

การกัดกร่อนของเหล็กภายใต้บรรยากาศในภาคใต้ของประเทศไทย

Atmospheric Corrosion of Steel in Southern Thailand



ทรงธรรม โปธิ์ถาวร
Songtham Photaworn

๑

| | |
|-----------|-------------------------|
| เลขหมู่ | TS 305 174.2 15710 ๐. 2 |
| Order Key | 28958 |
| Bib Key | 137485 |
| | 19 ก.ค. 2543 |

วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

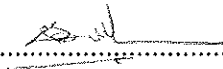
Master of Engineering Thesis in Chemical Engineering

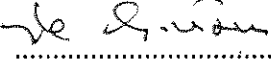
Prince of Songkla University

2540


ชื่อวิทยานิพนธ์ การกักกรองของเหล็กภายใต้บรรยากาศในภาคใต้ของประเทศไทย
ผู้เขียน นายทรงธรรม โพธิ์ถาวร
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

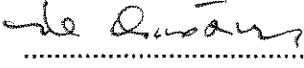
คณะกรรมการที่ปรึกษา

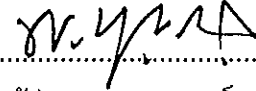

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชاکริต ทองอุไร)

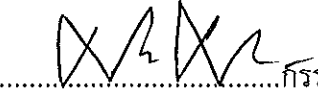

.....กรรมการ
(อาจารย์พิชิต เรืองแสงวัฒนา)

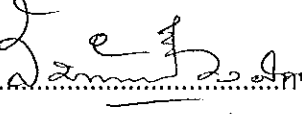
คณะกรรมการสอบ


.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชاکริต ทองอุไร)

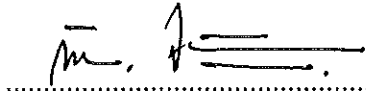

.....กรรมการ
(อาจารย์พิชิต เรืองแสงวัฒนา)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุ บุญพล)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เล็ก สีตง)

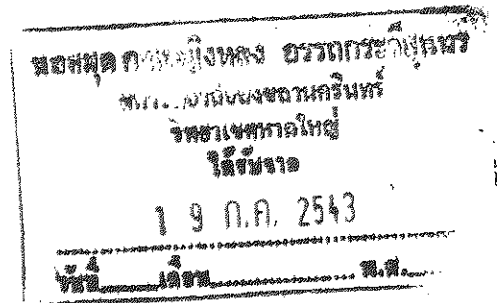

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สัมพันธ์ วงศ์นาวา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ก้าน จันทร์พรหมมา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การกัดกร่อนของเหล็กภายใต้บรรยากาศในภาคใต้ของประเทศไทย
ผู้เขียน นายทรงธรรม โพธิ์ถาวร
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2540

บทคัดย่อ



การศึกษาการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าละมุน (mild steel) ภายใต้บรรยากาศในภาคใต้ของประเทศไทย เมื่อวางชิ้นงานเปลี่ยนที่มีลักษณะต่างๆ กัน คือ ปกติ, หักงอ 90 องศา และมีรอยเชื่อม ทั้งหมดอยู่ในแนวราบในระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน ทั้งกลางแจ้งและในร่ม เมื่อทำการวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป (weight loss) ตามมาตรฐาน ASTM G1 พบว่า อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของบรรยากาศชายทะเล (25 เมตร จากชายฝั่ง) อุตสาหกรรม-ชายทะเล (500 เมตร จากชายฝั่ง) และ ชนบท (30 กิโลเมตร จากชายฝั่ง) หลังจาก 12 เดือน เท่ากับ 300.62, 29.68 และ 19.51 $\mu\text{m}/\text{y}$ ตามลำดับ ซึ่งปริมาณมลสารในบรรยากาศเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนมากกว่าสภาพภูมิอากาศ โดยเฉพาะปริมาณแก๊สไอซอดีียมคลอไรด์ นอกจากนี้ลักษณะการวางชิ้นงานในกลางแจ้งจะมีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่าในร่มไม่เกิน 1 เท่า และชิ้นงานหักงอ 90 องศา (วางหงาย) เป็นชิ้นงานที่มีอัตราการกัดกร่อนสูงสุด สำหรับการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กโดยวิธีเคลือบสี พบว่า วิธีพ่นให้การป้องกันดีกว่าวิธีทา โดยที่ สีโคลทาร์อีพอกซี ชนิด 2 ส่วนผสมกัน และสีอัลคิเดย์ยังไม่มี ความเสียหายเกิดขึ้นบนฟิล์มสี ส่วนสีอีพอกซี ชนิด 2 ส่วนผสมกันมีการเสื่อมสภาพของฟิล์มสีจึงไม่เหมาะกับการใช้งานในกลางแจ้ง นอกจากนี้พบว่า สีโคลทาร์อีพอกซี ชนิด 2 ส่วนผสมกันมีคุณสมบัติการยึดติดแน่นที่ดีกว่าชนิดอื่นๆ

Thesis Title Atmospheric Corrosion of Steel in Southern Thailand
Author Mr. Songtham Photaworn
Major Program Chemical Engineering
Academic Year 1997

Abstract

Atmospheric corrosion of mild steel sheets in Southern Thailand was studied by exposing specimens in flat position for 1, 3, 6, 9 and 12 months. Conditions of specimens were bare, 90°-bended, and welded sheets. The results showed the remarkable influence of sodium chloride (NaCl) content in the atmosphere. The corrosion rates (after 12 months) of marine atmosphere (25 m from coastal), industrial-marine atmosphere (500 m from coastal), and rural atmosphere (30 km from coastal) were 300.62, 29.68 and 19.51 $\mu\text{m}/\text{y}$, respectively. As a whole, the corrosion rates of specimens with outdoor exposures are higher than those in shaded area but not more than 100 %. Furthermore, the 90°-bended specimens in V-position yielded maximum corrosion rates. In preventing corrosion by coating, it was found that the corrosion resistance of spray painting was better than brush painting. 2- pack coal tar epoxy and alkyd paint systems gave good appearances whereas 2-pack epoxy showed paint film deterioration. It was also noticeable that the 2-pack coal tar epoxy paint system produced better adhesion property than others.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร ประธาน
กรรมการที่ปรึกษาและอาจารย์พิชิต เรืองแสงวัฒนา กรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณา
ให้การปรึกษาตลอดมา ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ์ บุญนวล ผู้ช่วย
ศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์ วงศ์นาวา
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้
สำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิจัย และโครงการร่วมมือ
ระหว่างประเทศไทย-นอร์เว ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิจัยบางส่วน

ขอขอบคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมเหมืองแร่และโลหะวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์
ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวัดความผิดแผกของสี และ คุณพงศ์ศาสตร์
เกษัชศาสตร์นุกูล จาก บริษัทเอ็กซ์เคมีคอลอินดัสทรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์
เรซินเพื่อใช้ทำอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน

ขอขอบคุณ คุณวีรวิศา วัชรสุวรรณ เพื่อนๆ นักศึกษาปริญญาโท ตลอดจน
เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่สนับสนุนในการศึกษาและให้กำลังใจ
ข้าพเจ้าตลอดมา

ทรงธรรม โพธิ์ถาวร

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ | (3) |
| Abstract | (4) |
| กิตติกรรมประกาศ | (5) |
| สารบัญ | (6) |
| รายการตาราง | (9) |
| รายการภาพประกอบ | (13) |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ | 1 |
| บทนำต้นเรื่อง | 1 |
| ตรวจเอกสาร | 3 |
| วัตถุประสงค์ | 21 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 21 |
| ขอบเขตการวิจัย | 21 |
| 2 ทฤษฎี | 23 |
| 1. หลักการกัดกร่อน | 23 |
| 2. คุณสมบัติการเป็นโลหะที่มีสกุลและไม่มีสกุล | 26 |
| 3. รูปแบบของการกัดกร่อน | 28 |
| 4. การป้องกันการกัดกร่อน | 41 |
| 5. การกัดกร่อนในบรรยากาศ | 46 |
| 6. ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการกัดกร่อนของโลหะใน บรรยากาศ | 48 |
| 7. การป้องกันการกัดกร่อนด้วยสารเคลือบผิว | 58 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 3 วิธีวิจัย | 69 |
| 1. วัสดุและสารเคมี | 69 |
| 2. อุปกรณ์ | 70 |
| 3. วิธีดำเนินการ | 70 |
| 3.1 ชิ้นงานเปลือย | 70 |
| 3.2 ชิ้นงานเคลือบผิวด้วยสี | 71 |
| 3.3 วิธีการเคลือบสี | 71 |
| 3.4 การติดตั้งแผงทดลอง | 71 |
| 3.5 รายละเอียดสถานีทดลอง | 72 |
| 4. จำนวนชิ้นงาน | 72 |
| 5. การรวบรวมข้อมูล | 75 |
| 4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง | 77 |
| วิเคราะห์ผลสภาพภูมิอากาศและปริมาณมลสารในบรรยากาศ | 82 |
| วิเคราะห์ผลอัตราการกักตัวของชิ้นงานเปลือยภายใต้ - บรรยากาศ | 99 |
| 1. บรรยากาศ | 99 |
| 2. ลักษณะของการวางชิ้นงาน | 102 |
| 3. ลักษณะของชิ้นงาน | 104 |
| 4. ผลกระทบจากการกักตัวของ | 104 |
| วิเคราะห์ผลชิ้นงานเคลือบสี | 115 |
| 1. ชนิดของสี | 115 |
| 2. วิธีการเคลือบสี | 116 |
| 3. ความหนาของสี | 116 |
| 4. การเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบสี | 117 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 5 บทวิจารณ์และสรุปผลการวิจัย | 118 |
| บทวิจารณ์ | 118 |
| สรุปผลการวิจัย | 121 |
| ข้อเสนอแนะ | 122 |
| บรรณานุกรม | 123 |
| ภาคผนวก | 131 |
| ก. แสดงรายละเอียดของชิ้นงาน | 131 |
| ข. รายละเอียดของสถานีทดลองและการติดตั้งชิ้นงาน | 146 |
| ค. ข้อมูลอากาศของสถานีทดลอง | 151 |
| ง. การคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนของโลหะโดยวิธีน้ำหนัก ที่หายไป (weight loss) (ASTM G 1) | 154 |
| จ. การหาปริมาณมลสารในบรรยากาศ | 170 |
| ฉ. ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสี | 176 |
| ช. ผลการวิเคราะห์สัณนิมเหล็กโดย XRD | 190 |
| ประวัติผู้เขียน | 191 |

รายการตาราง

| ตาราง | | หน้า |
|-------|--|------|
| 1.1 | อัตราส่วนของระยะเวลาเป็ยกชั้นที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 86 % กับความชื้นสัมพัทธ์ทั้งหมดที่บรรยากาศต่างๆ | 5 |
| 1.2 | ความเข้มข้นเฉลี่ยของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศต่างๆ กับอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของสังกะสี | 8 |
| 1.3 | ปัจจัยทางด้านบรรยากาศที่ใช้ในการทดสอบอัตราการกัดกร่อน | 9 |
| 1.4 | อัตราการกัดกร่อนของเหล็กในสภาวะการทดสอบต่างๆ | 10 |
| 1.5 | อัตราการกัดกร่อนของเหล็กในสภาวะการทดสอบที่ไม่มีสิ่งเจือปน ในบรรยากาศ | 11 |
| 1.6 | อัตราการกัดกร่อนของเหล็กในประเทศภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ | 12 |
| 1.7 | แสดงผลการคำนวณค่าคงที่ของสมการ (1.1) และ (1.2) ในสถานที่ต่างๆ ของประเทศญี่ปุ่น | 13 |
| 2.1 | โลหะและสารเคมีคู่ต่างๆ ที่ให้ค่าความต้านทานการกัดกร่อนสูงที่สุด | 26 |
| 2.2 | ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานที่แสดงคุณสมบัติการเป็นโลหะมีสกุล และไม่มีสกุลเทียบกับไฮโดรเจนอิเล็กโทรดที่ 25 °ซ. | 27 |
| 2.3 | สิ่งแวดล้อมที่อาจจะทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากความเค็มของ โลหะและโลหะผสมที่ใช้ในการทดลอง | 40 |
| 2.4 | แสดงความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับระยะห่างจาก ศูนย์กลางเมือง | 50 |
| 2.5 | การเปรียบเทียบของอัตราการกัดกร่อนของโลหะในสภาพแวดล้อม ต่างๆ | 55 |
| 2.6 | ส่วนประกอบทางเคมีที่มีผลต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศ | 56 |
| 2.7 | แสดงการเคลือบผิวที่เป็นระบบในโครงสร้างเหล็ก | 60 |
| 2.8 | การจำแนกประเภทการเคลือบสี | 63 |

รายการตาราง (ต่อ)

| ตาราง | หน้า |
|--|------|
| 2.9 แสดงความแข็งแรงของพันธะในฟิล์มสีที่ลดลงเมื่อวางในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 100 % ที่ระยะเวลาต่างๆ | 64 |
| 2.10 ผลของการเตรียมพื้นผิวของเหล็กต่ออายุใช้งานของสี | 68 |
| 3.1 แสดงจำนวนชิ้นงานทั้งหมด | 73 |
| 4.1 ข้อมูลอากาศของสถานีทดลอง ม.อ., อ.เทพา และ อ.ขนอมระหว่างเดือน พ.ค. 2539 - เม.ย. 2540 | 77 |
| 4.2 แสดงปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ โดยวิธี alkali filter paper และปริมาณแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ โดยวิธี dry gauze ของสถานีทดลอง ม.อ., อ.เทพา และ อ.ขนอม ระหว่างเดือน พ.ค. 2539 - เม.ย. 2540 | 78 |
| 4.3 สภาพภูมิอากาศและปริมาณมลสารในบรรยากาศโดยเฉลี่ยในรอบ 1 ปี | 82 |
| 4.4 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเปลี่ยนที่สถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานในกลางแจ้ง ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 84 |
| 4.5 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเปลี่ยนที่สถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานในร่ม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 85 |
| 4.6 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเปลี่ยนที่สถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชิ้นงานในกลางแจ้ง ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 86 |
| 4.7 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเปลี่ยนที่สถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชิ้นงานในร่ม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 87 |
| 4.8 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเปลี่ยนที่สถานีทดลอง อ.ขนอม เมื่อวางชิ้นงานในกลางแจ้ง ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 88 |
| 4.9 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเปลี่ยนที่สถานีทดลอง อ.ขนอม เมื่อวางชิ้นงานในร่ม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 88 |

รายการตาราง (ต่อ)

| ตาราง | หน้า |
|--|------|
| 4.10 อัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ., อ.เทพา และ อ.ชนอม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 92 |
| 4.11 อัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ ของชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ., อ.เทพา และ อ.ชนอม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 93 |
| 4.12 อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของชิ้นงานเปลือยภายใต้บรรยากาศต่างๆ ในระยะเวลา 1 ปี | 99 |
| 4.13 อัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ เฉลี่ยของชิ้นงานเปลือยภายใต้ บรรยากาศต่างๆ ในระยะเวลา 1 ปี | 100 |
| 4.14 อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยเมื่อวางชิ้นงานในกลางแจ้งและในร่ม | 102 |
| 4.15 แสดงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสีที่สถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวาง ชิ้นงานในกลางแจ้ง ในระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 106 |
| 4.16 แสดงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสีที่สถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวาง ชิ้นงานในร่ม | 107 |
| 4.17 ความผิดแผกของสีของชิ้นงานเคลือบสี A, B, C และ D ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 107 |
| 4.18 ความผิดแผกของสีของชิ้นงานเคลือบสี A ที่ความหนา 300, 200 และ 100 ไมครอน ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 108 |
| 4.19 ความผิดแผกของสีของชิ้นงานเคลือบสี A โดยวิธีทา ที่ความหนา 300 และ 100 ไมครอน ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 108 |
| 4.20 ความผิดแผกของสีของชิ้นงานเคลือบสี A ที่ไม่แต่งผิว ที่ความหนา 300, 200 และ 100 ไมครอน ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 108 |
| 5.1 เปรียบเทียบการกัดกร่อนภายใต้บรรยากาศในระยะเวลา 1 ปี ของงานวิจัยกับประเทศไทยและประเทศฟิลิปปินส์ | 119 |
| ก.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าอะลูมิเนียมที่ใช้ในงานวิจัย | 131 |

รายการตาราง (ต่อ)

| ตาราง | หน้า |
|---|------|
| ค.1 ข้อมูลอากาศของสถานีตรวจอากาศ เกษตรคองหงส์ ระหว่างเดือน พ.ค. 2539 - เม.ย. 2540 | 151 |
| ค.2 ข้อมูลอากาศของสถานีตรวจอากาศ สงขลา ระหว่างเดือน พ.ค. 2539 - เม.ย. 2540 | 152 |
| ค.3 ข้อมูลอากาศของสถานีตรวจอากาศ อ.ชนอม ระหว่างเดือน พ.ค. 2539 - เม.ย. 2540 | 153 |
| ง.1 แสดงน้ำหนักที่หายไปในการล้างแต่ละครั้ง | 156 |
| ง.2 แสดงค่าคงที่ในสมการการหาอัตราการกักร้อนในหน่วยต่าง ๆ | 158 |
| ง.3 น้ำหนักที่หายไป (g) ของชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ., อ.เทพา และ อ.ชนอม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 159 |
| ง.4 น้ำหนักที่หายไป (g/m^2) ของชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ., อ.เทพา และ อ.ชนอม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 160 |
| ง.5 อัตราเร็วและเร่งของการกักร้อน ในชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ. ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 161 |
| ง.6 อัตราเร็วและเร่งของการกักร้อน ในชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง อ.เทพา ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 162 |
| ง.7 อัตราเร็วและเร่งของการกักร้อน ในชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง อ.ชนอม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 163 |
| ช.1 แสดงผลการวิเคราะห์สัณนิษเหิล็กโดย XRD ของชิ้นงานเปลือยในบรรยากาศต่างๆ เมื่อวางชิ้นงานเป็นระยะเวลา 1 ปี | 190 |

รายการภาพประกอบ

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 เครื่องวัดระยะเวลาเป็ยกขึ้น | 4 |
| 1.2 อัตราการกัดกร่อนสูงสุดของสังกะสีเทียบกับเปอร์เซ็นต์ของระยะเวลาเป็ยกขึ้น | 5 |
| 1.3 เปอร์เซ็นต์ของระยะเวลาเป็ยกขึ้นในเดือนต่างๆ | 6 |
| 1.4 ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ในบรรยากาศต่างๆ | 7 |
| 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนหรือระยะห่างจากทะเลกับอัตราการกัดกร่อน | 8 |
| 1.6 ผลของความชื้นสัมพัทธ์และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่ออัตราการกัดกร่อน | 10 |
| 1.7 โมโนแกรมของอัตราการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศ | 16 |
| 1.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับและปริมาณน้ำในฟิล์มโพลียูรีเทน | 18 |
| 1.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของระยะเวลาเป็ยกขึ้นกับการกัดกร่อน (corrosion loss) ของเหล็กใต้ฟิล์มสี | 19 |
| 1.10 ความหนาที่น้อยที่สุดของสีสำหรับอายุใช้งาน 8-10 ปีที่บรรยากาศต่างๆ | 19 |
| 1.11 ขั้นตอนการเสื่อมสภาพของสี | 20 |
| 2.1 การเกิดเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ที่แอโนดและฟองแก๊สไฮโดรเจนที่แคโทด | 24 |
| 2.2 ปรากฏการณ์ cathodic polarization ที่ลดอัตราการกัดกร่อน | 25 |
| 2.3 การกัดกร่อนแบบโลหะต่างชนิดกันของเหล็กที่เคลือบผิวด้วยดีบุก (ซ่าย) และสังกะสี (ขวา) | 30 |
| 2.4 การเกิดการกัดกร่อนในที่อับชื้นเริ่มต้น | 31 |
| 2.5 การเกิดการกัดกร่อนในที่อับชื้นต่อมา | 32 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| 2.6 การกัดกร่อนในที่อับที่เกิดกับหน้าแปลนของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม | 32 |
| 2.7 กลไกการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม | 34 |
| 2.8 ภาพ 2 มิติของขอบเกรน | 35 |
| 2.9 การกัดกร่อนระหว่างเกรนของทองเหลือง (ขยาย 5400 เท่า) | 36 |
| 2.10 การกัดกร่อนแบบขั้วสีของผนังท่อเครื่องควบแน่น (condenser) | 38 |
| 2.11 แสดงบริเวณกันหลุมซึ่งมีแรงเค้นมากกว่าบริเวณอื่น | 40 |
| 2.12 แผนภูมิของ Pourbaix diagram | 44 |
| 2.13 แสดงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนของโลหะในบรรยากาศ | 46 |
| 2.14 แสดงการกัดกร่อนของเหล็กในอากาศที่มีแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ผสม 0.01% ระยะเวลาทดสอบ 55 วัน | 49 |
| 2.15 แสดงการเกิดขึ้นของซัลไฟด์และซัลเฟต จากแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ | 52 |
| 2.16 แสดงการทำปฏิกิริยาของเหล็กกับซัลเฟตที่แอโนด | 53 |
| 2.17 แสดงกลไกปฏิกิริยาของคลอไรด์ไอออนกับเหล็กตามผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน | 55 |
| 2.18 การเปลี่ยนแปลงของความเงาของฟิล์มสี เมื่อวางในบรรยากาศต่างกันที่ระยะเวลาต่างๆ | 65 |
| 2.19 ส่วนตัดขวางชิ้นงานทดสอบ และผลการทดสอบระบบสีต่างๆ โดยใช้วิธีหมอกเกลือ (salt-fog test) | 66 |
| 4.1 แสดงสภาพภูมิอากาศของ ม.อ. ระหว่าง พ.ค. 2539 - เม.ย. 2540 | 79 |
| 4.2 แสดงปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ของ ม.อ. ระหว่าง พ.ค. 2539 - เม.ย. 2540 | 79 |
| 4.3 แสดงสภาพภูมิอากาศของ อ.เทพา ระหว่าง พ.ค. 2539 - เม.ย. 2540 | 80 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| 4.4 แสดงปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และปริมาณแก๊สโอโซนเดี่ยว-คลอไรด์ของ อ.เทพา ระหว่าง พ.ศ. 2539 - เม.ย. 2540 | 80 |
| 4.5 แสดงสภาพภูมิอากาศของ อ.ชนอม ระหว่าง พ.ศ. 2539 - เม.ย. 2540 | 81 |
| 4.6 แสดงปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และปริมาณแก๊สโอโซนเดี่ยว-คลอไรด์ของ อ.ชนอม ระหว่าง พ.ศ. 2539 - เม.ย. 2540 | 81 |
| 4.7 ลักษณะทางกายภาพด้านล่างของชิ้นงานเปลือยปกติ, ที่มีรอยเชื่อมและหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) (เรียงจากซ้ายไปขวา) ที่สถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางในกลางแจ้ง ที่ระยะเวลา 3 เดือน | 89 |
| 4.8 แสดงผลึกของเกลือและคราบสีขาวบนชิ้นงานที่สถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางในร่ม ที่ระยะเวลา 9 เดือน | 89 |
| 4.9 การแตกเป็นชั้นๆ ของสนิม ที่สถานีทดลอง อ.เทพา ระยะเวลา 12 เดือน | 90 |
| 4.10 ลักษณะทางกายภาพด้านบนของชิ้นงานเปลือยหักงอ 90 องศา (วางหงาย, วางคว่ำ), ที่มีรอยเชื่อมและปกติ (เรียงจากซ้ายไปขวา) ที่สถานีทดลอง อ.ชนอม เมื่อวางในกลางแจ้ง ที่ระยะเวลา 12 เดือน | 90 |
| 4.11 ลักษณะของชิ้นงานเปลือยหลังจากล้างสนิม ที่สถานีทดลอง อ.เทพา ระยะเวลา 12 เดือน | 91 |
| 4.12 ลักษณะของชิ้นงานเปลือยหลังจากล้างสนิม ที่สถานีทดลอง อ.ชนอม ระยะเวลา 12 เดือน | 91 |
| 4.13 แสดงอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเปลือย (ปกติ, หักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) และมีรอยเชื่อม) ของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 94 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| 4.14 แสดงอัตราการกัดกร่อนระยะใดๆ ของชิ้นงานเปลือย (ปกติ, หักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) และมีรอยเชื่อม) ของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 94 |
| 4.15 แสดงอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเปลือย (ปกติ, หักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) และมีรอยเชื่อม) ของสถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 95 |
| 4.16 แสดงอัตราการกัดกร่อนระยะใดๆ ของชิ้นงานเปลือย (ปกติ, หักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) และมีรอยเชื่อม) ของสถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) | 95 |
| 4.17 แสดงอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเปลือย (ปกติ, หักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) และมีรอยเชื่อม) ของสถานีทดลอง อ.ขนอม เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 96 |
| 4.18 แสดงอัตราการกัดกร่อนระยะใดๆ ของชิ้นงานเปลือย (ปกติ, หักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) และมีรอยเชื่อม) ของสถานีทดลอง อ.ขนอม เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 96 |
| 4.19 เปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเปลือย ของสถานีทดลอง ม.อ. (เส้นทึบ) และอ.ขนอม (เส้นประ) เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 97 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| 4.20 เปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเปลือย (ปกติ, หักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) และมีรอยเชื่อม) ของสถานีทดลอง ม.อ. (เส้นทึบ) และ อ.ชนอม (เส้นประ) เมื่อวางชิ้นงานในร่ม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 97 |
| 4.21 เปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อน (เส้นทึบ) และอัตราการกัดกร่อน-ขณะใดๆ (เส้นประ) ในชิ้นงานหักงอ 90 องศา (วางหงาย) ของ สถานีทดลอง ม.อ. และ อ.ชนอม เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 98 |
| 4.22 เปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อน (เส้นทึบ) และอัตราการกัดกร่อน-ขณะใดๆ (เส้นประ) ในชิ้นงานหักงอ 90 องศา (วางหงาย) ของ สถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชิ้นงานในกลางแจ้งและในร่ม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 98 |
| 4.23 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสีในชิ้นงานเคลือบสี B เมื่อวาง ชิ้นงานในกลางแจ้งเป็นระยะเวลา 12 เดือน | 109 |
| 4.24 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสีในชิ้นงานเคลือบสี B เมื่อวาง ชิ้นงานในร่ม เป็นระยะเวลา 12 เดือน | 109 |
| 4.25 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสีในชิ้นงานเคลือบสี A โดยวิธีทา ที่ความหนา 100 ไมครอน เมื่อวางชิ้นงานในกลางแจ้งเป็น ระยะเวลา 12 เดือน | 110 |
| 4.26 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสีในชิ้นงานเคลือบสี A โดยวิธีทา ที่ความหนา 100 ไมครอน เมื่อวางชิ้นงานในร่มเป็น ระยะเวลา 12 เดือน | 110 |
| 4.27 แสดงความผิดแผกของสีของระบบสี A, B, C และ D ของสถานี ทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 111 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| 4.28 แสดงความผิดแผกของสีของระบบสี A, B, C และ D ของชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิงที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 111 |
| 4.29 แสดงความผิดแผกของสีของระบบสี A เคลือบสีโดยวิธีทาของสถานีทดลอง ม.อ. ที่ความหนา 100 และ 300 ไมครอน เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 112 |
| 4.30 แสดงความผิดแผกของสีของระบบสี A เคลือบสีโดยวิธีทาของชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิง ที่ความหนา 100 และ 300 ไมครอน ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 112 |
| 4.31 แสดงความผิดแผกของสีของระบบสี A ที่ความหนา 100, 200 และ 300 ไมครอน ของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 113 |
| 4.32 แสดงความผิดแผกของสีของระบบสี A ที่ความหนา 100, 200 และ 300 ไมครอน ของชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิง ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 113 |
| 4.33 แสดงความผิดแผกของสีของระบบสี A และไม่แต่งผิวที่ความหนา 100, 200 และ 300 ไมครอน ของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 114 |
| 4.34 แสดงความผิดแผกของสีของระบบสี A และไม่แต่งผิว ที่ความหนา 100, 200 และ 300 ไมครอน ของชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิง ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 114 |
| ก.1 ชิ้นงานเปลือย : ปกติ, มีรอยเชื่อม และงอ 90 องศา (เรียงจากซ้ายไปขวา) | 131 |
| ก.2 ชิ้นงานที่ไม่แต่งผิวและแต่งผิว | 132 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| ก.3 วิธีการพ่นสี | 132 |
| ก.4 ชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิงสี A, B, C และ D | 133 |
| ก.5 ชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิงสี A ที่มีการกรีดฟิล์มสี เชื่อม และหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) | 133 |
| ก.6 ชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิงสี A โดยวิธีทาความหนา 100 และ 300 ไมครอน | 134 |
| ก.7 ชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิงสี A ความหนา 100, 200 และ 300 ไมครอน | 134 |
| ก.8 ชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิงที่ไม่แต่งผิวสี A ความหนา 100, 200 และ 300 ไมครอน | 135 |
| ข.1 สถานีทดลอง ม.อ. | 146 |
| ข.2 สถานีทดลอง ม.อ. | 146 |
| ข.3 แสดงที่ตั้งของสถานีทดลอง อ.เทพา จ.สงขลา | 147 |
| ข.4 สถานีทดลอง อ.เทพา จ.สงขลา | 148 |
| ข.5 สถานีทดลอง อ.เทพา จ.สงขลา | 148 |
| ข.6 แสดงที่ตั้งของสถานีทดลองในบริเวณบริษัทผลิตไฟฟ้าขนอม จำกัด | 149 |
| ข.7 สถานีทดลอง อ.ขนอม จ.นครศรีธรรมราช | 150 |
| ข.8 สถานีทดลอง อ.ขนอม จ.นครศรีธรรมราช | 150 |
| ง.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับเวลาในการล้างชิ้นงาน | 154 |
| ง.2 แสดงขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นงานหลังการติดตั้ง | 155 |
| ง.3 แสดงน้ำหนักที่หายไปเนื่องจากผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน | 156 |
| ง.4 แสดงน้ำหนักที่หายไปชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 164 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| ง.5 แสดงอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย ของชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 164 |
| ง.6 แสดงอัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ ของชิ้นงานเปลือยของ สถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 165 |
| ง.7 แสดงอัตราเร่งการกัดกร่อนขณะใดๆ ของชิ้นงานเปลือยของสถานี ทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 165 |
| ง.8 แสดงน้ำหนักที่หายไปชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 166 |
| ง.9 แสดงอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย ของชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 166 |
| ง.10 แสดงอัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ ของชิ้นงานเปลือยของสถานี- ทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 167 |
| ง.11 แสดงอัตราเร่งการกัดกร่อนขณะใดๆ ของชิ้นงานเปลือยของสถานี ทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 167 |
| ง.12 แสดงน้ำหนักที่หายไปชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง อ.ขนอม เมื่อ วางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 168 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| ง.13 แสดงอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย ของชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง อ.ชนอม เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 168 |
| ง.14 แสดงอัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ ของชิ้นงานเปลือยของสถานี ทดลอง อ.ชนอม เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 169 |
| ง.15 แสดงอัตราเร่งการกัดกร่อนขณะใดๆ ของชิ้นงานเปลือยของสถานี ทดลอง อ.ชนอม เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน | 169 |
| จ.1 อุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างอนุภาคเกลือในบรรยากาศ | 174 |

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

เนื่องจากเทคโนโลยีทางด้านวัสดุศาสตร์เจริญก้าวหน้าไปมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุประเภทโลหะและโลหะผสม ซึ่งการเลือกใช้ต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งาน ความสามารถในการจัดหา ความต้านทานต่อการกัดกร่อน ตลอดจนถึงราคาของวัสดุชนิดนั้น บ่อยครั้งที่การตัดสินใจเลือกใช้วัสดุใดขึ้นอยู่กับสภาวะทางเศรษฐกิจมากกว่าคุณสมบัติในด้านอื่น แต่อย่างไรก็ตาม ความเสียหายจากการกัดกร่อนนั้นมีมูลค่ามหาศาลต่อปี ดังนั้นหากเข้าใจในหลักการของการเกิดและวิธีป้องกันการกัดกร่อน ก็จะสามารถประหยัดค่าเสียหายได้

ความสำคัญของการศึกษาเรื่องการกัดกร่อน สามารถแบ่งออกได้ 3 ข้อ ดังนี้

1. ด้านเศรษฐกิจ ช่วยลดการสูญเสียเนื้อโลหะจากอุปกรณ์ โครงสร้าง และยานพาหนะ เป็นต้น

2. ด้านความปลอดภัย มีประโยชน์ในการออกแบบเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน เช่น ถังบรรจุที่มีความดัน (pressure vessel) หม้อไอน้ำ ถังบรรจุสารพิษ และส่วนประกอบของเครื่องบิน เป็นต้น

3. ด้านการอนุรักษ์ เป็นการอนุรักษ์แหล่งวัตถุดิบของโลหะ เนื่องจากโลหะเป็นทรัพยากรที่มีจำกัด ดังนั้นถ้าหากเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ดีหรือยืดอายุการใช้งานได้นาน ย่อมหมายถึงการช่วยสงวนทรัพยากรโลหะรวมทั้งช่วยลดการสูญเสียพลังงานที่ใช้ในการผลิต

ในปัจจุบันการศึกษากการกัดกร่อนมักมุ่งเน้นไปทางด้านเศรษฐกิจ เพราะต้องใช้จ่ายเงินเป็นจำนวนมากในแต่ละปี โดยที่ความเสียหายทางด้านเศรษฐกิจสามารถแบ่งออกได้เป็นทางตรงและทางอ้อม

ความเสียหายทางตรง เช่น ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนโครงสร้างที่เกิดการกัดกร่อนรวมไปถึงค่าแรงและการจัดซื้อวัสดุ พบว่าในประเทศเยอรมันนี้ จากการ

คำนวณมีการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศประมาณ 2 % ของกำลังการผลิตเหล็กของประเทศ (Barton, 1976) นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการกัดกร่อนของประเทศออสเตรเลีย อังกฤษ ญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกามีค่าประมาณ 3-4 % ของรายได้ผลิตภัณฑ์มวลรวมประชาชาติ (GNP) ส่วนความเสียหายทางอ้อมนั้นยากต่อการคำนวณ แต่สามารถดูได้จากตัวอย่างดังต่อไปนี้ (Uhlig and Revie, 1985 ; Fontana, 1987)

- การหยุดการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม (shut down) เช่น การหยุดการผลิตของโรงกลั่นน้ำมันเพื่อเปลี่ยนท่อที่เกิดการกัดกร่อน โดยที่ท่อดีมีราคาไม่ก็ร้อยเหรียญดอลลาร์สหรัฐ แต่ต้องสูญเสียผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่า 50,000 เหรียญดอลลาร์สหรัฐต่อชั่วโมง

- การสูญเสียประสิทธิภาพในการทำงาน เช่น การอุดตันเนื่องมาจากสนิม ทำให้ต้องเพิ่มกำลังของปั๊ม

- การปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์ เช่น การปนเปื้อนของทองแดงในสบู่จากท่อทองแดง ทำให้อายุการเก็บรักษาสบู่ก่อนการใช้งานสั้นลง

สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนในประเทศไทยยังไม่แพร่หลาย ประกอบกับการกัดกร่อนใช้ระยะเวลาในการศึกษา และมีปัจจัยต่างๆ มาเกี่ยวข้องมากมาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าละมุน (mild steel) ภายใต้บรรยากาศในภาคใต้ของประเทศไทยในระยะเวลา 1 ปี เนื่องจากเหล็กกล้าละมุนมีการใช้อย่างแพร่หลายทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและสถาปัตยกรรม เช่น เหล็กเส้นสำหรับก่อสร้าง เหล็กแผ่น ตัวถังรถยนต์ เป็นต้น ประกอบกับภาคใต้มีลักษณะทางภูมิศาสตร์เป็นคาบสมุทรและฝนตกชุกตลอดปี ทำให้มีบรรยากาศที่ส่งเสริมการกัดกร่อน โดยเฉพาะบริเวณชายทะเล และศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศ สำหรับการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศ เลือกใช้วิธีการเคลือบผิวด้วยสี เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้กันอยู่ทั่วไป และได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำลายประสิทธิภาพของสี

ตรวจเอกสาร

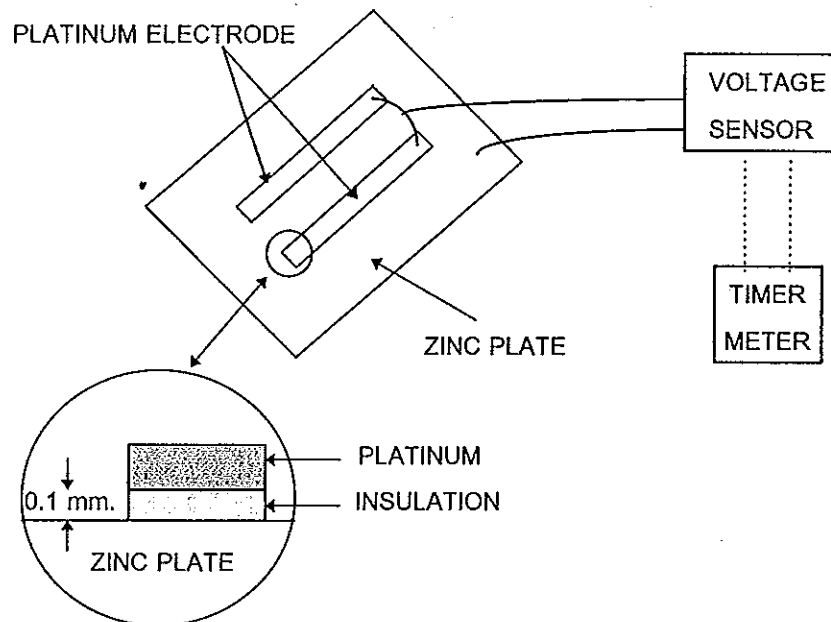
เนื่องจากการกัดกร่อนของโลหะเป็นการกลับคืนสู่สถานะธรรมชาติที่มีเสถียรภาพมากกว่า และเมื่อบรรยากาศเป็นสภาพแวดล้อมที่ส่งเสริมการกัดกร่อน ทำให้ต้องพิจารณาส่วนประกอบต่างๆ ในบรรยากาศรวมทั้งสภาพภูมิอากาศว่ามีผลอย่างไรต่อการกัดกร่อน นอกจากนี้สามารถแบ่งประเภทของบรรยากาศออกได้เป็นหลายประเภทด้วยกันตามสภาวะแวดล้อม โดยทั่วไปนิยมจัดแบ่งเป็น 4 ประเภท คือ บรรยากาศชนบท (rural) บรรยากาศเมือง (urban) บรรยากาศอุตสาหกรรม (industrial) และบรรยากาศชายทะเล (marine) (Uhlig and Revie, 1985 ; Fontana, 1987 ; Suzuki, 1989)

1. ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศ

1. มุมและทิศของการวางชิ้นงาน พบว่า มุมการวาง 0 องศากับพื้นดิน มีอัตราการกัดกร่อนสูงสุด และ 90 องศากับพื้นดินมีอัตราการกัดกร่อนต่ำสุด (Principe, et al., 1994 ; Sawant and Venugopal, 1996) โดยที่วิธีมาตรฐานที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อน คือ วางชิ้นงานทำมุม 30-45 องศากับพื้นดิน และหันไปทางทิศใต้ (JIS Z 0304)

2. ระยะเวลาเปียกชื้น (time of wetness) เป็นระยะเวลาที่พื้นผิวของโลหะถูกปกคลุมด้วยฟิล์มของน้ำ (film of water) สามารถวัดได้จากเครื่องวัดระยะเวลาเปียกชื้น (time of wetness meter) ดังภาพประกอบ 1.1 โดยมีหลักการตั้งนี้ นำอิเล็กโทรดพลาดินัมมายึดติดบนแผ่นสังกะสีขนาด 4 x 6 นิ้ว ให้มีระยะห่าง 0.1 มม. โดยมีฉนวนกันระหว่างโลหะ แล้วต่อแบตเตอรี่ที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1 โวลต์ เข้ากับแผ่นโลหะ ดังนั้นเมื่อมีการเปียกชื้นก็จะเกิดสะพานอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กตรอนสามารถวิ่งผ่านอิเล็กโทรดไปยังแผ่นสังกะสีได้ เมื่อมีขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตั้งแต่ 0.2 โวลต์ ขึ้นไป จึงทำให้ตัวตรวจวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (voltage sensor) ตรวจวัดได้และส่งสัญญาณไปที่เครื่องบันทึกเวลา (timer meter) เพื่อเริ่มบันทึกระยะเวลาเปียกชื้น (Grossman, 1976) นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีทางอ้อม ได้แก่การนับจำนวนเวลาที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 80 % และอุณหภูมิสูงกว่า 0 °ซ. (Porro, Otero and Elola, 1992) หรือที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 86 % (Suzuki, 1989)

ระยะเวลาเปียกชื้นขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ลม และปริมาณฝน (precipitation) เป็นต้น รวมทั้งทิศและตำแหน่งการวางของโลหะ ด้วย นอกจากนี้การเปียกชื้นอาจเกิดจากอนุภาค เช่น ฝุ่นละอองของเกลือดูดซับน้ำ จากบรรยากาศ (สรุทธิ จุฑะพงศ์ และเกรียงไกร อิมสมโภช, 2535) อัตราส่วนของ ระยะเวลาเปียกชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 86 % ที่บรรยากาศต่างๆ แสดงไว้ใน ตาราง 1.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาเปียกชื้นจาก บริเวณแผ่นดินสู่ชายฝั่ง และยังมีเวลาเปียกชื้นมากขึ้นเท่าใดอัตราการกัดกร่อนก็จะ เกิดสูงขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 1.2 ดังนั้นข้อมูลของสภาพภูมิอากาศ จึง สามารถบ่งบอกถึงความรุนแรงของบรรยากาศที่มีผลต่อการกัดกร่อนได้ แต่เนื่องจาก สภาพภูมิอากาศมีการแปรปรวนอยู่ตลอดปี แต่การแปรปรวนนี้มีรูปแบบซ้ำๆ กัน ส่งผลให้ระยะเวลาเปียกชื้นในแต่ละปีมีค่าค่อนข้างคงที่ดังภาพประกอบ 1.3 ซึ่งแสดง การวางชิ้นงานห้ามุม 30 องศา กับแนวราบ หันไปทางทิศใต้ และพบว่าระยะเวลา เปียกชื้นของผิวชิ้นงานด้านล่างสูงกว่าด้านบน (Grossman, 1978)



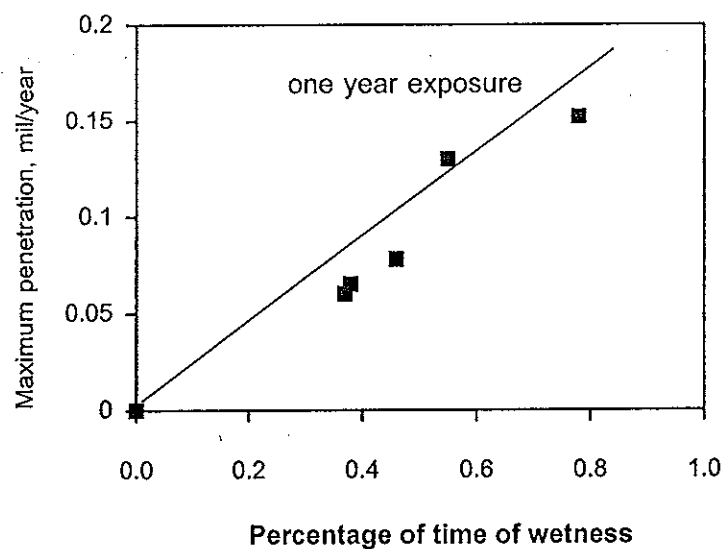
ภาพประกอบ 1.1 เครื่องวัดระยะเวลาเปียกชื้น

ที่มา : Grossman, 1978 : 6

ตาราง 1.1 อัตราส่วนของระยะเวลาเปียกชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 86 % กับความชื้นสัมพัทธ์ทั้งหมดที่บรรยากาศต่างๆ

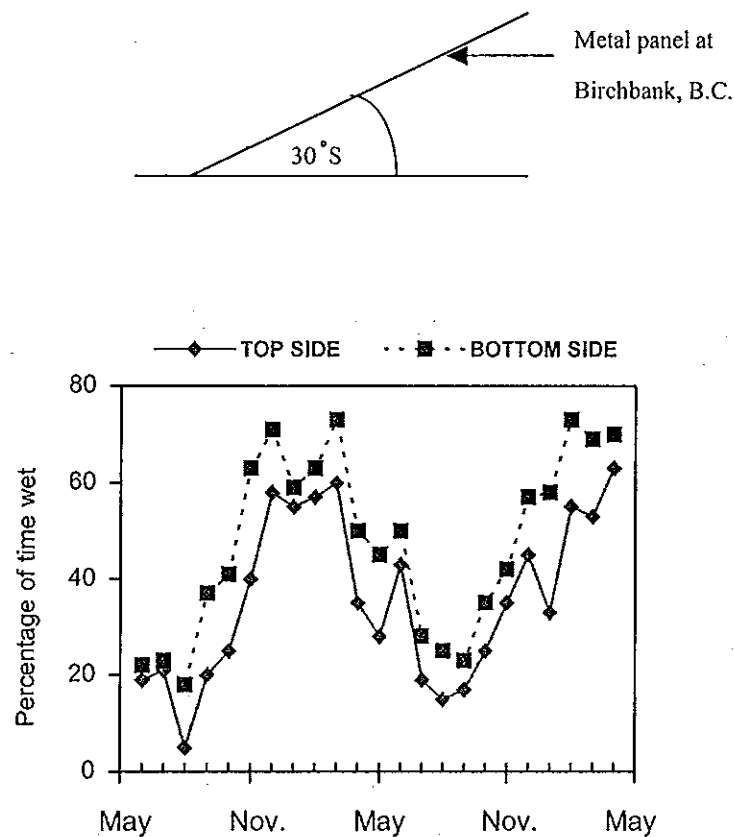
| Location | Time of wetness ratio | |
|---------------------------------|-----------------------|------------|
| | Range | Mean value |
| Inland | 0.25-0.35 | 0.30 |
| Inland, shore of lake and marsh | 0.35-0.45 | 0.40 |
| Coast | 0.45-0.55 | 0.50 |
| Seashore | 0.75 | 0.75 |

ที่มา : Suzuki, 1989 : 68



ภาพประกอบ 1.2 อัตราการกัดกร่อนสูงสุดของสังกะสีเทียบกับเปอร์เซ็นต์ของระยะเวลาเปียกชื้น

ที่มา : Suzuki, 1989 : 163



ภาพประกอบ 1.3 เปอร์เซนต์ของระยะเวลาเปียกชื้นในเดือนต่างๆ
ที่มา : Grossman, 1978 : 8

3. ปริมาณมลสารในอากาศ ที่สำคัญๆ ได้แก่ ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) ซึ่งมีมากในบรรยากาศเมืองและอุตสาหกรรม เนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งมีมากในบรรยากาศชายทะเล เนื่องจากกระแสนมพัดปลิวละอองเกลือมาจากทะเล (Costa and Vilarrasa, 1993)

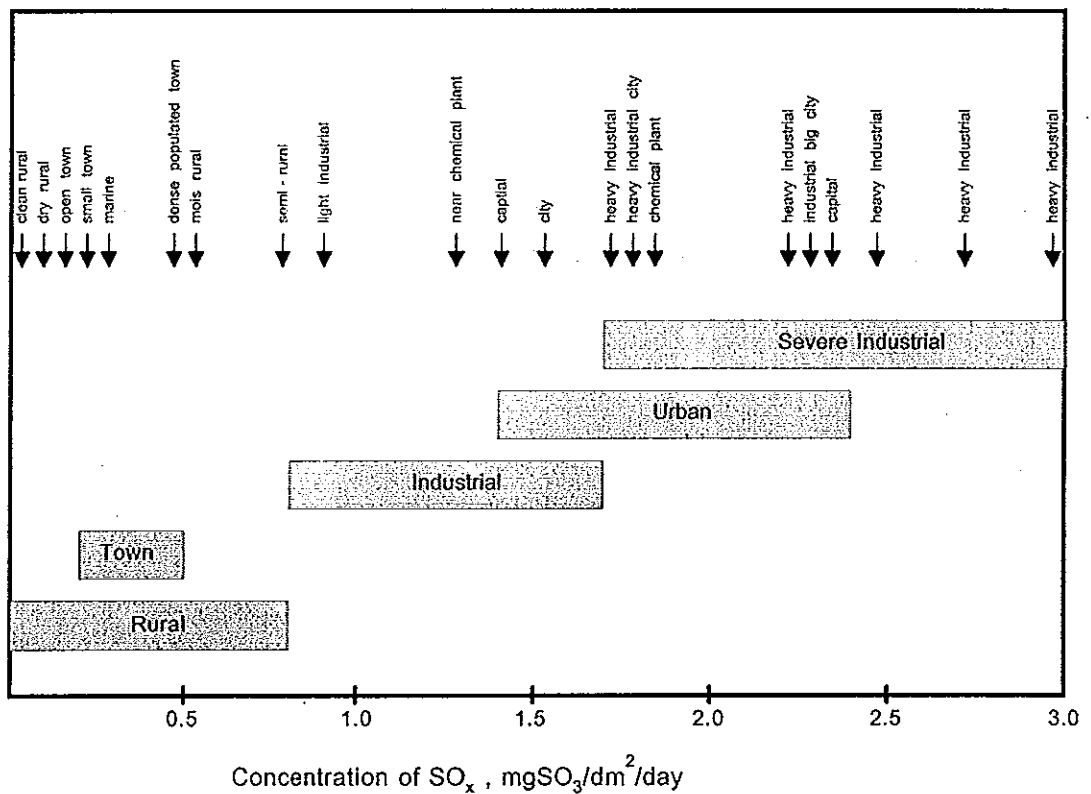
3.1 ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์

การวัดปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ในบรรยากาศสามารถวัดในรูปของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และหรือแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) นอกจากนี้ยังสามารถใช้ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ จัดประเภทของ-

บรรยากาศได้ดังภาพประกอบ 1.4 ส่วนตาราง 1.2 แสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ที่บรรยากาศต่าง ๆ กับอัตราการกีดกร่อนเฉลี่ยของสังกะสี

3.2 ปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์

ปริมาณคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ต่ำสุดที่ไม่มีผลต่อการกีดกร่อนคือ 0.05 mg/dm²/day สำหรับระยะห่างระยะต่ำสุดจากทะเลที่ปลอดภัยต่อการกีดกร่อนคือ 1-5 กิโลเมตร แต่ระยะที่ปลอดภัยที่สุด คือ 25 กิโลเมตร เนื่องจากไม่มีปัจจัยจากลมมาเกี่ยวข้อง (Matsushima, 1994) ผลกระทบของระยะห่างจากทะเลกับอัตราการกีดกร่อนแสดงดังภาพประกอบ 1.5

