) บนพื้นผิวทองแดง

5.1.1 สมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ

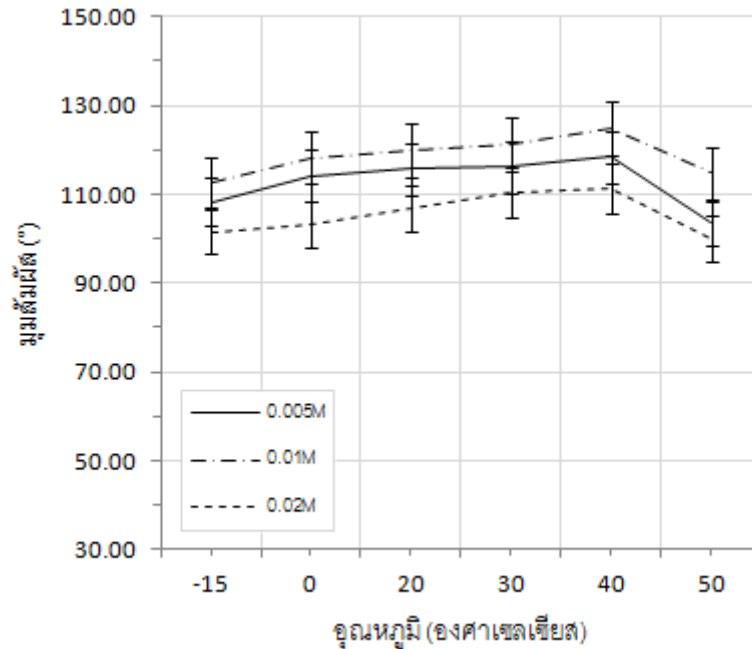
สมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตนั้น แสดงได้จากค่ามุมสัมผัส ซึ่งการวัดมุมสัมผัสนั้นจะใช้ของเหลว (น้ำปราศจากไอออน) เพื่อบ่งบอกคุณสมบัติของการเปียกหรือความสามารถในการกระจายตัวของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง

โดยโครงสร้างของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหัวและส่วนหาง ซึ่งส่วนหัวหรือหมู่ทีโอล (-SH) จะมีคุณสมบัติชอบน้ำหรือมีค่ามุมสัมผัสต่ำ และส่วนหางจะมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำหรือมีค่ามุมสัมผัสสูง ในการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียว ส่วนหัวของสารเคลือบผิวจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบออกไซด์ของทองแดง ซึ่งมีคุณสมบัติชอบน้ำเช่นเดียวกัน และจะยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวของทองแดงโดยหันส่วนหางที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำออก ทำให้ทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลตมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำนั่นเอง

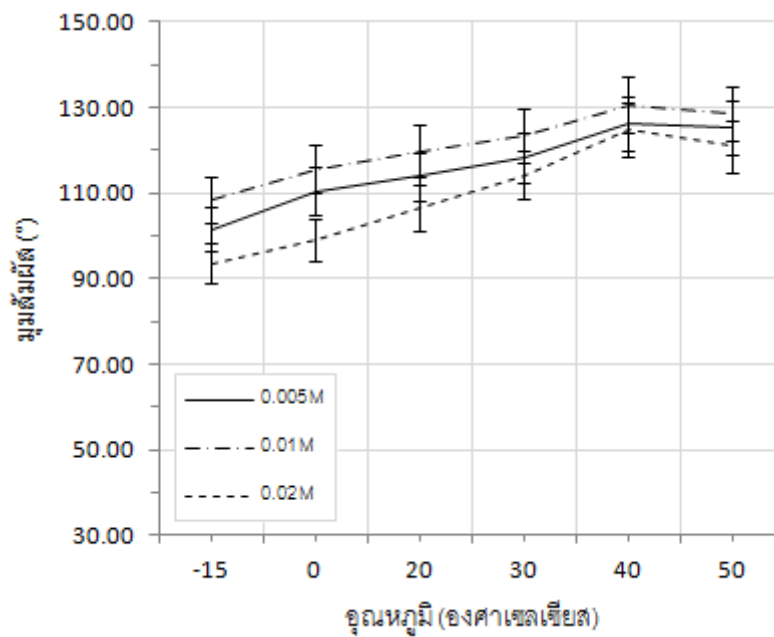
จากภาพที่ 5.1-5.3 แสดงอิทธิพลของสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิว ที่มีผลต่อคุณสมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต (OTT, 2-EHT และ 2-PET ซึ่งมีลักษณะทางโครงสร้างเป็นโซ่ตรง, โซ่กิ่ง และวงอะโรมาติกตามลำดับ) ผลการวิเคราะห์พบว่า การเคลือบผิวทองแดงด้วยสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ส่งผลให้พื้นผิวของทองแดงมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงที่สุด หรือมีค่ามุมสัมผัสสูงที่สุด

ในทางตรงกันข้าม ที่สภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่มีค่า 0.005 โมลาร์ ซึ่งน้อยจนเกินไป ส่งผลให้สารเคลือบเกาะตัวบนพื้นผิวของทองแดงได้น้อย เพราะมีโมเลกุลของสารเคลือบผิวน้อยเกินไป และที่สภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่มีค่า 0.02 โมลาร์ ซึ่งสูงจนเกินไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว โครงสร้างโมเลกุลของสารเคลือบผิวจึงไม่มีเวลาพอในการจัดเรียงตัว ทำให้โครงสร้างของสารเคลือบผิวที่เข้าเกาะกับพื้นผิวของทองแดงเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะขัดขวางไม่ให้โมเลกุลอื่นๆ เข้าเกาะได้อีก สารเคลือบ

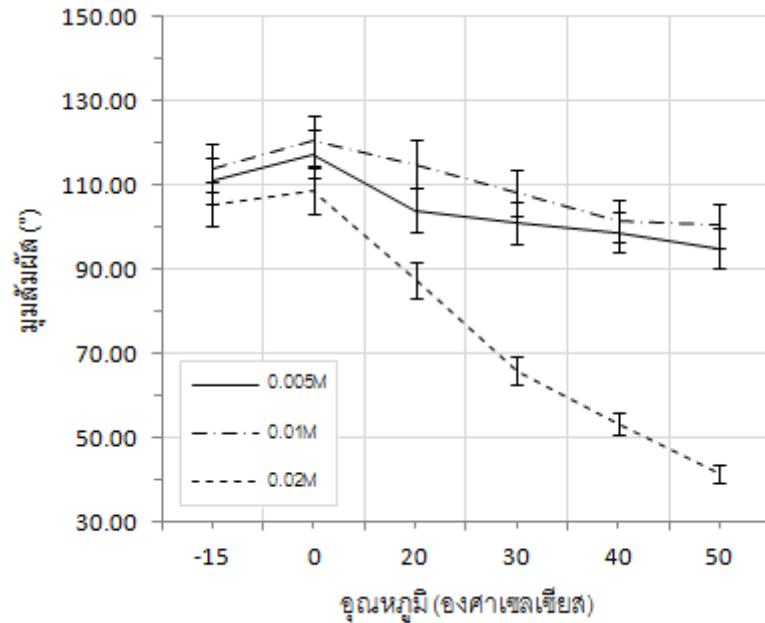
ผิวจึงเกาะตัวได้น้อย ทำให้พื้นผิวของทองแดงมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำต่ำ หรือมีค่ามุมสัมผัสต่ำนั่นเอง



ภาพที่ 5.1 เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ



ภาพที่ 5.2 เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ

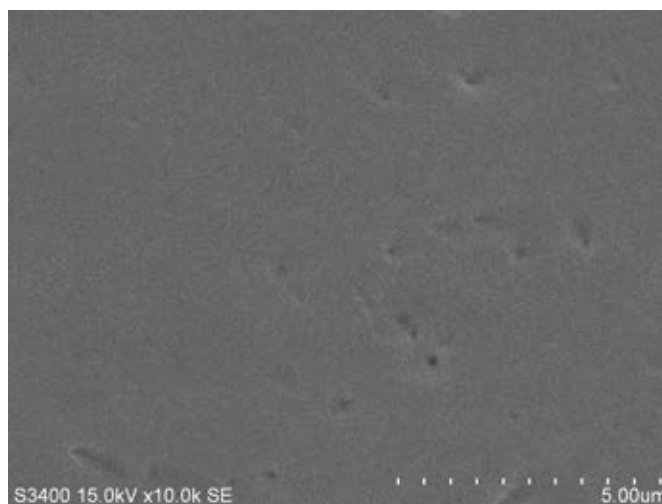


ภาพที่ 5.3 เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ

ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณ(ความเข้มข้น) ของสารเคลือบผิว จะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวที่เหมาะสม จะทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างพอเหมาะ ส่งผลให้สารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีขี้้ว สามารถเข้าเกาะกับพื้นผิวทองแดงได้ดีและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้พื้นผิวของทองแดงมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ หรือมีค่ามุมสัมผัสสูงที่สุด

5.1.2 ลักษณะของชั้นเคลือบและปริมาณของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่เกาะตัวบนพื้นผิวทองแดง

การวิเคราะห์ลักษณะของชั้นเคลือบและปริมาณของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่เกาะตัวบนพื้นผิวทองแดง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope analysis with energy dispersive x-ray spectroscopy; SEM/EDX) เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต (OTT, 2-EHT และ 2-PET ตามลำดับ) ที่ส่งผลต่อสัญญาณและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 5.4-5.7 และศึกษาอิทธิพลของสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต ที่ส่งผลต่อการเกาะตัวของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตบนพื้นผิวทองแดง โดยการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (EDX) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.1



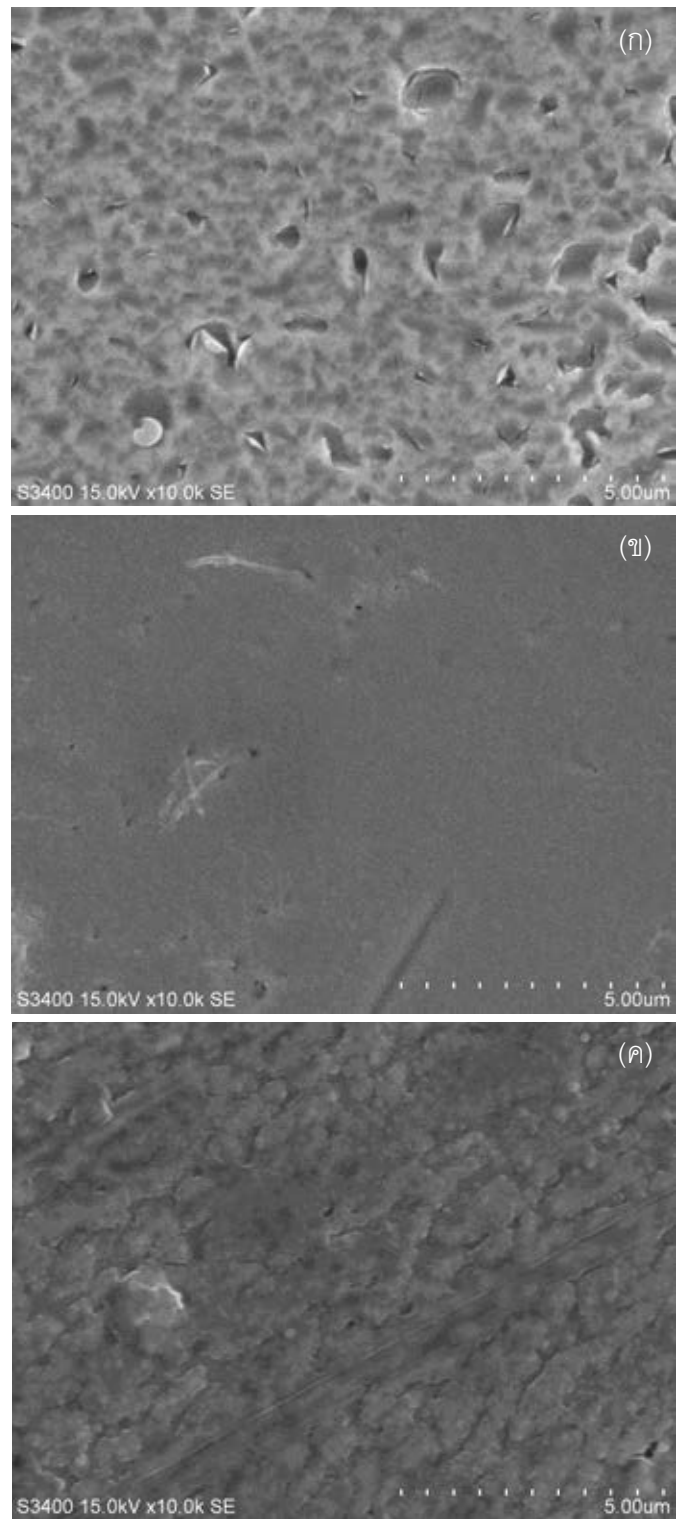
ภาพที่ 5.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ไม่ได้เคลือบผิว

จากภาพที่ 5.4 แสดงลักษณะของพื้นผิวทองแดงที่ไม่ได้เคลือบผิว ซึ่งมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของทองแดง เท่ากับ 99.9 และจากภาพที่ 5.5 แสดงพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่เป็นไฮดรอกไซด์ พบว่า ที่สภาวะความเข้มข้น 0.005 โมลาร์ สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวเข้าเกาะบนพื้นผิวของทองแดง แต่มีบริเวณบางจุดที่สารเคลือบผิวไม่สามารถเกาะตัวบนพื้นผิวของทองแดงได้ จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนต่ำ แสดงดังภาพที่ 5.5(ก) และที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดง จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนสูงที่สุด ดังภาพที่ 5.5(ข) และที่สภาวะความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ สารเคลือบผิวเข้าเกาะ

