

# รายงานฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การเคลือบผิวเหล็กด้วยกระบวนการโซลเจลเพื่อป้องกันการกัดกร่อน (ปีที่ 2)

Sol-gel coatings for corrosion protection of steel (2<sup>nd</sup> year)

โดย

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะผู้วิจัย

ดร.สุพิน แสงสุข

นางสาวกนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ

นางสาวปราวณี รัตนวลิตโรจน์

หัวหน้าโครงการ

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ร่วมวิจัย

ธันวาคม 2557

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการการเคลือบผิวเหล็กด้วยกระบวนการโซลเจลเพื่อป้องกันการกัดกร่อน เป็นโครงการที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาลประจำปีงบประมาณ 2557 ประเภทผลผลิตเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีโครงการวิจัยประยุกต์ ซึ่งเป็นการดำเนินโครงการในปีที่ 2 ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้

## บทคัดย่อ

สารประกอบโซลเจล 2 ชนิด ได้แก่ ไทเทเนียโซลเจลและไฮบริดโซลเจล ถูกเตรียมขึ้นเพื่อใช้เคลือบผิวเหล็ก ไทเทเนียโซลเจลสังเคราะห์ได้จากไทเทเนียมไดออกไซด์ โพรพานไดออล บิสอะเซทิลอะซิโตน (Titanium diisopropoxide bisacetylacetonate, TIAA) และ 1,3 โพรพานไดออล (1,3 propanediol) และไฮบริดโซลเจลเตรียมจากการผสมระหว่างไทเทเนียโซลเจลและพอลิไวนิลบิวทีรัล อัตราเร็วในการจุ่มเคลือบผิวในขั้นตอนการเคลือบผิวและขั้นตอนการทำให้ชิ้นงานตัวอย่างแห้งหลังการเคลือบผิวมีการปรับเปลี่ยน ในการทดลองนี้ใช้สี 2 ชนิด ได้แก่ สีอะคริลิกชนิดสเปรย์และสีน้ำมัน ตัวอย่างชิ้นงานเหล็กหลังการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียโซลเจลและไฮบริดโซลเจลแล้วจะถูกเคลือบผิวด้วยสี การยึดติดระหว่างสีและชิ้นงานเหล็กถูกทดสอบด้วยวิธี Cross-Cut tape test ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการยึดติดระหว่างสีและชิ้นงานเหล็กเพิ่มขึ้นเมื่อชิ้นงานเหล็กมีการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียโซลเจลหรือไฮบริดโซลเจลก่อนการเคลือบผิวด้วยสี โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างที่พ่นด้วยสีอะคริลิก สำหรับการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคอะองเกลีอ ชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียโซลเจลหรือไฮบริดโซลเจลก่อนการพ่นสีอะคริลิก แสดงให้เห็นว่าต้านทานการกัดกร่อนได้สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่เคลือบผิวด้วยโซลเจลหรือไฮบริดโซลเจล สำหรับการป้องกันการกัดกร่อนที่ดีที่สุด คือตัวอย่างเหล็กที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียโซลเจลโดยการจุ่มเคลือบผิวที่อัตราเร็วการจุ่มเคลือบผิวที่ 1600 มิลลิเมตรต่อนาที

## Abstract

Two types of sol-gel i.e. titania sol and hybrid sol-gel were used for coating on iron surface. Titania sols were prepared using Titanium diisopropoxide bisacetylacetonate (TIAA) and 1,3 propanediol, and hybrid sol-gels were prepared by mixing titania sol with polyvinyl butyral. Dip coating speeds in sol-gel coating step and drying temperatures after coating were varied. In this experiment, two different types of paint were used which are acrylic spray paint and oil paint. The iron samples after coating with titania sol and hybrid sol-gel were coated with paints. Adhesion between paint and iron samples was tested by Cross-Cut tape test. The results showed that adhesion between paint and iron samples was increased when the iron samples were coated with titania sol or hybrid sol-gel before painting especially for the samples painted with acrylic paint. In the case of corrosion resistance test using salt spray technique, the iron samples coated with titania sol or hybrid sol-gel before spraying with acrylic paint showed higher corrosion resistance than the samples without sol or hybrid sol-gel coating. For the best corrosion protection, the iron samples were coated with titania sol at dipping speed of  $1600 \text{ mm min}^{-1}$  and dried at  $100^\circ\text{C}$  before painting with acrylic paint.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อภาษาไทย	ii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญรูป	vi
สารบัญตาราง	vii
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ผลที่ได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 การกัดกร่อนของเหล็ก	3
2.2 สารเคลือบผิว (coatings) เพื่อป้องกันการกัดกร่อน	5
2.3 กระบวนการโซลเจล	13
2.4 ชนิดของโซลเจลที่ใช้เป็นสารเคลือบผิว	15
2.5 การประยุกต์ใช้โซลเจลในสีเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อน	17
<b>บทที่ 3 วิธีการทดลอง</b>	<b>19</b>
3.1 วัสดุ-อุปกรณ์ สารเคมีและเครื่องมือ	19
3.2 การสังเคราะห์ไทเทเนียโซล	20
3.3 การเตรียมสารเคลือบผิว	20
3.4 การวัดขนาดอนุภาคของไทเทเนียในโซล	20
3.5 การจุ่มเคลือบผิวเหล็กด้วยสารเคลือบผิว	20
3.6 การวัดค่า contact angle ของผิวเหล็ก	21
3.7 การทดสอบการยึดติดของผิวเคลือบบนผิวเหล็ก	21
3.8 การใช้โปรแกรม Image J	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.9 การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงาน โดยวิธีจำลองสภาวะในเครื่อง Salt spray อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM B117	22
บทที่ 4 ผลการทดลอง	23
4.1 การศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมในโซลที่ระยะเวลาต่างๆ	23
4.2 การวัดค่า contact angle ของชิ้นงานเหล็ก	24
4.3 การยึดติดของสีอะคริลิกชนิดสเปรย์บนชิ้นงานเหล็ก	28
4.4 การยึดติดของสีน้ำมันบนชิ้นงานเหล็ก	31
4.5 ความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบละอองเกลือของชิ้นงานเหล็กเคลือบสี หลังจากผ่านการเคลือบโซลเจล	33
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	36
เอกสารอ้างอิง	37
ภาคผนวก	39

## สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	แผ่นชิ้นงาน Galvalume ที่ผ่านการทาสี Waterborne acrylic lacquer ความหนา 23 $\mu\text{m}$ ภายหลังจากทดสอบ salt spray เป็นเวลา 1200 ชั่วโมง	17
รูปที่ 2.2	แผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการทาสีด้วย Solvent-based medium oil alkyd primer ความหนา 58 $\mu\text{m}$ ภายหลังจากทดสอบ salt spray เป็นเวลา 240 ชั่วโมง และมีผลการทดสอบ Cross-hatch adhesion แสดงที่มุมบนขวา	18
รูปที่ 4.1	การกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมในโซลที่ระยะเวลาต่างๆ โดยการวัดเทคนิค dynamic light scattering	23
รูปที่ 4.2	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไททาเนียมในโซลที่ระยะเวลาต่างๆ	24
รูปที่ 4.3	ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวชิ้นงานเหล็ก (ตัวอย่าง Fe)	25
รูปที่ 4.4	ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโซลและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน (ตัวอย่าง Fe-TiO <sub>2</sub> -rt)	25
รูปที่ 4.5	ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโซลและอบที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Fe-TiO <sub>2</sub> -100)	26
รูปที่ 4.6	ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยสารประกอบไฮบริดโซลเจลและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน (ตัวอย่าง Fe-Hybrid-rt)	27
รูปที่ 4.7	ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยสารประกอบไฮบริดโซลเจลและอบที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ตัวอย่าง Fe-Hybrid-100)	26

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสภาพแวดล้อมของการทำงาน และการเลือกใช้ชนิดของสีและ ขั้นตอนการเคลือบสีสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน	11
ตารางที่ 3.1 แสดงการจัดกลุ่มตามมาตรฐานการทดสอบการยึดติด	22
ตารางที่ 4.1 ค่า contact angle ของชิ้นงานเหล็กตัวอย่าง	27
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการยึดติดสีอะคริลิก ชนิดสเปรย์บนแผ่นเหล็กที่ไม่เคลือบผิว	28
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการยึดติดของสีอะคริลิกชนิดสเปรย์กับแผ่นเหล็กที่เคลือบผิว ด้วยโซลเจล	29
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการยึดติดสีน้ำมันกับแผ่นเหล็กที่ไม่เคลือบผิว	31
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการยึดติดของสีน้ำมันกับแผ่นเหล็กที่เคลือบผิวด้วยโซลเจล	32
ตารางที่ 4.6 ลักษณะชิ้นงานพ่นเคลือบสีอะคริลิกหลังผ่านการเคลือบโซลเจล ก่อนและ หลังการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM B117	34
ตารางที่ 4.7 ลักษณะชิ้นงานเหล็กทาสีน้ำมันหลังผ่านการเคลือบโซลเจล ก่อนและหลัง การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM B117	35



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เหล็กเป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับการใช้งานโครงสร้างต่างๆ มากมาย เช่น โครงสร้างอาคาร ตัวถังรถยนต์ ประตู และรั้ว เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กมีสมบัติที่ดีในเรื่องความแข็งแรง และเหนียวทำให้ปรับแต่งดัดโค้งงอเป็นรูปทรงต่างๆ ให้เหมาะสมแก่การใช้งานได้ อย่างไรก็ตามข้อด้อยของเหล็กที่ทราบกันดีคือ การเกิดสนิม ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของเหล็ก ดังนั้นการป้องกันการกัดกร่อนหรือการเกิดสนิมของเหล็กจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษา เนื่องจากการป้องกันการกัดกร่อนเป็นการยืดอายุการใช้งานของเหล็กให้ยาวนานขึ้น ทำให้ลดการสูญเสียโครงสร้างเหล็ก วิธีการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นการเคลือบผิวด้วยวัสดุอื่นที่ทั้งโลหะ เช่น การชุบเหล็กด้วยสังกะสี หรือ โครเมียม และด้วยการทาผิวเหล็กด้วยสี เช่น สีน้ำมัน ส่วนใหญ่การเคลือบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของโลหะที่มีประสิทธิภาพนั้นมักมีโครเมตเป็นองค์ประกอบสำหรับสารประกอบที่มีเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (hexavalent chromium) นั้น เป็นสารดั้งเดิมที่ช่วยยับยั้งการกัดกร่อนได้ มีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าสารยับยั้งการกัดกร่อนตัวอื่นๆ เนื่องจากสมบัติการออกซิเดชันที่แรงของ  $Cr^{6+}$  เมื่อมีการเคลือบผิวโครเมต สารประกอบพวกเฮกซะวาเลนต์โครเมียม นั้นจะเกิดพันธะอย่างหลวมๆ เกิดเป็นฟิล์มบางและค่อยๆ ถูกปลดปล่อยออกสู่ตัวกลางที่เป็นน้ำ โครเมตไอออนจะทำปฏิกิริยาที่ผิวโลหะเกิดเป็น  $Cr_2O_3 \cdot nH_2O$  แม้ว่าการเคลือบผิวด้วยโครเมียมจะให้ผลด้านการป้องกันการกัดกร่อน แต่การหลุดออกมาทีละน้อยและสมบัติความเป็นออกซิเดชันที่ดีมาก ทำให้โครเมตจัดอยู่ในกลุ่มสารที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การสัมผัสที่ผิว การสูดหายใจเข้าไป และการกลืนกินเข้าไปทำโครเมียมมีโอกาสเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ได้ ซึ่งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นสารที่ทำให้ DNA เกิดความเสียหายได้และยังเป็นเป็นสารก่อมะเร็งด้วย อย่างไรก็ตามความเป็นพิษของโครเมตไม่ได้ขึ้นอยู่กับแค่การเป็นสารก่อมะเร็งเท่านั้น ดังนั้นจึงมีกฎระเบียบด้านสิ่งแวดล้อมที่เคร่งครัดที่จะระงับการใช้สารประกอบที่มี  $Cr^{6+}$  เป็นองค์ประกอบในการใช้เพื่อป้องกันการกัดกร่อน ความจำเป็นในเรื่องการพัฒนาการใช้สารที่เป็นพวกสารประกอบที่ไม่มีโครเมียมจึงเป็นเรื่องที่มีความจำเป็นอย่างเร่งด่วน

นอกจากวิธีการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีวิธีการเคลือบผิวเหล็กอีกวิธีการหนึ่งซึ่งเป็นวิธีการใหม่ที่สามารถนำมาทดแทนการโครเมตได้และมีการวิจัยอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน คือการเคลือบผิวโลหะด้วยโซลเจล ซึ่งหลายงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าโซลเจลช่วยลดการกัดกร่อนของโลหะได้ ในอดีตผู้วิจัยได้เคยทดลองเคลือบผิวโลหะเงินด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โซล ( $TiO_2$  sol) และเซอร์โคเนียมไดออกไซด์โซล ( $ZrO_2$  sol) พบว่าผิวเคลือบทั้งสองชนิดสามารถป้องกัน

การหมองของโลหะเงินได้ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกงานหนึ่งที่มีการนำ  $\text{TiO}_2$  sol มาเคลือบผิวเหล็กชุบสังกะสีที่มีโครเมียมเคลือบผิวอยู่ชั้นบนสุด พบว่า ผิวเคลือบด้วยโซลเจลช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กชุบสังกะสีที่มีโครเมียมได้ ดังนั้นการวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาประสิทธิภาพของโซลเจลในการช่วยยึดติดระหว่างสีและแผ่นเหล็ก และการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็ก

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของโซลเจลในการช่วยการยึดติดระหว่างสีและแผ่นเหล็ก และป้องกันการกัดกร่อนของเหล็ก โดยการเคลือบผิวเหล็กด้วยโซลและการทาสี

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบผิวเหล็กด้วยโซลโดยการปรับเปลี่ยน ชนิดของสารเคลือบผิวประเภทโซล และอุณหภูมิการอบชิ้นงานหลังการเคลือบผิวเหล็กด้วยโซล

## 1.4 ผลที่ได้รับ

วิธีการที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบผิวด้วยโซลก่อนการพ่นหรือทาสี

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การกัดกร่อนของเหล็ก

การกัดกร่อนของเหล็กเป็นการสูญเสียเนื้อวัสดุจากการทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม โดยผลจากปฏิกิริยาจะทำให้เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปกลับคืนสู่สถานะเดิมในรูปสารประกอบ เช่น สารประกอบออกไซด์ ซัลไฟด์ ที่เคยเป็นอยู่ตามธรรมชาติตามหลักเทอร์โมไดนามิกส์

##### 2.1.1 กลไกปฏิกิริยาการกัดกร่อนของเหล็ก

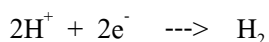
การกัดกร่อนที่พบได้บ่อยเกิดขึ้นเมื่อเหล็กสัมผัสกับสารละลาย เช่น น้ำ น้ำทะเล ใต้น้ำในโรงงานอุตสาหกรรม ความชื้นในอากาศหรือในดิน เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า โดยน้ำซึ่งอาจมีภาวะเป็นกรด ด่าง หรือเป็นกลางที่สัมผัสกับโลหะนั้นทำหน้าที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) เนื่องจากในน้ำจะมีไอออนของธาตุต่างๆ ที่เจือปนอยู่เป็นสื่อไฟฟ้า

การกัดกร่อนเกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก โดยเหล็กจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนส่งถ่ายให้กับตัวรับอิเล็กตรอน เช่น ออกซิเจน hydrogen ion เป็นต้น ทำให้เหล็กเปลี่ยนสถานะไปเป็นไอออนหรือมีเลขออกซิเดชันสูงขึ้น (1)

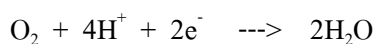


สำหรับปฏิกิริยารีดักชันอาจเกิดขึ้นได้ดังนี้

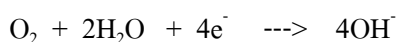
การเกิดก๊าซไฮโดรเจน:



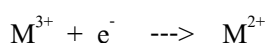
ปฏิกิริยารีดักชันของก๊าซออกซิเจนในภาวะกรด:



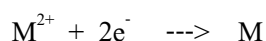
ปฏิกิริยารีดักชันของก๊าซออกซิเจนในภาวะ pH เป็นกลาง :



ปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะไปสู่ไอออนที่มีเลขออกซิเดชันลดลง:



ปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะไปสู่โลหะ:

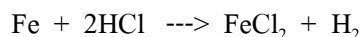


การส่งถ่ายอิเล็กตรอนนี้จะเกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานเหล็ก โดยบริเวณที่มีการให้อิเล็กตรอนจะเรียกว่าแอโนด (anode) ส่วนบริเวณที่เกิดการรับอิเล็กตรอนจะเรียกว่าแคโทด (cathode) ซึ่งความแตกต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างสองบริเวณนี้จะทำให้เกิดวงจรไฟฟ้าขึ้น โดยอิเล็กตรอนจะไหลจากแอโนดไปยังแคโทด ยิ่งโลหะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนมากหรือเกิดการกัดกร่อนมากก็จะมีค่าของกระแสที่ไหลในวงจรมากขึ้นด้วย

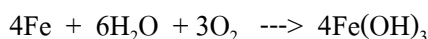
### 2.1.2 ภาวะความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่มีผลต่อปฏิกิริยาการกัดกร่อนและผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนของเหล็ก

ในภาวะสารละลายกรด โมเลกุลของน้ำจะเร่งให้เกิดการกัดกร่อนโดยการให้ hydrogen ions แม้แต่น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงปริมาณ  $\text{CO}_2$  ที่ละลายอยู่ในน้ำนั้นก็สามารถเพิ่มความเข้มข้นของ hydrogen ion ได้เช่นกัน โดย  $\text{CO}_2$  จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็น carbonic acid ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) ซึ่งสามารถเกิดการแตกตัวให้ bicarbonate, carbonate และ hydrogen ion (2)

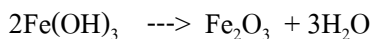
ตัวอย่างการกัดกร่อนของเหล็กที่เกิดขึ้นในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก สามารถเขียนปฏิกิริยาได้ดังสมการข้างล่าง โดยเหล็กจะเกิดการละลายกลายเป็นเฟอร์รัสคลอไรด์ (ferrous chloride) พร้อมกับมีฟองก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น



สำหรับในภาวะสารละลายด่างและเป็นกลางซึ่งพบได้ใน น้ำ น้ำทะเล สารละลายเกลือ สารละลายด่าง การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นด้วยผลจากปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายนั้นเป็นสำคัญ โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังนี้



เหล็กจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์ลักษณะเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดงอยู่ในสารละลาย ส่วนกรณีของการเกิดสนิมเหล็กในบรรยากาศ ferric hydroxide ที่เกิดขึ้นอาจถูกทำให้แห้งหรือสูญเสียโมเลกุลน้ำ (dehydration) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น ferric oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) สีน้ำตาลแดงเช่นกัน



สำหรับในภาวะของน้ำทะเลนั้นจัดว่าเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ดีมาก เนื่องจากมีคลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) อยู่ในปริมาณสูง ซึ่งภาวะที่มีคลอไรด์หรือซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) สูงนั้นจะมีผลไปเร่งให้ผิวหน้าของโลหะเกิดการกัดกร่อนได้เร็วขึ้น อีกทั้งยังทำให้พาสซีเวชัน (passivation) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างฟิล์มปกป้องผิวโลหะเกิดได้ยากขึ้น กรณีนี้รูปแบบความเสียหายที่พบจากการกัดกร่อนมักเป็นแบบรูเข็ม (pitting) (3)

โดยทั่วไป corrosion product ของเหล็กคือ  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  (หรือ  $\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) แต่ผลจากปริมาณออกซิเจนและน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ก็อาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปต่างๆ และมีสีแตกต่างกันไป เช่น

hydrrous ferrous oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) มีสีน้ำตาลแดง, hydrated magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) มีสีเขียวจนถึงสีน้ำเงินเข้ม และ magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ที่มีสีดำ เป็นต้น

## 2.2 สารเคลือบผิว (coatings) เพื่อป้องกันการกัดกร่อน

การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะทำได้โดยการสร้างชั้นวัสดุในลักษณะเป็นผนังกั้น (barrier) เพื่อป้องกันโลหะจากการสัมผัสกับน้ำและบรรยากาศโดยตรง ในขณะเดียวกันก็ทำหน้าที่ในการยับยั้งการส่งถ่ายประจุระหว่างบริเวณ cathode และ anode ด้วยการเพิ่มความต้านทานไฟฟ้า (electrical resistance) หรือ ionic resistance ให้กับชิ้นงาน

สารเคลือบผิวที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้ (4)

- Organic coatings ได้แก่ epoxy, urethanes, alkyds, acrylics, coal tars
- Inorganic coatings ได้แก่ silicates, glass
- Conversion coatings ได้แก่ chromate, phosphating, anodizing
- Metallic coatings ได้แก่ galvanizing, electroplating, electroless plating

สารเคลือบผิวชนิดสารอินทรีย์ (organic coatings) เป็นวัสดุเคลือบผิวที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง สามารถใช้เคลือบเพื่อความสวยงามและเพื่อป้องกันการกัดกร่อน เป็นวัสดุที่หาซื้อได้ง่าย และสามารถเลือกใช้วิธีเคลือบได้หลายวิธีการขึ้นอยู่กับลักษณะชิ้นงาน ชนิดสารเคลือบ และคุณภาพผิวเคลือบที่ต้องการ ซึ่งหากพิจารณาจัดแบ่งประเภทตามองค์ประกอบที่อยู่ภายในสารเคลือบชนิดนี้จะสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. แล็กเกอร์ (lacquer) เป็นสารที่ได้จากการนำสารยึดหรือเรซินมาละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) โดยฟิล์มที่ได้จะเกิดจากการระเหยไปของตัวทำละลาย

2. วานิช (varnish) เป็นสารเคลือบที่ได้จากการนำเรซินมาละลายด้วย drying oil และเจือจางด้วยตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน โดยผิวเคลือบไม่ได้เกิดการระเหยของตัวทำละลายอย่างเดียวน แต่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วย ได้แก่ polymerization, oxidation, curing (5)

