

รายงานฉบับสมบูรณ์ ปีที่ 2

โครงการ การศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของเหล็กชุบสังกะสี
ความต้านทานการกัดกร่อนสูง

Investigation and Development of the Performance of
High Corrosion Resistant Galvanized Steels

สนับสนุนทุนวิจัยโดย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

จัดทำโดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์ และคณะ
สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 แผนงานย่อย คือ (1) การศึกษาถึงประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ Sol-gel coatings ระบบต่างๆ เพื่อปกป้องผิวเคลือบสังกะสี โดยทำการเปรียบเทียบผิวเคลือบ 3 ระบบ ได้แก่ ระบบที่มี Silicate, Titania และ Chromate ที่ใช้กันโดยทั่วไป (2) การศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรการผลิตที่มีต่อประสิทธิภาพของชั้นเคลือบ Silicate และ (3) การเสริมประสิทธิภาพของชั้นเคลือบ Silicate ด้วยการผสมสาร Colloidal Silica ผลจากการศึกษาพบว่า Silicate สามารถลดอัตราการเกิดสนิมขาวในสภาวะละอองน้ำได้เทียบเคียงกับระบบ Cr^{6+} และในสภาวะละอองเกลือจนถึงแม้ระบบ Silicate จะมีอัตราการเกิดสนิมขาวที่สูงกว่าระบบ Cr^{6+} เล็กน้อย แต่กลับมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กที่สูงกว่า ทั้งนี้ประสิทธิภาพของชั้นเคลือบ Silicate มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย Silicate และระดับความร้อนที่ใช้ในการอบขึ้นงานอย่างเด่นชัด เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบด้วยการแช่น้ำ พบว่า ความต้านทานต่อการเกิดสนิมขาวเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของ Silicate นอกจากนี้การเคลือบแผ่นเหล็กสังกะสีด้วยน้ำยาที่มีส่วนผสมของ Colloidal Silica, Sodium Silicate และ PVA ช่วยในการชะลอการกัดกร่อนของชั้นสังกะสีได้ดียิ่งขึ้นเมื่อปริมาณ Colloidal Silica ที่ใช้อยู่ที่ 10% โดยเห็นผลค่อนข้างชัดเจนในกรณีที่มีสภาวะการกัดกร่อนไม่รุนแรงมากดังเช่นการอ้งขึ้นงานเหนือผิวน้ำ รวมถึงยังช่วยป้องกันการกัดกร่อนให้กับผิวเหล็กได้เป็นอย่างดีเมื่อชิ้นงานแช่ในน้ำซึ่งเป็นสภาวะกัดกร่อนที่มีความรุนแรงขึ้นมา ดังนั้น การใช้น้ำยาเคลือบชนิดนี้จึงช่วยชะลอทั้งการกัดกร่อนของผิวสังกะสีและของเนื้อเหล็กได้

สารบัญ

บทคัดย่อ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูป	ง
1. บทนำ	1
2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
3. ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	3
4. แผนการวิจัย	7
5. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผิวเคลือบ	8
6. การศึกษาการเตรียมและผลของชั้นเคลือบ Silicate	14
7. การศึกษาการเตรียมและผลของชั้นเคลือบ Silicate ผสม Colloidal silica	21
8. ผลลัพธ์	31

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	ภาพถ่ายผิวหน้าของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการทดสอบความขึ้นที่เวลาต่างๆ	10
ตารางที่ 2	ภาพถ่ายผิวหน้าชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการทดสอบละอองเกลือที่เวลาต่างๆ	12
ตารางที่ 3	ภาพถ่ายผิวหน้าชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่เคลือบด้วยซิลิเกตโซลเจล ความเข้มข้น 5wt%, 10wt% และ 20wt% หลังอบที่อุณหภูมิต่างๆ	15
ตารางที่ 4	ภาพถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการกัดกร่อนโดยการแช่ในน้ำปราศจากไอออนที่เวลาต่างๆ	18
ตารางที่ 5	ภาพถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการกัดกร่อนโดยการอั่งชิ้นงานเหนือน้ำที่เวลาต่างๆ	19
ตารางที่ 6	ส่วนผสมของน้ำยาเคลือบที่ใช้ในงานวิจัย	21
ตารางที่ 7	ภาพถ่ายผิวหน้าชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนต่อเนื่องที่เคลือบด้วยน้ำยา 2.5wt%, 10 wt% และ 20 wt% Silicate, ชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนต่อเนื่องที่ผ่านกระบวนการ CCCs ด้วย Cr^{6+} และชิ้นงาน Blank บริเวณที่แช่น้ำที่เวลาต่างๆ	24
ตารางที่ 8	ภาพถ่ายผิวหน้าชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนต่อเนื่องที่เคลือบด้วยน้ำยา 2.5wt%, 10wt% และ 20wt% Silicate, ชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนต่อเนื่องที่ผ่านกระบวนการเคลือบด้วย Cr^{6+} และชิ้นงาน Blank บริเวณที่อยู่เหนือน้ำที่เวลาต่างๆ	26
ตารางที่ 9	ภาพถ่ายผิวหน้าชิ้นงานสลักเกลียวเหล็กกล้าชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (GI) และที่ชุบนิกเกิล โดยใช้ไฟฟ้า และชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (GN) ที่ทำการเคลือบและไม่เคลือบด้วยน้ำยา 10wt% Silica หลังทดสอบการแช่น้ำที่เวลาต่างๆ	28

สารบัญรูป

รูปที่ 1	ภาพถ่ายผิวหน้าชิ้นงานสลักเกลียวเหล็กกล้าชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (GI) และที่ชุบนิกเกิลโดยใช้ไฟฟ้า	28
----------	---	----

คณะผู้วิจัย

ชื่อผู้รับผิดชอบ	หน้าที่รับผิดชอบ	สัดส่วน ความรับผิดชอบ
หัวหน้าโครงการ: อาจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์ หน่วยงาน: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์ 0 2218 4243 โทรสาร 0 2611 7586 E-mail : yuttanant.b@chula.ac.th	- วางแผนงานและดูแลกิจกรรมในภาพรวมของโครงการ - ศึกษาและวิเคราะห์เทคโนโลยีการผลิตเหล็กชุบสังกะสีและปัญหาการกัดกร่อน	20 %
ผู้ร่วมงาน		
1. อาจารย์ ดร. ณัฐธิตา ชวนเกริกกุล หน่วยงาน: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์ 0 2218 4234 โทรสาร 0 2611 7586 E-mail : Nutthita.c@chula.ac.th	สืบค้นข้อมูลด้านกระบวนการชุบเคลือบสังกะสี และสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กชุบสังกะสี	10 %
2. ดร. สุพิน แสงสุข หน่วยงาน: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์ 0 2218 4243 โทรสาร 0 2611 7586 E-mail : Supin.t@chula.ac.th	ศึกษาและพัฒนากระบวนการเคลือบ Passivation เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเหล็กชุบสังกะสี	10 %
3. นางสาวปรานี รัตนวลิตโรจน์ หน่วยงาน: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์ 0 2218 4221 โทรสาร 0 2611 7586 E-mail : pranee.r@chula.ac.th	- ศึกษาและพัฒนากระบวนการเคลือบ Passivation เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเหล็กชุบสังกะสี - กำกับดูแลด้านสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการชุบสังกะสี	15%
4. นางสาวกนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ หน่วยงาน: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์ 0 2218 4233 โทรสาร 0 2611 7586 E-mail : kanokwan.s@chula.ac.th	ศึกษาและวิเคราะห์สมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กชุบเคลือบ	15%

ชื่อผู้รับผิดชอบ	หน้าที่รับผิดชอบ	สัดส่วน ความรับผิดชอบ
ผู้ร่วมงาน		
5. นายจุมพฏ วานิชสัมพันธ์ หน่วยงาน: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์ 0 2218 4219 โทรสาร 0 2611 7586 E-mail : wjumpot@chula.ac.th	- เตรียมชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยเครื่องชุบสังกะสีอัตโนมัติระดับประลอง - วิเคราะห์ชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์, SEM, XRD	10 %
6. นายอดิศักดิ์ ถีพอลอย หน่วยงาน: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์ 0 2218 4241 โทรสาร 0 2611 7586 E-mail : Adisak.T@chula.ac.th	- เตรียมชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยเครื่องชุบสังกะสีอัตโนมัติระดับประลอง - ทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบแบบละอองเกลือ	10 %
7. นางสาวสวลี เสนาพิทักษ์ หน่วยงาน: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์ 0 2218 4241 โทรสาร 0 2611 7586 E-mail : sawalee.s@chula.ac.th	- ทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท - เป็นผู้ประสานงานโครงการ	10 %

หน่วยงานรับผิดชอบหลัก

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่

เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์ 02-218-4209-10 โทรสาร 02-611-7586