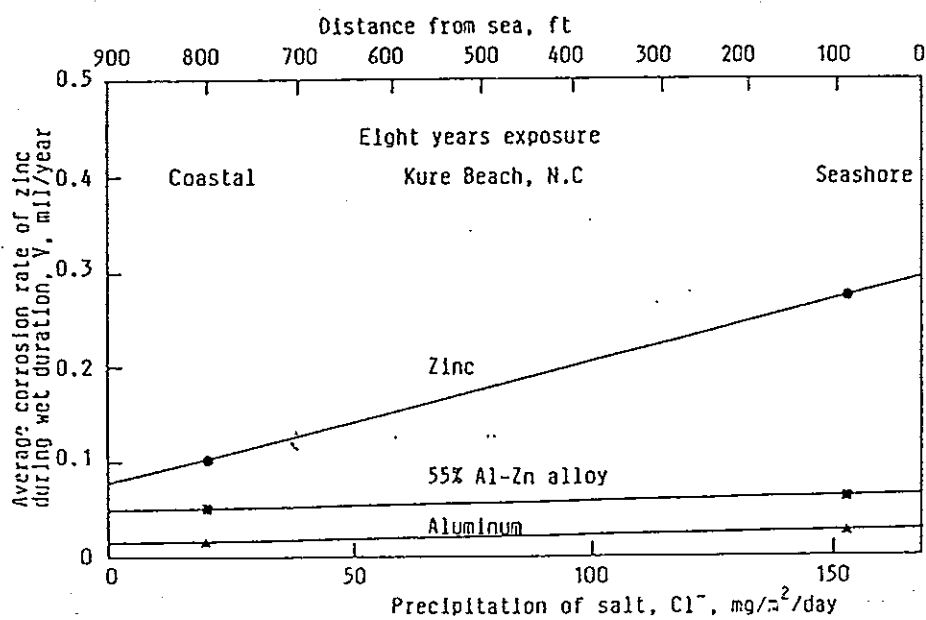


ภาพประกอบ 1.4 ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ในบรรยากาศต่าง ๆ
ที่มา : Suzuki, 1989 : 72

ตาราง 1.2 ความเข้มข้นเฉลี่ยของแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ในบรรยากาศต่างๆ
กับอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของสังกะสี

| Atmosphere | SO _x (mgSO ₂ /dm ² /day) | Average corrosion rate of zinc (mpy) |
|-------------------|--|---|
| Rural | 0.40 ± 0.40 | 0.147 ± 0.093 |
| Town | 0.35 ± 0.15 | 0.135 ± 0.035 |
| Urban | 1.85 ± 0.45 | 0.493 ± 0.107 |
| Industrial | 1.25 ± 0.45 | 0.350 ± 0.110 |
| Severe industrial | 1.70 - | 0.46 - |
| | In most case, | In most case, |
| | 2.00 ± 0.30 | 0.530 ± 0.070 |

ที่มา : Suzuki, 1989 : 73



ภาพประกอบ 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนหรือ
ระยะห่างจากทะเลกับอัตราการกัดกร่อน

ที่มา : Suzuki, 1989 : 73

2. การทดสอบการกัดกร่อน

การทดสอบการกัดกร่อน กระทำได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในบรรยากาศจริง โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นสามารถจำลองสภาวะของบรรยากาศต่างๆ ได้ และมีข้อดีคือระยะเวลาของการทดสอบให้สั้นลง โดยการเพิ่มความรุนแรงของปัจจัยต่างๆ เข้าไป ตัวอย่างเช่น การทดสอบการกัดกร่อนของเหล็ก โดยใช้ปัจจัยต่างๆ ดังตาราง 1.3 และเมื่อทำการทดสอบครบ 1000 ชั่วโมง ปรากฏว่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศต่างๆ เป็นดังตาราง 1.4

ตาราง 1.3 ปัจจัยทางด้านบรรยากาศที่ใช้ในการทดสอบอัตราการกัดกร่อน

| Environment Factors | Level | |
|--|----------------|-----------------|
| | Low | Hight |
| Sulfur dioxide (SO ₂), µg/m ³ | 79 (0.03 ppm) | 1310 (0.50 ppm) |
| Nitrogen dioxide (NO ₂), µg/m ³ | 94 (0.05 ppm) | 940 (0.50 ppm) |
| Ozone (O ₃), µg/m ³ | 157 (0.08 ppm) | 980 (0.50 ppm) |
| Relative humidity (RH), % | 50 | 90 |

ที่มา : Haynie, Spence and Upham, 1978 : 31

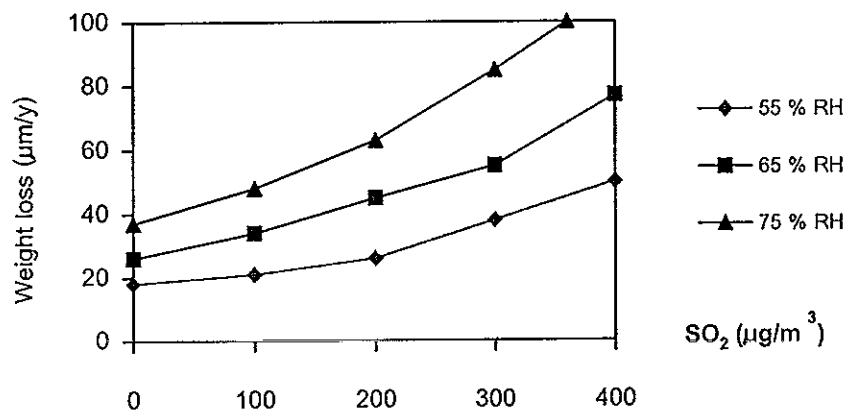
เห็นได้ว่าความชื้นสัมพัทธ์และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีผลต่ออัตราการกัดกร่อนมาก และภาพประกอบ 1.6 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีผลต่ออัตราการกัดกร่อน

นอกจากนี้ ได้ทดสอบอุณหภูมิว่ามีผลต่อการกัดกร่อนอย่างไร เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงและต่ำในสภาวะที่ไม่มีสิ่งเจือปนในบรรยากาศได้ผลดังตาราง 1.5 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก็กระตุ้นให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดี

ตาราง 1.4 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กในสภาวะการทดสอบต่างๆ

| Exposure Condition | Corrosion Rate and Standard Deviation, $\mu\text{m}/\text{y}$ | | | |
|--------------------|---|-------------------|-----------------------|-------------------|
| | High Relative Humidity | | Low Relative Humidity | |
| | High SO_2 | Low SO_2 | High SO_2 | Low SO_2 |
| High NO_2 | | | | |
| High O_3 | 753 ± 85 | 256 ± 27 | 414 ± 151 | 179 ± 30 |
| Low O_3 | 762 ± 121 | 178 ± 44 | 607 ± 105 | 162 ± 62 |
| Low NO_2 | | | | |
| High O_3 | 736 ± 90 | 230 ± 27 | 479 ± 78 | 123 ± 26 |
| Low O_3 | 656 ± 56 | 147 ± 13 | 371 ± 18 | 84 ± 14 |

ที่มา : Haynie, Spence and Upham, 1978 : 34



ภาพประกอบ 1.6 ผลของความชื้นสัมพัทธ์และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อ
อัตราการกัดกร่อน

ที่มา : สมเกียรติ รุ่งทองไมสุรีย์, 2537 : 49

ตาราง 1.5 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กในสภาวะการทดสอบที่ไม่มีสิ่งเจือปนในบรรยากาศ

| Temperature | Corrosion Rate and Standard Deviation, $\mu\text{m}/\text{y}$ | |
|-------------|---|-----------------------|
| | High Relative Humidity | Low Relative Humidity |
| 35 ° C | 86 \pm 31 | 28 \pm 10 |
| 13 ° C | 1.03 \pm 0.17 | 1.07 \pm 0.06 |

ที่มา : Haynie, Spence and Upham, 1978 : 34

ส่วนประเทศทางด้านเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีบรรยากาศชายทะเลที่แตกต่างไปจากส่วนอื่นๆ ของโลก เนื่องจากอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร จึงทำให้ปริมาณของแสงอัลตราไวโอเล็ต อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูง โดยที่อุณหภูมิที่แผ่นเหล็กอาจสูงถึง 60 °ซ. ในเวลา 10 นาฬิกา (Heikoop and Nor, 1994) และได้มีผลการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศของประเทศต่างๆ ในภูมิภาคนี้ ดังตาราง 1.6

นอกจากนี้เวลาเริ่มต้นการวางชิ้นงานในฤดูร้อน (dry season) กับฤดูฝน (wet season) พบว่าอัตราการกัดกร่อนของทั้งสองการทดสอบไม่มีความแตกต่างกัน (Bernas, et al., 1994) และผิวด้านบน (skyward) ของชิ้นงานมีอัตราการกัดกร่อนมากกว่าด้านล่าง (groundward) เนื่องจากเวลาฝนตก ก็จะนำสิ่งเจือปนในบรรยากาศที่เป็นกรดลงมาด้วย ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อผิวด้านล่าง (Legault and Pearson, 1978)

สำหรับผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน (corrosion products) ที่เกิดขึ้นบนเหล็กประกอบด้วย $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\alpha\text{-FeOOH}$, $\gamma\text{-FeOOH}$, $\delta\text{-FeOOH}$, $\beta\text{-FeOOH}$ และ Fe_3O_4 แต่ในกรณีที่วางชิ้นทดสอบเป็นเวลานาน ผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนจะเป็น $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ส่วนผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนตัวอื่นๆ เช่น FeCO_3 , FeOCl และ FeSO_4 พบได้ในบรรยากาศที่มีมลภาวะสูงๆ (Barton, 1976 : Leidheiser and Music, 1982, Jasinski and Asfaha, 1988 : Graedel and Frankenthal, 1990)

ตาราง 1.6 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กในประเทศภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

| ประเทศ | อัตราการกัดกร่อน (mdd), ($\mu\text{m}/\text{y}$) | | | |
|-------------|--|-------------|----------------------|-------------------|
| | ชายทะเล | อุตสาหกรรม | เมือง | ชนบท |
| ไทย | 19.45, 90.32 | 6.34, 29.44 | 5-10, 23.22-46.44 | 1-2, 4.64-9.24 |
| อินโดนีเซีย | 13.8, 64.02 | 12.1, 56.19 | 7.1, 32.97 | - |
| ฟิลิปปินส์ | 15, 69.66 | - | - | - |

ที่มา : สรวุฒิ จุฑะพงศ์ และ เกรียงไกร อิมสมโภช, 2535 ; Musalum, 1990 ;
Bernas, et al., 1994

3. การคาดคะเนการกัดกร่อนระยะยาวของเหล็กในบรรยากาศ

สมการที่ใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนระยะยาวของเหล็กในบรรยากาศ สามารถวิเคราะห์หาได้จากข้อมูลการกัดกร่อนของเหล็กที่เวลาต่างๆ หรือจากการคาดคะเนโดยอาศัยข้อมูลของสภาพภูมิอากาศ ที่มีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็ก

3.1 การคาดคะเนจากข้อมูลการกัดกร่อนของเหล็กที่เวลาต่างๆ

สมการที่นิยมใช้มีอยู่ 2 สมการ คือ

$$y = AB \exp\left(\frac{C}{t}\right) \quad (1.1)$$

เมื่อ y = อัตราการกัดกร่อนที่เวลาใดๆ

t = เวลา (ปี)

A, B, C = ค่าคงที่

$$y = kt^m \quad (1.2)$$

เมื่อ $y =$ อัตราการกัดกร่อนที่เวลาใดๆ (10^{-4} mm)
 $t =$ เวลา (ปี)
 $k, m =$ ค่าคงที่

โดยที่สมการ (1.1) ใช้คาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กระยะยาวได้ดีพอสมควรเมื่อเวลามากกว่าศูนย์ แต่เมื่อเวลาเข้าใกล้ศูนย์สมการนี้จะให้คำตอบที่ไม่ถูกต้อง สำหรับสมการ (1.2) สามารถใช้ได้ดีทุกๆ ค่าของเวลา (สมเกียรติ รุ่งทองใบ สุรีย์, 2537 ; Legault and Pearson, 1978 ; Wei, 1991) ตาราง 1.7 แสดงผลการคำนวณค่าคงที่ของสมการ (1.1) และสมการ (1.2) ในสถานที่ต่างๆของประเทศญี่ปุ่น

ตาราง 1.7 แสดงผลการคำนวณค่าคงที่ของสมการ (1.1) และ (1.2) ในสถานที่ต่างๆของประเทศญี่ปุ่น

| Location | สมการ (1.1) | | | สมการ (1.2) | |
|--------------|-------------|-------|--------|-------------|-------|
| | A | B | C | k | m |
| Otaru | 0.050 | 0.293 | -0.263 | 0.039 | 0.424 |
| Sendai | 0.036 | 0.455 | 0.184 | 0.042 | 0.363 |
| Niigata | 0.046 | 0.509 | 0.189 | 0.055 | 0.415 |
| Nagano | 0.031 | 0.270 | -0.188 | 0.026 | 0.363 |
| Nagoya | 0.101 | 0.099 | -0.432 | 0.068 | 0.314 |
| Shimizu | 0.063 | 0.659 | -0.354 | 0.046 | 0.836 |
| Tokyo | 0.047 | 0.447 | 0.246 | 0.059 | 0.324 |
| Kawasaki | 0.079 | 0.931 | 0.640 | 0.144 | 0.613 |
| Matsue | 0.041 | 0.429 | -0.227 | 0.035 | 0.542 |
| Amagasaki | 0.124 | 0.407 | -0.370 | 0.088 | 0.592 |
| Shionomisaki | 0.099 | 0.349 | -0.631 | 0.055 | 0.663 |

ที่มา : สมเกียรติ รุ่งทองใบ สุรีย์, 2537 : 49-50

3.2 การคาดคะเนจากข้อมูลของสภาพภูมิอากาศ

สามารถคาดคะเนได้จากข้อมูลของสภาพภูมิอากาศ ที่มีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณฝน ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ในบรรยากาศ (สมเกียรติ รุ่งทองใบสุรีย์, 2537) โดยที่สมการอยู่ในรูป

$$Y_n = a_0 + a_1T + a_2H + a_3P + a_4S + a_5Cl \quad (1.3)$$

เมื่อ Y_n = อัตราการกัดกร่อนที่เวลาใดๆ (10^{-4} mm)

T = อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

H = ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

P = ปริมาณฝน (มม./ปี)

S = ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (10^{-3} ppm)

Cl = ปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ (10^{-4} g/cm²/year)

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 และ a_5 = ค่าคงที่

สมการ (1.4) - สมการ (1.8) แสดงสมการการคาดคะเนการกัดกร่อนระยะยาวของเหล็กในประเทศไทยปี ระยะเวลา 1-5 ปี

$$Y_1 = 551.7 + 53.2T - 15.4H - 0.111P + 33.9S + 4.46Cl \quad (1.4)$$

$$Y_2 = 878.3 + 75.1T - 26.9H - 0.021P + 47.8S + 5.99Cl \quad (1.5)$$

$$Y_3 = 2001 + 101.3T - 49.1H + 0.120P + 57.3S + 6.83Cl \quad (1.6)$$

$$Y_4 = 5289 + 118.3T - 96.1H + 0.333P + 39.4S + 7.29Cl \quad (1.7)$$

$$Y_5 = 5793 + 131.5T - 111.4H + 0.503P + 55.9S + 7.57Cl \quad (1.8)$$

สำหรับบรรยากาศชายทะเล พบว่าปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีผลต่ออัตราการกัดกร่อนน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ในบรรยากาศ ดังนั้นสามารถเขียนสมการใหม่ ได้ดังนี้ (Feliu, et al., 1990)

$$Y = a_0 + a_1T + a_2H + a_3P + a_5CI \quad (1.9)$$

$$\ln Y = b_0 + b_1 \ln T + b_2 \ln H + b_3 \ln P + b_5 \ln CI \quad (1.10)$$

เมื่อ Y = อัตราการกักต้อน ($\mu\text{m}/\text{y}$)

CI = ปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ ($\text{mgNaCl}/\text{dm}^2/\text{day}$)

b_0, b_1, b_2, b_3 และ b_5 = ค่าคงที่

แต่อย่างไรก็ตาม สมการ (1.9) จะให้ค่าอัตราการกักต้อนเป็นลบ ในกรณีที่ข้อมูลของสภาพภูมิอากาศมีค่าต่ำๆ ส่วนสมการ (1.10) เมื่อทำการคำนวณแล้วจะได้สมการ (1.11) และสมการ (1.12) โดยที่ สมการ (1.11) ใช้ได้ในกรณีที่ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ น้อยกว่า $0.4 \text{ mgSO}_3/\text{dm}^2/\text{day}$

$$\ln Y = 0.2804 \ln T + 5.775 \ln H - 0.03247 \ln P + 0.5506 \ln CI - 21.323 \quad (1.11)$$

$$\ln Y = 0.3113 \ln T + 4.293 \ln H - 0.1360 \ln P + 0.5324 \ln CI - 14.170 \quad (1.12)$$

นอกจากนี้ในกรณีที่วัดค่าระยะเวลาเป็ยกขึ้น ก็สามารถคาดคะเนการกักต้อนระยะยาวของเหล็กในบรรยากาศ ได้จากสมการ (1.13) และ (1.14) (Barton, 1976 : Porro, Otero and Elola, 1992)

$$Y = M \tau^n S^m \quad (1.13)$$

เมื่อ Y = อัตราการกักต้อน ($\mu\text{m}/\text{year}$)

τ = ระยะเวลาเป็ยกขึ้น

S = ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$)

M, n, m = ค่าคงที่

ซึ่งสมการ (1.13) สามารถหาอัตราการกักต้อนของเหล็กในบรรยากาศ โดยใช้โมโนแกรม (monogram) ดังภาพประกอบ 1.7

ส่วนสมการ (1.14) เขียนได้ดังนี้

$$\ln Y = k_1 + k_2 S^{c_1} + k_3 Cl^{c_2} + k_4 \ln \tau + k_5 S^{c_3} Cl^{c_4} + (k_6 + k_7 S + k_8 Cl + k_9 S Cl + k_{10} \tau) \ln \tau \quad (1.14)$$

เมื่อ $Y =$ อัตราการกักกรอง ($\mu\text{m/y}$)

$S =$ ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ($\text{mgSO}_3/\text{dm}^2/\text{day}$)

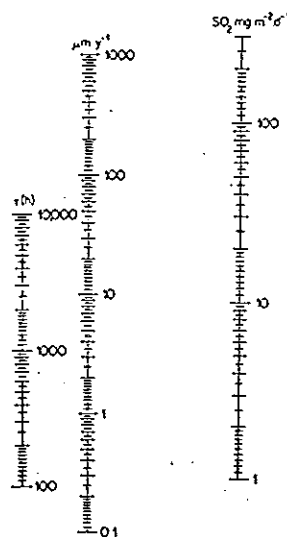
$Cl =$ ปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ ($\text{mgNaCl}/\text{dm}^2/\text{day}$)

c_1, c_2, c_3 และ $c_4 =$ ค่าคงที่

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9$ และ $k_{10} =$ ค่าคงที่

เมื่อคำนวณค่าคงที่ต่างๆ จากข้อมูลการทดลอง สมการ (1.14) จะเขียนใหม่ได้ ดังนี้

$$\ln Y = 2.689 + 2.784 S^{0.4} + 3.102 Cl^{0.6} + 0.846 \ln \tau - 3.853 S^{0.5} Cl^{0.6} + (-0.212 + 0.024 S - 0.32 Cl + 0.38 S Cl - 0.178 \tau) \ln \tau \quad (1.15)$$



ภาพประกอบ 1.7 โมโนแกรมของอัตราการกักกรองของเหล็กในบรรยากาศ
ที่มา : Barton, 1976 : 72

4. การป้องกันการกัดกร่อน

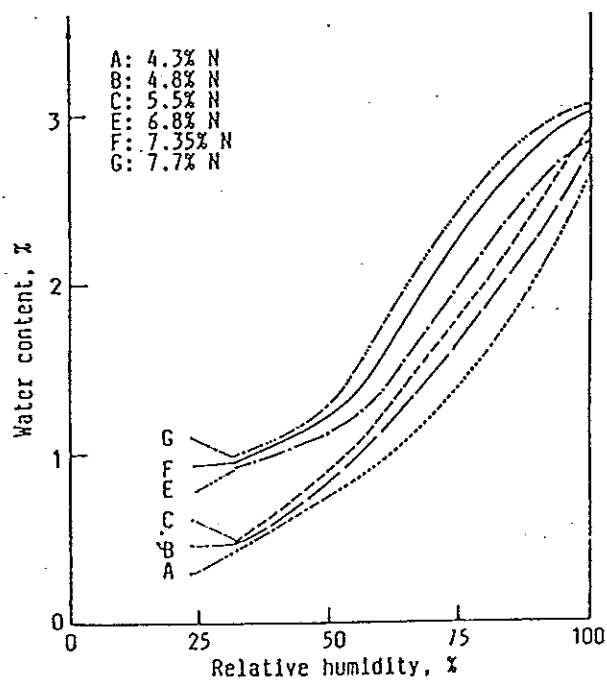
วิธีป้องกันการกัดกร่อนของโลหะที่ได้รับความนิยมวิธีหนึ่ง คือ การเคลือบผิวโลหะด้วยสารอินทรีย์ (organic coating) เช่น สีชนิดต่างๆ เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย และเพิ่มความสวยงามให้แก่ชิ้นงาน แต่เมื่อใช้ไปนานๆ ก็เกิดการเสื่อมสภาพของสี ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. อิทธิพลของสิ่งแวดล้อม ขึ้นอยู่กับสถานะต่างๆ ในสถานที่นั้นๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณแสงอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น เนื่องจากความชื้นและน้ำเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของสี ดังนั้น ระยะเวลาเปียกชื้นและความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งมาจากฝน หมอก น้ำค้าง หิมะ และไอน้ำในบรรยากาศ จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญเช่นเดียวกัน ดังภาพประกอบ 1.8 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์และปริมาณน้ำในฟิล์มโพลียูรีเทน (polyurethane film) โดยที่ปริมาณน้ำในฟิล์มจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของระยะเวลาเปียกชื้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 85 % กับการกัดกร่อน (corrosion loss) ของเหล็กใต้ฟิล์มสี ดังภาพประกอบ 1.9 แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่อยู่ใกล้ทะเลเป็นสถานะที่รุนแรงและเกิดการกัดกร่อนสูง

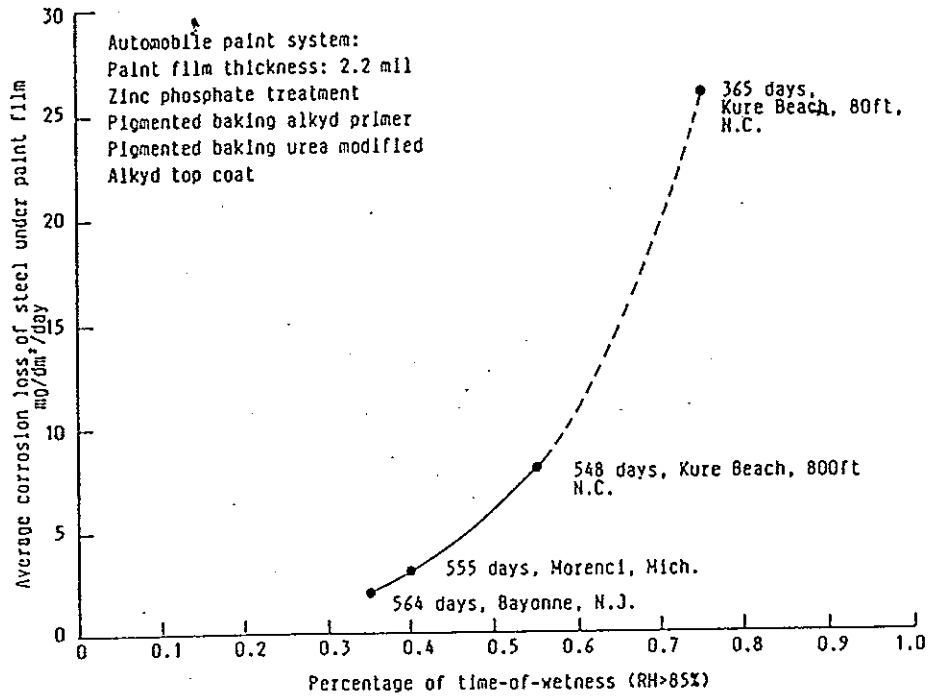
2. ชนิดของสี ในสถานะแวดล้อมเดียวกัน ถ้าใช้สีต่างชนิดกัน ก็จะทำให้อายุการใช้งานแตกต่างกันไป โดยแบ่งชนิดของสีตามสารยึด (binder) เช่น บริเวณชายทะเลสีที่มีการเสื่อมสภาพน้อยคือ สีอีพอกซี (epoxy) และสีอีพอกซีโพลีเอไมด์ (epoxy polyamide) ส่วนสีที่มีการเสื่อมสภาพมากได้แก่ สีอัลคีด (alkyd) และสีเซลลูโลสแอซิเตต (cellulose acetate) (Musalum, 1990)

3. ความหนาของสี เมื่อความหนาของสีมากขึ้น อายุการใช้งานของสีก็ยิ่งนาน ภาพประกอบ 1.10 แสดงให้เห็นถึงความหนาที่น้อยที่สุดของสีสำหรับอายุใช้งาน 8-10 ปีที่บรรยากาศต่างๆ เห็นว่าบริเวณชายทะเลต้องใช้ความหนาประมาณ 2 เท่าของความหนาที่ใช้ในชนบท โดยที่บรรยากาศชายทะเลมีความรุนแรงกว่าบรรยากาศอุตสาหกรรม และบรรยากาศชนบท ตามลำดับ (Wei, Chen and Liou, 1994) และจากการทดสอบด้วยเครื่องเร่งการกัดกร่อนด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต พบว่าความหนาที่ป้องกันการกัดกร่อนได้ดีเมื่อใช้สีน้ำมันคือ 80 ไมครอน (μm) (รุ่งทิพย์ ห้าวหาญ และ วรพงษ์ ดี รุ่งโรจน์, 2534)



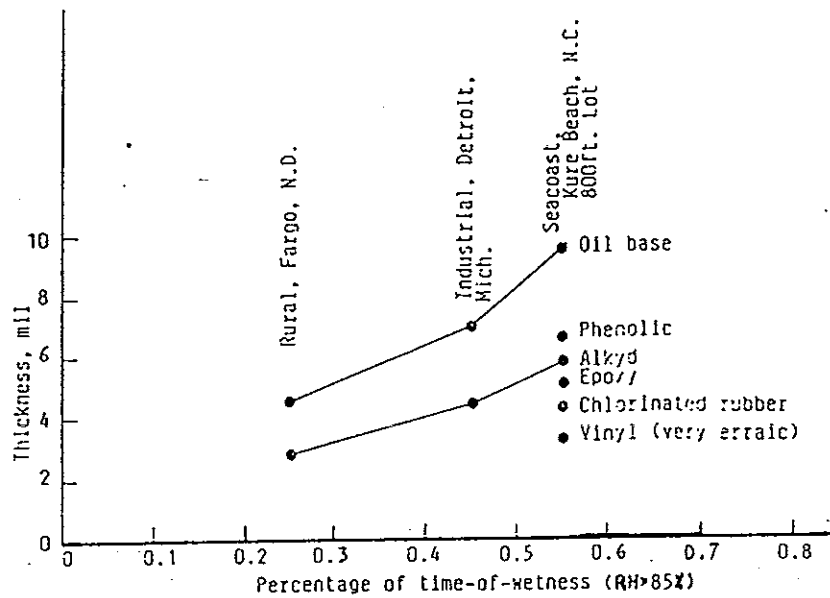
ภาพประกอบ 1.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับปริมาณน้ำในฟิล์ม
โพลียูรีเทน

ที่มา : Suzuki, 1989 : 234



ภาพประกอบ 1.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของระยะเวลาเปียกขึ้นกับการกัดกร่อน (corrosion loss) ของเหล็กใต้ฟิล์มสี

ที่มา : Suzuki, 1989 : 235

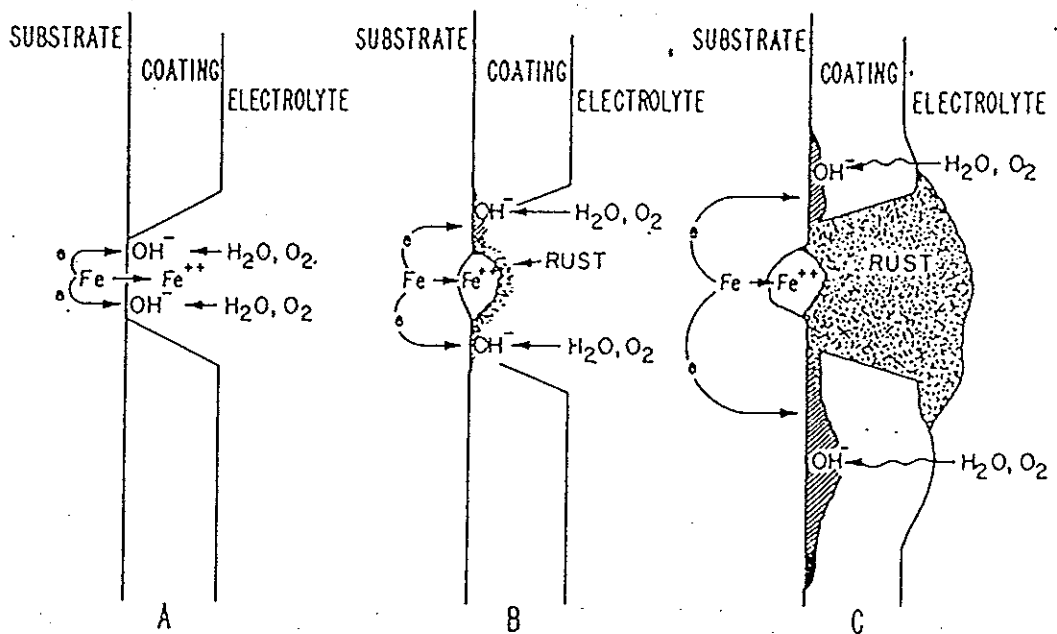


ภาพประกอบ 1.10 ความหนาที่น้อยที่สุดของสีสำหรับอายุใช้งาน 8-10 ปีที่บรรยากาศต่างๆ

ที่มา : Suzuki, 1989 : 239

4. การเตรียมผิวของชิ้นงาน โดยที่การเตรียมผิวที่ดีจะช่วยยืดอายุการใช้งานของสี จากการทดสอบการเสื่อมสภาพของสีด้วยเครื่องพ่นละอองเกลือ (salt spray) และแสงอัลตราไวโอเล็ต พบว่าชิ้นงานที่เตรียมโดยวิธี iron phosphate ทนทานต่อการกัดกร่อนมากกว่าวิธีขัด (polish) และวิธีการล้างด้วยสารละลาย (degreasing) ส่วนค่าความเงา (gloss) ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการทดสอบ และไม่ขึ้นกับวิธีการเตรียมพื้นผิว (Thanuddhanusilp and Tahara, 1993)

สำหรับการเสื่อมสภาพของสีเริ่มจากมีตำหนิ (defect) เล็กๆ เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของสี ในขั้นตอนนี้ยังไม่มีผลต่อความเงา แต่เมื่อเวลาผ่านไปความเสียหายได้เพิ่มขึ้นทำให้ผิวหน้าของสีขรุขระมากขึ้น ค่าความเงาจึงลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อสีทับหน้า (top coat) ถูกทำลายไปแล้ว ทำให้ฟิล์มสีมีลักษณะชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งมีผลต่อการยึดติดแน่นและความทนทานต่อการกัดกร่อนของสีในขั้นถัดไป (Iwami, 2539) ดังภาพประกอบ 1.11



ภาพประกอบ 1.11 ขั้นตอนการเสื่อมสภาพของสี

ที่มา : Dickie, 1978 : 139

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กเมื่ออยู่ในบรรยากาศต่างๆ ของภาคใต้
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศ
3. เพื่อศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศ โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยสี
4. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำลายประสิทธิภาพของสี

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้เกี่ยวกับการกัดกร่อนของที่ใช้ในบรรยากาศต่างๆ ของภาคใต้
2. ได้ความรู้เกี่ยวกับการใช้สีอย่างเหมาะสมเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

ขอบเขตการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กเมื่ออยู่ในบรรยากาศต่างๆของภาคใต้
ดังนี้
 - 1.1 บรรยากาศชนบท
สถานที่ทดลองอยู่บริเวณตลาดฟ้าของตึกภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา
 - 1.2 บรรยากาศชายทะเล
สถานที่ทดลองอยู่บริเวณศูนย์วิชาการและหน่วยวิจัยเพาะพืชสัตว์น้ำ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.เทพา จ.สงขลา
 - 1.3 บรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเล
สถานที่ทดลองอยู่ บริเวณบริษัทผลิตไฟฟ้าขนอมจำกัด อ.ขนอม จ.นครศรีธรรมราช
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศ ดังนี้
 - 2.1 ลักษณะการวางชิ้นงาน

- 2.1.1 ไนรม
- 2.1.2 กลางแจ้ง
- 2.2 ลักษณะของชิ้นงานเปลือย
 - 2.2.1 ชิ้นงานปกติ
 - 2.2.2 ชิ้นงานหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย)
 - 2.2.3 ชิ้นงานมีรอยเชื่อม
- 2.3 ปริมาณมลสารในบรรยากาศ
 - 2.3.1 แก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์
 - 2.3.2 เกลือโซเดียมคลอไรด์
- 3. เพื่อศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กชั้นต้นในบรรยากาศชนบท
โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยสี โดยมีลักษณะชิ้นงานเหมือนกับชิ้นงานเปลือย
- 4. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำลายประสิทธิภาพของสี ดังนี้
 - 4.1 ชนิดของสี
 - 4.1.1 ระบบสี A คือ สีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกัน
 - 4.1.2 ระบบสี B คือ สีอีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกัน
 - 4.1.3 ระบบสี C คือ สีอัลคิต 1
 - 4.1.4 ระบบสี D คือ สีอัลคิต 2
 - 4.2 ความหนาของสี ใช้ตามคู่มือการใช้สีของระบบนั้นๆ
 - 4.3 การเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบผิว

บทที่ 2

ทฤษฎี

การกัดกร่อน (Corrosion) (กัญจนา, 2530 ; กนกพร, 2532 ; Fontana, 1987)

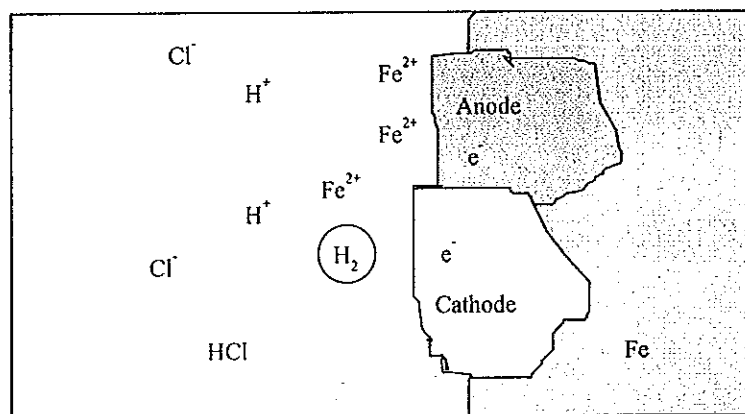
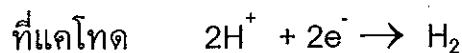
การกัดกร่อน คือสภาพเสื่อมของโลหะ ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาทางเคมีหรือไฟฟ้าเคมีระหว่างโลหะกับสิ่งแวดล้อม โดยมีอิทธิพลจากอุณหภูมิ ปริมาณสิ่งเจือปนในบรรยากาศและน้ำ นอกจากโลหะแล้ววัสดุชนิดอื่น เช่น พลาสติกหรือเซรามิกส์ ก็เกิดการกัดกร่อนได้ แต่จะเป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีเท่านั้น ไม่ใช่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ส่วนโลหะจะเกิดจากทั้ง 2 กรณี เนื่องจากโลหะมีอิเล็กตรอนอิสระที่จะทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมี (electrochemical cells) ภายในเนื้อโลหะได้ การกัดกร่อนทำให้สูญเสียเนื้อโลหะบางส่วนไป เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า ผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน (corrosion products) อาจอยู่ในรูปสารประกอบของออกไซด์ (oxide) ซัลไฟด์ (sulfide) หรือคาร์บอเนต (carbonate) เป็นต้น สารประกอบเหล่านี้มีเสถียรภาพกว่าโลหะในบรรยากาศ ดังนั้นการกัดกร่อนของโลหะจึงเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา โดยที่ความรุนแรงของการกัดกร่อนจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม

1. หลักการกัดกร่อน

โลหะจะเกิดการกัดกร่อนขึ้นเมื่อสภาพแวดล้อมทำตัวเป็นอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) และทำให้เกิดแคโทด (cathode) และแอโนด (anode) ขึ้นที่ผิวของโลหะ เป็นผลทำให้กระแสไฟฟ้าไหลระหว่างแคโทดและแอโนดนั้นได้ ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีเช่นนี้จะทำให้โลหะบริเวณที่เป็นแอโนดถูกกัดกร่อนไป การเกิดปฏิกิริยาหรือการกัดกร่อนที่สมบูรณ์ต้องมีการให้และการรับอิเล็กตรอน (electron) เรียกปฏิกิริยาที่มีการให้และการรับอิเล็กตรอนว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) ขั้วอิเล็กโทรด (electrode) ที่ให้อิเล็กตรอนเรียกว่าแอโนด โดยที่แอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ขั้วอิเล็กโทรดที่รับอิเล็กตรอนเรียกว่าแคโทด และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้ว

นี้เป็นปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) โดยปฏิกิริยานี้อาจเกิดขึ้นในสภาวะต่างๆ ขึ้นอยู่กับอิเล็กโทรไลต์

ตัวอย่างเช่น ถ้าเรานำเหล็กชิ้นหนึ่งไปจุ่มในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ฟองแก๊สไฮโดรเจนจะผุดขึ้นมากมายอย่างรุนแรง และเหล็กถูกกัดกร่อนไปด้วยอัตราสูง อธิบายการกัดกร่อนด้วยหลักการข้างต้นคือ ผิวของเหล็กชิ้นเดียวกันมีสารมลทินหรือส่วนประกอบทางเคมีต่างกันเป็นจุดๆ ทำให้จุดเหล่านี้มีความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical potential) ต่างกันไป บริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า ทำตัวเป็นแคโทด ขณะที่บริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่ากลายเป็นแอโนด เหล็กชิ้นเดียวกันจึงมีพื้นที่แคโทดและแอโนดเล็กๆ มากมาย ตามภาพประกอบ 2.1 เมื่ออยู่ในอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นกรด ซึ่งมีสมรรถภาพในการกัดกร่อนสูง ดังนั้นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่แคโทดและแอโนดก็จะรุนแรงตามไปด้วย



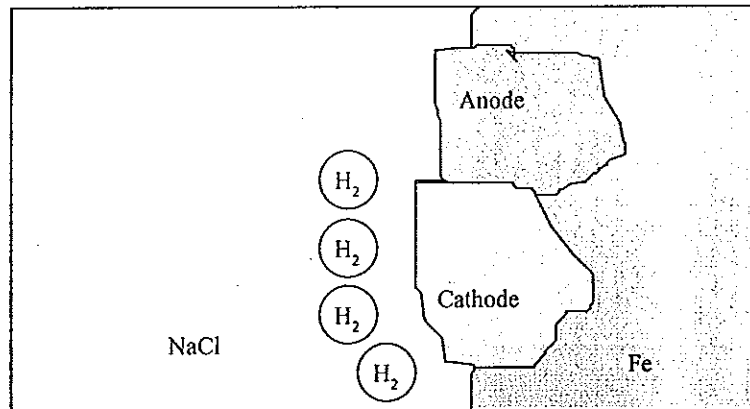
ภาพประกอบ 2.1 การเกิดเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ที่แอโนด และ ฟองแก๊สไฮโดรเจนที่แคโทด

ที่มา : กนกพร, 2532 : 9

จะเห็นว่าเนื้อเหล็กที่แอโนดถูกกัดกร่อนละลายเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ในอิเล็กโทรไลต์ ส่วนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นวิ่งผ่านเนื้อเหล็กไปรวมกับไฮโดรเจนไอออน

(H^+) ซึ่งได้จากการแตกตัวของกรดไฮโดรคลอริกกลายเป็นฟองแก๊สไฮโดรเจนที่แคโทด นอกจากนี้บริเวณแคโทดและแอโนดเล็กๆ เหล่านี้อาจสลับที่กันได้ขณะเกิดปฏิกิริยา จึงทำให้เห็นการผุกร่อนของเหล็กเป็นไปอย่างค่อนข้างสม่ำเสมอ

อัตราการกัดกร่อนของเหล็กในกรดไฮโดรคลอริกจะสูงมาก แต่ถ้าใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) ซึ่งเป็นกลาง อัตราการกัดกร่อนจะช้าลงมากจนฟองแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีโอกาสไปจับเป็นฟิล์มที่แคโทด เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า cathodic polarization ดังภาพประกอบ 2.2 และถ้าไม่มีปฏิกิริยาเคมีอื่นมาทำลายฟิล์มของฟองแก๊สไฮโดรเจน การกัดกร่อนที่แอโนดก็จะไม่เกิดขึ้นอีกต่อไป



ภาพประกอบ 2.2 ปรากฏการณ์ cathodic polarization ที่ลดอัตราการกัดกร่อน
ที่มา : กนกพร, 2532 : 9

สรุปได้ว่าอัตราการกัดกร่อนของโลหะจะขึ้นกับสภาพแวดล้อม วิธีหนึ่งที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนก็คือสรรหาโลหะมาใช้ให้ถูกต้องและเหมาะสม

จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าโลหะและสารเคมีบางชนิดที่ใช้คู่กันแล้วจะให้ความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงสุดด้วยค่าใช้จ่ายที่ต่ำสุด ดังตัวอย่างตามตาราง 2.1

ตาราง 2.1 โลหะและสารเคมีคู่ต่างๆ ที่ให้ค่าความต้านทานการกัดกร่อนสูงที่สุด

| โลหะ | สารเคมี |
|------------------------------------|---|
| ตะกั่ว (lead) | กรดซัลฟูริกเจือจาง |
| เหล็กกล้า (steel) | กรดซัลฟูริกเข้มข้น |
| เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) | กรดไนตริก |
| โมนีล (monel) | กรดไฮโดรฟลูออริก |
| เฮสเทลลอย (hastelloys) | กรดไฮโดรคลอริก |
| นิกเกิลและนิกเกิลอัลลอยด์ | ด่าง (NaOH) |
| ดีบุก (tin) | น้ำกลั่น |
| อลูมิเนียม (aluminium) | บรรยากาศทั่วไป (nonstaining atmosphere) |

ที่มา : Fontana,1987 : 279

2. คุณสมบัติการเป็นโลหะมีสกุลและไม่มีสกุล

Electromotive force (E.M.F.) เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าดังแสดงในตาราง 2.2 โดยถือเอาไฮโดรเจนเป็นมาตรฐาน (standard electrode potential) และให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของโลหะก็จะเป็นศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะนั้นในสารละลายที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ของโลหะไอออนเมื่อเทียบกับไฮโดรเจนอิเล็กโทรด

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของโลหะจะบอกว่าโลหะนั้นเป็นโลหะมีสกุล (noble) หรือโลหะที่ว่องไวต่อการรวมตัว (active) จากการหาค่าของศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของโลหะต่างๆ โดยคิดเป็นสมการรีดักชัน ถ้าเป็นสมการแบบออกซิเดชัน เครื่องหมายก็เป็นตรงกันข้ามและเรียกตารางนี้ว่า Standard Electrode Potential Series หรือ Electromotive force series

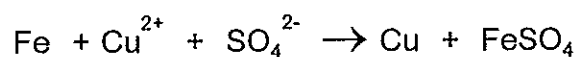
ตาราง 2.2 ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานที่แสดงคุณสมบัติการเป็นโลหะมีสกุลและไม่มี
สกุลเทียบกับไฮโดรเจนอิเล็กโทรดที่ 25 °ซ.

| | โลหะ | ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (โวลต์) |
|--------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Noble | Au-Au ³⁺ | + 1.498 |
| | Pt-Pt ²⁺ | + 1.200 |
| Cathodic | Pd-Pd ²⁺ | +0.987 |
| | Ag-Ag ⁺ | + 0.799 |
| | Hg-Hg ²⁺ | + 0.788 |
| | Cu-Cu ²⁺ | + 0.337 |
| | H ₂ -H ⁺ | 0.000 |
| | Pb-Pb ²⁺ | - 0.126 |
| | Sn-Sn ²⁺ | - 0.136 |
| | Ni-Ni ²⁺ | - 0.250 |
| | Co-Co ²⁺ | - 0.277 |
| | Cd-Cd ²⁺ | - 0.403 |
| | Fe-Fe ²⁺ | - 0.440 |
| | Cr-Cr ³⁺ | - 0.744 |
| | Zn-Zn ²⁺ | - 0.763 |
| | Al-Al ³⁺ | - 1.662 |
| | Active | Mg-Mg ²⁺ |
| Na-Na ⁺ | | - 2.714 |
| Anodic | K-K ⁺ | -2.925 |

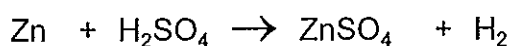
ที่มา : Fontana, 1987 : 42

จากตาราง 2.2 สรุปได้ว่า

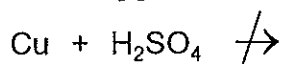
1. ในสารละลาย โลหะที่อยู่ต่ำกว่าในตารางสามารถแทนที่ไอออนของโลหะที่อยู่สูงกว่าได้ เช่น เหล็กสามารถแทนที่ไอออนของทองแดงในสารละลายได้ ดังสมการ



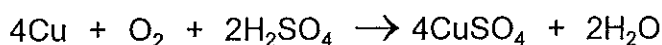
2. สามารถบอกได้ว่าโลหะหนึ่งจะถูกกัดกร่อนโดยกรดได้หรือไม่ โดยอาศัยหลักที่ว่าถ้าโลหะอยู่ต่ำกว่าไฮโดรเจนในตารางสามารถแทนที่ H^+ ในกรดได้ แต่โลหะที่อยู่สูงกว่าไม่สามารถแทนที่ H^+ ในกรดได้ เช่น



แต่ทองแดงซึ่งอยู่สูงกว่าไฮโดรเจนในตารางจะไม่ถูกกัดกร่อนโดยกรด เช่น



สมการนี้จะไม่เกิดขึ้นเองแต่ในบางกรณีทองแดงสามารถถูกกัดกร่อนในกรดได้สาเหตุมาจากมีออกซิเจนอยู่ด้วย เช่น



3. ถ้าโลหะ 2 ชนิดสัมผัสกัน โลหะที่มีสกุลกว่าเป็นแคโทดและรับอิเล็กตรอน ส่วนโลหะที่มีสกุลต่ำกว่าเป็นแอโนดและให้อิเล็กตรอน

4. ถ้าโลหะ 2 ชนิดสัมผัสกันความรุนแรงของปฏิกิริยา ที่เกิดขึ้นดูได้จากผลต่างของศักย์ไฟฟ้า ถ้าต่างกันมากปฏิกิริยาก็จะรุนแรงมาก เช่น

ทองแดงสัมผัสกับอลูมิเนียมความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า

$$= 0.337 - (-1.662) \quad \text{โวลต์}$$

$$= 1.999 \quad \text{โวลต์}$$

แมกนีเซียมสัมผัสกับอลูมิเนียมความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า

$$= -1.662 - (-2.363) \quad \text{โวลต์}$$

$$= 0.701 \quad \text{โวลต์}$$

เพราะฉะนั้นปฏิกิริยาของทองแดงกับอลูมิเนียมจะรุนแรงกว่า

3. รูปแบบของการกัดกร่อน

ในการจำแนกการกัดกร่อนนั้น วิธีที่สะดวกคือการพิจารณารูปแบบที่เกิดขึ้นกับผิวโลหะที่ถูกกัดกร่อนไป ซึ่งสามารถพิจารณาทั้งด้วยตาเปล่าหรือทัศนอุปกรณ์ช่วยขยายจากตัวอย่างทดสอบ

รูปแบบของการกัดกร่อนแบ่งออกได้ 8 ลักษณะ โดยที่แต่ละลักษณะมีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อยแล้วแต่กรณี รูปแบบดังกล่าวได้แก่

- 3.1 การกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอ (uniform corrosion)
- 3.2 การกัดกร่อนแบบโลหะต่างชนิดกัน (galvanic corrosion or bimetallic corrosion)
- 3.3 การกัดกร่อนในที่อับ (crevice corrosion)
- 3.4 การกัดกร่อนแบบหลุม (pitting corrosion)
- 3.5 การกัดกร่อนระหว่างเกรน (intergranular corrosion)
- 3.6 การชะล้างแบบเลือกละลาย (selective leaching)
- 3.7 การกัดกร่อนแบบขัดสี (erosion corrosion)
- 3.8 การกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น (stress corrosion or stress corrosion cracking : SCC)

แต่ละรูปแบบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอ

การกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอ เป็นรูปแบบสามัญที่สุดของการกัดกร่อนโดยดำเนินไปอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นผิวสัมผัสของโลหะกับสารกัดกร่อน มีผลทำให้โลหะนั้นบางลงทุกด้านจนกร่อนหมดไป ตัวอย่างของการกัดกร่อนแบบนี้ ได้แก่ เหล็กหรือสังกะสีที่จุ่มอยู่ในกรดซัลฟิวริกเจือจางซึ่งจะถูกกัดกร่อนไปอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ

การกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอเป็นการสูญเสียเนื้อโลหะมากที่สุด แต่ก็ไม่ได้ได้รับความสนใจทางเทคนิคมากนัก เนื่องจากอายุการใช้งานของวัสดุอุปกรณ์สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.2 การกัดกร่อนแบบโลหะต่างชนิดกัน

โดยทั่วไปเมื่อนำเอาโลหะต่างชนิดกันจุ่มลงในสารกัดกร่อนหรือสารละลายที่นำไฟฟ้าได้จะเกิดความต่างศักย์ขึ้น ถ้าต่อโลหะ 2 ชนิดนี้เข้าด้วยกันจะมีกระแสไฟฟ้าไหล โลหะที่มีสกุลกว่าจะทำหน้าที่เป็นแคโทด แต่โลหะที่ไวกว่าจะเป็นแอโนด ทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นที่โลหะที่เป็นแอโนด การเกิดการกัดกร่อนแบบนี้เกิดเนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลในโลหะต่างชนิดกัน เรียกว่า กัลวานิก (galvanic) หรือ bimetallic corrosion โลหะสองชนิดที่กล่าวถึงนี้ อาจเป็นโลหะชนิดเดียวกันแต่มีความแตกต่างในส่วนประกอบของโลหะก็ได้