3. สี (Paint) เป็นสารเคลือบที่มีองค์ประกอบหลายส่วน ได้แก่ สารยึด (binder) ตัวทำละลาย (solvent) ผงสี (pigment) และสารเติมแต่ง (additive)

### 2.2.1 องค์ประกอบของสีที่ใช้ในการเคลือบผิว

1. สารยึด (Binder) หรือเรซิน (resin) มีบทบาทในการประสานรวมเอาองค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ภายในสีเข้าไว้ด้วยกัน และสามารถเกิดเป็นฟิล์มยึดเกาะกับพื้นผิวชิ้นงานได้ดี ให้สมบัติด้านความมันเงา ความยืดหยุ่น ความเหนียว โดยทั่วไปมักเป็นสารอินทรีย์ประเภทพอลิเมอร์หรือเรซิน ได้แก่ alkyds, acrylics, epoxy, polyurethanes, melamine resins เป็นต้น หรือเป็นสารประเภทน้ำมัน ได้แก่ น้ำมันลินสีด (linseed oil) สแตนดาร์ดออยล์ (stand oil) เป็นต้น

2. ตัวทำละลาย (solvent หรือ diluents) มีบทบาทในการละลายพอลิเมอร์หรือปรับความหนืดของสีเคลือบเพื่อความสะดวกในการใช้งาน โดยทั่วไปเป็นสารอินทรีย์และน้ำ ในกลุ่ม water-borne paints จะมีน้ำเป็น diluent หลัก ส่วนกลุ่ม solvent-borne หรือ oil-based อาจใช้ diluent หลายชนิดในองค์ประกอบ เช่น aliphatic, aromatics, alcohols, ketones, white spirit ในขณะที่สีบางชนิดไม่มี diluent

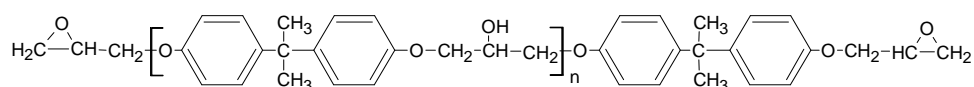
3. ผงสี (pigment) และตัวเติม (filler) ผงสีเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ในรูปผงละเอียดที่ทำหน้าที่ให้สี ให้สมบัติในการปิดบังพื้นผิว รวมถึงให้สมบัติยับยั้งการกัดกร่อน ตัวอย่างเช่น  $\text{TiO}_2$ , zinc oxide, carbon black, red iron oxide, aluminium powder, chrome orange, phthalocyanine blue เป็นต้น ส่วนตัวเติมเป็นอนุภาคของแข็งที่มีบทบาทในการให้ความเหนียว ให้ผิวสัมผัส (ขรุขระ) ลดต้นทุน หรือให้สมบัติอื่นๆ ตัวอย่างเช่น talc, mica, clay

4. สารเติมแต่ง (additives) เป็นสารที่ใช้เติมลงไปเพียงเล็กน้อยแต่ให้ผลในการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของสีเคลือบ สารเหล่านี้ ได้แก่ catalysts, defoamers, dispersing agents, UV absorbers, plasticizers (6)

### 2.2.2 เรซินที่สำคัญในสีและสารเคลือบผิว

เรซินเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสีเคลือบ เพราะเป็นชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่ปกป้องผิววัสดุจากการกัดกร่อน และเป็นวัสดุเนื้อพื้นซึ่งเป็นที่รวมอยู่ขององค์ประกอบอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของสีเคลือบ ได้แก่ ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำและออกซิเจน ความต้านทานการกัดกร่อน ความทนทานต่อแสง UV เป็นต้น เรซินที่สำคัญที่ใช้เป็นส่วนประกอบในสี ได้แก่ (7)

1. Epoxy resins เป็นสารที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เคลือบผิว เนื่องจากมีความทนทานต่อสารเคมีและยึดติดกับพื้นผิวได้ดี การสังเคราะห์ Epoxy resin ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง di หรือ polyhydric phenol เช่น bisphenol-A และ epichlorohydrin ได้แก่ epichlorohydrin



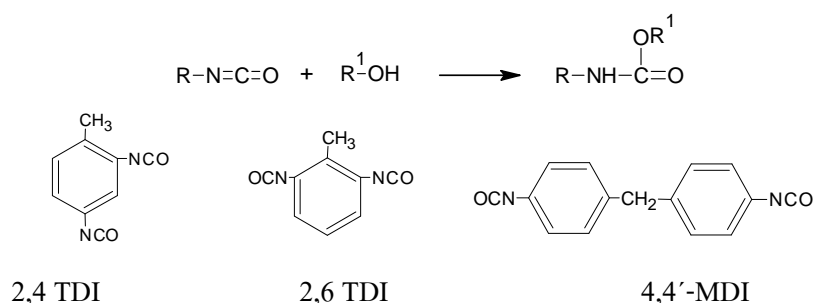
ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของ epoxy resin

การใช้ epoxy resin เพียงลำพังจะไม่สามารถใช้งานได้ดี เพราะยังคงมีน้ำหนักรีดโมเลกุลต่ำ อย่างไรก็ตามสามารถทำให้เกิดโครงข่ายร่างแหได้ด้วยการเติมสารเชื่อม โยง (crosslinkers) ได้แก่ aliphatic amine, aromatic amine, polyamide resin, phenolic resin ฯลฯ ซึ่งในการใช้งานจะจัดอยู่ในประเภท two-package คือมีสาร 2 ส่วนแยกกันอยู่ ก่อนใช้งานต้องนำมาผสมกันแล้วรีบใช้ให้หมดโดยเร็ว

Epoxy resin ชนิดอบ ซึ่งใช้สารบ่ม ได้แก่ phenolic resin, urea resin, melamine resin มีสมบัติทนต่อเคมีภัณฑ์และตัวทำละลายสูง ยึดผิวหน้าได้ดี ไม่เปราะ มีความแข็งและทนต่อการขีดสีได้ดี มักนำไปใช้เคลือบด้านในท่อ อะลูมิเนียม หรือภาชนะบรรจุอาหาร

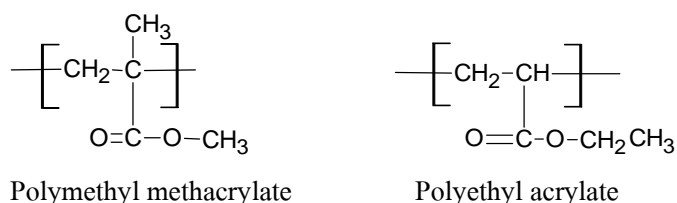
ส่วน Epoxy resin ชนิดแห้งได้เองในอากาศ ซึ่งได้จากการนำ epoxy resin มา esterify ด้วยกรดไขมัน มักนำไปใช้ทำวารันิชเคลือบพื้น และสีรองพื้นสำหรับเหล็ก

2. Polyurethane เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่าง di หรือ polyisocyanate กับ di หรือ polyhydric alcohol โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีหมู่  $-NHCOO-$  อยู่ในโครงสร้าง ทั้งนี้สารตั้งต้นที่สำคัญ ได้แก่ toluene 2,4-diisocyanate (2,4 TDI) toluene 2,6-diisocyanate (2,6 TDI) และ 4-4'-methylene diphenyl diisocyanate (4,4'-MDI)



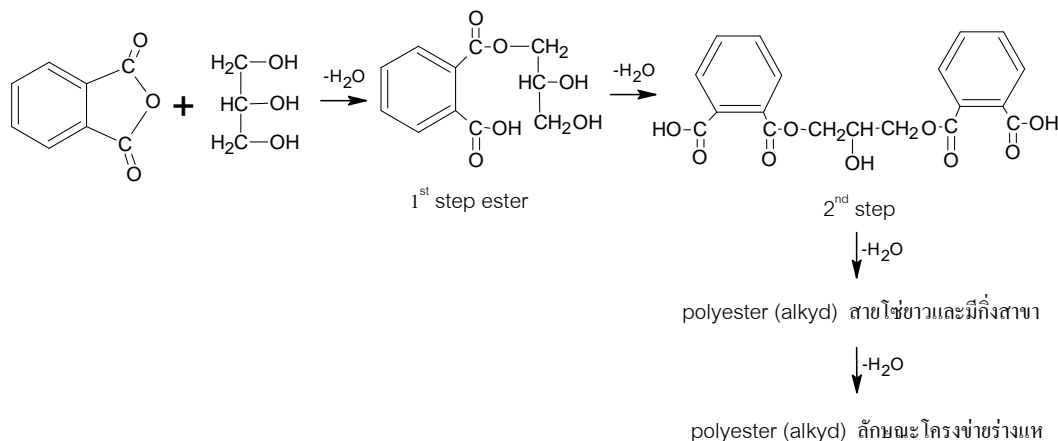
ชั้นเคลือบของ polyurethane มีสมบัติทนต่อกรด ต่าง น้ำ ตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น aromatic solvent, chlorinated hydrocarbon และทนต่อน้ำมัน (แต่ความคงทนต่อด่างจะด้อยกว่า epoxy resin ที่ผ่านการอบหรือบ่มเย็นแล้ว) polyurethane ที่บ่มแล้วจะมีความทนทานต่อการขีดสี ยึดผิวหน้าได้ดี มีความเหนียวสูง และทนทานต่อสภาพลมฟ้าอากาศได้ดี

3. Acrylic resins สามารถเตรียมได้ทั้งประเภทเทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซต และ อิมัลชัน โดยเป็นพอลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากรดอะคริลิก และอนุพันธ์ รวมทั้งเอสเทอร์ของกรดเหล่านี้ ได้แก่ polymethyl methacrylate และ polyethyl acrylate และเนื่องจากในโมเลกุลไม่มี tertiary hydrogen ที่เกาะอยู่บนแกนสายโซ่พอลิเมอร์ จึงมีสมบัติที่เสถียรต่อออกซิเจนและแสง UV (8)



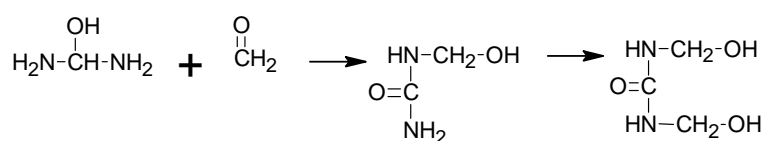
ฟิล์ม acrylic resins มีความเงาและยึดผิวหน้าได้ดี กรณีชนิดสารละลายจะนำไปใช้ทำ แลกเกอร์เคลือบวัสดุต่างๆ เช่น ไม้ โลหะ ผนัง เซรามิก พลาสติก ส่วนชนิดอิมัลชัน มักใช้ทำสีทาบ้าน ทั้งภายในและภายนอก

4. Alkyd resins เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง polyhydric alcohol ได้แก่ glycerol กับกรดประเภท di หรือ polybasic ได้แก่ phthalic anhydride (5)



alkyd resin ที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะยังคงมีความเปราะ และไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการใช้เป็นสีเคลือบ ดังนั้นจึงมักเติมกรด monobasic สายโซ่ยาวเข้าไปในโมเลกุลของ alkyd resin เรียกว่า oil-modified alkyd resin โดยถ้าเป็น long-oil alkyds มักใช้สำหรับงานภายนอก เช่น สีน้ำมันทาบ้าน medium-oil alkyds เหมาะสำหรับการใช้เคลือบเครื่องมือเครื่องใช้ในบ้าน ส่วน short-oil alkyds ถ้าใช้ตัวทำละลายชนิดน้ำมันไม่แห้ง จะใช้ผสมกับไนโตรเซลลูโลสเพื่อทำแล็กเกอร์

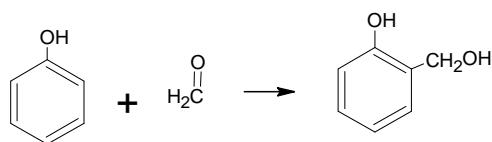
5. Urea resins เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างยูเรียและอัลดีไฮด์ ซึ่งได้แก่ formaldehyde โดยการทำให้ปฏิกิริยาในภาวะที่เป็นกลางหรือด่างเล็กน้อยจะเกิดเป็น monomethylol urea และ dimethylol urea ตามลำดับ จากนั้น dimethylol urea จะทำปฏิกิริยากันเองได้เป็นสาร โมเลกุลใหญ่ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเมทิลีนและพันธะอีเทอร์



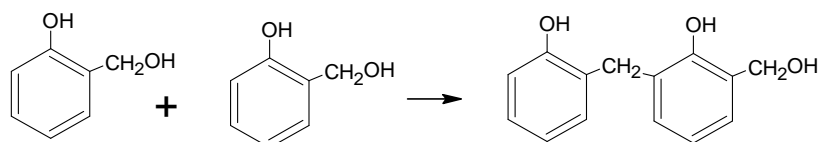
Urea resin ชนิดอบที่ใช้ผสมร่วมกับ alkyd resin เป็นผิวเคลือบที่มีสมบัติยึดผิวหน้าได้ดี มักนำไปใช้ในการเคลือบตู้เย็น รถยนต์ เครื่องมือ เครื่องใช้ในบ้าน

6. Phenolic resin เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่าง phenol หรือ substituted phenol กับ aldehyde หรือสารที่จะเกิดเป็น aldehyde ได้ ซึ่งโดยทั่วไปมักได้จากปฏิกิริยาระหว่าง phenol กับ formaldehyde

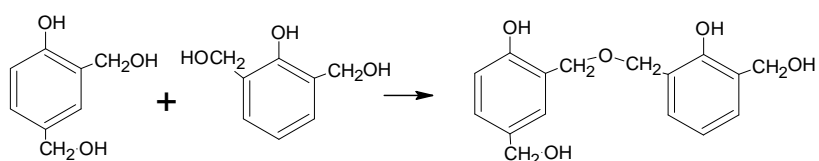




methylolphenol ที่เกิดขึ้นจะว่องไวต่อปฏิกิริยามาก โดยจะเกิดปฏิกิริยาต่อไปดังนี้

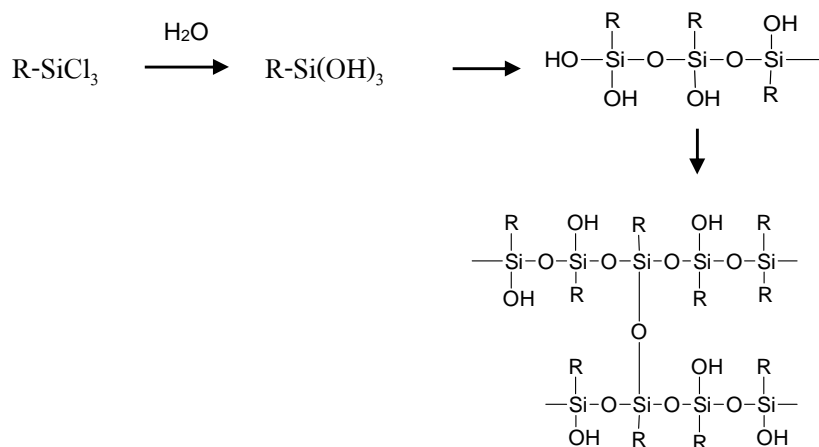


หรือ

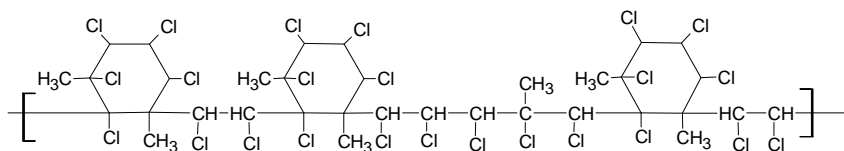


การสังเคราะห์ phenolic resin มี 2 แบบ คือหากทำในภาวะที่ใช้ phenol มากเกินพอจะ  
ได้ผลิตภัณฑ์เป็น Novolac resin แต่ถ้าทำในภาวะที่ใช้ formaldehyde มากเกินพอจะได้ resole resin  
ตัวอย่างการใช้งานในอุตสาหกรรมเคลือบผิว ได้แก่ resole resin ที่ตัดแปรด้วย alcohol ซึ่งจะเป็นฟิล์มที่  
มีความแข็งแรง ทนต่อเคมีภัณฑ์สูง เหมาะสำหรับใช้เคลือบกระป๋องบรรจุอาหาร

7. Silicone resin การเตรียม silicone resin เพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมกับงานเคลือบผิว  
มักเตรียมโดยวิธีการไฮโดรไลซ์ trichlorosilane เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีปริมาณการเชื่อมโยงสูง โดยเร  
ซินชนิดนี้สามารถทนทานต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงและเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีจึงเหมาะสำหรับการใช้  
งานภายนอก ตัวอย่างเช่น ใช้ผสมกับผง Zn สำหรับทำสีรองพื้น และผสมกับผง Al สำหรับทำสีทับหน้า  
และยังสามารถใช้ผสมกับเรซินอื่นๆ ได้เช่น alkyd resin, phenolic resin, amino resin, epoxy resin,  
acrylic resin เพื่อช่วยให้ผิวเคลือบทนต่อความร้อนและลมฟ้าอากาศได้ดีขึ้น



8. Chlorinated rubber เป็นเรซินที่เตรียมได้จากการนำยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ มาทำปฏิกิริยา chlorination โดยเติมคลอรีนเข้าไปที่พันธะคู่ของโมเลกุลยาง จนมีคลอรีนอยู่ประมาณ 65-68 % และควรเติม plasticizer ด้วยเนื่องจากยางที่ได้จะมีลักษณะแข็งและเปราะ



Chlorinated rubber มีสมบัติทนกรด ต่าง และการกัดกร่อนจากสารฟอกสีและตัวออกซิไดส์ต่างๆ ได้ดี จึงมักนำไปใช้ทำสีสำหรับการใช้งานที่ต้องการความทนทานเป็นพิเศษ โดยเฉพาะเรื่องการซึมผ่านของน้ำ เช่น ทาได้น้ำและสีกันเปรียง (9)

### 2.2.3 ชนิดของชั้นเคลือบสี

เมื่อทำการเคลือบสีลงบนผิวโลหะจะได้เป็นชั้นฟิล์มเปียก (wet film) หลังจากนั้น solvent จะค่อยๆ ระเหยไปจนกระทั่งเหลือเป็นชั้นฟิล์มแห้ง (dry film) ที่ประกอบด้วยเรซิน ผงสี และสารเติมแต่งอยู่บนชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม การใช้สีเคลือบในงานป้องกันการกัดกร่อนของโลหะอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากชิ้นงานโลหะนั้นจะต้องถูกนำไปใช้งานภายใต้สภาวะที่รุนแรงมักต้องทำการเคลือบจำนวนหลายชั้น ซึ่งแบ่งออกได้เป็น ชั้นสีรองพื้น สีชั้นล่าง และสีทับหน้า (7)

สีรองพื้น (Primers) เป็นสีที่ใช้เคลือบเป็นชั้นแรกลงบนผิวโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวมาแล้ว เป็นชั้นที่ช่วยทำให้เกิดการยึดเกาะได้ดีระหว่างผิวโลหะกับชั้นเคลือบถัดไป รวมถึงช่วยลดการซึมผ่านของความชื้นและออกซิเจน สารยึดที่ใช้ส่วนใหญ่ทำมาจาก polyurethane ชนิด 2 ส่วน, epoxy resin ชนิด 2 ส่วน, alkyd resin, chlorinated rubber เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจมีการเติมสารที่ช่วยยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะร่วมด้วย ได้แก่ การเติม pigment ที่มีสมบัติยับยั้งการกัดกร่อน เช่น red lead หรือใช้สีรองพื้นที่มี anodic metal เช่น zinc-rich primer

สีชั้นล่าง (Intermediate coats หรือ undercoats) เป็นชั้นที่ทำการเคลือบหลังจากการทำสีรองพื้นมาแล้ว โดยทั่วไปสีชั้นนี้จะมีปริมาณมากที่สุด ในขณะที่มีปริมาณผงสีอยู่มาก จึงมีความสามารถในการปิดบังพื้นผิวได้ดี มีสีเรียบสม่ำเสมอ โดยปกติจะมีความเงาอยู่ระหว่างด้านถึงกึ่งด้าน สารยึดที่ใช้ในสีชั้นล่าง ได้แก่ phenolic resin, alkyd resin

สีทับหน้า (Finish coats หรือ Top coats) เป็นชั้นเคลือบที่อยู่บนสุด สมบัติของชั้นเคลือบนี้จึงต้องการความสวยงามและความทนทานต่อสภาพแวดล้อมของการใช้งานโลหะนั้นๆ เช่น ทนต่อไอสารเคมี ไอทะเล แสงแดด

ตัวอย่างของสารยึดที่ใช้ในสีทับหน้าตามการใช้งานประเภทต่างๆ มีดังนี้

- ใช้กับวัสดุโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับบรรยากาศเช่น ไอทะเล เคมีภัณฑ์ในโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ chlorinated rubber , epoxy resin
- ใช้เคลือบเครื่องจักร ได้แก่ alkyd resin
- ใช้เคลือบรถยนต์ ได้แก่ alkyd/amino resin, acrylic resin ชนิด thermoplastic
- ใช้เคลือบเหล็กและคอนกรีตที่ต้องการป้องกันการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อม เช่น ท้องเรือ สะพานที่ยื่นออกไปในน้ำ ได้แก่ epoxy resin/น้ำมันดิน, polyurethane
- ใช้เคลือบวัสดุที่ต้องใช้งานภายใต้ความร้อน เช่น ปล่องไฟ ท่อไอเสีย ได้แก่ silicone resin

#### 2.2.4 การเลือกระบบของชั้นเคลือบสีให้เหมาะสมกับการใช้งาน

การเลือกว่าจะทำการเคลือบผิวด้วยสีชนิดใด จำนวนกี่ชั้น ความหนาเท่าใด ต้องพิจารณาจากสภาพแวดล้อมในการใช้งานวัสดุที่ผ่านการเคลือบนั้นๆ ได้แก่ สภาพอุณหภูมิ แสงแดด การสัมผัสกับความชื้น โอกาสที่จะสัมผัสกับสารเคมี หรืออุตสาหกรรมเคมีที่อยู่ใกล้เคียง เป็นต้น ซึ่งในที่นี้ได้ทำการยกตัวอย่างการเลือกใช้ชนิดของสีและขั้นตอนการเคลือบสีสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steel) เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของการใช้งาน ไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสภาพแวดล้อมของการใช้งาน และการเลือกใช้ชนิดของสีและขั้นตอนการเคลือบสีสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน (8)