1. บทนำ

เหล็กเป็นวัสดุพื้นฐานที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายตั้งแต่ผลิตภัณฑ์ในครัวเรือนไปจนถึงผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เช่น วัสดุก่อสร้าง ชิ้นส่วนยานยนต์ อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติเด่นด้านความแข็งแรงและความเหนียว จึงทำให้สามารถขึ้นรูปและตัดโค้งงอได้ง่าย อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยของเหล็กที่ทราบกันดีคือ การกัดกร่อนและการเกิดสนิม ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ที่ทำให้เหล็กเกิดการเสื่อมสภาพ การเกิดสนิมมีผลทำให้สมบัติความแข็งแรงและความเหนียวของเหล็กลดลง ซึ่งเป็นปัจจัยที่เสี่ยงต่อการใช้งาน โดยเฉพาะในกรณีของเหล็กประเภทที่ใช้งานก่อสร้างหรือผลิตสิ่งปลูกสร้างและโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ เช่น อาคารที่อยู่อาศัย, สะพาน, เสาไฟฟ้า, แท่นขุดเจาะน้ำมัน เป็นต้น นอกจากนี้ในกรณีของผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การถอดชิ้นส่วนเพื่อเปลี่ยนอะไหล่ชิ้นใหม่เข้าไปทดแทนชิ้นส่วนเก่าที่เสื่อมสภาพจากการกัดกร่อนเป็นขั้นตอนที่ทำได้ยาก มีค่าใช้จ่ายสูง และส่งผลกระทบต่อกระบวนการหรือกิจกรรมอื่นที่เกี่ยวข้อง ยกตัวอย่างเช่น ในงานโครงสร้างแท่นขุดเจาะน้ำมันในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ชิ้นส่วนเหล็กโครงสร้างซึ่งมีการเคลือบด้วยสังกะสีมีความจำเป็นที่ต้องได้รับการซ่อมแซมทุก 3 ปี จากปัญหาการกัดกร่อนคิดเป็นมูลค่ากว่า 16 ล้านบาทต่อปีต่อ 1 แท่นขุดเจาะ สำหรับในอุตสาหกรรมเคมี เช่น โรงงานกลั่นน้ำมันต่างๆ ในประเทศไทยมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงซ่อมแซมเหล็กเคลือบสังกะสีที่เสียหายกว่า 15 ล้านบาทต่อปี ในส่วนของอาคารที่อยู่อาศัยและโครงสร้างสำหรับสาธารณูปโภคพื้นฐาน หากมีการกักขังของน้ำ เช่น จากปัญหาน้ำท่วมก็สามารถก่อให้เกิดการกัดกร่อนของชิ้นส่วนเหล็ก ที่สำคัญต่อโครงสร้าง เช่น ผนัง, หลังคา, เหล็กข้ออ้อยเสริมแรงคอนกรีต, โครงสร้างของเสาไฟฟ้าแรงสูง ได้เช่นกัน ดังนั้นการป้องกันการกัดกร่อนหรือการเกิดสนิมของเหล็กจึงเป็นสิ่งจำเป็นและเป็นประเด็นที่มีความน่าสนใจในการวิจัย

ทั้งนี้ในช่วงปี พ.ศ. 2551-2553 คณะผู้วิจัยได้ดำเนินงานวิจัยโครงการ “การพัฒนากระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน” โดยการสนับสนุนจากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย จากงานวิจัยนั้น คณะผู้วิจัยได้พัฒนาเทคโนโลยีการเคลือบผิวเหล็กด้วยสังกะสีแบบใหม่ขึ้นมีชื่อว่าเทคโนโลยี “Galvaniche” โดยจากการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการด้วยเทคนิคการฟลักซ์เอเล็คโตรไลซิส พบว่า เหล็กชิ้นงานตัวอย่างที่เคลือบสังกะสี

ด้วยแนวทางใหม่นี้มีความต้านทานต่อการเกิดสนิม (10% Red Rust) ที่ดีกว่าเหล็กชุบสังกะสีทั่วไปถึงกว่า 1,300 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อย (ประมาณ 6 เท่า) ถึงแม้ชั้นเคลือบอัลลอยสังกะสีจะบางกว่า 3 เท่าก็ตาม เทคโนโลยีดังกล่าวได้ยื่นขอรับสิทธิบัตรการประดิษฐ์จากกรมทรัพย์สินทางปัญญา เรื่อง “เหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ประกอบด้วยชั้นเคลือบสังกะสีนิกเกิลที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง และกรรมวิธีการผลิตเหล็กชุบสังกะสีดังกล่าว” (เลขที่คำขอ 1001000114)

โครงการวิจัยฯ ในปีที่ 1 นั้น ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยีการผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบใหม่ “Galvaniche” และพบว่า เทคโนโลยีการดังกล่าวก่อให้เกิดชิ้นงานเหล็กกล้าที่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่สูงกว่าเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนทั่วไป เหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าและสแตนเลส 304 ในสภาวะบรรยากาศเหนือน้ำทะเลและละอองเกลือ อย่างไรก็ตาม ยังพบว่า ผิวชิ้นงานเหล็ก Galvaniche เกิดสนิมขาวในอัตราเร็วคล้ายคลึงกับที่พบในเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน ซึ่งบ่งถึงการเกิดการกัดกร่อนและ Oxidation ของผิวสังกะสีที่อยู่ชั้นนอกสุด ดังนั้น หากอัตราการเกิดสนิมขาวสามารถชะลอลงได้ ชั้นเคลือบก็必将มีความคงทนต่อบรรยากาศได้ดียิ่งขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นในการศึกษาและพัฒนาผิวเคลือบชั้นนอกที่สุด เพื่อปกคลุมผิวของชั้นสังกะสีและป้องกันชั้นสังกะสีนั้นจากการกัดกร่อน โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบทั้งในส่วนของการใช้สารเคลือบที่ใช้กันโดยทั่วไปในท้องตลาด รวมถึงสารเคลือบในกลุ่ม Sol-gel ซึ่งมีโอกาสนำมาปรับใช้ได้ในอนาคต ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในรายงานฉบับนี้

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและแนวทางประยุกต์ใช้เทคโนโลยีชุบเคลือบสังกะสี โดยมีชั้นเคลือบปกคลุมผิวชั้นสังกะสีเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

2.2 เพื่อการพัฒนาบุคลากรวิจัย และเสริมประสบการณ์และศักยภาพของกลุ่มวิจัย นำไปสู่การพัฒนาเป็นศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการเคลือบผิวโลหะและวัสดุ

3. ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

3.1 เหล็กและการกัดกร่อน

การกัดกร่อนของเหล็กก่อให้เกิดความเสียหาย เป็นอันตรายและเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นจำนวนมากดังที่แสดงไว้ข้างต้น โดยเมื่อนำเหล็กไปใช้งาน เหล็กจะสัมผัสกับบรรยากาศและความชื้น ทำให้เหล็กสูญเสียอิเล็กตรอน นำไปสู่การกัดกร่อนและการเกิดสนิม การเคลือบสังกะสีบนผิวเหล็กจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนให้กับเหล็ก โดยสังกะสีช่วยทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นระหว่างผิวเหล็กกับสภาวะแวดล้อม (barrier protection) ป้องกันผิวเหล็กจากการสัมผัสกับความชื้นและบรรยากาศ อีกทั้งยังช่วยป้องกันการกัดกร่อนในแบบแคโทดิก (cathodic protection) โดยเมื่อสังกะสีหลุดล่อนไปบางส่วน และผิวเหล็กเริ่มสัมผัสกับบรรยากาศ เหล็กจะยังคงได้รับการป้องกันจากการกัดกร่อนไว้ได้ อย่างไรก็ตาม การกัดกร่อนของผิวเคลือบสังกะสีสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อใช้งาน โดยสังกะสีจะผุกร่อนออกไปพร้อมกับการเกิดสนิมของสังกะสี (ZnCO_3 ; ZnOH_2) เมื่อสังกะสีได้สลายไประดับหนึ่ง ท้ายที่สุดสนิมสีแดงของเหล็ก (Fe_2O_3) จะปรากฏขึ้น ซึ่งแสดงว่าการกัดกร่อนได้เกิดขึ้นในชั้นผิวเหล็กกล้า ทั้งนี้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กชุบสังกะสีโดยทั่วไปแล้วขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเคลือบสังกะสี ประสิทธิภาพของชั้นเคลือบ และสภาวะบรรยากาศที่นำเหล็กไปใช้งาน

3.2 เทคนิคการชุบเคลือบสังกะสี

ปัจจุบันได้มีความพยายามในการพัฒนาเทคนิคการเคลือบสังกะสีขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของชั้นเคลือบสังกะสีในการใช้งานในสภาวะที่มีการกัดกร่อนสูง เช่น สภาวะน้ำทะเลที่มีปริมาณคลอไรด์สูง ซึ่งสามารถทำลายชั้นฟิล์ม passivation บนผิวโลหะลง นำไปสู่การกัดกร่อนในอัตราที่รวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ข้อมูลและความรู้เกี่ยวกับประสิทธิภาพของเหล็กชุบสังกะสีที่ผลิตขึ้นด้วยเทคนิคต่างๆ เมื่อใช้งานในสภาวะบรรยากาศของประเทศไทยยังมีอยู่โดยจำกัด

เทคนิคการเคลือบสังกะสี 2 ลักษณะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้มีดังนี้

1) การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนวิธีการดั้งเดิม (Galvanizing, GI)

การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ การเตรียมผิว (surface pretreatment) และการชุบชิ้นงานในบ่อสังกะสีหลอมเหลว วิธีการเตรียมผิวหลักก่อนการชุบสังกะสีเริ่มด้วยขั้นตอนการจุ่มชิ้นงานในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่าง (caustic cleaning) เช่น โซดาไฟ (NaOH) ที่อุณหภูมิ 60 °C เพื่อกำจัดคราบไขมันออกจากผิวชิ้นงาน ต่อด้วยการจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด (acid pickling) เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดกำมะถันหรือกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เพื่อกำจัดคราบสนิมที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน โดยกรดเหล่านี้สามารถซึมไปตามรอยแยกของชั้นสนิม (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 และ FeO) และทำการละลายสนิมจากผิวเหล็ก