ตัวอย่างของการกัดกร่อนแบบโลหะต่างชนิดกัน เช่น ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (shell and tube heat exchanger) ส่วนมากท่อ (tube) ทำด้วยโลหะอลูมิเนียม แต่เนื่องจากโลหะอลูมิเนียมเป็นโลหะอ่อน ไม่สามารถรับน้ำหนักของตัวเองซึ่งมีขนาดยาวได้ จึงต้องมีตัวช่วยรองรับ (baffle) ในรูปของแผ่นเหล็กสำหรับร้อยท่อเหล่านี้ ท่ออลูมิเนียมจะสัมผัสกับแผ่นเหล็ก ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างโลหะ อลูมิเนียมซึ่งไวกว่าเหล็กเป็นแอโนดและเกิดการกัดกร่อนขึ้น

ตัวอย่างของการกัดกร่อนแบบโลหะต่างชนิดกัน ที่เกิดขึ้นกับเหล็กเคลือบด้วยสังกะสีแสดงในภาพประกอบ 2.3 โดยสังกะสีเป็นตัวที่ถูกกัดกร่อน



ภาพประกอบ 2.3 การกัดกร่อนแบบโลหะต่างชนิดกันของเหล็กที่เคลือบผิวด้วย ดีบุก (ซ้าย) และสังกะสี (ขวา)

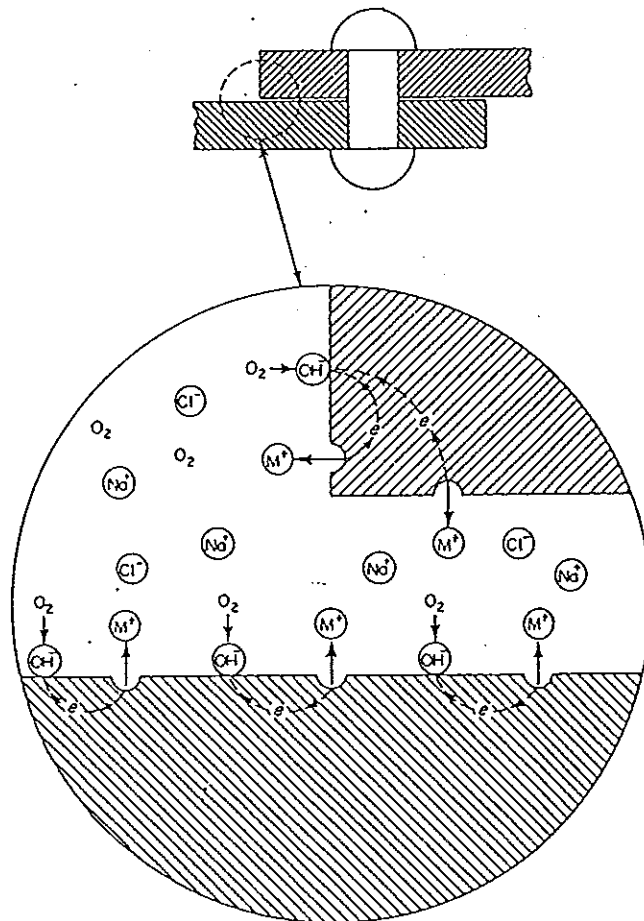
ที่มา : Fontana, 1987 : 50

3.3 การกัดกร่อนในที่อับ

เป็นการกัดกร่อนของโลหะที่เกิดขึ้นในบริเวณของโลหะที่เป็นช่องแคบๆ หรือบริเวณที่ถูกปกปิด เช่น บริเวณที่อยู่ใต้ไม้ค้ำ ใต้หมวกของตะปู หรือตะเข็บรอยต่อของโลหะ เป็นต้น บริเวณที่เป็นช่องแคบๆ นี้ได้รับออกซิเจนหรือไอออนจากสารละลายได้ไม่เพียงพอ จึงทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น (concentration cell) ขึ้นระหว่างภายในและภายนอก ทำให้บริเวณช่องแคบๆ นั้นกลายเป็นแอโนดแล้วเกิดการกัดกร่อนขึ้น ขณะเดียวกันภายในช่องแคบๆ นั้น ก็จะเกิดการสะสมของเกลือของโลหะขึ้น ทำให้ pH ลดลง และภายในช่องแคบๆ นั้นก็ถูกกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อน ลักษณะคล้ายกับการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม (pitting) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.4 และ 2.5

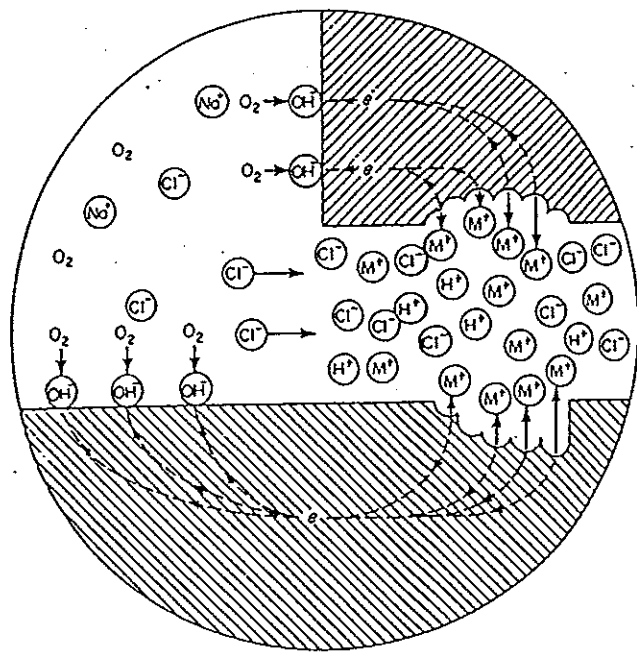
ตัวอย่างของสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ คือ น้ำทะเลที่มีคลอไรด์ผสมอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดการกัดกร่อนในที่อับได้ง่าย และโลหะต่างชนิดกันจะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนในที่อับได้ไม่เท่ากัน

ตัวอย่างของการกัดกร่อนแบบนี้ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.6 ซึ่งเกิดการกัดกร่อนในที่อับตรงหน้าแปลนของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม

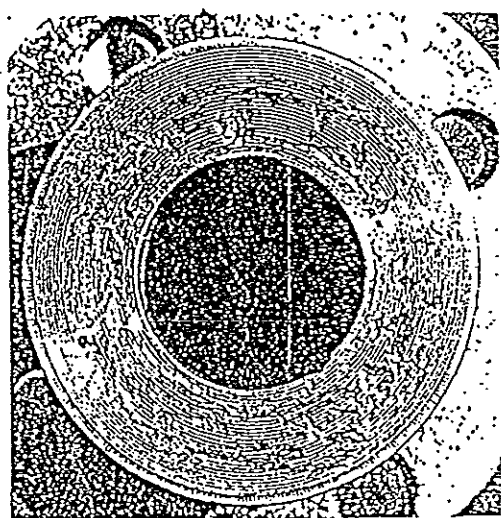


ภาพประกอบ 2.4 การเกิดการกัดกร่อนในที่อับชั้นเริ่มต้น

ที่มา : Fontana, 1987 : 54



ภาพประกอบ 2.5 การเกิดการกัดกร่อนในที่อับชื้นต่อมา
ที่มา : Fontana, 1987 : 55



ภาพประกอบ 2.6 การกัดกร่อนในที่อับที่เกิดกับหน้าแปลนของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม
ที่มา : Fontana, 1987 : 52

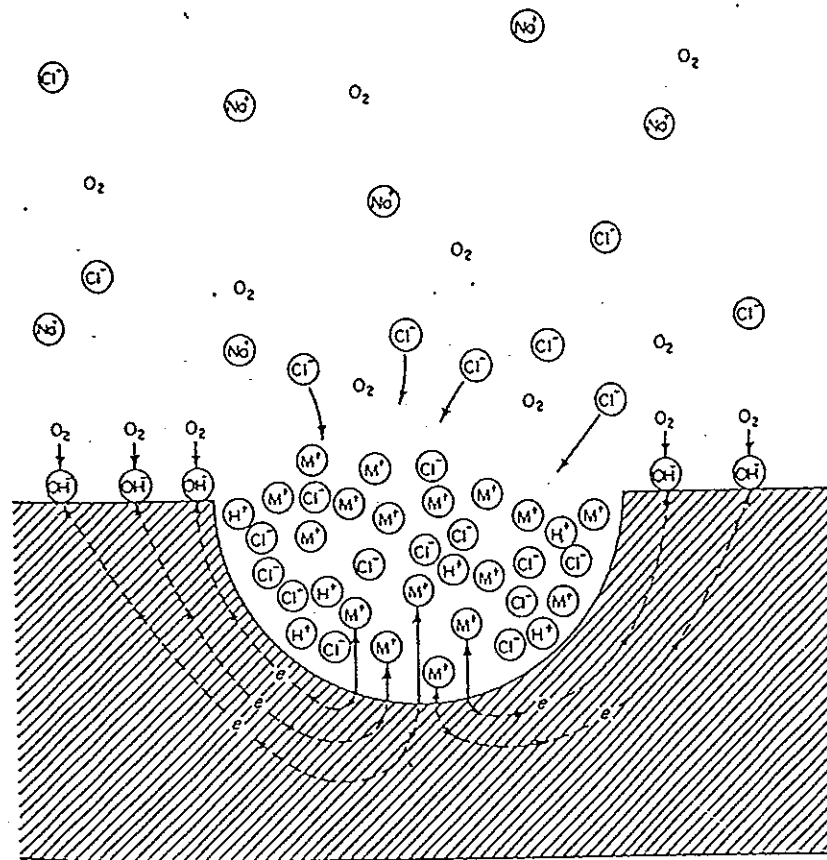
3.4 การกัดกร่อนแบบหลุม

นับเป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ที่รุนแรงมาก โดยมีผลทำให้เกิดรูหรือหลุมบนผิวโลหะซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางอาจเล็กหรือใหญ่ แต่โดยทั่วไปแล้วจะมีขนาดเล็ก โดยให้ความหมายของคำว่า pit ว่า เป็นช่องว่าง หรือหลุมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ผิวขนาดเท่าๆ กับความลึกหรือน้อยกว่า

การกัดกร่อนแบบหลุมเป็นรูปแบบของการกัดกร่อนที่จัดว่าเป็นการทำลายมากที่สุด เพราะทำให้ประสิทธิภาพลดลงต่างๆ ที่ เมื่อเปรียบเทียบการสูญเสียไปโดยน้ำหนักแล้วมีค่าน้อยมาก เช่น ต้องหยุดเครื่องจักรหรือหยุดการทำงานเนื่องจากรอยร้าว และประการสำคัญคือ การหาร่องรอยของหลุมนั้นยากมาก เนื่องจากมีขนาดเล็กและยังอาจปกคลุมไว้ด้วยผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน จึงต้องใช้เวลานานกว่าจะพบเห็นว่าวัสดุที่ใช้งานไปนั้นเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม นอกจากนี้ยังเป็นการยากที่จะทำนายการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม โดยวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

โดยทั่วไปการกัดกร่อนแบบหลุม เกิดขึ้นในทิศทางของแรงโน้มถ่วง กล่าวคือ หลุมจะเติบโตในทิศทางลงจากพื้นผิวที่อยู่ในแนวระนาบ และพบที่เกิดอยู่บนพื้นผิวแนวตั้งน้อยมาก นอกจากนี้ช่วงระยะเวลาในการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมขึ้นอยู่กับทั้งโลหะและสารกัดกร่อน แต่เมื่อเริ่มเกิดขึ้นแล้วก็จะเติบโตต่อไปอย่างรวดเร็ว

กลไกของการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม เป็นการเกิดปฏิกิริยาแอโนดิก และสามารถเร่งการเกิดด้วยตัวเอง (autocatalytic) กล่าวคือ ภายในหลุมเกิดภาวะที่เป็นทั้งการเร่งและสิ่งจำเป็นในการที่ให้หลุมมีความว่องไวต่อไป ดังภาพประกอบ 2.7 ที่แสดงให้เห็นว่าโลหะเกิดการละลายอย่างรวดเร็วภายในหลุม ทำให้เกิดประจุบวกขึ้นมากในบริเวณนั้น มีผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนเข้ามา เพื่อรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าไว้ ภายในหลุมจึงมีความเข้มข้นของ MCI สูง และผลจากการไฮโดรไลซิสจะเกิดไฮโดรเจนไอออนมีความเข้มข้นสูงมาก ซึ่งทั้งไฮโดรเจนไอออนและคลอไรด์ไอออนจะเร่งการละลายของโลหะ สำหรับการละลายของออกซิเจนในหลุมมีน้อยมากทำให้ไม่มีปฏิกิริยารีดักชันในหลุม แต่จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนขึ้นที่ผิวของโลหะข้างๆ ใกล้เคียงกับหลุม และเท่ากับเป็นการเร่งการกัดกร่อน

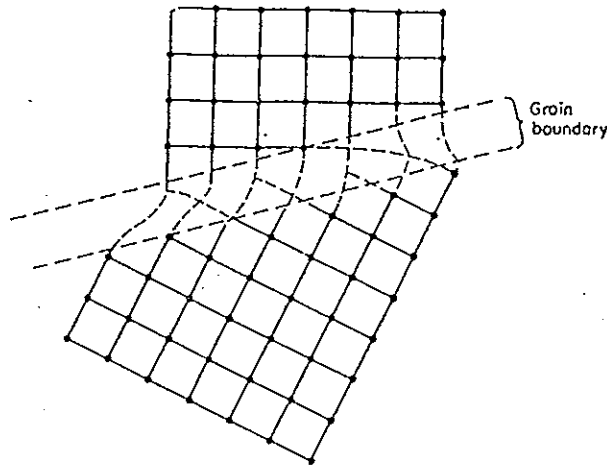


ภาพประกอบ 2.7 กลไกการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม

ที่มา : Fontana, 1987 : 67

3.5 การกัดกร่อนระหว่างเกรน

ในการหล่อโลหะ (casting) เมื่อโลหะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งแล้ว อะตอมของโลหะซึ่งเคยอยู่กันอย่างกระจัดกระจายในสถานะของเหลวนั้นก็จะจัดตัวเองให้อยู่ในลักษณะของผลึกหรือเกรน (grains) แต่การจัดผลึกนี้จะเกิดขึ้นในหลายๆ ที่ ทำให้เกิดผลึกมากมายและในบริเวณที่ผลึกมาชนกันนี้เรียกว่าขอบของเกรน (grain boundaries) ขอบของเกรนจะเป็นบริเวณที่มีความไม่เป็นระเบียบ ดังอธิบายได้จากภาพประกอบ 2.8 เป็นรูปสายเส้นสองมิติแทนเกรนที่มาพบกัน ที่ขอบของเกรน คือ บริเวณที่ไม่มีความเป็นระเบียบ



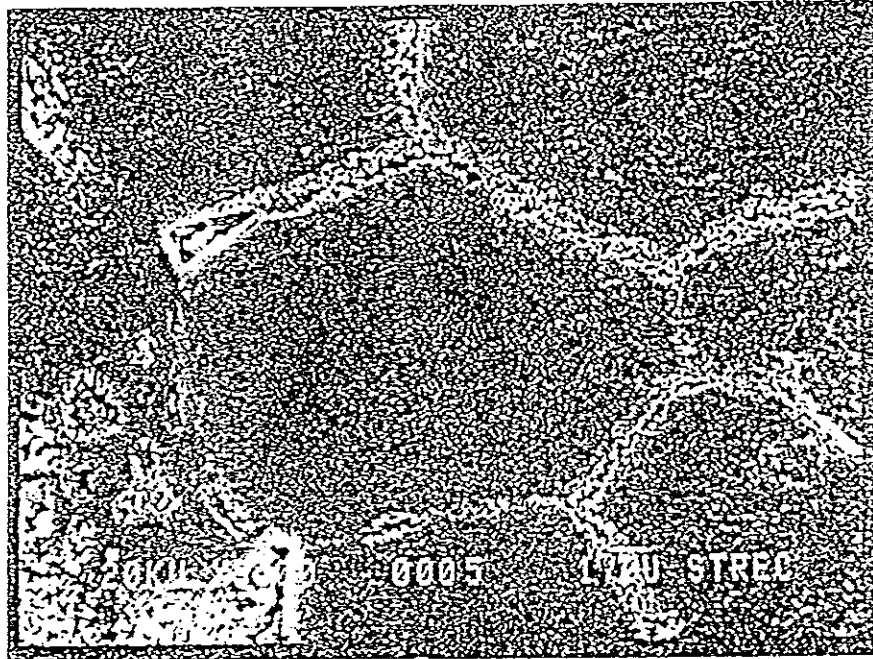
ภาพประกอบ 2.8 ภาพ 2 มิติของขอบเกรน

ที่มา : Fontana, 1987 : 30

เนื่องจากการจัดเรียงตัวที่เสถียรที่สุดของโลหะ คือรูปแบบโครงสร้างผลึก ดังนั้นขอบเกรนจึงมีพลังงานสูง คือมีความว่องไวทางเคมีมากกว่าบริเวณอื่น เมื่อสัมผัสกับสารกัดกร่อนในการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (uniform attack) จะไม่สามารถสังเกตเห็นการกัดกร่อนของขอบเกรนว่าแตกต่างจากเกรนส่วนอื่น ทั้งนี้เนื่องจากขอบเกรนมีความว่องไวกว่าเกรนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ในสภาวะบางอย่างขอบเกรนจะมีความว่องไวมาก มีผลทำให้เกิดการกัดกร่อนระหว่างเกรนมากขึ้น ในขณะที่เกรนถูกกัดกร่อนน้อยมาก จึงเรียกการกัดกร่อนแบบนี้ว่า การกัดกร่อนระหว่างเกรน (intergranular corrosion) ซึ่งมีผลทำให้โลหะผสมนั้นแตกแยกออกไป สังเกตได้จากการที่เกรนเริ่มหายไป และอาจทำให้โลหะนั้นสูญเสียความแข็งแรง

การกัดกร่อนระหว่างเกรนมีสาเหตุมาจาก การมีสิ่งเจือปนที่ขอบเกรนมีปริมาณของส่วนประกอบของโลหะผสมหนึ่งมากเป็นพิเศษ หรือมีการลดลงอย่างมากของธาตุใดธาตุหนึ่งในบริเวณขอบเกรน เช่น การลดลงของโครเมียมในบริเวณขอบเกรน มีผลทำให้เกิดการกัดกร่อนระหว่างเกรนในเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการเชื่อม

ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบนี้ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.9 เกิดขึ้นกับทองเหลือง



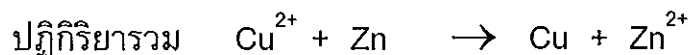
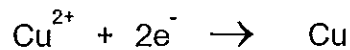
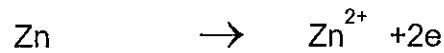
ภาพประกอบ 2.9 การกัดกร่อนระหว่างเกรนของทองเหลือง (ขยาย 5400 เท่า)
ที่มา : กัญจนนา, 2530 : 33

3.6 การชะล้างแบบเลือกละลาย

การชะล้างแบบเลือกละลาย เป็นการกัดกร่อนชนิดที่ส่วนประกอบหนึ่งของโลหะผสมที่มีสกลน้อยกว่าส่วนประกอบอื่นๆ ถูกดึงออกมาด้วยการกัดกร่อน ทำให้เหลือพื้นผิวของโลหะผสมที่เต็มไปด้วยส่วนประกอบอื่นและผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน โลหะผสมที่ถูกกัดกร่อนก็ยังคงรูปร่างเดิมหรืออาจจะถูกทำลายลงก็ได้ แต่ความทนแรงดึง (tensile strength) ของโลหะผสมและคุณสมบัติยืดดึง (ductility) จะลดลง กลไกทางปฏิกิริยาเคมีของการเกิดการกัดกร่อนแบบนี้ ยังไม่มีผู้ใดพิสูจน์ได้ว่าเกิดขึ้นได้อย่างไร แต่ทฤษฎีที่ยอมรับขณะนี้ เป็นทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิด

dezincification ซึ่งเป็นการชะล้างแบบเลือกละลายชนิดหนึ่งที่พบบ่อยมากในทองเหลือง โดยเกิดการสูญหายของสังกะสีไปจากทองเหลืองคงเหลือแต่ทองแดง สังกะสีได้จากสีของโลหะจะเปลี่ยนไปจากสีเหลืองของทองเหลืองเป็นสีแดงของทองแดง สามารถอธิบายการเกิด dezincification ได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. ทองเหลือง (ทั้งทองแดงและสังกะสี) ถูกละลายออกมา
2. สังกะสียังคงเป็นไอออนในสารละลาย
3. ทองแดงในสารละลายจะเกาะคืนที่ผิวของโลหะผสม เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะที่มีสกุลกว่าสังกะสี สังกะสีจะสามารถแทนที่ไอออนของทองแดงในสารละลายได้ ดังแสดงด้วยสมการได้ดังนี้



เมื่อสังกะสีแยกตัวออกจากโลหะผสมทองเหลือง ทั้งทองแดงเหลือไว้ ทองแดงที่เหลือนี้จะอยู่ในลักษณะพรุน ทำให้โลหะเปราะและคุณสมบัติทางกลเลวลง

การเกิด dezincification หรือการแยกตัวของสังกะสีจากทองเหลืองแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การแยกตัวเสมอกันทั้งผิว (uniform parting) และการแยกตัวเฉพาะแห่ง (localized parting) การแยกตัวแบบเสมอกันทั้งผิวส่วนมากเกิดกับโลหะผสมทองเหลืองที่มีปริมาณสังกะสีสูงและในสิ่งแวดล้อมที่เป็นกรด เช่นที่พบในท่อทองเหลือง ส่วนการแยกตัวแบบเฉพาะแห่งจะพบบ่อยในทองเหลืองที่มีสังกะสีน้อยและในสารกัดกร่อนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง เป็นด่างหรือเป็นกรดเพียงเล็กน้อย เช่น ผิวท่อในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง

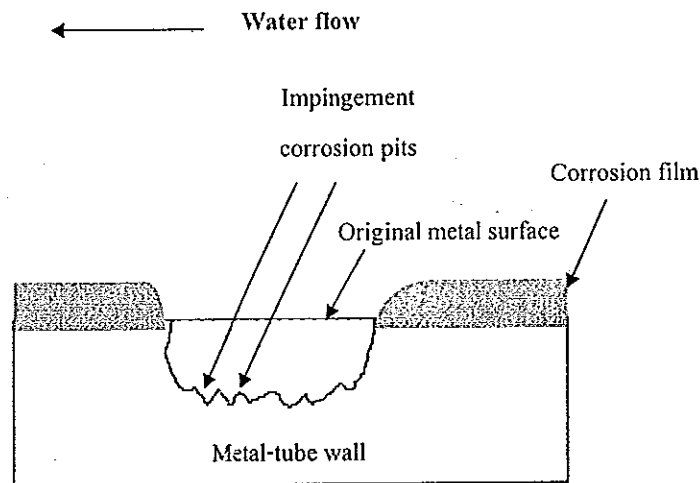
นอกจากนี้แล้ว การชะล้างแบบเลือกละลายยังสามารถเกิดกับโลหะอื่นๆ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมได้เช่นกัน เช่น การแยกตัวของอลูมิเนียมออกจากโลหะผสมของอลูมิเนียมกับทองแดง การแยกตัวของซิลิคอนออกจากโลหะผสมของทองแดงกับซิลิคอนเรียกว่า dealuminification และ desiliconification ตามลำดับ

3.7 การกัดกร่อนแบบขัดสี

การกัดกร่อนแบบนี้จัดเป็นการเร่งอัตราการเสื่อมสภาพ หรือการกัดกร่อนของโลหะอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของสารกัดกร่อนผ่านโลหะ โดยทั่วไปแล้ว

การเคลื่อนที่จะเป็นไปอย่างรวดเร็ว จึงจะมีผลในลักษณะการขัดสีร่วมด้วย ลักษณะของการกัดกร่อนแบบขัดสีจะเห็นเป็นคลื่น เป็นร่อง เป็นหลุมกลม หรือเป็นแอ่ง ตัวอย่างดังแสดงในภาพประกอบ 2.10

โลหะและโลหะผสมส่วนมากสามารถเกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนแบบนี้ได้ ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับเวลาที่โลหะนั้นสามารถเกิดฟิล์มที่ผิวอันคงทนต่อการกัดกร่อนได้หรือไม่ เช่น อลูมิเนียม ตะกั่ว และเหล็กกล้าไร้สนิม โดยผลความเสียหายจากการกัดกร่อนแบบนี้ จะเกิดขึ้นเมื่อผิวฟิล์มป้องกันนี้ถูกทำลายไป ทำให้โลหะหรือโลหะผสมนั้นเกิดการกัดกร่อนได้อย่างรวดเร็ว สำหรับโลหะที่อ่อนและถูกขัดสีด้วยด้วยวิธีทางกล (mechanical) ได้ง่าย เช่น ทองแดง และตะกั่วก็ยังสามารถเกิดความเสียหาย เนื่องจากการกัดกร่อนแบบขัดสีได้ง่ายขึ้น



ภาพประกอบ 2.10 การกัดกร่อนแบบขัดสีของผนังท่อเครื่องควบแน่น (condenser)
ที่มา : Fontana, 1987 : 91

สารกัดกร่อนหลายชนิดสามารถเป็นสาเหตุการกัดกร่อนแบบนี้ได้ ได้แก่ แก๊ส สารละลาย สารอินทรีย์ และโลหะหลอมเหลว ดังนั้นอุปกรณ์ต่างๆ ที่สัมผัสกับของไหลที่เคลื่อนที่จะสามารถเกิดการกัดกร่อนแบบนี้ได้ เช่น ระบบท่อ ท่อโค้ง ช้องอ วาล์ว ปั๊ม ใบพัด ใบกวน ถังกวน และใบกังหัน เป็นต้น

3.8 การกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น

การกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น จะเกี่ยวข้องกับการแตกหัก (cracks) ที่เกิดจากการมีสารกัดกร่อนและแรงเค้น (stress) ในเนื้อโลหะแรงเค้นที่กล่าวถึงแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แรงเค้นภายนอกที่ทำกับโลหะ เนื่องจากการใช้งานหรือลักษณะของงาน (applied stress) และแรงเค้นภายในเนื้อโลหะ เนื่องจากการขึ้นรูปโลหะหรือการเชื่อมโลหะ เป็นต้น

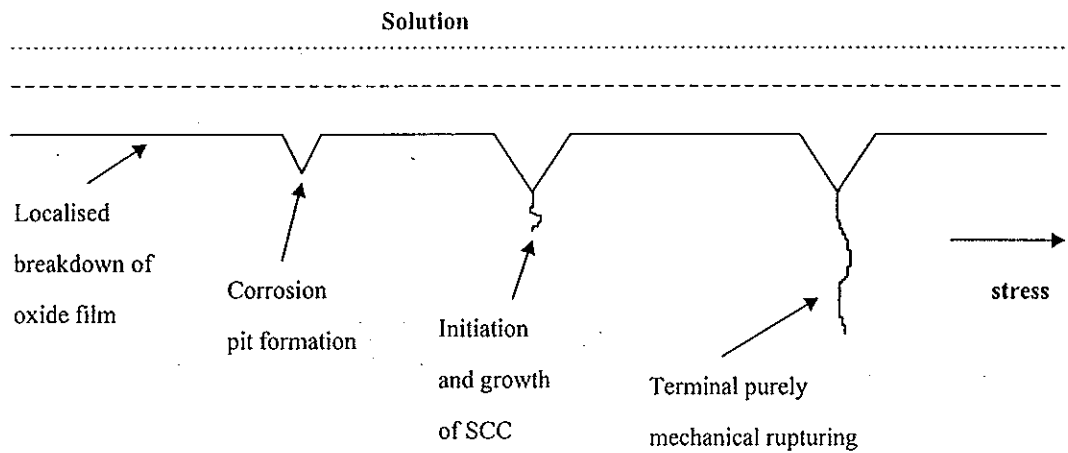
ลักษณะของการแตกหักที่เกิดขึ้น อาจเป็นแบบการแตกหักระหว่างเกรนหรือแบบผ่านเกรน โดยแบบระหว่างเกรนเป็นรอยแตกที่ขยายไปในแนวขอบเขตของเกรน

การเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น จะช้าหรือเร็วขึ้นกับสาเหตุหลายประการ คือ

1. แรงเค้น
2. ลักษณะของสิ่งแวดล้อม
3. อุณหภูมิ
4. ลักษณะและส่วนประกอบของโลหะ

ตาราง 2.3 แสดงถึงสิ่งแวดล้อมที่อาจจะเป็นสาเหตุของการเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากความเค้นของโลหะผสมและโลหะผสม แต่มีใช้ว่าโลหะหรือโลหะผสมเหล่านี้จะไม่สามารถใช้ได้เลยในสารละลายที่กล่าวไว้ เพียงแต่ให้ระวังว่าอาจเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากความเค้นขึ้นได้

การเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น มักเริ่มจากที่ก้นหลุมของโลหะแบบการกัดกร่อนแบบหลุม ดังภาพประกอบ 2.11 ที่ก้นหลุมมีแรงเค้นเพิ่มมากกว่าบริเวณอื่นหลายเท่า ทำให้โลหะสามารถแยกออกจากกันได้ง่ายขึ้น ยิ่งหลุมมีขนาดเล็กแหลมมากแรงเค้นก็จะยิ่งสูงขึ้น นอกเหนือจากผลของแรงเค้นที่หลุมเหล่านี้แล้ว ที่บริเวณหลุมนี้จะทำหน้าที่เป็นแอโนดต่อบริเวณข้างเคียง ยิ่งทำให้การกัดกร่อนเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 2.11 แสดงบริเวณก้นหลุม ซึ่งมีแรงเค้นมากกว่าบริเวณอื่น
ที่มา : กนกพร, 2532 : 26

ตาราง 2.3 สิ่งแวดล้อมที่อาจจะทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น ของโลหะ
และโลหะผสมที่ใช้ในการทดลอง

| วัสดุ | สิ่งแวดล้อม |
|----------------------------|--|
| อลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม | สารละลายของ NaCl-H ₂ O ₂ , สารละลาย NaCl, น้ำทะเล, อากาศ, ไอน้ำ |
| ทองแดงและทองแดงผสม | สารละลายและไอของแอมโมเนีย, เอมีน (amines), น้ำ, ไอน้ำ |
| เหล็กกล้า | สารละลายของ NaOH และ NaOH-Na ₂ SiO ₂ , สารละลายของแคลเซียม (calcium), แอมโมเนีย และโซเดียมไนเตรด , กรดผสมของ H ₂ SO ₄ -HNO ₃ , สารละลายของ HCN และ H ₂ S, น้ำทะเล, โลหะหลอมเหลว Na-Pb |
| แมกนีเซียมผสม | สารละลายของ NaCl-K ₂ CrO ₃ , บรรยากาศชนบทและชายฝั่ง, น้ำกลั่น |

ที่มา : Fontana, 1987 : 119

4. การป้องกันการกัดกร่อน

การป้องกันการกัดกร่อน อาจทำได้โดยวิธีต่างๆ ดังนี้

1. เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนให้กับวัสดุ เช่น การเคลือบผิวในของภาชนะบรรจุ
2. การขจัดส่วนประกอบในการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมให้หมดไปหรือลดลง
3. การออกแบบป้องกันและการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสม

4.1 การป้องกันการกัดกร่อนโดยการปรับสภาวะแวดล้อม

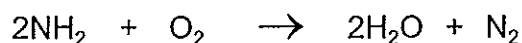
การป้องกันการกัดกร่อนโดยการปรับสภาวะแวดล้อมอาจแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

1. วิธีขจัดตัวประกอบที่เร่งการกัดกร่อน แบ่งออกเป็น

ก. การขจัดความชื้น ในอากาศจะมีความชื้นจากไอน้ำ ความชื้นอ้อมตัวและความชื้นในอากาศ ดังนั้นในโรงงานหรือโกดัง ถ้าต้องการป้องกันสนิมจำเป็นต้องขจัดความชื้นทำได้โดยการ

- เพิ่มความร้อน โดยใช้ขดลวดไอน้ำหรือขดลวดไฟฟ้า
- ใช้สารเคมีดูดความชื้น
- ใช้เครื่องปรับอากาศและความชื้น

ข. การขจัดส่วนประกอบที่เป็นอันตรายในอากาศและในน้ำ ส่วนประกอบที่จะเป็นอันตรายต่อการกัดกร่อนของโลหะ โดยทั่วไปแล้วจะเป็นออกซิเจน สารประกอบที่ใช้ในการขจัดออกซิเจน เช่น hydro sulphite paracium alkali, สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ส่วนเหล็กคลอไรด์มีใช้กันมากในการบรรจุหีบห่ออาหารและสามารถนำมาใช้ป้องกันสนิม ในกรณีน้ำจืดที่มีออกซิเจนปนอยู่ การเพิ่มอุณหภูมิหรือการลดความดัน จะมีผลในการลดปริมาณของออกซิเจนที่ละลายอยู่น้ำลงได้ การเผาให้ร้อนและลดความดัน โดยการพ่นฝอยออกมา เป็นการลดออกซิเจนมักใช้กับน้ำในหม้อน้ำ และมีการเติมสารเคมีที่ใช้กำจัดออกซิเจน โดยส่วนมากนิยมใช้ sodium sulphite และ hydrazine โดยทำปฏิกิริยาดังสมการต่อไปนี้



ค. การปรับ pH ในน้ำโดยการเลือกใช้กรดหรือด่างที่เหมาะสม

2. การป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน (inhibitor)

สารยับยั้งการกัดกร่อน คือ สารที่ใช้เติมลงไปในการละลายเพื่อควบคุมการกัดกร่อน มีทั้งชนิดอินทรีย์และอนินทรีย์ มีคุณสมบัติรวมๆ ดังนี้

1. ใช้ได้กับโลหะชนิดต่างๆ ไม่เฉพาะแต่เหล็กเพียงอย่างเดียว

2. การป้องกันการกัดกร่อนจะมีมากขึ้น ตามความเข้มข้นของสารยับยั้งที่ใช้ ถ้าใช้ปริมาณของสารยับยั้งไม่เพียงพอก็จะป้องกันการกัดกร่อนได้ไม่ดีเท่าที่ควร

3. ความเข้มข้นที่จำเป็นขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลาย เงื่อนไขของโลหะและสภาพผิวของโลหะ ตลอดจนอุณหภูมิของของเหลว และความเข้มข้นของเกลือ

4. การใช้ผสมผสานกันมักมีประโยชน์มากกว่า ในห้องตลาดจะมีการผสมผสานกันมากกว่า 2 ชนิด

4.2 การป้องกันการกัดกร่อนโดยแยกตัวจากสภาวะแวดล้อม (coating)

การป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีนี้ กระทำโดยการเคลือบด้วยโลหะหรือโลหะซึ่งรวมทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ การเคลือบอาจแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. การเคลือบผิวด้วยโลหะ แบ่งออกตามลักษณะการเคลือบ คือ

- การเคลือบทางเคมี ได้แก่ พวาทองแดง นิเกิล โครเมียมที่อยู่ในเกลือคลอไรด์ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันแลกเปลี่ยนกับโลหะ ทำให้เกิดการเคลือบที่ผิวของชิ้นงาน

- การเคลือบทางไฟฟ้า (electrolysis หรือ electroplating)

- การเคลือบด้วยการหลอมละลาย (hot dipping) โดยการหลอมโลหะที่อุณหภูมิสูงใส่ลงในภาชนะ แล้วจุ่มชิ้นงานที่ต้องการเคลือบลงไปให้เกาะติดผิวขึ้นมา

- การเคลือบผิวด้วยการพ่น โดยใช้โลหะที่หลอมละลายด้วยความร้อนจากไฟฟ้าหรือแก๊ส แล้วพ่นด้วยอากาศที่มีกำลังดันสูงเพื่อเคลือบติดผิวจะได้ชั้นฟิล์มที่มีรูพรุนมาก

2. การเคลือบด้วยสารอนินทรีย์ ได้แก่ การเคลือบด้วยฟอสเฟต เช่น นำแผ่นเหล็กจุ่มลงในสารละลาย zinc phosphate หรือกรดฟอสเฟตทำให้เกิดชั้น

ฟิล์มทำหน้าที่เป็นชั้นรองพื้น เพื่อให้มีการป้องกันการกัดกร่อน และความหนาแน่นในการติด หรือการเคลือบด้วย mortar cement ซึ่งผสมด้วยเรซินชนิดต่างๆ เพื่อป้องกันการกัดกร่อน

3. การเคลือบด้วยสารอินทรีย์ ได้แก่การทาสี (painting) โดยทั่วไปจะมีผงสี (pigment) ในน้ำมันหรือพวกเรซิน เมื่อทาแล้วตัวทำละลายระเหยไปเหลือชั้นฟิล์มที่เป็นสีอยู่ อาจมีการใช้สีแบบผงเป็นแบบที่ไม่มีสารละลายปนอยู่โดยเอาสีที่จะพ่นทำการหลอมละลายด้วยความร้อน ทำให้เคลือบเป็นชั้นต่อเนื่อง หรือการทำ lining ด้วยพลาสติกและยาง

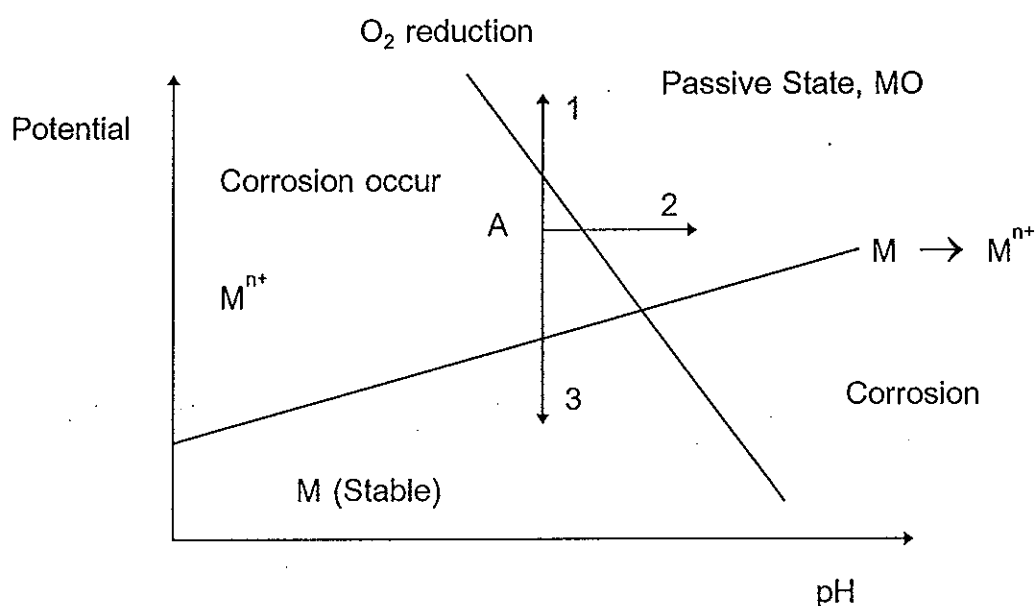
4.3 การป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้ไฟฟ้า

พิจารณาจาก Pourbaix diagram ซึ่งเป็นแผนภูมิที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH และความต่างศักย์สำหรับโลหะต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.12 จากเส้น $M \rightarrow M^{n+}$ เป็น anodic polarization (anodic reaction) และเส้น O_2 reduction เป็น cathodic polarization (cathodic reaction) ที่ช่วงใต้เส้น $M \rightarrow M^{n+}$ และอยู่ทางซ้ายของเส้น O_2 reduction เป็นช่วงที่โลหะ M จะคงตัว (stable) ฉะนั้นในช่วงนี้โลหะจะไม่เกิดการกัดกร่อน อีกช่วงคือเหนือเส้น $M \rightarrow M^{n+}$ และทางด้านขวาของเส้น O_2 reduction เป็นช่วงที่โลหะเกิดฟิล์มของออกไซด์คลุมผิว ทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลงหรือเกือบหยุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของฟิล์มที่ปกคลุมผิวโลหะ สำหรับช่วงบนของเส้น $M \rightarrow M^{n+}$ และทางซ้ายของเส้น O_2 reduction เป็นช่วงที่โลหะเกิดการกัดกร่อนเป็น M^{n+} ส่วนช่วงที่อยู่ด้านขวาของ O_2 reduction และด้านล่างของเส้น $M \rightarrow M^{n+}$ จะเกิดการกัดกร่อนในต่าง

ดังนั้นจาก Pourbaix diagram ทำให้ทราบถึงช่วงของสภาวะที่จะทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนหรือไม่ เช่น ตัวอย่างในภาพประกอบ 2.12 ถ้าสภาวะการใช้งานของโลหะอยู่ที่จุด A ซึ่งโลหะจะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากอยู่ในบริเวณโลหะไอออน M^{n+} คงตัว การป้องกันอาจจะกระทำได้โดย

1. เพิ่มความต่างศักย์ให้เข้าไปอยู่ใน passivity คือ โลหะออกไซด์คงตัว

2. เพิ่ม pH ให้เข้าไปอยู่ในช่วง passivity
3. ทำให้เข้าไปอยู่ในช่วงโลหะคงตัว คือทำให้โลหะทำตัวเป็นแคโทด หรือเรียกว่าการป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิก
4. อาจจะใช้โลหะผสม ซึ่งจะทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ปกคลุมผิวโลหะได้ง่ายขึ้น



ภาพประกอบ 2.12 แผนภูมิของ Pourbaix diagram

ที่มา : ทัศนจินดา, 2530 : 81

การป้องกันการกัดกร่อนโดยไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ

1. การป้องกันการกัดกร่อนโดยไฟฟ้าแบบแอโนดิก

เป็นการป้องกันการกัดกร่อน โดยอาศัยหลักการใช้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกทำให้โลหะที่ต้องการป้องกันเป็นแอโนด และเกิดฟิล์มป้องกันบนผิวของแอโนดเพื่อลดอัตราการกัดกร่อนให้น้อยลง กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทำให้เกิดฟิล์มบนผิวโลหะจะสูง แต่เมื่อเกิดฟิล์มแล้วกระแสไฟฟ้าที่ใช้รักษาฟิล์มจะลดลงมีค่า

ต่ำมากตัวอย่างเช่น การทำให้เกิดฟิล์มบนผิวของเหล็กในกรดซัลฟิวริก ต้องใช้กระแส 0.2 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร แต่ค่ากระแสที่ใช้ในการรักษาสภาพฟิล์มนั้นเท่ากับ 10^{-5} แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้นการป้องกันการกัดกร่อนโดยไฟฟ้าแบบแอโนดิกสามารถทำได้กับโลหะที่มีคุณสมบัติที่จะเกิดฟิล์มบนผิวเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นเท่านั้น เพราะโลหะบางชนิดเกิดฟิล์มบนผิวได้แต่โลหะบางชนิดไม่เกิด งานส่วนใหญ่ใช้กับภาชนะที่บรรจุสารละลายหรือท่อโลหะที่ส่งสารละลาย โลหะที่ให้ anode polarization ได้แก่ เหล็ก นิกเกิล อลูมิเนียม โครเมียม ไทเทเนียม โมลิบดีนัม สังกะสี ฮาฟเนียม และโลหะผสมของโลหะเหล่านี้

2. การป้องกันการกัดกร่อนโดยไฟฟ้าแบบแคโทดิก

การป้องกันการกัดกร่อนโดยไฟฟ้าแบบแคโทดิก คือ ทำให้โลหะหรือโครงสร้างที่ต้องการป้องกันการกัดกร่อน เป็นแคโทด แทนที่จะเป็นแอโนด ซึ่งเกิดการกัดกร่อนได้ วิธีการทำได้ 2 วิธี คือ

1. Sacrificial anode

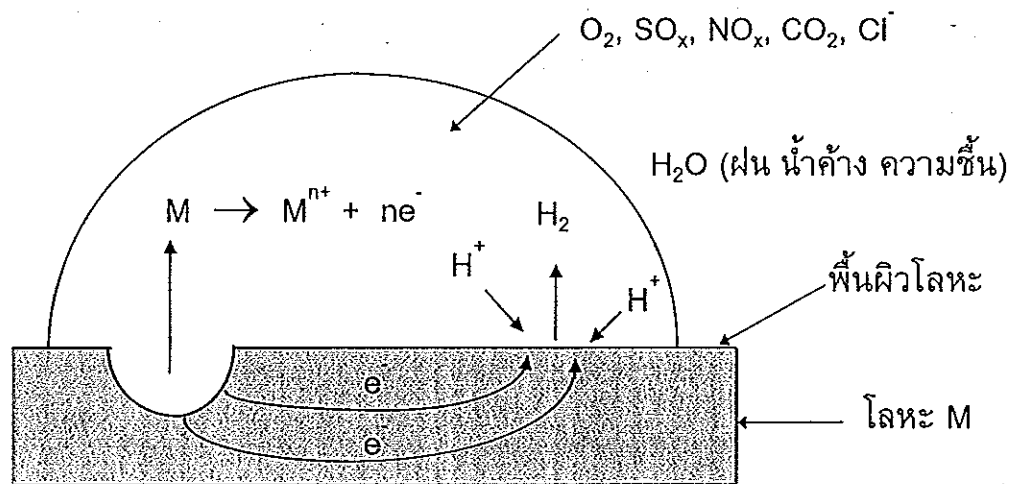
หาโลหะที่ว่องไวมากกว่าหรืออยู่ต่ำกว่าในตาราง EMF มาสัมผัสไว้กับโลหะที่ต้องการป้องกัน เมื่อทำครบวงจรแล้ว โลหะที่ต้องการป้องกันก็จะทำหน้าที่เป็นแคโทดแทน ส่วนโลหะที่นำมาเกาะไว้ก็จะเปลี่ยนเป็นแอโนด และเกิดการกัดกร่อนแทน

2. Impressed current

ให้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกบังคับให้โลหะที่ต้องการป้องกันเป็นแคโทด โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าจะต้องสูงมากพอที่ชนะความต่างศักย์ของโลหะนั้นๆ

5. การกัดกร่อนในบรรยากาศ (สรุทธิ จุฑะพงศ์ และเกรียงไกร อิ่มสมโภช, 2535)

สำหรับการกัดกร่อนของโลหะในบรรยากาศเป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และมีหลักการดังแสดงในภาพประกอบ 2.13



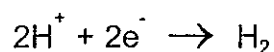
ภาพประกอบ 2.13 แสดงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนของโลหะในบรรยากาศ

โลหะ (M) มีน้ำหรือความชื้นเกิดบนผิว น้ำหรือความชื้นนี้เป็นของเหลวที่นำไฟฟ้าได้ดี เรียกว่า อิเล็กโทรไลต์ โลหะจะเกิดการสูญเสียแรงยึดระหว่างอะตอมของโลหะ เปลี่ยนเป็นไอออนหลุดออกไปในอิเล็กโทรไลต์ ทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการ

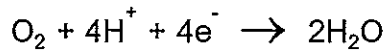


ซึ่งเป็นการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกไป เพื่อให้ดูกับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นภายในระบบนี้ต้องมีปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้น และสามารถแบ่งได้ดังนี้

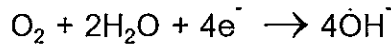
ก. มีไฮโดรเจนเกิดขึ้น



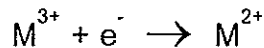
ข. เกิดรีดักชันของออกซิเจน (เกิดในสภาพเป็นกรด)



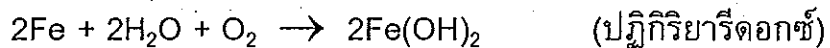
ค. เกิดรีดักชันของออกซิเจน (เกิดในสภาพเป็นกลางหรือเป็นด่าง)



ง. เกิดรีดักชันของไอออนของโลหะ



ลักษณะที่โลหะเกิดการกัดกร่อน เนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีดังกล่าว สามารถพิจารณาเปรียบเทียบเสมือนกับเซลล์ไฟฟ้าหรือ corrosion cell โดยตำแหน่งโลหะที่สูญเสียอะตอมไป (ส่วนที่กัดกร่อน) หรือตรงที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นแอโนด พื้นที่ส่วนที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็นแคโทด และน้ำหรือไอน้ำที่เกาะบนผิวโลหะจะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ จากปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันดังกล่าว สามารถนำมาอธิบายการเกิดการกัดกร่อนของโลหะเหล็ก ได้ดังสมการ



ปรากฏว่าจะมีสารประกอบของไฮดรอกไซด์ (FeO.nH₂O) หรือเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)₂) ขึ้นที่ผิวของเหล็ก และ pH ของสารประกอบเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์อิ่มตัวประมาณ 9.5 ดังนั้นผิวของเหล็กที่ถูกกัดกร่อนด้วยน้ำบริสุทธิ์ที่มีออกซิเจนผสมอยู่มักจะเป็นด่าง สีของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)₂) จะเป็นสีขาวเมื่อโลหะมีความบริสุทธิ์ แต่ส่วนใหญ่จะมีสีเขียวหรือสีเขียวคล้ำ (greenish black) เนื่องจากถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจน และที่ชั้นนอกของฟิล์มออกไซด์ยังเกิดการออกซิไดซ์ได้อย่างรวดเร็วด้วยออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศ ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกไซด์เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃.nH₂O) หรือเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)₃)

ไฮดรอกไซด์เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃.nH₂O) จะมีสีส้มหรือสีน้ำตาลแดง ได้แก่ฮีมาไทต์ (hematite : α-Fe₂O₃) และ แมกฮีไมต์ (maghemite : γ-Fe₂O₃) เป็นต้น

6. ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการกัดกร่อนของโลหะในบรรยากาศ (Barton, 1976)

เนื่องจากในบรรยากาศประกอบด้วย ส่วนประกอบทางเคมีที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีหลายชนิด (chemically active components) ที่เป็นสาเหตุของการเกิดการกัดกร่อนในบรรยากาศ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของบรรยากาศ

6.1 ส่วนประกอบทางเคมีของบรรยากาศ

- ไนโตรเจนและแก๊สเฉื่อย

ไนโตรเจนและแก๊สเฉื่อยเป็นส่วนประกอบทางเคมีที่มีมากที่สุด ในบรรยากาศ แต่ในสภาวะทั่วๆ ไปไม่มีผลต่อการกัดกร่อน

- ออกซิเจนและโอโซน

ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ ของการเกิดการกัดกร่อนในบรรยากาศ เนื่องจากมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมี ประกอบกับการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ที่โลหะเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และออกซิเจนหรือส่วนประกอบอื่นๆ เป็นตัวรับอิเล็กตรอน

โอโซนจะมีผลต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศ ก็ต่อเมื่อมีความเข้มข้นประมาณ $10-50 \mu\text{gm}^{-3}$ โดยกระตุ้นให้เกิดการเสื่อมสภาพของโพลีเมอร์ และสารเคลือบผิวประเภทสารอินทรีย์