สภาพแวดล้อมของการใช้งาน	ขั้นตอนการเคลือบสี
1. สภาพแวดล้อมที่ไม่รุนแรง เช่น เหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีต	ชั้นที่ 1 เคลือบ epoxy mastic หนา 75-125 $\mu\text{m}$
2. ภายในอาคารที่แห้ง เช่น สำนักงาน โกดังเก็บของแห้ง	ชั้นที่ 1 เคลือบ acrylic primer หนา 50-75 $\mu\text{m}$ ชั้นที่ 2 เคลือบ acrylic finish หนา 50-75 $\mu\text{m}$
3. ภายนอกอาคารที่แห้ง เช่น เสาไฟ	ชั้นที่ 1 เคลือบ aluminum epoxy mastic หนา 100-150 $\mu\text{m}$ ชั้นที่ 2 เคลือบ polyurethane finish หนา 50-100 $\mu\text{m}$
4. บริเวณที่ต้องสัมผัสกับน้ำ (สะอาด) เช่น บริเวณภายในและนอกอาคารที่ต้องมีการล้างทำความสะอาด	ชั้นที่ 1 เคลือบ aluminum epoxy mastic หนา 100-150 $\mu\text{m}$ ชั้นที่ 2 เคลือบ acrylic finish หนา 50-75 $\mu\text{m}$
5. บริเวณที่ต้องสัมผัสกับน้ำเกลือ เช่น บริเวณภายในและนอกอาคารที่ตั้งอยู่ใกล้ชายฝั่งทะเล หรืออยู่ใกล้อุตสาหกรรมที่มีไอเกลือหรือใช้น้ำทะเล	ชั้นที่ 1 เคลือบ inorganic zinc หนา 50-75 $\mu\text{m}$ ชั้นที่ 2 เคลือบ epoxy primer หนา 100-150 $\mu\text{m}$ ชั้นที่ 3 เคลือบ polyurethane finish หนา 50-100 $\mu\text{m}$

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ตัวอย่างสภาพแวดล้อมของการใช้งาน และการเลือกใช้ชนิดของสีและขั้นตอนการเคลือบสีสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน (8)

สภาพแวดล้อมของการใช้งาน	ขั้นตอนการเคลือบสี
6. บริเวณที่ต้องจุ่มแช่ในน้ำ	ชั้นที่ 1 เคลือบ epoxy mastic หนา 100-150 $\mu\text{m}$ ชั้นที่ 2 เคลือบ epoxy mastic หนา 100-150 $\mu\text{m}$
7. บริเวณที่ต้องจุ่มแช่ในน้ำเกลือ	ชั้นที่ 1 เคลือบ aluminum epoxy mastic หนา 100-150 $\mu\text{m}$ ชั้นที่ 2 เคลือบ epoxy finish หนา 100-150 $\mu\text{m}$
8. บริเวณที่มีโอกาสสัมผัส (ได้รับไอหรือสารกระเด็นใส่) กับสารเคมีประเภทกรด (pH 2-5)	ชั้นที่ 1 เคลือบ epoxy novalac หนา 150-200 $\mu\text{m}$ ชั้นที่ 2 เคลือบ epoxy novalac หนา 150-200 $\mu\text{m}$
9. บริเวณที่มีโอกาสสัมผัสกับสารเคมีประเภทเป็นกลาง (pH 5-10)	ชั้นที่ 1 เคลือบ aluminum epoxy mastic หนา 100-150 $\mu\text{m}$ ชั้นที่ 2 เคลือบ polyurethane finish หนา 50-100 $\mu\text{m}$
10. บริเวณที่มีโอกาสสัมผัสกับตัวทำละลายที่ไม่รุนแรง เช่น mineral spirits, lower alcohols, glycols	ชั้นที่ 1 เคลือบ inorganic zinc หนา 50-75 $\mu\text{m}$ ชั้นที่ 2 เคลือบ epoxy mastic หนา 100-150 $\mu\text{m}$
11. บริเวณที่มีโอกาสสัมผัสกับสารเคมีที่รุนแรง เช่น solvent ที่รุนแรง, สาร oxidizing, กรดที่รุนแรง	ชั้นที่ 1 เคลือบ epoxy phenolic primer หนา 200 $\mu\text{m}$ ชั้นที่ 2 เคลือบ epoxy phenolic finish หนา 200 $\mu\text{m}$ ชั้นที่ 3 เคลือบ epoxy phenolic finish หนา 200 $\mu\text{m}$

### 2.2.5 กรรมวิธีการเคลือบผิว

การเลือกใช้วิธีการในการเคลือบผิวนั้นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการพิจารณา ได้แก่ วัตถุประสงค์การใช้งานของชิ้นงานนั้น สภาพแวดล้อมของการใช้งาน ชนิดของสารเคลือบผิว ลักษณะรูปร่างของชิ้นงาน ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว และต้นทุน เป็นสำคัญ วิธีการที่ใช้กัน โดยทั่วไปมีดังต่อไปนี้ [7,9,10]

การจุ่ม (dip coating) เป็นวิธีการเคลือบผิวที่ทำได้ง่ายที่สุดและประหยัดเวลา เหมาะสำหรับการเคลือบสีชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและมีจำนวนมาก โดยความหนาของผิวเคลือบจะถูกกำหนดจากอัตราเร็วในการดึงชิ้นงานขึ้นจากสีเคลือบ รวมถึงการควบคุมความหนืดและการระเหยของตัวทำละลายในสีเคลือบ

การทาด้วยแปรง (brushing) เป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย ต้นทุนต่ำ สามารถทำการเคลือบผิวชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้และทำการเคลือบได้ชั้นฟิล์มที่หนา แต่มีข้อเสียเรื่องความสม่ำเสมอของผิวเคลือบ สีที่เหมาะสมสำหรับการทาดังวิธีนี้มักเป็นสีที่แห้งช้า

การทาด้วยลูกกลิ้ง (roller coating) เป็นวิธีการที่ทำได้รวดเร็ว เหมาะกับการทาทนพื้นผิวที่มีความเรียบและมีพื้นที่มาก โดยที่ไม่ต้องการความเนียนเรียบสม่ำเสมอของผิวเคลือบมากเท่ากับผิวพ่นสเปรย์ ทั้งนี้สีที่ใช้ทาต้องมีคุณสมบัติด้านการไหลที่เหมาะสม ตัวทำละลายต้องไม่ระเหยช้าจนเกินไป และมีความทึบแสงสูง

การพ่น (spraying) เป็นวิธีการที่ทำได้รวดเร็ว เหมาะสำหรับการเคลือบบนวัสดุที่มีพื้นที่มากและมีบริเวณซอกมุมที่ยากต่อการทาด้วยแปรงหรือลูกกลิ้ง แต่ข้อเสียคือจะมีการสูญเสียสีที่ถูกพ่นออกนอกเป้าหมาย (overspray) ในปริมาณค่อนข้างสูง วิธีการพ่นสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี คือ

1. การพ่นโดยใช้ลม (air spraying) วิธีการนี้สีจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในกระแสของอากาศที่มีแรงอัดแล้วถูก atomized ให้เป็นละอองฝอยเคลือบติดบนชิ้นงาน ขณะทำการพ่นหยดละอองของสีเหล่านี้จะหนาแน่นมากขึ้นจนรวมเป็นชั้นฟิล์มที่มีความต่อเนื่อง ข้อดีของวิธีการนี้คือ ทำได้รวดเร็ว และได้ชั้นฟิล์มที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ เหมาะสำหรับการผลิตที่ต้องการปริมาณมากๆ และต้องการความสวยงามสม่ำเสมอของพื้นผิว

2. การพ่นโดยไม่ใช้ลม (airless spraying) วิธีการนี้สีจะถูกบีบคูดขึ้นมาโดยตรงจากภาชนะ แล้วใช้แรงอัดสูงในการอัดสีเคลือบให้ถูกฉีดพ่นออกมาโดยไม่ใช้อากาศ ซึ่งกรณีสีเคลือบที่มีความหนืดสูงจะต้องทำการให้ความร้อนเสียก่อน วิธีการดังกล่าวสามารถเคลือบโดยให้ชั้นฟิล์มที่มีความหนามากกว่าวิธีพ่นโดยใช้ลม

3. การพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic spraying) วิธีการนี้เครื่องพ่นจะต่ออยู่กับแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูง โดยที่หัวพ่นจะมีขั้วไฟฟ้า ส่วนวัสดุที่ต้องการเคลือบจะถูกต่อสายดินเอาไว้ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านสี จะทำให้สีที่มีประจุเหล่านั้นถูกพ่นไปเกาะติดอยู่บนวัสดุที่ต้องการเคลือบ จนกว่าบริเวณนั้นกลายเป็นฉนวนนั่นคือเกิดการเคลือบปิดพื้นผิวอย่างสมบูรณ์ วิธีการนี้จึงได้ผิวเคลือบที่มีความสม่ำเสมอและมีการสูญเสียสีน้อย แต่ข้อเสียคือทำได้ช้า มีต้นทุนสูง และชิ้นงานที่จะทำการเคลือบต้องเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าได้

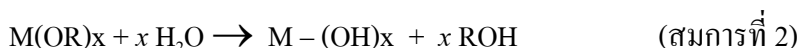
### 2.3 กระบวนการโซลเจล

กระบวนการโซลเจลสามารถให้คำจำกัดความทั่วไปว่าเป็นเทคนิคการสังเคราะห์เซรามิกจากขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ คือ การเตรียมโซล การเปลี่ยนสภาพจากโซลเป็นเจล ตามด้วยการทำให้แห้ง การสลายตัวของสารอินทรีย์ของเจลด้วยความร้อน การทำให้โครงตาข่ายเจล (gel network) เกิดความหนาแน่นมากขึ้น และขั้นตอนสุดท้ายคือการเกิดเป็นผลึกตามโครงสร้างที่ต้องการ สำหรับคำว่า “โซล” อาจให้คำจำกัดความ ได้ว่าเป็นการกระจายตัวของอนุภาคขนาดคอลลอยด์ หรือ polymeric molecule ในของเหลว (11) กระบวนการโซลเจลในสาขาเซรามิกเกี่ยวข้องกับโซลทั้งสองแบบคือ ทั้งในระบบของคอลลอยด์ที่อนุภาคของ metal oxide หรือ metal hydroxide กระจายตัวอยู่และเกิดการจับตัวกันจน

กลายเป็นเจลในที่สุด สำหรับใน polymeric system โครงตาข่ายของเจลเกิดจากการ polymerization ของสารตั้งต้นประเภท metal carboxylate หรือ alkoxide

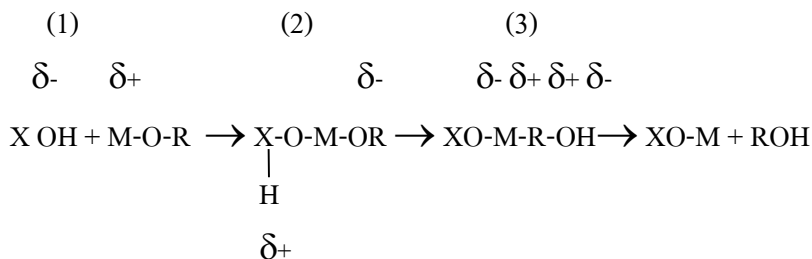
การพอลิเมอไรเซชันของสารตั้งต้นพวก metal organic เช่น metal alkoxide เกิดขึ้น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และกระบวนการคอนเดนเซชัน (condensation) เพื่อให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของ oligomeric alkoxide ดังแสดงในสมการที่ 1 และ 2

ก) กระบวนการไฮโดรไลซิส



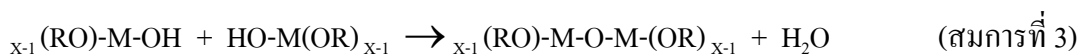
ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดย nucleophilic substitution อธิบายได้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. Nucleophilic addition ของโมเลกุลน้ำบนประจุบวกของโลหะที่อยู่ตรงกลาง
2. Proton transfer ที่ transition state จากการเข้าของโมเลกุลของน้ำไปยังกลุ่ม alkoxy ที่จะหลุดออกไป
3. การออกไปของ positively charged protonated species



เมื่อ  $\delta$  คือ ประจุของแต่ละอะตอม

ข) กระบวนการคอนเดนเซชันทำให้เกิดการโตขึ้นของ organic-inorganic polymer ดังนี้



(oxolation)



(alkoxolation)

จากปฏิกิริยาข้างต้นทำให้เกิด polycondensation และ polymer formation

การเตรียมฟิล์มของโซลเจลบนผิวโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อนทำได้โดยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ การจุ่มเคลือบผิว (dipping) (12,13) การพ่น (spraying) (14,15) หรือ การหมุนเหวี่ยง (spinning) (16,17) ซึ่งเทคนิคการเคลือบแบบจุ่มเคลือบและการหมุนเหวี่ยงเหมาะสำหรับการสร้างฟิล์มบนผิวที่แบนเรียบ

เท่านั้น ในกรณีที่ชิ้นงานมีรูปร่างซับซ้อนการเคลือบผิวให้สม่ำเสมออาจทำได้ยาก มีหลายงานวิจัยที่แสดงให้เห็น โพลีเมอร์ฟิล์มที่มีคุณภาพดี เมื่อเคลือบผิวด้วยวิธี electrochemical deposition ขั้นตอนสำคัญต่อการเคลือบผิวคือการทำให้โพลีเมอร์ฟิล์มแห้งตัว ในขั้นตอนนี้เป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่เคลือบผิวโดยระดับความร้อนที่ให้อาจสูงถึง 900 องศาเซลเซียส ซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการให้ความร้อนอาจแบ่งเป็นระยะต่างๆดังนี้ คือ ระยะที่ 1 การระเหยของตัวทำละลายและการควบแน่น (polycondensation) ที่เกิดขึ้นประมาณ 100-200 องศาเซลเซียส ต่อมาเป็นระยะที่ 2 การสลายตัวของสารอินทรีย์และการทลายของรูเล็กๆ ซึ่งเกิดขึ้นที่ 300-500 องศาเซลเซียส และระยะสุดท้าย เป็นการทลายของรูที่มีขนาดใหญ่ทำให้ได้เป็นเซรามิกฟิล์ม สำหรับอีกกรณีหนึ่งเป็นการทำให้เกิดโพลีเมอร์ฟิล์มที่อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 200 องศาเซลเซียส) ไม่เพียงแต่เป็นการระเหยตัวทำละลายที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้เท่านั้น แต่เป็นการเกิดเจลและการหดตัวจากการเกิดเจลด้วย การทำให้ฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิต่ำเหมาะสำหรับการเคลือบผิวด้วยโพลีเมอร์โดยมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ

#### 2.4 ชนิดของโพลีเมอร์ที่ใช้เป็นสารเคลือบผิว

วัสดุทางเซรามิกต่างๆ ได้แก่ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ), เซอร์โคเนีย ( $\text{ZrO}_2$ ), อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ไทเทเนีย ( $\text{TiO}_2$ ) และ ซีเรียมออกไซด์ ( $\text{CeO}_2$ ) เป็นต้น เป็นวัสดุที่มีความเสถียรต่อสารเคมีสูงมาก จึงเหมาะแก่การเคลือบผิวโลหะเพื่อป้องกันผิวโลหะ

ซิลิกาสามารถปรับปรุงการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะแบบออกซิเดชันและการกัดกร่อนภายใต้สภาวะกรด ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ เนื่องจากการต้านทานความร้อนและการต้านทานสารเคมีสูง (18, 19) Vasconcelos และคณะ (19) ทำการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ด้วยซิลิกา โดยใช้ tetraethyl orthosilicate (TEOS) เป็นสารตั้งต้น พบว่า การเคลือบผิวมีธาตุ Si, O และ Fe เกิดขึ้นระหว่างชั้นเหล็กและชั้นของ  $\text{SiO}_2$  ผิวเคลือบซิลิกาที่ได้มีความสม่ำเสมอและไม่มีรอยแตก เมื่อตัวอย่างได้รับการทดสอบภายใต้สภาวะสารละลายกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1 mol/l และสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.5% พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้นและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลง เป็นการแสดงให้เห็นว่า ผิวซิลิกาที่มีความหนาประมาณ 100 นาโนเมตร สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมได้

เซอร์โคเนียมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูงและใกล้เคียงกับโลหะ ซึ่งช่วยลดการเกิดรอยแตกระหว่างกระบวนการให้ความร้อน (12, 20) นอกจากนี้ยังมีความเสถียรต่อสารเคมีสูงและความแข็งสูง (21) จึงเหมาะแก่การใช้เป็นวัสดุเคลือบผิวเพื่อการปกป้อง Perdomo และคณะ (22) เคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ด้วย  $\text{ZrO}_2$  โดยใช้ zirconium peroxide เป็นสารตั้งต้น และให้แน่นตัวในอากาศและในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน (อาร์กอนหรือไนโตรเจน) พฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม

ศึกษาด้วย potentiodynamic polarization curve พบว่า การเคลือบผิวด้วย  $ZrO_2$  ช่วยยืดระยะเวลาอายุการใช้งานของวัสดุได้เกือบ 8 เท่า ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงมาก

อลูมินาเป็นที่รู้จักดีสำหรับการใช้งานด้านการเป็นฉนวน และมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำมาก ดังนั้นจึงเหมาะแก่การใช้เป็นผิวเคลือบสำหรับการป้องกัน Masalski และคณะ (23) เตรียมผิวเคลือบอลูมินา 2, 4 และ 6 ชั้น บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 เพื่อปรับปรุงความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ พบว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแคโทดแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิการเผาผนึกยิ่งอุณหภูมิการเผาผนึกสูงขึ้น (ในช่วง 500-800 องศาเซลเซียส) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ายิ่งต่ำลง

ไทเทเนียมมีความเสถียรต่อสารเคมีสูง การต้านทานความร้อนสูง และการนำอิเล็กตรอนต่ำ ทำให้เหมาะสำหรับการใช้เป็นวัสดุสำหรับการต้านการกัดกร่อน  $TiO_2$  ฟิล์มบริสุทธิ์ส่วนใหญ่มักใช้ในด้านการเร่งปฏิกิริยา การวิจัยสำหรับใช้  $TiO_2$  ฟิล์ม เพื่อการป้องกันการกัดกร่อนของผิวเหล็กยังมีอยู่น้อย

นอกจากนี้การเคลือบผิวที่มีออกไซด์ 2 ชนิดหรือมากกว่า สามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวางในหลายด้าน นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงการต้านทานการกัดกร่อนของผิวเหล็ก ตัวอย่างเช่น 70  $SiO_2$ -30  $TiO_2$  และ 75  $SiO_2$  - 25  $Al_2O_3$  ใช้เคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ฟิล์มดังกล่าวสามารถยืดอายุการใช้งานของวัสดุได้ถึง 10 เท่า ในสารละลายเกลือแอมโมเนียมความเข้มข้น 3% และยืดอายุการใช้งานได้ 5 เท่าในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 15% (12)

ในช่วงที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่ให้ความสนใจศึกษาไฮบริดโซลเจล (Hybrid sol-gel) เนื่องจากเป็นวัสดุให้สมบัติที่ดี โดยเฉพาะสารเคลือบระบบ Hybrid organic-inorganic materials ที่นำมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ ระบบดังกล่าวเป็นการผสมผสานเพื่อรวมคุณสมบัติของสารอินทรีย์และเซรามิก โดยเซรามิกซึ่งเป็นสารประกอบอนินทรีย์จะให้สมบัติด้านความทนทานต่อสารเคมี ความต้านทานต่อรอยขีดข่วน และการยึดเกาะกับพื้นผิวโลหะ ในขณะที่สารประกอบอินทรีย์ซึ่งได้แก่ เรซิน จะให้สมบัติที่ดีด้านความยืดหยุ่น ทำให้ผิวเคลือบโซลเจล ไม่เปราะแตกง่าย จึงสามารถเคลือบได้ความหนาที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ป้องกันการกัดกร่อนได้ดีขึ้น

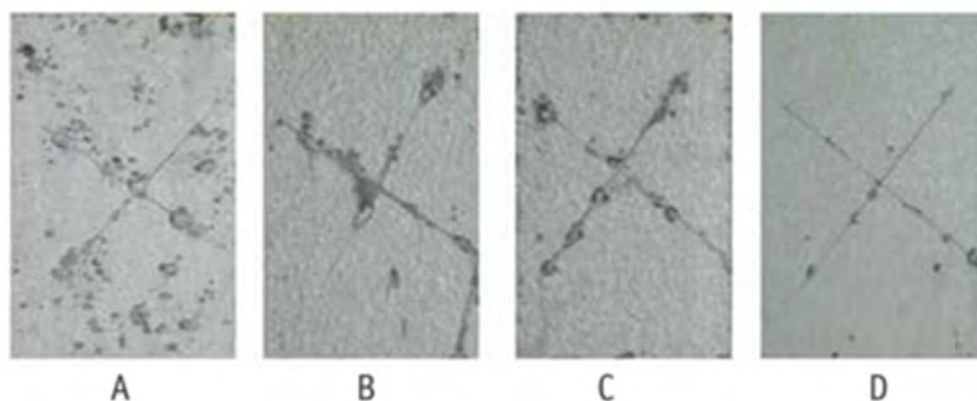
ตัวอย่างงานวิจัยด้านการเตรียมสารเคลือบชนิดไฮบริดโซลเจล ได้แก่ งานวิจัยของ Varela Caselis และคณะ (24) ที่ศึกษาการใช้สารเคลือบชนิด Polymethacrylate (PMMA)-silica hybrid ที่ได้จากกระบวนการโซลเจล สำหรับเคลือบบนเหล็กสเตนเลส 316L ซึ่งพบว่าการใช้ PMMA-silica hybrid สามารถยึดติดกับผิวชิ้นงานได้ดีกว่าการใช้ PMMA เพียงอย่างเดียว ส่วนงานวิจัยของ Salahinejad และคณะ (25) ได้ทำการศึกษาการเคลือบสารโซลเจล ลงบนชิ้นงานเหล็กสเตนเลส 316L แบบหลายชั้น โดยเป็นการสลับกันระหว่างชั้น inorganic และ organic ซึ่งทำได้โดยเคลือบชั้นแรกด้วย  $ZrTiO_4$  แล้วเผาผนึก (sinter) ที่ 700 องศาเซลเซียส จากนั้นเคลือบชั้นที่สองด้วย  $ZrTiO_4$ -PMMA แล้วอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส



## 2.5 การประยุกต์ใช้โซลเจลในสีเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

โซลเจลถูกนำไปใช้งานมากมายสำหรับการพัฒนาสีเคลือบ (paint) เพื่อยับยั้งการกัดกร่อน โดยสารเคลือบผิวเหล่านี้เกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างโซลเจลกับผงสีหลายๆ ชนิดที่มีความปลอดภัยต่อการใช้งานและมีประสิทธิภาพด้านทานการกัดกร่อน เช่น ผงสีประเภท zinc phosphate โครงข่ายร่างแหของโซลเจลนั้นจะทำหน้าที่ปกคลุมพื้นผิวชิ้นงานและกักเก็บอนุภาคผงสีไว้ภายใน ทำให้ผงสีสามารถปลดปล่อยไอออนที่มีสมบัติยับยั้งการกัดกร่อน เช่น phosphate, zinc, calcium ions มายังพื้นผิวโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ (26)

การผสมโซลเจลร่วมกับสีเคลือบสูตรน้ำ (waterborne) ได้แก่ การผสมโซลเจลในปริมาณ 2 % โดยน้ำหนักลงไปในสีเคลือบชนิด Water reducible alkyd enamel ซึ่งพบว่า มีข้อดีหลายประการ อาทิ ช่วยรักษาความมันเงา เพิ่มสมบัติการยึดเกาะ และด้านทานการพองตัวของผิวเคลือบ สำหรับการประยุกต์ใช้โซลเจลในสีประเภท Waterborne clear lacquer สำหรับการเคลือบบนผิวชิ้นงาน Galvalume (เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี-อลูมิเนียม) พบว่า การใช้โซลเจลร่วมกับผงสีที่มีสมบัติป้องกันการกัดกร่อน จะมีผลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนให้กับชิ้นงานอย่างเห็นได้ชัด ดังผลการทดสอบ salt spray ในรูปที่ 2.1

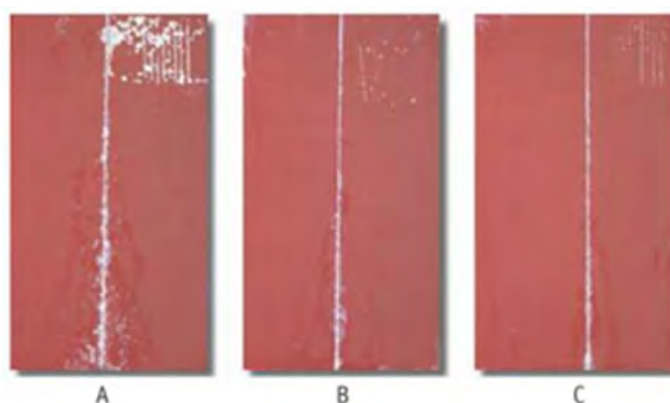


รูปที่ 2.1 แผ่นชิ้นงาน Galvalume ที่ผ่านการทาสี Waterborne acrylic lacquer ความหนา 23  $\mu\text{m}$  ภายหลังจากการทดสอบ salt spray เป็นเวลา 1200 ชั่วโมง : (A) สีที่ไม่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน (B) สารทางการค้า 3% (C) โซลเจล 3% และ (D) โซลเจล 3% + ผงสียับยั้งการกัดกร่อน 3%

นอกจากสีเคลือบสูตรน้ำแล้ว ในสูตรที่ใช้ตัวทำละลาย (solventborne) อาทิ vinyl wash primer ก็สามารถนำเทคโนโลยีโซลเจลมาประยุกต์ใช้งานได้เช่นกัน โดยที่ wash primer นั้นจัดว่าเป็นภาวะที่รุนแรงเนื่องจากการใช้ phosphoric acid เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นผงสีที่ใช้จึงต้องมีความทนทานต่อภาวะที่รุนแรงดังกล่าวได้ดี ซึ่งในอดีตที่ผ่านมามีสารที่ได้รับความนิยมคือผงสีชนิดโครเมต แต่จากการศึกษาทดลองพบว่า ระบบดังกล่าวสามารถทดแทนได้ ด้วยการนำโซลเจลมาใช้ร่วมกับผงสีที่มีความ

ปลอดภัยและมีสมบัติยับยั้งการกัดกร่อน โดยพบว่า ผิวนีเคลือบมีสมบัติการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานและทนทานต่อการกัดกร่อนแบบละอองเกลือได้ดี

นอกจากนี้ ยังมีการประยุกต์ใช้งาน โพลีเอสเตอร์ในกลุ่มของ Solventborne medium oil alkyd prime สำหรับการทาสีชิ้นงานชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (Hot dip galvanized) ซึ่งโดยปกติแล้วการนำสี alkyd มาทาบนผิวที่ผ่านการชุบสังกะสีโดยตรงมักมีข้อจำกัดจากปัญหาการหลุดลอกได้ง่ายของฟิล์มชั้นเคลือบ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา saponification ระหว่างด่างที่อยู่บนผิวชิ้นงานกับเรซิน ทั้งนี้จากผลการทดสอบ salt spray ในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่า โพลีเอสเตอร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะและการป้องกันการกัดกร่อนของผิวนีเคลือบได้ดี



รูปที่ 2.2 แผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการทาสีด้วย Solvent-based medium oil alkyd primer ความหนา 58  $\mu\text{m}$  ภายหลังการทดสอบ salt spray เป็นเวลา 240 ชั่วโมง และมีผลการทดสอบ Cross-hatch adhesion แสดงที่มุมบนขวา (A) ไม่มีผงสียับยั้งการกัดกร่อน (B) ผงสียับยั้งการกัดกร่อน 6% + โพลีเอสเตอร์ 1% และ (C) ผงสียับยั้งการกัดกร่อน 6%+ โพลีเอสเตอร์ 1.5%

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 3.1 วัสดุ-อุปกรณ์ สารเคมีและเครื่องมือ

##### 3.1.1 วัสดุ-อุปกรณ์

1. ปีกเกอร์
2. ขวดพลาสติก
3. หลอดหยด
4. แท่งแก้วคนสาร
5. แผ่นเหล็กกริดเย็น ของบริษัท บลูส โคป (ประเทศไทย) จำกัด ขนาด 2 x 3.5 เซนติเมตรหนา 0.4 มิลลิเมตร

##### 3.1.2 สารเคมี

1. ไทเทเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ บิสอะเซทิลอะซิโตนเนต  
(Titanium diisopropoxide bisacetylacetonate  
[Ti(OCH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)<sub>2</sub>(CH<sub>3</sub>COCHCOCH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] หรือ TIAA, 75 wt% in isopropanol  
(Aldrich))
2. 1,3 โพรเพนไดออล (1,3 propanediol [HO(CH<sub>2</sub>)<sub>3</sub>OH] (Aldrich, purity > 99% ))
3. เอทานอลเกรดการค้า (Commercial Ethanol (96% EtOH))
4. แอบโซลูท เอทานอล (Absolute Ethanol (BDH, 99.7-100 %v/v))
5. พอลิไวนิลบิวทีเรต (Polyvinyl butyral, PVB (Aldrich))

##### 3.1.3 เครื่องมือ

1. กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล ของ Celetron รุ่น Amoeba
2. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ของ Satorius
3. เครื่องจุ่มเคลือบผิวขนาดเล็ก (Mini dip coater) แบบจุ่มเร็ว  
(ประดิษฐ์โดยคุณวิรัช เฟื่องฟูนาภิกิจ)
4. เครื่องจุ่มเคลือบผิวแบบจุ่มช้า (ประดิษฐ์โดยคุณอดิศักดิ์ ถิ่นพลอย)
5. เครื่อง Hot plate stirrer
6. ตู้อบไฟฟ้า
7. เครื่องวัด contact angle ของ Kyowa รุ่น DM-CE1
8. เครื่องวัดขนาดอนุภาคของ Malvern รุ่น Nano 2590

### 3.2 การสังเคราะห์ไทเทเนียโซล

ผสม TIAA และ 1,3 propanediol ในอัตราส่วน 1 : 1 โมล โดยรีฟลักซ์สารผสมเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นจึงกลั่นที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เจือจางสารละลายโซลที่สังเคราะห์ได้ด้วย absolute Ethanol ให้เป็น stock  $\text{TiO}_2$  sol ที่ความเข้มข้น 1 M

### 3.3 การเตรียมสารเคลือบผิว

การเตรียมสารเคลือบผิวไทเทเนียโซลทำได้โดยการเจือจาง stock  $\text{TiO}_2$  sol ด้วยตัวทำละลายเอทานอลเกรดการค้าให้ได้สารละลายไทเทเนียที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 M

การเตรียมสารเคลือบผิวไฮบริดโซลเจล (Hybrid sol gel) ทำได้โดยการผสมสารประกอบพอลิไวนิลบิวทีรัล (PVB) ในสารละลายไทเทเนียโซลโดยไทเทเนียโซลมีความเข้มข้นประมาณ 0.05 M และใช้พอลิไวนิลบิวทีรัลประมาณร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก

### 3.4 การวัดขนาดอนุภาคของไทเทเนียในโซล

เจือจางไทเทเนียโซลให้มีความเข้มข้น 0.05 M เพื่อวัดขนาดอนุภาคของไทเทเนียในโซลที่ระยะเวลาต่างๆ โดยวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค Dynamic light scattering เครื่อง Zetasizer ของ Malvern รุ่น Nano 2590 โดยวัดขนาดอนุภาคไทเทเนียโซลทุกๆ 15 วัน

### 3.5 การจุ่มเคลือบผิวเหล็กด้วยสารเคลือบผิว

1. ทำความสะอาดผิวชิ้นงานเหล็กด้วยเอทานอลเกรดการการค้า แล้วมาจุ่มเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่เตรียมไว้โดยการจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายโซลด้วยเครื่องจุ่มเคลือบผิวขนาดเล็ก โดยใช้ระดับความเร็วในการจุ่มประมาณ 1,600 มิลลิเมตรต่อนาที หรือระดับความเร็วประมาณ 100 มิลลิเมตรต่อนาที

2. ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องในกล่องดูดความชื้นเป็นเวลา 1 คืน หรืออบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

3. พันสีชิ้นงานด้วยสีอะคริลิกชนิดสเปรย์หรือทาสีน้ำมัน ทิ้งให้สีแห้งเป็นเวลา 7 วัน ก่อนการนำไปทดสอบการยึดติดของสี

### 3.6 การวัดค่า contact angle ของผิวเหล็ก

วัดค่า contact angle ของผิวเหล็กที่ไม่เคลือบผิวและเคลือบผิวด้วยโซล โดยการใช้เครื่องวัดค่า contact angle ของ Kyowa รุ่น DM-CE1

### 3.7 การทดสอบการยึดติดของผิวเคลือบบนผิวเหล็ก

การทดสอบการยึดติดของผิวเคลือบด้วยวิธีการตามมาตรฐาน ASTM D 3359-02 Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test มีวิธีการดังนี้

1. ทำความสะอาดชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ
2. นำเทปกาวอย่างดี เช่น เทปกาวตรา 3M ติดลงไปที่ชิ้นงานในบริเวณที่ต้องการทดสอบ
3. ใช้นิ้วกดที่อยู่ที่ด้านปลายของคินสอเพื่อทำให้เทปติดแน่นกับชิ้นงาน
4. ดึงเทปออกโดยดึงให้ทำมุมใกล้เคียง 180 องศา ให้ได้มากที่สุด
5. ตรวจสอบการหลุดลอกของสี ถ่ายภาพชิ้นงานเพื่อคำนวณร้อยละของการหลุดลอกของสี

### 3.8 การใช้โปรแกรม Image J

โปรแกรม ImageJ เป็นโปรแกรมสำหรับการคำนวณหาสัดส่วนของพื้นที่จากภาพถ่าย เพื่อใช้คำนวณพื้นที่การหลุดลอกของสี โดยมีวิธีการใช้งานดังนี้

1. เปิดโปรแกรม Image J จากนั้นเลือกคำสั่ง File และเลือกคำสั่ง Open และเลือกรูปที่ต้องการวิเคราะห์หาพื้นที่ของสีที่ติดอยู่บนแผ่นเหล็ก
2. กำหนดบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ โดยเลือกคำสั่ง Image และเลือกคำสั่ง Crop
3. เลือกคำสั่ง Image และเลือกคำสั่ง Type 8 - bit
4. เลือกคำสั่ง Image จากนั้นเลือกคำสั่ง Adjust เลือกคำสั่ง Threshold และเลือกคำสั่ง Apply
5. เลือกคำสั่ง Analyze จากนั้นเลือกคำสั่ง Analyze Particle และเลือก Summarize และ ok ตามลำดับ
6. โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ของสีที่อยู่แผ่นเหล็ก
7. นำผลการคำนวณพื้นที่ไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM D3359-09 เพื่อจัดกลุ่มของชิ้นงานหลังการทำ Tape test ว่าอยู่ในกลุ่มใด โดยดูจากร้อยละของสีที่หลุดลอกจากชิ้นงานเหล็ก โดยการจัดกลุ่มมี 6 กลุ่ม ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงการจัดกลุ่มตามมาตรฐานการทดสอบการขีดขีด

กลุ่มที่	ร้อยละของพื้นที่สีที่หลุดลอก
5B	0 % หรือ ไม่หลุดลอก
4B	น้อยกว่า 5 %
3B	5-15 %
2B	15-35 %
1B	35-65%
0B	มากกว่า 65 %

### 3.9 การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงาน โดยวิธีจำลองสถานะในเครื่อง Salt spray อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM B117

1. นำแผ่นชิ้นงานทดสอบมาตรวจพินิจลักษณะบกพร่อง เช่น ตำหนิ รอยขีดขีดและคราบสนิม บันทึกผลที่สังเกตเห็นได้ แล้วทำการถ่ายรูปชิ้นงานทดสอบ

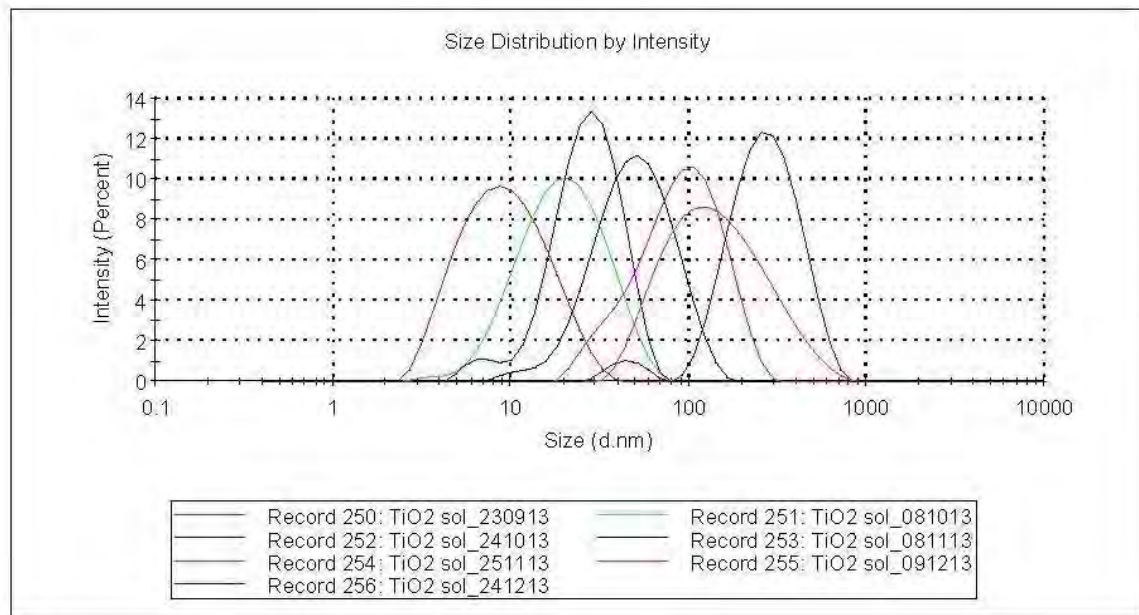
2. นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการตรวจพินิจแล้ว ไปวางบนอุปกรณ์วางชิ้นงานทำมุม 30 องศา ในเครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือ : Q-Fog Salt Spray Chamber โดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง  $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$  อัตราการฉีดพ่นของน้ำเกลือความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก ในช่วง 0.4-0.6 ลิตรต่อชั่วโมง ที่มีความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.5 ถึง 7.2 ด้วยแรงดันระหว่าง 12-15 psi

3. เมื่อเวลาผ่านไป 24, 72 และ 120 ชั่วโมง นำชิ้นงานทดสอบออกจากเครื่องทดสอบแล้วนำมาทำความสะอาดโดยใช้น้ำที่มีอุณหภูมิไม่เกิน  $38^{\circ}\text{C}$  ไหลผ่าน ทำการตรวจพินิจ ถ่ายรูปและบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานทดสอบ

## บทที่ 4

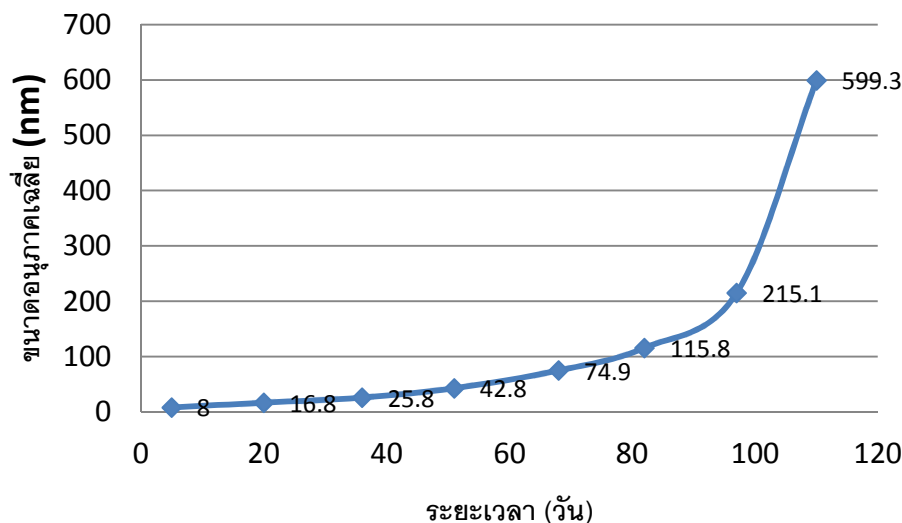
### ผลการทดลอง

#### 4.1 การศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมในโซลที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมในโซลที่ระยะเวลาต่างๆ โดยการวัดเทคนิค dynamic light scattering

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นช่วงการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมในโซลซึ่งตรวจวัดที่ระยะเวลาต่างๆ หลังจากสังเคราะห์ไทเทเนียมโซลเมื่อวันที่ 18 กันยายน 2556 โดยทำการตรวจวัดทั้งสิ้น 7 ครั้ง (ครั้งที่ 1 : วันที่ 23 กันยายน 2556 ครั้งที่ 2 : วันที่ 8 ตุลาคม 2556 ครั้งที่ 3 : วันที่ 24 ตุลาคม 2556 ครั้งที่ 4 : วันที่ 8 พฤศจิกายน 2556 ครั้งที่ 5 : วันที่ 25 พฤศจิกายน 2556 ครั้งที่ 6 : วันที่ 9 ธันวาคม 2556 และครั้งที่ 7 : วันที่ 24 ธันวาคม 2556) โดยเป็นการวัดในแต่ละช่วงห่างกันเป็นระยะเวลาประมาณ 15 วัน ผลการวิเคราะห์พบว่า อนุภาคช่วงของการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมในโซลส่วนใหญ่เป็นรูปร่างค้ำและมีเพียงพีกเดียว ยกเว้นผลการทดลองในการวัดการกระจายตัวของอนุภาคครั้งที่ 4 และครั้งที่ 7 ซึ่งมีอีกหนึ่งพีกแต่เป็นพีกขนาดเล็กที่ไม่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของอนุภาคโดยรวม นอกจากนี้การกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมในโซลมีแนวโน้มไปในทิศทางของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามระยะเวลาที่ผ่านมา สังเกตได้จากพีกกระจายตัวของอนุภาคที่ขยับไปทางขวาตามแกน x ซึ่งเป็นแกนของขนาดอนุภาค



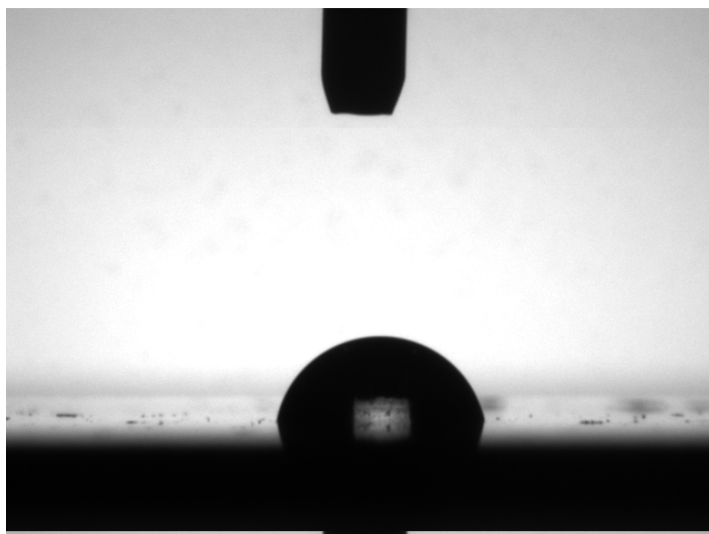
รูปที่ 4.2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไทเทเนียมในโซลที่ระยะเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 แสดงอนุภาคเฉลี่ยของไทเทเนียมในโซลที่ระยะเวลาต่างๆ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า ขนาดของอนุภาคไทเทเนียมหลังการสังเคราะห์ 5 วัน มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 8 นาโนเมตร โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ขึ้นเกือบเท่าตัวในแต่ละครั้งของการวัดขนาดอนุภาค และอนุภาคไทเทเนียมมีขนาดใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร เมื่อเวลาผ่านไป 82 วัน หลังจากการสังเคราะห์ไทเทเนียมโซล สำหรับขนาดของอนุภาคไทเทเนียมที่ใหญ่ที่สุดวัดได้มีขนาดประมาณ 600 นาโนเมตร เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 110 วัน หลังจากการสังเคราะห์โซล ต่อจากนั้นไทเทเนียมโซลเริ่มเปลี่ยนเป็นเจล ซึ่งผลการวัดขนาดของอนุภาคไทเทเนียมทำให้ทราบถึงช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการใช้ไทเทเนียมโซล โดยไทเทเนียมโซลที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการสำหรับการทดลองนี้มีอายุการใช้งานได้ประมาณ 3 เดือน ก่อนโซลที่สังเคราะห์ได้จะเปลี่ยนเป็นเจล