หลังจากจุ่มกรดแล้ว ชิ้นงานเหล็กจะถูกนำไปเคลือบสารละลายฟลักซ์ที่มีแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) และซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) เป็นส่วนประกอบ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ผิวชิ้นงานเกิดคราบสนิมก่อนการชุบสังกะสี และเพื่อช่วยให้เหล็กและสังกะสีมีสมบัติ wettability ที่ดีต่อกัน การเคลือบฟลักซ์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีแรก ฟลักซ์จะลอยปกคลุมอยู่บนผิวสังกะสีหลอมเหลวในบ่อสังกะสี และชิ้นงานเหล็กจะสัมผัสสังกะสีหลังจากเคลื่อนผ่านชั้นฟลักซ์โดยทันที ในวิธีที่ 2 ชิ้นงานจะถูกจุ่มในสารละลายฟลักซ์ในบ่อฟลักซ์และทำให้แห้งด้วยการอบร้อนก่อนนำไปจุ่มในบ่อสังกะสีต่อไป

บ่อสังกะสีหลอมเหลวมักทำจากเหล็กที่มีโลหะเจือต่ำหรือเซรามิก อุณหภูมิที่นิยมใช้อยู่ที่ประมาณ 450 °C (สังกะสีมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 419.5 °C) โดยน้ำสังกะสีอาจมีโลหะชนิดอื่นเจืออยู่เล็กน้อย เช่น อะลูมิเนียม (Al) ตะกั่ว (Pb) พลวง (Sb) และนิกเกิล (Ni) การเจือโลหะทำเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของสังกะสีหลอมเหลว เช่น ให้มีความหนืดต่ำและเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะกับผิวเหล็ก เป็นต้น ชิ้นงานที่ดึงขึ้นจากบ่อสังกะสีแล้ว ทำให้เย็นตัวได้โดยทิ้งไว้ในอากาศ หรือทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำ

ทั้งนี้การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน ยังแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีการหลัก คือ กระบวนการชุบสังกะสีแบบต่อเนื่อง (Continuous process) และกระบวนการชุบสังกะสีแบบไม่ต่อเนื่อง (Non-continuous process หรือ General galvanizing) โดยในกระบวนการแรกใช้กับชิ้นงานขนาดยาว เช่น ขดลวดเหล็ก หรือ แผ่นเหล็กม้วนซึ่งจะถูกเคลื่อนที่ และเคลื่อนตัวสู่บ่อในแต่ละขั้นตอนของการชุบสังกะสีอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วที่คงที่ และชิ้นงานมักสัมผัสกับน้ำสังกะสีเพียงไม่กี่วินาที ส่วนในกระบวนการหลังนั้นมักใช้กับชิ้นงานประเภทเหล็กท่อ, เหล็กฉาก, คานเหล็ก และสกรูน็อต โดยชิ้นงานซึ่งถูกจับยึดด้วยระบบเครนจะถูกจุ่มลงในบ่อสารเคมีเตรียมผิวและบ่อสังกะสีด้วยความเร็วและระยะเวลาที่แตกต่างกันออกไป ชิ้นงานมักอยู่ในบ่อสังกะสีเป็นเวลา 1-10 นาที

เหล็กชุบสังกะสีที่ผลิตขึ้นโดยวิธีดั้งเดิมนั้นประกอบด้วยโครงสร้างชั้นเคลือบหลายชั้น ซึ่งขณะทำการชุบร้อนนั้น เหล็กและสังกะสีจะแพร่เข้าหากันและทำปฏิกิริยาเกิดเป็นชั้นเคลือบ Fe-Zn intermetallics เฟสต่างๆ ซึ่งมีส่วนประกอบโลหะและความหนาที่แตกต่างกันไป ชั้นเคลือบ 4 ชั้นที่มักสังเกตพบประกอบด้วย (1) ชั้นเฟสแกมมา (Γ), $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ ซึ่งอยู่ติดกับผิวเหล็ก และมีเหล็กเป็นองค์ประกอบในช่วง 23.5-28.0wt% (2) ชั้นเฟสเดลตา (δ), FeZn_{10} มีปริมาณของเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วง 7.0-11.5wt% (3) ชั้นเฟสซีตา (ζ), FeZn_{13} มีปริมาณของเหล็กในช่วง 5-6wt% และ (4) ชั้นเอตา (η) ซึ่งเป็นโลหะสังกะสีเกือบทั้งหมด ทั้งนี้ชั้นเฟส Γ มีขนาดบางมากระดับ ~ 1 ไมครอน ในขณะที่ชั้นเคลือบเฟส δ และ ζ มีขนาดหนากว่าอยู่ในระดับ 10-100 ไมครอน โดยชั้นเคลือบ Fe-Zn intermetallics ทั้งสองสามารถมีขนาดความหนาเพิ่มขึ้นได้หากเพิ่มระยะเวลาทำการชุบร้อน ส่วนชั้น η เกิดจากน้ำสังกะสีในบ่อชุบที่ติดมากับชิ้นงานเหล็ก ดังนั้นขนาดความหนาจึงถูกควบคุมด้วยความหนืดของน้ำสังกะสี และการควบคุมการไหลของน้ำสังกะสีบนชิ้นงาน

2) การชุบสังกะสีด้วยเทคนิค Galvanic (GN)

Galvanic เป็นเทคนิคการชุบสังกะสีที่พัฒนาขึ้นโดยคณะผู้วิจัย โดยขั้นตอนการผลิตจะแตกต่างจากการชุบสังกะสีวิธีดั้งเดิม โดยมีการเคลือบชั้นรองพื้นนิเกิลหรือนิกเกิลอัลลอยบนผิวเหล็กก่อนการชุบร้อนในบ่อสังกะสี ทั้งนี้ชั้นรองพื้นสามารถเตรียมขึ้นได้ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น Electro deposition และ

Electroless deposition ในขั้นตอนการชุบร้อนนั้นสังกะสีหลอมเหลวจะทำปฏิกิริยากับนิกเกิลในชั้นรองพื้น และให้ชั้นเคลือบที่มีความบางอันเนื่องมาจากอัตราเร็วในการทำปฏิกิริยาของสังกะสีและนิกเกิลมีค่าต่ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้เกิดชั้นเคลือบที่มีองค์ประกอบของสังกะสีนิกเกิล จากการศึกษาด้านสมบัติการกัดกร่อนในสภาวะละอองเกลือในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า เหล็ก Galvanic มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็ก Galvanizing เป็นเวลาอย่างน้อย 1,300 ชั่วโมง (ประมาณ 6 เท่า) ถึงแม้ชั้นเคลือบอัลลอยของวัสดุจะมีความบางกว่ากันถึง 3 เท่าก็ตาม นอกจากนี้ ได้มีการพัฒนาแบบจำลองต้นทุนราคา (cost modeling) ของ Galvanic ขึ้น และได้พบว่า Galvanic สามารถประยุกต์ใช้ในราคาต้นทุนใกล้เคียงกับการชุบสังกะสีแบบดั้งเดิม ดังนั้น เทคนิค Galvanic นี้จึงมีโอกาสนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกัดกร่อนให้กับเหล็ก รวมถึงช่วยประหยัดการใช้ทรัพยากรสังกะสีลง

3.3 การปกป้องผิวเคลือบสังกะสี

เมื่อเหล็กที่ผิวด้านนอกเป็นสังกะสีถูกนำไปใช้งาน สังกะสีจะค่อยๆ ถูกกัดกร่อนออกไป อีกทั้งยังเกิดปฏิกิริยา Oxidation ส่งผลให้ผิวสังกะสีมีลักษณะเป็นสีขาว ดังนั้น เพื่อเป็นการชะลอการกัดกร่อนของสังกะสีดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาคิดค้นการเคลือบผิววัสดุลงบนผิวสังกะสีอีกชั้นหนึ่ง เทคนิคที่ได้รับความนิยมที่สุดคือ การชุบเหล็กสังกะสีลงในน้ำยาโครเมต อันก่อให้เกิดปฏิกิริยา Chromate conversion coatings ระหว่างน้ำยาและสังกะสี โดยเมื่อถลอกชิ้นงานออกจากบ่อน้ำยาจะได้ผิวเคลือบที่ประกอบด้วย oxides และ hydroxides ของ Cr และ Zn ทั้งนี้ น้ำยาโครเมตประกอบด้วย Hexavalent chromium (Cr^{6+}) เป็นสารหลัก ซึ่งมีความเป็นพิษเป็นอันตรายต่อผู้ผลิตและผู้ใช้งาน ปัจจุบันจึงมีความนิยมใช้ลดน้อยลง โดยในอุตสาหกรรมเหล็กเองมีความพยายามที่จะพัฒนาสารประเภทอื่นมาทดแทน ในงานวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการศึกษาพัฒนาสารในกลุ่ม Sol-gel ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีองค์ประกอบของสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ฟอร์มตัวขึ้น จากการที่สารผสมอนุภาคคอลลอยด์เกิดปฏิกิริยา Polymerization และ Condensation ขึ้น ฟิล์ม Sol-gel มีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำ อีกทั้งมีความแข็งแรงของ oxides จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาช่วยผิวสังกะสีจากการกัดกร่อน

4. แผนการวิจัย

การดำเนินการวิจัย แบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ ดังนี้

4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผิวเคลือบ

ในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาศึกษาถึงประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ Sol-gel coatings ระบบต่างๆ เพื่อปกป้องผิวเคลือบสังกะสี โดยทำการเปรียบเทียบผิวเคลือบ 3 ระบบ ได้แก่ ระบบที่มี Silicate, Titania และ Chromate ที่ใช้กันโดยทั่วไป และทำการทดสอบการกัดกร่อนในบรรยากาศความชื้น ตามมาตรฐาน ASTM D2247 และในบรรยากาศละอองเกลือตามมาตรฐาน ASTM B117 เป็นเวลาประมาณ 650 ชั่วโมง

4.2 การศึกษาการเตรียมและผลของชั้นเคลือบ Silicate

ระบบชั้นเคลือบ Silicate มีความน่าสนใจและผลการทดลองแสดงถึงการมีประสิทธิภาพที่ดีของชั้นฟิล์ม ในหัวข้อนี้จึงได้ทำการศึกษาศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรการผลิต ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้น และ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบร้อนที่มีต่อความต้านทานการกัดกร่อนในลักษณะต่างๆ