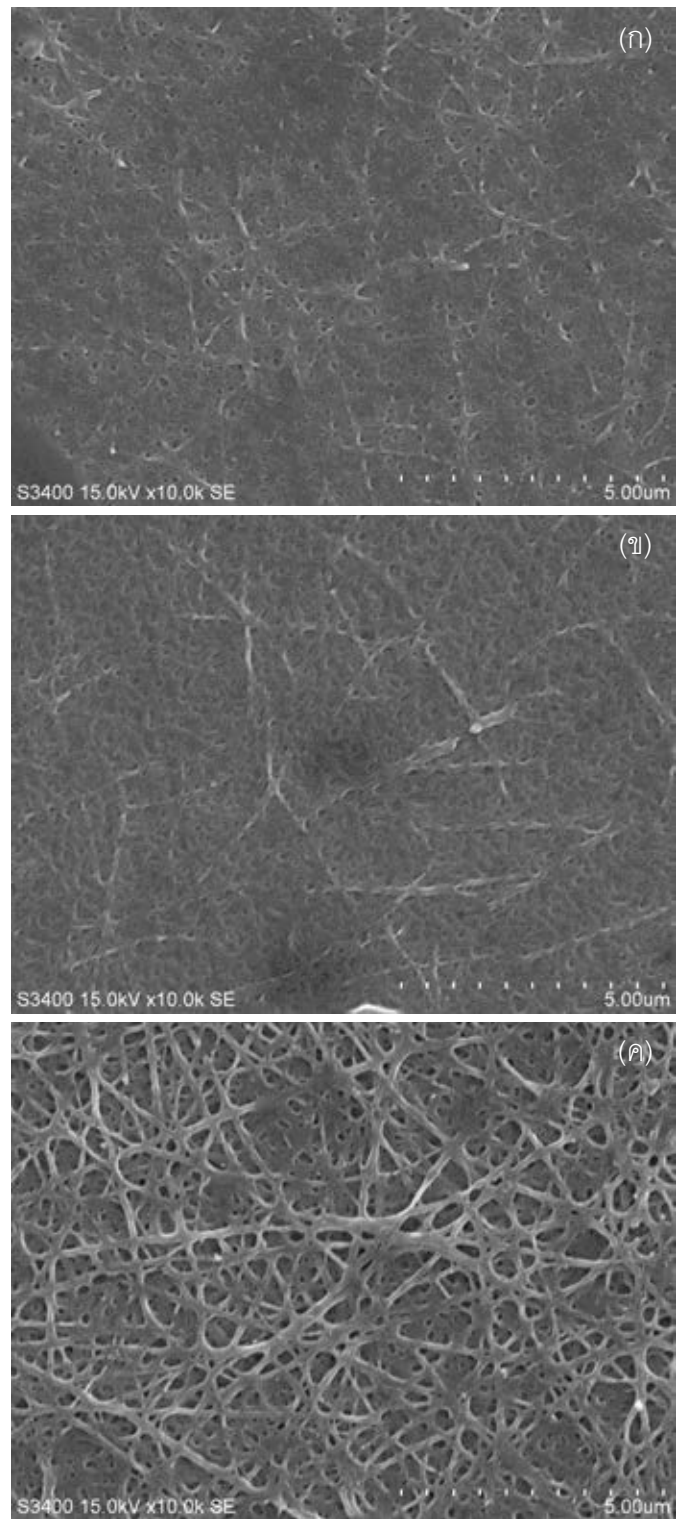
กับพื้นผิวของทองแดงอย่างรวดเร็ว ทำให้เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนต่ำที่สุด แสดงดังภาพที่ 5.5(ค)

จากภาพที่ 5.6 แสดงพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่เป็นโซ่กิ่ง พบว่า ที่สภาวะความเข้มข้น 0.005 โมลาร์ สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวเข้าเกาะบนพื้นผิวของทองแดงในลักษณะที่เป็นโครงข่าย แต่มีบริเวณบางจุดที่สารเคลือบผิวไม่สามารถเกาะตัวบนพื้นผิวของทองแดงได้ จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนต่ำ แสดงดังภาพที่ 5.6(ก) และที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ในลักษณะที่เป็นโครงข่ายอย่างหนาแน่นทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดง จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนสูงที่สุด ดังภาพที่ 5.6(ข) และที่สภาวะความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ สารเคลือบผิวเข้าเกาะกับพื้นผิวของทองแดงอย่างรวดเร็ว ทำให้เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ เห็นได้จากลักษณะของสารเคลือบที่เกาะตัวกันเป็นโครงข่ายอย่างหลวมๆ และรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนต่ำที่สุด แสดงดังภาพที่ 5.6(ค)

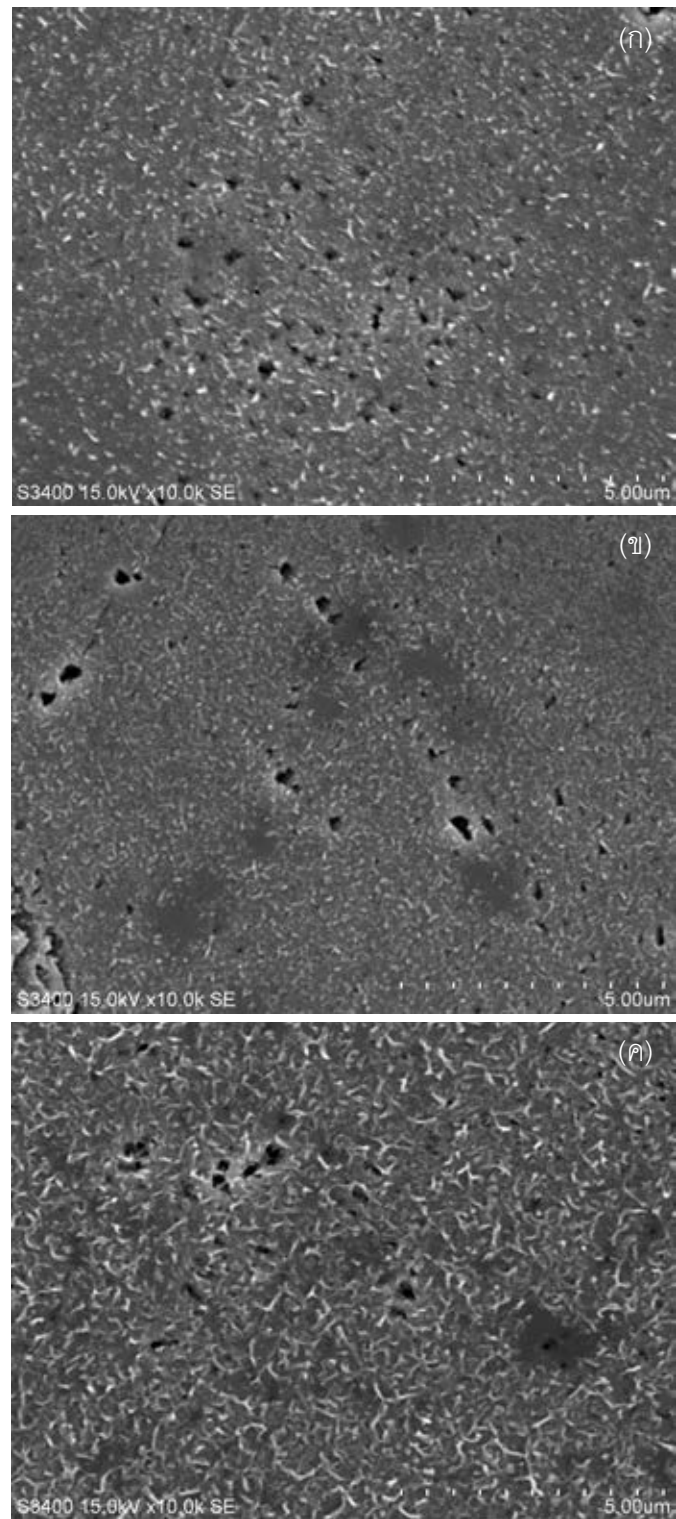
จากภาพที่ 5.7 แสดงพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติก พบว่า ที่สภาวะความเข้มข้น 0.005 โมลาร์ สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวเข้าเกาะบนพื้นผิวของทองแดง แต่มีบริเวณบางจุดที่สารเคลือบผิวไม่สามารถเกาะตัวบนพื้นผิวของทองแดงได้และรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนต่ำ แสดงดังภาพที่ 5.7(ก) และที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดง จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนสูงที่สุด ดังภาพที่ 5.7(ข) และที่สภาวะความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ สารเคลือบผิวเข้าเกาะกับพื้นผิวของทองแดงอย่างรวดเร็ว ทำให้เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนต่ำที่สุด แสดงดังภาพที่ 5.7(ค)



ภาพที่ 5.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 °C และที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0.005 M (ข) 0.01 M และ (ค) 0.02 M



ภาพที่ 5.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 °C และที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0.005 M (ข) 0.01 M และ (ค) 0.02 M



ภาพที่ 5.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะอุณหภูมิ 0 °C และที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0.005 M (ข) 0.01 M และ (ค) 0.02 M

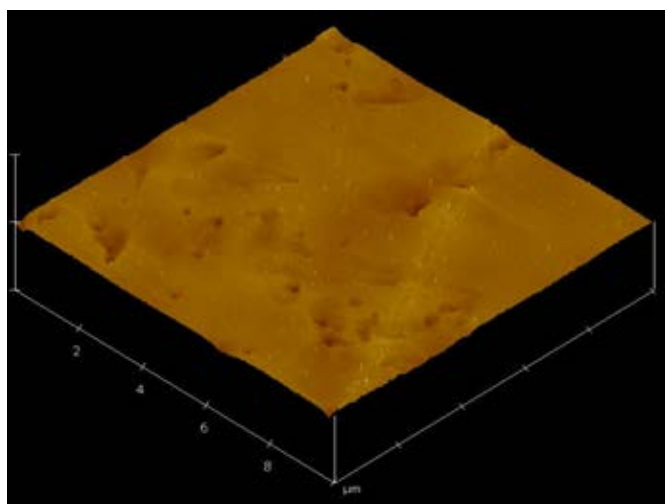
จากตารางที่ 5.1 แสดงอิทธิพลของสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิว ที่มีผลต่อสัดส่วนของคาร์บอนต่อทองแดง หรือปริมาณการเกาะตัวของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต (OTT, 2-EHT และ 2-PET) บนพื้นผิวทองแดง ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (EDX) พบว่า การเคลือบผิวทองแดงด้วยสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตนั้น สารเคลือบผิวจะสามารถเกาะตัวบนพื้นผิวทองแดงได้มากหรือน้อย ดูได้จากปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอน ซึ่งโมเลกุลของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต ประกอบไปด้วย ธาตุคาร์บอน ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีหลัก ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ทำให้ทราบว่า การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT, 2-EHT และ 2-PET ตามลำดับ ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ สารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีซัลฟิว จะสามารถเข้าเกาะกับพื้นผิวของทองแดงได้ดีและเป็นระเบียบที่สุด แสดงดังปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอน คือ 6.29, 52.60 และ 14.96 ตามลำดับ ส่งผลให้พื้นผิวของทองแดงมีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีซัลฟิวได้ดีที่สุด โดยผลที่ได้มีความสัมพันธ์กับสมบัติความไม่ชอบน้ำหรือค่ามุมสัมผัสในหัวข้อ 5.1.1 นั้นเอง

ตารางที่ 5.1 อิทธิพลของสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต ที่ส่งผลต่อสัดส่วนของคาร์บอนต่อทองแดง หรือปริมาณการเกาะตัวของสารเคลือบผิวบนพื้นผิวทองแดง

ชนิดของสารเคลือบผิว	ความเข้มข้น	ร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอน	ร้อยละโดยอะตอมของทองแดง
แผ่นทองแดง	-	-	99.90
OTT @ 40 °C	0.005 M	3.87	96.13
	0.01 M	6.29	93.71
	0.02 M	3.82	96.18
2-EHT @ 40 °C	0.005 M	38.64	61.36
	0.01 M	52.60	47.40
	0.02 M	37.31	62.69
2-PET @ 0 °C	0.005 M	6.50	93.50
	0.01 M	14.96	85.04
	0.02 M	2.94	97.06

5.1.3 ลักษณะและความขรุขระของชั้นเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่เกาะตัวบนพื้นผิวทองแดง

การวิเคราะห์ลักษณะและความขรุขระของชั้นเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่เกาะตัวบนพื้นผิวทองแดง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต (OTT, 2-EHT และ 2-PET ตามลำดับ) ที่ส่งผลต่อสัญญาณและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต ซึ่งแสดงออกมาในรูปแบบภาพสามมิติ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 5.8-5.11 และสามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าความขรุขระ (roughness) ของพื้นผิวทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.2