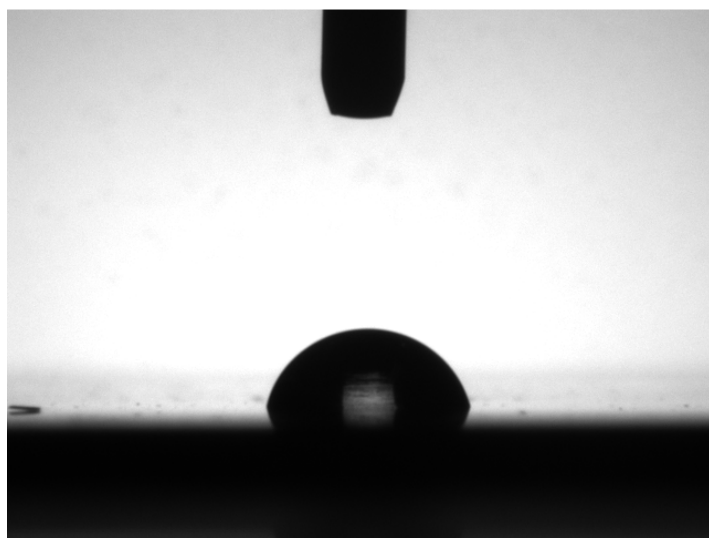
#### 4.2 การวัดค่า contact angle ของชิ้นงานหลัก

ผลการทดลองวัดค่า contact angle ของชิ้นงานหลักตัวอย่างที่ไม่เคลือบผิวและเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโซลโดยใช้น้ำหยดลงบนผิวชิ้นงานตัวอย่าง แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 – 4.7

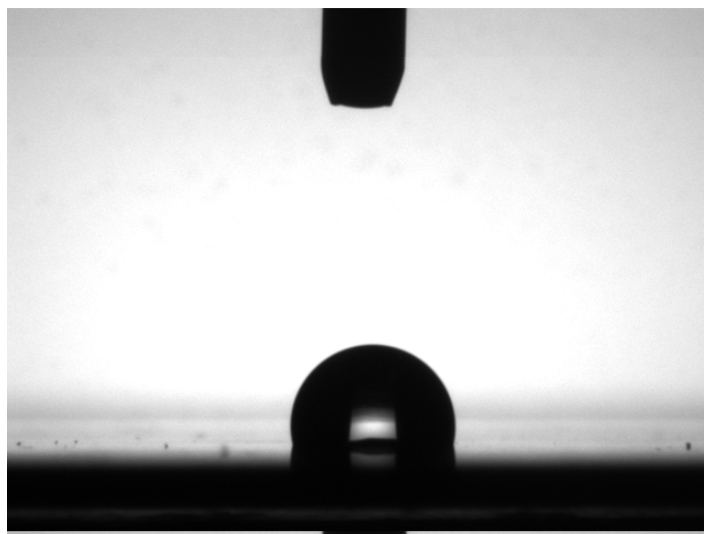




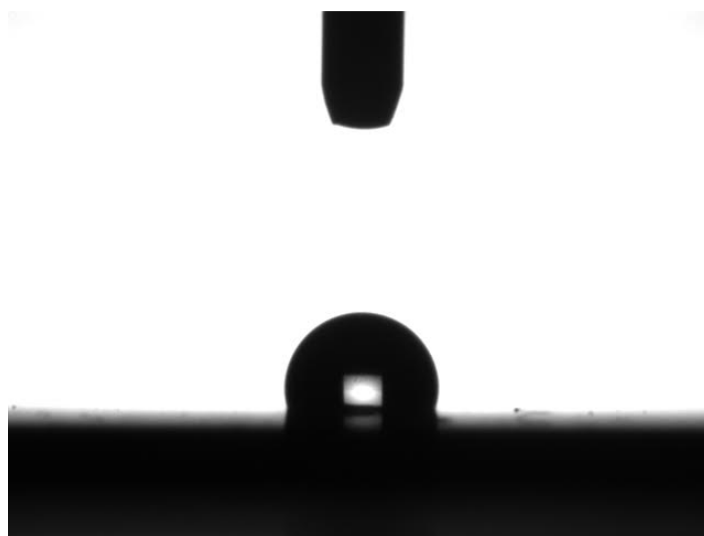
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวชิ้นงานเหล็ก (ตัวอย่าง Fe)



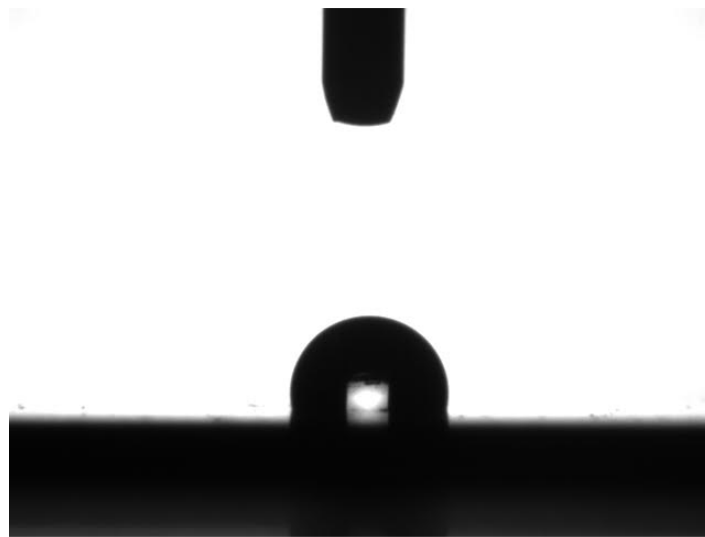
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไฮดรอกไซด์และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน (ตัวอย่าง Fe-TiO<sub>2</sub>-rt)



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียม โซลและอบที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ( $\text{Fe-TiO}_2\text{-100}$ )



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยสารประกอบไฮบริด โซลเจลและทิ้งไว้ที่ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คีน (ตัวอย่าง Fe-Hybrid-rt)



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยสารประกอบไฮบริด โพลีเอทิลีนไกลคอลและอบที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ตัวอย่าง Fe-Hybrid-100)

ตารางที่ 4.1 ค่า contact angle ของชิ้นงานเหล็กตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ค่า contact angle (องศา)
Fe	96.7
Fe-TiO <sub>2</sub> -rt	75.6
Fe-TiO <sub>2</sub> -100	111.1
Fe-Hybrid-rt	105.7
Fe-Hybrid-100	104.2

- หมายเหตุ Fe คือ ชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิว
- Fe-TiO<sub>2</sub>-rt คือ ชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียม โพลีเอทิลีนไกลคอลและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน
- Fe-TiO<sub>2</sub>-100 คือ ชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียม โพลีเอทิลีนไกลคอลและอบที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- Fe-Hybrid-rt คือ ชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฮบริด โพลีเอทิลีนไกลคอลและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน
- Fe-Hybrid-100 คือ ชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฮบริด โพลีเอทิลีนไกลคอลและอบที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่า contact angle ของชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิวและชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโพลีเอทิลีน พบว่าชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโพลีเอทิลีนและทิงไว้ที่อุณหภูมิห้องมีค่า contact angle ประมาณ 75.6 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโพลีเอทิลีนมีค่า contact angle ประมาณ 96.7 องศา ทั้งนี้เป็นเพราะผิวเคลือบที่เกิดจากการเปลี่ยนจากโพลีเอทิลีนเป็นไทเทเนียมโพลีเอทิลีนมีความพรุนตัวสูง จึงเป็นไปได้ว่าน้ำสามารถแทรกลงในผิวของไทเทเนียมโพลีเอทิลีนได้ อย่างไรก็ตามสภาพที่ขรุขระของผิวชิ้นงานเหล็กที่เคลือบด้วยไทเทเนียมโพลีเอทิลีนลดลงหรือค่า contact angle เพิ่มขึ้นเมื่อมีการอบชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโพลีเอทิลีนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยค่า contact angle เพิ่มขึ้นเป็น 111.1 องศา ทั้งนี้เป็นเพราะการอบชิ้นงานทำให้ไทเทเนียมโพลีเอทิลีนบนผิวเหล็กหดตัวทำให้ความพรุนตัวของผิวเคลือบลดลง สำหรับชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารประกอบไฮบริดโพลีเอทิลีนเจลทั้งแบบที่ทิงไว้ที่อุณหภูมิห้องและที่อบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส มีค่า contact angle ประมาณ 105.7 และ 104.2 องศาตามลำดับ สูงกว่าค่า contact angle ของชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิวเล็กน้อย เนื่องจากไฮบริดโพลีเอทิลีนเจลมีพอลิไวนิลบิวทีเรตเป็นองค์ประกอบทำให้ชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยไฮบริดโพลีเอทิลีนเจลมีสภาพที่ไม่ขรุขระสูงขึ้นเนื่องจากพอลิไวนิลบิวทีเรตเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ ค่า contact angle ของผิวชิ้นงานแต่ละประเภททำให้ทราบถึงแนวโน้มในการเปียกผิวด้วยสีที่ใช้พ่นหรือทาเหล็ก

### 4.3 การยึดติดของสีอะคริลิกชนิดสเปรย์บนชิ้นงานเหล็ก

#### 4.3.1 ตัวอย่างชิ้นงานเหล็กที่ไม่มีสารเคลือบผิวก่อนพ่นสีอะคริลิกบนชิ้นงานเหล็ก

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการยึดติดสีอะคริลิกชนิดสเปรย์บนแผ่นเหล็กที่ไม่เคลือบผิว

ตัวอย่าง	การขัดผิวชิ้นงานก่อนพ่นสี	ความหนาของสี ( $\mu\text{m}$ )	ร้อยละของพื้นที่สีที่หลุดลอก	กลุ่มตาม ASTM D3359-09
Blank A1	ไม่ขัดผิว	21.3	88.8	0B
Blank A2	ไม่ขัดผิว	25.2	47.4	2B
Blank A3	ไม่ขัดผิว	26.6	60.7	1B
Blank-PA1	ขัดผิวด้วยกระดาษทราย	21.4	11.4	3B
Blank-PA2	ขัดผิวด้วยกระดาษทราย	18.7	13.2	3B
Blank-PA3	ขัดผิวด้วยกระดาษทราย	20.7	15.5	2B

การทดลองนี้มีการขัดผิวชิ้นงานเหล็กบางชิ้นด้วยกระดาษทรายเนื่องจาก ชิ้นงานเหล็กบางชิ้นมี สนิมเกิดขึ้นระหว่างที่เก็บไว้ก่อนการทดลอง ดังนั้นการขัดชิ้นงานเหล็กนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อการขจัด สนิมเหล็ก อย่างไรก็ตามชิ้นเหล็กที่ถูกขัดเกิดรอยจากการขัด ทำให้ผิวเหล็กมีลักษณะไม่เรียบเหมือน ชิ้นงานตัวอย่างเริ่มต้น แต่เมื่อทดลองพ่นสีบนผิวชิ้นงานเหล็กทั้ง 2 ชนิด พบว่าชิ้นงานเหล็กที่ขัดผิว (ตัวอย่าง Blank PA1, Blank PA2 และ Blank PA3) แสดงการยึดติดกับสีได้ดีกว่าชิ้นงานเหล็กที่ไม่ขัด ผิว (ตัวอย่าง Blank A1, Blank A2 และ Blank A3) โดยชิ้นงานที่ขัดผิวมีการยึดติดสีอยู่ในกลุ่ม 2B และ 3B ในขณะที่ชิ้นงานเหล็กที่ไม่ขัดผิวมีการยึดติดสีอยู่ในกลุ่ม 0B, 1B และ 2B ดังตารางที่ 4.2 ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากลักษณะความเรียบหรือความขรุขระของผิวเหล็กที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อการยึดติด ของชิ้นงานเหล็กกับสี ดังนั้นเพื่อให้ชิ้นงานมีความสม่ำเสมอทุกชิ้นงานการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้ วิธีการกำจัดสนิมเหล็กด้วยการแช่ชิ้นงานตัวอย่างที่เกิดสนิมในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความ เข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตร

#### 4.3.2 ตัวอย่างชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยโซลเจลก่อนพ่นสีอะคริลิกบนชิ้นงานเหล็ก

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการยึดติดของสีอะคริลิกชนิดสเปรย์กับแผ่นเหล็กที่เคลือบผิวด้วยโซลเจล

ตัวอย่าง	ชนิดของ สารเคลือบ	อัตราเร็ว การจุ่ม (mm min <sup>-1</sup> )	การอบ ชิ้นงานก่อน ทาสี	ความ หนาของ สี (μm)	ร้อยละของ พื้นที่สีที่ หลุดลอก	กลุ่มตาม ASTM D3359-09
Blank A1	-		-	26.5	88.7	0B
Blank A2	-		-	28.2	47.4	2B
Blank A3	-		-	23.5	60.7	1B
AT-slow-rt (1)	TiO <sub>2</sub>	100	อุณหภูมิห้อง	14.3	95	0B
AT-slow-rt(2)	TiO <sub>2</sub>	100	อุณหภูมิห้อง	17.2	51.3	1B
AT-slow-rt(3)	TiO <sub>2</sub>	100	อุณหภูมิห้อง	12.5	98.8	0B
AT-slow-100(1)	TiO <sub>2</sub>	100	100 °C	25.9	98.9	0B
AT-slow-100(2)	TiO <sub>2</sub>	100	100 °C	12.6	98.8	0B
AT-slow-100(3)	TiO <sub>2</sub>	100	100 °C	14.7	98.7	0B
AT-fast-rt(1)	TiO <sub>2</sub>	1600	อุณหภูมิห้อง	40.6	8.8	3B
AT-fast-rt(2)	TiO <sub>2</sub>	1600	อุณหภูมิห้อง	41.2	7.0	3B
AT-fast-rt(3)	TiO <sub>2</sub>	1600	อุณหภูมิห้อง	38.2	7.9	3B
AT-fast-100(1)	TiO <sub>2</sub>	1600	100 °C	62.2	18.3	2B

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ผลการทดสอบการยึดติดของสีอะคริลิกชนิดสเปรย์กับแผ่นเหล็กที่เคลือบผิวด้วยโซลเจล

ตัวอย่าง	ชนิดของสารเคลือบ	อัตราเร็วการจุ่ม (mm min <sup>-1</sup> )	การอบขึ้นงานก่อนทาสี	ความหนาของสี (μm)	ร้อยละของพื้นที่สีที่หลุดลอก	กลุ่มตาม ASTM D3359-09
AT-fast-100(2)	TiO <sub>2</sub>	1600	100 °C	50.1	12.9	3B
AT-fast-100(3)	TiO <sub>2</sub>	1600	100 °C	57.6	11.4	3B
ATP-slow-rt(1)	Hybrid	100	อุณหภูมิห้อง	22.0	86.5	0B
ATP-slow-rt(2)	Hybrid	100	อุณหภูมิห้อง	16.8	18	2B
ATP-slow-rt(3)	Hybrid	100	อุณหภูมิห้อง	17.3	74.6	0B
ATP-slow-100(1)	Hybrid	100	100 °C	28.6	15.4	3B
ATP-slow-100(2)	Hybrid	100	100 °C	26.9	11.4	3B
ATP-slow-100(3)	Hybrid	100	100 °C	13.0	3	4B

จากตารางที่ 4.3 ขึ้นงานที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโซลเจลโดยใช้อัตราการจุ่มเคลือบผิวที่ต่ำทั้งแบบที่ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง (ตัวอย่าง AT-slow-rt (1), AT-slow-rt (2) และ AT-slow-rt (3)) และที่อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (ตัวอย่าง AT-slow-100(1), AT-slow-100(2) และ AT-slow-100(3)) มีค่าการยึดติดกับสีที่ต่ำมาก หรือเกือบไม่ยึดติดกับสีเลย คือส่วนใหญ่มีค่าการยึดติดกับสีอยู่ในกลุ่ม 0B แต่ผลการยึดติดกับสีดีขึ้นเมื่ออัตราเร็วในการจุ่มเคลือบผิวสูงขึ้น (ตัวอย่าง AT-fast-rt(1), AT-fast-rt(2) และ AT-fast-rt(3) และ AT-fast-100(1), AT-fast-100(2) และ AT-fast-100(3)) ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะ อัตราเร็วในการจุ่มเคลือบผิวที่สูงขึ้นทำให้ผิวเคลือบโซลเจลหนาขึ้น ทำให้สียึดเกาะกับผิวไทเทเนียมได้ดี เนื่องจากไทเทเนียมออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจึงทำให้เกิดพันธะได้ดีกับทั้งเหล็กและสีประเภทอะคริลิกเรซิน ส่วนตัวอย่างขึ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารประกอบไฮบริดโซลเจลแสดงการยึดติดที่ดีขึ้นกว่าขึ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโซลเจลเมื่อมีการอบขึ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส คือมีการยึดติดอยู่ในกลุ่ม 3B และ 4B

#### 4.4 การยึดติดของสีน้ำมันบนชิ้นงานเหล็ก

##### 4.4.1 ตัวอย่างชิ้นงานเหล็กที่ไม่มีสารเคลือบผิวก่อนทาสีน้ำมันบนชิ้นงานเหล็ก

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการยึดติดสีน้ำมัน (Oil paint) กับแผ่นเหล็กที่ไม่เคลือบผิว

ตัวอย่าง	การขัดผิวชิ้นงานก่อนพ่นสี	ความหนาของสี ( $\mu\text{m}$ )	ร้อยละของพื้นที่สีที่หลุดลอก	กลุ่มตามASTM D3359-09
Blank O1	ไม่ขัดผิว	67.5	48.2	1B
Blank O2	ไม่ขัดผิว	57.9	47.4	1B
Blank O3	ไม่ขัดผิว	44.4	64.2	1B
Blank-PO1	ขัดผิวด้วยกระดาษทราย	49.7	36.0	1B
Blank-PO2	ขัดผิวด้วยกระดาษทราย	44.9	30.9	2B
Blank-PO3	ขัดผิวด้วยกระดาษทราย	41.5	35.0	1B

จากตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการยึดติดของชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียม โคลก่อนการทาสี พบว่า ชิ้นงานทั้งแบบที่ไม่มีการขัดผิวและที่มีการขัดผิวด้วยกระดาษทราย แสดงระดับการยึดติดกับสีน้ำมันอยู่ในระดับเดียวกัน คืออยู่ในกลุ่ม 1B เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับความเรียบของผิวชิ้นงานไม่ได้ส่งผลกระทบต่ออย่างเห็นได้ชัดต่อการยึดติดของชิ้นงานเหล็กกับสีน้ำมัน อย่างไรก็ตามการทดลองต่อไปเลือกใช้การกำจัดสนิมของเหล็กด้วยการล้างด้วยกรดเช่นเดียวกับการทดลองข้างต้นซึ่งใช้กับสีอะคริลิกชนิดสปรย์เพื่อให้ชิ้นงานมีความสม่ำเสมอตลอดการทดลอง

#### 4.4.2 ตัวอย่างชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยโซลเจลก่อนทาสีน้ำมันบนชิ้นงานเหล็ก

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการยึดติดของสีน้ำมันกับแผ่นเหล็กที่เคลือบผิวด้วยโซลเจล

ตัวอย่าง	ชนิดของสารเคลือบ	อัตราเร็วการจุ่ม (mm min <sup>-1</sup> )	การอบชิ้นงานก่อนทาสี	ความหนาของสี (μm)	ร้อยละของพื้นที่สีที่หลุดลอก	กลุ่มตาม ASTM D3359-09
Blank O1	-		-	67.5	48.2	1B
Blank O2	-		-	57.9	47.4	1B
Blank O3	-		-	44.4	64.2	1B
OT-slow-rt (1)	TiO <sub>2</sub>	100	อุณหภูมิห้อง	78.0	60.6	1B
OT-slow-rt(2)	TiO <sub>2</sub>	100	อุณหภูมิห้อง	97.7	69.5	0B
OT-slow-rt(3)	TiO <sub>2</sub>	100	อุณหภูมิห้อง	77.2	48.5	1B
OT-slow-100(1)	TiO <sub>2</sub>	100	100 °C	107.1	65.6	0B
OT-slow-100(2)	TiO <sub>2</sub>	100	100 °C	111.2	72.6	0B
OT-slow-100(3)	TiO <sub>2</sub>	100	100 °C	74.1	71.3	0B
OT-fast-rt(1)	TiO <sub>2</sub>	1600	อุณหภูมิห้อง	77.4	24.6	2B
OT-fast-rt(2)	TiO <sub>2</sub>	1600	อุณหภูมิห้อง	106.0	20.3	2B
OT-fast-rt(3)	TiO <sub>2</sub>	1600	อุณหภูมิห้อง	133.0	20.6	2B
OT-fast-100(1)	TiO <sub>2</sub>	1600	100 °C	132.0	16.9	2B
OT-fast-100(2)	TiO <sub>2</sub>	1600	100 °C	136.0	23.8	2B
OT-fast-100(3)	TiO <sub>2</sub>	1600	100 °C	126.0	25.3	2B
OTP-slow-rt(1)	Hybrid	100	อุณหภูมิห้อง	95.5	64.6	1B
OTP-slow-rt(2)	Hybrid	100	อุณหภูมิห้อง	48.4	34.0	1B
OTP-slow-rt(3)	Hybrid	100	อุณหภูมิห้อง	94.7	44.2	1B
OTP-slow-100(1)	Hybrid	100	100 °C	64.4	41.5	1B
OTP-slow-100(2)	Hybrid	100	100 °C	65.1	54.8	1B
OTP-slow-100(3)	Hybrid	100	100 °C	55.3	37.5	1B