4.3 การศึกษาการเตรียมและผลของชั้นเคลือบ Silicate + Colloidal Silica

ในหัวข้อนี้ได้ทำการต่อยอดการศึกษาค้นคว้าชั้นเคลือบ Silicate โดยศึกษาผลกระทบของการผสมสาร Colloidal Silica ที่มีต่อประสิทธิภาพของผิวเคลือบ

5. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผิวเคลือบ

5.1 วิธีการทดลอง

5.1.1 การเตรียมชิ้นงาน

ชิ้นงานแผ่นเหล็ก 4 กลุ่ม ขนาด (10 x 5 เซนติเมตร) ได้ถูกเตรียมขึ้น กลุ่มละอย่างน้อย 4 ชิ้นงาน ตามรายละเอียด ดังนี้

1) *Blank* ชิ้นงานแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีจุ่มร้อนแบบต่อเนื่องชนิดมาตรฐาน ผลิตโดย บริษัทกรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด

2) Cr^{2+} ชิ้นงานแผ่นเหล็กชนิดเดียวกับ Blank ซึ่งชุบเคลือบในน้ำยาโครเมต ผลิตโดย บริษัทกรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด

3) *Silicate* ชิ้นงานแผ่นเหล็กชนิดเดียวกับ Blank ซึ่งจุ่มเคลือบในน้ำยาโซลเจลที่ประกอบด้วย 20wt% Sodium Silicate; 0.0034wt% PVA และน้ำ DI ขั้นตอนการจุ่มเคลือบประกอบด้วย การจุ่มชิ้นงานในกรดไนตริก 1wt% 10 วินาที ติดตั้งชิ้นงานกับเครื่อง Dip coater จุ่มเคลือบชิ้นงานลงในน้ำยาเป็นเวลา 1 นาที ดึงขึ้นด้วยอัตราเร็ว 100 มิลลิเมตรต่อวินาที) และอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 20 นาที

4) *Titania* ชิ้นงานแผ่นเหล็กชนิดเดียวกับ Blank ซึ่งจุ่มเคลือบในน้ำยาโซลเจลที่ประกอบด้วย 0.05 M TiO_2 , 0.125wt% PVB และ Ethy alcohol ขั้นตอนการจุ่มเคลือบเป็นเช่นเดียวกับการเตรียมชิ้นงาน Silicate

5.1.2 การทดสอบการกัดกร่อน

ชิ้นงานแผ่นเหล็กเคลือบที่ได้เตรียมขึ้นได้ถูกคัดเลือกกลุ่มละ 4 ชิ้นงาน เพื่อนำมาทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศความชื้น ASTM D2247 ภายในตู้พ่นละอองน้ำ กลุ่มละ 2 ชิ้นงาน และทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศละอองเกลือ ASTM B117 กลุ่มละ 2 ชิ้นงาน โดยทำการทดสอบกว่า 600 ชั่วโมง และมีการถ่ายรูปผิวหน้าชิ้นงานเป็นระยะตลอดการทดสอบ โดยการวิเคราะห์สภาพผิวนั้น ใช้การสังเกตวิเคราะห์ด้วยสายตาประกอบกับการใช้โปรแกรมวิเคราะห์รูปภาพ (J-Image) ที่ช่วยแยกสัดส่วนของการเกิดสนิมขาว สนิมดำ และสนิมแดงบนพื้นผิวชิ้นงาน

5.2 ผลการทดลอง

5.2.1 ผลการทดสอบในบรรยากาศความชื้น ASTM D2247

รูปภาพด้านล่างแสดงถึงตัวอย่างลักษณะของผิวชิ้นงานทั้ง 4 กลุ่ม ที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยผลการทดลองของแต่ละชิ้นงานในแต่ละกลุ่มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ขณะทำการทดสอบ ผลการศึกษาพบว่า ชิ้นงาน Blank และชิ้นงาน Titania เกิดสนิมขาวขึ้นปกคลุมอย่างรวดเร็ว และภายในระยะเวลา 96 ชั่วโมง สนิมขาวได้ปกคลุมทั่วผิวหน้าของชิ้นงานทั้งสอง ในทางกลับกัน ชิ้นงาน Silicate และ Cr^{2+} มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยมีปริมาณสนิมขาวที่ต่ำกว่าสองกลุ่มแรกอย่างเห็นได้ชัดในแต่ละช่วงเวลาของการทดสอบ นอกจากนี้สังเกตพบว่ามีดอกสังกะสีในบางบริเวณมีสีคล้ำขึ้นในชิ้นงาน Blank, Titania และ Silicate ในขณะที่ชิ้นงาน Cr^{6+} ไม่ปรากฏดอกสังกะสีที่สีคล้ำอย่างเด่นชัด

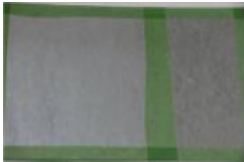
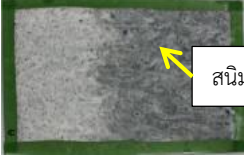
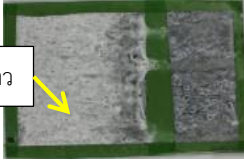
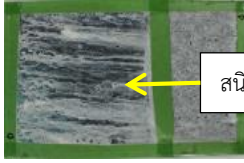
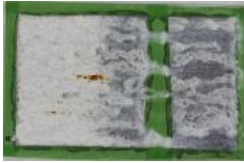
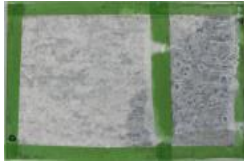
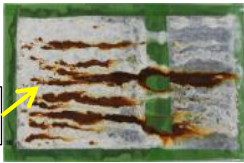
ตารางที่ 1 ภาพถ่ายผิวหน้าของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการทดสอบความชื้นที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	Blank	Titania	Silicate	Cr ⁶⁺
0				
48				
120				
216				
384				
552				
672				

5.2.2 ผลการทดสอบในบรรยากาศละอองเกลือ ASTM B117

รูปภาพด้านล่างแสดงถึงตัวอย่างลักษณะผิวชิ้นงานทั้ง 4 กลุ่ม ที่ช่วงเวลาต่างๆ ขณะทำการทดสอบ เป็นที่สังเกตว่า สนิมขาวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในชิ้นงาน 4 กลุ่ม (ก่อน 24 ชั่วโมง) เมื่อเปรียบเทียบกับที่ทดสอบในบรรยากาศความชื้น โดยปริมาณสนิมขาวที่เวลา 24 ชั่วโมง พบมากที่สุดบนชิ้นงาน Blank, Titania Silicate และ Cr^{6+} ตามลำดับ ที่เวลา 72 ชั่วโมง สนิมแดงได้ปรากฏขึ้นบนชิ้นงาน Titania และปริมาณสนิมแดงของชิ้นงานนี้ได้ขยายตัวอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการทดสอบ ส่วนชิ้นงาน Blank นั้น สนิมแดงได้ปรากฏขึ้นที่เวลาประมาณ 400 ชั่วโมง ของการทดสอบ เมื่อการทดสอบสิ้นสุดที่เวลา 624 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงาน Silicate ปกคลุมด้วยสนิมขาวในปริมาณมาก โดยไม่พบสนิมแดงปรากฏขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่ชิ้นงาน Cr^{6+} ได้ปรากฏสนิมแดงเกิดขึ้นเป็นแนวยาวที่เวลาทดสอบดังกล่าว

ตารางที่ 2 ภาพถ่ายผิวหน้าชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการทดสอบละอองเกลือที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	Blank	Titania	Silicate	Cr ⁶⁺
0				
24				
72				
168				
408				
624				

5.3 อภิปรายและสรุปผล

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผิวเคลือบที่สภาวะการทดสอบต่างๆ ชี้ให้เห็นว่า ผิวเคลือบซิงกะสีมีความไวต่อการเกิดสนิมขาวและผิวสีคล้ำในสภาวะละอองน้ำ และไวต่อการเกิดสนิมขาวและสนิมแดงในสภาวะละอองเกลือ การเคลือบด้วยสาร Cr^{6+} ที่นิยมใช้โดยทั่วไปนั้นสามารถช่วยป้องกันการเกิดสนิมขาวที่เกิดจากความชื้นของละอองน้ำได้ดีพอสมควร แต่ไม่สามารถป้องกันการเกิดสนิมขาวในบรรยากาศละอองเกลือได้ดีนัก ในส่วนของผิวเคลือบ Titania นั้น ไม่เพียงแต่มีได้ป้องกันการเกิดสนิมขาวในบรรยากาศ ทั้งสองได้อย่างชัดเจน แต่กลับยังทำหน้าที่เร่งการเกิดสนิมแดงของชิ้นงานเหล็กในบรรยากาศละอองเกลืออีกด้วย สันนิษฐานได้ว่า องค์ประกอบของผิวเคลือบ Titania นั้น อาจจะเอื้อต่อการเก็บกักความชื้น, คลอไรด์ไอออน และ corrosion deposit ที่มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนของเนื้อเหล็ก