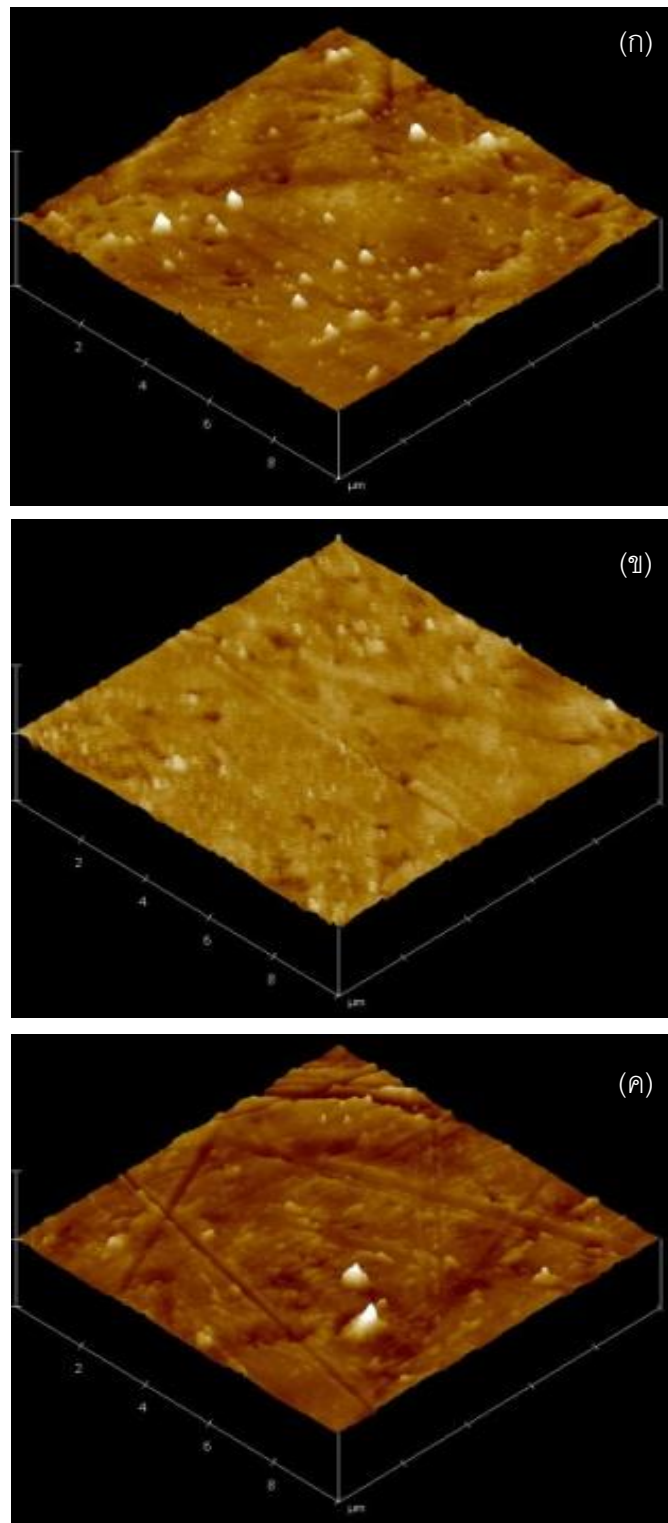


ภาพที่ 5.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ไม่ได้เคลือบผิว

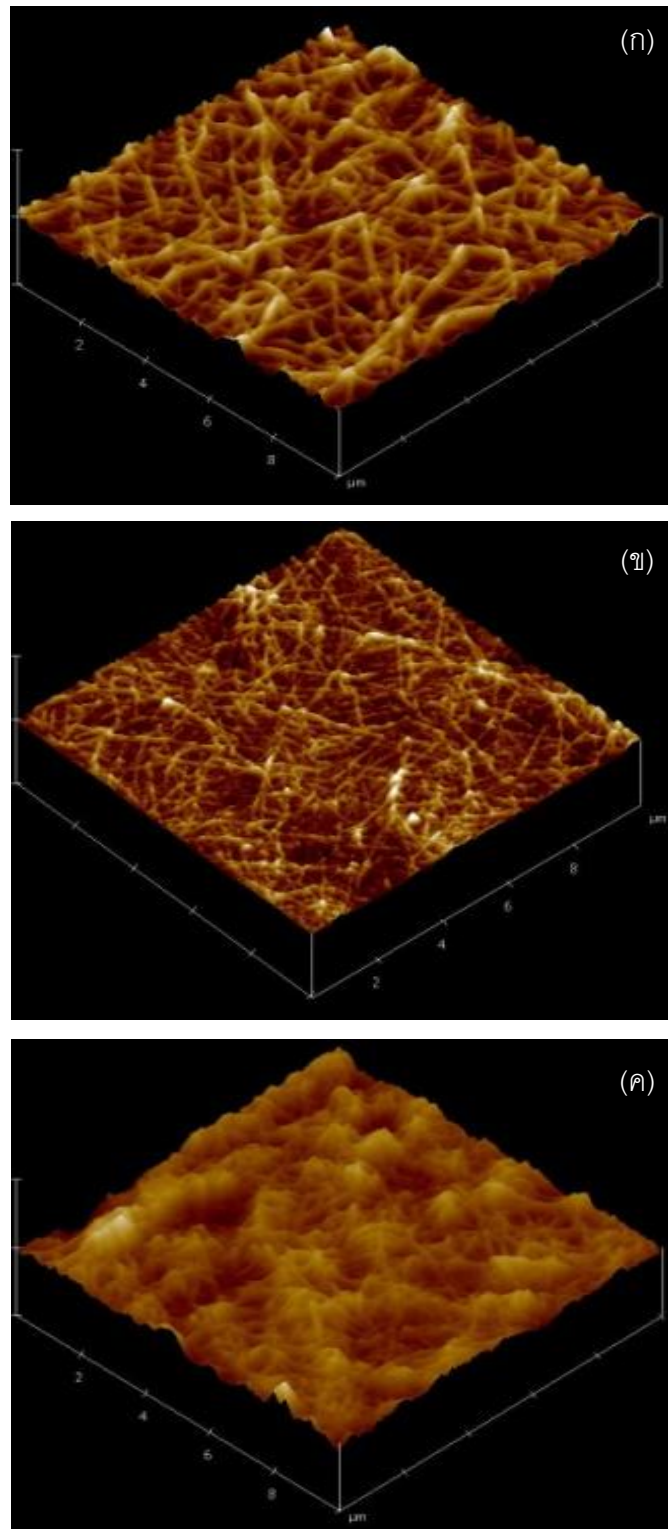
จากภาพที่ 5.8 แสดงลักษณะของพื้นผิวทองแดงที่ไม่ได้เคลือบผิว ซึ่งมีค่าความขรุขระเท่ากับ 5.075 และจากภาพที่ 5.9 แสดงพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่เป็นไซ้ตรง พบว่า ที่สภาวะความเข้มข้น 0.005 โมลาร์ สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวเข้าเกาะบนพื้นผิวของทองแดง แต่มีบริเวณบางจุดที่สารเคลือบผิวไม่สามารถเกาะตัวบนพื้นผิวของทองแดงได้และรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จึงมีความขรุขระสูง แสดงดังภาพที่ 5.9(ก) และที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และเกาะตัวอย่างหนาแน่นทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดง จึงมีความขรุขระต่ำที่สุด ดังภาพที่ 5.9(ข) และที่สภาวะความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ สารเคลือบผิวเข้าเกาะกับพื้นผิวของทองแดงอย่างรวดเร็ว ทำให้เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนทั่วบริเวณพื้นผิว จึงมีความขรุขระสูงที่สุด แสดงดังภาพที่ 5.9(ค)

จากภาพที่ 5.10 แสดงพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่เป็นโซ่กิ่ง พบว่า ที่สภาวะความเข้มข้น 0.005 โมลาร์ สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวเข้าเกาะบนพื้นผิวของทองแดงในลักษณะที่เป็นโครงข่ายอย่างหลวมๆ และมีบริเวณบางจุดที่สารเคลือบผิวเกาะตัวรวมกันเป็นกลุ่มก้อน จึงมีความขรุขระสูง แสดงดังภาพที่ 5.10(ก) และที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ในลักษณะที่เป็นโครงข่ายอย่างหนาแน่นทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดง จึงมีความขรุขระต่ำที่สุด ดังภาพที่ 5.10(ข) และที่สภาวะความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ สารเคลือบผิวเข้าเกาะกับพื้นผิวของทองแดงอย่างรวดเร็ว ทำให้เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ เห็นได้จากลักษณะของสารเคลือบที่เกาะตัวกันเป็นโครงข่ายอย่างหลวมๆ และรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนทั่วบริเวณ จึงมีความขรุขระสูงที่สุด แสดงดังภาพที่ 5.10(ค)

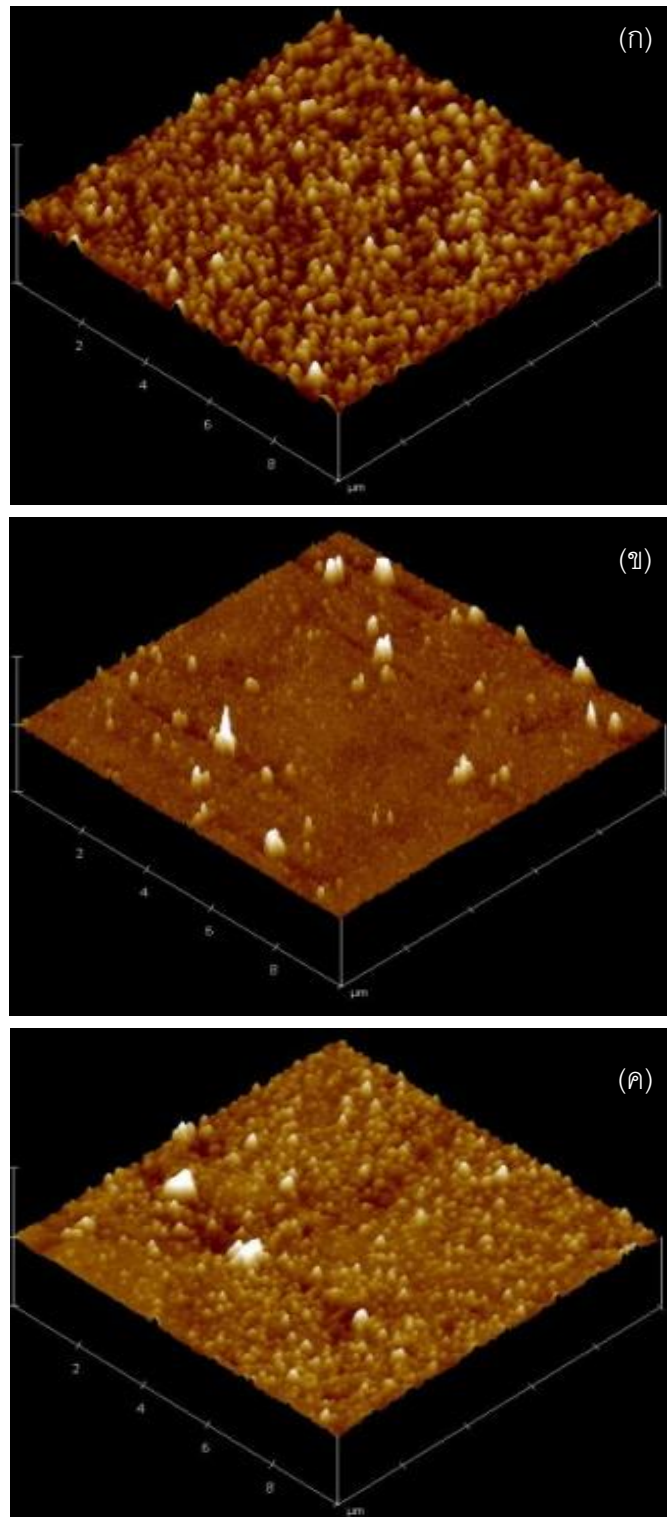
จากภาพที่ 5.11 แสดงพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติก พบว่า ที่สภาวะความเข้มข้น 0.005 โมลาร์ สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวเข้าเกาะบนพื้นผิวของทองแดงได้ไม่หนาแน่น เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบและไม่สม่ำเสมอ จึงมีความขรุขระสูง แสดงดังภาพที่ 5.11(ก) และที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดงอย่างหนาแน่น จึงมีความขรุขระต่ำที่สุด ดังภาพที่ 5.11(ข) และที่สภาวะความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ สารเคลือบผิวเข้าเกาะกับพื้นผิวของทองแดงอย่างรวดเร็ว ทำให้เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบและไม่สม่ำเสมอ และรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนทั่วบริเวณ จึงมีความขรุขระสูงที่สุด แสดงดังภาพที่ 5.11(ค)



ภาพที่ 5.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย สารเคลือบ OTT ที่สภาวะอุณหภูมิ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0.005 M (ข) 0.01 M และ (ค) 0.02 M



ภาพที่ 5.10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 °C และที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0.005 M (ข) 0.01 M และ (ค) 0.02 M



ภาพที่ 5.11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย สารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะอุณหภูมิ 0 °C และที่สภาวะความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0.005 M (ข) 0.01 M และ (ค) 0.02 M

จากตารางที่ 5.2 แสดงอิทธิพลของสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิว ที่มีผลต่อค่าความขรุขระ (roughness) ของพื้นผิวทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต (OTT, 2-EHT และ 2-PET) ผลการวิเคราะห์ พบว่า การเคลือบผิวทองแดงด้วยสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ นั้น สารเคลือบผิวสามารถเกาะตัวบนพื้นผิวทองแดงได้ดีและจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากที่สุด เนื่องจากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างพอเหมาะ ทำให้สารเคลือบผิวสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับพื้นผิวทองแดงได้ดี และมีเวลาในการจัดเรียงตัว เมื่อสารเคลือบมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้ทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวมีค่าความขรุขระต่ำที่สุด คือ 3.904, 46.505 และ 14.354 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อพื้นผิวทองแดงมีความขรุขระต่ำ เมื่อทดสอบสมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ จะพบว่าหยดน้ำมีลักษณะที่เป็นแบบ drop wise หรือแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ หรือมีค่ามุมสัมผัสสูงที่สุด คือ 124.79° , 130.66° และ 120.58° ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า พื้นผิวที่มีความขรุขระต่ำ จะทำให้พื้นผิวมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูง [20]

ตารางที่ 5.2 อิทธิพลของสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต ที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระ (roughness) ของพื้นผิวทองแดงหลังการเคลือบผิว

ชนิดของสารเคลือบผิว	ความเข้มข้น	ค่ามุมสัมผัส ($^{\circ}$)	ค่าความขรุขระ (นาโนเมตร)
แผ่นทองแดง	-	31.12	5.075
OTT @ 40 $^{\circ}$ C	0.005 M	118.44	6.939
	0.01 M	124.79	3.904
	0.02 M	111.29	8.450
2-EHT @ 40 $^{\circ}$ C	0.005 M	126.16	64.674
	0.01 M	130.66	46.505
	0.02 M	124.73	67.046
2-PET @ 0 $^{\circ}$ C	0.005 M	117.44	17.697
	0.01 M	120.58	14.354
	0.02 M	108.76	24.031

5.1.4 ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน

ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องทดสอบทางไฟฟ้าเคมี (potentiostats) เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต (OTT, 2-EHT และ 2-PET ตามลำดับ) ที่ส่งผลต่อการดูดซับสารเคลือบผิวบนพื้นผิวทองแดง ผลการวิเคราะห์พบว่า การเคลือบผิวทองแดงด้วยสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ นั้น พื้นผิวทองแดงสามารถดูดซับสารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีซัลฟิดได้ดีและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบที่สุด ส่งผลให้พื้นผิวของทองแดงมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงสุด หรือมีค่ามุมสัมผัสสูงที่สุดนั่นเอง และเนื่องจากพื้นผิวของทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลตมีคุณลักษณะที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้ทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวมีค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนสูง คือ 96.24%, 99.37% และ 98.90% ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 5.3 โดยค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$IE(\%) = \frac{(i_{corr} - i'_{corr})}{i_{corr}} \times 100 \quad (5.1)$$