จากตารางที่ 4.5 ตัวอย่างที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโซลและไฮบริดโซลเจล ไม่แสดงผลในการปรับปรุงสมบัติการยึดติดกับสีอย่างชัดเจน โดยชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโซลและไฮบริดโซลเจล แสดงผลการยึดติดกับสีน้ำมันในระดับเดียวกับชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิว คือการยึดติดกับสีอยู่ในระดับ 1B มีเพียงชิ้นงานตัวอย่างที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโซลและไฮอัคราเร็วในการเคลือบที่เร็ว (ตัวอย่าง OT-fast-rt(1), OT-fast-rt(2) และ OT-fast-rt(3) และตัวอย่าง OT-fast-100(1), OT-fast-100(2) OT-fast-100(3)) เท่านั้นที่แสดงผลในการปรับปรุงการยึดติดกับสีน้ำมันบ้างเล็กน้อย คือการยึดติดกับสีอยู่ในระดับ 2B ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะปัจจัยจากความหนาของผิวเคลือบที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วของการจุ่มเคลือบผิวสูงขึ้น ทำให้การยึดเกาะกับผิวเหล็กและสีดีขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการยึดติดของสีกับผิวเหล็กจากผลการทดลองที่ดีที่สุดเมื่อใช้สีแต่ละชนิดจะเห็นว่าชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวไทเทเนียมโซลหรือไฮบริดโซลเจลก่อนการพ่นด้วยสีอะคริลิกแสดงค่าการยึดติดกับสีอยู่ที่ระดับ 3B ถึง 4B ซึ่งสูงกว่าชิ้นงานที่ทำด้วยสีน้ำมัน โดยมีค่าการยึดติดที่ดีที่สุดอยู่ในระดับ 2B ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะสีอะคริลิกและสีน้ำมันใช้ส่วนผสมของเรซินต่างกัน โดยสีอะคริลิกใช้ อะคริลิกเรซิน (Acrylic resin) ในขณะที่สีน้ำมันใช้อัลคิเดเรซิน (Alkyd resin) ส่งผลให้ความสามารถในการยึดติดระหว่างเหล็กกับโซลเจล และโซลเจลกับสีต่างกัน สำหรับการทดลองนี้ทำให้ทราบว่า ไทเทเนียมโซลและไฮบริดโซลเจลที่เตรียมได้ เหมาะกับการใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดติดของเหล็กกับสีอะคริลิกมากกว่าการใช้งานกับสีน้ำมัน

#### 4.5 ความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบละอองเกลือของชิ้นงานเหล็กเคลือบสีหลังจากผ่านการเคลือบโซลเจล

ผลการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนแบบละอองเกลือของชิ้นงานเหล็กชุบสีที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยโซลเจลก่อนทำการพ่นสีอะคริลิกแสดงดังตารางที่ 4.6 โดยชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโซลและชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารประกอบไฮบริดโซลเจลก่อนการทดสอบ ชิ้นงานทุกชิ้นมีรอยกาบยาบนพื้นผิวและไม่มีคราบสนิมก่อนการทดสอบ เมื่อเวลาการทดสอบผ่านไป 24 ชั่วโมง ชิ้นงานทุกชิ้นมีสนิมสีน้ำตาลแดงเกิดขึ้นบริเวณรอยกาบยา โดยปริมาณสนิมแดงบนพื้นผิวชิ้นงาน Blank มีปริมาณมากกว่าชิ้นงานอื่น และเมื่อเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้นพบว่า มีสนิมสีน้ำตาลแดงบนชิ้นงาน Blank เต็มพื้นที่ชิ้นงานทดสอบ และมีปริมาณมากกว่าชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโซลและสารประกอบไฮบริดโซลเจล แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยโซลเจลและไฮบริดโซลเจลก่อนทำการพ่นสีอะคริลิกสามารถต้านทานการกัดกร่อนแบบละอองเกลือได้ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบโซลเจล และจากผลการทดสอบ salt spray เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโซลโดยไฮอัคราเร็วในการจุ่มเคลือบผิวที่ 1600 มิลลิเมตรต่อวินาทีและอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (AT-fast-100) มีแนวโน้มต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าชิ้นงานอื่นๆ

ตารางที่ 4.6 ลักษณะชิ้นงานเหล็กพ่นเคลือบสีอะคริลิกหลังผ่านการเคลือบโซลเจล ก่อนและหลังการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM B117

จำนวน ชั่วโมง	Blank	AT -slow-rt	AT -slow-100	ATP -slow-rt	ATP -slow-100	AT -fast-rt	AT -fast-100
0 h							
24 h							
72 h							

ผลการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนแบบละอองเกลือของชิ้นงานเหล็กชุบที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยโซลเจลก่อนการทำสีน้ำมันแสดงดังตารางที่ 4.7 โดยชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมโซลเจลและชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารประกอบไฮบริดโซลเจลก่อนการทดสอบ ชิ้นงานทุกชิ้นมีรอยกาบบาทบนพื้นผิวและไม่มีคราบสนิมก่อนการทดสอบ ที่เวลาการทดสอบ 24 ชั่วโมง บริเวณรอยกริดของชิ้นงานทุกชิ้น มีสนิมสีน้ำตาลแดงเกิดขึ้น และมีคราบสนิมสีน้ำตาลแดงไหลเป็นทางยาวบนพื้นผิว ปริมาณสนิมบริเวณรอยกริดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้น ที่เวลาการทดสอบ 72 ชั่วโมง ปริมาณสนิมของชิ้นงาน ไม่แตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิวด้วยโซลเจล โดยไม่แสดงผลในการปรับปรุงสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.7 ลักษณะชิ้นงานเหล็กทาสีน้ำมันหลังผ่านการเคลือบโซลเจล ก่อนและหลังการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM B117

จำนวนชั่วโมง	Blank	OT -slow-rt	OT -slow-100	OTP -slow-rt	OTP -slow-100	OT -fast-rt	OT -fast-100
0 h							
24							
72							

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ไทเทเนียซัลที่สังเคราะห์ได้สำหรับการทดลองนี้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไทเทเนียประมาณ 8 นาโนเมตร ซึ่งเป็นอนุภาคเฉลี่ยที่วัดได้หลังการสังเคราะห์ประมาณ 5 วัน อนุภาคไทเทเนียมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยอนุภาคไทเทเนียมีขนาดใหญ่ที่สุดที่วัดได้ประมาณ 600 นาโนเมตร หลังการสังเคราะห์ประมาณ 110 วัน ดังนั้นไทเทเนียที่สังเคราะห์ได้มีอายุในการเก็บได้ประมาณ 3 เดือน

การเคลือบผิวเหล็กด้วยไทเทเนียซัลทำให้ค่า contact angle ของผิวเหล็กเปลี่ยนไป โดยค่า contact angle ของเหล็กที่ไม่เคลือบผิวมีค่าประมาณ 90 องศา เมื่อเคลือบผิวเหล็กด้วยไทเทเนียซัลค่า contact angle ของเหล็กที่เคลือบผิวลดลงเหลือเพียง 75 องศา แต่ค่า contact angle ของเหล็กเพิ่มขึ้นได้เมื่อเคลือบผิวเหล็กด้วยด้วยไทเทเนียซัลและอบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส หรือเคลือบผิวเหล็กด้วยไฮบริดโซลเจล โดย contact angle มีค่ามากกว่า 100 องศา

การทดสอบการยึดติดของสีอะคริลิกชนิดสเปรย์กับผิวเหล็ก พบว่าชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิวด้วยซัลมีการยึดติดกับสีอะคริลิกอยู่ในระดับต่ำคือ อยู่ในระดับ 0B, 1B และ 2B ส่วนสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบผิวเหล็กที่ปรับปรุงการยึดติดของสีอะคริลิก คือการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียซัลโดยใช้อัตราเร็วในการจุ่มเคลือบผิวที่ 1600 มิลลิเมตรต่อนาที โดยผลการยึดติดอยู่ระดับ 3B ส่วนการเคลือบผิวด้วยไฮบริดโซลเจลที่อัตราการจุ่มเคลือบผิวที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที และอบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ช่วยการยึดติดสีอะคริลิกดีขึ้นเช่นกัน โดยให้ผลการยึดติดในระดับ 3B และ 4B

การทดสอบการยึดติดของสีน้ำมันกับผิวเหล็ก พบว่าชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิวด้วยซัลมีการยึดติดกับสีน้ำมันอยู่ในระดับต่ำ คืออยู่ในระดับ 1B การเคลือบผิวด้วยไทเทเนียซัลช่วยปรับปรุงการยึดติดกับสีน้ำมันได้เพียงเล็กน้อย เมื่อชิ้นงานตัวอย่างเคลือบผิวด้วยไทเทเนียซัลโดยใช้อัตราเร็วในการจุ่มเคลือบผิวที่ 1600 มิลลิเมตรต่อนาที โดยผลการยึดติดอยู่ในระดับ 2B

การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนแบบละอองเกลือ พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยโซลเจลและไฮบริดโซลเจลก่อนทำการพ่นสีอะคริลิกสามารถต้านทานการกัดกร่อนแบบละอองเกลือได้ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบโซลเจล โดยชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียซัลโดยใช้อัตราเร็วในการจุ่มเคลือบผิวที่ 1600 มิลลิเมตรต่อนาที และอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าชิ้นงานอื่นๆ สำหรับกรณีของชิ้นงานเหล็กที่ทำการทาสีน้ำมันพบว่า การเคลือบผิวด้วยโซลเจลก่อนการทาสีไม่แสดงผลในการปรับปรุงสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนอย่างชัดเจน

## เอกสารอ้างอิง

1. P. A. Schweitzer, Fundamentals of corrosion : mechanisms, causes, and preventative methods. pp. 5-6. CRC Press, 2010.
2. P.R. Roberge, Corrosion engineering : principles and practice. 1<sup>st</sup> ed. pp. 19-33. The McGraw-Hill Companies, Inc., USA, 2008.
3. D. Landolt, Corrosion and surface chemistry of metals. pp.1-13. EFPL Press, 2007.
4. P.A. Schweitzer, Atmospheric Degradation and Corrosion Control. New York: Marcel Dekker, 1999.
5. P. Ghosh, Adhesives and coatings technology. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
6. D.G. Weldon, Failure analysis of paints and coatings. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd., 2002.
7. อรุณา สรวารี. สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
8. P.A. Schweitzer, Corrosion-resistant linings and coatings. New York: Marcel Dekker, Inc., 2001.
9. Jr. Z.W. Wicks, F.N. Jones, S.P. Pappas, D.A. Wicks, Organic Coatings: Science and technology. 3<sup>rd</sup> Ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
10. P. A. Schweitzer, Fundamentals of corrosion: mechanisms, causes, and preventative methods. Florida: CRC Press, 2010.
11. R.W. Jones, Fundamental Principles of Sol-Gel Technology, The Institute of Metals, London. 1989.
12. M. Atik, P. L. Neto, L.A. Avacaa and M.A. Aegertera, *Ceram. Int.* 1995, **21**, 403.
13. R. Di Maggio, L. Fedrizzi, S. Rossi and P. Scardi, *Thin Solid Films*, 1996, **286**, 127.
14. R.L. Parkhill, E.T. Knobbe and M.S. Donley, *Prog. Org. Coat.*, 2001, **41**, 261.
15. T.L. Metroke, O.Kachurina and E.T. Knobbe, *Prog. Org Coat.*, 2002, **44**, 295.
16. M. Fallet, H. Mahdjoub, B. Gautier and J.-P. Bauer, *J. Non-Crys. Solids.*, 2001, **293**, 527.
17. Y.Chen, L. Jin and Y. Xie, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 1998, **13**, 735.
18. P. Galliano, J.J.D. Damborenea, M.J. Pascual, A. Duran, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 1998, **13**, 723.
19. D.C.L. Vasconcelos, J.A.N. Carvalho, M. Mantel, W.L. Vasconcelos, *J. Non-Cryst. Solids.*, 2000, **273**, 135.

20. H.Li, K. Liang, L. Mei, S. Gu, S. Wang, *J. Mater. Sci. Lett.*, 2001, **20**, 1081.
21. L. Fedrizzi, F.J. Rodriguez, S. Rossi, F. Deflorian, R.D. Maggio, *Electrochim. Acta.*, 2001, **46**, 3715.
22. F. Perdomo, P.D. Lima, M.A. Aegerter, L.A. Avaca, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 1999, **15**, 87.
23. J. Masalski, J. Gluszek, J. Zabrzski, K. Nitsch, P. Gluszek., *Thin Solid Film.*, 1999, **349**, 186.
24. Varela Caselis, J.L., Rubio Rosas, E., Castaño Menese, V.M. Hybrid PMMA-silica anticorrosive coatings for stainless steel 316L. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 47 (2012): 131-137.
25. Salahinejad, E., Hadianfard, M.J., Macdonald, D.D., Mozafari, M., Vashae, D., Tayebi, L., A new double-layer sol-gel coating to improve the corrosion resistance of a medical-grade stainless steel in a simulated body fluid. *Materials Letters* 97(2013): 162-165.
26. Gichuhi, T., Balgeman, A., Adams, A., Prince, S. Hybrid sol-gel corrosion inhibitors: A novel approach to corrosion inhibitors for coating. *JCT Coatings Tech* Apr (2009): 24-29.

### ภาคผนวก

ก. ข้อมูลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคไททาเนียในโซล

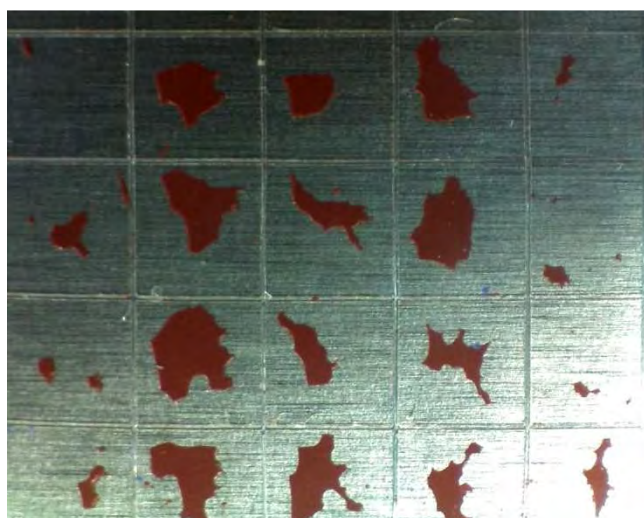
ตารางที่ ผ1 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไทเทเนียในโซล

วันที่วัดขนาด	ระยะเวลาจากวันสังเคราะห์ (วัน)	ขนาดเฉลี่ยที่วัดได้ (nm)
23 ก.ย. 2556	5	8.0
8 ต.ค. 2556	20	16.8
24 ต.ค. 2556	36	25.8
8 พ.ย. 2556	51	42.8
25 พ.ย. 2556	68	74.9
9 ธ.ค. 2556	82	115.8
24 ธ.ค. 2556	97	215.1
6 ม.ค. 2557	110	599.3

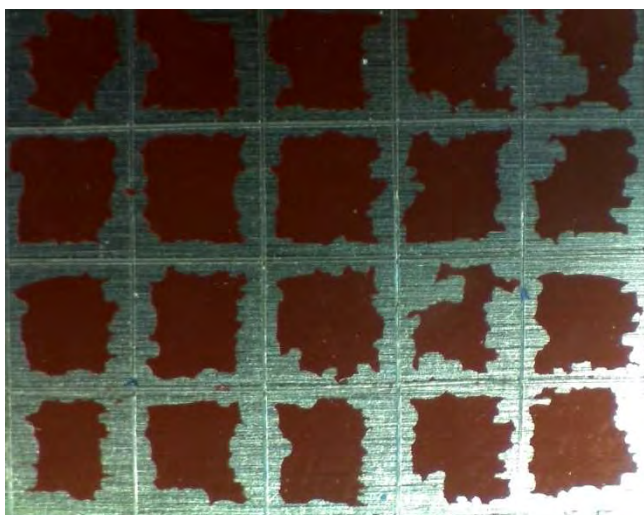
หมายเหตุ ไทเทเนียโซลสังเคราะห์เมื่อวันที่ 18 ก.ย. 2556

ข. ภาพถ่ายผลการทดสอบการยึดติดของสีด้วยวิธี Tape test

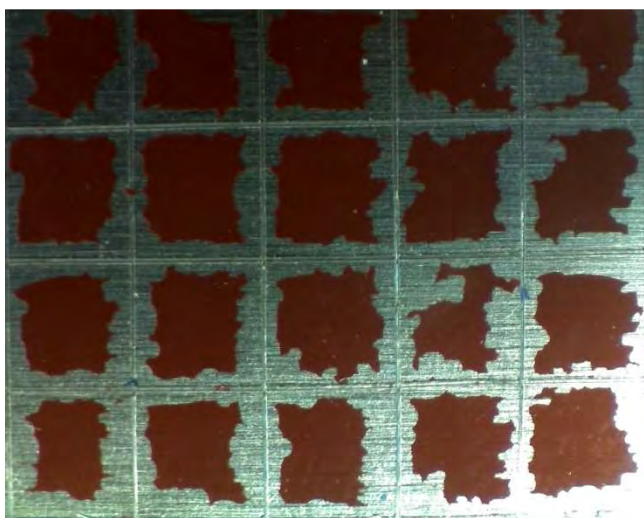
ข (1) สีอะคริลิกชนิดสเปรย์



รูปที่ ผ1 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิวด้วยโซล ฟันด้วยสีสเปรย์ ตัวอย่างที่ 1 (Blank A1)

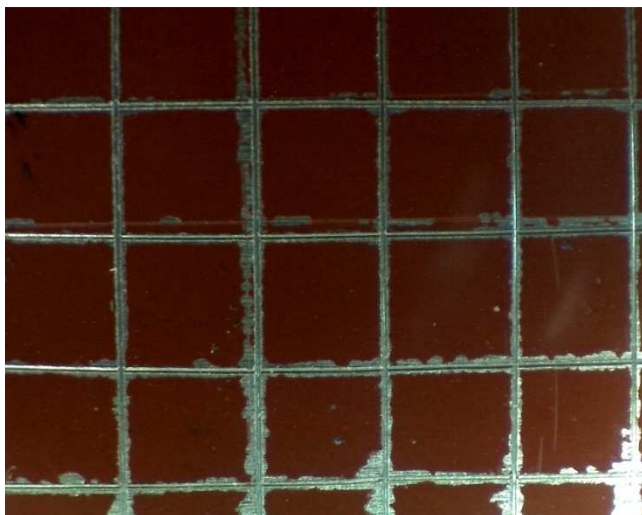


รูปที่ ผ2 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิวด้วยโซล ฟันด้วยสีสเปรย์ ตัวอย่างที่ 2 (Blank A2)

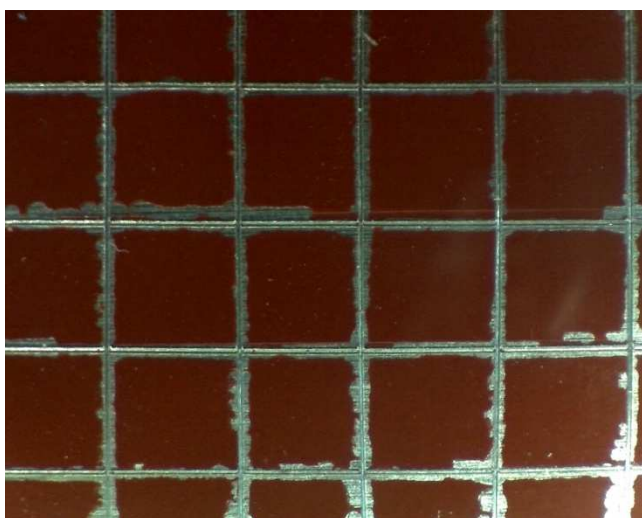


รูปที่ ผ3 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิวด้วยโซล ฟันด้วยสีสเปรย์ ตัวอย่างที่ 3 (Blank A3)

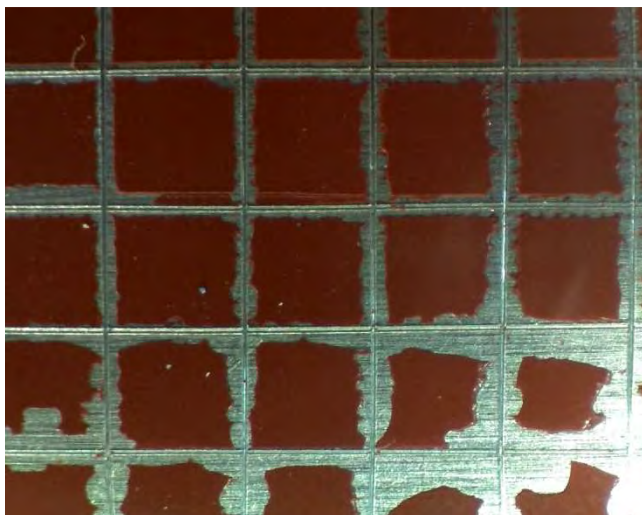




รูปที่ ๗4 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่มีการขัดผิวด้วยกระดาษทรายและไม่เคลือบผิวด้วยโซล ฟันด้วยสีสเปรย์  
ตัวอย่างที่ 1 (Blank PA1)



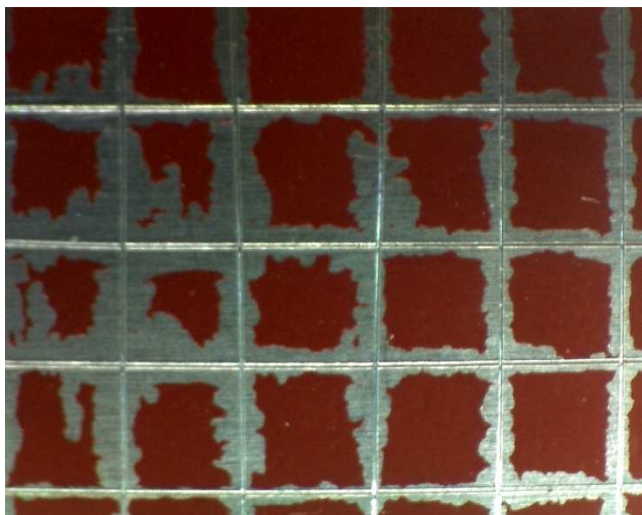
รูปที่ ๗5 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่มีการขัดผิวด้วยกระดาษทรายและไม่เคลือบผิวด้วยโซล ฟันด้วยสีสเปรย์  
ตัวอย่างที่ 2 (Blank PA2)