เมื่อพิจารณาระบบ Silicate พบว่า สามารถลดอัตราการเกิดสนิมขาวในสภาวะละอองน้ำได้ เทียบเคียงกับระบบ Cr^{6+} และในสภาวะละอองเกลือนั้นถึงแม้ระบบ Silicate จะมีอัตราการเกิดสนิมขาวที่สูงกว่าระบบ Cr^{6+} เล็กน้อย แต่กลับมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กที่สูงกว่า ผลที่ได้นี้ชี้ให้เห็นว่า สนิมสีขาวที่สังเกตพบในระบบ Silicate มีองค์ประกอบและหรือโครงสร้างที่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนมากกว่าสนิมขาวของระบบ Cr^{6+} หรือสนิมสีขาวนั้นเกิดขึ้นบนพื้นผิวเหล็กโดยสม่ำเสมอ และทำหน้าที่เสมือนเป็น passive film ที่ช่วยกันการสัมผัสกันของสภาวะบรรยากาศและผิวเหล็ก ดังนั้น ผลจากการทดลอง ในส่วนนี้จึงแสดงให้เห็นว่า สารเคลือบผิวระบบ Silicate ที่ทำการศึกษามีโอกาสที่จะพัฒนาเพื่อทดแทนสารเคลือบระบบ Cr^{6+} ที่มีความอันตรายได้

6. การศึกษาการเตรียมและผลของชั้นเคลือบ Silicate

6.1 วิธีการทดลอง

จากหัวข้อที่ 5 พบว่า สารเคลือบซิลิเกตมีสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนที่ค่อนข้างดี และมีโอกาสนำมาพัฒนาเพื่อใช้ทดแทนสารเคลือบโครเมียมได้ ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาถึงตัวแปรในการผลิตชั้นเคลือบ Silicate ที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบร้อน หลังชุบเคลือบชิ้นงานในน้ำยาซิลิเกต นอกจากนี้ชิ้นงานในบางกลุ่มได้ถูกคัดเลือกไปทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาวะต่างๆ ที่มีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริง ได้แก่ การแช่น้ำและการอังเหนือน้ำ

ชิ้นงานแผ่นเหล็กสังกะสีเคลือบซิลิกาได้ถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธีการที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 5 โดยมี ความเข้มข้นสารละลายที่ 5wt%, 10wt% และ 20wt% ซิลิเกต และมี PVA ผสมอยู่ที่ 0.0034wt% จำนวน อย่างน้อยกลุ่มละ 4 ชิ้น หลังจากนั้นได้ทำการอบร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 100 °C, 130 °C และ 160 °C เป็น เวลา 20 นาที เมื่อชิ้นงานเย็นต้องทำการเปรียบเทียบผิวของชิ้นงาน และสังเกตถึงความเงางามและความเรียบ สม่ำเสมอหลังการผลิต

ชิ้นงานกลุ่มที่มีความสมบูรณ์ได้นำไปทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยการแช่น้ำและการ อังเหนือดว้มน้ำกลุ่มละ 2 ชิ้น ในลักษณะแรกชิ้นงานเหล็กแผ่นเคลือบแต่ชิ้นถูกจุ่มอยู่ในน้ำ DI ปริมาณ 350 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร ซึ่งมีพลาสติกใสปิดอยู่ด้านบนของบีกเกอร์เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ รวมเวลาทดสอบประมาณ 700 ชั่วโมง ส่วนการทดสอบในลักษณะที่สอง ชิ้นงานเหล็กแผ่นเคลือบถูกแขวนไว้ในบีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร ซึ่งบรรจุน้ำ DI ปริมาณ 300 มิลลิลิตร ในลักษณะนี้ปลายชิ้นงานสัมผัสกับผิวน้ำพอดี และผิวของชิ้นงานจะสัมผัสกับไอน้ำที่เกิดขึ้นในระบบ ด้านบนของบีกเกอร์ถูกปิดไว้ด้วยพลาสติกใสเพื่อป้องกัน ไอน้ำระเหยออกจากบีกเกอร์ การทดสอบทำขึ้นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 700 ชั่วโมง

6.2 ผลการทดลอง

6.2.1 ผลกระทบของความเข้มข้นของซิลิกาและอุณหภูมิการอบร้อน

รูปด้านล่างแสดงถึงลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานแผ่นเหล็กเคลือบที่เตรียมขึ้นในลักษณะต่างๆ ตามที่กล่าวข้างต้น ผลการศึกษาได้ชี้ให้เห็นว่า เมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารซิลิกาเกิดลดลงจาก 20% เป็น 10% และ 5% ความขุ่นมัวของชิ้นงานจะลดลงตามลำดับ ถึงแม้ว่าชิ้นงานในแต่ละกลุ่มนั้นมีความเรียบสม่ำเสมอในลักษณะคล้ายคลึงกัน นอกจากนี้ยังพบว่า การลดปริมาณลดต่ำลงอย่างมีนัยยะ ชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยาความเข้มข้นที่ 5% และอบร้อนที่ 100 °C นั้น มีความเงาแวววาวที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อเทียบกับผิวของแผ่นเหล็กสังกะสีที่เคลือบน้ำยา Cr^{6+} แล้วพบว่า ผิวของชิ้นงานมีสีผิวที่ขุ่นกว่าและสะท้อนแสงได้ไม่ดีเทียบเท่า

ตารางที่ 3 ภาพถ่ายผิวชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่เคลือบด้วยซิลิกาเกิดโซลเจลความเข้มข้น 5wt%, 10wt% และ 20wt% หลังอบที่อุณหภูมิต่างๆ

ความเข้มข้น	อุณหภูมิ 100 °C	อุณหภูมิ 130 °C	อุณหภูมิ 160 °C
5 wt%			
10 wt%			
20 wt%			

เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิในการอบร้อนชิ้นงาน พบว่า อุณหภูมิมีผลกับลักษณะของผิวชิ้นงานอย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิอบร้อนที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 100 °C เป็น 130 °C และ 160 °C ผิวชิ้นงานมีความขุ่นมัวมากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้คาดว่า อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ น้ำในผิวเคลือบซิลิเกตถูกกำจัดออกอย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลต่อความแข็งแรงและความสมบูรณ์ของชั้นเคลือบ อย่างไรก็ตาม เป็นไปได้ที่ PVA ซึ่งเป็นส่วนประกอบของน้ำยาเคลือบมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออกไปเมื่อได้รับความร้อนสูงเป็นระยะเวลานาน ซึ่งอาจส่งผลให้สีมีความขุ่นมัวที่ผิวของชิ้นงาน

ทั้งนี้ ความต้องการของตลาดปัจจุบันมักนิยมเลือกใช้เหล็ก โดยเฉพาะแผ่นเหล็กที่มีลักษณะเรียบเงาเป็นมันวาว หากชิ้นงานมีความขุ่นมัวอาจไม่เป็นที่ยอมรับในตลาด ถึงแม้ว่าชิ้นงานมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าก็ตาม ในลักษณะนี้การเคลือบน้ำยาซิลิเกตที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 20wt% และใช้อุณหภูมิอบร้อนไม่สูงไปกว่า 100 °C ซึ่งยังคงให้ชิ้นงานที่ค่อนข้างเงางาม จึงเป็นตัวเลือกการผลิตที่มีความน่าสนใจ

6.2.2 ผลการทดสอบการแช่น้ำ

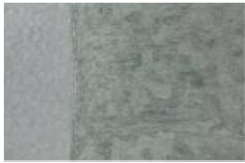
รูปภาพด้านล่างแสดงถึงตัวอย่างลักษณะของผิวชิ้นงาน 4 กลุ่ม ได้แก่ เหล็กแผ่นชุบสังกะสี (blank), เหล็กแผ่นชุบสังกะสีเคลือบน้ำยา Cr^{6+} และเหล็กแผ่นชุบสังกะสีเคลือบน้ำยาซิลิเกตที่มีความเข้มข้น 20wt% และ 5wt% (อบร้อนที่ 100 °C) เมื่อทำการทดสอบโดยการแช่ชิ้นงานลงในน้ำเป็นระยะเวลานาน โดยผลการทดลองของแต่ละชิ้นงานในแต่ละกลุ่มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ผลการศึกษาพบว่า ชิ้นงาน blank มีสนิมขาวปกคลุมอย่างรวดเร็วและมีปริมาณมากภายในวันที่ 3 ของการทดสอบ นอกจากนั้นคราบสนิมดำสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนควบคู่กับการเกิดสนิมขาว เมื่อการทดสอบดำเนินไปสนิมขาวและสนิมดำมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อถึงระยะเวลาประมาณ 700 ชั่วโมง สนิมแดงได้ปรากฏขึ้นบนผิวชิ้นงาน ซึ่งเมื่อเทียบกับในบรรยากาศลองเกลือแล้วนั้น ใช้เวลายาวนานกว่าประมาณ 300 ชั่วโมง ก่อนการเกิดสนิมแดงบนพื้นผิว

ส่วนชิ้นงาน Cr^{6+} นั้น พบสนิมขาวในปริมาณน้อยเมื่อการทดสอบผ่านไป 3 วัน และที่เวลา 168 ชั่วโมง เป็นต้นไป พบสนิมขาวกระจายตัวสม่ำเสมอปกคลุมผิวชิ้นงาน ทั้งนี้มีคราบสนิมดำปรากฏให้เห็นเช่นกัน แต่กระจายตัวเป็นจุดเล็กๆ ทั่วผิวชิ้นงาน

ชิ้นงานซิลิเกตความเข้มข้น 20wt% พบคราบสีเทาในปริมาณน้อย เมื่อการทดสอบผ่านไป 3 วัน และที่เวลา 168 ชั่วโมง เป็นต้นไป พบคราบสีเทาจางๆ กระจายตัวสม่ำเสมอปกคลุมผิวชิ้นงาน นอกจากนี้พบคราบสนิมดำบน Spangle ของสังกะสีในลักษณะใกล้เคียงกับชิ้นงาน blank เมื่อการทดสอบดำเนินไป 724 ชั่วโมง