โดยที่ i_{corr} คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ของทองแดงที่ไม่ได้เคลือบผิว

i'_{corr} คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิว

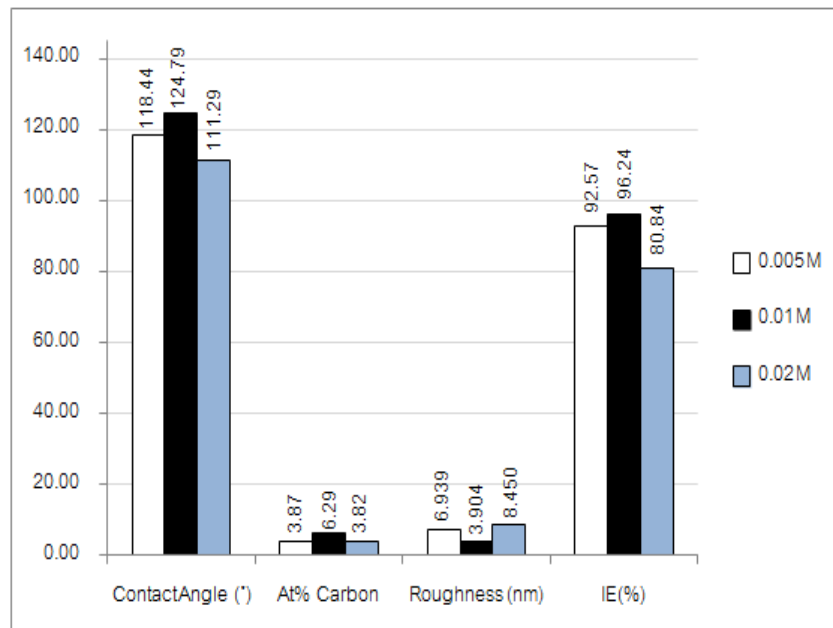
ตารางที่ 5.3 อิทธิพลของสภาวะความเข้มข้น ที่ส่งผลต่อสมบัติด้านความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต

ชนิดของสารเคลือบผิว	ความเข้มข้น	E_{corr} (v) vs. Ag/AgCl	I_{corr} (A/cm ²)	ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน (%)
แผ่นทองแดง	-	-0.259	4.21E-05	-
OTT @ 40 °C	0.005 M	-0.255	3.13E-06	92.57
	0.01 M	-0.245	1.58E-06	96.24
	0.02 M	-0.278	8.06E-06	80.84
2-EHT @ 40 °C	0.005 M	-0.237	2.29E-06	94.56
	0.01 M	-0.231	2.65E-07	99.37
	0.02 M	-0.228	3.93E-06	90.66
2-PET @ 0 °C	0.005 M	-0.254	6.01E-07	98.57
	0.01 M	-0.253	4.64E-07	98.90
	0.02 M	-0.265	6.38E-06	84.83

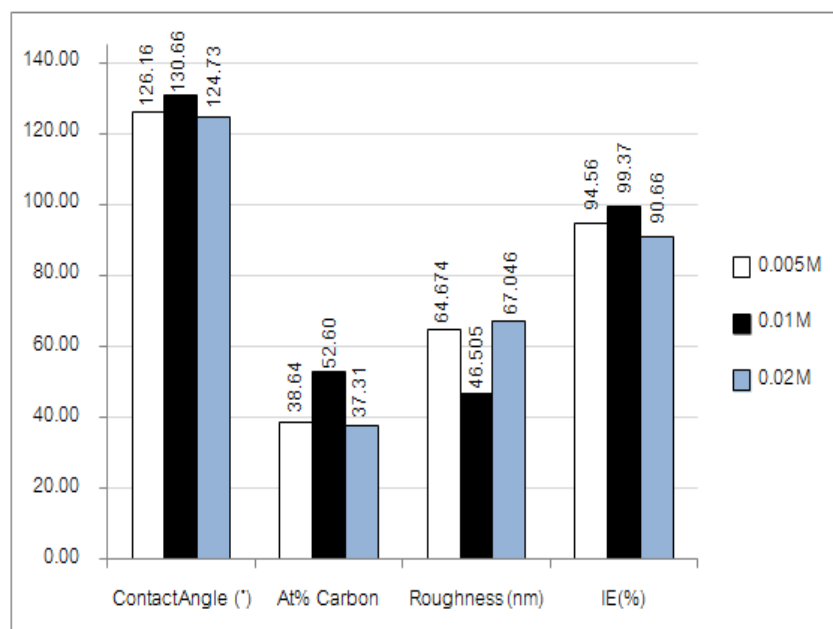
5.1.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามูมสัมพัทธ์, สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง, ความขรุขระของชั้นเคลือบ และประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน ของทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบกลุ่มทีโอเลต ที่สภาวะความเข้มข้นต่าง ๆ

จากภาพที่ 5.12-5.14 แสดงให้เห็นว่า การเคลือบผิวทองแดงด้วยสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตทั้ง 3 ชนิด ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ทำให้สารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีขี้ว สามารถเข้าเกาะกับพื้นผิวทองแดงได้มากที่สุด เห็นได้จากปริมาณสัดส่วนของคาร์บอนโดยอะตอม และเมื่อมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างพอเหมาะ สารเคลือบผิวที่เข้าเกาะกับพื้นผิวทองแดง จึงมีเวลาเพียงพอในการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบที่สุด ทำให้พื้นผิวของทองแดงมีความขรุขระต่ำนั่นเอง เมื่อนำไปทดสอบสมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ โดยการวัดมูมสัมพัทธ์ หยดน้ำจะมีลักษณะเป็นแบบ drop wise หรือมีค่ามูมสัมพัทธ์สูงนั่นเอง ทองแดงจึงมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูง ทำให้ทองแดงมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนดีที่สุด

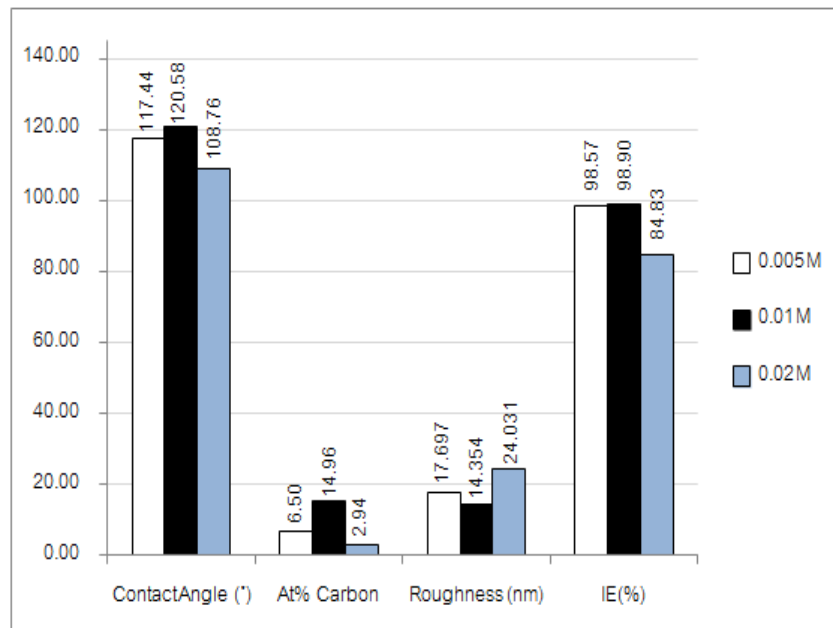
ในทางตรงกันข้าม ที่สภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่มีค่า 0.005 โมลาร์ ซึ่งน้อยจนเกินไป ส่งผลให้สารเคลือบเกาะตัวบนพื้นผิวของทองแดงได้น้อย เพราะมีโมเลกุลของสารเคลือบผิวน้อยเกินไป และที่สภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่มีค่า 0.02 โมลาร์ ซึ่งสูงจนเกินไป ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของสารเคลือบผิวไม่มีเวลาพอในการจัดเรียงตัว สารเคลือบผิวที่เข้าเกาะกับพื้นผิวของทองแดงจึงเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะขัดขวางไม่ให้โมเลกุลอื่นๆ เข้าเกาะได้อีก สารเคลือบผิวจึงเกาะตัวได้น้อย ทำให้พื้นผิวของทองแดงมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำต่ำ หรือมีค่ามูมสัมพัทธ์ต่ำนั่นเอง ส่งผลให้ทองแดงมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนต่ำ



ภาพที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามุมสัมผัส/สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง/ค่าความขรุขระของพื้นผิว/ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน ของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสาร OTT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 °C เพื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะความเข้มข้น



ภาพที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามุมสัมผัส/สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง/ค่าความขรุขระของพื้นผิว/ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน ของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสาร 2-EHT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 °C เพื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะความเข้มข้น

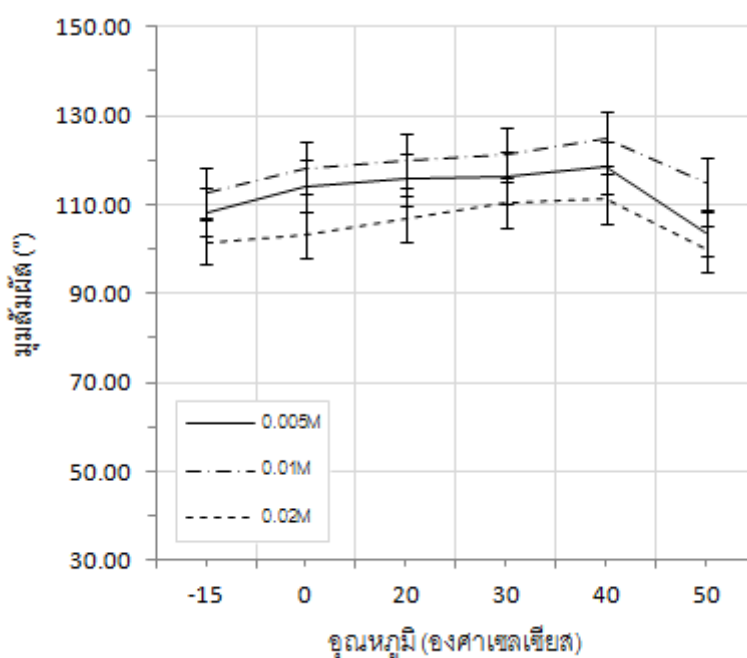


ภาพที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามุมสัมผัส/สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง/ค่าความขรุขระของพื้นผิว/ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน ของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสาร 2-PET ที่สภาวะอุณหภูมิ 0 °C เพื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะความเข้มข้น

5.2 สภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของสารกลุ่มทีโอเลต (ออกเทนทีโอล, อีทิลเฮกเซนทีโอล และฟีนิลอีเทนทีโอล) บนพื้นผิวทองแดง

5.2.1 สมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ

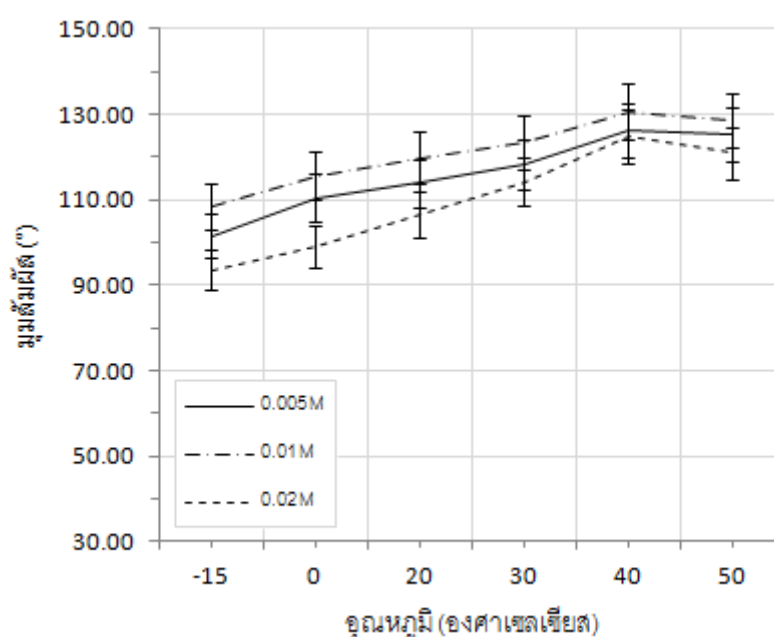
จากภาพที่ 5.15 แสดงอิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว ที่มีผลต่อคุณสมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว OTT ซึ่งมีลักษณะทางโครงสร้างเป็นโซ่ตรง ผลการวิเคราะห์พบว่า การเคลือบผิวทองแดงด้วยสารเคลือบผิว OTT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ส่งผลให้พื้นผิวของทองแดงมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงสุด หรือมีค่ามุมสัมผัสสูงสุดที่สุด คือ 124.79° และจะเห็นได้ว่าการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว OTT ที่สภาวะอุณหภูมิสูงมีความเหมาะสมมากกว่าอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ โมเลกุลของสารเคลือบสามารถเคลื่อนที่ได้ช้า จึงไม่สามารถกระจายตัวได้ดี และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาดำ สารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีขี้ผึ้งเกาะตัวได้น้อย ทำให้มีค่ามุมสัมผัสต่ำ



ภาพที่ 5.15 เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

จากภาพที่ 5.16 แสดงอิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว ที่มีผลต่อคุณสมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว 2-EHT

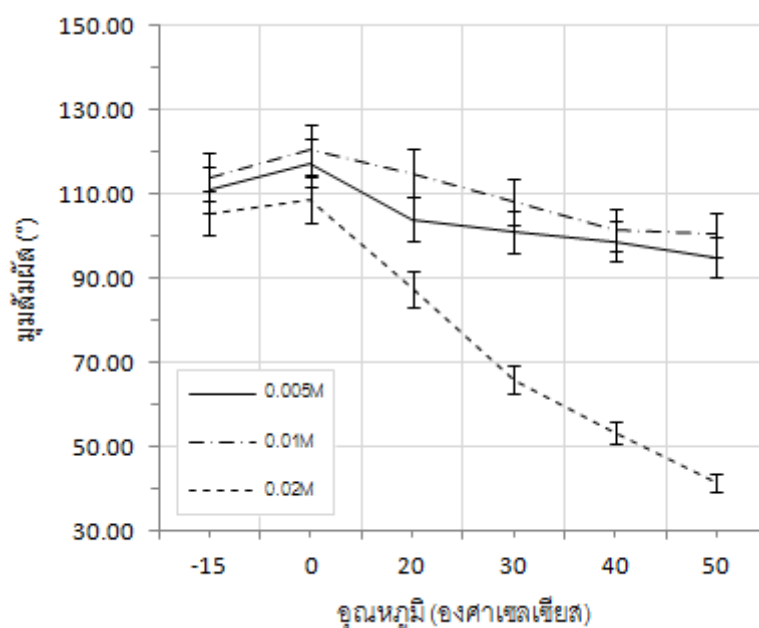
ซึ่งมีลักษณะทางโครงสร้างเป็นโซ่กิ่ง ผลการวิเคราะห์พบว่า การเคลือบผิวทองแดงด้วยสารเคลือบผิว 2-EHT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ส่งผลให้พื้นผิวของทองแดงมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงสุด หรือมีค่ามุมสัมผัสสูงสุด คือ 130.66° และจะเห็นได้ว่า การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว 2-EHT ที่สภาวะอุณหภูมิสูงมีความเหมาะสมมากกว่าอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ โมเลกุลของสารเคลือบสามารถเคลื่อนที่ได้ช้า จึงไม่สามารถกระจายตัวได้ดี และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ สารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีขี้ผึ้งเกาะตัวได้น้อย ทำให้มีค่ามุมสัมผัสต่ำ เช่นเดียวกับการเคลือบผิวทองแดงด้วยสารเคลือบผิว OTT