- น้ำ

น้ำในบรรยากาศมีอยู่ทั้ง 3 สถานะ คือ

สถานะของแข็ง อยู่ในรูป หิมะ น้ำแข็ง หรือลูกเห็บ

สถานะของเหลว อยู่ในรูป ฝน หมอก หรือน้ำค้าง

สถานะแก๊ส อยู่ในรูป ไอน้ำ

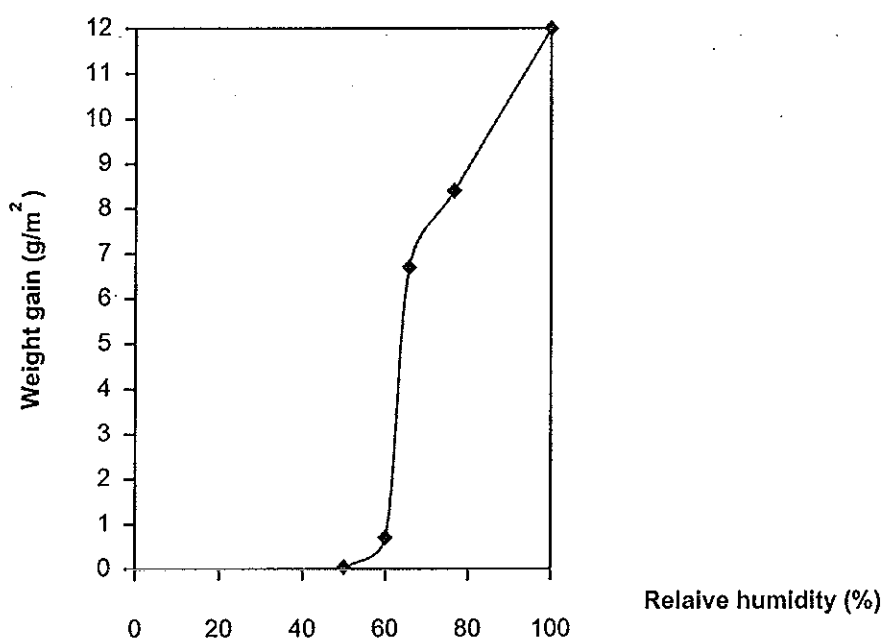
โดยที่ปริมาณของน้ำในบรรยากาศ จะวัดอยู่ในรูปของปริมาณฝน และความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพทางภูมิศาสตร์

นอกจากนี้ น้ำในสถานะของเหลวในบรรยากาศยังได้ละลายมลสารต่างๆ ในบรรยากาศ เช่น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังนั้นเมื่อน้ำไปปกคลุมพื้นผิวของโลหะ จึงก่อให้เกิดการกัดกร่อน ในกรณีที่ฝนตกเป็นเวลานาน จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ดี

เนื่องจากน้ำเป็นอิเล็กโทรไลต์ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี แต่ในทางกลับกันก็อาจยับยั้งการกัดกร่อนได้ เนื่องจากน้ำได้ชะล้างมลสารที่อยู่บนพื้นผิวของโลหะออกไป

- ความชื้น

อัตราการกัดกร่อนของเหล็กจะสูงในที่มีความชื้นสูง และต่ำในที่มีความชื้นต่ำ แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ถ้าความชื้นในอากาศต่ำกว่าค่าๆ หนึ่งแล้ว ความชื้นจะไม่มีผลกระทบต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็ก ความชื้นที่ค่านี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical humidity) และอัตราการกัดกร่อนของเหล็กจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อความชื้นในอากาศสูงกว่าความชื้นวิกฤต นอกจากนี้ความชื้นวิกฤตของเหล็ก จะมีค่าอยู่ระหว่าง 50-80 % ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของอากาศ และถ้าทำให้อากาศปราศจากสิ่งเจือปนต่างๆ เช่น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เกลือโซเดียมคลอไรด์ และฝุ่นแล้ว ความชื้นวิกฤตอาจมีค่าสูงถึง 99 % ภาพประกอบ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและการกัดกร่อนของเหล็ก แสดงให้เห็นความชื้นวิกฤต



ภาพประกอบ 2.14 แสดงการกัดกร่อนของเหล็กในอากาศที่มีแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ผสม 0.01% ระยะเวลาทดสอบ 55 วัน

ที่มา : Uhlig and Revie, 1985 : 174

- ปริมาณฝน

อิทธิพลของฝน คือ ทำให้ผิวของเหล็กเป็ยก ถ้าฝนตกมาก เวลาที่ผิวเหล็กเป็ยกฝนก็จะมาก ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการกร่อนของเหล็กสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ผลกระทบทางอ้อมของปริมาณฝน ก็คือ ทำให้ปริมาณความชื้นในอากาศมีค่าสูงขึ้นและความชื้นมีผลกระทบอย่างมากต่ออัตราการกร่อนของเหล็กในอากาศ

- คาร์บอนไดออกไซด์

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ โดยทั่วไปมีประมาณ 10^{-2} % และความสามารถในการละลายในน้ำมีค่าน้อยคือ 0.232 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม ที่ 10°C . ดังนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จึงไม่ค่อยมีผลต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศ

- แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

เป็นแก๊สที่พบได้ในบรรยากาศเมืองและอุตสาหกรรม เนื่องจากถูกปล่อยมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะแตกต่างกันตามระยะห่างจากศูนย์กลางเมือง ดังแสดงในตาราง 2.4 และความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะ คือ 0.01-5 ppm นอกจากนี้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ยังว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมี ประกอบกับความสามารถในการละลายในน้ำมีค่าสูง คือ 16.2 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม ดังนั้นจึงก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนในบรรยากาศเป็นอย่างมาก

ตาราง 2.4 แสดงความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับระยะห่างจากศูนย์กลางเมือง

| City | Distance | | Part per Million (ppm) | | | | | |
|-----------------------|----------|------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Miles | Kilometers | 0-5 | 5-10 | 10-15 | 15-20 | 20-25 | 25-30 |
| | | | 0-8 | 8-16 | 16-24 | 24-32 | 32-40 | 40-48 |
| Detroit | | | 0.023 | 0.012 | 0.006 | 0.004 | 0.004 | 0.005 |
| Philadelphia - Camden | | | 0.030 | 0.018 | 0.016 | 0.021 | 0.012 | 0.012 |
| Pittsburgh | | | 0.060 | 0.030 | 0.015 | 0.018 | 0.009 | 0.010 |
| St. Louis | | | 0.111 | 0.048 | 0.029 | 0.020 | 0.018 | 0.014 |
| Washington, D.C. | | | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.002 |

ที่มา : Uhlig and Revie, 1985 : 173

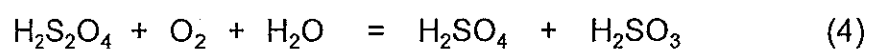
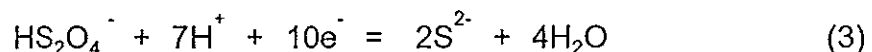
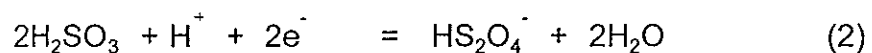
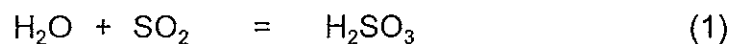
อัตราการกัดกร่อนของเหล็ก จะสูงในพื้นที่ที่มีปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูง โดยที่กลไกการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศกับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้น แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน (Graedel and Frankenthal, 1990) คือ

1. เกิดการดูดซับของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนสนิมที่เปียก
2. เกิดเหล็กซัลเฟต (FeSO_4) จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กกับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และออกซิเจน
3. เกิดการออกซิเดชันของ FeSO_4 กลายเป็นสนิมและปล่อยซัลเฟต (SO_4^{2-}) ออกมา ซึ่งจะไปรวมตัวกับเหล็กกลายเป็น FeSO_4 อีก เท่ากับไปเร่งการกัดกร่อน และจะเกิดเป็นวัฏจักรจนกว่าจะกลายเป็นสนิมที่ไม่ละลาย

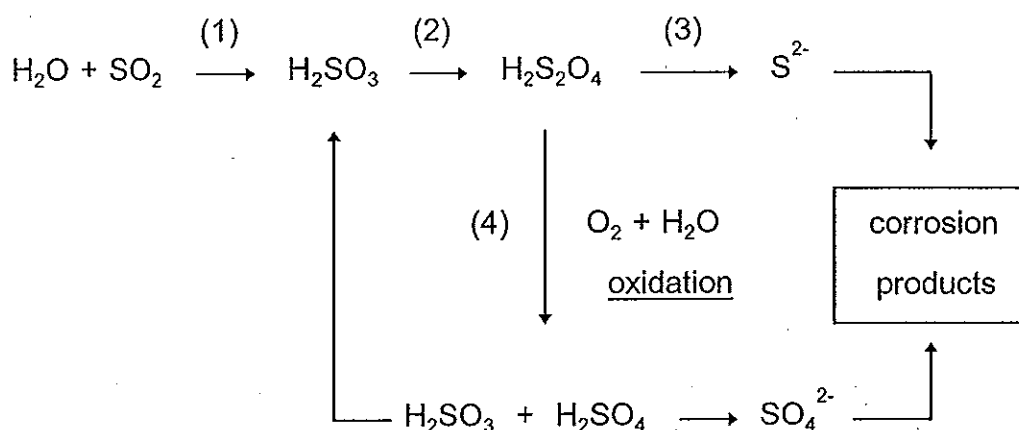
มีทฤษฎี 2 ทฤษฎี คือ กระบวนการแคโทดิก (cathodic process) (Chawla and Payer, 1990) และกระบวนการแอโนดิก (anodic process) (Barton, 1976 : Graedel and Frankenthal, 1990) ที่สามารถอธิบายการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศกับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ ดังนี้

กระบวนการแคโทดิก

อธิบายได้ว่าแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่แคโทด ดังสมการ



หลังจากนั้นซัลไฟด์และซัลเฟตทำปฏิกิริยากับเหล็กได้ผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน สรุปลงเป็นแผนผังดังภาพประกอบ 2.15



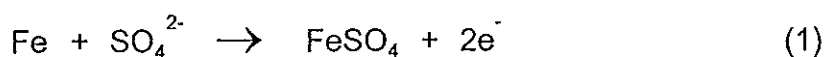
ภาพประกอบ 2.15 แสดงการเกิดขึ้นของซัลไฟต์และซัลเฟต จากแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ที่มา : Chawla and Payer, 1990 : 63

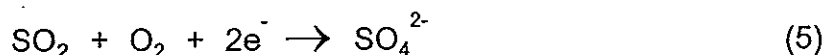
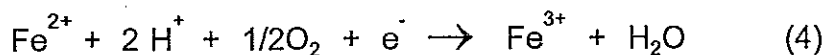
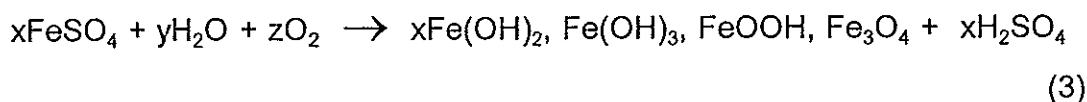
กระบวนการแอโนดิก

การทำปฏิกิริยาของเหล็กกับซัลเฟต แบ่งออกเป็นบริเวณต่างๆ ดังภาพประกอบ 2.16 โดยที่

- บริเวณ A มีการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและซัลเฟต ดังสมการ

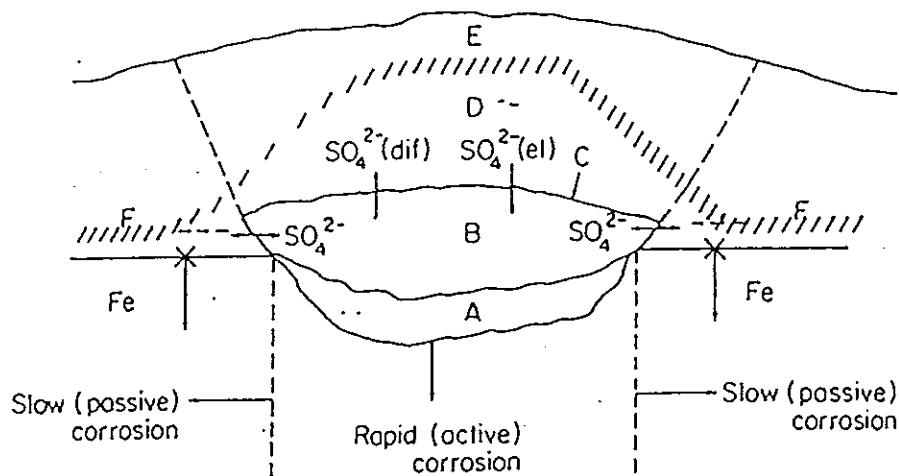
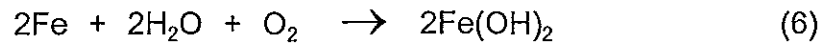


- บริเวณ B เกิดการละลายของ FeSO_4 ดังสมการ



- บริเวณ C ที่ชั้นของ $\text{Fe}(\text{OH})_3/\text{FeOOH}$ มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น ดังสมการ (4) และ (5) นอกจากนี้ยังมีการเคลื่อนที่เข้าของอิเล็กโทรไลต์ซัลเฟต (electrolytic transport) และการแพร่ออกของซัลเฟต (diffusion transport)

- บริเวณ D และ E มีการเกิดขึ้นของ FeSO_4 , FeOOH และ Fe_3O_4 เนื่องจากปฏิกิริยาในสมการ (4) และ (5) สำหรับซัลเฟตที่เกิดขึ้นนั้นสามารถถูกฝนชะล้างออกไปได้
- บริเวณ F เป็นบริเวณที่เกิดสนิม โดยไม่มีซัลเฟตมาเกี่ยวข้อง
 ดังสมการ (6)



ภาพประกอบ 2.16 แสดงการทำปฏิกิริยาของเหล็กกับซัลเฟตที่แอโนด
 ที่มา : Barton, 1976 : 38

- ไฮโดรเจนซัลไฟด์

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้นเพียง $100 \mu\text{g m}^{-3}$ หรือ 0.06 ppm ก็
 สามารถก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ โดยเฉพาะการกัดกร่อนต่อทองแดง นิกเกิล และเงิน

- แก๊สที่เป็นกรดอื่นๆ (acidic gases)

มลสารที่มีผลต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศ ได้แก่ ไนตริกออกไซด์ พบมากในบรรยากาศอุตสาหกรรม และความเข้มข้นเฉลี่ยประมาณ $1 \mu\text{gm}^{-3}$ นอกจากนี้ไนตริกออกไซด์ยังเกิดขึ้นเวลาฝนฟ้าคะนองอีกด้วย คลอรีนและไฮโดรคลอไรด์ พบมากในบริเวณที่ปฏิบัติงานเกี่ยวกับสารเคมี ส่วนฟอร์มาลดีไฮด์ กรดฟอร์มิก และ กรดแอซิดิก ต่างก็เป็นมลสารที่มีผลต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศเช่นกัน

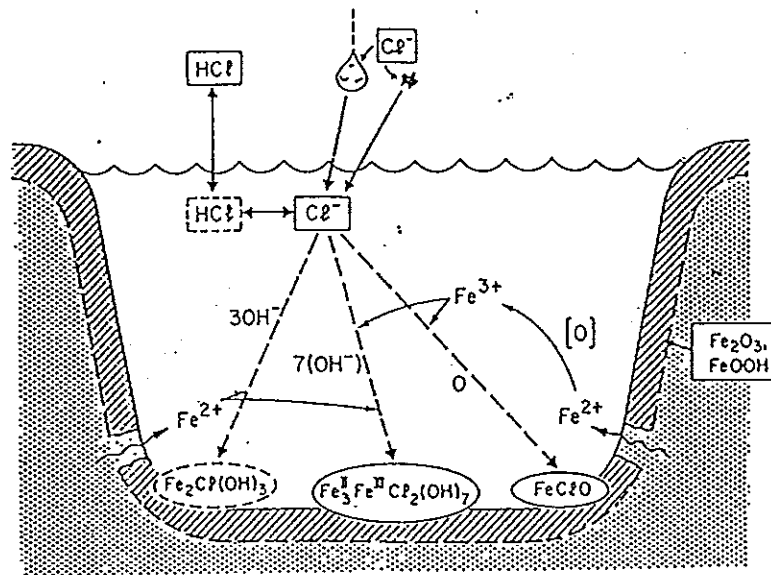
- เกลือ

เกลือที่สำคัญ คือ เกลือโซเดียมคลอไรด์ซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากทะเล เนื่องจากลมที่พัดมาจากทะเล จะนำละอองของคลอไรด์ไอออนในรูปอนุภาคและ หยดน้ำเล็กๆ เข้ามาและความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนจะลดลงเมื่อระยะห่างจาก ทะเลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนสูงสุดเฉลี่ยในบรรยากาศ ชายทะเล คือ $100 \mu\text{gm}^{-3}$ ส่วนในบรรยากาศอุตสาหกรรมและเมือง มีค่าประมาณ $10-30 \mu\text{gm}^{-3}$

นอกจากนี้เกลือชนิดอื่นๆ เช่น แอมโมเนียมซัลเฟต ก็ส่งผลต่อการกัดกร่อนเช่นเดียว เพียงแต่สภาวะการเกิดของเกลือแตกต่างกันออกไป

สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศกับ คลอไรด์ไอออนยังไม่ทราบแน่ชัด แต่คลอไรด์ไอออนจะเข้ามาช่วยทำให้เกิดอิเล็กโทรไลต์ได้เร็วขึ้น แม้จะมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งภาพประกอบ 2.17 เป็นการคาดหมาย กลไกปฏิกิริยาตามผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น โดยที่ส่วนเป็นเส้นประเป็นส่วนที่คาดหมาย (Graedel and Frankenthal, 1990)

นอกจากนี้คลอไรด์ไอออนยังมีผลทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบหลุมและการกัดกร่อนเนื่องจากความเค็ม สำหรับตาราง 2.5 แสดงให้เห็นอัตราการกัดกร่อนของโลหะในสภาพแวดล้อมต่างๆ



ภาพประกอบ 2.17 แสดงกลไกปฏิกิริยาของคลอไรด์ไอออนกับเหล็กตามผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน

ที่มา : Graedel and Frankenthal, 1990 : 2390

ตาราง 2.5 การเปรียบเทียบของอัตราการกัดกร่อนของโลหะในสภาพแวดล้อมต่างๆ

| Environment | Corrosion rate (gmd) | | |
|------------------------|----------------------|-------|--------|
| | Steel | Zinc | Copper |
| Rural atmospheric | - | 0.017 | 0.014 |
| Marine atmospheric | 0.29 | 0.031 | 0.032 |
| Industrial atmospheric | 0.15 | 0.10 | 0.029 |
| Sea water | 2.5 | 1.0 | 0.8 |
| Soil | 0.5 | 0.3 | 0.07 |

ที่มา : Uhlig and Revie, 1985 : 170

- แอมโมเนีย

แม้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศไม่เคยสูงเกิน $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ แต่ก็มีผลต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศ เนื่องจากมีการพบผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนของเกลือแอมโมเนียมในเหล็ก

- ฝุ่น

ปริมาณฝุ่นเฉลี่ยในบรรยากาศมีค่าอยู่ระหว่าง $10^3 - 2 \times 10^5$ อนุภาคต่อ cm^3 มีขนาดประมาณ $0.1 \mu\text{m} - 0.3 \text{mm}$ โดยที่ฝุ่นจะมาจาก 2 แหล่งด้วยกัน คือ พื้นดิน และมลสารในอากาศ

สำหรับความเข้มข้นของส่วนประกอบทางเคมีต่างๆ ที่มีผลต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศดูได้จากตาราง 2.6

ตาราง 2.6 ส่วนประกอบทางเคมีที่มีผลต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศ

| Species | Normal values for urban atmospheres | Limiting values |
|---------------------|-------------------------------------|---|
| CO ₂ | 0.03 % | 0.306 % (caves) 0.275 % (cow shed) |
| CO | 12.5 mg/m ³ | 29 mg/m ³ |
| pH of precipitation | 5.5 | 2.9 - 7.2 |
| Dust | 2.3 mg/m ³ | 224 mg/m ³ (cement factory) |
| SO ₂ | 0.11- 2.3 mg/m ³ | 10 - 50 mg/m ³ (industrial area) |
| Cl ₂ | 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 3 mg/m ³ (breaking surf) |
| O ₃ | 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| NH ₃ | 30 - 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 675 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| NO ₂ | 0.2 - 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| H ₂ S | 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 0.1 - 10 mg/m ³ |
| Formaldehyde | 5 - 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | |

ที่มา : Barton, 1976 : 10

6.2 สมบัติทางกายภาพของบรรยากาศ

- อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะแตกต่างกันไปตามลักษณะภูมิศาสตร์ ในเขตหนาวอุณหภูมิมิมีผลต่อการกักต้อนน้อยมาก เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำๆ ($-5 - 0^{\circ}\text{C}$.) น้ำกลายเป็นน้ำแข็ง จึงไม่สามารถเป็นอิเล็กโทรไลต์ได้ ส่วนในเขตร้อนเช่น ทะเลทราย ก็มีความชื้นสัมพัทธ์น้อยเกินไปสำหรับการเกิดอิเล็กโทรไลต์ แต่โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิมิมีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากการกักต้อนของเหล็กนั้นเป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการกักต้อนของเหล็กกล่าวคือ เหล็กจะมีอัตราการกักต้อนสูงที่อุณหภูมิสูงและมีอัตราการกักต้อนต่ำที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งอุณหภูมิจึงเกิดการกักต้อนของเหล็กได้ดี คือ อุณหภูมิที่สูงกว่า 25°C .

- ความดันบรรยากาศ

ความดันบรรยากาศไม่มีผลต่อการกักต้อนในบรรยากาศ

- การเคลื่อนไหวของอากาศ

การเคลื่อนไหวของอากาศมีผลต่อการกักต้อนในบางสภาวะเท่านั้น เช่น บริเวณชายฝั่งทิศทางของลมมีผลต่อการพัดพาอนุภาคของเกลือ และบริเวณอุตสาหกรรมที่ลมพัดพามลสารในอากาศสู่พื้นผิวของโลหะ นอกจากนี้อนุภาคของแข็งในกระแสมก็ยังสามารถทำลายสารเคลือบผิวที่ใช้ป้องกันการกักต้อน

- ฝนฟ้าคะนอง (thunderstorms)

ช่วงเวลาฝนฟ้าคะนอง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นซึ่งไม่มีผลต่อการกักต้อน เพียงแต่ช่วงเวลาฝนฟ้าคะนองทำให้เกิดไนตริกออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นต้น

- การแผ่รังสี

พบว่าแสงอัลตราไวโอเล็ต สามารถกระตุ้นการเกิดของผลิตภัณฑ์จากการกักต้อนของโลหะได้ เช่น ในทองแดงหรือสังกะสี เป็นต้น นอกจากนี้แสงอัลตราไวโอเล็ตยังมีผลต่อการเสื่อมสภาพของการเคลือบผิวด้วยสารอินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีความชื้นสูง สำหรับแสงอินฟราเรดจะส่งผลกระทบต่อการเคลือบผิวด้วยสารอินทรีย์ ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิจึงพื้นผิวสูงถึง 100°C . หรือมากกว่า

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อบรรยากาศเป็นสภาวะที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน ทำให้ต้องพิจารณาถึงสภาพภูมิอากาศและปริมาณมลสารในบรรยากาศ ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมากต่อการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศ คือ อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณฝน ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และปริมาณเกลือในอากาศ (สมเกียรติ รุ่งทองใบสุรีย์, 2537)

7. การป้องกันการกัดกร่อนด้วยสารเคลือบผิว

สารเคลือบผิว (surface coatings) เช่น สี มีอิทธิพลต่อสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อมนุษย์มากมายพอสมควร ในอุตสาหกรรมใช้สารเคลือบผิวป้องกันพื้นผิววัสดุโครงสร้างให้มีความคงทนถาวรขึ้น เป็นต้น

วัตถุประสงค์ของการเคลือบผิว มีอยู่ด้วยกัน 2 ประการคือ

1. เพื่อป้องกันพื้นผิววัสดุจากมลภาวะต่างๆ สารเคลือบผิวจะช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุที่ถูกเคลือบมีความทนทานต่ออากาศ น้ำและสารเคมีต่างๆ นอกจากนี้ยังช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุมีความแข็งแรงขึ้น ทนทานต่อการขีดสีได้มากขึ้นและมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

2. เพื่อตกแต่งให้สวยงาม ความสวยงามของวัสดุหลังการเคลือบผิวหน้าด้วยสารเคลือบผิวอาจมาจากสี (color) เงาม (gloss) ลวดลายตกแต่ง (texture) หรือความสว่าง (lighting) หรือจากทั้งหมดรวมกัน

สีของผิวหน้ามีผลต่อการสะท้อนแสงของผิวหน้านั้น ๆ สีขาวจะสะท้อนแสงได้สูงสุดและสีดำจะสะท้อนแสงได้ต่ำสุด

7.1 องค์ประกอบของสี (พรชัย บุญโชคชัย และคณะ, 2533)

สีเป็นสารประกอบชนิดหนึ่งที่ประกอบไปด้วยสารเพิ่มคุณสมบัติต่างๆ และเนื้อของสีเอง แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบของสีสามารถแบ่งได้ 4 อย่าง คือ

ก. ผงสี (pigment) เป็นส่วนประกอบของสีที่เห็นได้ชัดเจน ปกติผงสีจะเป็นของแข็ง ซึ่งอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ โดยถูกบดละเอียดจนมีขนาดเล็กมาก ผงสีจะไม่ละลายในสารยึดและตัวทำละลาย แต่ผงสีจะทำให้เกิดสีและบดบังผิวของวัตถุที่ต้องการเคลือบผิว ช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน ทนไฟ และทำให้มีความเงางามขึ้น

ข. สารยึด (binder) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของสีเพราะเป็นตัวที่ทำให้เกิดฟิล์มบางๆ เกาะติดแน่นอยู่กับพื้นผิวที่เคลือบโดยยึดเอาผงสีไว้ในฟิล์มของมัน ส่วนประกอบตัวนี้โดยทั่วไปได้จากสารที่เรียกว่า เรซิน (resin) ซึ่งมีอยู่ 2 ประเภท คือ

- เรซินธรรมชาติ (natural resins) ซึ่งในปัจจุบันไม่ค่อยนิยมใช้ ชนิดที่ใช้กันบ้างได้แก่ ชันสน (rosin) ซึ่งใช้ในการผสมสีเคลือบ

- เรซินสังเคราะห์ (synthetic resins) เป็นเรซินที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยกรรมวิธีทางวิทยาศาสตร์ เช่น อะครีลิก (acrylic) โพลียูรีเทน (polyurethane) อัลคิิด (alkyd) และอีพอกซี (epoxy) เป็นต้น

ประโยชน์อื่นๆ ของเรซินนอกจากทำให้เกิดฟิล์มแล้วยังทำให้เกิดความเงา ความแข็ง ความทนทานต่อสิ่งแวดล้อม เช่น แสงอาทิตย์ ความร้อน ความชื้น เป็นต้น

ค. ตัวทำละลาย (solvent) เป็นของเหลวที่ใช้ใส่ลงในสีเพื่อผสมกับผงสีและสารยึดให้ได้ความเข้มข้นตามที่ต้องการ โดยที่ตัวทำละลายนี้จะระเหยไปหลังจากเคลือบผิวเสร็จ ตัวอย่างของตัวทำละลายได้แก่ น้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายของสีพลาสติก ทินเนอร์ซึ่งเป็นตัวทำละลายของสีน้ำมัน เป็นต้น

ง. สารเพิ่มคุณสมบัติ (additive) เป็นสารพิเศษจำนวนน้อย ที่ใส่เข้าไปในสีเพื่อให้มีคุณสมบัติพิเศษบางประการตามที่ต้องการ ได้แก่ สารที่ช่วยทำให้เกิดการแห้ง (drier) สารกันเชื้อรา (preservative) สารกันการนอนกัน (suspending agent) เป็นต้น

7.2 การเคลือบผิวชิ้นงานด้วยสี (ผคมเทพ มิคะเสนและคณะ, 2536)

ก. สีรองพื้น (primer) จุดประสงค์ในการเคลือบสีด้วยสีรองพื้น มีหลายประการคือ เกิดความติดแน่นระหว่างสีพื้นกับชิ้นงาน เกิดความยึดแน่น (cohesion) มีความเหนียว เกิดพันธะที่แข็งแรง มีความยืดหยุ่นที่เหมาะสมและทนต่อสารเคมี

ข. สีพื้น (intermediate coat) จุดประสงค์ในการเคลือบด้วยสีพื้น คือเพิ่มความหนาของการเคลือบสี ทนสารเคมี ป้องกันการถ่ายเทความชื้น ยึดเกาะกับสีรองพื้นและยึดเกาะกับสีทับหน้าเพื่อเพิ่มความแข็งแรง

ค. สีทับหน้า (top coat) จุดประสงค์ในการเคลือบสีทับหน้า คือ ทำให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อม ยึดเกาะกับสีพื้น เกิดความสวยงาม ได้แก่ สีมัน ความเงา ปกปิดพื้นผิวทั้งหมดและเพิ่มความทนทาน

สีที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะมีการเคลือบที่เป็นระบบดังตาราง 2.7 เรซินมีความสำคัญมาก บางระบบจะใช้สารยึดชนิดเดียวกันตลอด แต่บางระบบอาจจะมีการเปลี่ยนเรซิน

ตาราง 2.7 แสดงการเคลือบผิวที่เป็นระบบในโครงสร้างเหล็ก

| | General coating system | | |
|-----------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| | A | B | C |
| 1 st coat | Etching primer | Etching primer | Zinc rich primer |
| 2nd coat | Oil corrosion preventive paint | Oil corrosion preventive paint | Chlorinated rubber system primer |
| 3 rd coat | Oil corrosion preventive paint | Oil corrosion preventive paint | Chlorinated rubber system primer |
| 4 th coat | Long oil alkyd resin paint | Phenolic resin system MIO paint | Chlorinated rubber system paint |
| 5 th coat | Long oil alkyd resin paint | Chlorinated rubber system paint | Chlorinated rubber system paint |
| 6 th coat | | Chlorinated rubber system paint | |

ตาราง 2.7 (ต่อ)

| | Heavy coating system | | | |
|-----------|---------------------------------|--|--|-----------------------|
| | D | E | F | G |
| 1 st coat | Zinc spray or zinc-rich paint | Thick-type zinc-rich paint | Thick-type zinc-rich paint | Zinc rich primer |
| 2nd coat | Etching primer | Thick-type vinyl system or chlorinated rubber system paint | Thick-type epoxy primer | Tar epoxy resin paint |
| 3 rd coat | Zinc chromate primer | Thick-type vinyl or chlorinated rubber system paint | Thick-type epoxy primer | Tar epoxy resin paint |
| 4 th coat | Phenolic resin system MIO paint | Vinyl resin or chlorinated rubber system paint | Epoxy resin system paint | Tar epoxy resin paint |
| 5 th coat | Chlorinated rubber system paint | Vinyl resin or chlorinated rubber system paint | Epoxy or polyurethane resin system paint | |
| 6 th coat | Chlorinated rubber system paint | | | |

ที่มา : Suzuki, 1989 : 227

7.3 ขั้นตอนในการเคลือบสี (วินิจ ละเอียดของสุวรรณ, 2534)

แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

ก. การเตรียมพื้นผิวก่อนเคลือบสี (surface preparation)

พื้นผิวก่อนเคลือบสีจะต้องปราศจากคราบไขมัน และสิ่งสกปรกต่างๆ นอกจากนี้การใช้สีบางประเภทยังจะต้องทำให้พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ (profile) พอสมควร เพื่อผลทางการยึดเกาะที่ดี

เพราะฉะนั้นการเตรียมพื้นผิวจึงแตกต่างกันไป ตามประเภทของสีและชนิดของพื้นผิวที่จะเคลือบ การเตรียมพื้นผิวก่อนเคลือบ สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้ (อรอุษา สรวารี, 2537) คือ

- โดยวิธีขัดหรือขัดด้วยแปรงลวด (wire brushing)
- โดยวิธีพ่นทราย (sand blasting) เป็นการขัดแผ่นสนิม คราบสนิม และสิ่งสกปรกต่างๆ ทำให้ได้พื้นผิวที่สะอาดและขรุขระ ทำให้สีเกาะติดแน่นได้ดี
- โดยวิธีพ่นด้วยน้ำ (water blasting) เป็นการใช้น้ำที่มีแรงดันสูงพ่นให้สีเก่าหลุดออกจากพื้นผิวหรือชะล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรกออกจากพื้นผิว โดยวิธีการนี้จะทำได้เร็วกว่าวิธีพ่นทรายและพื้นผิวที่ได้จะมีความขรุขระน้อยกว่า
- โดยวิธีล้างด้วยตัวทำละลาย (solvent cleaning) เป็นการทำความสะอาดพื้นผิวขจัดสิ่งสกปรก คราบไขมันและไขมันโดยการใช้ตัวทำละลาย เช่น แอซิโตน แอลกอฮอล์ โทลูอีน ไซลีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์และเมทิลีนคลอไรด์ เป็นต้น
- โดยวิธีล้างด้วยด่าง (alkaline cleaning) อาจทำโดยการแช่ (soak cleaning or immersion) หรือโดยวิธีพ่นก็ได้ หลังจากล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรกต่างๆ ออกจากพื้นผิวแล้ว นำมาล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดด่างออกให้หมด
- การล้างสนิม (pickling) เป็นการขจัดฟิล์มของออกไซด์ หรือซัลไฟด์บนพื้นผิวโลหะโดยการจุ่มในกรดหรือด่าง แล้วแต่ชนิดของโลหะ เช่น ถ้าเป็นเหล็กนิยมใช้กรดไฮโดรคลอริก (1-10 %, 20-50 °ซ., 1-5 นาที) หรือกรดซัลฟิวริก (5-20 % ที่ 95 °ซ., 2-10 นาที) การล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก จะให้พื้นผิวที่ขาวและเงากว่า การล้างด้วยกรดซัลฟิวริก

ข. วิธีการเคลือบ (application techniques)

การเคลือบพื้นผิววัสดุต่างๆ สามารถกระทำได้หลายวิธี ดังตาราง 2.8 ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ การทา (spreading process) และการพ่น (spraying process) สำหรับวิธีการทา ยังแบ่งได้เป็นการใช้แปรงทา การใช้ลูกกลิ้ง การจุ่ม ฯลฯ ส่วนวิธีการพ่น ก็รวมไปถึงการใช้สีผง และการชุบด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) ด้วย

การเลือกวิธีการเคลือบใด ขึ้นกับสมบัติของสารเคลือบผิวและธรรมชาติของพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการเคลือบ

ตาราง 2.8 การจำแนกประเภทการเคลือบสี

| วิธีการ | หลักการ | กรรมวิธี |
|--|---|---|
| การพ่นสี (Spray painting) | โดยการพ่นให้เป็นละออง | การพ่นโดยใช้อากาศ, การพ่นโดยไม่ใช้อากาศ, การพ่นโดยใช้อากาศร้อน |
| การจุ่มสี (Dip painting) | ใช้การจุ่ม | การจุ่มโดยใช้ไฟฟ้า, การจุ่มสี, การจุ่มแบบ TFS, การจุ่มแบบฟลูอิดไดซ์เบด |
| การเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electrostatic painting) | อาศัยประจุไฟฟ้า | การเคลือบด้วยประจุไฟฟ้า, การพ่นสีด้วยประจุไฟฟ้า |
| การใช้แปรงทา (Brush painting) การทาสีแบบการไหล (Flow painting) | อาศัยการกระจายตัวของสี อาศัยการรินไหลและการ กระจายตัว | การใช้แปรงทาสี การเคลือบโดยใช้เครื่อง เคลือบแบบพ่นโปรย (shower coat) |
| การทาโดยใช้ลูกกลิ้ง (Roller painting) | อาศัยการกระจายตัวโดยใช้ ลูกกลิ้ง | การใช้เครื่องเคลือบแบบ ลูกกลิ้ง, การใช้ลูกกลิ้ง |

ที่มา : ทรงกลด เจริญพร และสมพงษ์ โชติจารุมณีวงศ์, 2533 : 21

7.4 ปัจจัยที่มีผลต่อความคงทนของสีในบรรยากาศ (รุ่งทิพย์ ห้าวหาญ และ วรพงษ์ ตีรุ่งโรจน์, 2534 ; Suzuki, 1989)

สีเคลือบต่างๆ ขณะเมื่อใช้งาน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสี ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยที่สำคัญดังต่อไปนี้

ก. สภาพแวดล้อม

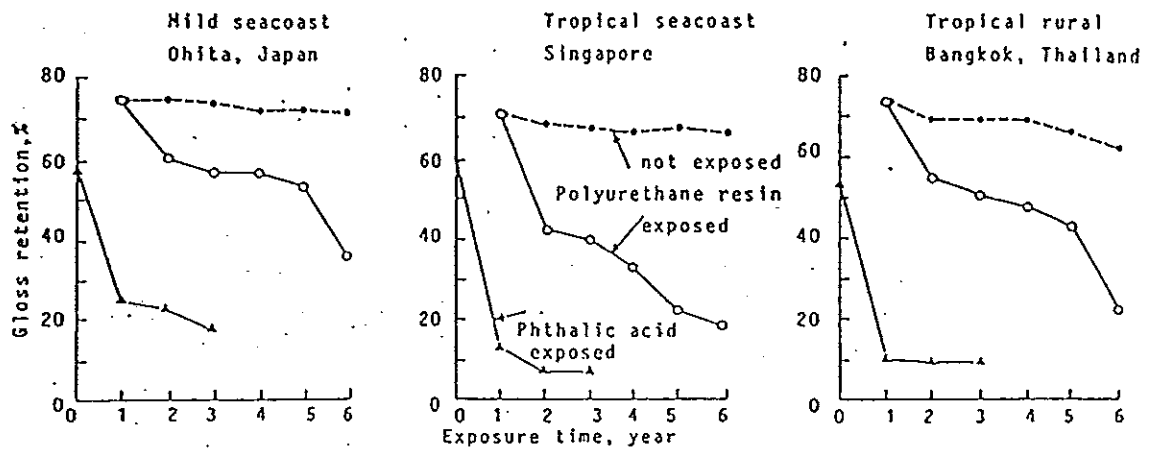
มีปัจจัยหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยกัน คือ ความชื้น น้ำ แสง อัลตราไวโอเลต อุณหภูมิ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ปริมาณเกลือและตำแหน่งของการวางโครงสร้าง เป็นต้น เนื่องจากสภาพแวดล้อมในบรรยากาศ ทำให้เกิดการเปื่อยและแห้งตลอดเวลา ดังนั้น ความชื้นและน้ำจึงมีความสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของฟิล์มสี และทำให้ระยะเวลาเปื่อยขึ้นมีความสำคัญมาก และพฤติกรรมของน้ำเมื่ออยู่ในโพลีเมอร์จะทำให้ความแข็งแรงของพันธะในฟิล์มสีลดลง ดังตาราง 2.9

ตาราง 2.9 แสดงความแข็งแรงของพันธะในฟิล์มสีที่ลดลง เมื่อวางในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 100 % ที่ระยะเวลาต่างๆ

| Exposure time (hour) | Bond strength (psi) | | |
|----------------------|---------------------|---------|-------------|
| | Thermosetting | | |
| | Polyurethane | Acrylic | Epoxy ester |
| Initial | 3410 | 5700 | 4790 |
| 24 | 1500 | 3650 | 1640 |
| 48 | 1430 | 3420 | 1500 |
| 120 | 1390 | 2400 | - |
| 195 | 1130 | 1850 | 1400 |
| 500 | 670 | 480 | 1390 |

ที่มา : Suzuki, 1989 : 234

ในกรณีที่มีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้องเช่น ระยะเวลาเปื่อยขึ้น แสงอัลตราไวโอเลต และสภาพบรรยากาศ จะทำให้เกิดการหลุดร่อนเป็นผง (chalking) ของผงสี และเป็นสาเหตุให้ความเงา (gloss) ของสีเปลี่ยนไป ดังภาพประกอบ 2.18

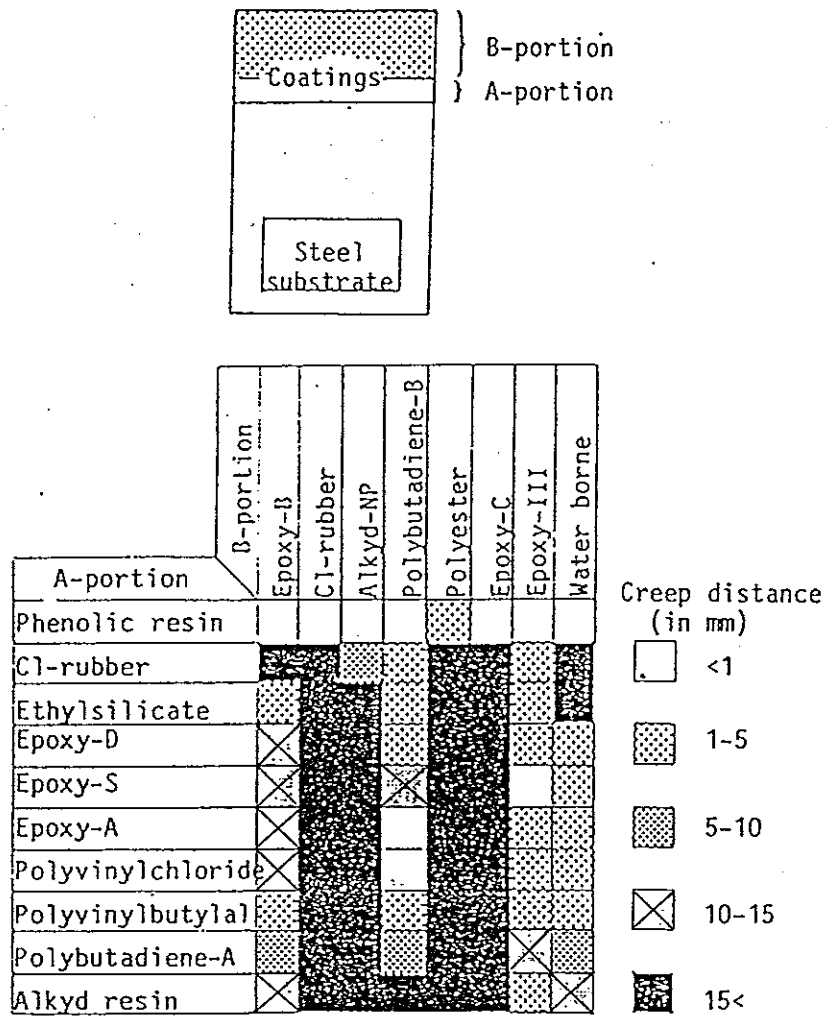


ภาพประกอบ 2.18 การเปลี่ยนแปลงของความเงาของฟิล์มสี เมื่อวางในบรรยากาศต่างกัน ที่ระยะเวลาต่างๆ

ที่มา : Suzuki, 1989 : 236

ข. ชนิดของสี

ในสภาพแวดล้อมแบบเดียวกัน แต่ถ้าใช้สีต่างชนิดกันประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนก็ย่อมแตกต่างกัน เช่น การทดสอบระบบสีต่างๆ โดยใช้วิธีหมอกเกลือ (salt-fog test) เนื่องจากการเคลือบผิวที่เป็นระบบ ชนิดของสีที่ใช้เป็นสีรองพื้นมีความสำคัญมาก เพราะมีผลต่อการเคลือบผิวในชั้นอื่นๆ ดังภาพประกอบ 2.19 ซึ่งแสดงความหนาที่ใช้ในส่วนต่างๆ คือ ส่วน A (A-portion) มีความหนาน้อยกว่า 1 ไมครอน และส่วน B (B-portion) มีความหนา 50-100 ไมครอน ผลการทดสอบพบว่าเมื่อใช้สีฟีนอลิก (phenolic) เป็นสีรองพื้นจะมีความทนทานต่อการกัดกร่อนดีที่สุด



ภาพประกอบ 2.19 ส่วนตัดขวางชิ้นงานทดสอบ และผลการทดสอบระบบสีต่างๆ โดยใช้วิธีหมอกเกลือ (salt-fog test)

ที่มา : Suzuki, 1986 : 238

ค. ความหนาของสี

โดยปกติแล้วอายุการใช้งานของสีเพิ่มขึ้น ตามความหนาของสีที่ใช้เคลือบผิว แต่อย่างไรก็ตาม ในการใช้สีชนิดเดียวเคลือบผิวพบว่าถ้าความหนามากกว่า 500 ไมครอน फिल्मสีจะเกิดการแตกหักได้ง่าย เนื่องจากขณะที่ฟิล์มสีกำลังแห้งทำให้เกิดการสั่นภายในฟิล์มสี สำหรับโครงสร้างเหล็กระบบการเคลือบผิวที่ใช้มีอยู่ 2 ระบบ ซึ่งแบ่งตามลักษณะการใช้งาน คือ

- ลักษณะงานทั่วไป

เป็นการเคลือบผิวที่ใช้ในบรรยากาศที่ไม่รุนแรงมากนัก เช่น ในชนบท บริเวณภูเขา และในเมือง เป็นต้น โดยใช้สีน้ำมันชนิดป้องกันสนิมเป็นสีรองพื้น และใช้สีอัลคิตหรือสีคลอรีเนเตดรับเบอร์ (chlorinated rubber) เป็นสีชั้นกลาง และสีทับหน้า สำหรับความหนาของฟิล์มสีทั้งหมดไม่เกิน 150 ไมครอน

- ลักษณะงานหนัก

เป็นการเคลือบผิวที่ใช้ในบรรยากาศที่รุนแรง เช่น บริเวณชายทะเล เขตอุตสาหกรรม ใต้น้ำ และน้ำทะเล เป็นต้น โดยทั่วไปมักใช้สังกะสี หรืออลูมิเนียมพ่นเคลือบผิว หรือใช้สีรองพื้นที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบ และเคลือบผิวอีกหลายๆ ชั้นด้วยสีทับหน้า เช่น สีอีพอกซี สีทาร์อีพอกซี และสีโพลียูรีเทน สำหรับความหนาของฟิล์มสีทั้งหมดไม่ต่ำกว่า 250 ไมครอน

ง. การเตรียมพื้นผิว

การเตรียมพื้นผิวมักประกอบด้วยขั้นตอน 2 ขั้นตอน คือ

- การล้างคราบน้ำมันและสิ่งสกปรกออกจากพื้นผิว
- การล้างสนิมและเกล็ดเหล็ก (mill scale)

นอกจากนี้การเตรียมพื้นผิวที่ดีจะช่วยยืดอายุการใช้งานของสี ดังตาราง 2.10 แสดงให้เห็นว่าการใช้แปรงขัดเพื่อกำจัดเกล็ดเหล็ก มีความคงทนของสีน้อยกว่า การกำจัดเกล็ดเหล็กทั้งหมด (intact mill scale) การล้างสนิมและการพ่นทราย

จ. ลักษณะหรือรายละเอียดของโครงสร้าง

เช่น บริเวณขอบ เป็นบริเวณที่เคลือบผิวได้บางกว่าบริเวณอื่นๆ

ตาราง 2.10 ผลของการเตรียมพื้นผิวของเหล็กต่ออายุใช้งานของสี

| Surface Preparation | Durability of Paint , years (Sheffield, England) | |
|----------------------------|---|---------------------------------|
| | 2 coats red lead | |
| | + 2 coats red iron oxide paint | 2 coats red iron oxide paint |
| Weathered and wire brushed | 2.3 | 1.2 |
| Intact mill scale | 8.2 | 3.0 |
| Pickled | 9.5 | 4.6 |
| Sandblasted | 10.4 | 6.3 |

ที่มา : Uhlig and Revie, 1985 : 256

7.5 การทดสอบสมบัติของสีและฟิล์ม (ผคมเทพ มิคะเสน และคณะ, 2536)

การทดสอบ มี 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ สมบัติของสี (wet paint properties) และสมบัติของฟิล์มสี (film properties)

ก. สมบัติของสี ได้แก่ ความละเอียด (fineness of grind) ความหนืด (viscosity) ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) และปริมาณสารที่ไม่ระเหย (non-volatile) คิดเป็นร้อยละ

ข. สมบัติของฟิล์มสี ได้แก่ ความหนาของฟิล์มสี (film thickness) ความเงา (gloss) ความติดแน่น (adhesion) การหลุดร่อนเป็นผง (chalking) การแตกลายงา (checking) การโป่งพอง (blistering) สมบัติการต้านทานการกัดกร่อน (anticorrosive properties) รูเข็ม (pinhole) ความต้านทานทางไฟฟ้า (impedance) ความผิดแผกของสี (color difference) ความแข็ง (hardness) กำลังซ่อนแสง (hiding power) ความทนต่อการกระแทก (impact resistance) ความยืดหยุ่น (erichsen test) ความทนกรด (acid resistance) ความทนด่าง (alkali resistance) ความทนต่อความชื้น (humidity test) ความทนต่อละอองน้ำเกลือ (salt spray test) และความทนต่อสภาพลมฟ้าอากาศ (exposure test)

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

1. วัสดุและสารเคมี

ประกอบด้วย

1. แผ่นเหล็กกล้าระฆัง หน้า 1.2 มิลลิเมตร (องค์ประกอบทางเคมี
ดูใน ภาคผนวก ก.1)
2. สี (A, B, C และ D)
3. กระดาษกรองโครมาโตกราฟี (chromatography paper 17 chr
(Whatman))
4. ผ้ายก๊อช
5. เรซิน
6. กรดคลอรานิลิก (chloranilic acid : $C_6H_2Cl_2O_4$)
7. กรดอะซิติก (acetic acid : CH_3COOH)
8. กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid : HCl)
9. โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride : $NaCl$)
10. โซเดียมอะซิเตท (sodium acetate : CH_3COONa)
11. 2,5 ไดไนโตรฟีนอล (2,5 dinitrophenol : $C_6H_4N_2O_5$)
12. แบเรียมคลอไรด์ (barium chloride : $BaCl_2$)
13. โพแทสเซียมคาร์บอเนต (potassium carbonate : K_2CO_3)
14. เมอร์คิวริก (II) ไธโอไซยาเนต (mercuric thiocyanate
: $Hg(SCN)_2$)
15. สแตนนัสคลอไรด์ (stannous chloride : $SnCl_2$)
16. แอซีโตน (acetone : CH_3COCH_3)
17. อีเทอร์ (ether : $(C_2H_5)_2O$)
18. เอทานอล (ethanol : CH_3CH_2OH)

19. แอนติโมนีไตรออกไซด์ (antimony (III) oxide : Sb_2O_3)
20. แอมโมเนียมซัลเฟต (ammonium sulfate : $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)
21. แอมโมเนียมไอร์ออน (III) ซัลเฟต (ammonium iron (III) sulfate : $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$)
22. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide : H_2O_2)

2. อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย

1. เครื่องวัดความผิดแผกของสี (Reflection meter : Photovolt model 577)
2. เครื่อง UV-spectrophotometer
3. เครื่อง X-ray diffractometer
4. เครื่องพ่นสี
5. แปรงทาสี

3. วิธีดำเนินการ

3.1 ชิ้นงานเปลือย (ภาคผนวก ก.1)

- ตัดแผ่นเหล็กชิ้นงานขนาด 8 x 18 เซนติเมตรหนา 1.2 มิลลิเมตร
- ทำเครื่องหมายบนชิ้นงานโดยการตอก
- ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยแอซิโตน เพื่อกำจัดคราบน้ำมัน
- ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนการติดตั้ง

หมายเหตุ

ชิ้นงานหักงอ 90 องศา

- นำแผ่นเหล็กชิ้นงานขนาด 8 x 18 เซนติเมตร ไปหักงอ 90 องศา ด้วยเครื่องพับโลหะ

ชิ้นงานมีรอยเชื่อม

- นำแผ่นเหล็กชิ้นงานขนาด 8 x 18 เซนติเมตร แล้วนำไปตัดแบ่งให้

มีขนาด 4 x 18 เซนติเมตร

- นำแผ่นเหล็กชิ้นงานขนาด 4 x 18 เซนติเมตร มาเชื่อม (เชื่อมด้วยไฟฟ้า) ประกอบตามแนวยาวตลอดทั้งชิ้นงาน

3.2 ชิ้นงานเคลือบผิวด้วยสี (ภาคผนวก ก.2)

ชิ้นงานแต่งผิว

- นำแผ่นเหล็กชิ้นงานขนาด 8 x 18 เซนติเมตร มาทำความสะอาดชิ้นงานด้วยแอซิโตนเพื่อกำจัดคราบน้ำมันแล้วนำไปแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 5% เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำชิ้นงานไปล้างสารละลายกรดออกด้วยน้ำ
- ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 220 เพื่อให้พื้นผิวมีความขรุขระ ชิ้นงานไม่แต่งผิว
- นำแผ่นเหล็กชิ้นงานขนาด 8 x 18 เซนติเมตร มาทำความสะอาดชิ้นงานด้วยแอซิโตนเพื่อกำจัดคราบน้ำมัน

หมายเหตุ ทำเครื่องหมายโดยการเขียนด้วยสีบนมุมซ้ายด้านบนของชิ้นงาน

3.3 วิธีการเคลือบสี

ระบบสีที่ใช้เคลือบชิ้นงานแบ่งได้ 4 ระบบตามชนิดของสารยึด (รายละเอียดของสีดูในภาคผนวก ก.3) คือ

- ระบบสี A ใช้วิธีทาและพ่นให้มีความหนา 100, 200 และ 300* ไมครอน
- ระบบสี B ใช้วิธีพ่น โดยพ่นสีรองพื้นหนา 50* ไมครอน และสีทับหน้าหนา 50* ไมครอน
- ระบบสี C ใช้วิธีพ่น โดยพ่นสีรองพื้นหนา 80* ไมครอน และสีทับหน้าหนา 35* ไมครอน
- ระบบสี D ใช้วิธีพ่น โดยพ่นสีรองพื้นหนา 80* ไมครอน และสีทับหน้าหนา 35* ไมครอน

หมายเหตุ * คือ ความหนาของสีใช้ตามคู่มือการใช้สีของระบบนั้นๆ

3.4 การติดตั้งแผงทดลอง

- ติดชิ้นงานบนแผงทดลอง ด้วยอุปกรณ์ยึดชิ้นงานที่เป็นฉนวน ซึ่งทำจากเรซินเพื่อป้องกันการเกิดการกัดกร่อนแบบโลหะต่างชนิดกัน
- ติดตั้งแผงทดลองในบรรยากาศต่างๆ ตามลักษณะการวางชิ้นงาน

(ในร่ม, กลางแจ้ง) โดยให้แผงทดลองทำมุม 0 องศากับพื้นดิน ในแนวทิศเหนือ-ใต้

- ระยะเวลาในการติดตั้ง 1 ปี (พฤษภาคม 2539 : เดือนที่ 1- เมษายน 2540 : เดือนที่ 12)

3.5 รายละเอียดสถานีทดลอง (ภาคผนวก ข.)