ชิ้นงานซิลิเกตความเข้มข้น 5wt% นั้น พบคราบสีเทาในปริมาณมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานซิลิเกตความเข้มข้น 20wt% ที่เวลา 72 ชั่วโมง ของการทดสอบ โดยคราบสีเทามีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดการทดสอบ และลักษณะของผิวชิ้นงานค่อนข้างใกล้เคียงกับชิ้นงาน blank อย่างไรก็ดี เมื่อสิ้นสุดการทดสอบที่ 724 ชั่วโมง ไม่พบคราบสนิมแดงปรากฏบนผิวชิ้นงาน

ตารางที่ 4 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการกัดกร่อนโดยการแช่ในน้ำปราศจากไอออนที่เวลาต่างๆ

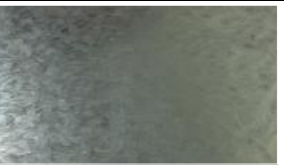
เวลา (ชั่วโมง)	Blank	Cr ⁶⁺ passivation	20wt% ซิลิเกตโซลเจล	5wt% ซิลิเกตโซลเจล
0				
72				
168				
264				NA.
724				

6.2.3 ผลการทดสอบการอั้งขึ้นงานเหนือน้ำ

รูปภาพด้านล่างแสดงถึงตัวอย่างลักษณะของผิวชิ้นงาน 3 กลุ่ม ได้แก่ เหล็กแผ่นชุบสังกะสี (blank) เหล็กแผ่นชุบสังกะสีเคลือบน้ำยา Cr^{6+} และเหล็กแผ่นชุบสังกะสีของระบบน้ำยา 20wt% ซิลิเกต ที่อบร้อนที่ 100 °C เมื่อทำการทดสอบโดยการอั้งขึ้นงานเหนือน้ำยาเป็นระยะเวลานาน โดยผลการทดลองของแต่ละชิ้นงานในแต่ละกลุ่มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยภาพรวมพบว่า ทุกกลุ่มมีสนิมขาวเกิดขึ้นในปริมาณไม่มาก โดยสนิมขาวปกคลุมผิวหน้าชิ้นงานค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วบริเวณชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ตั้งแต่เวลาประมาณ 96 ชั่วโมง ของการทดสอบ เมื่อสิ้นสุดการทดสอบที่ประมาณ 700 ชั่วโมง คราบสนิมขาวเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยและไม่สังเกต พบคราบสนิมแดงแต่อย่างใด

อย่างไรก็ดี ได้สังเกตพบคราบสนิมดำเกิดขึ้นตามบริเวณดอกสังกะสีของผิวชิ้นงาน ค่อนข้างชัดเจนระหว่างดำเนินการทดสอบ ซึ่งคาดว่าคราบสนิมดำที่เกิดขึ้นนั้นมีที่มาจากปฏิกิริยา Oxidation ของโลหะชนิดอื่นๆ ในเนื้อสังกะสี (อันได้แก่ ตะกั่วและพลวง เป็นต้น) กับอากาศ เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ชิ้นงาน blank มีคราบสนิมดำในปริมาณมากที่สุด ส่วนชิ้นงาน 20wt% ซิลิเกต พบคราบสนิมดำในปริมาณต่ำที่สุด

ตารางที่ 5 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการกัดกร่อนโดยการอั้งขึ้นงานเหนือน้ำที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	Blank	Cr^{6+} passivation	20wt% ซิลิเกตโซลเจล
0			
96			
192			
672			

6.3 อภิปรายและสรุปผล

จากการทดลองในหัวข้อนี้พบว่า ประสิทธิภาพของชั้นเคลือบซิลิเกต มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายซิลิเกต และระดับความร้อนที่ใช้ในการอบขึ้นงานอย่างเด่นชัด โดยอุณหภูมิ การอบที่เพิ่มสูงขึ้นจาก 100 °C เป็น 130 °C และ 160 °C ส่งผลให้ชั้นงานมีผิวที่ขุ่นมัว ดังนั้น อุณหภูมิที่ใช้ในการอบที่ 100 °C จึงมีความเหมาะสม ความเข้มข้นของสารละลายที่เพิ่มขึ้นจาก 5% เป็น 10% และ 20% ส่งผลให้ผิวชั้นงานขุ่นมัวมากยิ่งขึ้น อีกทั้งสารละลายเกิดการตกตะกอนในปริมาณที่มากขึ้น ดังนั้น จึงพบว่าความเข้มข้นของสารละลายซิลิเกต (ซึ่งมีส่วนผสมของ PVA และน้ำ DI) ไม่ควรมีค่าสูงเกินกว่า 20wt%

เมื่อชั้นงานหลักแผ่นสังกะสีเคลือบสารซิลิเกตถูกนำไปทดสอบด้วยการแช่น้ำ พบว่า ความต้านทานต่อการเกิดสนิมขาวเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของซิลิเกต ซึ่งส่วนหนึ่งอาจเป็นผลจากความหนาของชั้นเคลือบซิลิเกตที่อาจเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้น หากต้องการให้ชั้นงานมีประสิทธิภาพเทียบเคียงกับการใช้สารเคลือบ Cr^{6+} จำเป็นต้องใช้สารละลายซิลิเกตที่มีความเข้มข้นสูง

การนำชั้นงานอั้งไว้น้ำมีผลต่อการเกิดสนิมขาวของชั้นงานเคลือบสารซิลิเกตเพียงเล็กน้อย ในลักษณะคล้ายคลึงกับชั้นงานกลุ่มอื่นๆ อย่างไรก็ตาม พบว่า ชั้นเคลือบซิลิเกตที่มีความเข้มข้นสูงมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดของคราบสนิมดำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7. การศึกษาการเตรียมและผลของชั้นเคลือบ Silicate ผสม Colloidal silica

7.1 วิธีการทดลอง

ในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาผลของการผสมสาร Colloidal silica ในน้ำยา Sodium silicate ผสม PVA โดยการทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การทดสอบบนแผ่นเหล็กชุบสังกะสี และบนสกรูเหล็กชุบสังกะสีขนาด M16 โดยใช้วิธีการชุบเคลือบชิ้นงานตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.1 และเตรียมชิ้นงานจำนวนอย่างน้อยกลุ่มละ 4 ชิ้น

สูตรของสารละลายที่ใช้ในการชุบเคลือบวัสดุทั้ง 2 แบบ เป็นตามตารางที่ 7.1 โดยมีการควบคุมปริมาณของ PVA คงที่ ลดปริมาณของ Sodium silicate ลงในกรณีที่มี Colloidal silica ผสม และปรับเปลี่ยนสัดส่วนของปริมาณ Colloidal silica (40wt% Lab grade) ให้ Colloidal silica มีส่วนผสมอยู่ในสารละลายในปริมาณ 2.5wt% และ 10wt% ในการศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบผลกับการใช้สารละลาย 20wt% Silicate ซึ่งเตรียมขึ้นมาในลักษณะเดียวกับที่ใช้และอธิบายไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา

ตารางที่ 6 ส่วนผสมของน้ำยาเคลือบที่ใช้ในงานวิจัย

สูตรน้ำยา	น้ำปราศจากไอออน (กรัม)	PVA (กรัม)	Sodium Silicate (กรัม)	Colloidal silica (กรัม)
20wt% Silicate	239.99	0.01	60 (20wt%)	-
2.5wt% Silica	266.24	0.01	15 (5wt%)	18.75
10wt% Silica	209.99	0.01	15 (5wt%)	75

ชิ้นงานแผ่นเหล็กสังกะสีเคลือบที่เตรียมขึ้นมากถูกนำไปทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน โดยการแช่น้ำเป็นระยะเวลายาวนานกว่า 800 ชั่วโมง กลุ่มละ 2 ชิ้น และการอังเหนือผิวน้ำเป็นระยะเวลายาวนานกว่า 800 ชั่วโมงกลุ่มละ 2 ชิ้น ในลักษณะเดียวกับที่ดำเนินการในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งจากการศึกษาในหัวข้อ 6 พบว่า การทดสอบโดยการแช่น้ำ DI และการอังชิ้นงานเหนือ น้ำ DI เป็นสภาวะที่เร่งให้เกิดคราบสนิมสีขาวและคราบสนิมสีดำ ตามลำดับ

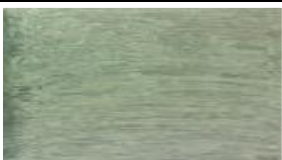
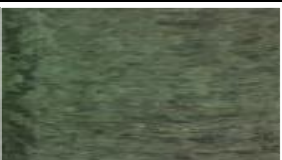
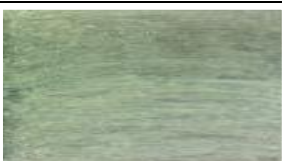
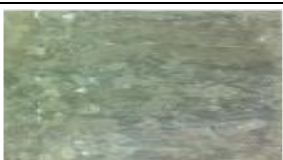
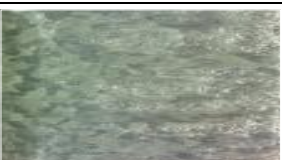
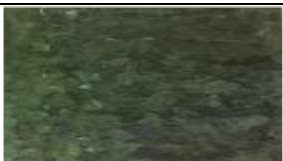
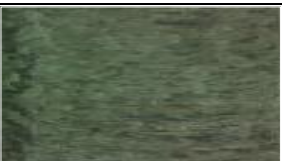
สกรูเหล็กขนาด M16 เกรด 8.8 ได้นำมาใช้ในการศึกษาเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของสารเคลือบเมื่อนำมาใช้กับเหล็กรูปพรรณที่เคลือบผิวด้วยเทคนิค GI และ GN (ซึ่งมีการชุบสังกะสีด้วยวิธี Batch hot-dip galvanizing เป็นขั้นตอนสุดท้าย) โดยชิ้นงานสกรูเหล็ก GI เตรียมขึ้นโดยนำชิ้นงานมาทำความสะอาด ชุบฟลักซ์ และชุบเคลือบในบ่อสังกะสีที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 1 นาที ในห้องปฏิบัติการ ส่วนชิ้นงานสกรูเหล็ก GN เตรียมขึ้นในลักษณะคล้ายคลึงกัน ต่างกันที่ก่อนการชุบสังกะสีนั้น ชิ้นงานถูกเคลือบโลหะรองพื้น (pre-coating) ด้วยวิธี Electrodeposition ตามรายละเอียดที่แสดงไว้ในรายงานวิจัยของปีที่ 1 หลังจากชิ้นงานทั้งหมดได้เตรียมขึ้นแล้ว ได้นำไปเคลือบผิวอีกขั้นตอนหนึ่งในสารละลาย 10wt% Colloidal silica ซึ่งมีส่วนประกอบของ Sodium silicate และ PVA ดังตารางข้างต้น แล้วจึงนำไปทดสอบโดยการแช่น้ำ DI กลุ่มละ 2 ชิ้นเป็นระยะเวลาเกินกว่า 300 ชั่วโมง