ภาพที่ 5.16 เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว 2-EHT ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

จากภาพที่ 5.17 แสดงอิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว ที่มีผลต่อคุณสมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว 2-PET ซึ่งมีลักษณะทางโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติก ผลการวิเคราะห์พบว่า การเคลือบผิวทองแดงด้วยสารเคลือบผิว 2-PET ที่สภาวะอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ส่งผลให้พื้นผิวของทองแดงมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงสุด หรือมีค่ามุมสัมผัสสูงสุด คือ 120.58° และจะเห็นได้ว่า การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว 2-PET ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำมีความเหมาะสมมากกว่าอุณหภูมิสูง เนื่องจากสารเคลือบผิวมีลักษณะทางโครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติก ซึ่งจัดเรียงตัวได้ยากกว่าโครงสร้างที่เป็นโซ่ตรงและโซ่กิ่ง จึงต้องควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้ช้าลง เพื่อให้โครงสร้างมีเวลาพอในการ

จัดเรียงตัว สารเคลือบผิวจึงเกาะตัวได้ดีและจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบที่สุด ในทางตรงกันข้าม หากสภาวะอุณหภูมิสูง จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วเกินไป ทำให้โครงสร้างเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะขัดขวางโมเลกุลอื่นๆไม่ให้เข้าเกาะได้อีก สารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีขี้ผึ้งเกาะตัวได้น้อย ทำให้มีค่ามุมสัมผัสต่ำ

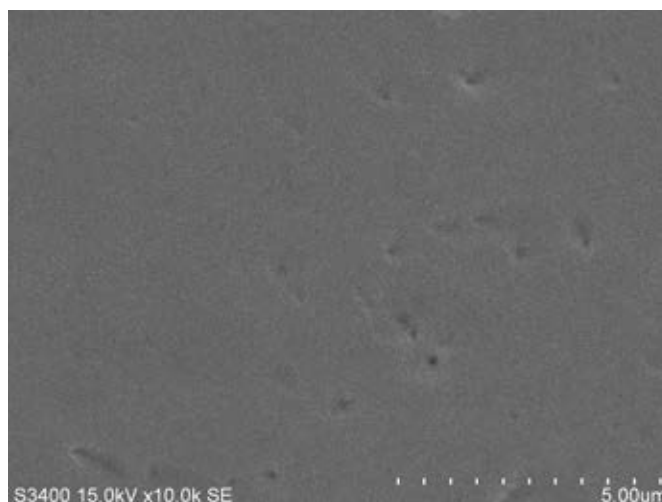


ภาพที่ 5.17 เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่า สภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว จะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและการเคลื่อนที่โมเลกุล ซึ่งสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิวที่เหมาะสมกับการเข้าเกาะของโมเลกุลของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตกับพื้นผิวทองแดง ขึ้นอยู่กับลักษณะทางโครงสร้างโมเลกุลของสารเคลือบ โดยพบว่า ในการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นไซตรงและไซกิ่ง สภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วงอุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ และการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติก ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำมากกว่าอุณหภูมิสูง เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติก จัดเรียงตัวยากกว่าโครงสร้างที่เป็นไซตรงและไซกิ่ง จึงต้องควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้ช้าลง เพื่อให้โครงสร้างมีเวลาพอในการจัดเรียงตัว เพราะหากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วเกินไป ทำให้โครงสร้างเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ โมเลกุลเหล่านี้จะขัดขวางโมเลกุลอื่นๆไม่ให้เข้าเกาะได้อีก สารเคลือบผิวจึงเกาะตัวได้น้อยนั่นเอง

5.2.2 ลักษณะของชั้นเคลือบและปริมาณของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่เกาะตัวบนพื้นผิวทองแดง

การวิเคราะห์ลักษณะของชั้นเคลือบและปริมาณของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่เกาะตัวบนพื้นผิวทองแดง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope analysis with energy dispersive x-ray spectroscopy; SEM/EDX) เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต (OTT, 2-EHT และ 2-PET ตามลำดับ) ที่ส่งผลต่อสัดส่วนและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 5.18-5.21 และศึกษาอิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว ที่ส่งผลต่อการเกาะตัวของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตบนพื้นผิวทองแดง โดยการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (EDX) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.4



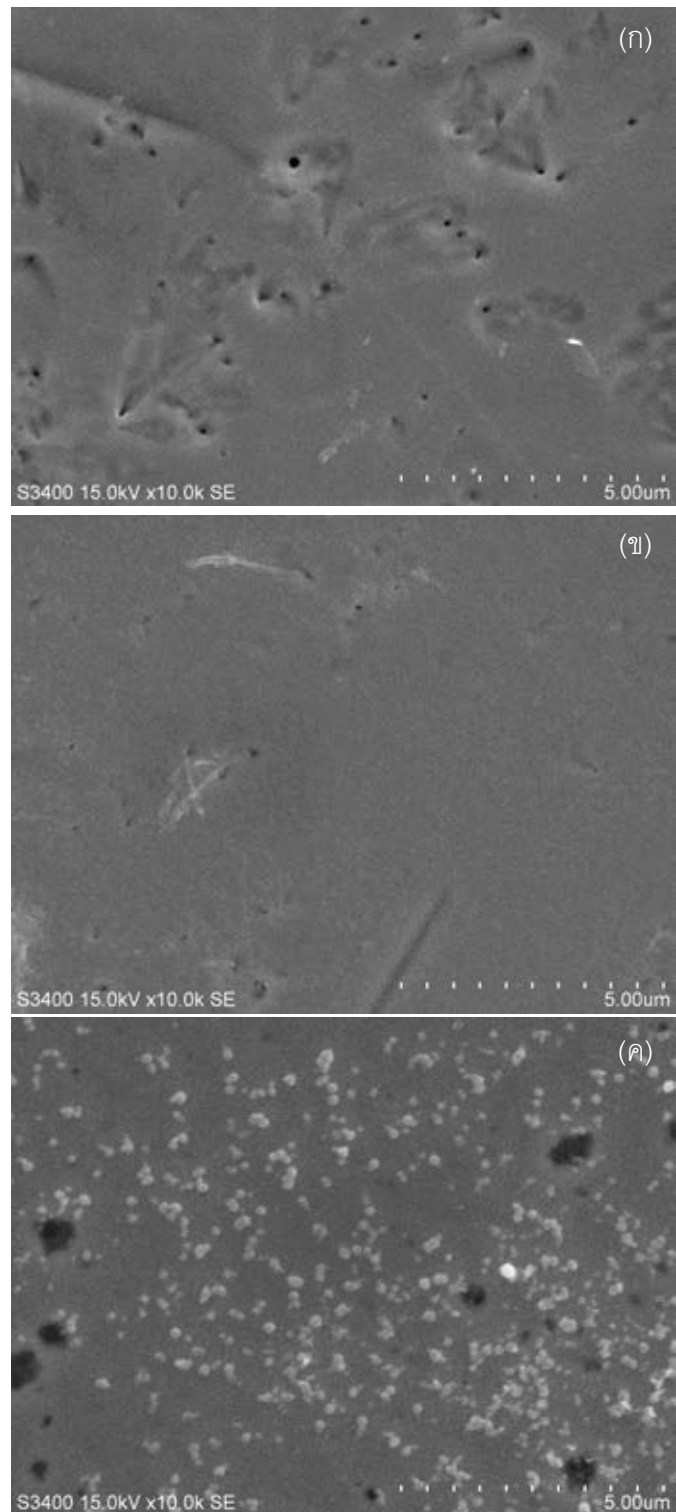
ภาพที่ 5.18 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแผ่นทองแดงที่ไม่ได้เคลือบผิว

จากภาพที่ 5.18 แสดงลักษณะของพื้นผิวทองแดงที่ไม่ได้เคลือบผิว ซึ่งมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของทองแดง เท่ากับ 99.9 และจากภาพที่ 5.19 แสดงพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่เป็นโซ่ตรง พบว่า ที่สภาวะอุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวเข้าเกาะบนพื้นผิวของทองแดง แต่มีบริเวณบางจุดที่สารเคลือบผิวไม่สามารถเกาะตัวบนพื้นผิวของทองแดงได้ จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนต่ำ ดังภาพที่ 5.19(ก) และที่สภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดง จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนสูงที่สุด ดังภาพที่ 5.19(ข) และที่สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

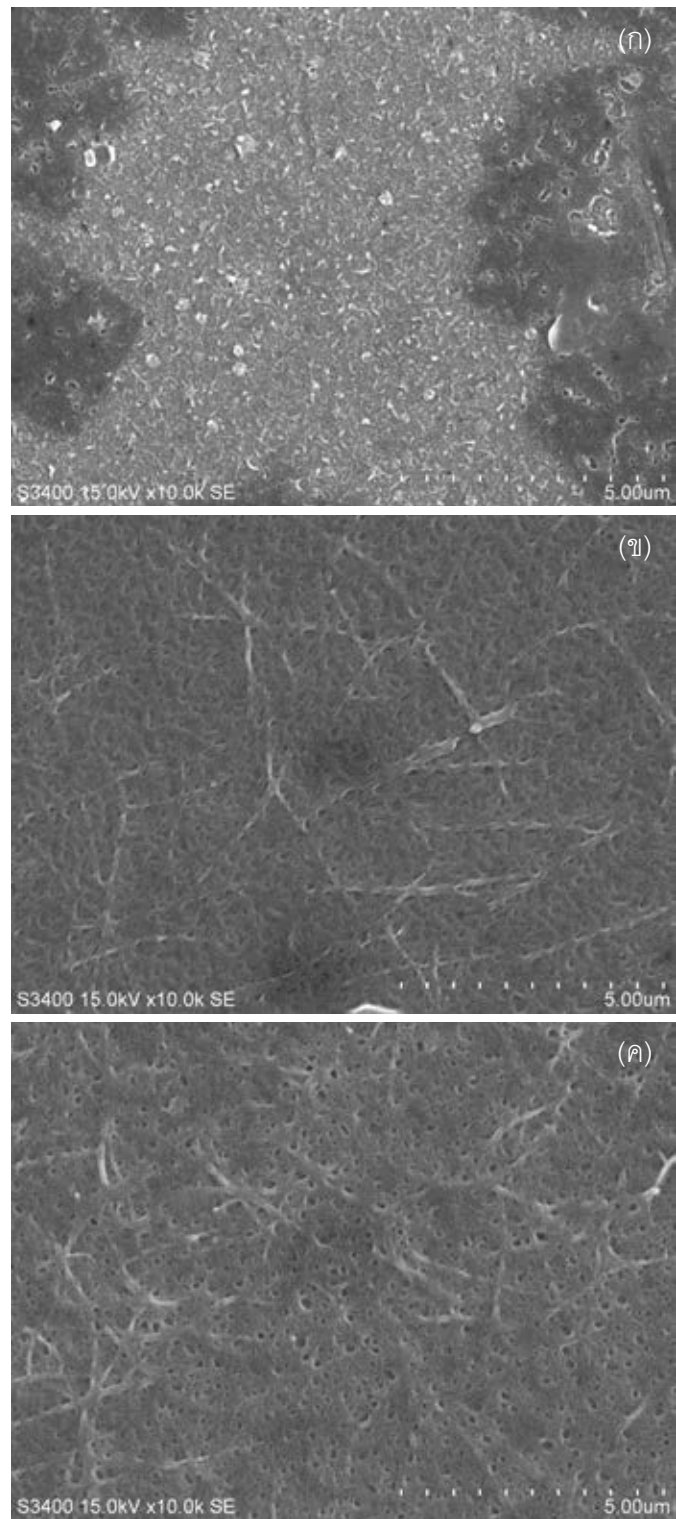
สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวเข้าเกาะบนพื้นผิวของทองแดงอย่างไม่เป็นระเบียบ และรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนต่ำที่สุด แสดงดังภาพที่ 5.19(ค)

จากภาพที่ 5.20 แสดงพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่เป็นโซ่กิ่ง พบว่า ที่สภาวะอุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวเข้าเกาะบนพื้นผิวของทองแดงได้น้อย ซึ่งแสดงลักษณะที่ไม่เป็นโครงข่าย และมีบริเวณบางจุดที่สารเคลือบผิวเกาะตัวรวมกันเป็นกลุ่มก้อน จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนต่ำที่สุด แสดงดังภาพที่ 5.20(ก) และที่สภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ในลักษณะที่เป็นโครงข่ายอย่างหนาแน่นทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดง จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนสูงที่สุด ดังภาพที่ 5.20(ข) และที่สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ในลักษณะที่เป็นโครงข่ายค่อนข้างจะหนาแน่นทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดง จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนสูง แสดงดังภาพที่ 5.20(ค)