ติดตั้งแผงทดลองในสภาพบรรยากาศ ดังต่อไปนี้

- ก. บรรยากาศชนบท : สถานีทดลอง ม.อ.
- ข. บรรยากาศชายทะเล : สถานีทดลอง อ.เทพา
- ค. บรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเล : สถานีทดลอง อ.ขนอม

4. จำนวนชิ้นงาน

จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง (3 ชิ้น) ขึ้นอยู่กับตัวแปร ดังต่อไปนี้

- 4.1 บรรยากาศในการทดลอง (ดู 3.5)
- 4.2 ลักษณะการวางชิ้นงาน (ดู 3.4)
- 4.3 ลักษณะของชิ้นงาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ
 - ก. ชิ้นงานเปลือย แบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ คือ
 - ชิ้นงานปกติ
 - ชิ้นงานมีรอยเชื่อม
 - ชิ้นงานหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ และวางหงาย)
 - ข. ชิ้นงานเคลือบผิวด้วยสี แบ่งออกเป็น 5 ลักษณะ คือ
 - เคลือบสีปกติ
 - กรีดสีเคลือบชิ้นงานเป็นรูปกากบาท
 - ชิ้นงานมีรอยเชื่อม
 - งอชิ้นงาน 90 องศา (วางคว่ำ และวางหงาย)
- 4.4 ระบบของสี (ดู 3.3)
- 4.5 วิธีการเคลือบสี แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ
 - ก. การทาสีด้วยแปรงทาสี
 - ข. การพ่นสีด้วยเครื่องพ่นสี

4.6 ความหนาของสี่ ชั้นอยู่กับระบบบลิที่ใช้ (ดู 3.3)

จากตัวแปรทั้งหมด สามารถแจกแจงจำนวนชั้นงาน ได้ดังตาราง 3.1

ตาราง 3.1 แสดงจำนวนชั้นงานทั้งหมด

| ประเภท | รหัส | จำนวน: ชั้นงาน/ สถานี/ สภาวะ | สถานี : ม.อ./ เทพา/ ขนอม | สภาวะ : ในร่ม/ กลาง แจ้ง | จำนวน ชั้นงาน รวม | จำนวน ชั้นงาน อ้างอิง | รวม |
|--|---|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----|
| 1. ชั้นงานปกติ | 1x ₂ x ₃ x ₄ | 15 | 3 | 2 | 90 | 1 | 91 |
| 2. ชั้นงานหึ่งงอ 90 องศา,วางคว่ำ | 2x ₂ x ₃ x ₄ | 10 | 3 | 2 | 60 | 1 | 61 |
| 3. ชั้นงานหึ่งงอ 90 องศา,วางหงาย | 2x ₂ x ₃ x ₄ | 10 | 3 | 2 | 60 | 1 | 61 |
| 4. ชั้นงานมีรอยเชื่อม | 3x ₂ x ₃ x ₄ | 15 | 3 | 2 | 90 | 1 | 91 |
| 5. ชั้นงานปกติระบบสี่ A 300 ไมครอน วิธีฟัน | 1x ₂ x ₃ x ₄ A3 | 3 | 1 | 2 | 6 | 1 | 7 |
| 6. ชั้นงานปกติระบบสี่ B วิธีฟัน | 1x ₂ x ₃ x ₄ B | 3 | 1 | 2 | 6 | 1 | 7 |
| 7. ชั้นงานปกติระบบสี่ C วิธีฟัน | 1x ₂ x ₃ x ₄ C | 3 | 1 | 2 | 6 | 1 | 7 |
| 8. ชั้นงานปกติระบบสี่ D วิธีฟัน | 1x ₂ x ₃ x ₄ D | 3 | 1 | 2 | 6 | 1 | 7 |
| 9. ชั้นงานปกติระบบสี่ A 300 ไมครอน, าริด, วิธีฟัน | 1x ₂ x ₃ x ₄ A3G | 3 | 1 | 2 | 6 | 1 | 7 |
| 10. ชั้นงานปกติระบบสี่ A 300 ไมครอน, งอ 90 องศา, วิธีฟัน, วางคว่ำ | 2x ₂ x ₃ x ₄ A3 | 2 | 1 | 2 | 4 | 1 | 5 |
| 11. ชั้นงานปกติระบบสี่ A 300 ไมครอน, งอ 90 องศา, วิธีฟัน, วางหงาย | 2x ₂ x ₃ x ₄ A3 | 2 | 1 | 2 | 4 | 1 | 5 |
| 12. ชั้นงานปกติระบบสี่ A 300 ไมครอน, เชื่อม, วิธีฟัน | 3x ₂ x ₃ x ₄ A3 | 3 | 1 | 2 | 6 | 1 | 7 |
| 13. ชั้นงานปกติระบบสี่ A 200 ไมครอน, วิธีฟัน | 1x ₂ x ₃ x ₄ A2 | 3 | 1 | 2 | 6 | 1 | 7 |
| 14. ชั้นงานปกติระบบสี่ A 100 ไมครอน, วิธีฟัน | 1x ₂ x ₃ x ₄ A1 | 3 | 1 | 2 | 6 | 1 | 7 |
| 15. ชั้นงาน ปกติระบบสี่ A 300 ไมครอน, วิธีทา | 1x ₂ x ₃ x ₄ A3P | 3 | 1 | 2 | 6 | 1 | 7 |
| 16. ชั้นงานปกติระบบสี่ A 100 ไมครอน, วิธีทา | 1x ₂ x ₃ x ₄ A1P | 3 | 1 | 2 | 6 | 1 | 7 |
| 17. ชั้นงานปกติระบบสี่ A 300 ไมครอน, ไม่แต่งผิว, วิธีฟัน | 1x ₂ x ₃ x ₄ A1N | 3 | 1 | 2 | 6 | 1 | 7 |
| 18. ชั้นงานเหล็กปกติระบบสี่ A 200 ไมครอน,ไม่แต่งผิว, วิธีฟัน | 1x ₂ x ₃ x ₄ A2N | 3 | 1 | 2 | 6 | 1 | 7 |
| 19. ชั้นงานปกติระบบสี่ A 100 ไมครอน,ไม่แต่งผิว, วิธีฟัน | 1x ₂ x ₃ x ₄ A3N | 3 | 1 | 2 | 6 | 1 | 7 |
| | | | | รวม | 386 | 17 | 403 |

หมายเหตุ

รหัสของชิ้นงานที่ใช้ ประกอบด้วยตัวเลขและตัวอักษรเป็นจำนวน 7 ตัวดังนี้

- ตัวอักษร X_1 หมายถึง ตัวเลขที่แสดงลักษณะของชิ้นงาน โดยที่
 - 1 คือ ชิ้นงานปกติ
 - 2 คือ ชิ้นงานหักงอ 90 องศา
 - 3 คือ ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม
- ตัวอักษร X_2 หมายถึงตัวอักษรที่แสดงสถานที่ทดลองที่ติดตั้งชิ้นงาน โดยที่
 - R คือ ชิ้นงานอ้างอิง
 - C คือ สถานที่ทดลอง ม.อ.
 - T คือ สถานที่ทดลอง อ. เทพา
 - K คือ สถานที่ทดลอง อ. ชนอม
- ตัวอักษร X_3 หมายถึง ตัวเลขที่แสดงลักษณะการวางชิ้นงาน โดยที่
 - 0 คือ ชิ้นงานอ้างอิง
 - 1 คือ ชิ้นงานที่วางไว้กลางแจ้ง
 - 2 คือ ชิ้นงานที่วางไว้ในร่ม
- ตัวอักษร X_4 หมายถึง ตัวเลขที่แสดงจำนวนชิ้นงาน
 - 0 คือ ชิ้นงานอ้างอิง
 - 1 คือ ชิ้นงานชั้นที่ 1
 - 2 คือ ชิ้นงานชั้นที่ 2
 - 3 คือ ชิ้นงานชั้นที่ 3
 - 4 คือ ชิ้นงานชั้นที่ 4
- ตัวอักษร X_5 หมายถึง ตัวอักษรที่แสดงระบบของสี โดยที่
 - A คือ ระบบสี A
 - B คือ ระบบสี B
 - C คือ ระบบสี C
 - D คือ ระบบสี D
- ตัวอักษร X_6 หมายถึง ตัวเลขที่แสดงความหนาของระบบสี A โดยที่
 - 1 คือ ความหนา 100 ไมครอน

2 คือ ความหนา 200 ไมครอน

3 คือ ความหนา 300 ไมครอน

- ตัวอักษร X₇ หมายถึงลักษณะพิเศษของชิ้นงาน โดยที่

N คือ ชิ้นงานที่ไม่ได้เตรียมพื้นผิว

P คือ ชิ้นงานที่เคลือบสีด้วยการทาแปรง

G คือ ชิ้นงานที่เคลือบสีที่มีการกรีดสี

ตัวอย่างเช่น

2K12 หมายถึง ชิ้นงานหักงอ 90 องศาติดตั้งที่สถานีทดลอง อ. ขนอม
ในกลางแจ้งเป็นชิ้นงานชั้นที่ 2

1C13A3P หมายถึง ชิ้นงานที่ติดตั้งที่สถานีทดลอง ม.อ. ในกลางแจ้ง
เป็นชิ้นงานชั้นที่ 3 เคลือบสีด้วยระบบสี A ที่ความหนา 300 ไมครอน ด้วยการทา
แปรง

5. การรวบรวมข้อมูล

5.1 เก็บข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาทุกๆ 1 เดือน ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์
และปริมาณฝน โดยรวบรวมข้อมูลจากสถานีตรวจอากาศเกษตรคองหงส์ อ.หาดใหญ่
จ.สงขลา สถานีตรวจอากาศสงขลา จ.สงขลา และสถานีตรวจอากาศทางทะเล
อ.ขนอม จ.นครศรีธรรมราช (ภาคผนวก ค.)

5.2 วิเคราะห์หาอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน (ASTM G 1) ที่ระยะเวลา 1, 3,
6, 9 และ 12 เดือน (ภาคผนวก ง.)

5.3 วิเคราะห์หาปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์และปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์
ทุกๆ 1 เดือน โดยมีหลักการคือ มลสารถูกดูดซับบนวัสดุที่มีการดูดซับที่ติดตั้งไว้
ณ แผงทดลอง แล้วนำมาวิเคราะห์มลสารในห้องปฏิบัติการ ผลที่ได้เป็นการคำนวณ
อยู่ในเทอมอัตราการสะสม (deposition rate) ของสาร วิธีการวิเคราะห์ปริมาณแก๊ส
ซัลเฟอร์ออกไซด์ใช้วิธี alkali filter paper (JIS K 0101) และปริมาณเกลือโซเดียม
คลอไรด์ใช้วิธี dry gauze (JIS Z 2381) (ภาคผนวก จ.)

5.4 วิเคราะห์หาความผิวดมของสี การเกิดสนิม การโป่งพอง และการแตก
ลายงาของชิ้นงานเคลือบสี ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน โดยใช้วิธีการ ดังนี้

- ความผิดแผกของสี เป็นการวัดค่าความผิดแผกของสี ทั้งปริมาณและลักษณะในเชิงเปรียบเทียบระหว่างสี 2 ชนิด เป็นจำนวน 3 คู่คือ ขาว-ดำ แดง-เขียว และเหลือง-น้ำเงิน ซึ่งการคำนวณค่าความผิดแผกของสี สามารถคำนวณได้จากมาตรฐาน ASTM D 2244 (ภาคผนวก ฉ.1)

- การเกิดสนิม มาตรฐาน ASTM D 610 ได้เสนอวิธีการประเมินผลการเกิดสนิม โดยอัตราการเกิดสนิมจะอยู่บนสเกลระหว่าง 10 ถึง 0 โดยที่ 10 หมายถึงไม่มีสนิมเกิดขึ้น และ 0 หมายถึงเกิดสนิมทั่วทั้งแผ่น ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับรูปมาตรฐานที่แสดงไว้ (ภาคผนวก ฉ.2)

- การโป่งพอง มาตรฐาน ASTM D 714 ได้เสนอวิธีการประเมินค่าการโป่งพอง โดยเปรียบเทียบกับรูปมาตรฐาน วิธีการทดสอบทำได้โดยนำชิ้นงานหลังการทดสอบมาเปรียบเทียบกับรูปมาตรฐาน โดยการวัดการโป่งพองของสารที่เคลือบผิวชิ้นงาน วัดเทียบกับขนาดและความถี่ของการโป่งพอง โดยเริ่มสเกลจาก 0 ถึง 10 โดยที่ 10 หมายถึงไม่มีการโป่งพองเกิดขึ้นและ 0 หมายถึงฟิล์มที่เคลือบผิวถูกทำลายหมด ความถี่ของการโป่งพอง แสดงในเทอมของความหนาแน่น คือ ความหนาแน่น (dense, D), ความหนาแน่นปานกลาง (medium dense, MD), ปานกลาง (medium, M) และเล็กน้อย (few, F) (ภาคผนวก ฉ.3)

- การแตกกระจาย มาตรฐาน ASTM D 660 ได้เสนอวิธีประเมินค่าการแตกกระจาย โดยเปรียบเทียบกับรูปมาตรฐาน (ภาคผนวก ฉ.4)

บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย

ตาราง 4.1 ข้อมูลอากาศของสถานีทดลอง ม.อ., อ.เทพา และอ.ขนอมระหว่างเดือน พ.ค. 2539 - เม.ย. 2540

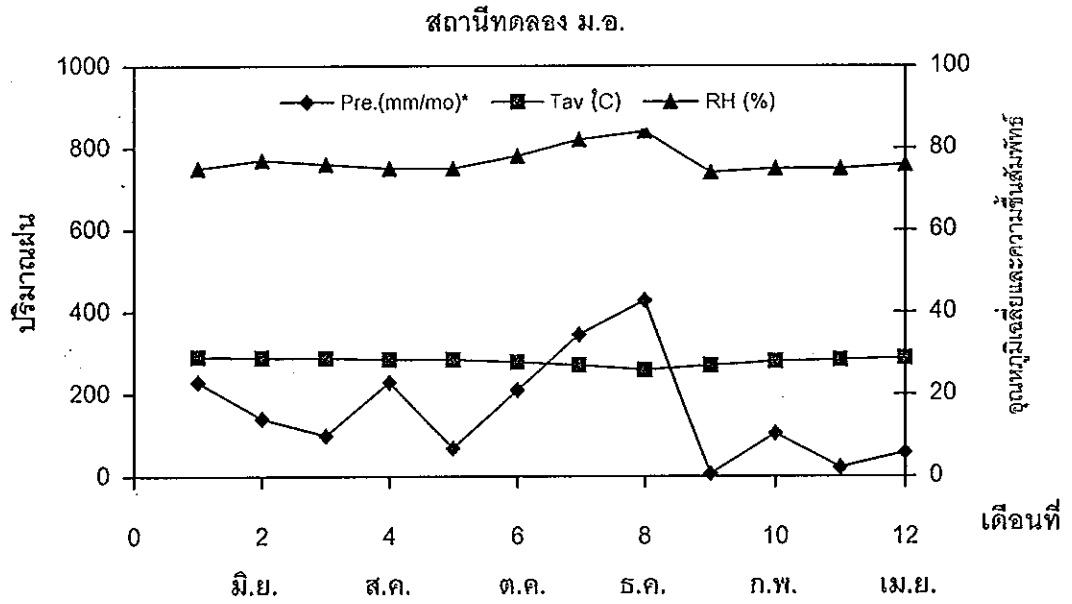
| เดือน ที่ | เดือน | อุณหภูมิเฉลี่ย (° ซ.) | | | ความชื้นสัมพัทธ์ (%) | | | ปริมาณฝน (มม./เดือน) | | |
|--------------|---------------|------------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|------------------------|---------|---------|
| | | ม.อ. | อ.เทพา | อ.ขนอม | ม.อ. | อ.เทพา | อ.ขนอม | ม.อ. | อ.เทพา | อ.ขนอม |
| 1 | พ.ค. | 29.10 | 28.51 | - | 75.00 | 78.35 | - | 229.40 | 50.40 | - |
| 2 | มิ.ย. | 28.90 | 28.64 | 23.90 | 77.00 | 77.68 | 73.48 | 141.00 | 111.10 | 112.28 |
| 3 | ก.ค. | 28.80 | 28.46 | 28.80 | 76.00 | 76.30 | 73.94 | 99.20 | 44.20 | 142.20 |
| 4 | ส.ค. | 28.40 | 27.97 | 28.70 | 75.00 | 77.99 | 71.58 | 229.40 | 109.90 | 93.80 |
| 5 | ก.ย. | 28.40 | 28.19 | 28.50 | 75.00 | 74.29 | 71.58 | 69.00 | 211.80 | 93.80 |
| 6 | ต.ค. | 27.80 | 27.72 | 27.20 | 78.00 | 81.76 | 79.74 | 210.80 | 215.10 | 477.20 |
| 7 | พ.ย. | 27.10 | 26.75 | 27.45 | 82.00 | 83.47 | 77.55 | 345.00 | 490.40 | 565.70 |
| 8 | ธ.ค. | 25.90 | 26.63 | 26.18 | 84.00 | 85.11 | 77.86 | 428.30 | 803.60 | 589.10 |
| 9 | ม.ค. | 27.00 | 26.79 | 27.43 | 74.00 | 72.28 | 68.83 | 7.00 | 0.00 | 21.60 |
| 10 | ก.พ. | 28.00 | 27.41 | 28.17 | 75.00 | 77.45 | 72.11 | 104.50 | 49.80 | 15.80 |
| 11 | มี.ค. | 28.40 | 27.99 | 28.93 | 75.00 | 75.30 | 70.19 | 21.70 | 14.80 | 7.20 |
| 12 | เม.ย. | 28.90 | 28.49 | 29.40 | 76.00 | 76.59 | 71.55 | 58.40 | 104.60 | 181.10 |
| | รวม เฉลี่ย | 28.06 | 27.71 | 27.70 | 76.83 | 78.05 | 73.49 | 1943.70 | 2205.70 | 2350.08 |
| | | | | | | | | 161.98 | 183.81 | 213.64 |

ตาราง 4.2 แสดงปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ โดยวิธี alkali filter paper และปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ โดยวิธี dry gauze ของสถานีทดลอง ม.อ. อ.เทพา และ อ.ชนอมระหว่างเดือน พ.ค. 2539 - เม.ย. 2540

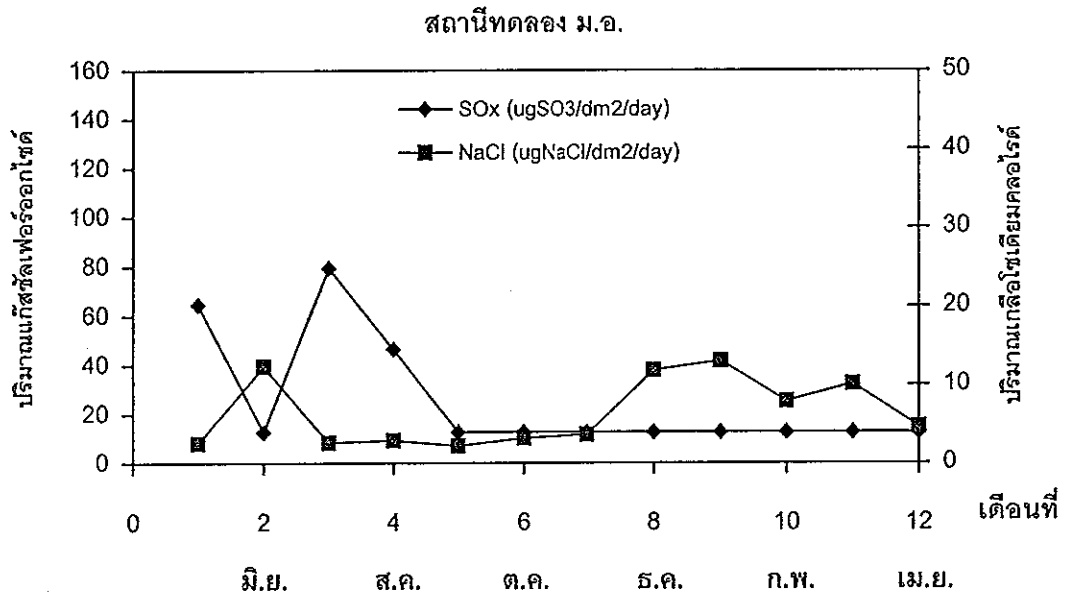
| เดือน ที่ | เดือน | SO _x (µgSO ₃ /dm ² /day) | | | NaCl (µgNaCl/dm ² /day) | | |
|--------------|--------|---|--------|--------|------------------------------------|--------|--------|
| | | ม.อ. | อ.เทพา | อ.ชนอม | ม.อ. | อ.เทพา | อ.ชนอม |
| 1 | พ.ค. | <12.67 | 46.85 | <12.67 | 2.53 | 5.97 | 10.72 |
| 2 | มิ.ย. | 64.69 | <12.67 | 152.88 | 12.39 | 26.50 | 12.11 |
| 3 | ก.ค. | < 12.67 | <12.67 | 143.61 | 2.62 | 19.90 | 13.69 |
| 4 | ส.ค. | 79.40 | 26.60 | 50.40 | 2.90 | 25.66 | 10.68 |
| 5 | ก.ย. | 46.53 | <12.67 | <12.67 | < 2.22 | 10.37 | 10.18 |
| 6 | ต.ค. | < 12.67 | <12.67 | <12.67 | 3.19 | 5.35 | 6.58 |
| 7 | พ.ย. | < 12.67 | <12.67 | 27.69 | 3.65 | 23.73 | 9.86 |
| 8 | ธ.ค. | < 12.67 | <12.67 | 18.38 | 11.86 | 30.83 | 14.14 |
| 9 | ม.ค. | < 12.67 | <12.67 | 26.99 | 13.06 | 31.41 | 11.31 |
| 10 | ก.พ. | < 12.67 | <12.67 | 50.38 | 7.90 | 47.51 | 12.86 |
| 11 | มี.ค. | < 12.67 | <12.67 | 65.23 | 10.14 | 33.07 | 11.17 |
| 12 | เม.ย. | < 12.67 | 81.03 | 113.71 | 4.67 | 21.10 | 6.77 |
| | รวม | 304.65 | 268.51 | 687.28 | 77.13 | 281.40 | 131.34 |
| | เฉลี่ย | 25.39 | 22.38 | 57.27 | 6.43 | 23.45 | 10.95 |

หมายเหตุ ขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ของ

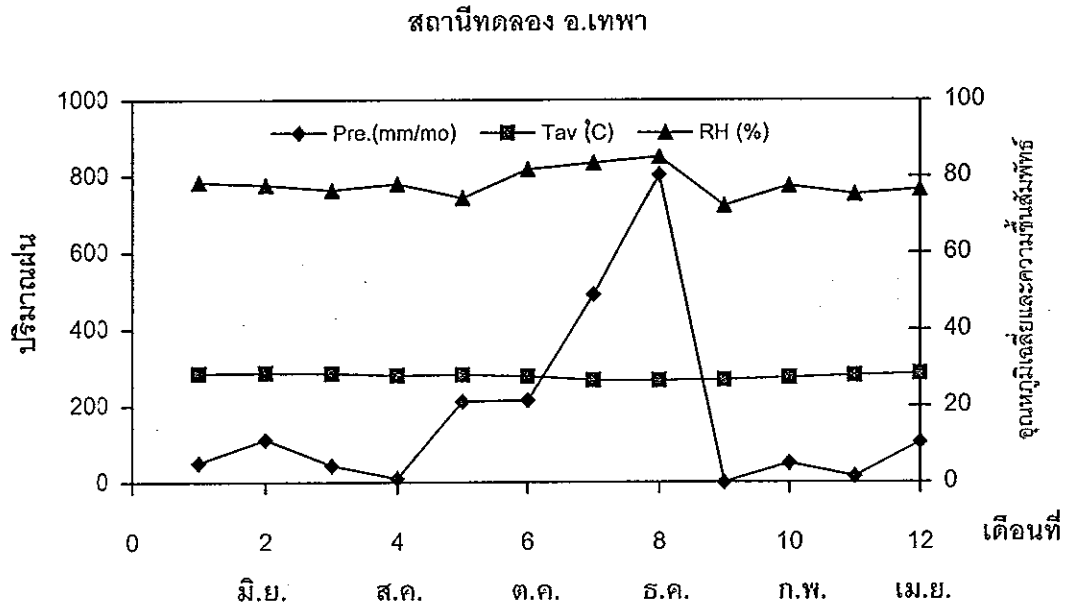
- ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ โดยวิธี alkali filter paper = 12.67 µgSO₃/dm²/day
- ปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ โดยวิธี dry gauze = 2.22 µgNaCl/dm²/day



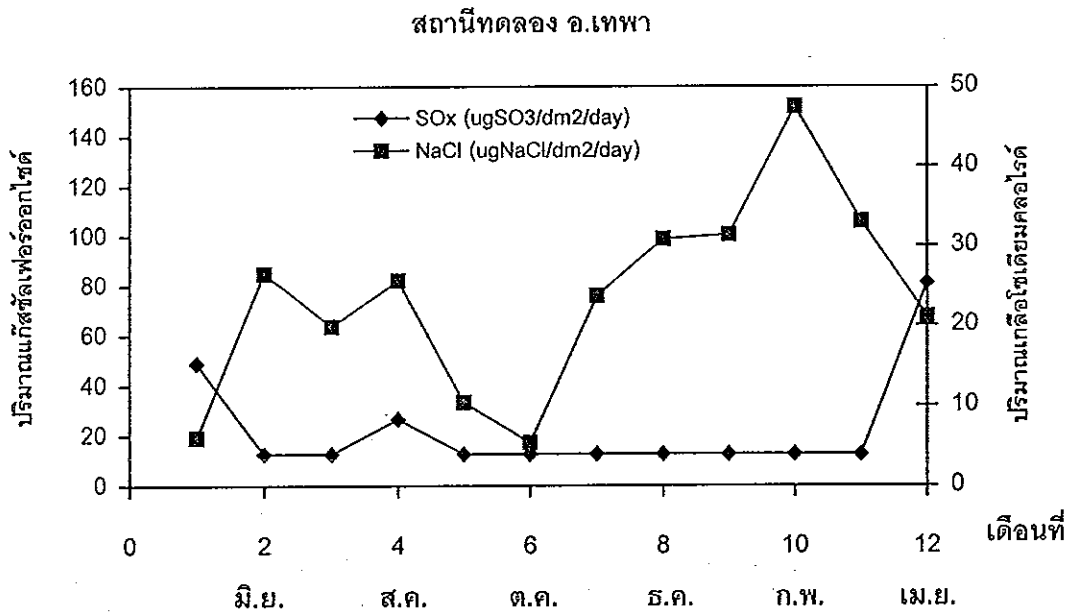
ภาพประกอบ 4.1 แสดงสภาพภูมิอากาศของ ม.อ. ระหว่าง พ.ค. 2539 - เม.ย. 2540
*(มิลลิเมตรต่อเดือน)



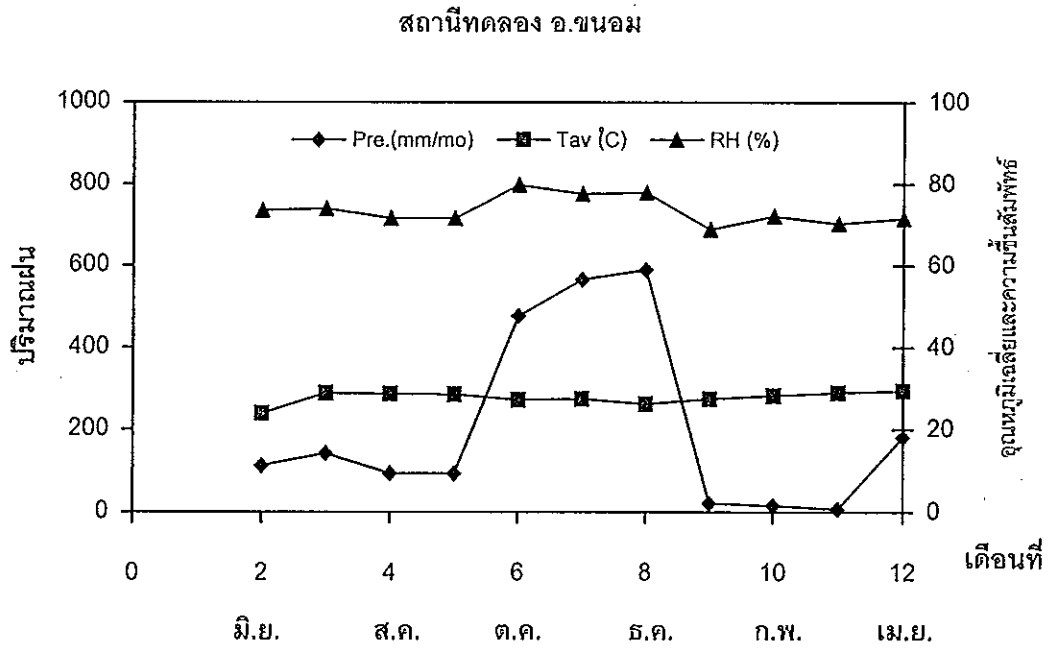
ภาพประกอบ 4.2 แสดงปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์และปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์
ของ ม.อ. ระหว่าง พ.ค. 2539 - เม.ย. 2540



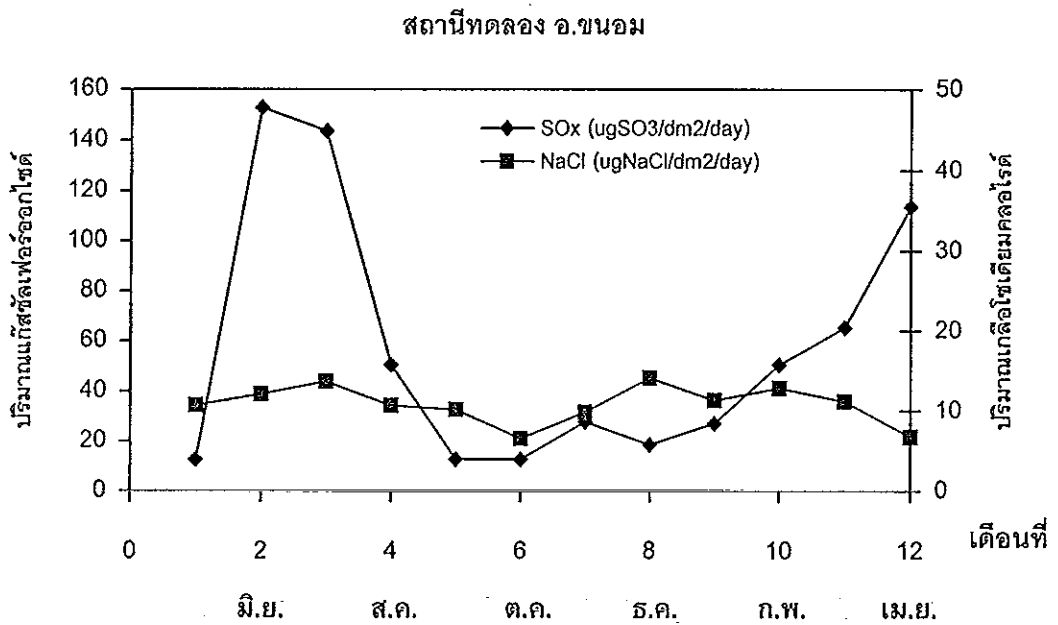
ภาพประกอบ 4.3 แสดงสภาพภูมิอากาศของ อ.เทพา ระหว่าง พ.ค. 2539 - เม.ย. 2540



ภาพประกอบ 4.4 แสดงปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์และปริมาณแกลือโซเดียมคลอไรด์ของ อ.เทพา ระหว่าง พ.ค. 2539 - เม.ย. 2540



ภาพประกอบ 4.5 แสดงสภาพภูมิอากาศของ อ.ชนอม ระหว่าง พ.ศ. 2539 - เม.ย. 2540



ภาพประกอบ 4.6 แสดงปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์และปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ของ อ.ชนอม ระหว่าง พ.ศ. 2539 - เม.ย. 2540

วิเคราะห์ผล สภาพภูมิอากาศและปริมาณมลสารในบรรยากาศ

สภาพภูมิอากาศและปริมาณมลสารในบรรยากาศโดยเฉลี่ยในรอบ 1 ปี สามารถสรุปได้ดังตาราง 4.3

ตาราง 4.3 สภาพภูมิอากาศและปริมาณมลสารในบรรยากาศโดยเฉลี่ยในรอบ 1 ปี

| บรรยากาศ | อุณหภูมิเฉลี่ย (°ซ.) | ความชื้นสัมพัทธ์ (%) | ปริมาณฝน (มม./เดือน) | SO _x (µgSO ₂ /dm ² /day) | NaCl (µgNaCl/dm ² /day) |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---|------------------------------------|
| ชนบท | 28.06 | 76.83 | 161.98 | 25.39 | 6.43 |
| อุตสาหกรรม-ชายทะเล | 27.70 | 73.49 | 213.64 | 57.27 | 10.95 |
| ชายทะเล | 27.71 | 78.05 | 183.81 | 22.38 | 23.45 |

จากตาราง 4.3 จะเห็นได้ว่าสภาพภูมิอากาศโดยเฉลี่ยในแต่ละบรรยากาศ อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน จึงส่งผลต่อการกักต้อนไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าสูงกว่า 25 °ซ. ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่เกิดปฏิกิริยาได้ดี ดังนั้นหากอุณหภูมิยิ่งสูงก็จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น ส่วนความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 50-80 % ซึ่งเป็นความชื้นวิกฤตของเหล็ก (สมเกียรติ รุ่งทองใบสุรีย์, 2537 : Barton, 1976 : Uhlig and Revie, 1985) ส่วนปริมาณมลสารในบรรยากาศจะมีค่าแตกต่างกันมากในแต่ละบรรยากาศ โดยที่ปริมาณแก๊สโอไซด์มลคลอไรด์เฉลี่ยในบรรยากาศชายทะเลมีมากกว่าบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเลและชนบทประมาณ 1 และ 3 เท่า ตามลำดับ เนื่องมาจากที่ตั้งของสถานีทดลองในแต่ละบรรยากาศมีระยะห่างจากชายฝั่งไม่เท่ากัน กล่าวคือ มีระยะห่างจากชายฝั่งเป็น 25, 500 และ 30,000 เมตร ในบรรยากาศชายทะเล, อุตสาหกรรม-ชายทะเลและชนบท ตามลำดับ ซึ่งระยะห่างจากชายฝั่งที่ปลอดภัยต่อการกักต้อน คือ 25,000 เมตร (Matsushima, 1994) ดังนั้นปริมาณแก๊สโอไซด์มลคลอไรด์จึงไม่น่ามีผลต่อการกักต้อนในบรรยากาศชนบท

สำหรับปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ พบว่า ในบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเลมีค่าเป็น 2 เท่าของบรรยากาศชนบทและชายทะเล เนื่องจากบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเล เป็นที่ตั้งของบริษัทผลิตไฟฟ้าขอม จำกัด ซึ่งใช้เชื้อเพลิง (น้ำมันเตา) ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ จึงน่าจะมีผลต่อการกัดกร่อนมากกว่าบรรยากาศชนบทและชายทะเล แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันบริษัทผลิตไฟฟ้าขอม จำกัด ได้นำแก๊สธรรมชาติมาใช้ทดแทนน้ำมันเตา จึงทำให้ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพการใช้เชื้อเพลิง

ตาราง 4.4 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเปลี่ยนที่สถานีทดลอง ม.อ.
เมื่อวางชิ้นงานในกลางแจ้ง ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

| เวลา (เดือนที่) | ลักษณะทางกายภาพชิ้นงาน |
|-----------------|--|
| 1 | <p>ด้านบน</p> <ul style="list-style-type: none"> - เกิดสนิมสีส้มแดงทั่วทั้งชิ้นงาน และสนิมสีส้มตามบริเวณที่น้ำขังได้ เช่น บริเวณรอยยึดของหิ้งอุปกรณ์ - ในชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมมีสนิมหนาแน่นตามแนวรอยเชื่อม <p>ด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - เกิดสนิมสีส้มแดงประมาณ 10 % ของชิ้นงาน และสนิมสีส้มเป็นจุดๆ กระจายอยู่ทั่วไป - ในชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมมีสนิมหนาแน่นตามแนวรอยเชื่อม |
| 3 | <p>ด้านบน</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานปกติและที่มีรอยเชื่อม เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % - ชิ้นงานหิ้งอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) เกิดสนิมสีส้มแดงประมาณ 90 % <p>ด้านล่าง (ภาพประกอบ 4.7)</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม และหิ้งอ 90 องศาที่วางคว่ำ เกิดสนิมสีส้มแดงประมาณ 90 % - ชิ้นงานปกติเกิดสนิมสีส้มแดงประมาณ 50 % - ชิ้นงานหิ้งอ 90 องศาที่วางหงาย เกิดสนิมสีส้มแดงและสนิมสีส้มกระจายเป็นจุดๆ ประมาณ 25 % |
| 6 | <p>ด้านบน</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทุกชิ้นงาน เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % <p>ด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานปกติและที่มีรอยเชื่อม เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % - ชิ้นงานหิ้งอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) เกิดสนิมสีส้มแดงประมาณ 98 % |
| 9, 12 | <p>ด้านบน และด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทุกชิ้นงาน เกิดสนิมสีน้ำตาลแดง 100 % |

ตาราง 4.5 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเปลี่ยนที่สถานีทดลอง ม.อ.
เมื่อวางชิ้นงานใหม่ ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

| เวลา (เดือนที่) | ลักษณะทางกายภาพ |
|-----------------|--|
| 1 | <p>ด้านบน</p> <ul style="list-style-type: none"> - เกิดสนิมสีส้มกระจายอยู่ทั่วไป ประมาณ 10 % - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม และหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) เกิดสนิมสีส้มแดง ประมาณ 20 % <p>ด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม, หักงอ 90 องศาที่วางคว่ำ และหักงอ 90 องศา ที่วางหงาย เกิดสนิมสีส้มแดงประมาณ 50 %, 10 % และ 5 % ตามลำดับ - ชิ้นงานปกติ เกิดสนิมสีส้มแดงและส้มประมาณ 20 % |
| 3 | <p>ด้านบน</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม และปกติ เกิดสนิมสีส้มแดง ประมาณ 90 และ 50 % ตามลำดับ <p>ด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม, หักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) และปกติ เกิดสนิมสีส้มแดง ประมาณ 90 %, 80 % และ 50 % ตามลำดับ |
| 6 | <p>ด้านบน</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมและหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % - ชิ้นงานปกติ เกิดสนิมสีส้มแดงและส้มประมาณ 50 % <p>ด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม และหักงอ 90 องศาที่วางหงาย เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % - ชิ้นงานหักงอ 90 องศาที่วางคว่ำและปกติ เกิดสนิมสีส้มแดงและส้มประมาณ 95 และ 80% ตามลำดับ |
| 9 | <p>ด้านบน</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม และหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % - ชิ้นงานปกติ เกิดสนิมสีส้มแดงและส้มประมาณ 50% <p>ด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม และหักงอ 90 องศาที่วางหงาย เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % - ชิ้นงานปกติ เกิดสนิมสีส้มแดงและส้มประมาณ 90% |
| 12 | <p>ด้านบน</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทุกชิ้นงาน เกิดสนิมสีน้ำตาลแดง 100 % <p>ด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมและหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % - ชิ้นงานปกติ เกิดสนิมสีส้มแดงและส้มประมาณ 95 % |

ตาราง 4.6 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเปลี่ยนที่สถานีทดลอง อ.เทพา
เมื่อวางชิ้นงานในกลางแจ้ง ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

| เวลา (เดือนที่) | ลักษณะทางกายภาพ |
|-----------------|--|
| 1 | <p>ด้านบน</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % - ชิ้นงานปกติ เกิดสนิมสีส้มแดงประมาณ 80 % - ชิ้นงานหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) เกิดสนิมสีส้มแดงประมาณ 80 % และมีคราบสีส้ม <p>ด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม เกิดสนิมสีส้มแดงประมาณ 50 % - ชิ้นงานปกติและหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) เกิดสนิมสีส้มแดงประมาณ 20 % และมีคราบสีส้ม |
| 3 | <p>ด้านบน</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทุกชิ้นงาน เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % <p>ด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % - ชิ้นงานปกติและที่มีรอยเชื่อม เกิดสนิมสีส้มแดงประมาณ 98 % |
| 6 | <p>ด้านบน และด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทุกชิ้นงาน เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % |
| 9 | <p>ด้านบน และด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทุกชิ้นงาน เกิดสนิมสีดำ, น้ำตาลแดง และส้ม 100 % - ชิ้นงานหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) ด้านที่หันเข้าสู่ทะเล มีปริมาณสนิมหนาแน่นกว่าอีกด้าน - มีผลึกของเกลือและคราบสีขาวบนพื้นผิวของชิ้นงาน (ภาพประกอบ 4.8) |
| 12 | <p>ด้านบน และด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ลักษณะทั่วไปเหมือนกับเดือนที่ 9 - มีผลึกของเกลือและคราบสีขาวบนพื้นผิวของชิ้นงาน โดยที่ด้านบนมากกว่าด้านล่าง - สนิมมีการแตกออกเป็นชั้นๆ (ภาพประกอบ 4.9) |

ตาราง 4.7 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเปลี่ยนที่สถานีทดลอง อ.เทพา
เมื่อวางชิ้นงานในร่ม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

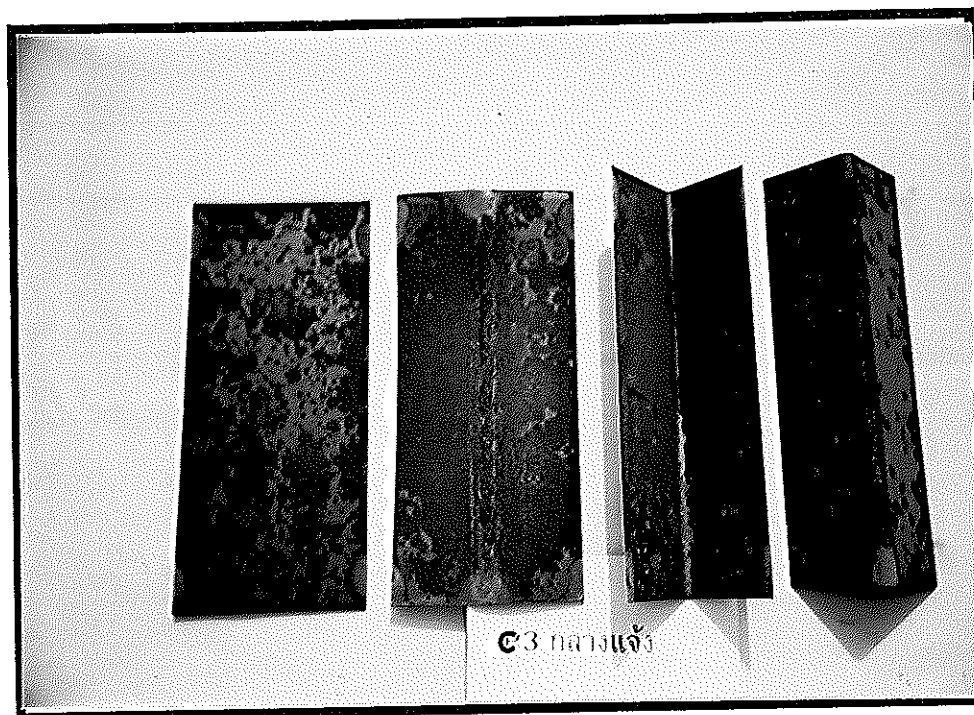
| เวลา (เดือนที่) | ลักษณะทางกายภาพ |
|-----------------|---|
| 1 | <p>ด้านบน</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานหักงอ 90 องศาที่วางคว่ำ เกิดสนิมสีน้ำตาลแดง 100 % - ชิ้นงานปกติ เกิดสนิมสีน้ำตาลแดงประมาณ 80 % และชิ้นงานหักงอ 90 องศา ที่วางคว่ำและที่มีรอยเชื่อม เกิดสนิมสีน้ำตาลแดงประมาณ 50% <p>ด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) , ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม และชิ้นงานปกติ เกิดสนิมสีน้ำตาลแดง และส้มประมาณ 50%, 20 และ 10% ตามลำดับ - ชิ้นงานหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) ด้านที่หันเข้าสู่ทะเล มีปริมาณสนิมหนาแน่นกว่าอีกด้าน |
| 3, 6 | <p>ด้านบน และด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทุกชิ้นงาน เกิดสนิมสีน้ำตาลแดง 100 % |
| 9, 12 | <p>ด้านบน และด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทุกชิ้นงาน เกิดสนิมสีน้ำตาลแดง 100 % - มีผลึกของเกลือและคราบสีขาวบนพื้นผิวของชิ้นงาน โดยที่ด้านบนมากกว่าด้านล่าง |

ตาราง 4.8 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเปลี่ยนที่สถานีทดลอง อ.ชนอม
เมื่อวางชิ้นงานในกลางแจ้ง ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

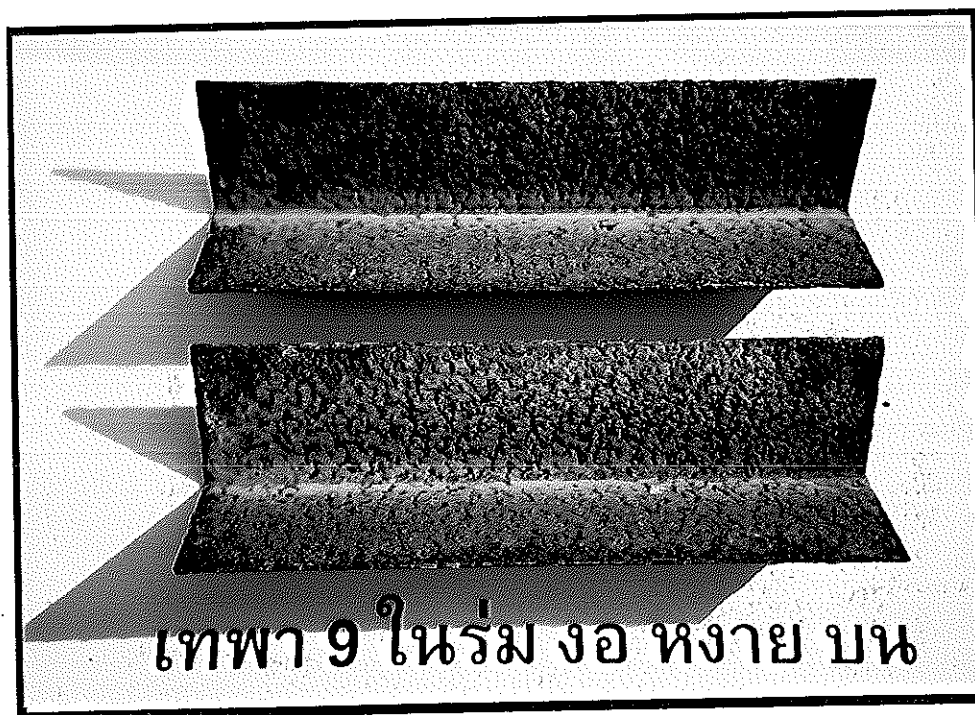
| เวลา (เดือนที่) | ลักษณะทางกายภาพ |
|-----------------|---|
| 1 | <p>ด้านบน</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % - ชิ้นงานปกติและ หักงอ 90 องศา(วางคว่ำ, วางหงาย) เกิดสนิมสีส้มแดง ประมาณ 95 และ 20 % ตามลำดับ <p>ด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม เกิดสนิมสีส้มแดง และ ส้ม ประมาณ 80 % - ชิ้นงานปกติ และ หักงอ 90 องศา(วางคว่ำ, วาง หงาย) เกิดสนิมสีส้มแดง และ ส้ม ประมาณ 50 % |
| 3, 6 | <p>ด้านบน และด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทุกชิ้นงาน เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % |
| 9, 12 | <p>ด้านบน และด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทุกชิ้นงาน เกิดสนิมสีน้ำตาลแดง 100 % (ภาพประกอบ 4.10) |