7.2 ผลการทดสอบการกักกรอง

7.2.1 ผลการทดสอบแผ่นหลักแขนน้ำ

รูปภาพด้านล่างแสดงตัวอย่างผลการทดสอบหลักเคลือบผิวแขนน้ำ DI ที่ระยะเวลาต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงาน 2.5wt% Colloidal Silica (CS), 10wt% Colloidal Silica (CS) และ 20wt% Silicate (S) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานในกลุ่มต่างๆ ยังไม่มีคราบสนิมขาวปรากฏขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง แต่เมื่อเข้าสู่เวลา 48 ชั่วโมง ชิ้นงาน 2.5wt% CS มีคราบสนิมขาวเกิดขึ้นอย่างชัดเจน ส่วนชิ้นงาน 10wt% CS และ 20wt% S มีคราบสนิมขาวขึ้นชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไป 72 ชั่วโมง โดยชิ้นงาน 10wt% CS มีปริมาณสนิมขาวน้อยกว่าชิ้นงาน 20wt% S เล็กน้อย หลังจากนั้นทุกกลุ่มชิ้นงานมีสนิมขาวปรากฏขึ้นบนผิวชิ้นงานในปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเวลา 168 ชั่วโมง เป็นที่สังเกตว่า ชิ้นงาน 10wt% CS มีปริมาณคราบสนิมขาวที่ลดลง ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการที่สนิมขาวหลุดร่อนออกไป เมื่อคราบสนิมขาวลดน้อยลง ผิวชิ้นงานมีการปรากฏของสนิมดำตามดอกสังกะสีทั่วบริเวณ เมื่อการทดสอบเสร็จสิ้นที่เวลา 888 ชั่วโมง พบว่า คราบสนิมขาวมีปริมาณน้อยไปจนถึงมากที่สุดตามลำดับในชิ้นงานดังนี้: 10wt% CS < 20wt% S < 2.5wt% CS โดยชิ้นงานทุกกลุ่มไม่มีคราบสนิมแดงปรากฏ

ตารางที่ 7 ภาพถ่ายผิวหน้าชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนต่อเนื่องที่เคลือบด้วยน้ำยา 2.5wt%, 10 wt% และ 20 wt% Silicate, ชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนต่อเนื่องที่ผ่านกระบวนการ CCCs ด้วย Cr^{6+} และชิ้นงาน Blank บริเวณที่แช่น้ำที่เวลาต่างๆ

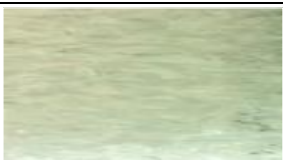
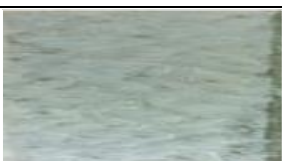
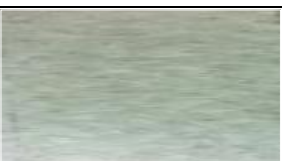
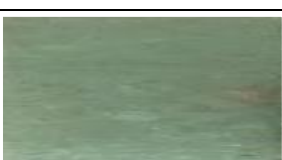
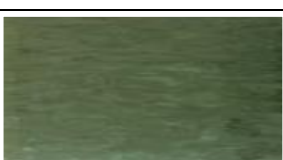
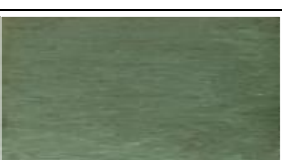
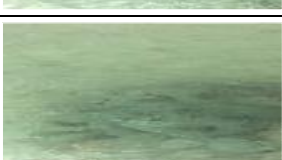
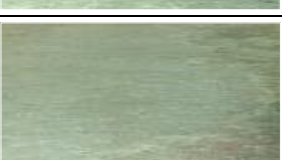
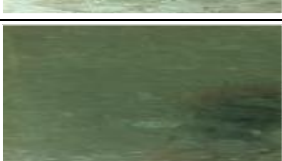
เวลา (ชั่วโมง)	2.5wt% Silica	10wt% Silica	20wt% Silicate
24			
48			
72			
96			
168			
192			
840			
888			

7.2.2 ผลการทดสอบแผ่นเหล็กเหนียวผิวหน้า

รูปภาพด้านล่างแสดงตัวอย่างผลการทดสอบเหล็กเคลือบที่ยังอยู่เหนียวผิวหน้า DI ที่ระยะเวลาต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงาน 2.5wt% CS, 10wt% CS และ 20wt% S ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานในกลุ่มต่างๆ ยังไม่มีคราบสนิมขาวปรากฏเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง เมื่อเข้าสู่เวลา 48 ชั่วโมง ชิ้นงาน 2.5wt% CS และ 20wt% S มีคราบสนิมขาวบางๆ ปรากฏบนพื้นผิว หลังจากนั้นทุกกลุ่มชิ้นงานมีคราบสนิมขาวเกิดขึ้นและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อเทียบที่ระยะเวลาเดียวกันแล้วการเกิดคราบสนิมขาวมีในปริมาณที่น้อยกว่าที่พบในการทดสอบชิ้นงานด้วยการแช่น้ำอย่างชัดเจน เป็นที่น่าสังเกตอีกเช่นกันว่า หลังจากการเวลา 168 ชั่วโมง ปริมาณคราบสนิมขาวบนผิวชิ้นงานทุกกลุ่มลดต่ำลง ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการที่สนิมขาวหลุดล่อนออกไป และทำให้สังเกตพบคราบสนิมดำบนผิวของชิ้นงานได้ชัดเจนมากขึ้น หลังจากนั้นคราบสนิมขาวในแต่ละกลุ่มชิ้นงานได้กลับมามีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อการทดสอบเสร็จสิ้นที่เวลา 888 ชั่วโมง พบว่า คราบสนิมขาวมีปริมาณน้อยไปจนถึงมากที่สุดตามลำดับในชิ้นงานดังนี้:

$$10\text{wt}\% \text{ CS} < 2.5\text{wt}\% \text{ CS} < 20\text{wt}\% \text{ S}$$

ตารางที่ 8 ภาพถ่ายผิวหน้าชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนต่อเนื่องที่เคลือบด้วยน้ำยา 2.5wt%, 10wt% และ 20wt% Silicate, ชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนต่อเนื่องที่ผ่านกระบวนการเคลือบด้วย Cr^{6+} และชิ้นงาน Blank บริเวณที่อยู่เหนือน้ำที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	2.5wt% Silica	10wt% Silica	20wt% Silicate
24			
48			
72			
96			
168			
192			
840			
888			

7.2.3 ผลการทดสอบสกรูเหล็กแช่น้ำ

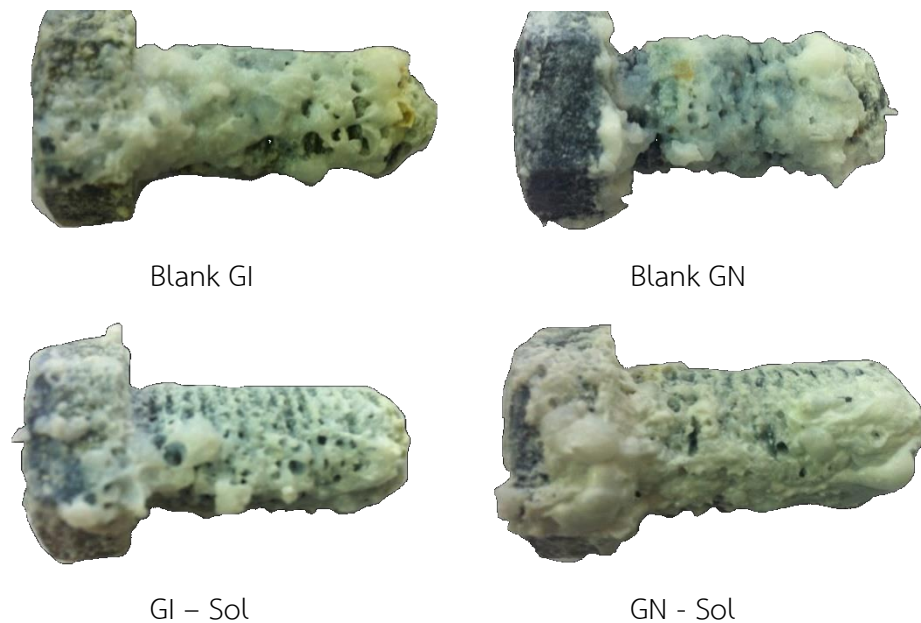
รูปภาพด้านล่างแสดงตัวอย่างผลการทดสอบสกรูเหล็กเคลือบ 4 กลุ่ม ได้แก่ GI, GN และ GI และ GN ที่เคลือบด้วยน้ำยา 10wt% CS ซึ่งมีส่วนประกอบของ Sodium silicate และ PVA ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า ทุกกลุ่มชิ้นงานมีสนิมขาวมาปกคลุมทั่วบริเวณผิวชิ้นงานทั้งหัวสกรูและสลักเกลียว เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 วัน โดยไม่สามารถแยกความแตกต่างของปริมาณสนิมขาวในแต่ละกลุ่มชิ้นงานได้อย่างชัดเจน คาดว่าส่วนหนึ่งเกิดจากการที่ชิ้นงานสกรูเหล็กเหล่านี้ชุบเคลือบด้วยวิธี Batch hot-dip galvanizing จึงทำให้ผิวสังกะสีชั้นนอกมีความขรุขระไม่สม่ำเสมอ เป็นสาเหตุที่เอื้อให้ปฏิกิริยาการเกิดสนิมขาวเกิดขึ้นได้ง่ายในอัตราที่เร็วขึ้น นอกจากนี้ความขรุขระไม่สม่ำเสมอของผิวชุบดังกล่าว ยังส่งผลให้การสังเกตการเปลี่ยนแปลงของลักษณะผิวชุบก่อนหลังการเกิดคราบสนิมขาวอย่างแม่นยำทำได้ยากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ปริมาณสนิมขาวมีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาการทดลอง โดยไม่พบช่วงที่สนิมขาวมีปริมาณลดลงแต่อย่างใด และเมื่อสิ้นสุดการทดสอบที่เวลา 336 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานกลุ่มต่างๆ มีสนิมขาวมาปกคลุมทั่วบริเวณในลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยไม่พบคราบสนิมแดงแต่อย่างใด