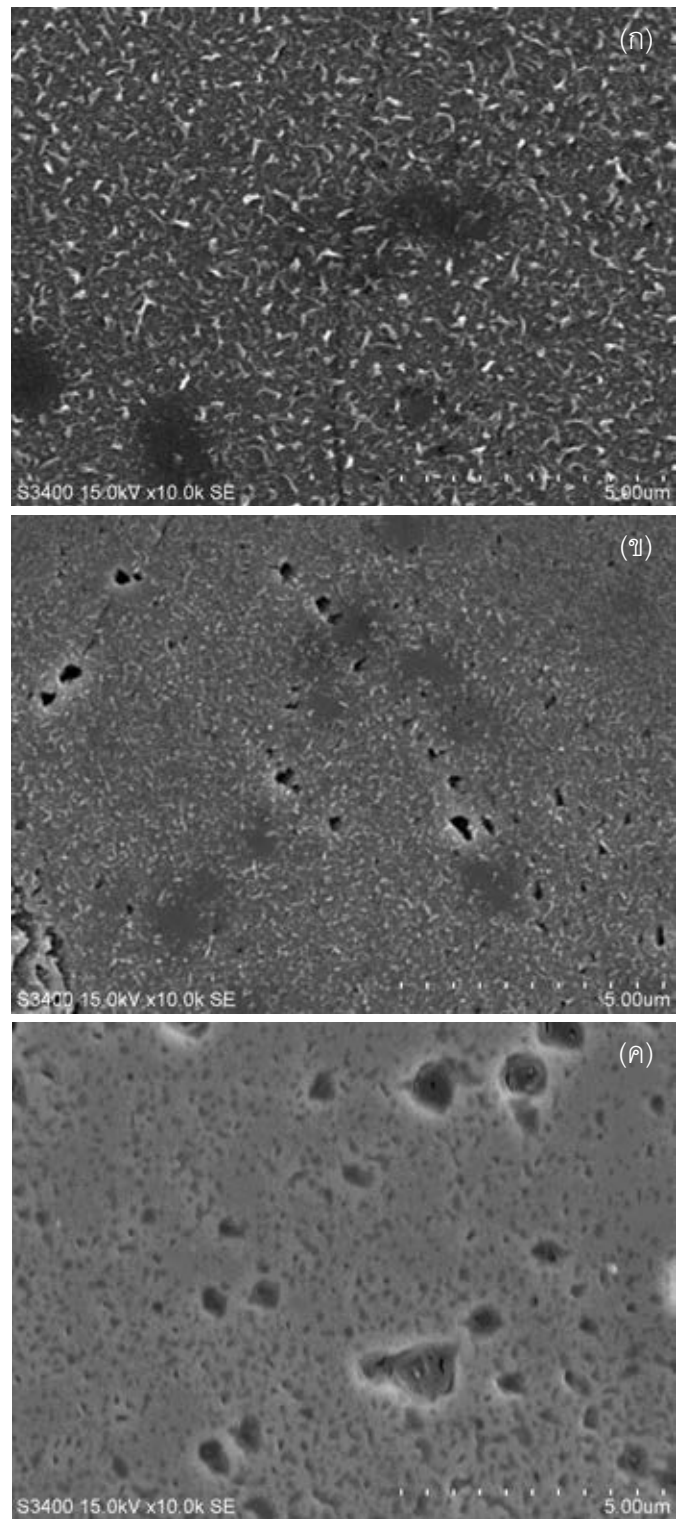
จากภาพที่ 5.21 แสดงพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติก พบว่า ที่สภาวะอุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดงที่ค่อนข้างจะหนาแน่น จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนสูง แสดงดังภาพที่ 5.21(ก) และที่สภาวะอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดงอย่างหนาแน่น จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนสูงที่สุด ดังภาพที่ 5.21(ข) และที่สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวเข้าเกาะบนพื้นผิวของทองแดงได้น้อย และมีบริเวณบางจุดที่สารเคลือบผิวไม่สามารถเกาะตัวบนพื้นผิวของทองแดงได้ จึงมีปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนต่ำที่สุด แสดงดังภาพที่ 5.21(ค)



ภาพที่ 5.19 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M และที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (ก) -15 °C (ข) 40 °C และ (ค) 50 °C



ภาพที่ 5.20 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M และที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (ก) $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ข) $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ (ค) $50\text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 5.21 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M และที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (ก) -15 °C (ข) 0 °C และ (ค) 50 °C

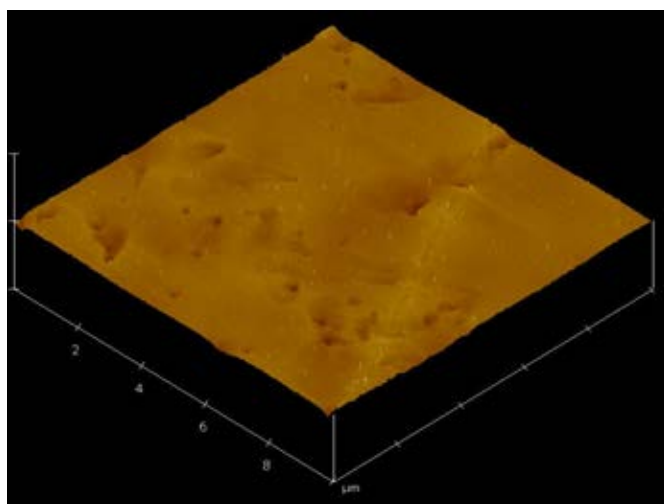
จากตารางที่ 5.4 แสดงอิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในเคลือบผิว ที่มีผลต่อสัดส่วนของคาร์บอนต่อทองแดง หรือปริมาณการเกาะตัวของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต (OTT, 2-EHT และ 2-PET) บนพื้นผิวทองแดง ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (EDX) พบว่า การเคลือบผิวทองแดงด้วยสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตนั้น สารเคลือบผิวจะสามารถเกาะตัวบนพื้นผิวทองแดงได้มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอน ซึ่งโมเลกุลของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตประกอบไปด้วย ธาตุคาร์บอน ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีหลัก ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ทำให้ทราบว่า การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT และ 2-EHT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ตามลำดับ ที่สภาวะอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีซัลไฟด์ จะสามารถเข้าเกาะกับพื้นผิวของทองแดงได้ดีและเป็นระเบียบที่สุด แสดงดังปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนคือ 6.29, 52.60 และ 14.96 ตามลำดับ ส่งผลให้พื้นผิวของทองแดงมีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีซัลไฟด์ได้ดีที่สุด โดยผลที่ได้มีความสัมพันธ์กับสมบัติความไม่ชอบน้ำหรือค่ามุมสัมผัสในหัวข้อ 5.2.1 นั้นเอง

ตารางที่ 5.4 อิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว ที่ส่งผลต่อสัดส่วนของคาร์บอนต่อทองแดง หรือปริมาณการเกาะตัวของสารเคลือบผิวบนพื้นผิวทองแดง

ชนิดของสารเคลือบผิว	อุณหภูมิ	ร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอน	ร้อยละโดยอะตอมของทองแดง
แผ่นทองแดง	-	-	99.90
OTT @ 0.01 M	-15 °C	5.86	94.14
	40 °C	6.29	93.71
	50 °C	5.69	94.31
2-EHT @ 0.01 M	-15 °C	11.42	88.58
	40 °C	52.60	47.40
	50 °C	33.92	66.08
2-PET @ 0.01 M	-15 °C	11.49	88.51
	0 °C	14.96	85.04
	50 °C	3.36	96.64

5.2.3 ลักษณะและความขรุขระของชั้นเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่เกาะตัวบนพื้นผิวทองแดง

การวิเคราะห์ลักษณะและความขรุขระของชั้นเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตที่เกาะตัวบนพื้นผิวทองแดง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต (OTT, 2-EHT และ 2-PET ตามลำดับ) ที่ส่งผลต่อสัญญาณและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต ซึ่งแสดงออกมาในรูปแบบภาพสามมิติ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 5.22-5.25 และสามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าความขรุขระ (roughness) ของพื้นผิวทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.5

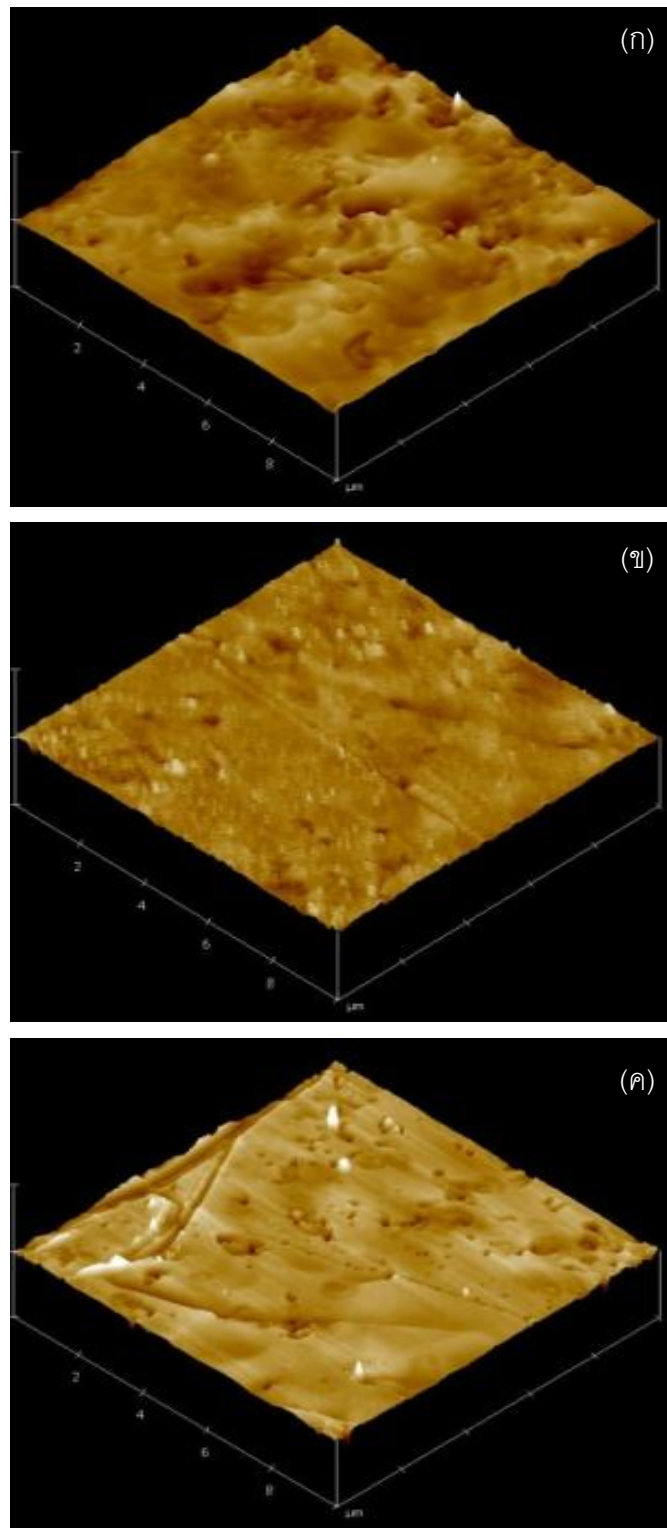


ภาพที่ 5.22 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ไม่ได้เคลือบผิว

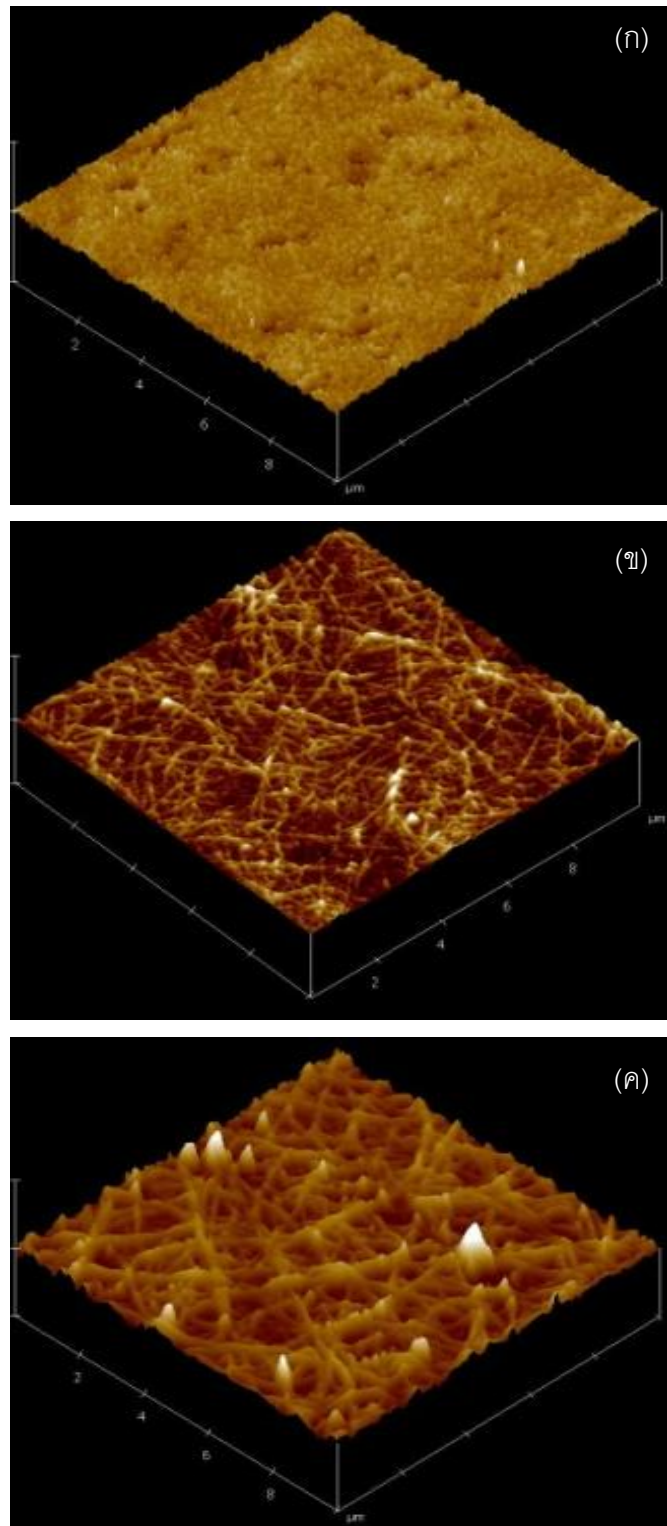
จากภาพที่ 5.22 แสดงลักษณะของพื้นผิวทองแดงที่ไม่ได้เคลือบผิว ซึ่งมีค่าความขรุขระเท่ากับ 5.075 และจากภาพที่ 5.23 แสดงพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่เป็นโซ่ตรง พบว่า ที่สภาวะอุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวเข้าเกาะบนพื้นผิวของทองแดง แต่มีบริเวณบางจุดที่สารเคลือบผิวไม่สามารถเกาะตัวบนพื้นผิวของทองแดงได้และรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จึงมีความขรุขระสูงที่สุดแสดงดังภาพที่ 5.23(ก) และที่สภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และเกาะตัวอย่างหนาแน่นทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดง จึงมีความขรุขระต่ำที่สุด ดังภาพที่ 5.23(ข) และที่สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวเข้าเกาะบนพื้นผิวของทองแดง แต่มีบริเวณบางจุดที่สารเคลือบผิวไม่สามารถเกาะตัวบนพื้นผิวของทองแดงได้และรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จึงมีความขรุขระสูง แสดงดังภาพที่ 5.23(ค)