ตาราง 4.9 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเปลี่ยนที่สถานีทดลอง อ.ชนอม
เมื่อวางชิ้นงานในร่ม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

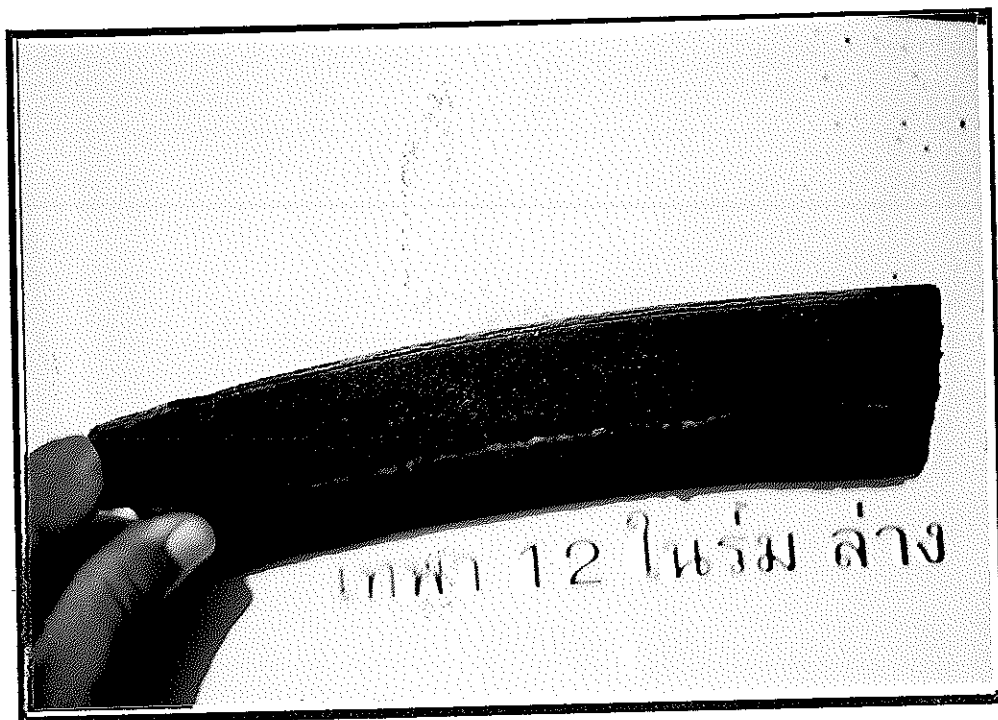
| เวลา (เดือนที่) | ลักษณะทางกายภาพ |
|-----------------|---|
| 1 | <p>ด้านบน</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) และที่มีรอยเชื่อม เกิดสนิมสีส้มแดง 100% - ชิ้นงานปกติเกิดสนิมสีส้มแดงประมาณ 98 % <p>ด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม, หักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) และปกติ เกิดสนิมสีส้มแดง ประมาณ 50, 40 และ 20% ตามลำดับ |
| 3 | <p>ด้านบน และด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทุกชิ้นงาน เกิดสนิมสีส้มแดง 100 % |
| 6 | <p>ด้านบน และด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทุกชิ้นงาน เกิดสนิมสีน้ำตาลแดง 100% |
| 9, 12 | <p>ด้านบน และด้านล่าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทุกชิ้นงาน เกิดสนิมสีน้ำตาล และดำ 100 % |



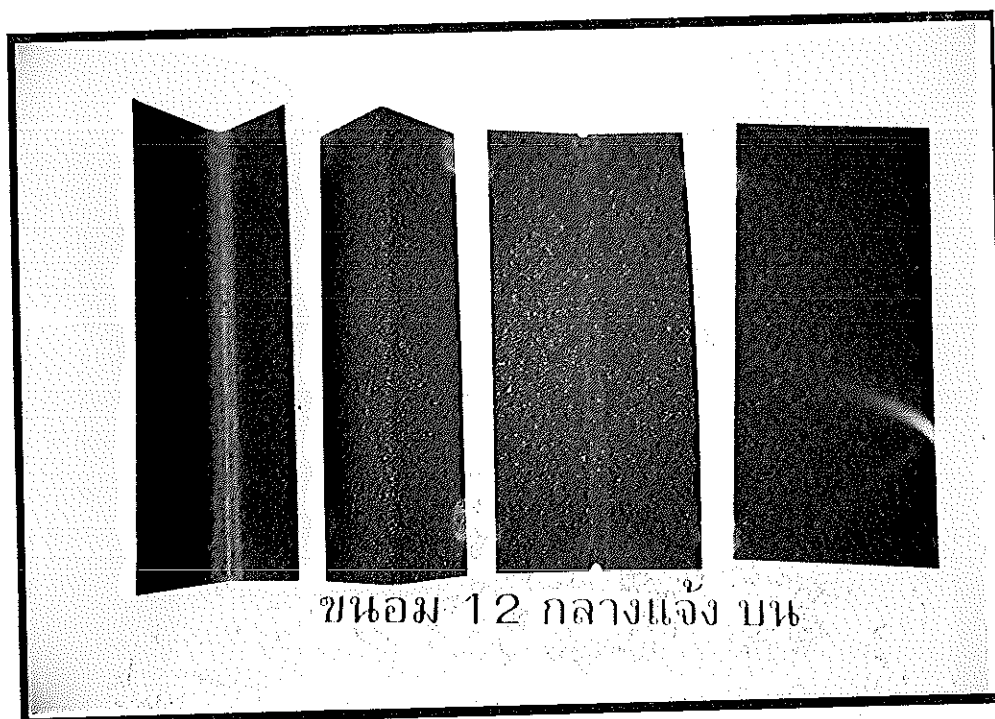
ภาพประกอบ 4.7 ลักษณะทางกายภาพด้านล่างของชิ้นงานเปลือยปกติ, ที่มีรอยเชื่อม และหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) (เรียงจากซ้ายไปขวา) ที่สถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางในกลางแจ้ ที่ระยะเวลา 3 เดือน



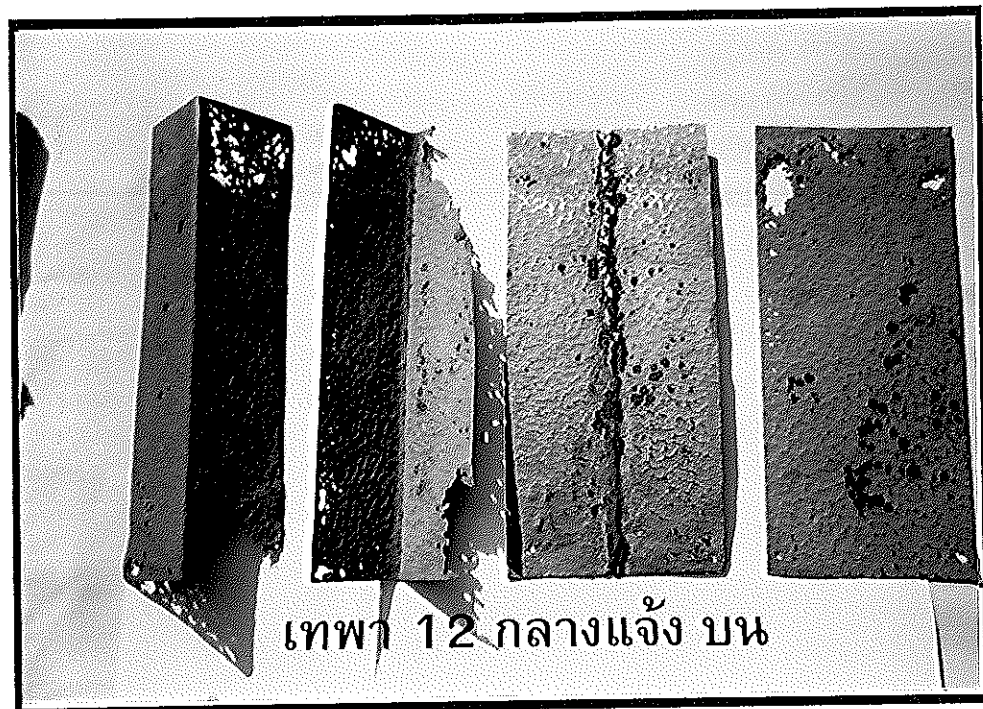
ภาพประกอบ 4.8 แสดงผลึกของเกลือและคราบสีขาวบนชิ้นงานที่สถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางในร่ม ที่ระยะเวลา 9 เดือน



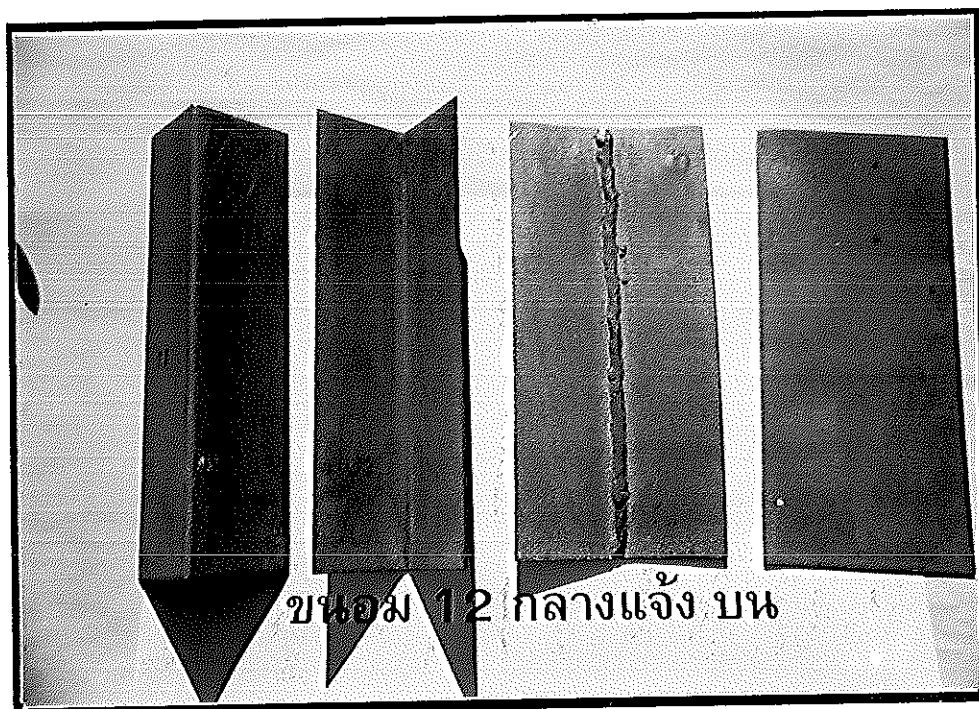
ภาพประกอบ 4.9 การแตกเป็นชั้นๆ ของสนิม ที่สถานีทดลอง อ.เทพา ระยะเวลา 12 เดือน



ภาพประกอบ 4.10 ลักษณะทางกายภาพด้านบนของชิ้นงานเปลือยหักงอ 90 องศา (วางหงาย, วางคว่ำ), ที่มีรอยเชื่อมและปกติ (เรียงจากซ้ายไปขวา) ที่สถานีทดลอง อ.খনอม เมื่อวางในกลางแจ้งที่ระยะเวลา 12 เดือน



ภาพประกอบ 4.11 ลักษณะของชิ้นงานเปลือยหลังจากล้างสนิมที่สถานีทดลอง อ.เทพา ระยะเวลา 12 เดือน



ภาพประกอบ 4.12 ลักษณะของชิ้นงานเปลือยหลังจากล้างสนิมที่สถานีทดลอง อ.ชนอม ระยะเวลา 12 เดือน

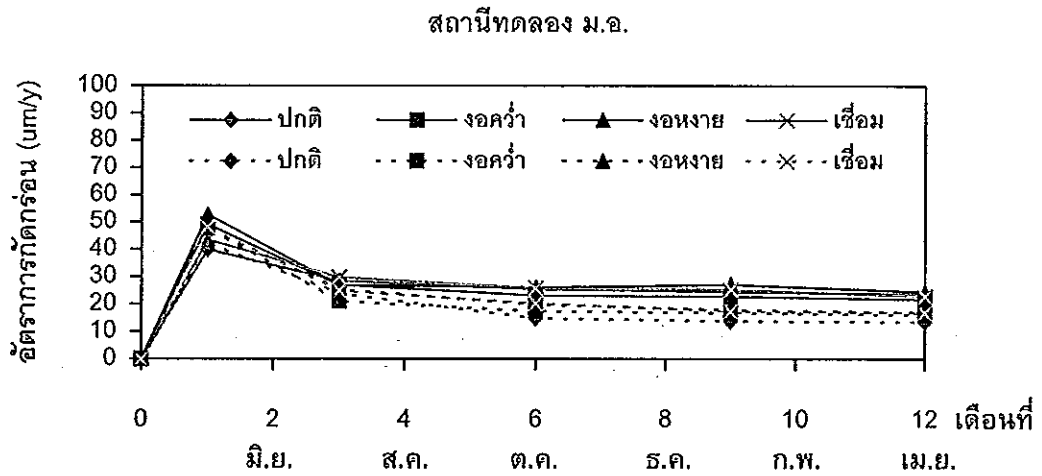
ตาราง 4.10 อัตราการกักต้อนของชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ., อ.เทพา และอ.ขนอม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

| อัตราการกักต้อน ($\mu\text{m/y}$) | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------|--------|----------------------|--------|----------|--------|-----------------------|--------|
| สถานีทดลอง ม.อ. | | | | | | | | |
| เวลา (เดือน) | ชิ้นงานปกติ | | ชิ้นงานหักงอ 90 องศา | | | | ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม | |
| | | | วางคว่ำ | | วางหงาย | | | |
| | กลางแจ้ง | ใหม่ | กลางแจ้ง | ใหม่ | กลางแจ้ง | ใหม่ | กลางแจ้ง | ใหม่ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 39.92 | 42.26 | 49.15 | 48.08 | 52.82 | 47.91 | 43.56 | 48.20 |
| 3 | 28.50 | 23.91 | 26.96 | 21.13 | 26.97 | 25.35 | 29.82 | 24.85 |
| 6 | 25.50 | 14.80 | 23.05 | 17.49 | 26.03 | 19.85 | 25.82 | 20.24 |
| 9 | 24.44 | 13.76 | 22.74 | 16.86 | 27.10 | 17.85 | 25.35 | 17.44 |
| 12 | 23.72 | 13.49 | 21.67 | 16.16 | 24.47 | 16.97 | 22.82 | 16.79 |
| สถานีทดลอง อ.เทพา | | | | | | | | |
| เวลา | กลางแจ้ง | ใหม่ | กลางแจ้ง | ใหม่ | กลางแจ้ง | ใหม่ | กลางแจ้ง | ใหม่ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 63.89 | 63.77 | 70.98 | 70.92 | 75.87 | 76.99 | 68.28 | 70.38 |
| 3 | 42.93 | 46.67 | 46.14 | 46.12 | 53.07 | 49.59 | 41.00 | 43.51 |
| 6 | 31.45 | 31.61 | 29.34 | 32.51 | 28.65 | 31.42 | 24.83 | 34.69 |
| 9 | 109.75 | 110.95 | 186.86 | 151.23 | 192.08 | 178.75 | 99.16 | 97.86 |
| 12 | 319.64 | 259.10 | 420.46 | 253.27 | 442.12 | 284.75 | 281.34 | 144.28 |
| สถานีทดลอง อ.ขนอม | | | | | | | | |
| เวลา | กลางแจ้ง | ใหม่ | กลางแจ้ง | ใหม่ | กลางแจ้ง | ใหม่ | กลางแจ้ง | ใหม่ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 71.59 | 64.82 | 57.81 | 61.99 | 63.76 | 65.04 | 62.22 | 64.47 |
| 3 | 36.86 | 40.06 | 35.75 | 40.78 | 43.13 | 47.49 | 41.29 | 36.48 |
| 6 | 33.86 | 32.22 | 31.45 | 33.62 | 37.08 | 35.53 | 32.63 | 31.22 |
| 9 | 34.24 | 32.51 | 32.04 | 31.39 | 37.33 | 38.61 | 35.30 | 32.33 |
| 12 | 29.21 | 28.40 | 31.38 | 27.26 | 32.61 | 31.30 | 29.48 | 27.78 |

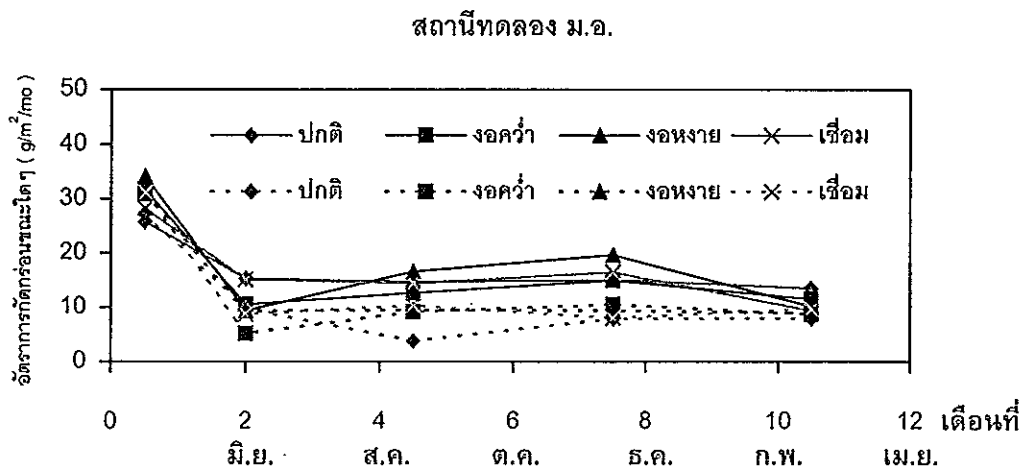
ตาราง 4.11 อัตราการกักต่อนขณะใดๆ ของชั้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ.,
อ.เทพา และอ.ชนอม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

| อัตราการกักต่อนขณะใดๆ (g/m ² /mo)* | | | | | | | | |
|---|-------------|--------|----------------------|--------|----------|--------|-----------------------|--------|
| สถานีทดลอง ม.อ. | | | | | | | | |
| เวลา (เดือน) | ชั้นงานปกติ | | ชั้นงานหักงอ 90 องศา | | | | ชั้นงานที่มีรอยเชื่อม | |
| | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม |
| 1 | 25.80 | 27.30 | 31.74 | 31.06 | 34.12 | 30.97 | 28.20 | 31.13 |
| 3 | 15.34 | 9.77 | 10.54 | 5.17 | 9.35 | 9.36 | 15.14 | 8.77 |
| 6 | 14.68 | 3.81 | 12.68 | 9.18 | 16.60 | 9.50 | 14.43 | 10.36 |
| 9 | 15.08 | 7.95 | 14.94 | 10.55 | 19.68 | 9.42 | 16.50 | 8.07 |
| 12 | 13.56 | 8.00 | 11.57 | 8.80 | 10.21 | 8.97 | 9.43 | 9.77 |
| สถานีทดลอง อ.เทพา | | | | | | | | |
| เวลา | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม |
| 1 | 41.28 | 41.17 | 45.87 | 45.84 | 49.01 | 49.76 | 44.12 | 45.47 |
| 3 | 22.36 | 25.98 | 23.27 | 23.27 | 28.63 | 24.77 | 18.98 | 20.83 |
| 6 | 12.65 | 10.49 | 7.74 | 11.91 | 2.21 | 8.17 | 5.26 | 16.45 |
| 9 | 179.24 | 181.43 | 336.99 | 261.26 | 348.41 | 318.01 | 166.57 | 151.27 |
| 12 | 616.46 | 456.03 | 726.06 | 359.62 | 772.31 | 386.84 | 538.29 | 180.65 |
| สถานีทดลอง อ.ชนอม | | | | | | | | |
| เวลา | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม |
| 1 | 46.25 | 41.86 | 37.36 | 40.04 | 41.19 | 42.03 | 40.08 | 41.65 |
| 3 | 13.39 | 18.76 | 16.74 | 20.39 | 22.14 | 26.03 | 20.86 | 15.33 |
| 6 | 20.38 | 16.09 | 17.93 | 17.46 | 20.48 | 15.57 | 15.83 | 17.16 |
| 9 | 22.86 | 21.63 | 21.70 | 17.57 | 24.71 | 29.29 | 26.35 | 22.52 |
| 12 | 8.95 | 10.22 | 19.04 | 20.05 | 11.76 | 5.80 | 7.76 | 9.04 |

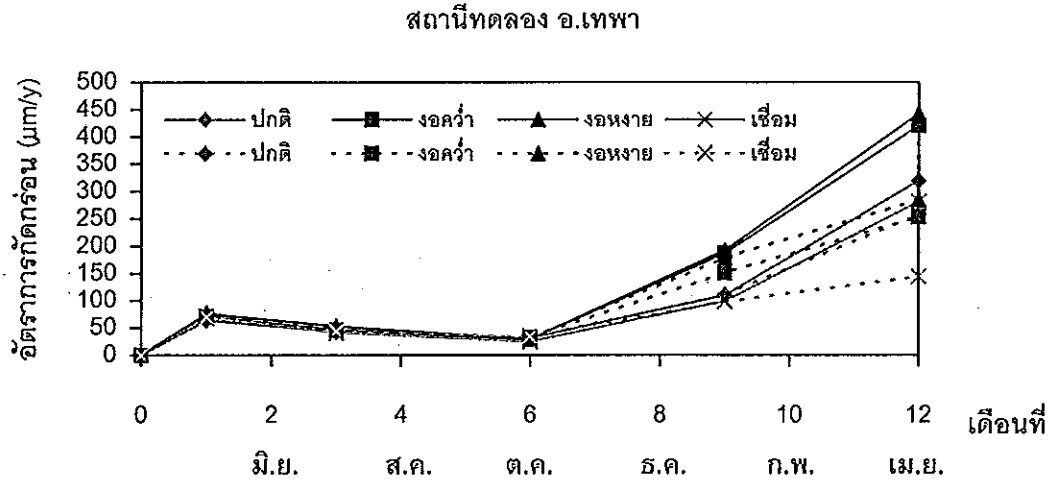
* (กรัม/ตารางเมตร/เดือน)



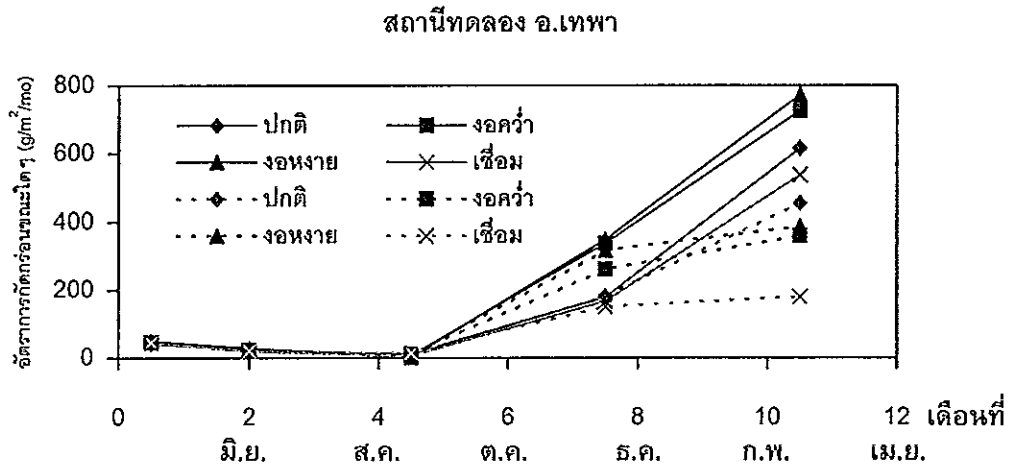
ภาพประกอบ 4.13 แสดงอัตราการกักต้อนของชิ้นงานเปลือย (ปลกดี, หักงอ 90 องศา (งามคว่า, งามหงาย) และมีรอยเชื่อม) ของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



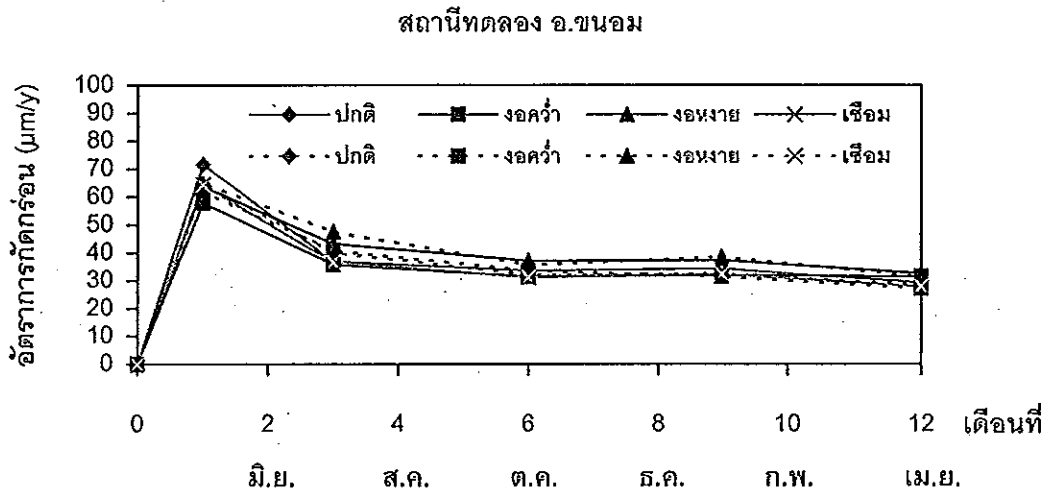
ภาพประกอบ 4.14 แสดงอัตราการกักต้อนขณะใดๆ ของชิ้นงานเปลือย (ปลกดี, หักงอ 90 องศา (งามคว่า, งามหงาย) และมีรอยเชื่อม) ของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



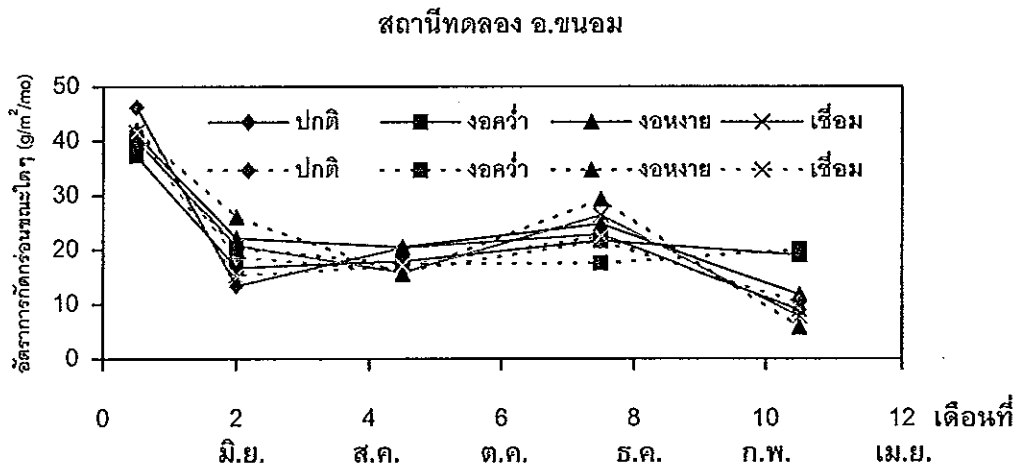
ภาพประกอบ 4.15 แสดงอัตราการกักต้อนของชิ้นงานเปลือย (ปกติ, หักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) และมีรอยเชื่อม) ของสถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



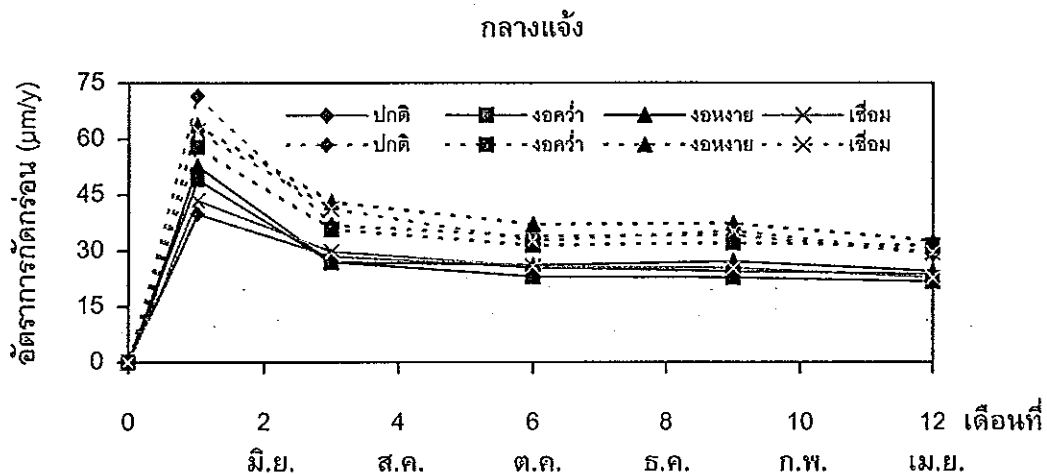
ภาพประกอบ 4.16 แสดงอัตราการกักต้อนขณะใดๆ ของชิ้นงานเปลือย (ปกติ, หักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) และมีรอยเชื่อม) ของสถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



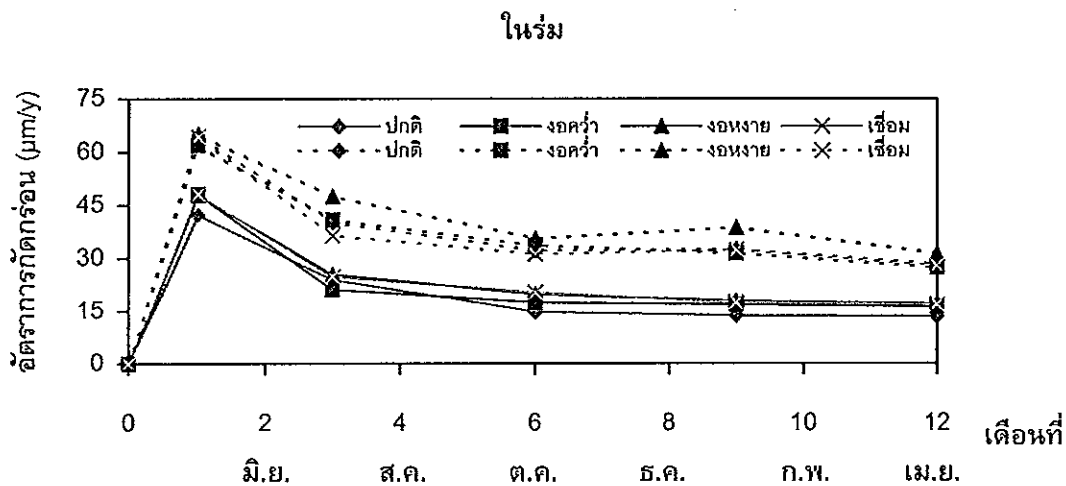
ภาพประกอบ 4.17 แสดงอัตราการกำจัดกร่อนของซิงงานเปลือย (ปกติ, หักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) และมีรอยเชื่อม) ของสถานีทดลอง อ.ชนอม เมื่อวางซิงงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



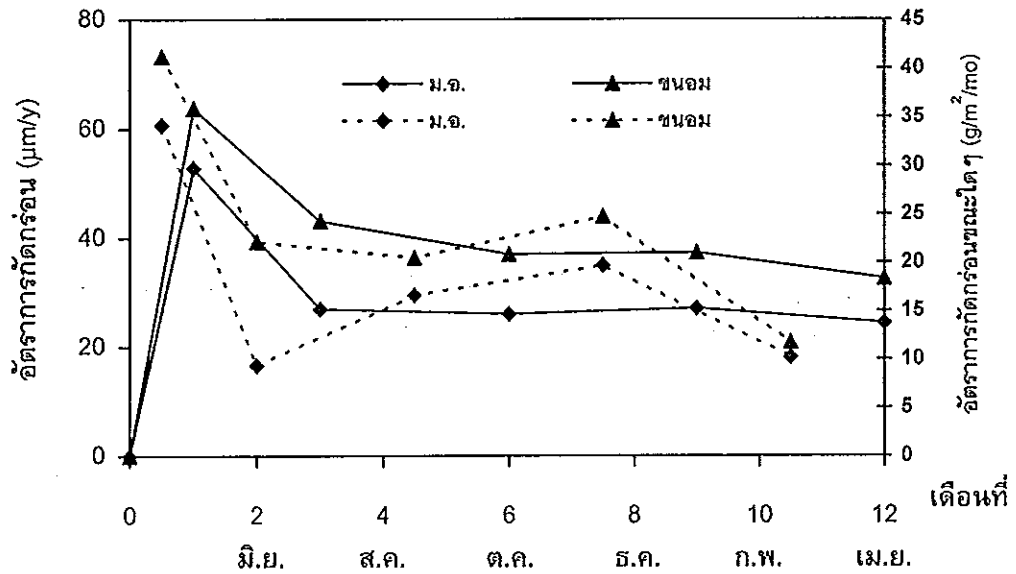
ภาพประกอบ 4.18 แสดงอัตราการกำจัดกร่อนขณะใดๆ ของซิงงานเปลือย (ปกติ, หักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย) และมีรอยเชื่อม) ของสถานีทดลอง อ.ชนอม เมื่อวางซิงงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



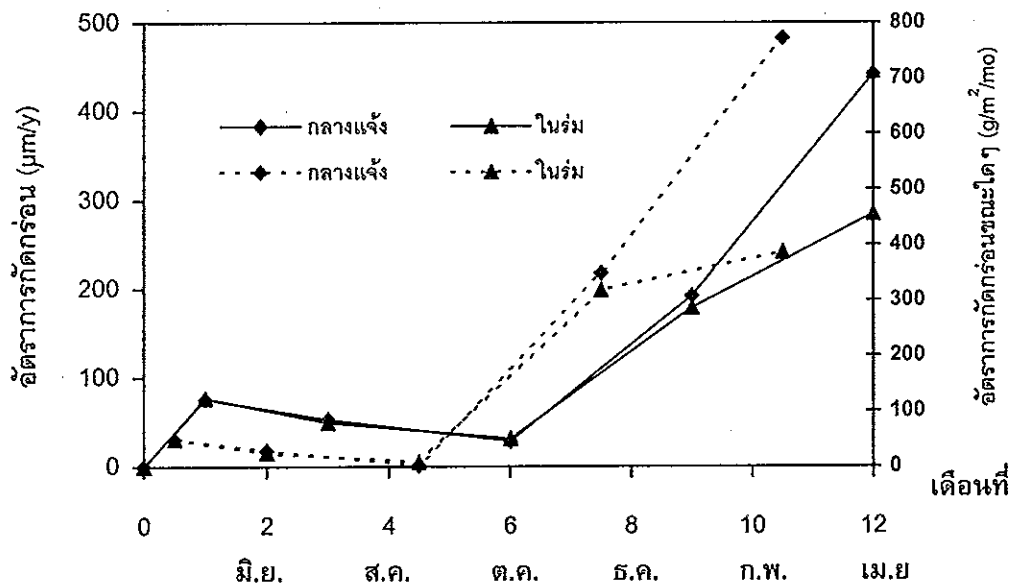
ภาพประกอบ 4.19 เปรียบเทียบอัตราการกักกรองของชิ้นงานเปลือย ของสถานีทดลอง ม.อ. (เส้นทึบ) และอ.ขนอม (เส้นประ) เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้งที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



ภาพประกอบ 4.20 เปรียบเทียบอัตราการกักกรองของชิ้นงานเปลือย ของสถานีทดลอง ม.อ. (เส้นทึบ) และอ.ขนอม (เส้นประ) เมื่อวางชิ้นงานในร่ม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



ภาพประกอบ 4.21 เปรียบเทียบอัตราการกักต้อน (เส้นทึบ) และอัตราการกักต้อนขณะใดๆ (เส้นประ) ในชิ้นงานหักงอ 90 องศา (วางหงาย) ของสถานีทดลอง ม.อ. และอ.ชนอม เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้งที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



ภาพประกอบ 4.22 เปรียบเทียบอัตราการกักต้อน (เส้นทึบ) และอัตราการกักต้อนขณะใดๆ (เส้นประ) ในชิ้นงานหักงอ 90 องศา (วางหงาย) ของสถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชิ้นงานในกลางแจ้งและในร่ม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

วิเคราะห์ผล อัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเปลี่ยนภายใต้บรรยากาศ

1. บรรยากาศ

อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของชิ้นงานเปลี่ยนภายใต้บรรยากาศต่างๆ ในระยะเวลา 1 ปี แสดงได้ดัง ตาราง 4.12

ตาราง 4.12 อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของชิ้นงานเปลี่ยนภายใต้บรรยากาศต่างๆ ในระยะเวลา 1 ปี

| เวลา (เดือน) | อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย ($\mu\text{m}/\text{y}$) | | |
|-----------------|---|--------------------|---------|
| | บรรยากาศ | | |
| | ชนบท | อุตสาหกรรม-ชายทะเล | ชายทะเล |
| 1 | 46.49 | 63.96 | 70.14 |
| 3 | 25.94 | 40.23 | 46.13 |
| 6 | 21.60 | 33.84 | 30.56 |
| 9 | 20.69 | 34.22 | 140.83 |
| 12 | 19.51 | 29.68 | 300.62 |

1.1 บรรยากาศชนบท

จากตาราง 4.12 จะเห็นได้ว่า อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยมีค่าสูงมากในเดือนที่ 1 (เดือนพ.ค.) แล้วลดลงประมาณ 40 % ในเดือนที่ 3 (เดือนก.ค.) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ในช่วง 1 เดือนแรกมีการทำลายฟิล์มเดิมของชิ้นงาน สังเกตได้จากลักษณะทางกายภาพได้ว่ามีสนิมสีส้มเกิดขึ้นอยู่ทั่วไปบนชิ้นงาน ทำให้กลายเป็นชั้นที่กั้นไม่ให้น้ำหรือมลสารเข้าไปสัมผัสกับชิ้นงาน จึงเป็นเหตุให้อัตราการกัดกร่อนลดลงในเดือนที่ 6 (เดือนต.ค.) ซึ่งลดลงประมาณ 50 % เมื่อเทียบกับเดือนที่ 1 (เดือนพ.ค.) แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาอัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ เฉลี่ย (ตาราง 4.13) พบว่า ในเดือนที่ 3 (เดือนก.ค.) และเดือนที่ 6 (เดือนต.ค.) มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เป็นการแสดงให้เห็นว่าปริมาณฝนได้ส่งเสริมการกัดกร่อน เนื่องจากในช่วงระยะเวลาดังกล่าวปริมาณฝนได้เพิ่มสูงขึ้นและเห็นผลได้ชัดเจนในเดือนที่ 9 (เดือนม.ค.) ว่ามีอัตราการกัดกร่อนขณะ

ใดๆ เฉลี่ยสูงกว่าเดือนที่ 6 (เดือนต.ค.) แต่อย่างไรก็ตามอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยก็ยังลดลง ดังจะเห็นได้จากเดือนที่ 12 (เดือนเม.ย.)

ตาราง 4.13 อัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ เฉลี่ยของชิ้นงานเปลือยภายใต้บรรยากาศต่างๆ ในระยะเวลา 1 ปี

| เวลา (เดือน) | อัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ เฉลี่ย ($\text{g/m}^2/\text{mo}$) | | |
|-----------------|--|--------------------|---------|
| | บรรยากาศ | | |
| | ชนบท | อุตสาหกรรม-ชายทะเล | ชายทะเล |
| 1 | 30.04 | 41.31 | 45.32 |
| 3 | 10.43 | 19.21 | 13.51 |
| 6 | 11.41 | 17.61 | 9.36 |
| 9 | 12.77 | 23.33 | 242.90 |
| 12 | 10.04 | 11.58 | 504.53 |

1.2 บรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเล

อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยมีค่าสูงมากในเดือนที่ 1 (เดือนพ.ค.) แล้วลดลงประมาณ 40 % ในเดือนที่ 3 (เดือนก.ค.) เช่นเดียวกับบรรยากาศชนบท เพียงแต่มีอัตราการกัดกร่อนที่สูงกว่า แสดงว่าต้องมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนรุนแรงกว่าปริมาณฝน ในที่นี้คือ ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์เฉลี่ยและเกลือโซเดียมคลอไรด์เฉลี่ย ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่า ของบรรยากาศชนบท แต่อย่างไรก็ตาม สนิมที่เกิดขึ้นก็ได้ต้านทานการกัดกร่อนเช่นเดียวกับบรรยากาศชนบทดังผลในเดือนที่ 6 (เดือนต.ค.) ที่พบว่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยลดลงประมาณ 50 % เมื่อเทียบกับเดือนที่ 1 (เดือนพ.ค.) นอกจากนี้ปริมาณฝนที่ลดลง (ภาพประกอบ 4.4) ก็จะทำให้อัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ ลดลงด้วยเช่นกัน โดยในช่วงฤดูฝนเดือนที่ 6 (เดือนต.ค.) ถึง เดือนที่ 9 (เดือนม.ค.) ปริมาณฝนที่เพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ เฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเช่นกันและยังมีผลให้อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยในเดือนที่ 9 (เดือนม.ค.) สูงกว่าในเดือนที่ 6 (เดือนต.ค.) อีกด้วย อธิบายได้ว่า ปริมาณฝนที่มีมลสารในบรรยากาศละลายอยู่ได้ตกลงมาปกคลุมชิ้นงานและชะล้างสนิมออกหรือทำให้ชั้นของสนิมที่ต้านทานการกัดกร่อนแตกออก แล้วเกิดการกัดกร่อนขึ้นใหม่และทำให้เกิดชั้น

ของสนิมที่ต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากพบว่าในเดือนที่ 12 (เดือนเม.ย.) มีค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยและอัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ เฉลี่ยลดลงและมีค่าต่ำกว่าเดือนที่ 6 (เดือนต.ค.)

1.3 บรรยากาศชายทะเล

อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยมีค่าสูงมากในเดือนที่ 1 (เดือนพ.ค.) แล้วลดลงประมาณ 40 % ในเดือนที่ 3 (เดือนก.ค.) เช่นเดียวกับบรรยากาศชนบทและอุตสาหกรรม-ชายทะเล แต่เนื่องจากปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์เฉลี่ยที่มากกว่าอุตสาหกรรม-ชายทะเลและชนบทเป็น 1 และ 3 เท่า ตามลำดับ จึงทำให้อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยในเดือนที่ 1 มีค่าสูงกว่าบรรยากาศอื่นๆ (ตาราง 4.12) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์มีผลต่อการกัดกร่อนมากกว่าปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ เนื่องจากบรรยากาศชายทะเลมีปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์น้อยกว่าบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเล 1 เท่า นอกจากนี้ในเดือนที่ 6 (เดือนต.ค.) จะพบว่าอัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ เฉลี่ย มีค่าต่ำกว่าบรรยากาศชนบทและอุตสาหกรรม-ชายทะเล แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของชั้นสนิมที่ต้านทานการกัดกร่อน เนื่องจากในช่วงระยะเวลาดังกล่าวปริมาณฝนก็ไม่ได้แตกต่างจากบรรยากาศอื่นๆ มากนัก ส่วนอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยในเดือนที่ 9 (เดือนม.ค.) เมื่อพิจารณาจากตาราง 4.12 จะเห็นว่าบรรยากาศชายทะเลมีอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นจากเดือนที่ 6 (เดือนต.ค.) ถึง 360 % ซึ่งอธิบายได้ว่า ในบรรยากาศชายทะเลชั้นสนิมที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ถูกทำลายลงโดยการชะล้างของฝน เนื่องมาจากในช่วงระยะเวลาเดือนที่ 6 (เดือนต.ค.) ถึงเดือนที่ 9 (เดือนม.ค.) เป็นฤดูฝน จึงทำให้มีปริมาณฝนสูง และเป็นเหตุให้น้ำและคลอไรด์ไอออนแพร่เข้าไปสัมผัสกับชิ้นงานเกิดการสะสมของเกลือโซเดียมคลอไรด์บนชิ้นงาน (ภาพประกอบ 4.8) แต่ในเดือนที่ 9 (เดือนม.ค.) ไม่มีปริมาณฝนเลย (ตาราง 4.1) จึงทำให้มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนเพิ่มสูงขึ้นและส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการแตกเป็นชั้นๆ ของสนิม (ภาพประกอบ 4.9) จึงทำให้น้ำและคลอไรด์ไอออนแพร่เข้าไปสัมผัสกับชิ้นงานและสะสมอยู่บนชิ้นงานได้มากขึ้น ดังนั้นในเดือนที่ 12 (เดือนเม.ย.) อัตราการกัดกร่อนก็ยังคงเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มจากเดือนที่ 9 (เดือนม.ค.) เป็น 113 %

ดังนั้นจากข้อมูลอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยและอัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ เฉลี่ย จะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนจะมีความแตกต่างกันไปตามสภาพภูมิอากาศและปริมาณมลสารในบรรยากาศ โดยที่ บรรยากาศชนบทจะขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศโดยเฉพาะปริมาณฝน ส่วนบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเลและชายทะเลนั้น ทั้งสภาพภูมิอากาศและปริมาณมลสารในบรรยากาศต่างมีผลต่อการกัดกร่อน แต่ปริมาณมลสารในบรรยากาศจะส่งผลที่รุนแรงกว่า โดยเฉพาะปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งเห็นผลได้ชัดเจนในบรรยากาศชายทะเล เพราะว่ามันทำงานที่ผ่านการล้างสนิมออกมักจะมีการทะเลในบริเวณที่ใกล้ๆ กับอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน (ภาพประกอบ 4.11) แสดงให้เห็นว่ามีมีการกัดกร่อนในที่อับหรือแบบหลุมเกิดขึ้น ส่วนบรรยากาศชนบทและบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเล เป็นการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอแต่เพียงอย่างเดียว (ภาพประกอบ 4.12)

ส่วนความรุนแรงของสภาพบรรยากาศสามารถจัดลำดับโดยพิจารณาจากอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยในระยะเวลา 1 ปี (ISO 9223, 1992) ได้ดังนี้ บรรยากาศชายทะเล ($300.62 \mu\text{m/y}$) มีความรุนแรงของสภาพบรรยากาศสูงสุด คือ C_5 ($80 < r_{\text{corr}} < 200 \mu\text{m/y}$) ส่วนบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเล ($29.68 \mu\text{m/y}$) และชนบท ($19.51 \mu\text{m/y}$) เป็น C_3 ($25 < r_{\text{corr}} < 50 \mu\text{m/y}$) และ C_2 ($1.3 < r_{\text{corr}} < 25 \mu\text{m/y}$) ตามลำดับ

2. ลักษณะการวางชิ้นงาน

ตาราง 4.14 อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยเมื่อวางชิ้นงานในกลางแจ้งและในร่ม

| เวลา (เดือน) | อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย ($\mu\text{m/y}$) | | | | | |
|-----------------|--|-------|--------------------------------|-------|-----------------|--------|
| | บรรยากาศชนบท | | บรรยากาศ อุตสาหกรรม-ชายทะเล | | บรรยากาศชายทะเล | |
| | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม |
| 1 | 46.36 | 46.61 | 63.85 | 64.08 | 69.76 | 70.52 |
| 3 | 28.06 | 23.81 | 39.26 | 41.20 | 45.79 | 46.47 |
| 6 | 25.10 | 18.10 | 33.76 | 33.15 | 28.57 | 32.56 |
| 9 | 24.91 | 16.48 | 34.76 | 33.71 | 146.96 | 134.70 |
| 12 | 23.17 | 15.85 | 30.67 | 28.69 | 365.89 | 235.35 |

อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยเมื่อวางชิ้นงานในกลางแจ้งและในร่ม แสดงไว้ในตาราง 4.14 พบว่า ในเดือนที่ 1 (เดือนพ.ค.) อัตราการกัดกร่อนไม่มีความแตกต่างกันระหว่างชิ้นงานที่วางในกลางแจ้งและในร่ม เนื่องจากใน 1 เดือนแรก เป็นการทำลายฟิล์มเดิมของชิ้นงานจึงเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วทั้งในกลางแจ้งและในร่ม โดยที่ชิ้นงานที่วางในร่มสามารถถูกละอองฝนสาดเข้ามาได้เพราะว่าเป็นลักษณะการวางในร่มแบบชายคา เป็นเหตุให้น้ำที่ตกลงบนชิ้นงานระเหยออกไปได้ช้าและมีความชื้นสูงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่วางกลางแจ้ง หลังจากนั้นในช่วงเดือนถัดๆ มาความรุนแรงของสภาพบรรยากาศได้ส่งผลต่อการกัดกร่อน ทำให้ชิ้นงานที่วางในกลางแจ้งและในร่มมีความแตกต่างกัน ดังนี้ ในบรรยากาศชนบทซึ่งมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนเพียงอย่างเดียว คือสภาพภูมิอากาศ ที่ทำให้ชิ้นงานที่วางในกลางแจ้งมีอัตราการกัดกร่อนมากกว่าในร่ม เนื่องจากฝนได้ชะล้างสนิมออกไป เป็นเหตุให้มีสนิมเกิดขึ้นใหม่ซึ่งเป็นการเพิ่มการกัดกร่อน เห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของความแตกต่างระหว่างอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของชิ้นงานที่วางในกลางแจ้งและในร่ม จาก 17.85 % ในเดือนที่ 3 (เดือนก.ค.) เป็น 38.67 % ในเดือนที่ 6 (เดือนต.ค.) และ 51.15 % ในเดือนที่ 9 (เดือนม.ค.) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณฝนที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในเดือนที่ 6 (เดือนต.ค.) ถึงเดือนที่ 9 (เดือนม.ค.) เป็นช่วงของฤดูฝน ส่วนในเดือนที่ 12 (เดือนเม.ย.) เมื่อปริมาณฝนลดลงความแตกต่างของอัตราการกัดกร่อนของลักษณะการวางชิ้นงานก็ลดลงด้วยเช่นกันโดยมีค่าเป็น 46.18 % ส่วนบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเลและชายทะเล การกัดกร่อนจะขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและปริมาณมลสารในบรรยากาศพบว่า ชิ้นงานที่วางในกลางแจ้งและในร่มมีอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างของอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยไม่เกิน 10 % โดยที่บรรยากาศชายทะเลในเดือนที่ 1 (เดือนพ.ค.) ถึงเดือนที่ 6 (เดือนต.ค.) จะมีอัตราการกัดกร่อนที่ใกล้เคียงกันกับบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเล แต่ในเดือนที่ 9 (เดือนม.ค.) และเดือนที่ 12 (เดือนเม.ย.) กลับมีอัตราการกัดกร่อนที่สูงมากและชิ้นงานที่วางในกลางแจ้งมีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่าในร่ม ซึ่งอธิบายได้ว่าเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่สะสมอยู่บนชิ้นงานได้ดูดความชื้นจากบรรยากาศ ทำให้เกิดอิเล็กโทรไลต์ในการกัดกร่อน โดยเฉพาะชิ้นงานที่วางในร่มซึ่งมีการระเหยของน้ำได้ช้าจึงทำให้เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงและอาจเกิดการกัดกร่อนในที่อับหรือแบบหลุมเนื่องจากการตกเป็นชั้นๆ ของสนิม ส่วนความแตกต่างของอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของชิ้นงานที่วางในกลางแจ้ง