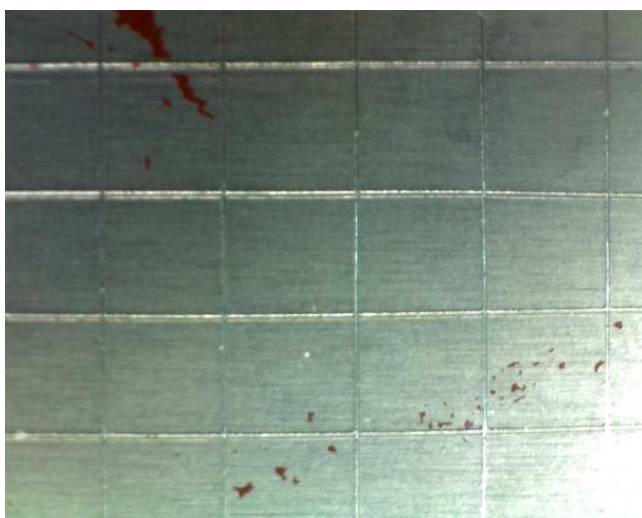
รูปที่ ๗6 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่มีการขัดผิวด้วยกระดาษทรายและไม่เคลือบผิวด้วยโซล ฟันด้วยสีสเปรย์  
ตัวอย่างที่ 3 (Blank PA3)



รูปที่ ๗7 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวดำ ฟันด้วยสีสเปรย์  
ตัวอย่างที่ 1 (AT-slow-rt(1))



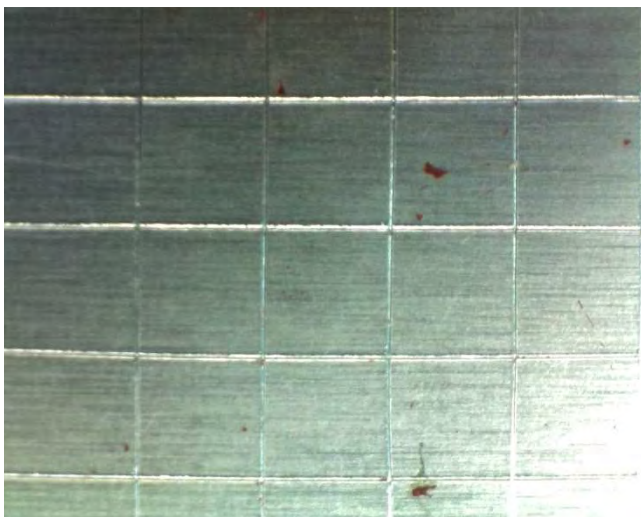
รูปที่ ผ8 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ ฟันด้วยสปีดเปอร์ย  
ตัวอย่างที่ 2 (AT-slow-rt(2))



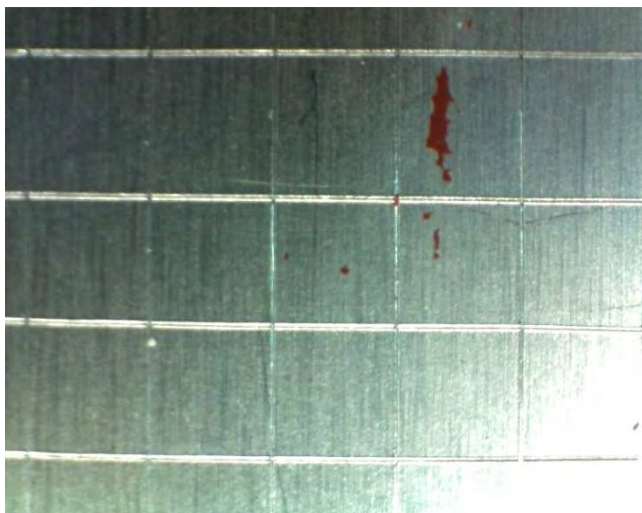
รูปที่ ผ9 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ ฟันด้วยสปีดเปอร์ย  
ตัวอย่างที่ 3 (AT-slow-rt(3))



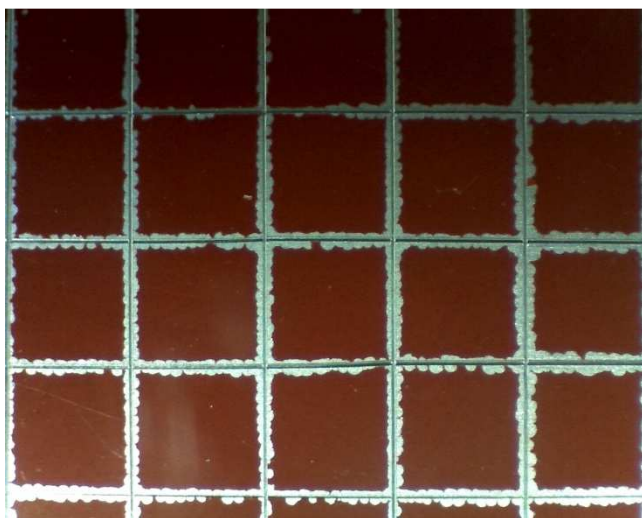
รูปที่ ผ10 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ ออบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ 1 (AT-slow-100(1))



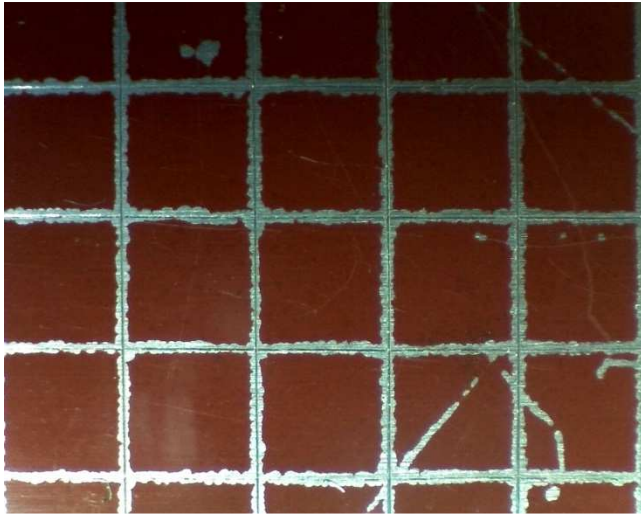
รูปที่ ผ11 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ ออบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ฟันด้วยสิสเปรย์ ตัวอย่างที่ 2 (AT-slow-100(2))



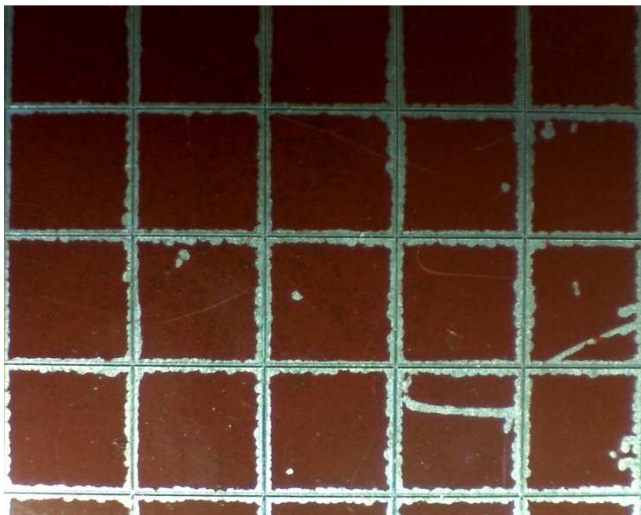
รูปที่ ผ12 ภาพถ่ายชิ้นงานหลักที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ อบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ฟ้นด้วยลีสเปรย์ ตัวอย่างที่ 3 (AT-slow-100(3))



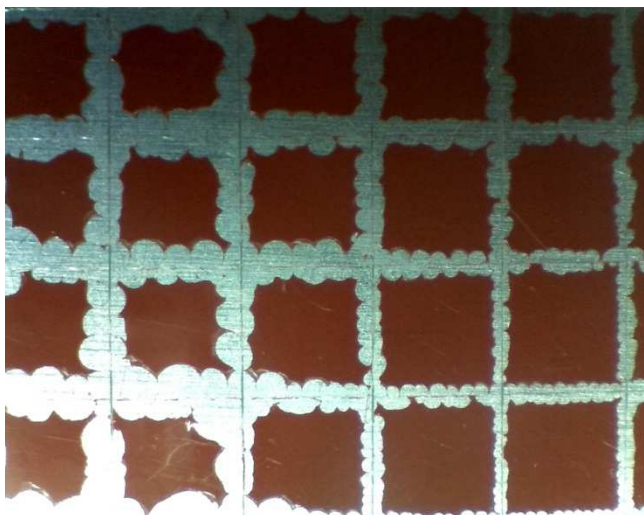
รูปที่ ผ13 ภาพถ่ายชิ้นงานหลักที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวสูง ฟ้นด้วยลีสเปรย์ ตัวอย่างที่ 1 (AT-fast-rt(1))



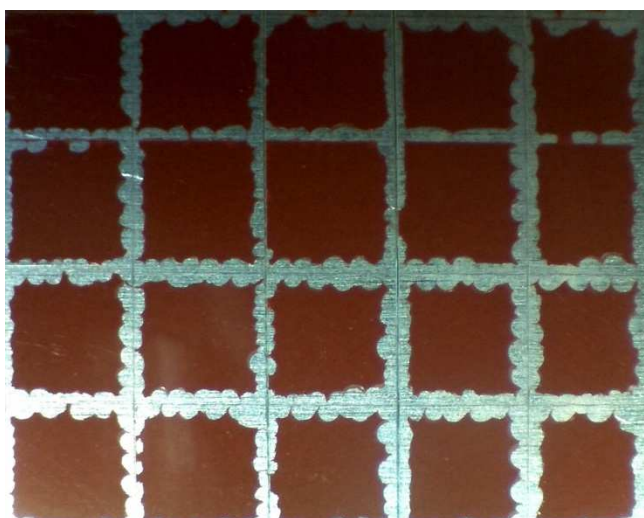
รูปที่ พ14 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมซัลเฟตที่อัตราเร็วการเคลือบผิวสูง พ่นด้วยสีสเปรย์  
ตัวอย่างที่ 2 (AT-fast-rt(2))



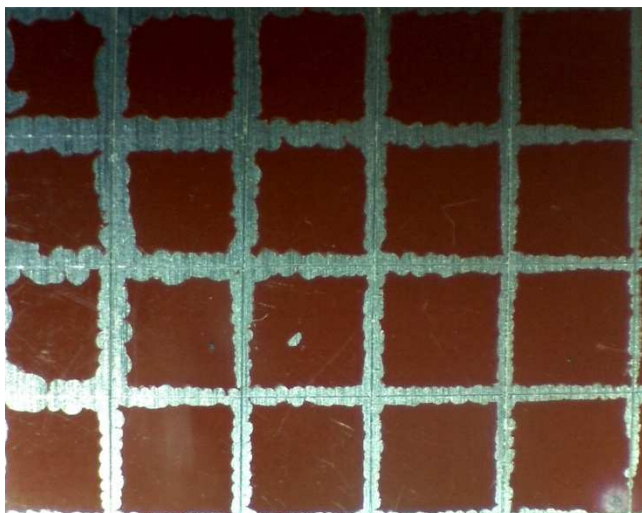
รูปที่ พ15 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมซัลเฟตที่อัตราเร็วการเคลือบผิวสูง พ่นด้วยสีสเปรย์  
ตัวอย่างที่ 3 (AT-fast-rt(3))



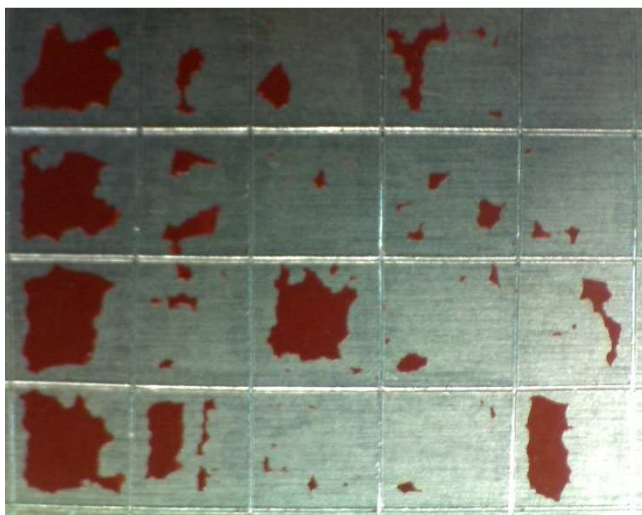
รูปที่ ผ16 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวสูง อบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ฟ้นด้วยลีสเปรย์ ตัวอย่างที่ 1 (AT-fast-100(1))



รูปที่ ผ17 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวสูง อบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ตัวอย่างพ่นด้วยลีสเปรย์ ที่ 2 (AT-fast-100(2))

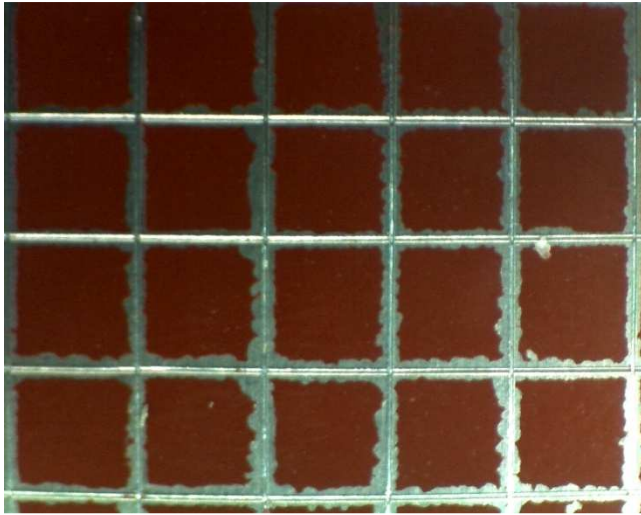


รูปที่ ๑๘ ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวสูง อบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ฟันด้วยสปีดปรีย์ ตัวอย่างที่ 3 (AT-fast-100(3))

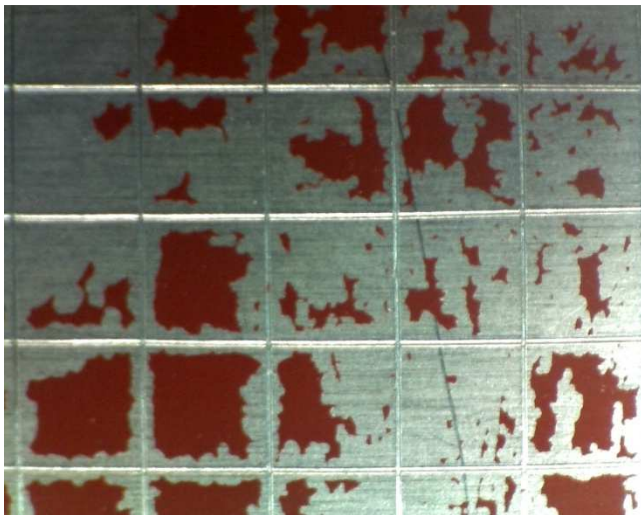


รูปที่ ๑๙ ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฮบริดไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ ฟันด้วยสปีดปรีย์ ตัวอย่างที่ 1 (ATP-slow-rt(1))

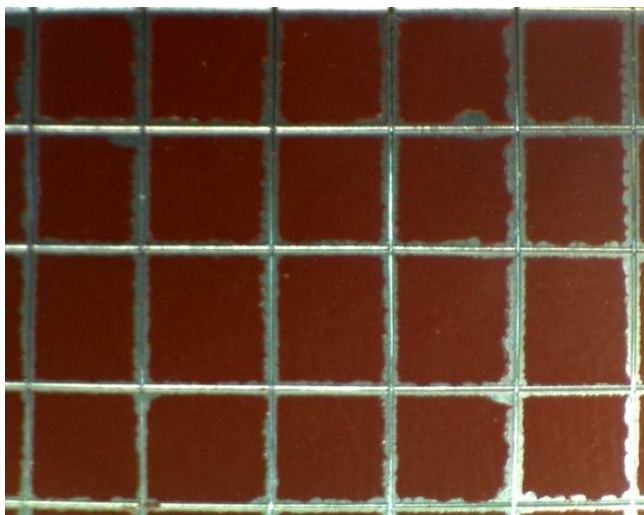




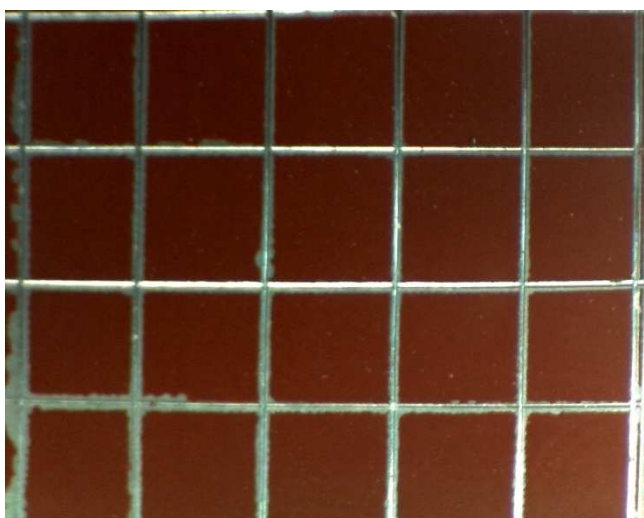
รูปที่ ๒๐ ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฮบริดไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ ฟันด้วยสปีเรย์ ตัวอย่างที่ 2 (ATP-slow-rt(2))



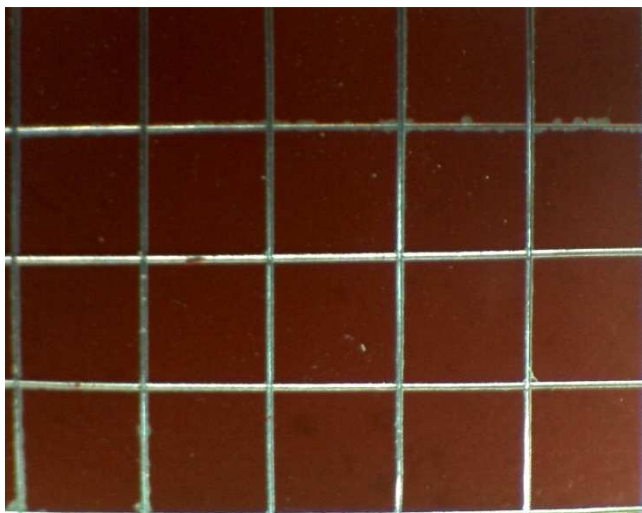
รูปที่ ๒๑ ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฮบริดไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ ฟันด้วยสปีเรย์ ตัวอย่างที่ 3 (ATP-slow-rt(3))



รูปที่ ผ22 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฮบริดไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ อบชิ้นงาน  
ที่ 100 องศาเซลเซียส ฟันด้วยสีสเปรย์ ตัวอย่างที่ 1 (ATP-slow-100(1))

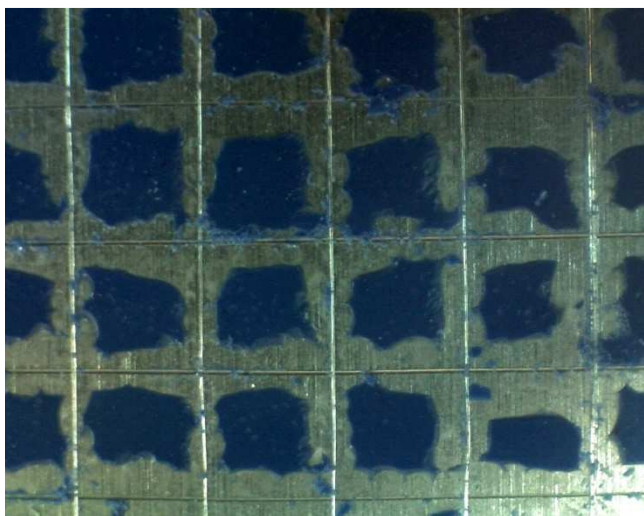


รูปที่ ผ23 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฮบริดไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ อบชิ้นงาน  
ที่ 100 องศาเซลเซียส ฟันด้วยสีสเปรย์ ตัวอย่างที่ 2 (ATP-slow-100(2))

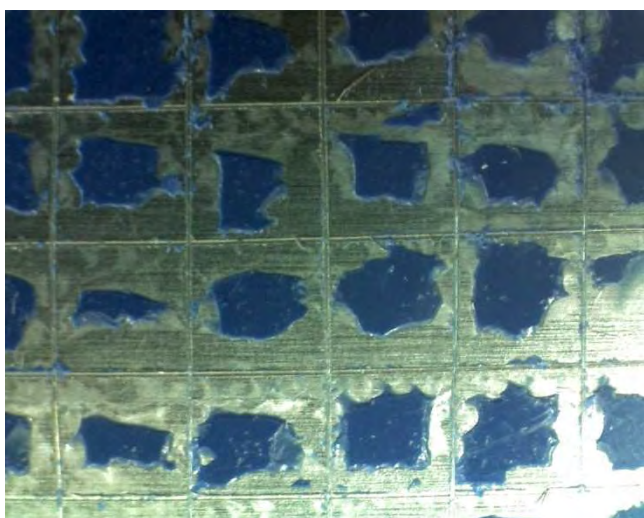


รูปที่ ผ24 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฮบริดไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ อบชิ้นงาน  
ที่ 100 องศาเซลเซียส ฟันด้วยสี่สเปร์ย์ ตัวอย่างที่ 3 (ATP-slow-100(3))