จากภาพที่ 5.24 แสดงพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่เป็นโซ่กิ่ง พบว่า ที่สภาวะอุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวเข้าเกาะบนพื้นผิวของทองแดงได้น้อย เห็นได้จากลักษณะที่ไม่เป็นโครงข่าย จึงมีความขรุขระต่ำที่สุด แสดงดังภาพที่ 5.24(ก) และที่สภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ในลักษณะที่เป็นโครงข่ายอย่างหนาแน่นทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดง จึงมีความขรุขระต่ำ ดังภาพที่ 5.24(ข) และที่สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ในลักษณะที่เป็นโครงข่ายค่อนข้างจะหนาแน่นทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดง จึงมีความขรุขระสูง แสดงดังภาพที่ 5.24(ค)

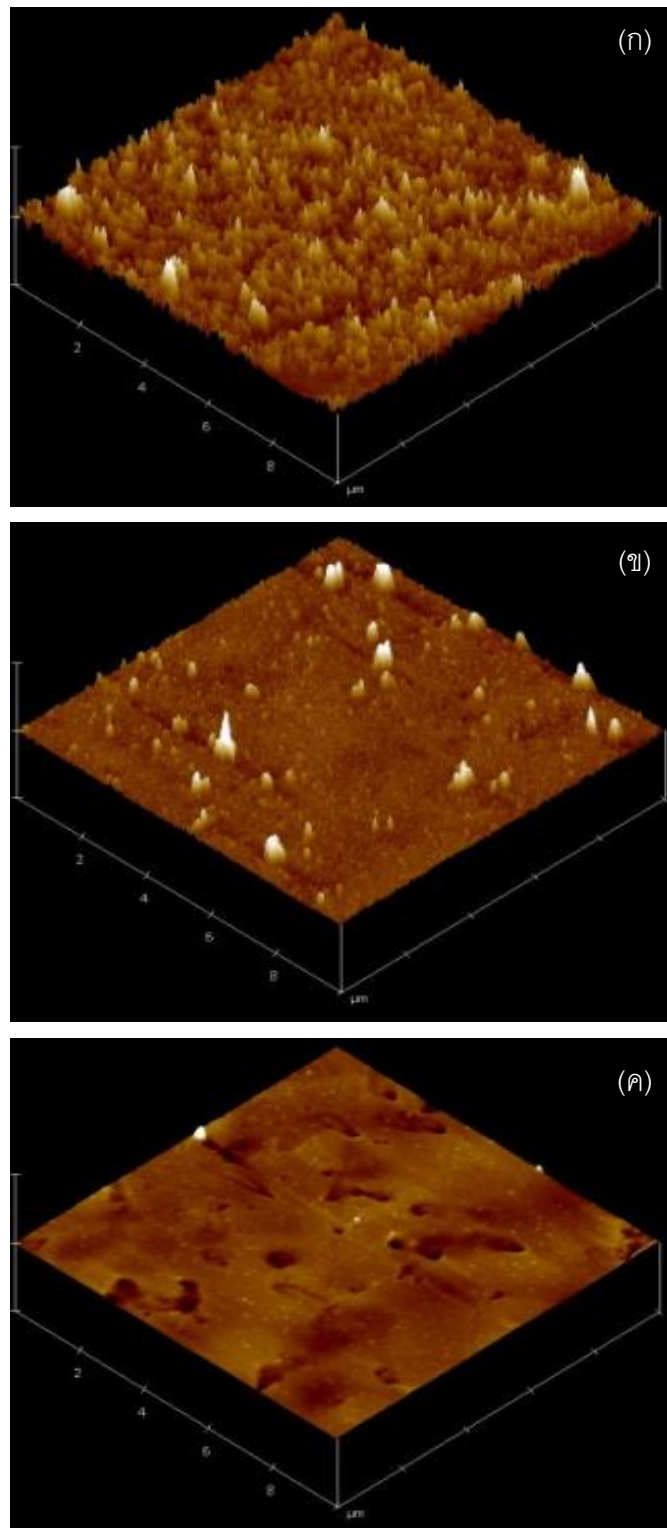
จากภาพที่ 5.25 แสดงพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติก พบว่า ที่สภาวะอุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดงที่ค่อนข้างจะหนาแน่น จึงมีความขรุขระสูง แสดงดังภาพที่ 5.25(ก) และที่สภาวะอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบทั่วบริเวณพื้นผิวของทองแดงอย่างหนาแน่น จึงมีความขรุขระต่ำ ดังภาพที่ 5.25(ข) และที่สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวมีการกระจายตัวเข้าเกาะบนพื้นผิวของทองแดงได้น้อย และมีบริเวณบางจุดที่สารเคลือบผิวไม่สามารถเกาะตัวบนพื้นผิวของทองแดงได้ จึงมีความขรุขระต่ำที่สุด แสดงดังภาพที่ 5.25(ค)



ภาพที่ 5.23 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M และที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (ก) $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ข) $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ (ค) $50\text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 5.24 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M และที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (ก) $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ข) $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ (ค) $50\text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 5.25 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะความเข้มข้น 0.01 M และที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (ก) $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ข) $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ (ค) $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

จากตารางที่ 5.5 แสดงอิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว ที่มีผลต่อค่าความขรุขระ (roughness) ของพื้นผิวทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต (OTT, 2-EHT และ 2-PET) ผลการวิเคราะห์ พบว่า การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT และ 2-EHT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีขี้ จะสามารถเข้าเกาะกับพื้นผิวของทองแดงได้ดีและเป็นระเบียบที่สุด เนื่องจากที่สภาวะอุณหภูมิดังกล่าว ทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างพอเหมาะ ส่งผลให้สารเคลือบผิวสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับพื้นผิวทองแดงได้ดี และมีเวลาในการจัดเรียงตัว เมื่อสารเคลือบมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้ทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวมีค่าความขรุขระต่ำที่สุด คือ 3.904, 46.505 และ 14.354 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อพื้นผิวทองแดงมีความขรุขระต่ำ เมื่อทดสอบสมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ จะพบว่าหยดน้ำมีลักษณะที่เป็นแบบ drop wise หรือแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ หรือมีค่ามุมสัมผัสสูงที่สุด คือ 124.79° , 130.66° และ 120.58° ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า พื้นผิวที่มีความขรุขระต่ำ จะทำให้พื้นผิวมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูง [20] อีกทั้งยังพบว่า การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติก ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำเหมาะสมมากกว่าอุณหภูมิสูง รายละเอียดอธิบายดังหัวข้อที่ 5.2.1

และจากการวิเคราะห์ผลการทดลอง ทำให้ทราบอีกด้วยว่า การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่สภาวะอุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวจะสามารถเข้าเกาะกับพื้นผิวของทองแดงได้น้อยที่สุด เนื่องจากที่สภาวะอุณหภูมิดังกล่าว ทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ สารเคลือบผิวจึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับพื้นผิวทองแดงได้น้อย และการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวจะสามารถเข้าเกาะกับพื้นผิวของทองแดงน้อยที่สุดเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากที่สภาวะอุณหภูมิดังกล่าว ทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วเกินไป โครงสร้างโมเลกุลของสารเคลือบผิว 2-PET จึงมีเวลาไม่เพียงพอในการจัดเรียงตัว โมเลกุลเหล่านี้จะขัดขวางไม่ให้โมเลกุลอื่นๆ เข้าเกาะได้อีก สารเคลือบผิวจึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับพื้นผิวทองแดงได้น้อยเช่นเดียวกัน ทำให้ทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวมีค่าความขรุขระต่ำ คือ 25.413 และ 6.707 นาโนเมตร ตามลำดับ แต่เนื่องจากสารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีขี้ สามารถเข้าเกาะกับพื้นผิวทองแดงได้น้อย พื้นผิวของทองแดงจึงมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำต่ำ หรือมีค่ามุมสัมผัสต่ำที่สุดนั่นเอง

ตารางที่ 5.5 อิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว ที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระ (roughness) ของพื้นผิวทองแดงหลังการเคลือบผิว

ชนิดของสารเคลือบผิว	อุณหภูมิ	ค่ามุมสัมผัส (°)	ค่าความขรุขระ (นาโนเมตร)
แผ่นทองแดง	-	31.12	5.075
OTT @ 0.01 M	-15 °C	112.48	7.237
	40 °C	124.79	3.904
	50 °C	114.80	7.017
2-EHT @ 0.01 M	-15 °C	108.47	25.413
	40 °C	130.66	46.505
	50 °C	128.56	62.867
2-PET @ 0.01 M	-15 °C	114.13	20.046
	0 °C	120.58	14.354
	50 °C	100.38	6.707

5.2.4 ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน

ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องทดสอบทางไฟฟ้าเคมี (potentiostats) เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลต (OTT, 2-EHT และ 2-PET ตามลำดับ) ที่ส่งผลต่อการดูดซับสารเคลือบผิวบนพื้นผิวทองแดง ผลการวิเคราะห์พบว่าการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT และ 2-EHT ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ตามลำดับ ที่สภาวะอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส นั้น พื้นผิวทองแดงสามารถดูดซับสารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีขี้ผึ้งได้ดีและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบที่สุด ส่งผลให้พื้นผิวของทองแดงมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงสุดหรือมีค่ามุมสัมผัสสูงสุดที่สื่อนั้นเอง และเนื่องจากพื้นผิวของทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลตมีคุณลักษณะที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้ทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวมีค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนสูง คือ 96.24%, 99.37% และ 98.90% ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 5.6

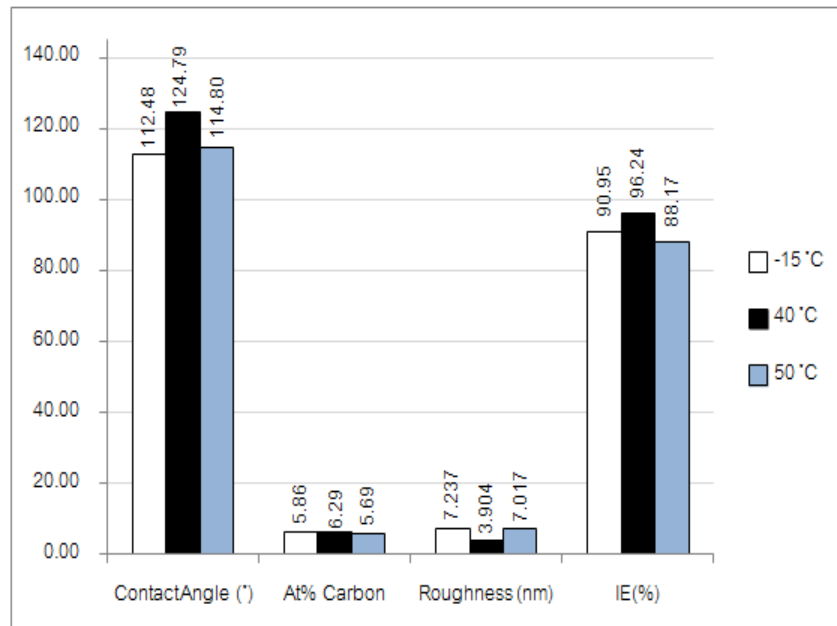
ตารางที่ 5.6 อิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว ที่ส่งผลต่อสมบัติด้านความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารกลุ่มทีโอเลต

ชนิดของสารเคลือบผิว	อุณหภูมิ	E_{corr} (V) vs. Ag/AgCl	I_{corr} (A/cm ²)	ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน (%)
แผ่นทองแดง	-	-0.259	4.21E-05	-
OTT @ 0.01 M	-15 °C	-0.232	3.81E-06	90.95
	40 °C	-0.245	1.58E-06	96.24
	50 °C	-0.247	4.98E-06	88.17
2-EHT @ 0.01 M	-15 °C	-0.252	5.03E-06	88.05
	40 °C	-0.231	2.65E-07	99.37
	50 °C	-0.233	8.91E-07	97.88
2-PET @ 0.01 M	-15 °C	-0.280	1.16E-06	97.25
	0 °C	-0.253	4.64E-07	98.90
	50 °C	-0.248	5.52E-06	86.88

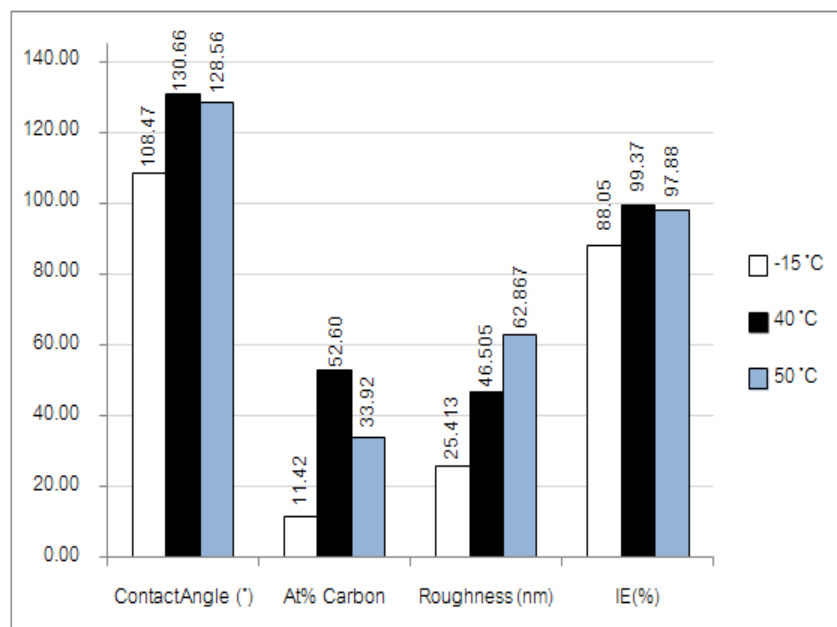
5.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามุมสัมผัส, สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง, ความขรุขระของชั้นเคลือบ และประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน ของทองแดงหลังการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบกลุ่มทีโอเลต ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

จากภาพที่ 5.26-5.28 แสดงให้เห็นว่า การเคลือบผิวทองแดงด้วยสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตแต่ละชนิด จะมีความเหมาะสมที่สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เนื่องจาก สภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว จะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา และการเคลือบที่ไม่เลกุล ซึ่งสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิวที่เหมาะสมกับการเข้าเกาะของโมเลกุลของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตกับพื้นผิวทองแดง ขึ้นอยู่กับลักษณะทางโครงสร้างโมเลกุลของสารเคลือบ โดยพบว่า สภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT และ 2-EHT ที่มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นโซ่ตรงและโซ่กิ่งตามลำดับ ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET ที่มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติก ที่สภาวะอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ทำให้สารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีขี้ สามารถเข้าเกาะกับพื้นผิวทองแดงได้มากที่สุด เห็นได้จากปริมาณสัดส่วนของคาร์บอนโดยอะตอม และเมื่อมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างพอเหมาะ สารเคลือบผิวที่เข้าเกาะกับพื้นผิวทองแดง จึงมีเวลาเพียงพอในการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบที่สุด ทำให้พื้นผิวของทองแดงมีความขรุขระต่ำนั่นเอง เมื่อนำไปทดสอบสมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ โดยการวัดมุมสัมผัส หยดน้ำจะมีลักษณะเป็นแบบ drop wise หรือมีค่ามุมสัมผัสสูงนั่นเอง ทองแดงจึงมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูง ทำให้ทองแดงมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนดีที่สุด