และในร่ม อธิบายได้ว่าในกลางแจ้งฝนได้ชะล้างสนิมออกประกอบกับมีการแตกของชั้นสนิม ทำให้คลอไรด์ไอออนแพร่เข้าไปสัมผัสกับชิ้นงานได้อีก จึงเกิดการกัดกร่อนที่มากกว่าในร่มและมีความแตกต่างของอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย ในเดือนที่ 9 (เดือนม.ค.) และเดือนที่ 12 (เดือนเม.ย.) เท่ากับ 9.10 และ 55.47 % ตามลำดับ โดยในเดือนที่ 9 (เดือนม.ค.) จะเห็นว่ามีค่าไม่เกิน 10 % จึงทำให้ความแตกต่างของอัตราการกัดกร่อนมีค่าใกล้เคียงกัน

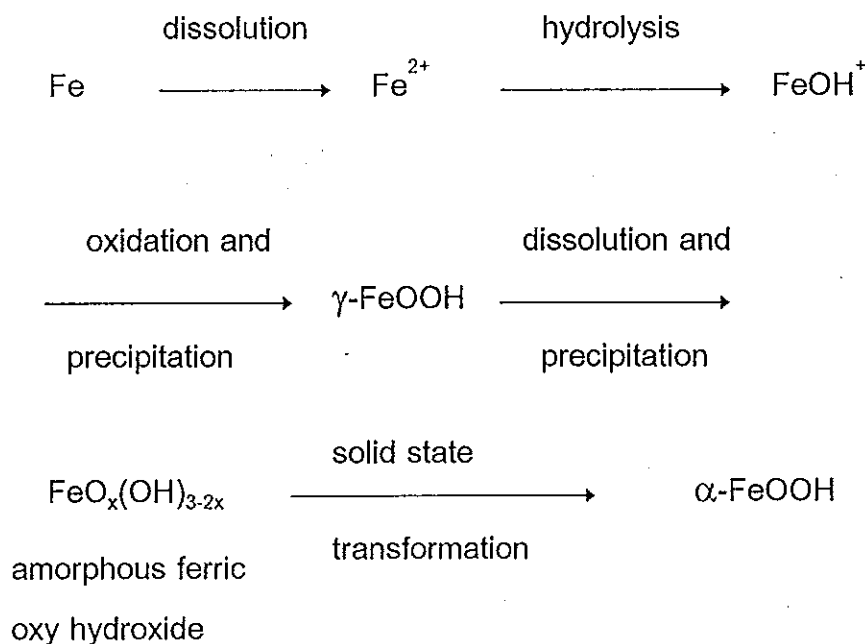
3. ลักษณะของชิ้นงาน

จากตาราง 4.10 พบว่า ในบรรยากาศชนบทและอุตสาหกรรม-ชายทะเลมีอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานในลักษณะต่างๆ ใกล้เคียงกัน ส่วนบรรยากาศชายทะเลในช่วง 6 เดือนแรก จะมีอัตราการกัดกร่อนเหมือนกับบรรยากาศชนบทและอุตสาหกรรม-ชายทะเล แต่ในช่วง 6 เดือนหลังชิ้นงานหักงอ 90 องศา กลับมีอัตราการกัดกร่อนสูงสุดโดยที่ชิ้นงานที่วางหงายมีอัตราการกัดกร่อนมากกว่าชิ้นงานที่วางคว่ำ ส่วนชิ้นงานปกติและมีรอยเชื่อมยังคงมีอัตราการกัดกร่อนที่ใกล้เคียงกัน อธิบายได้ว่า แรงเค้นภายในเนื้อโลหะเนื่องมาจากการหักงอ หรือการเชื่อม ในชิ้นงานหักงอ 90 องศาและมีรอยเชื่อมไม่มีผลต่อการกัดกร่อน เพียงแต่ชิ้นงานหักงอ 90 องศา มีลักษณะของชิ้นงานที่หักงอจะเอื้อต่อการสะสมของน้ำและมลสารในบรรยากาศ จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนได้มากกว่า ซึ่งเห็นผลได้ชัดเจนที่บรรยากาศชายทะเลใน 6 เดือนหลัง เพราะว่ามี การสะสมของเกลือโซเดียมคลอไรด์

4. ผลิตรภัณฑ์จากการกัดกร่อน

จากการวิเคราะห์สนิมของบรรยากาศต่างๆ ในเดือนเม.ย. (เดือนที่ 12) ด้วย X-ray diffraction (XRD) (ภาคผนวก ข.) พบว่า บรรยากาศชนบทและอุตสาหกรรม-ชายทะเลมีสนิมที่เหมือนกัน และเป็นสนิมที่มีอยู่ทั่วไปของการกัดกร่อนของเหล็ก (Barton, 1976 : Graede and Frankenthal, 1990 : Wei, 1991) คือ lepidocrocite (γ -FeOOH), goethite (α -FeOOH) และ magnetite (Fe_3O_4) ซึ่งเป็นสนิมที่มีสีแดงหรือน้ำตาลแดง, น้ำตาลเข้ม และดำ ตามลำดับ ส่วนบรรยากาศชายทะเลพบสนิมเพียงชนิดเดียว คือ akaganeite (β -FeOOH) ซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะบรรยากาศที่มีคลอไรด์ไอออนอย่างเพียงพอเท่านั้น (Barton, 1976 : Kaneko and

Inouye, 1981 : Graedel and Frankenthal, 1990) โดยที่กลไกการเกิด lepidocrocite (γ -FeOOH) และ goethite (α -FeOOH) สามารถเขียนได้ดังนี้ (Misawa, et al., 1974 : Barton, 1976)



อธิบายได้ว่าเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทำปฏิกิริยากับน้ำที่อยู่บนพื้นผิวเหล็ก ได้เป็น γ -FeOOH แต่เมื่อมีน้ำที่ตกลงมาปกคลุมพื้นผิวเหล็กใหม่มีสภาพเป็นกรด เนื่องมาจากการละลายของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศ ทำให้ γ -FeOOH ละลายและเปลี่ยนรูปเป็น $\text{FeO}_x(\text{OH})_{3-2x}$ ซึ่งเป็นชั้นของสนิมที่ป้องกันการกัดกร่อนของเหล็ก แต่ $\text{FeO}_x(\text{OH})_{3-2x}$ รวมตัวกับน้ำได้แตกายเป็น α -FeOOH และเป็นชั้นของสนิมที่ไม่สามารถป้องกันพื้นผิวของเหล็กได้

นอกจากนี้ จากการตรวจสอบด้วย electron diffraction ที่ผิวสัมผัสระหว่างเหล็กกับสนิม พบว่ามี Fe_3O_4 เกิดขึ้นในบริเวณที่มีออกซิเจนน้อย (Misawa, et al, 1974) ส่วนกลไกการเกิดของ β -FeOOH นั้นเนื่องมาจากการกระตุ้นของคลอไรด์ไอออน (Graedel and Frankenthal, 1990)

ตาราง 4.15 แสดงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสีที่สถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวาง
ชิ้นงานในกลางแจ้ง ในระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

| เวลา (เดือนที่) | ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสี |
|-----------------|---|
| 1 | - มีคราบฝุ่นบนชิ้นงานเคลือบสี - ชิ้นงานเคลือบสี A หน้า 300 ไมครอน ที่มีการกรีดสี พบสนิมสีส้มในร่องสีที่กรีด |
| 3 | - มีคราบฝุ่นบนชิ้นงานเคลือบสี - ชิ้นงานเคลือบสี A หน้า 300 ไมครอน ที่มีการกรีดสี พบสนิมสีส้มในร่องสีที่กรีด - ชิ้นงานเคลือบสี A ทุกความหนาเริ่มซีด |
| 6 | - มีคราบฝุ่นบนชิ้นงานเคลือบสี - ชิ้นงานเคลือบสี A หน้า 300 ไมครอน ที่มีการกรีดสี พบสนิมสีส้มในร่องสีที่กรีด - ชิ้นงานเคลือบสี B มีการหดและแตกจนเห็นสีรองพื้น เป็นการแตกแบบเส้นยาวขนานไปกับชิ้นงาน (long line) และรูปร่างไม่แน่นอนขนาดสั้น (short, random) เมื่อเทียบกับรูปมาตรฐานแล้วจัดได้แบบ ASTM 8, TNO 2 |
| 9 | - มีคราบฝุ่นบนชิ้นงานเคลือบสี - ชิ้นงานเคลือบสี A หน้า 300 ไมครอน ที่มีการกรีดสี พบสนิมสีส้มในร่องสีที่กรีด - ชิ้นงานเคลือบสี A ทุกความหนาเริ่มซีดมากขึ้น - ชิ้นงานเคลือบสี B มีการหดและแตกจนเห็นสีรองพื้นมากขึ้น เป็นการแตกแบบเส้นยาวขนานไปกับชิ้นงาน และรูปร่างไม่แน่นอนขนาดสั้น เมื่อเทียบกับรูปมาตรฐานแล้วจัดได้แบบ ASTM 6, TNO 4 และมีสนิมสีน้ำตาลแดงเกิดขึ้น ในสีรองพื้นเมื่อเทียบกับรูปมาตรฐานแล้วคิดเป็น 0.1 % - ชิ้นงานเคลือบสี A โดยวิธีทาหนา 100 ไมครอน เริ่มมีสนิมสีส้มเกิดขึ้นตามรอยแปรงเมื่อเทียบกับรูปมาตรฐานแล้วคิดเป็น 0.03 % |
| 12 | - มีคราบฝุ่นบนชิ้นงานเคลือบสี - ชิ้นงานเคลือบสี A ทุกความหนาเริ่มซีดมากขึ้น - ชิ้นงานเคลือบสี A หน้า 300 ไมครอน ที่มีการกรีดสี พบสนิมสีส้มในร่องสีที่กรีด - ชิ้นงานเคลือบสี B มีการหดและแตกจนเห็นสีรองพื้นมากขึ้น เป็นการแตกแบบเส้นยาวขนานไปกับชิ้นงาน และรูปร่างไม่แน่นอนขนาดสั้น เมื่อเทียบกับรูปมาตรฐานแล้วจัดได้แบบ ASTM 4, TNO 6 และมีสนิมสีน้ำตาลแดงเกิดขึ้นในสีรองพื้นเมื่อเทียบกับรูปมาตรฐานแล้วคิดเป็น 1 % (ภาพประกอบ 4.23) - ชิ้นงานเคลือบสี A โดยวิธีทาหนา 100 ไมครอน มีสนิมสีส้มเกิดขึ้นตามรอยแปรงเมื่อเทียบกับรูปมาตรฐานแล้วคิดเป็น 0.1 % (ภาพประกอบ 4.25) |

ตาราง 4.16 แสดงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสีที่สถานีทดลอง ม.อ.เมื่อวางชิ้นงานในร่ม
ในระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

| เวลา (เดือนที่) | ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสี |
|-----------------|---|
| 1, 3 | - มีคราบฝุ่นบนชิ้นงานเคลือบสี |
| 6 | - มีคราบฝุ่นบนชิ้นงานเคลือบสี |
| 9 | - ชิ้นงานเคลือบสี A หน้า 300 ไมครอน ที่มีการกรีดสี เริ่มพบสนิมสีส้มแดงในร่องสีที่กรีด |
| 12 | - มีคราบฝุ่นบนชิ้นงานเคลือบสี |
| | - ชิ้นงานเคลือบสี A หน้า 300 ไมครอน ที่มีการกรีดสีพบสนิมสีส้มแดงในร่องสีที่กรีด |

ตาราง 4.17 ความผิดแผกของสีของชิ้นงานเคลือบสี A, B, C และ D ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

| ระยะ เวลา (เดือนที่) | ความผิดแผกของสี | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|--------------|-----------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|-----------|
| | A300 | | | B | | | C | | | D | | |
| | อ้าง อิง | กลาง แจ้ง | ใน ร่ม | อ้าง อิง | กลาง แจ้ง | ใน ร่ม | อ้าง อิง | กลาง แจ้ง | ใน ร่ม | อ้าง อิง | กลาง แจ้ง | ใน ร่ม |
| 1 | 0.5 | 4.8 | 6.4 | 1.2 | 7.0 | 1.5 | 1.5 | 4.7 | 5.0 | 2.6 | 11.5 | 3.8 |
| 3 | 1.0 | 10.3 | 6.0 | 2.6 | 7.8 | 3.3 | 2.6 | 3.8 | 4.7 | 6.1 | 11.7 | 7.1 |
| 6 | 1.1 | 10.9 | 7.1 | 4.1 | 14.7 | 5.3 | 5.9 | 11.0 | 6.3 | 6.1 | 3.9 | 4.3 |
| 9 | 1.2 | 9.6 | 7.1 | 3.5 | 18.4 | 10.7 | 5.9 | 14.1 | 15.1 | 6.3 | 7.9 | 3.3 |
| 12 | 1.3 | 11.5 | 6.1 | 3.7 | 20.0 | 2.8 | 6.2 | 15.1 | 4.3 | 6.5 | 12.1 | 6.5 |

ตาราง 4.18 ความผิดแผกของสีของชิ้นงานเคลือบสี A ที่ความหนา 300, 200 และ 100 ไมครอนที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

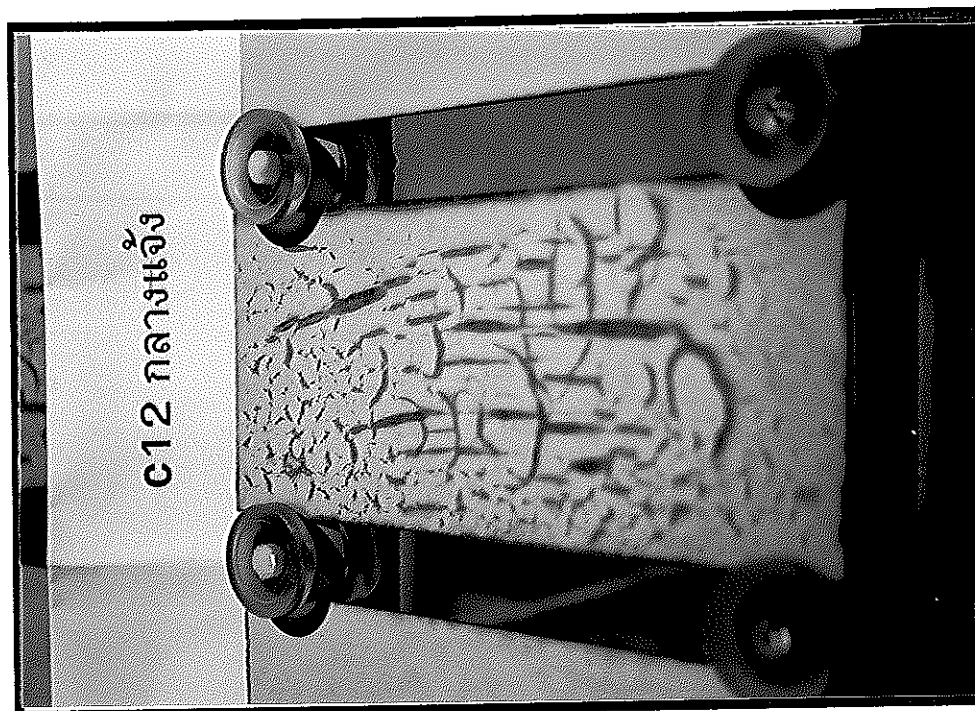
| ระยะ เวลา (เดือนที่) | ความผิดแผกของสี | | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|----------|-------|---------|----------|-------|---------|----------|-------|
| | A300 | | | A200 | | | A100 | | |
| | อ้างอิง | กลางแจ้ง | ในร่ม | อ้างอิง | กลางแจ้ง | ในร่ม | อ้างอิง | กลางแจ้ง | ในร่ม |
| 1 | 0.5 | 4.8 | 6.4 | 0.9 | 2.6 | 5.9 | 0.6 | 3.3 | 6.2 |
| 3 | 1.0 | 10.3 | 6.0 | 1.2 | 6.4 | 5.8 | 1.0 | 3.3 | 6.2 |
| 6 | 1.1 | 10.9 | 7.1 | 2.0 | 8.6 | 10.3 | 1.1 | 8.8 | 11.8 |
| 9 | 1.2 | 9.6 | 7.1 | 2.2 | 15.6 | 15.5 | 1.1 | 14.5 | 16.1 |
| 12 | 1.3 | 11.5 | 6.1 | 2.3 | 10.8 | 6.2 | 1.2 | 10.0 | 6.7 |

ตาราง 4.19 ความผิดแผกของสีของชิ้นงานเคลือบสี A โดยวิธีทา ที่ความหนา 300 และ 100 ไมครอน ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

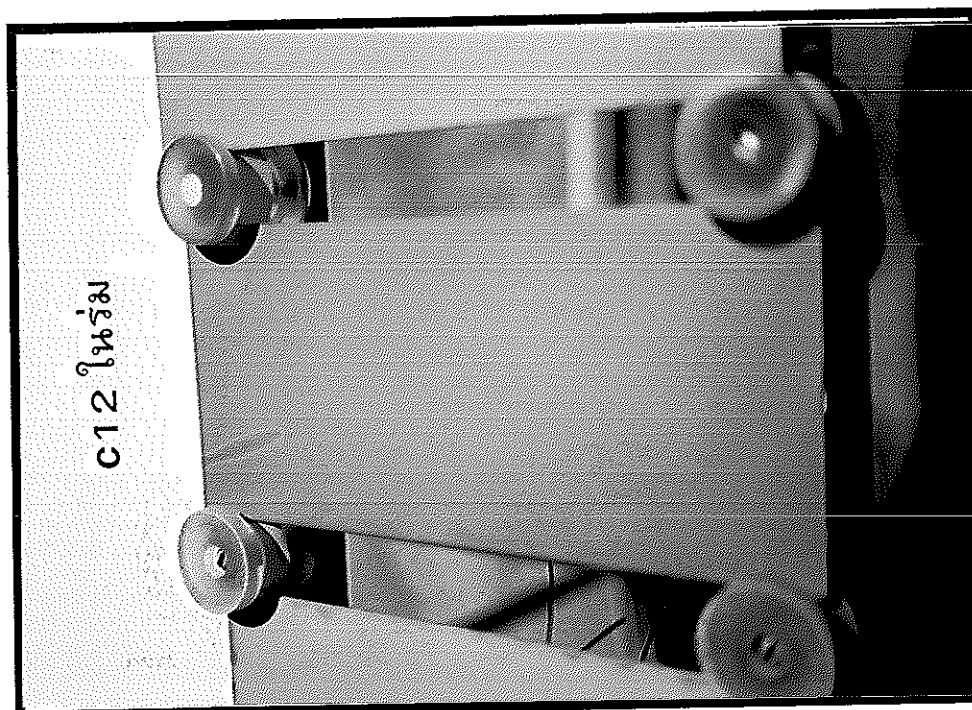
| ระยะ เวลา (เดือนที่) | ความผิดแผกของสี | | | | | |
|----------------------------|-----------------|----------|-------|---------|----------|-------|
| | A300P | | | A100P | | |
| | อ้างอิง | กลางแจ้ง | ในร่ม | อ้างอิง | กลางแจ้ง | ในร่ม |
| 1 | 0.5 | 3.6 | 5.1 | 0.8 | 2.8 | 6.3 |
| 3 | 0.7 | 6.8 | 5.0 | 1.7 | 1.7 | 5.9 |
| 6 | 0.5 | 7.8 | 11.2 | 2.5 | 7.5 | 11.2 |
| 9 | 1.5 | 16.2 | 15.5 | 3.8 | 15.2 | 17.6 |
| 12 | 2.9 | 10.1 | 6.8 | 4.4 | 8.4 | 7.0 |

ตาราง 4.20 ความผิดแผกของสีของชิ้นงานเคลือบสี A ที่ไม่แต่งผิว ที่ความหนา 300, 200 และ 100 ไมครอน ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

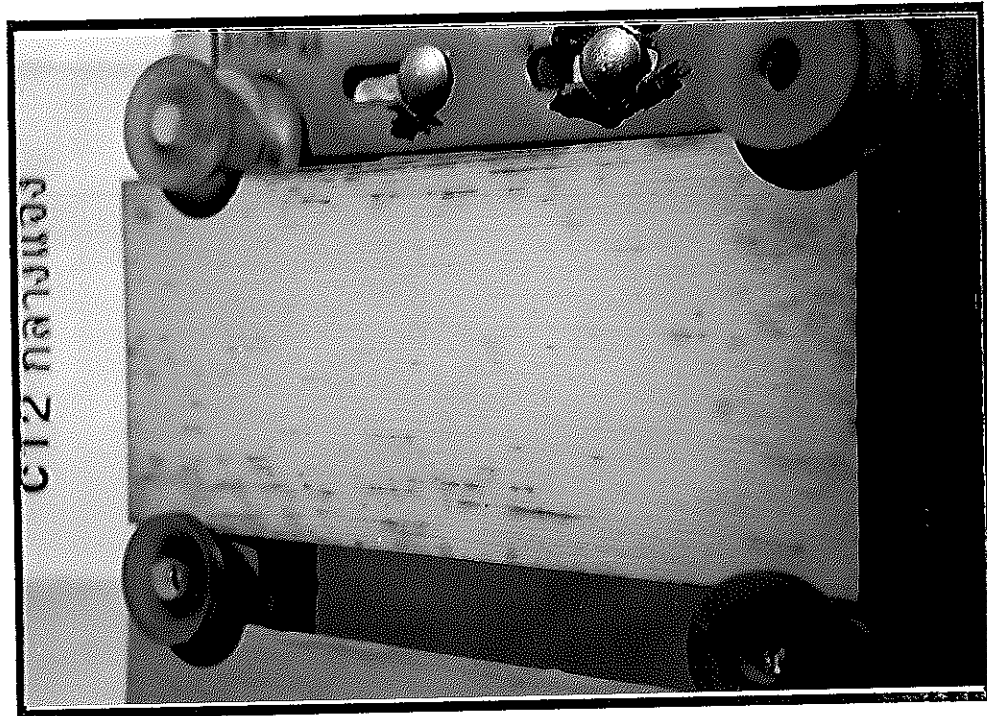
| ระยะ เวลา (เดือนที่) | ความผิดแผกของสี | | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|----------|-------|---------|----------|-------|---------|----------|-------|
| | A300N | | | A200N | | | A100N | | |
| | อ้างอิง | กลางแจ้ง | ในร่ม | อ้างอิง | กลางแจ้ง | ในร่ม | อ้างอิง | กลางแจ้ง | ในร่ม |
| 1 | 0.6 | 4.3 | 6.8 | 0.7 | 3.2 | 6.0 | 0.5 | 3.5 | 6.4 |
| 3 | 0.8 | 8.0 | 6.8 | 1.1 | 4.1 | 6.2 | 1.1 | 3.3 | 6.2 |
| 6 | 1.0 | 7.3 | 13.5 | 1.1 | 8.3 | 12.9 | 1.2 | 9.3 | 12.7 |
| 9 | 1.6 | 13.5 | 6.9 | 1.6 | 7.1 | 5.8 | 1.2 | 6.3 | 6.5 |
| 12 | 2.8 | 9.9 | 8.0 | 2.1 | 11.4 | 13.2 | 1.1 | 10.6 | 6.4 |



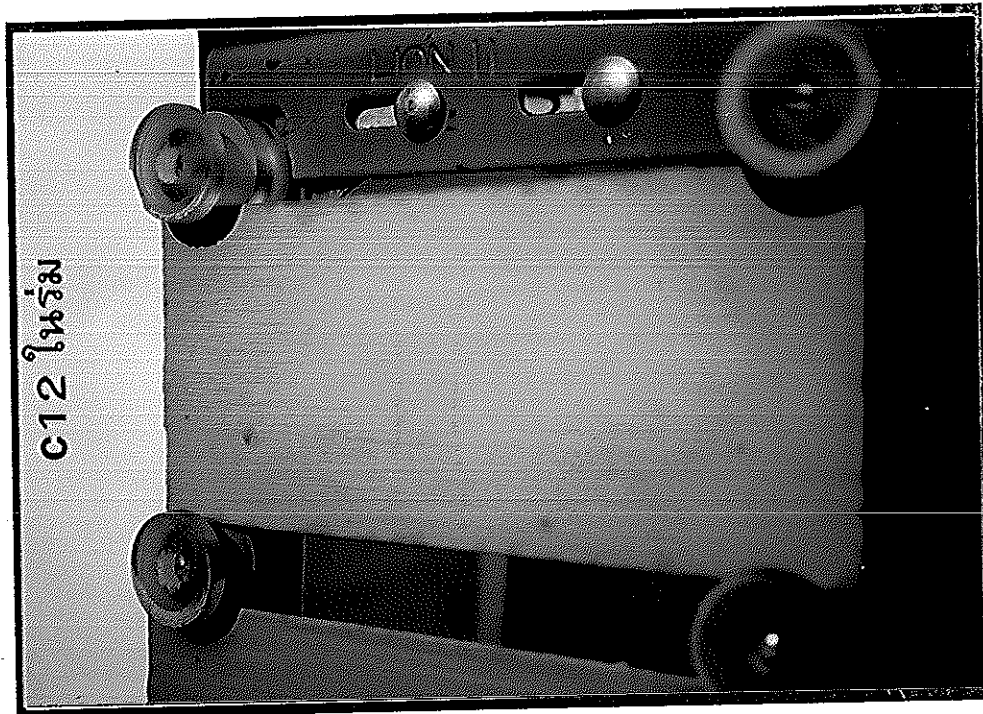
ภาพประกอบ 4.23 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสีในชิ้นงานเคลือบสี B เมื่อวางชิ้นงาน
ในกลางแจ้งเป็นระยะเวลา 12 เดือน



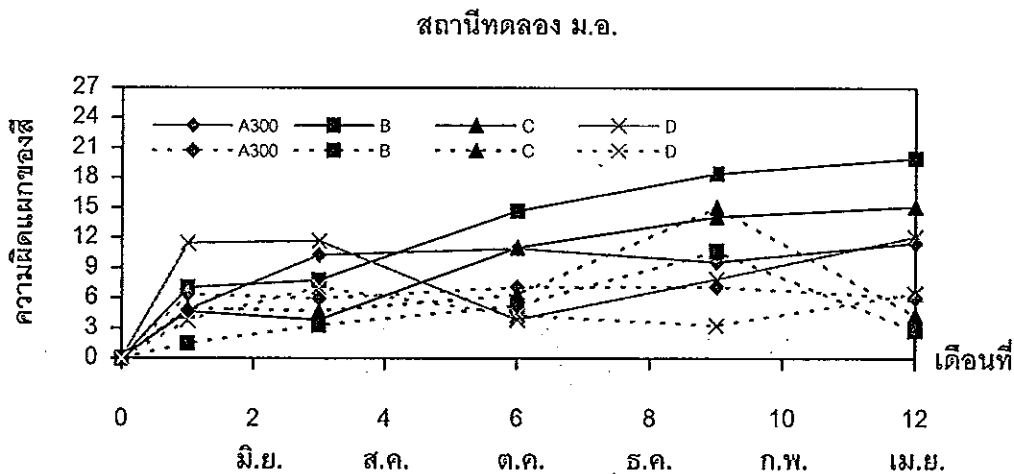
ภาพประกอบ 4.24 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสีในชิ้นงานเคลือบสี B เมื่อวางชิ้นงาน
ในร่ม เป็นระยะเวลา 12 เดือน



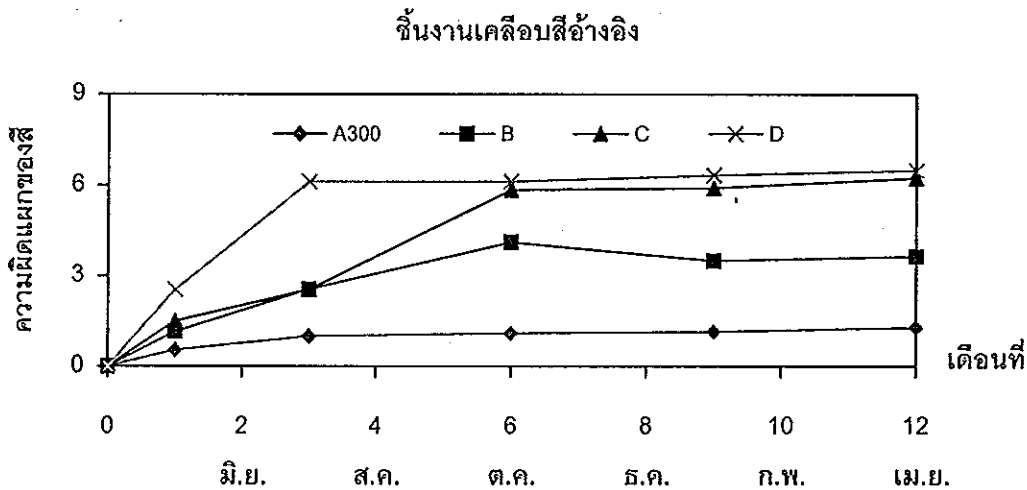
ภาพประกอบ 4.25 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสีในชิ้นงานเคลือบสี A โดยวิธีทา ที่ความหนา 100 ไมครอน เมื่อวางชิ้นงานในกลางแจ้งเป็นระยะเวลา 12 เดือน



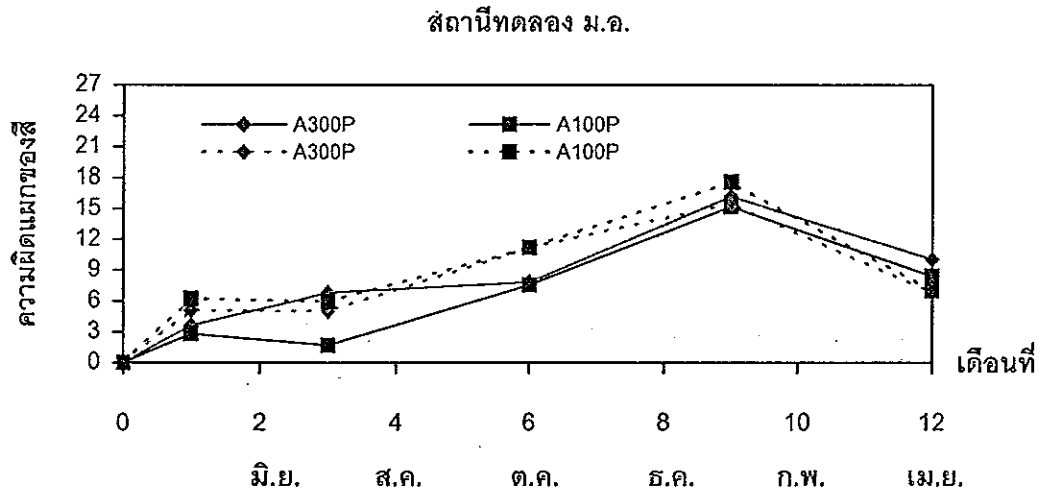
ภาพประกอบ 4.26 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสีในชิ้นงานเคลือบสี A โดยวิธีทา ที่ความหนา 100 ไมครอน เมื่อวางชิ้นงานในร่มเป็นระยะเวลา 12 เดือน



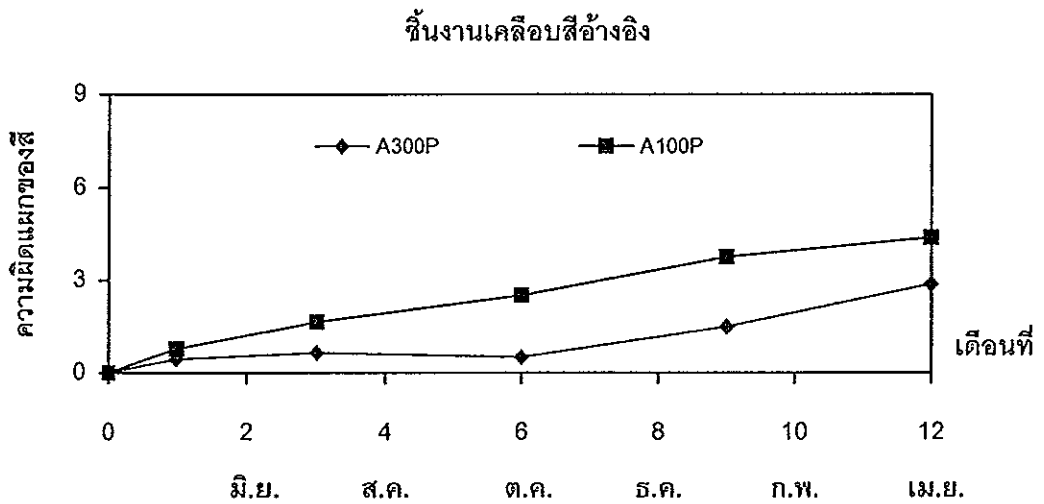
ภาพประกอบ 4.27 แสดงความชื้นดินแฉกของสีของระบบสี A, B, C และ D ของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



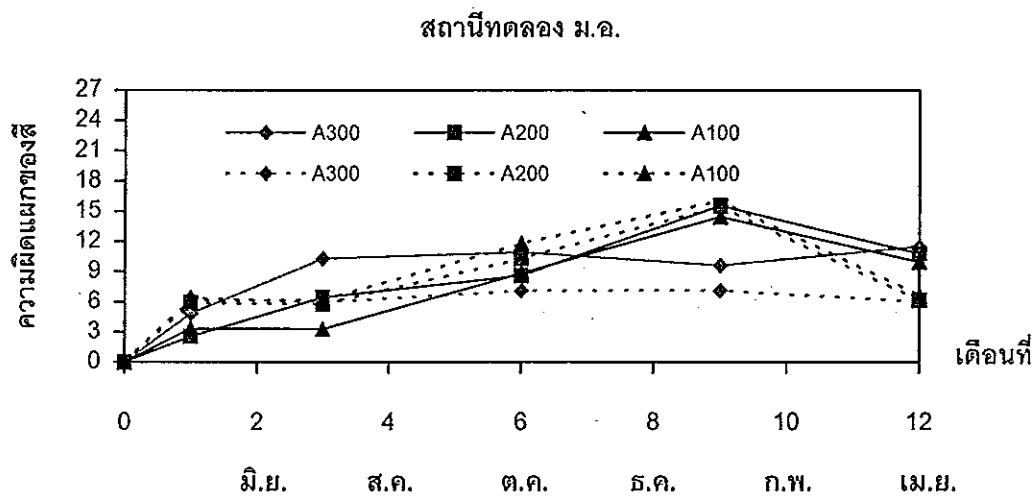
ภาพประกอบ 4.28 แสดงความชื้นดินแฉกของสีของระบบสี A, B, C และ D ของชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิงที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



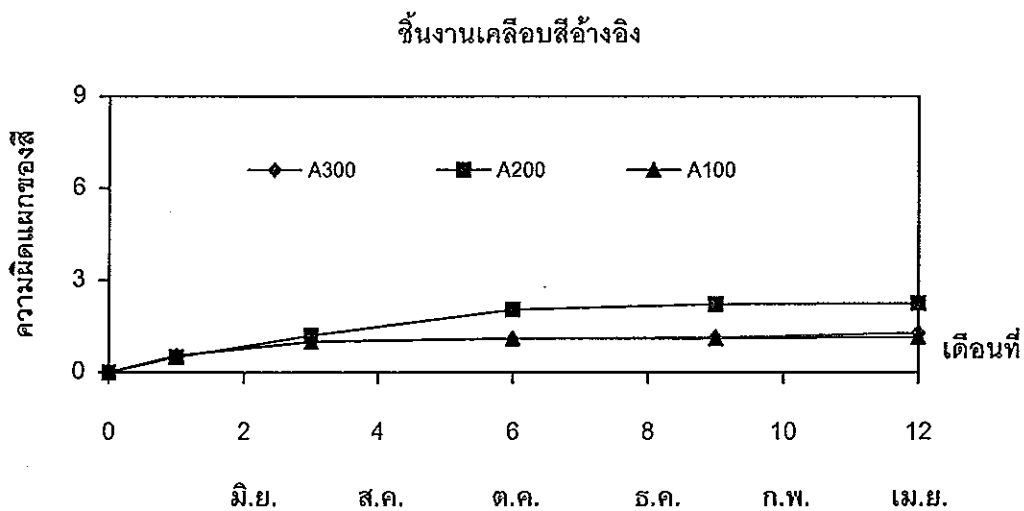
ภาพประกอบ 4.29 แสดงความชื้นดินแฉกของสีของระบบสี A เคลือบสีโดยวิธีทาของ สถานีทดลอง ม.อ. ที่ความหนา 100 และ 300 ไมครอน เมื่อวางชิ้นงาน ในกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



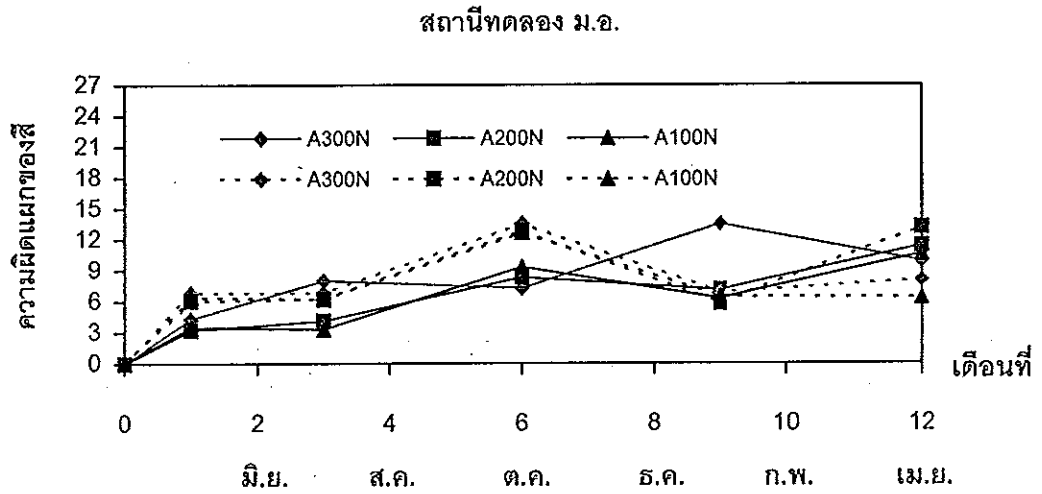
ภาพประกอบ 4.30 แสดงความชื้นดินแฉกของสีของระบบสี A เคลือบสีโดยวิธีทาของชิ้นงาน เคลือบสีอ้างอิงที่ความหนา 100 และ 300 ไมครอน ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



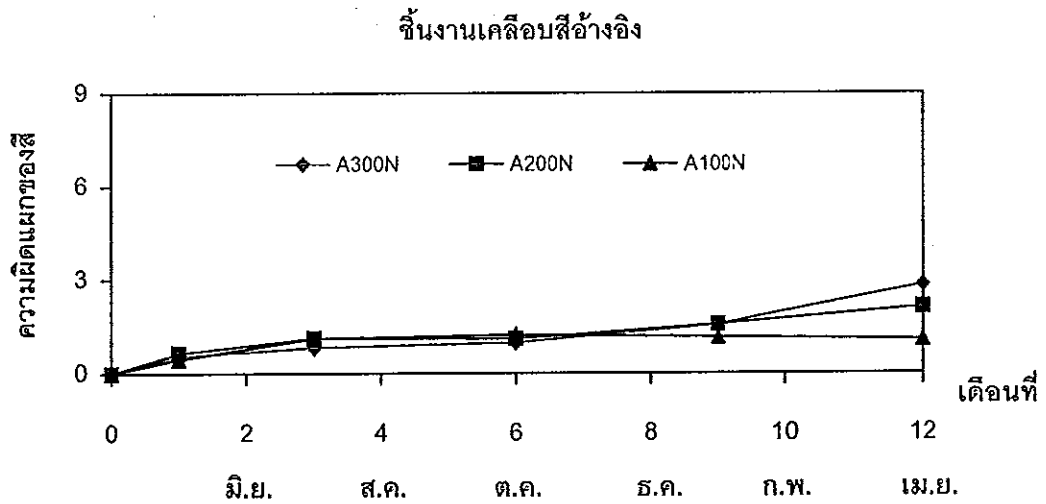
ภาพประกอบ 4.31 แสดงความชื้นดินของสี่ของระบบสี A ที่ความหนา 100, 200 และ 300 ไมครอน ของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



ภาพประกอบ 4.32 แสดงความชื้นดินของสี่ของระบบสี A ที่ความหนา 100, 200 และ 300 ไมครอน ของชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิงที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



ภาพประกอบ 4.33 แสดงความชื้นดินของสีกของระบบสี A และไม้แต่งผิวที่มีความหนา 100, 200 และ 300 ไมครอน ของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางขึ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



ภาพประกอบ 4.34 แสดงความชื้นดินของสีกของระบบสี A และไม้แต่งผิวที่มีความหนา 100, 200 และ 300 ไมครอน ของขึ้นงานเคลือบสีอ้างอิงที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

วิเคราะห์ผล ชิ้นงานเคลือบสี

1. ชนิดของสี

จากตาราง 4.15 และ ตาราง 4.16 พบว่า ชิ้นงานเคลือบสีอีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันที่วางในกลางแจ้ง มีการหดตัวของสีทับหน้า การแตกของสีรองพื้นและมีสนิมเกิดขึ้นบนฟิล์มสี (ภาพประกอบ 4.23) ส่วนชิ้นงานเคลือบสีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกัน และอัลคิดไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นบนฟิล์มสี อธิบายได้ว่าฟิล์มสีอีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันที่วางในกลางแจ้งมีการเสื่อมสภาพโดยแสงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้มีการหลุดออกของผงสีและเกิดการเปลี่ยนแปลงของสี จนมีการแตกของสีทับหน้าก็จะทำให้น้ำและออกซิเจนแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับเนื้อเหล็กได้จนกลายเป็นสนิม (อรอุษา สรวารี, 2537 : Suzuki, 1989 : Wicks, Jones and Pappas, 1992) ดังนั้นสีอีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันจึงไม่เหมาะกับการใช้งานในกลางแจ้ง และเมื่อพิจารณาที่ชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิง (ภาพประกอบ ก.4) จะได้ว่า ชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิงมีความผิวดมของสีเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บรักษา (ภาพประกอบ 4.28) แต่ไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นบนฟิล์มสี โดยสีอัลคิดมีการเปลี่ยนแปลงของสีมากที่สุด และสีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันมีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยที่สุด ดังนั้นเมื่อนำชิ้นงานเคลือบสีที่ติดตั้งไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิง จะได้ว่า ชิ้นงานเคลือบสีที่วางในร่ม (ภาพประกอบ 4.27) มีความผิวดมของสีใกล้เคียงกับชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิง ส่วนชิ้นงานเคลือบสีที่วางในกลางแจ้งจะมีความผิวดมของสีสูงกว่าในร่มและอ้างอิงตามลำดับ โดยที่ สีอีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันมีความผิวดมของสีสูงสุดเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของฟิล์มสี สีอัลคิด 2 และสีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกัน มีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยที่สุด ซึ่งสีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันจะมีค่าความผิวดมของสีค่อนข้างคงที่

นอกจากนี้สีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันที่มีการกรีดสี พบว่ามีสนิมเกิดขึ้นในร่องที่กรีดไว้แต่ไม่ได้ลุกลามเข้าไปในฟิล์มสี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันมีคุณสมบัติในการยึดติดแน่นที่ดี

2. วิธีการเคลือบสี

ชิ้นงานเคลือบสีโคลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกัน จะมีวิธีเคลือบสี 2 วิธี คือ การพ่นและการทาที่ความหนาต่างๆ กัน (ตาราง 3.1) พบว่า ชิ้นงานเคลือบสีโคลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันโดยการทา ด้วยความหนา 100 ไมครอนที่วางในกลางแจ้ง มีสนิมเกิดขึ้นตามรอยแปรง (ภาพประกอบ 4.25) ส่วนชิ้นงานเคลือบสีโดยการทาด้วยความหนา 300 ไมครอน และพ่นในทุกความหนา ไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นบนฟิล์มสี อธิบายได้ว่า ชิ้นงานที่เคลือบสีโดยการทา จะทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอในความหนาของฟิล์มสีเป็นเหตุให้ไม่มีความสม่ำเสมอของสารยึดในฟิล์มสี (Suzuki, 1989) และทำให้ส่วนที่มีความหนาน้อยง่ายต่อการเสื่อมสภาพโดยแสงอัลตราไวโอเล็ตเมื่อนำชิ้นงานไปวางในกลางแจ้ง ส่วนการเคลือบสีโดยการพ่นจะให้การป้องกันการกัดกร่อนที่ดีกว่าการทาที่ความหนาเดียวกัน เนื่องจากมีความสม่ำเสมอในความหนาของฟิล์มสี และเมื่อนำชิ้นงานที่ติดตั้งไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานเคลือบสีอ่างอิง (ภาพประกอบ ก.6) พบว่า ความผิวด้านของสีของชิ้นงานเคลือบสีโคลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกัน ทั้งโดยการทาและการพ่นมีค่าใกล้เคียงกัน (ภาพประกอบ 4.29 และ 4.31) ดังนั้น วิธีการเคลือบผิวที่แตกต่างกัน จึงไม่มีผลต่อความผิวด้านของสี เพียงแต่ชิ้นงานที่ติดตั้งทั้งในกลางแจ้งจะมีความผิวด้านของสีมากกว่าในร่มและชิ้นงานเคลือบสีอ่างอิงตามลำดับ (ตาราง 4.18 และ 4.19) เนื่องจากผงสีหลุดออกจากฟิล์มสีหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลผงสีที่เกิดจากแสงอัลตราไวโอเล็ตทำลายพันธะเคมีในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงช่วงมองเห็นเปลี่ยนไป (อรอุษา สรวารี, 2537)

3. ความหนาของสี

ในชิ้นงานเคลือบสีอีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันและอัลคิต ต่างใช้ความหนาตามคำแนะนำของคู่มือการใช้สี แต่ในสีโคลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกัน ได้เพิ่มเติมความหนาอีก 2 ความหนา คือ 100 และ 200 ไมครอน โดยที่ความหนาของคู่มือการใช้สี คือ 300 ไมครอน พบว่า ไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นบนฟิล์มสีในทุกความหนายกเว้นในสีอีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันที่มีการเสื่อมสภาพของสีเนื่องมาจากการใช้งานที่ไม่เหมาะสม ส่วนสีโคลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันก็แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติในการยึดติดแน่นที่ดี เพราะว่าในความหนา 100 ไมครอน ซึ่งต่ำกว่าความ

หนาที่แนะนำถึง 2 เท่า ก็ยังไม่ปรากฏความเสียหาย ดังนั้น ความหนาของสีที่ใช้ในการเคลือบสีเพื่อป้องกันการกัดกร่อน ควรใช้ความหนาตามที่ได้นำเสนอไว้ในคู่มือการใช้สี เพียงแต่เลือกใช้ชนิดของสีให้ถูกต้องตามลักษณะการใช้งานและสภาพแวดล้อม ซึ่งในบรรยากาศชนบทสีอัลคิดก็ให้การป้องกันการกัดกร่อนที่ดีและมีราคาถูกลงกว่าเมื่อเทียบกับสีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกัน ส่วนความผิแตกของสีพิจารณาที่สีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกัน พบว่า ความหนาของสีไม่มีผลต่อความผิแตกของสี เนื่องจากในความหนาต่าง ๆ จะมีความผิแตกของสีที่ใกล้เคียงกัน (ตาราง 4.18) และชั้นงานที่ติดตั้งในกลางแจ้งมีค่าความผิแตกของสีมากกว่าในร่ม (ภาพประกอบ 4.31) และชั้นงานเคลือบสีอ้างอิง (ภาพประกอบ 4.32) ตามลำดับ เช่นเดียวกับวิธีการเคลือบผิว โดยที่ความหนา 300 ไมครอนมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่

4. การเตรียมพื้นผิวก่อนการเคลือบสี

ในชั้นงานเคลือบสีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันโดยการพ่นมีชั้นงานอยู่ 2 ลักษณะ คือ ชั้นงานที่แต่งผิวและไม่แต่งผิวก่อนการเคลือบสี (ภาพประกอบ ก.2) พบว่าไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นบนฟิล์มสีของชั้นงานทั้ง 2 ลักษณะ เนื่องจากสภาพบรรยากาศที่ไม่รุนแรงและมีคุณสมบัติในการยึดติดแน่นที่ดี ส่วนความผิแตกของสี พบว่า การเตรียมพื้นผิวไม่มีผลต่อความผิแตกของสี เพราะที่ชั้นงานทั้ง 2 ลักษณะมีค่าความผิแตกของสีใกล้เคียงกัน และชั้นงานที่ติดตั้งในกลางแจ้งมีความผิแตกของสีมากกว่าในร่ม (ภาพประกอบ 4.31 และ 4.33) และชั้นงานเคลือบสีอ้างอิง (ภาพประกอบ 4.32 และ 4.34) ตามลำดับ เช่นเดียวกับวิธีการเคลือบผิวและความหนาของสีโดยที่ความหนา 300 ไมครอนมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุปผลการวิจัย

บทวิจารณ์

ปัจจัยที่มีผลต่อการกักตร้อนภายใต้บรรยากาศ คือ สภาพภูมิอากาศ และ ปริมาณมลสารในบรรยากาศ ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณฝน ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์และปริมาณแก๊สโอโซนเดียมคลอไรด์ โดยในงานวิจัยพบว่า ในแต่ละบรรยากาศต่างมีสภาพภูมิอากาศอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ส่งผลต่อการกักตร้อนไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่ปริมาณฝนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุด ดังจะเห็นได้จากอัตราการกักตร้อนขณะใด ๆ หรืออัตราการกักตร้อนที่เพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาที่ฝนตกหรือฤดูฝน และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการกักตร้อนในบรรยากาศชนบทกับจังหวัดสงขลาและเมือง Legazpi ดังตาราง 5.1 ซึ่งมีสภาพภูมิอากาศและปริมาณมลสารในบรรยากาศอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน พบว่าอัตราการกักตร้อนของบรรยากาศชนบทสูงกว่าเมือง Legazpi และจังหวัดสงขลาตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณฝนหรือมุกการวางขึ้นงาน เนื่องจากมุกการวางขึ้นงาน 0 องศาเซลเซียสกับแนวราบจะให้อัตราการกักตร้อนสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามอัตราการกักตร้อนก็ไม่ได้แตกต่างกันมากนักและสามารถจัดความรุนแรงของสภาพบรรยากาศเป็น C_2 ได้ทั้งหมด ส่วนปริมาณมลสารในบรรยากาศ พบว่า ปริมาณแก๊สโอโซนเดียมคลอไรด์มีอิทธิพลต่อการกักตร้อนมากกว่าปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ เห็นได้จากอัตราการกักตร้อนของบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเลเมื่อเปรียบเทียบกับบรรยากาศชายทะเลและเกาะสีชัง เนื่องจากเกาะสีชังและบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเลมีปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์มากกว่าบรรยากาศชายทะเลเป็น 2 และ 1 เท่า ตามลำดับ แต่บรรยากาศชายทะเลกลับมีอัตราการกักตร้อนมากกว่าเกาะสีชังและบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเลเป็น 5 และ 9 เท่า ตามลำดับ อธิบายได้ว่า บรรยากาศชายทะเลมีปริมาณฝนที่มากกว่าและมีการสะสมของแก๊สโอโซนเดียมคลอไรด์บนชั้นงานสูง เนื่องจากมีระยะห่างจากทะเลเพียง 25 เมตร จึงทำให้ถูกกระแสลมพัดพาละอองแก๊สเข้ามาสะสมได้