เพื่อเป็นการศึกษาผลของการใช้สารเคลือบ Colloidal Silica ผสม Sodium Silicate อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น ในชิ้นงานในกลุ่มสกรูเหล็กจึงได้ทำการทดสอบเพิ่มเติม โดยการเตรียมชิ้นงานขึ้นมาอีก 4 กลุ่ม ได้แก่ สกรูเหล็กเคลือบ GI, GN และ GI และ GN ที่เคลือบต่ออีกชั้นด้วยน้ำยา 10wt% CS และนำไปแช่น้ำเกลือ 5wt% เป็นระยะเวลา 2 ชิ้นงาน ทั้งนี้ผลการศึกษาในหัวข้อแรกได้ชี้ให้เห็นว่าการทดสอบการกัดกร่อนที่มีสภาวะเป็นน้ำเกลือส่งผลให้เหล็กเคลือบมีอัตราการกัดกร่อนที่รุนแรงกว่าในสภาวะที่เป็นน้ำ DI และนำไปสู่การเกิดสนิมแดงในที่สุด

ตารางที่ 9 ภาพถ่ายผิวหน้าชิ้นงานสลักเกลียวเหล็กกล้าชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (GI) และที่ชุบนิเกิลโดยใช้ไฟฟ้า และชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (GN) ที่ทำการเคลือบและไม่เคลือบด้วยน้ำยา 10wt% Silica หลังทดสอบ การแช่น้ำที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	GI-Blank	GI-Sol	GN-Blank	GN-Sol
4				
6				
49				
96				
168				
200				
336				

รูปภาพด้านล่างแสดงผลของการทดสอบชิ้นงานดังกล่าวในน้ำเกลือ หลังการแช่ชิ้นงานอย่างต่อเนื่องโดยไม่ยกชิ้นงานออกจากสารละลายเป็นระยะเวลาประมาณ 3,000 ชั่วโมง ผลจากการเกิดผลึกเกลือบนผิวชิ้นงานทำให้ไม่สามารถระบุได้อย่างแน่ชัดว่าชิ้นงานแต่ละกลุ่มมีปริมาณสนิมขาวเกิดขึ้นมากน้อยแตกต่างกันอย่างไร อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสนใจว่า ผลึกเกลือได้เกิดขึ้นและปกคลุมชิ้นงาน GI และ GN ที่มีการเคลือบของ 10wt% CS ในปริมาณที่มากกว่าชิ้นงาน GI และ GN ที่ไม่มีสารเคลือบอีกชั้นหนึ่งอย่างเห็นได้ชัด ในทางกลับกันพบว่า มีการเกิดสนิมแดงขึ้นบนผิวเกลียวบางส่วนของชิ้นงาน GI และ GN ที่ไม่มีสารเคลือบ 10wt% CS อีกทั้งสารละลายน้ำเกลือของทั้งสองกลุ่มนี้เปลี่ยนจากสีขาวขุ่นเป็นสีส้มแดง ผลการทดสอบนี้จึงชี้ให้เห็นว่า สารเคลือบ 10wt% CS ช่วยชะลอผิวเหล็กจากการกัดกร่อน โดยอาจเกิดจากการที่ผิวเคลือบ 10wt% CS เองได้ช่วยป้องกันการกัดกร่อนของผิวสังกะสี หรืออาจเกิดจากการที่ Corrosion product ที่เกิดขึ้นในระบบที่มีผิวเคลือบ 10wt% CS เอื้อต่อการยึดเกาะของผลึกเกลือ ซึ่งช่วยป้องกันการสัมผัสของผิวสังกะสีกับสารละลายเกลือที่เป็นอิเล็กโทรไลต์อีกทางหนึ่ง



รูปที่ 1 ลักษณะของชิ้นงานหลังแช่ในน้ำเกลือ 5% อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาประมาณ 3,000 ชั่วโมง

7.3 อภิปรายและสรุปผล

การนำ Coloidal Silica มาผสมกับ Sodium Silicate สามารถนำไปสู่การพัฒนาความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบสังกะสีใน 2 ลักษณะ ในลักษณะแรก Coloidal Silica สามารถสร้างพันธะกับ Sodium Silicate และก่อให้เกิด Monomeric และ Polymeric silicate species ต่างๆ ที่มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อน รวมถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยากับชั้นสังกะสีนำไปสู่การเกิดขึ้นของสารที่เป็น Interfacial barrier อย่างเช่น Zinc Silicate layer หรือ Zinc orthosilicate ได้ และในอีกลักษณะ หากมี Colloidal Silica บางส่วนที่ไม่ละลายใน Sodium Silicate Colloidal Silica เหล่านั้นก็อาจช่วยทำหน้าที่ Barrier protection ภายในชั้นฟิล์มอีกทางหนึ่ง ด้วยการที่สารเหล่านี้มีขนาดเล็กจึงน่าจะมีประสิทธิภาพในการถูก adsorp เข้าไปอยู่ตาม pits ของผิวสังกะสี และช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนได้

จากการศึกษาในหัวข้อนี้ได้พบว่า การเคลือบแผ่นเหล็กสังกะสีด้วยน้ำยาที่มีส่วนผสมของ Colloidal Silica, Sodium Silicate และ PVA ช่วยในการชะลอการกัดกร่อนของชั้นสังกะสีได้ดี เมื่อปริมาณ Colloidal Silica ที่ใช้อยู่ที่ 10% โดยเห็นผลค่อนข้างชัดเจนในกรณีที่สภาวะการกัดกร่อนไม่รุนแรงมาก (การอ้งขึ้นงานเหนือผิวน้ำ) เมื่อทดสอบชิ้นงานในสภาวะที่รุนแรงขึ้นมา (การแช่ชิ้นงานในน้ำ) พบว่า ผลของการพัฒนาประสิทธิภาพการชะลอการกัดกร่อนของชั้นสังกะสีด้วยสารเคลือบดังกล่าวมีความไม่ชัดเจน ทั้งในกรณีเหล็กแผ่นสังกะสีที่ชุบสังกะสีด้วยวิธี continuous และสกรูเหล็กชุบสังกะสีที่ชุบสังกะสีด้วยวิธี batch อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าถึงแม้ผลการป้องกันการกัดกร่อนให้กับสังกะสีไม่ชัดเจนนัก แต่ผลการทดลองได้ชี้ให้เห็นว่า น้ำยา 10wt% Colloidal Silica ที่ทำการศึกษาช่วยป้องกันการกัดกร่อนให้กับผิวเหล็กได้เป็นอย่างดี โดยส่วนหนึ่งอาจเกิดจากการที่สังกะสีมีอัตราการกัดกร่อนที่ลดลง เมื่อเคลือบด้วยสารละลาย Colloidal Silica ที่ศึกษาดังนั้น การใช้ยาเคลือบชนิดนี้จึงช่วยชะลอการกัดกร่อนทั้งผิวสังกะสีและเนื้อเหล็กได้ งานวิจัยที่สามารถต่อยอดได้ในอนาคตจะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาสูตรน้ำยาเคลือบที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นจากองค์ความรู้สำคัญที่ได้รับจากงานวิจัยนี้

8. ผลลัพธ์

8.1 องค์ความรู้ทางด้านการพัฒนาและประยุกต์ใช้เหล็กชุบสังกะสีความต้านทานการกัดกร่อนสูง
หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ ภาครัฐ ภาคเอกชน และประชาชนผู้สนใจทั่วไป ที่ต้องการใช้
งานเหล็กชุบสังกะสีในสภาวะบรรยากาศใกล้น้ำทะเลของประเทศไทย

8.2 การเข้าร่วมเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ 1 ครั้ง: The 7th Thailand Metallurgy Conference
(TMETC) – Krabi, October 2013 เรื่อง Influence of hot-dip coatings on mechanical and corrosion
behaviors of steel bolts นำเสนอแบบบรรยายโดย ธนิต เคนหงส์

8.3 ตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการ: Influence of Hot-Dip Coatings on Mechanical and
Corrosion Behaviors of Steel Bolts, Thanit Kenhong, Gobboon Lothongkum, Yuttanant
Boonyongmaneerat, Journal of Metals, Materials and Minerals, Vol.24, No.2, pp. 49-53 (2014).