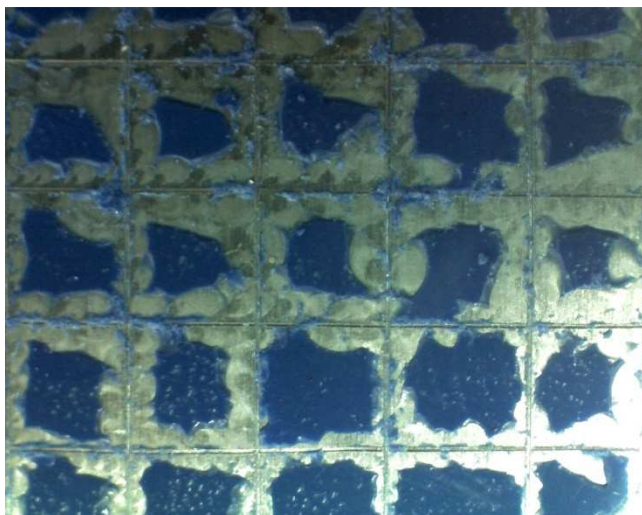
ข (2) สีนํ้ามัน



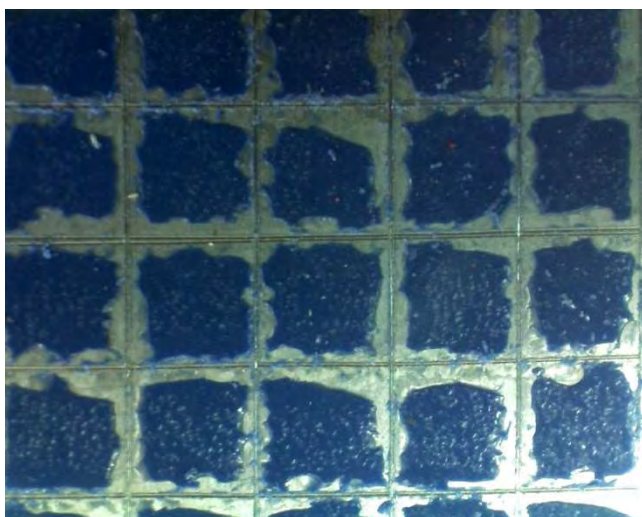
รูปที่ ๒๒๕ ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิวด้วยโซล ทำด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 1 (Blank O1)



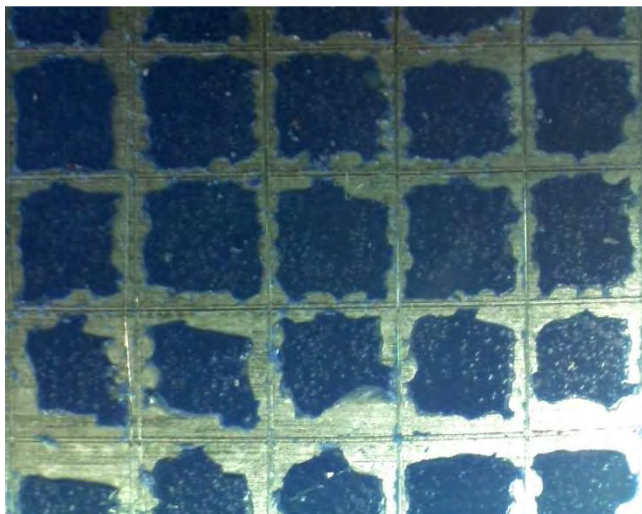
รูปที่ ๒๒๖ ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิวด้วยโซล ทำด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 2 (Blank O2)



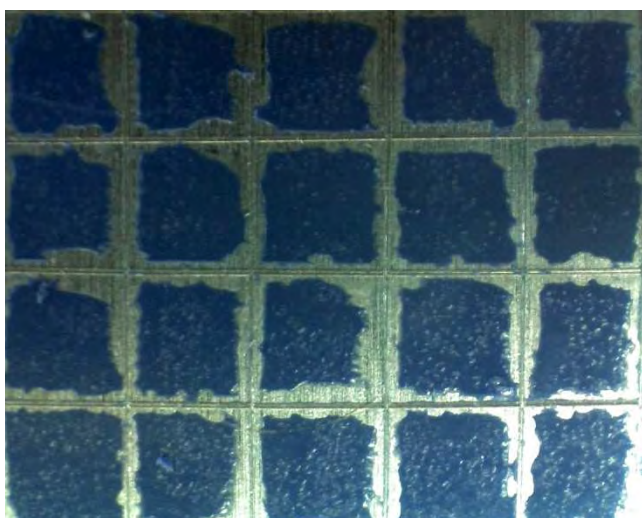
รูปที่ พ27 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่ไม่เคลือบผิวด้วยโซล ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 3 (Blank O3)



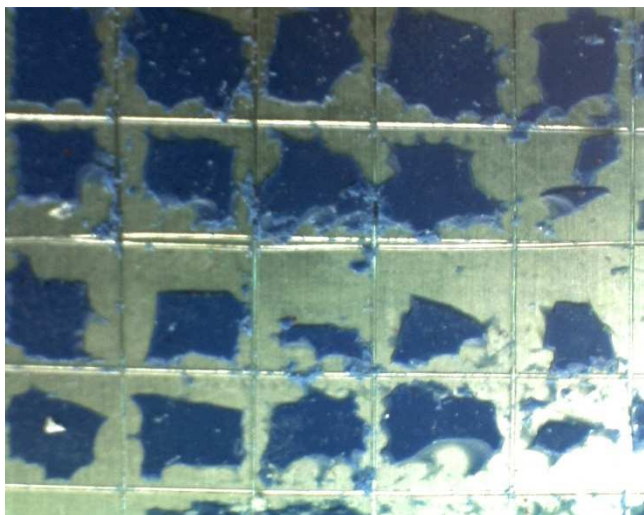
รูปที่ พ28 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่มีการขัดผิวด้วยกระดาษทรายและไม่เคลือบผิวด้วยโซล ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 1 (Blank PO1)



รูปที่ ผ29 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่มีการขัดผิวด้วยกระดาษทรายและไม่เคลือบผิวด้วยโซล ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 2 (Blank PO2)



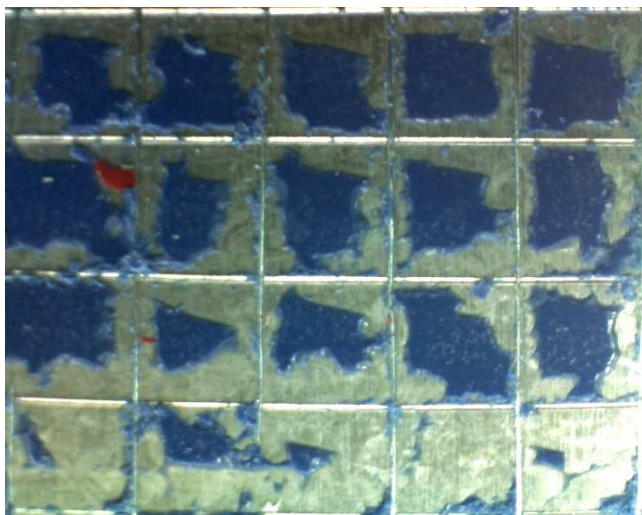
รูปที่ ผ30 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่มีการขัดผิวด้วยกระดาษทรายและไม่เคลือบผิวด้วยโซล ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 3 (Blank PO3)



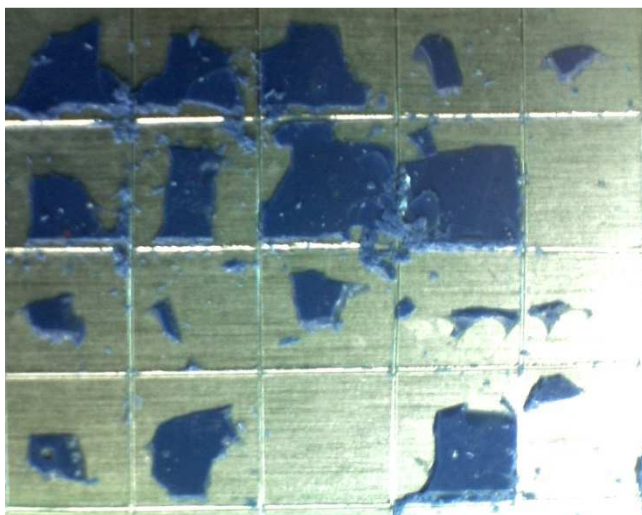
รูปที่ ผ31 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมซัลเฟตที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 1 (OT-slow-rt(1))



รูปที่ ผ32 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมซัลเฟตที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 2 (OT-slow-rt(2))

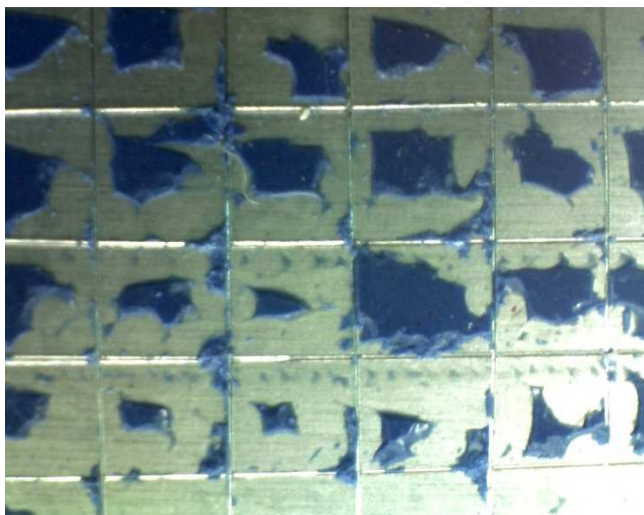


รูปที่ ผ33 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 3 (OT-slow-rt(3))

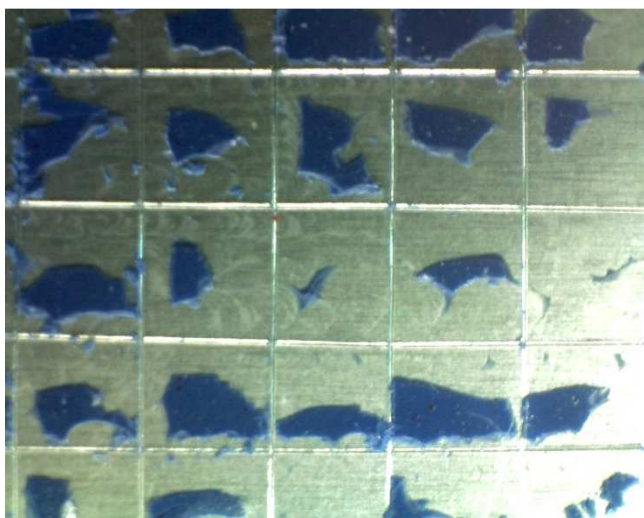


รูปที่ ผ34 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ อบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 1 (OT-slow-100(1))

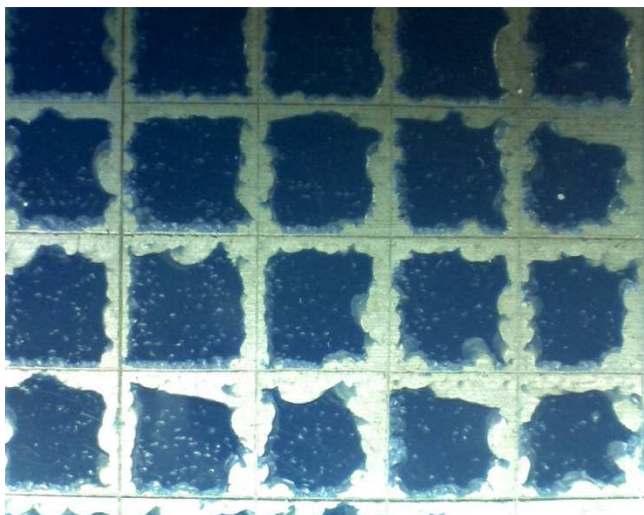




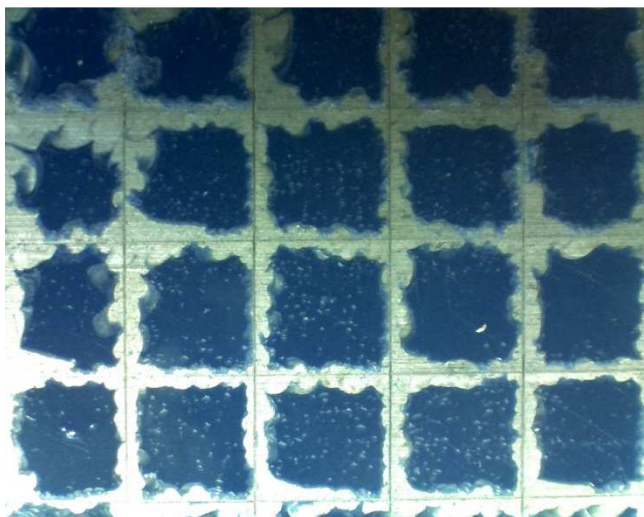
รูปที่ ผ35 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวดำ อบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 2 (OT-slow-100(2))



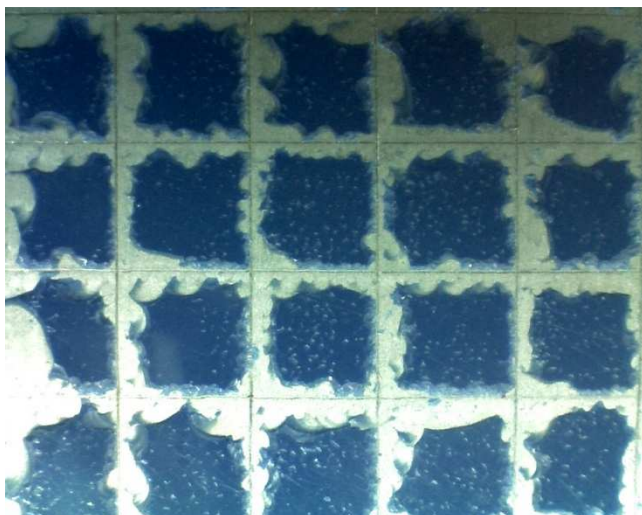
รูปที่ ผ36 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวดำ อบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 3 (OT-slow-100(3))



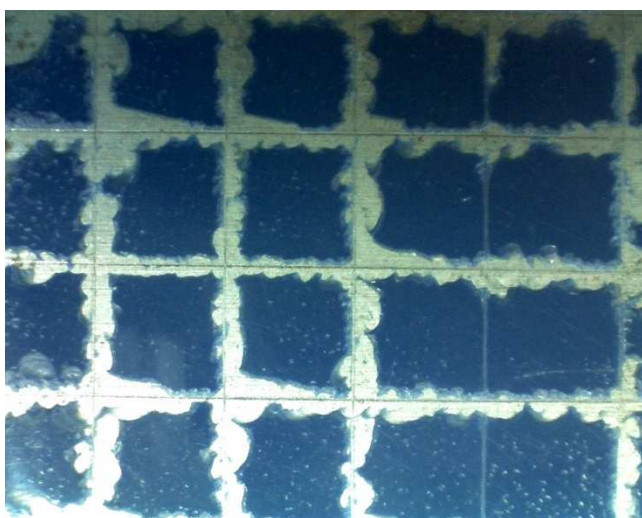
รูปที่ ผ37 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมซัลเฟตที่อัตราเร็วการเคลือบผิวสูง ทาด้วยสีน้ำมัน  
ตัวอย่างที่ 1 (OT-fast-rt(1))



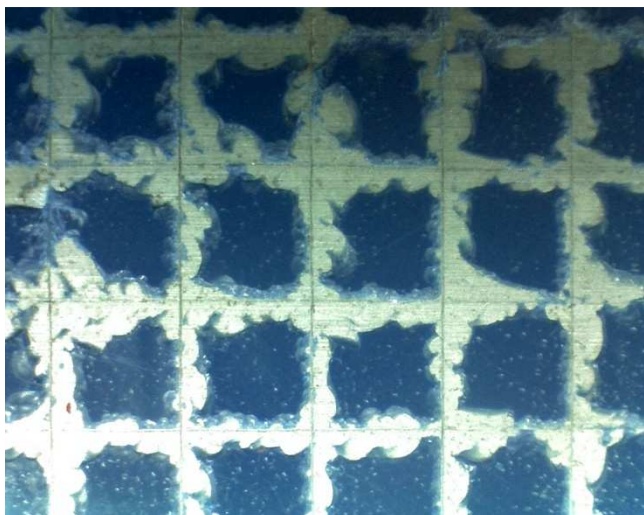
รูปที่ ผ38 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมซัลเฟตที่อัตราเร็วการเคลือบผิวสูง ทาด้วยสีน้ำมัน  
ตัวอย่างที่ 2 (OT-fast-rt(2))



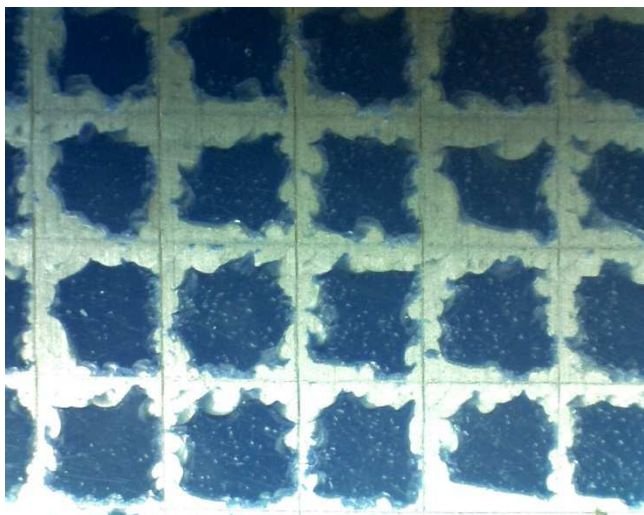
รูปที่ ผ39 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวสูง ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 3 (OT-fast-rt(3))



รูปที่ ผ40 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวสูง อบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 1 (OT-fast-100(1))



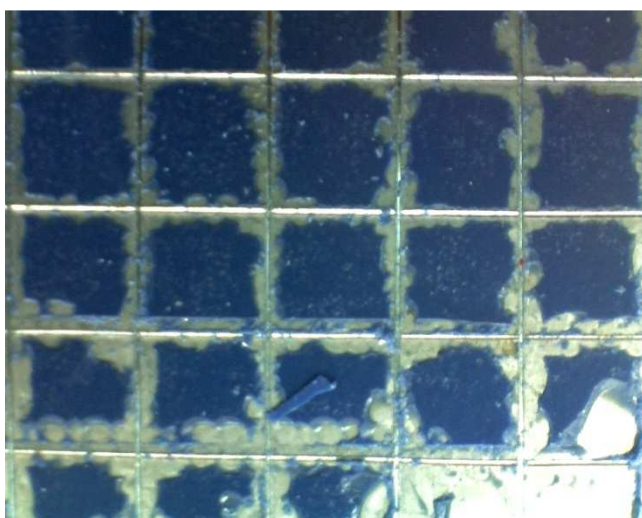
รูปที่ ผ41 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมซัลเฟตที่อัตราเร็วการเคลือบผิวสูง อบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 2 (OT-fast-100(2))



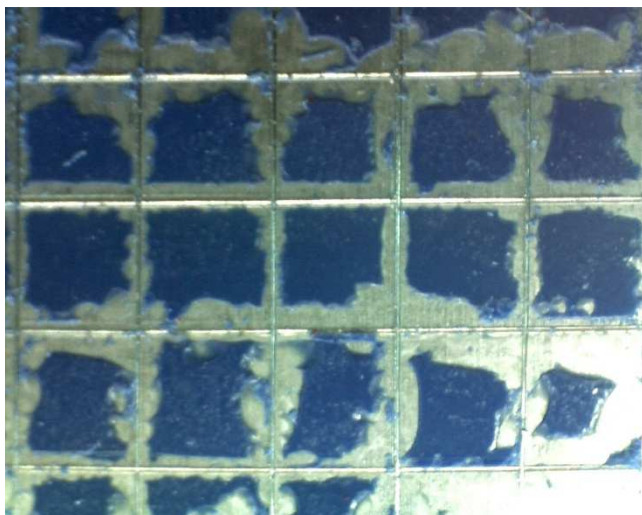
รูปที่ ผ42 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไททานเนียมซัลเฟตที่อัตราเร็วการเคลือบผิวสูง อบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 3 (OT-fast-100(3))



รูปที่ ๗43 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฮบริดไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 1 (OTP-slow-rt(1))



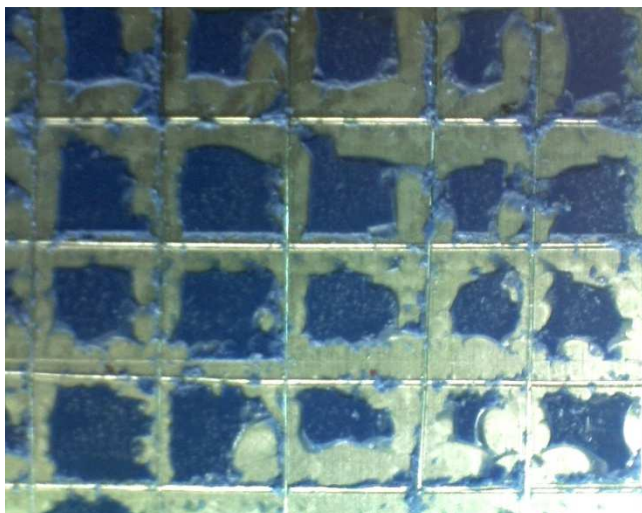
รูปที่ ๗44 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฮบริดไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 2 (OTP-slow-rt(2))



รูปที่ ๗45 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฮบริดไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 3 (OTP-slow-rt(3))



รูปที่ ๗46 ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฮบริดไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ อบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 1 (OTP-slow-100(1))



รูปที่ ๔๗ ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฮบริดไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ อบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 2 (OTP-slow-100(2))



รูปที่ ๔๘ ภาพถ่ายชิ้นงานเหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฮบริดไททานเนียมโซลที่อัตราเร็วการเคลือบผิวต่ำ อบชิ้นงานที่ 100 องศาเซลเซียส ทาด้วยสีน้ำมัน ตัวอย่างที่ 3 (OTP-slow-100(3))