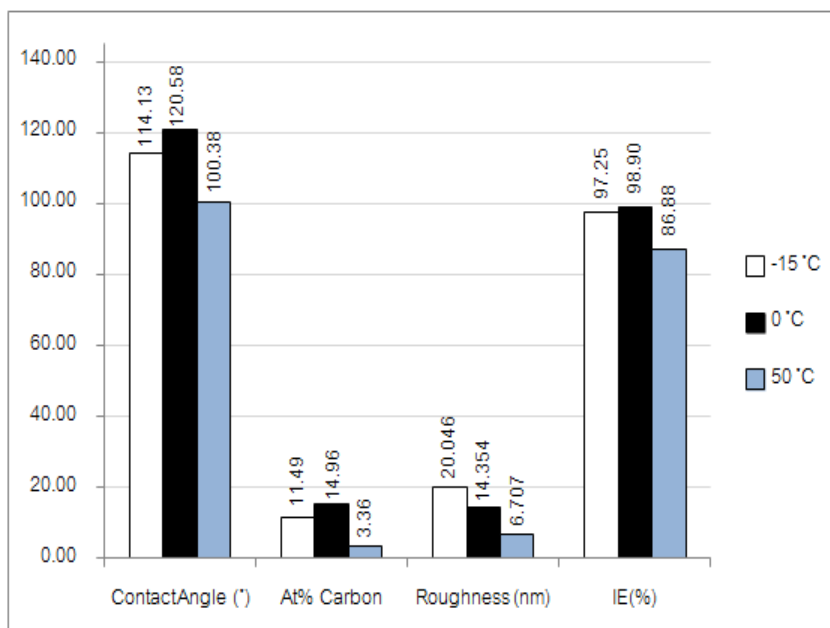
และพบว่า ในการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นโซ่ตรงและโซ่กิ่ง สภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วงอุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ และการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติก ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำมากกว่าอุณหภูมิสูง เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติก จัดเรียงตัวยากกว่าโครงสร้างที่เป็น โซ่ตรงและโซ่กิ่ง จึงต้องควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้ช้าลง เพื่อให้โครงสร้างมีเวลาพอในการจัดเรียงตัว เพราะหากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วเกินไป ทำให้โครงสร้างเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ โมเลกุลเหล่านี้จะขัดขวางโมเลกุลอื่นๆไม่ให้เข้าเกาะได้อีก สารเคลือบผิวจึงเกาะตัวได้น้อยนั่นเอง



ภาพที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามุมสัมผัส/สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง/ค่าความขรุขระของพื้นผิว/ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน ของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสาร OTT ที่มีสภาวะความเข้มข้น 0.01 M เพื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว



ภาพที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามุมสัมผัส/สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง/ค่าความขรุขระของพื้นผิว/ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน ของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสาร 2-EHT ที่มีสภาวะความเข้มข้น 0.01 M เพื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว



ภาพที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามุมสัมผัส/สัดส่วนของคาร์บอนบนพื้นผิวทองแดง/ค่าความขรุขระของพื้นผิว/ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน ของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสาร 2-PET ที่มีสภาวะความเข้มข้น 0.01 M เพื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิว

จากผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองในหัวข้อ 5.1 และ 5.2 สำหรับการเคลือบผิวทองแดงด้วยสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลดทั้ง 3 ชนิด ที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด พบว่า การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-EHT ที่มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นโซ่กิ่ง พบปริมาณร้อยละโดยอะตอมของคาร์บอนสูงกว่าการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET และ OTT ที่มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติกและโซ่ตรง ตามลำดับ เนื่องจากสารเคลือบผิว 2-EHT มีลักษณะโมเลกุลที่เป็นกิ่งก้านสาขา จึงส่งผลให้เกิดการยึดเกาะกันด้วยโมเลกุลของสารเคลือบผิวเองด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (อธิบายในหัวข้อ 3.4) ซึ่งการยึดเกาะกันของโมเลกุลที่มีกิ่งก้านสาขา จะมีลักษณะที่เป็นโครงข่าย เห็นได้จากภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ภาพที่ 5.20(ข)) และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (ภาพที่ 5.24(ข)) ส่งผลให้มีค่าความขรุขระที่สูงกว่าการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2-PET และ OTT ตามลำดับ และเมื่อสารเคลือบผิว 2-EHT ที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีขั้ว สามารถเกาะตัวบนพื้นผิวของทองแดงได้ดีและอีกทั้งโมเลกุลของสารเคลือบยังสามารถยึดเกาะกันเองด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ จึงทำให้ทองแดงหลังการเคลือบผิวมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงที่สุด และส่งผลให้ทองแดงมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนที่สูงที่สุดนั่นเอง

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

ทองแดงเป็นโลหะที่นิยมใช้เป็นอย่างมากในอุตสาหกรรม เนื่องจากทองแดงมีคุณสมบัติในการนำความร้อนและนำไฟฟ้าที่ดี อย่างไรก็ตาม ทองแดงเป็นโลหะที่ง่ายต่อการถูกกัดกร่อน ซึ่งวิธีการเคลือบผิวแบบเรียงตัวชั้นเดียวของโมเลกุลสารอินทรีย์บนพื้นผิวทองแดง เป็นวิธีหนึ่งในการป้องกันการกัดกร่อน หรือการป้องกันการเกิดออกไซด์ของพื้นผิวโลหะทองแดง

การเคลือบผิวทองแดงแบบเรียงตัวชั้นเดียวด้วยโมเลกุลของสารอินทรีย์เพื่อป้องกันการกัดกร่อนนั้น ส่วนมากจะทำการเคลือบผิวภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งสภาวะในการเคลือบผิวนั้น ส่งผลต่อคุณภาพของชั้นเคลือบหรือการยึดเกาะของโมเลกุลของสารเคลือบผิวที่ได้ และมีผลต่อประสิทธิภาพของการป้องกันการกัดกร่อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิวและสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิว และยังศึกษาสารเคลือบผิวที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่แตกต่างกัน แต่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมในโครงสร้างเท่ากัน คือ สารเคลือบออกเทนทีออล (OTT) มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นโซ่ตรง, สารเคลือบอีทิลเฮกเซนทีออล (2-EHT) มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นโซ่กิ่ง และฟีนิลอีเทนทีออล (2-PET) มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติก และจากผลการศึกษา สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิวของสารเคลือบ OTT และ 2-EHT ที่มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นโซ่ตรงและโซ่กิ่ง ตามลำดับ ที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด
2. สภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิวของสารเคลือบ 2-PET ที่มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติก ที่ 0 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด
3. สภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบผิวกลุ่มทีโอเลตทั้งสามชนิดที่เหมาะสมที่สุด คือ 0.01 โมลต่อลิตร

โดยการเคลือบผิวทองแดงแบบเรียงตัวชั้นเดียวของสารกลุ่มทีโอเลตที่สภาวะข้างต้นนั้น จะส่งผลให้สารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกาะติดของสารมีขี้ สามารถเข้าเกาะกับพื้นผิวทองแดงได้ดีและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้พื้นผิวของทองแดงที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ OTT, 2-EHT และ 2-PET ตามลำดับ นั้นมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงที่สุด ซึ่งมีมุมสัมผัส 124.79° , 130.66° และ 120.58° ตามลำดับ และทำให้มีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนสูงที่สุด เท่ากับ 96.24%, 99.37% และ 98.90% ตามลำดับ

และจากการวิเคราะห์ผล ทำให้ทราบว่า

1. สภาวะของสารเคลือบผิวที่มีความเข้มข้นน้อยจนเกินไป ส่งผลให้สารเคลือบเกาะตัวได้น้อย เพราะมีโมเลกุลของสารเคลือบน้อยเกินไป

2. สภาวะของสารเคลือบผิวที่มีความเข้มข้นสูงจนเกินไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว โครงสร้างโมเลกุลของสารเคลือบจึงไม่มีเวลาพอในการจัดเรียงตัว ทำให้โครงสร้างของสารเคลือบเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะขัดขวางไม่ให้โมเลกุลอื่นๆ เข้าเกาะได้อีก สารเคลือบผิวจึงเกาะตัวได้น้อย

ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณ (ความเข้มข้น) ของสารเคลือบจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสภาวะความเข้มข้นของสารเคลือบที่เหมาะสม ส่งผลให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างพอเหมาะ ทำให้สารเคลือบผิวสามารถเข้าเกาะกับพื้นผิวทองแดงได้ดีและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ

3. สภาวะอุณหภูมิของการเคลือบผิว จะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและการเคลื่อนที่ของโมเลกุลอีกด้วย

4. การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติก ควรเคลือบผิวภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ เพื่อให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้า เนื่องจากมีลักษณะทางโครงสร้างที่ต้องการเวลาในการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากกว่าสารเคลือบผิวที่มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นโซ่ตรงและโซ่กิ่ง

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากช่วงอุณหภูมิในการเคลือบผิวของสารเคลือบ 2-PET ที่เหมาะสม อยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่ต่ำ ดังนั้นถ้าสนใจศึกษาเพื่อให้เกิดความชัดเจนมากขึ้น ควรศึกษาสภาวะอุณหภูมิในการเคลือบผิวทองแดงที่ 10 องศาเซลเซียส เพิ่มเติม

2. เคลือบผิวทองแดงโดยใช้สารเคลือบผิวที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่เหมือนกัน แต่มีความยาวของสายโซ่ที่แตกต่างกัน ที่สภาวะการเคลือบผิวที่ดีที่สุดของสารเคลือบในแต่ละโครงสร้างที่ได้จากงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาผลของความยาวของสายโซ่

รายการอ้างอิง

- [1] Wang, P., Liang, C., Wu, B., Huang, N., and Li, J. Protection of Copper Corrosion by Modification of Dodecanethiol Self-Assembled Monolayers Prepared in Aqueous Micellar Solution. Electrochimica Acta 55(2009): 878-883.
- [2] Ma, H. Y., Yang, C., Yin, B. S., Li, G. Y., Chen, S. H., and Luo, J. L. Electrochemical Characterization of Copper Surface Modified by n-Alkanethiols in Chloride-Containing Solutions. Applied Surface Science 218(2003): 144-154.
- [3] Wuttichai Suthipongkiat. Optimum Condition of Copper Surface Treatment for Octadecanethiol Self-Assembled Monolayer Coating for Corrosion Protection. Master's Thesis, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2011.
- [4] Sung, M. M., and Kim, Y. Self-Assembled Monolayers of Alkanethiols on Clean Copper Surfaces. Bulletin of the Korean Chemical Society 22(2001): 748-752.
- [5] Pacharaporn Kongsumrit. Thermal Stability of Thiolate Self-Assembled Monolayer on Copper Surface. Master's Thesis, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2012.
- [6] Quan, Z., Chen, S., and Li, S. Protection of Copper Corrosion by Modification of Self-Assembled Films of Schiff Bases with Alkanethiol. Corrosion Science 43(2011): 1071-1080.
- [7] Jennings, G. K., and Laibinis, P. E. Self-Assembled Monolayers of Alkanethiols on Copper Provide Corrosion Resistance in Aqueous Environments. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 116(1996): 105-114.
- [8] Rao, B. V. A., Iqbal, M. Y., and Sreedhar B. Electrochemical and Surface Analytical Studies of the Self-Assembled Monolayer of 5-Methoxy-2-(Octadecylthio)Benzimidazole in Corrosion Protection of Copper. Electrochimica Acta 55(2010): 620-631.

- [9] Koo, J. R., Pyo, S. W., Kim, J. H., Lee, H. K., and Kim, Y. K. Self Assembled Monolayer for Molecular Electronics. Japanese Journal of Applied Physics 44(2005): 566-569.
- [10] Wikipedia, the free encyclopedia. Corrosion [Online]. 2011. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Corrosion> [2013, February 12]
- [11] Faculty of Science, Rajamangala University of Technology. Metallurgical Physics [Online]. 2011. Available from: <http://www.rmutphysics.com/metal/metal.html> [2013, February 12]
- [12] Namurata Sathirachinda. Electropolishing [Online]. 2010 Available from: <http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2010/12/electropolishing.html> [2013, February 12]
- [13] Wikipedia, the free encyclopedia. Self-assembled monolayer [Online]. 2011. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Self-assembled_monolayer [2013, February 14]
- [14] Pakorn Thaipituk. Wetting [Online]. 2011 Available from: <http://www.vcharkarn.com/varticle/43544> [2013, February 11]
- [15] College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. Scanning Eletron Microscopy (SEM) [Online]. 2009. Available from: http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php?option=com_content&view=article&id=218:scanning-eletron-microscopysem-&catid=23:2009-06-05-03-28-18&Itemid=24 [2013, March 4]
- [16] College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. Atomic Force Microscope (AFM) [Online]. 2009. Available from: http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php?option=com_content&view=article&id=219:atomic-force-microscope-afm-&catid=23&Itemid=24 [2013, March 4]
- [17] Institute for Innovative Learning. Intergrated Electrochemistry [Online]. 2010. Available from: <http://www.il.mahidol.ac.th/eng/index.php/e-media.html> [2013, March 5]

- [18] Wikipedia, the free encyclopedia. Potentiostat [Online]. 2010. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Potentiostat> [2013, March 5]
- [19] JAMWiki. Cyclic Potentiodynamic Polarization Scans [Online]. 2008. Available from: http://www.argentumsolutions.com/wiki/en/Cyclic_Potentiodynamic_Polarization_Scans [2013, March 5]
- [20] Elais, C. N., Oshida, Y., Lima, J. H. C., and Muller, C. A. Relationship Between Surface Properties (Roughness, Wettability and Morphology) of Titanium and Dental Implant Removal Torque. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials 1(2008): 234-242.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุพัตรา เฮากระโทก เกิดเมื่อวันที่ 2 ธันวาคม พ.ศ. 2530 มีภูมิลำเนาอยู่ในจังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนครบุรี จังหวัดนครราชสีมา จากนั้นได้ เข้าศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต โดยสำเร็จการในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553