สังเกตได้จากชิ้นงานหักงอ 90 องศา ด้านที่หันเข้าทะเลจะมีการสะสมของเกลือโซเดียมคลอไรด์มากกว่าอีกด้าน จึงทำให้คลอไรด์ไอออนกระตุ้นการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งสอดคล้องการตรวจพบ β -FeOOH ในบรรยากาศชายทะเล โดยที่ α -FeOOH, γ -FeOOH และ Fe_3O_4 ที่ตรวจพบในบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเลและเกาะสีชัง เป็นสนิมที่พบได้ทั่วไปในการกัดกร่อนของเหล็ก (Barton, 1976 : Leidheiser and Music, 1982, Jasinski and Asfaha, 1988 : Graedel and Frankenthal, 1990)

ตาราง 5.1 เปรียบเทียบการกัดกร่อนภายใต้บรรยากาศในระยะเวลา 1 ปีของงานวิจัยกับประเทศไทยและประเทศฟิลิปปินส์

| | งานวิจัย | | | ประเทศไทย ¹ | | ประเทศฟิลิปปินส์ ² |
|--|----------------|--------------------|----------------|------------------------|---------------------|-------------------------------|
| | บรรยากาศ | | | | | |
| | ชนบท | อุตสาหกรรม-ชายทะเล | ชายทะเล | ชนบท (จ.สงขลา) | ชายทะเล (เกาะสีชัง) | ชายทะเล (เมืองLegazpi) |
| อุณหภูมิจเฉลี่ย (°ซ.) | 28.06 | 27.70 | 27.71 | 27.77 | 28.35 | 27.03 |
| ความชื้นสัมพัทธ์ (%) | 76.83 | 73.49 | 78.05 | 71.80 | 75.50 | 83.08 |
| ปริมาณฝนเฉลี่ย (มม./เดือน) | 161.98 | 213.64 | 183.81 | 105.40 | 108.90 | - |
| ระยะเวลาเปียกชื้น (ปี) | - | - | - | - | - | 0.57 |
| SO _x ($\mu\text{gSO}_3/\text{dm}^2/\text{day}$) | 25.39 | 57.27 | 22.38 | 30.88 | 71.50 | 15 |
| NaCl ($\mu\text{gNaCl}/\text{dm}^2/\text{day}$) | 6.43 | 10.95 | 23.45 | 3.46 | 39.98 | 7.73 |
| อัตราการกัดกร่อน ($\mu\text{m}/\text{y}$) | 19.51 | 29.68 | 300.62 | 12.96 | 50.71 | 17.72 |
| สภาพความรุนแรงของบรรยากาศ | C ₂ | C ₃ | C ₅ | C ₂ | C ₄ | C ₂ |
| ผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน | | | | | | |
| α -FeOOH | ตรวจพบ | ตรวจพบ | - | - | ตรวจพบ | ตรวจพบ |
| γ -FeOOH | ตรวจพบ | ตรวจพบ | - | ตรวจพบ | ตรวจพบ | ตรวจพบ |
| β -FeOOH | - | - | ตรวจพบ | - | - | - |
| Fe ₃ O ₄ | ตรวจพบ | ตรวจพบ | - | ตรวจพบ | - | ตรวจพบ |

หมายเหตุ 1 : ลดาวัลย์ โชติมงคล และคณะ, 2539

2 : Bernas, C.V., et al., 1994

นอกจากนี้ปริมาณฝนยังส่งผลให้การวางชิ้นงานในกลางแจ้งมีอัตราการกัดกร่อนมากกว่าในร่ม ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในบรรยากาศชนบท ส่วนลักษณะของชิ้นงานพบว่า ชิ้นงานที่หังงอ 90 องศาที่วางหงายมีอัตราการกัดกร่อนมากกว่าที่วางคว่ำและชิ้นงานลักษณะอื่นๆ เนื่องจากลักษณะของชิ้นงานที่หังงอมีโอกาสรับการสะสมของปริมาณมลสารในบรรยากาศได้ง่ายและสามารถรับได้ 2 ทาง คือ จากกระแสลมที่พัดพามากรทบกับชิ้นงานและตกลงบนชิ้นงานโดยตรง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในบรรยากาศชายทะเล โดยพบว่าชิ้นงานหังงอ 90 องศาที่หันเข้าหาทะเลจะมีการสะสมของเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่มากกว่าอีกด้าน ส่วนชิ้นงานลักษณะอื่นๆ มีโอกาสรับการสะสมของปริมาณมลสารโดยการตกลงบนชิ้นงานเพียงอย่างเดียว

ส่วนการป้องกันการกัดกร่อนโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยสีในบรรยากาศ พบว่าชิ้นงานเคลือบสีที่วางในกลางแจ้ง และมีความเสียหายเกิดขึ้นบนฟิล์มสีเฉพาะการแตกลายงาและการเกิดสนิมเท่านั้น ไม่มีการโป่งพองเกิดขึ้น โดยที่ชิ้นงานเคลือบสีอีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันมีการแตกของสีทับหน้าและเกิดสนิมบนชิ้นงาน และชิ้นงานเคลือบสีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันโดยการทาด้วยความหนา 100 ไมครอน มีสนิมเกิดขึ้นในรอยแปรง ส่วนชิ้นงานเคลือบสีอื่นๆ รวมทั้งชิ้นงานเคลือบสีที่วางในร่มไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นบนฟิล์มสี และเมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติของสี (ภาคผนวก ก.3) พบว่า ฟิล์มสีของสีอีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันมีความแข็งแรง ทนทานต่อน้ำ สารเคมีและตัวทำละลายต่างๆ ได้ดี แต่สีอีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากฟิล์มสีที่ได้จะร่วนและเกิดการหลุดร่อนเป็นผงเมื่ออยู่ภายนอกหรือถูกแดดนานๆ (อรอุษา สรวารี, 2537 : Chandler, 1985) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัย ดังนั้นสีอีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันจึงไม่เหมาะที่จะใช้งานในกลางแจ้ง ส่วนสีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันมีความทนทานต่อน้ำและป้องกันสนิมได้ดีเหมาะสำหรับงานโครงสร้างเหล็ก เรือ ท่อส่งน้ำ ท่อส่งน้ำมันและอื่นๆ จะเห็นได้ว่าสีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัย เพียงแต่วิธีการเคลือบสีและความหนาที่ไม่เหมาะสมจึงทำให้เกิดสนิมในรอยแปรงในชิ้นงานเคลือบสีโดยการทาด้วยความหนา 100 ไมครอน สำหรับสีอัลทิดเป็นสีที่มีความเงาสูง ซึ่งจะสังเกตเห็นด้วยสายตาได้ว่ายังมีความเงาอยู่ นอกจากนี้ชิ้นงานเคลือบสีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันที่มีการกรีดสีและไม่มีการ

แต่งผิว ซึ่งเป็นสภาพที่ส่งเสริมการกัดกร่อนแต่ฟิล์มสีก็ยังป้องกันการกัดกร่อนไว้ได้ แสดงให้เห็นว่าสีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกันมีคุณสมบัติยึดติดแน่นที่ดี

ดังนั้น ในการเลือกใช้สีเพื่อป้องกันการกัดกร่อนในบรรยากาศชนบทซึ่งมีความรุนแรงของสภาพบรรยากาศน้อย จึงไม่จำเป็นต้องใช้สีที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น สีโกลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกัน เพียงแต่ใช้สีอัลคิด 1 หรือ 2 โดยใช้วิธีพ่น และความหนาที่เหมาะสม ก็จะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้มาก

สรุปผลการวิจัย

การกัดกร่อนของเหล็กภายใต้บรรยากาศในภาคใต้ของประเทศไทย เมื่อวางชิ้นงานทำมุม 0 องศา กับแนวราบในระยะเวลา 1 ปี พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนมากที่สุด คือ ปริมาณมลสารในบรรยากาศ โดยเฉพาะปริมาณแก๊สไอโซเดียมคลอไรด์ ประกอบกับสภาพภูมิอากาศอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้อิทธิพลของสภาพภูมิอากาศต่อการกัดกร่อนเป็นไปในลักษณะเดียวกันและน่าจะมีขนาดพอๆ กัน แต่ปริมาณแก๊สไอโซเดียมคลอไรด์จะส่งผลให้มีการกัดกร่อนที่แตกต่างกันซึ่งเห็นได้ชัดเจนในบรรยากาศชายทะเล (25 เมตร จากชายฝั่ง) ว่ามีอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยใน 1 ปีมากกว่าบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเล (500 เมตร จากชายฝั่ง) และชนบท (30 กิโลเมตร จากชายฝั่ง) เป็น 3-15 และ 10-17 เท่า ตามลำดับ และบรรยากาศอุตสาหกรรม-ชายทะเลมากกว่าชนบทไม่เกิน 1 เท่า โดยที่อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของบรรยากาศชายทะเล อุตสาหกรรม-ชายทะเลและชนบท เท่ากับ 300.62, 29.68 และ 19.51 $\mu\text{m}/\text{y}$ ตามลำดับ และสามารถจัดความรุนแรงของสภาพบรรยากาศตามอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย ได้ว่า บรรยากาศชายทะเลเป็น C_5 , อุตสาหกรรม-ชายทะเลเป็น C_3 และชนบทเป็น C_2 นอกจากนี้ลักษณะการวางชิ้นงานในกลางแจ้งจะมีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่าในร่มไม่เกิน 1 เท่า และชิ้นงานห้อย 90 องศา (วางหงาย) เป็นชิ้นงานที่มีอัตราการกัดกร่อนสูงสุด

สำหรับการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศชนบทโดยวิธีเคลือบสี พบว่า วิธีการเคลือบสีโดยวิธีพ่นให้การป้องกันที่ดีกว่าวิธีทา โดยที่ สีโกลทาร์อีพอกซี ชนิด 2 ส่วนผสมกัน และสีอัลคิดยังไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นบนฟิล์มสี ส่วนสีอีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกัน มีการเสื่อมสภาพของฟิล์มสีจึงไม่เหมาะกับการใช้

งานในกลางแจ้ง นอกจากนี้สีโคลทาร์อีพอกซีชนิด 2 ส่วนผสมกัน ยังมีคุณสมบัติการยึดติดแน่นที่ดี

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กภายใต้บรรยากาศ เป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ และมีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการศึกษา เพราะว่าจะได้เห็นแนวโน้มของการกัดกร่อน และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนกับเวลาหรือสภาพภูมิอากาศกับปริมาณมลสารในบรรยากาศได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการคาดคะเนการกัดกร่อนเพราะว่าสมการคาดคะเนการกัดกร่อนมักมีข้อจำกัดและใช้ได้ดีเฉพาะพื้นที่นั้นๆ แต่อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาการกัดกร่อนในระยะ 1 ปี ก็จะทำให้ทราบถึงอิทธิพลของสภาพภูมิอากาศหรือฤดูกาลอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงควรทำการวิจัยเพิ่มเติมในกรณีการเริ่มต้นวิจัยในช่วงของฤดูฝนว่ามีลักษณะการกัดกร่อนแตกต่างไปจากการเริ่มต้นวิจัยในช่วงของฤดูร้อนหรือไม่ นอกจากนี้ถ้าหากต้องการศึกษาสนิม ควรทำการศึกษาเป็นระยะๆ เช่นเดียวกับการหาอัตราการกัดกร่อน เนื่องจากสนิมมีการเปลี่ยนรูปไปตามสภาพแวดล้อม

สำหรับการป้องกันการกัดกร่อนโดยการเคลือบสี ควรศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องวิธีการเคลือบสี ความหนาของการเคลือบและการเตรียมพื้นผิวในกรณีของสีอัลคิด และ การใช้สีรองพื้นที่ป้องกันสนิมเพียงชนิดเดียวเนื่องจากพบเห็นได้ทั่วไป เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการเลือกใช้สีในการป้องกันอย่างเหมาะสม และทำการศึกษาในบรรยากาศอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบความรุนแรงของบรรยากาศ

บรรณานุกรม

- กนกพร เศรษฐลักขณ์. 2532. อิทธิพลของสารอัลลอยต่อแท่งอะโนดชนิดสังกะสีที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนแบบกะโทติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- กัญจนา ตระกูลกู. 2530. เทคโนโลยีการกัดกร่อน. กรุงเทพฯ : คราฟแมนเฟรส.
- ทรงกลด เจริญพร และ สมพงษ์ โชติจารุมนังวงศ์. 2533. การพัฒนาและปรับปรุงชุดทดสอบการกัดกร่อนแบบฟลักซ์ของเกลือ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เนตรทราย จุลาสัย, สุวลักษณ์ จุสวีสดี และ ปัญญา เสือดี. 2535. การวิเคราะห์มลสารในบรรยากาศประเทศไทย. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- ผคมเทพ มิกะเสน, นิรมล ถนัฒนศิลป์ และ ผุสดี แซ่ลิ้ม. 2536. การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบรถยนต์ในบรรยากาศ. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- พรชัย บุญโชคชัย, วิโรจน์ อภิวัฒน์กาญจน์ และ นิเวศคราวจันทร์ทีก. 2533. เครื่องทดสอบการกัดกร่อนของสารเคลือบอินทรีย์โดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ลดาวัลย์ โชติมงคล และคณะ. 2539. การวิจัยและพัฒนาวัสดุด้านทานการสึกกร่อน-
ในบรรยากาศต่าง ๆ. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

รุ่งทิพย์ ห้าวหาญ และ วรพงษ์ ดีรุ่งโรจน์. 2534. การทดสอบการเสื่อมสภาพของผิว
ขุบเคลือบสารอินทรีย์โดยแสงอุลตราไวโอเลต. วิทยานิพนธ์ปริญญา-
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระ-
จอมเกล้าธนบุรี.

วินิจ ละอองสุวรรณ. 2534. "การป้องกันการกัดกร่อนโดยการทาสี". วารสารโลหะ
วัสดุ และแร่. (กุมภาพันธ์), 65-69.

สมเกียรติ รุ่งทองใบสุรีย์. 2537. "การคาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กใน-
บรรยากาศ". วิศวกรรมสาร. 47 (2), 48-52.

สรุทธิ จุฑะพงศ์ และ เกรียงไกร อิมสมโภช. 2535. การหาอัตราการกัดกร่อนของ
โลหะชนิดต่าง ๆ ในบรรยากาศประเทศไทย. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และ-
เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2521. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
วิธีทดสอบสีวานิช และวัสดุที่เกี่ยวข้องเล่ม 3 แผ่นทดสอบและการเตรียม.
กรุงเทพมหานคร.

อรอุษา สรวารี. 2537. สารเคลือบผิว (สี วานิช และแล็กเกอร์). กรุงเทพมหานคร :
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

American Society for Testing and Material. 1985. Standard Test Method for Calculation of Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinate, ASTM, D2244, Vol. 06.01. The ASTM Committee of Standard, Easton, MD, U.S.A.

American Society for Testing and Material. 1987. Standard Method of Evaluating Degree of Blistering of Paints, ASTM, D714, Vol. 06.01. The ASTM Committee of Standard, Easton, MD, U.S.A.

American Society for Testing and Material. 1987. Standard Method of Evaluating Degree of Checking of Exterior Paints, ASTM, D659, Vol. 06.01. The ASTM Committee of Standard, Easton, MD, U.S.A.

American Society for Testing and Material. 1987. Standard Method of Evaluating Degree of Rusting, ASTM, D610, Vol. 06.01. The ASTM Committee of Standard, Easton, MD, U.S.A.

American Society for Testing and Material. 1987. Standard Practice for Preparing, cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, ASTM, G1, Vol. 06.01. The ASTM Committee of Standard, Easton, MD, U.S.A.

Baboian, R. , Haynes, G. & Sexton, P. 1978. " Atmospheric Corrosion of Laminar Composites Consisting of Copper on Stainless Steel " in Atmospheric Factors Affecting the Corrosion of Engineering Metals, ASTM STP 646, Coburn, S.K. Editor. (p. 30-47).

Barton, K. 1976. Protection Against Atmospheric Corrosion. John Wiley & Sons, Ltd.

- Bernas, C.V., et al. 1994. " Study on Atmospheric Corrosion in Philippines Series 2 : Nationwide Survey of Atmospheric Corrosivity " in Proceedings of the 8th ASIAN - PACIFIC Corrosion Control Conference. Materials and Corrosion Society (Thailand), et.al. Editor. (p. 170-180)
- Chandler, K. A. 1985. Marine and Offshore Corrosion. England. : Butterworth & Co (Publishers) Ltd.
- Chawla, S. K. and Payer, J. H. 1990. " The Early Stage of Atmospheric Corrosion of Copper by Sulfur Dioxide " J. Electrochem. Soc., 137(1), 60-64
- Costa, J.M. & Vilarrasa, M. 1993. "Effect of Air Pollution on Atmospheric Corrosion of Zinc " British Corrosion Journal., 28 (2), 117-120.
- Dickie, R.A. 1978. " Surface Study of De-adhesion of Paints by Corrosion " in Forth International Conference in Organic Coatings Science and Technology. Parfitt, G.D., et al. Editor. (p. 137-146)
- Feliu, S. Jr. , et al. 1990. " Dose / Response Equations for Mild Steel Corrosion in Marine Atmospheres " in Corrosion Reviews. vol.9. No. 3,4. Schorr, M. Editor. (p. 235-244)
- Fontana, M.G. 1987. Corrosion Engineering. (3rd ed.). Singapore. : Mcgrow-Hill Internation editions.

Graedel, T.E. & Frankenthal, R.P. 1990. " Corrosion Mechanisms for Iron and Low Alloy Steels Exposed to the Atmosphere " J. Electrochem. Soc., 137 (8), 2385-2394.

Grossman, P.R. 1978. " Investigation of Atmospheric Exposure Factors that Determine Time-of-wetness of Outdoor Structures " in Atmospheric Factors Affecting the Corrosion of Engineering Metals, ASTM STP 646, Coburn, S.K. Editor. (p. 5-16).

Haynie, F.H. , Spence, J.W. & Uphan, J.B. 1978. " Effects of Air Pollutants on Weathering Steel and Galvanized Steel : A Chamber Study " in Atmospheric Factors Affecting the Corrosion of Engineering Metals, ASTM STP 646, Coburn, S.K. Editor. (p. 30-47).

Heikoop, A. & Nor, A.M. 1994. " Industrial coating : Past, Present and Future Developments (Towards " Green " Barriers Between Aggressive Environments and Reactive Metal Surfaces) in Proceedings of the 8th ASIAN - PACIFIC Corrosion Control Conference. Materials and Corrosion Society (Thailand), et al. Editor. (p. 136-144).

International Organization for Standardization. 1992. Corrosion of Metals and Alloys-Corrosivity of Atmospheres Classification. ISO 9223. Technical Committee, Switzerland.

Iwami, T. 2539. เอกสารประกอบการสัมมนา เรื่อง การกีดกันของวัสดุอุตสาหกรรม กับบทบาทของ ISO 9000 / ISO 14000. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

Japanese Industrail Standard. 1987. Outdoor Exposure Test for Protected Metals, 0304. Fundamental & General Division. Japanese Industrail Standard Committee, Tokyo, Japan.

Japanese Industrail Standard. 1987. Recommended Practice for Weathering Test, 2381. Fundamental & General Division. Japanese Industrail Standard Committee, Tokyo, Japan.

Japanese Industrail Standard. 1979. Testing Method for Industrial Water, K0101. Chemical Engineering Division. Japanese Industrail Standard Committee, Tokyo, Japan.

Jasinski, R. & Asfaha, T. 1988. " FTIR Measurements of Iron Oxides on Low Alloy Steel " J. Electrochem. Soc : Electrochemical Science and Technology. 135(3), 551-556.

Kaneko, K. & Inouye, K. 1981. " The Mechanism of Chemisorption of SO₂ on Iron (III) Hydroxide Oxides " Corrosion Science., 27(9), 639-646.

Legault, R.A. & Pearson, V.P. 1978. " Kinetics of the Atmospheric Corrosion of Galvanized Steels " in Atmospheric Factors Affecting the Corrosion of Engineering Metals, ASTM STP 646, Coburn, S.K. Editor. (p. 83-96).

Leidheiser, H., Jr. & SvetoZar Music. 1982. " The Atmospheric Corrosion of Iron as Studied by Mossbauer Spectroscopy " Corrosion Science., 22(12), 1089-1096.

Misawa, T., et al. 1974. " The Mechanism of Atmospheric Rusting and the Protective Amorphous Rust on Low Alloy Steel " Corrosion Science., 14, 279-289.

Moree, J. C. 1978. " Interaction between Substrate and Coating related to Corrosion and Adhesion Phenomena " in Forth International Conference in Organic Coatings Science and Technology. Parfitt, G.D., et al. Editor. (p. 137-146)

Musalum, L. 1990. " Atmospheric Corrosion in Jakarta " in Siminar on Corrosion and Protection (17-19 October,1990). Thailand.

Mutsushima, I. 1994. " Trend in R & D on Corrosion in Japan " in Proceedings of the 8th ASIAN - PACIFIC Corrosion Control Conference. Materials and Corrosion Society (Thailand), et al. Editor. (p. 17-25).

Porro, A., Otero, T.F. & Elola, A.S. 1992. " Gravimetric Corrosion Monitoring and Mathematical Fitting of Atmospheric Corrosion Data for Carbon Steel " British Corrosion Journal., 27(3), 231-235.

Principe, R.G. et al. 1994. " Study on Atmospheric Corrosion in the Philippines Series 1 : The Effect of Angle of Inclination/Rack Orientation " in Proceedings of the 8th ASIAN - PACIFIC Corrosion Control Conference. Materials and Corrosion Society (Thailand), et al. Editor. (p. 181-188).

- Sawant, S.S. & Venogopal, C. 1996. " Effect of Exposure Angle on the Marine Atmospheric Corrosion of Mild Steel " Corrosion Prevention & Control., 43(1), 35-37.
- Suzuki, I 1989. Corrosion Resistant Coating Technology. New York. : Marcel Dekker, Inc.
- Suzuki, I., Masuko, N. & Hisamatsu, Y. 1979. " Electrochemical Properties of Iron Rust " Corrosion Science. 19, 521-535.
- Thanuddhanusilp, N. & Tahara, A. 1993. " The Effect of Surface Treatment on the Corrosion of Painted Steel " Thailand Institute of Scientific and Technological Research.
- Uhlig, H.H. & Revie, R.W. 1985. Corrosion and Corrosion Control. (3 rd ed.). New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Wei, F., Chen, W.Y. & Liou, H. 1994. " A Study of Performance of Anti-Rust Paints on Carbon and Atmospheric Corrosion Resistant Steels " in Proceedings of the 8th ASIAN - PACIFIC Corrosion Control Conference. Materials and Corrosion Society (Thailand), et al. Editor. (p. 313-316).
- Wei, F. 1991. " Atmospheric Corrosion of Carbon Steels and Weathering Steel in Taiwan " British Corrosion Journal., 26(3), 209-214.
- Wicks, Z. W. Jr., Jones, F. N. & Pappas, S. P. 1992. Organic Coating : Science and Technology Vol. 1 & 2. U.S.A. : John Wiley & Sons, Inc.

ภาคผนวก

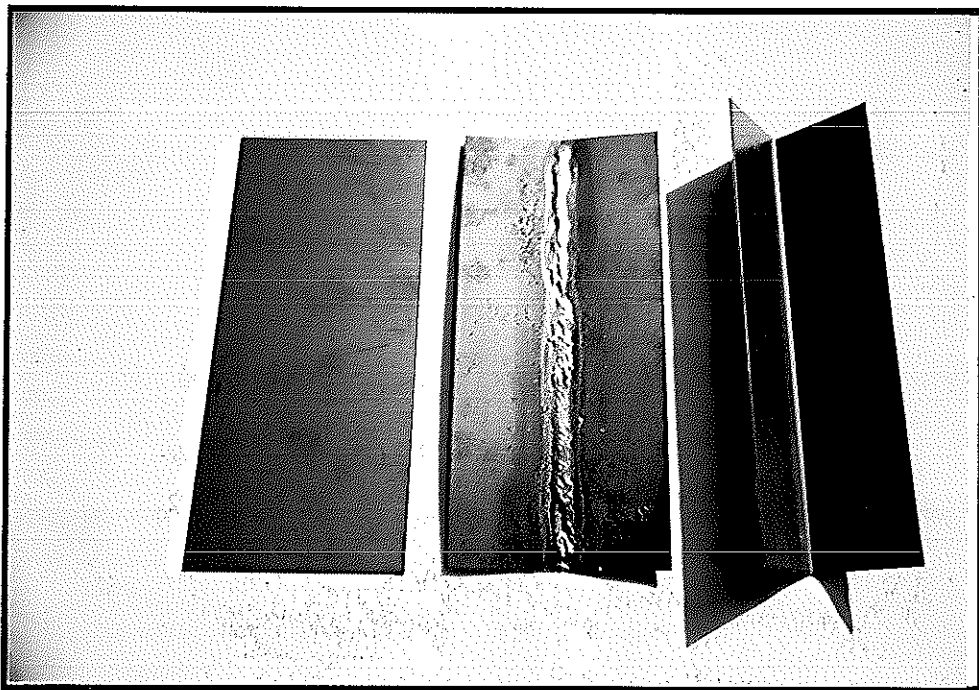
ภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดของชิ้นงาน

ก.1 ชิ้นงานเปลือย

ตาราง ก.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าละมุนที่ใช้ในงานวิจัย

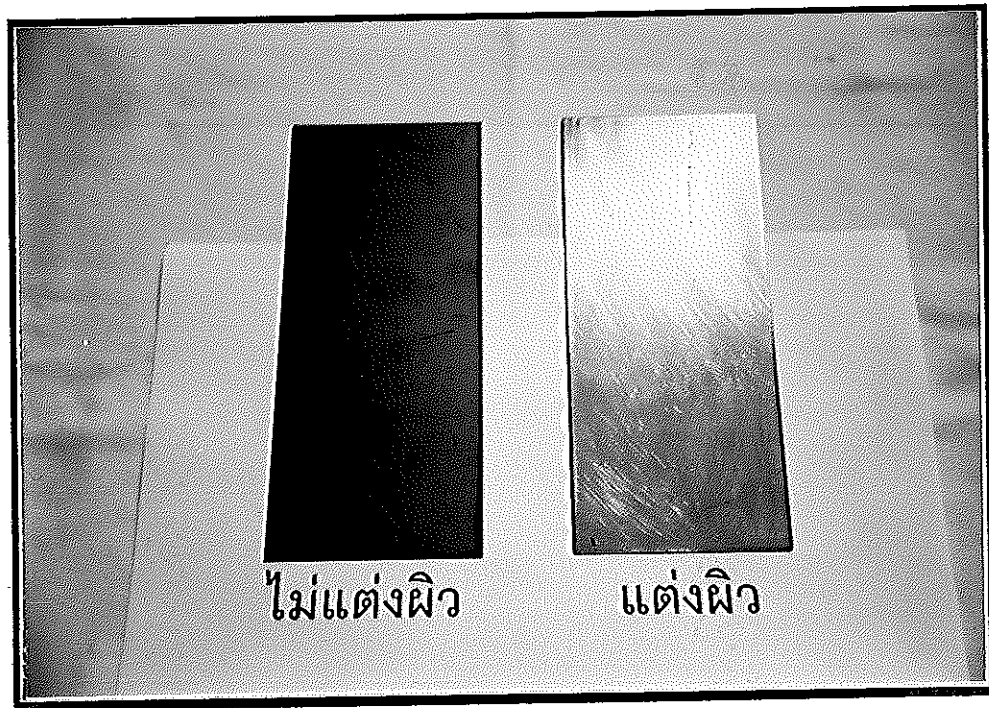
| ชิ้นงานทดสอบ | องค์ประกอบทางเคมี | | | | |
|--------------|-------------------|------|------|-------|---------|
| | %C | %Si | %Mn | %P | %S |
| เหล็กแผ่น | 0.04 | 0.01 | 0.36 | 0.013 | < 0.007 |

หมายเหตุ วิเคราะห์โดย ศูนย์ปฏิบัติวิจัยและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยี-
พระจอมเกล้าธนบุรี

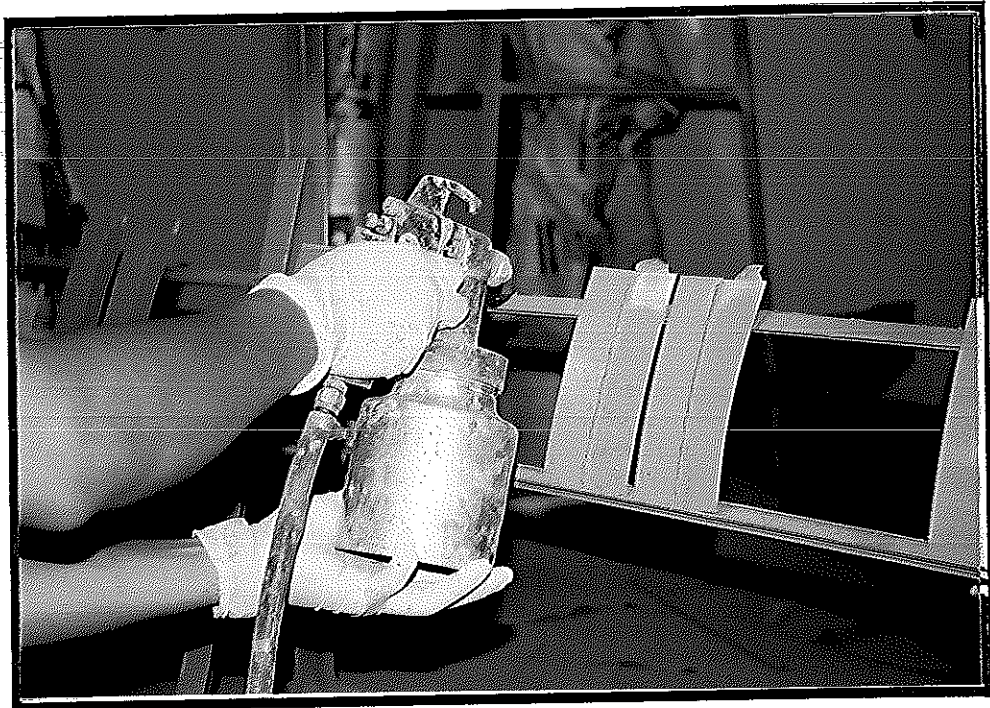


ภาพประกอบ ก.1 ชิ้นงานเปลือย : ปกติ, มีรอยเชื่อม และหักงอ 90 องศา
(เรียงจากซ้ายไปขวา)

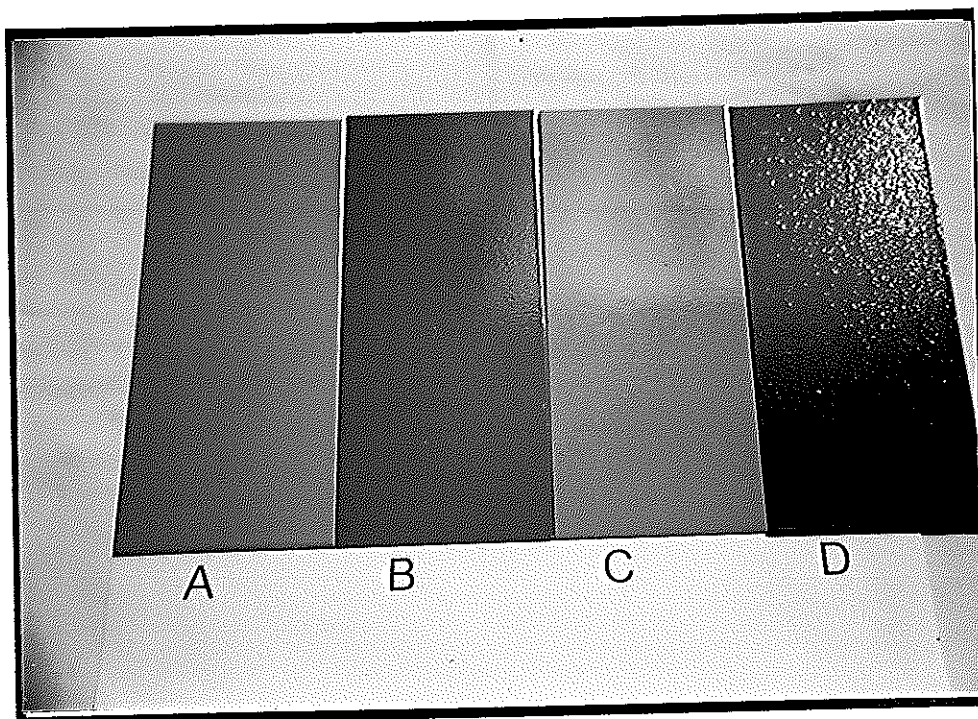
ก.2 ชิ้นงานเคลือบสี



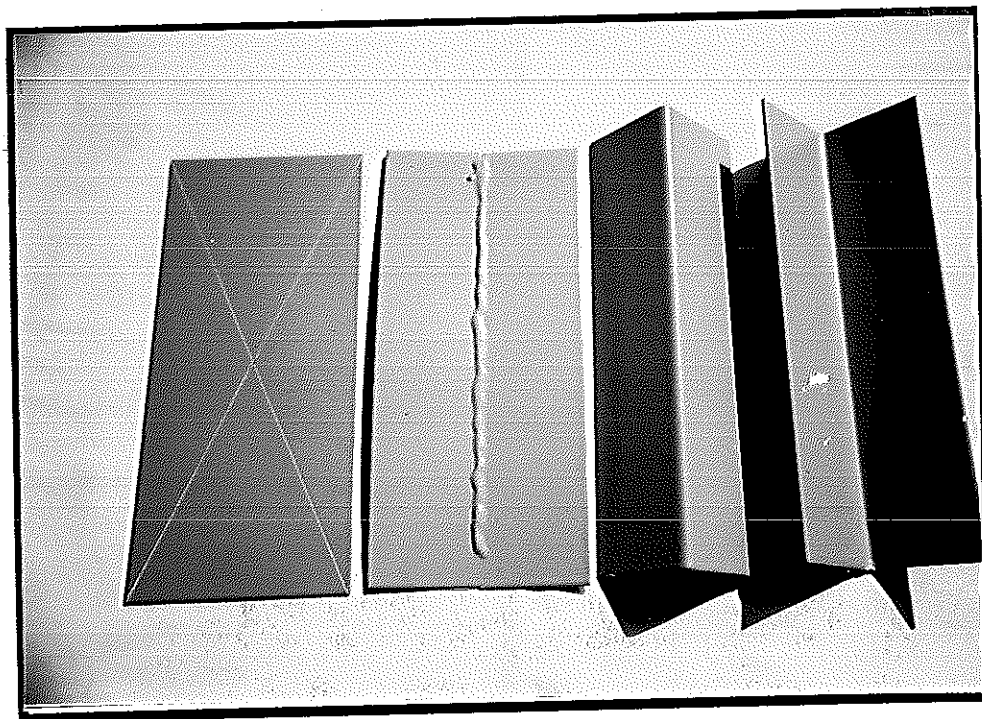
ภาพประกอบ ก.2 ชิ้นงานที่ไม่แต่งผิวและแต่งผิว



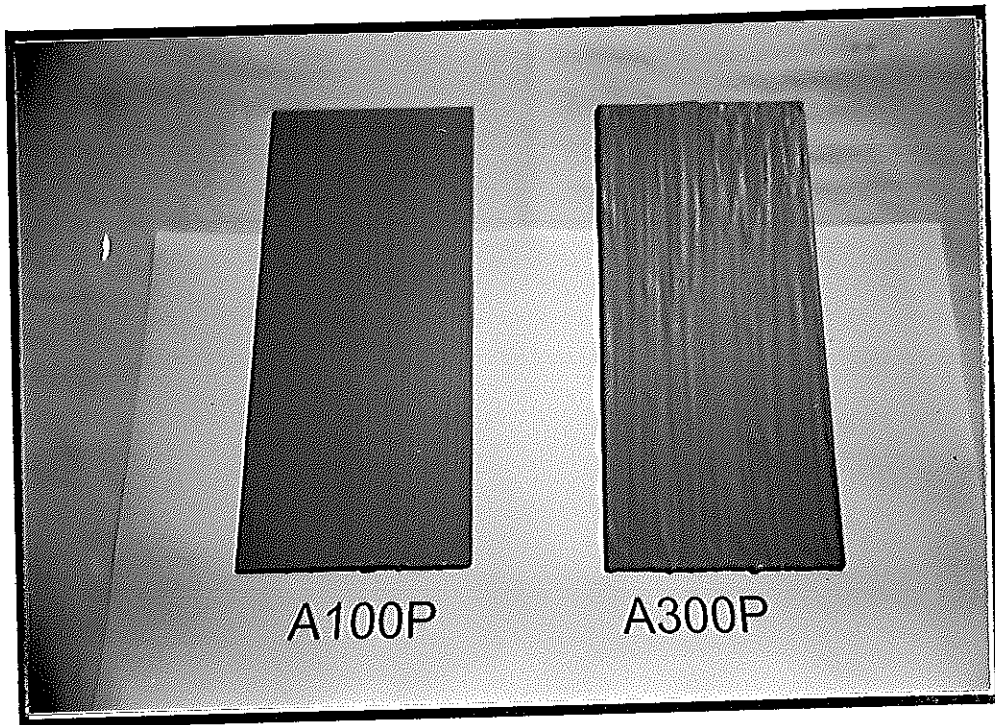
ภาพประกอบ ก.3 วิธีการพ่นสี



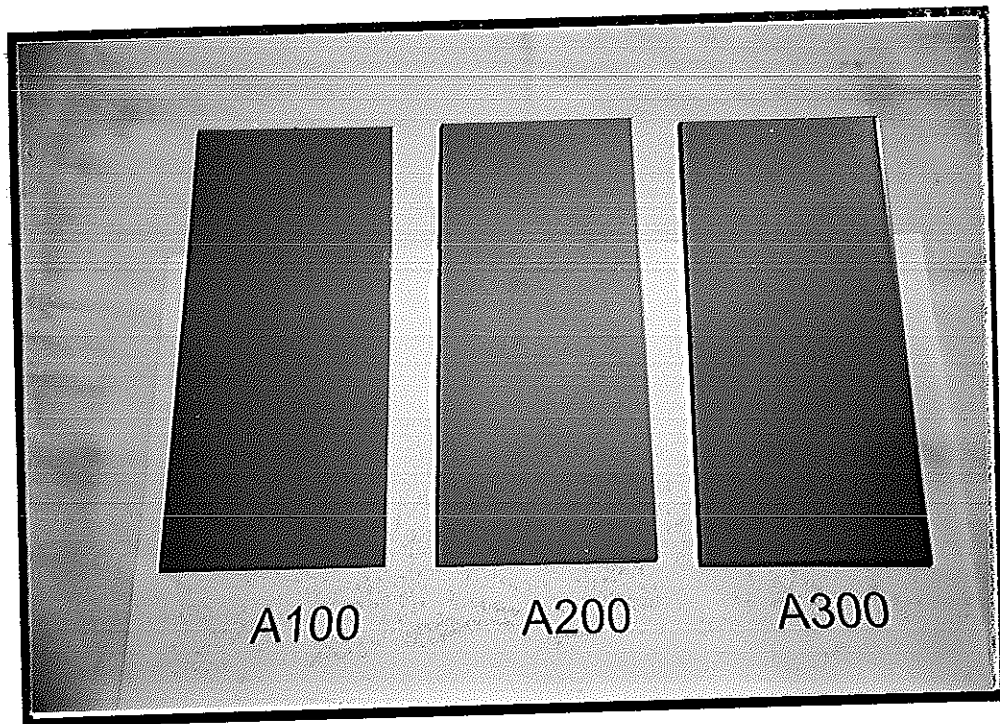
ภาพประกอบ ก.4 ชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิงสี A, B, C และ D



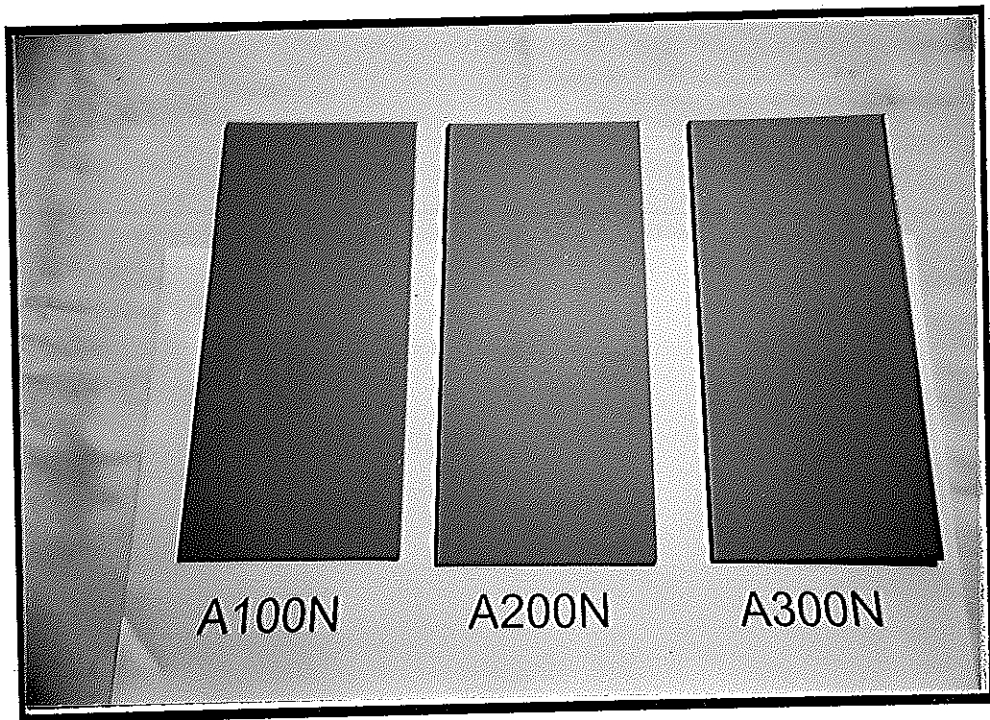
ภาพประกอบ ก.5 ชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิงสี A ที่มีการกรีดฟิล์มสี เชื่อม และหักงอ 90 องศา (วางคว่ำ, วางหงาย)



ภาพประกอบ ก.6 ชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิงสี A โดยวิธีทาความหนา 100 และ 300 ไมครอน



ภาพประกอบ ก.7 ชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิงสี A ความหนา 100, 200 และ 300 ไมครอน



ภาพประกอบ ก.8 ชิ้นงานเคลือบสีอ้างอิงที่ไม่แต่งผิวสี A ความหนา 100, 200 และ 300 ไมครอน

ก.3 รายละเอียดของสี

1. สี A : สีโพลีการ์ต (ยี่ห้อโจตัน)

คุณลักษณะของสินค้า : โพลีการ์ต เป็นสีโกลทาร์อีพอกซีชนิดฟอกจางมี 2 ส่วนผสมกัน

ข้อแนะนำในการใช้ : โพลีการ์ต มีคุณสมบัติทนทานต่อน้ำและป้องกันสนิมได้ดีเลิศ เหมาะสำหรับงานโครงสร้างเหล็ก, เรือ, ท่อส่งน้ำ, ท่อส่งน้ำมันและอื่นๆ

คุณลักษณะทางกายภาพ :

| | |
|------------------------|---|
| สี | แดง, เทาและเขียว |
| เนื้อสี (% โดยปริมาตร) | 67 ± 2 |
| ความถ่วงจำเพาะ | 1.25-1.30 (หลังจากผสม 2 ส่วนเข้าด้วยกัน) |
| ความเงา | กึ่งเงากึ่งด้าน |
| จุดวาบไฟ | 30 °ซ. - 85 °ฟ. |

ความหนืด

102-106 เกรบยูนิต

ความหนา

ตามตารางข้างล่าง

| ความหนา | แปรง/ลูกกลิ้ง | เครื่องพ่นสีระบบไฮดรอลิก |
|------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| ความหนาของฟิล์มสีแห้ง | 50 ไมครอน-2.0 มิล | 100 ไมครอน-4.0 มิล |
| ความหนาของฟิล์มสีเปียก | 75 ไมครอน-3.0 มิล | 150 ไมครอน-6.0 มิล |
| ทาได้เนื้อที่ | 13.3 ตร.ม./ลิตร | 6.7 ตร.ม./ลิตร-25.2 ตร.ม./ลิตร |
| | 13.4 -50.5 ตร.ม./ลิตร | |

เวลาในการแห้ง (ที่อุณหภูมิ 25 °ซ. -77 °ฟ.) :

| เวลาในการแห้ง | แปรง/ลูกกลิ้ง | เครื่องพ่นสีระบบไฮดรอลิก |
|------------------------------------|---------------------|--------------------------|
| แห้งสัมผัสได้หลังจาก | 1-2 ชั่วโมง | 4-6 ชั่วโมง |
| ระยะเวลาก่อนทาทับชั้นถัดไป หลังจาก | 6 ชั่วโมง | 6 ชั่วโมง |
| | -ไม่เกิน 36 ชั่วโมง | -ไม่เกิน 48 ชั่วโมง |
| แห้งใช้งานได้ หลังจาก | 3-5 วัน | 3-5 วัน |

ข้อมูลในการปฏิบัติงาน :

เครื่องมือ : แปรง, เครื่องพ่นสีระบบธรรมดาหรือเครื่องพ่นสีระบบไฮดรอลิก

อัตราส่วนผสม (โดยปริมาตร) : เนื้อสีส่วน A 4 ส่วน ต่อน้ำยาทำให้แข็ง B 1 ส่วน คนให้เข้ากันดี

อายุการใช้งาน (ที่อุณหภูมิ 23 °ซ.) : 6 ชั่วโมง (ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูง)

ทินเนอร์ : โจตันทินเนอร์ เบอร์ 17

ข้อมูลสำหรับการพ่นด้วยเครื่องพ่นสีระบบไฮดรอลิก

แรงดันไฮดรอลิก : 150 กิโลกรัม/ตร.ซม.-2100 ปอนด์/ตร.นิ้ว

ขนาดของหัวพ่น : 0.021-0.031 นิ้ว

มุมการพ่น : 65 °-85 °

การเตรียมพื้นผิวก่อนการใช้สี : ทาทับได้บนสีรองพื้นประเภทซิงค์รีซหรือบนเหล็กที่พ่นทรายขัดสะอาด ระดับ Sa 2 1/2 (ISO 8501-1:1988/SIS 05 5900)

ข้อแนะนำเวลาปฏิบัติงาน : อุณหภูมิของเหล็กต้องสูงกว่าจุดน้ำค้างอย่างน้อย 3 °ซ.-5 °ฟ. ก่อนทาหรือพ่นสี

ประกาศนียบัตร/ใบรับรอง : สีโพลีการ์ด ได้รับการรับรองจากสถาบัน North of England Industrial Health Service, Royal Min. of Social Affair และ Sate Inst. of Public Health Toxicol ว่าเป็นสีที่สามารถเคลือบภายในถังบรรจุเมล็ดพืชได้

2. สี B : สีเพนการ์ด อีนาเมล (ยี่ห้อโจตัน)

คุณลักษณะของสินค้า : เพนการ์ดอีนาเมล เป็นสีทับหน้าอีพอกซี ชนิด 2 ส่วนผสมกันที่ให้ความเงางามสูง

ข้อแนะนำในการใช้ : ใช้เป็นสีทับหน้าบนระบบอีพอกซี ซึ่งเคลือบวัสดุได้ทั้งบนผิวเหล็กและคอนกรีต

คุณลักษณะทางกายภาพ :

| | |
|-------------------------------------|---|
| สี | มีให้เลือกตามแค็ตตาล็อก |
| เนื้อสี (% โดยปริมาตร) | 55 ± 2 |
| ความถ่วงจำเพาะ | 1.20-1.30 (หลังจากผสม 2 ส่วนเข้าด้วยกัน) |
| ความเงา | เงามาก |
| ความยืดหยุ่น | ดี |
| ความทนน้ำ | ดีมาก |
| ความทนสารเคมี | ดีเลิศ |
| ความทนทานต่อตัวทำละลาย | ดีเลิศ |
| ความทนทานต่อการขัดถู | ดีมาก |
| ความหนืด | 67-72 เกรบยูนิต |
| ความสามารถในการปกคลุมพื้นที่ต่อชั้น | ตามตารางข้างล่าง |

| ความหนาของฟิล์มสี | | ทำได้เนื้อที่ (ตามทฤษฎี) |
|-------------------|---------------|--------------------------|
| แห้ง | เปียก | |
| 40-60 ไมครอน | 75-110 ไมครอน | 13.7-9.2 ตร.ม./ลิตร |
| 1.6-2.4 มิล | 3.0-4.3 มิล | 51.8-34.8 ตร.ม./ลิตร |

ข้อมูลในการปฏิบัติงาน :

เครื่องมือ : เครื่องพ่นสีระบบไฮดรอลิก, แปรงอาจใช้ได้บนพื้นที่ขนาดเล็ก

เล็ก

อัตราส่วนผสม (โดยปริมาตร) : เนื้อสีส่วน A 4 ส่วน ต่อน้ำยาทำให้
แข็ง B 1 ส่วน คนให้เข้ากันดี

การผสม : 1/2 ชม. ก่อนการใช้งาน

อายุการใช้งาน (ที่อุณหภูมิ 23 °ซ.) : 8 ชั่วโมง (ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูง)

ทินเนอร์/คลีนเนอร์ : ใจตันทินเนอร์ เบอร์ 17

ข้อมูลสำหรับการพ่นด้วยเครื่องพ่นสีระบบไฮดรอลิก

แรงดันไฮดรอลิก : 150 กิโลกรัม/ตร.ซม.-2100 ปอนด์/ตร.นิ้ว

ขนาดของหัวพ่น : 0.021-0.031 นิ้ว (0.46-0.58 มม.)

มุมการพ่น : 40 °-80 °

ไส้กรอง : ตรวจสอบว่าไส้กรองจะต้องสะอาดดี

การเตรียมพื้นผิวก่อนการใช้สี : ต้องแห้งสนิทปราศจากคราบไขมัน และสิ่ง
สกปรก ควรทำความสะอาดด้วยผงซักฟอก หรือน้ำยาขจัดคราบไขมันและล้างด้วย
น้ำสะอาดอีกครั้ง

ข้อแนะนำเวลาปฏิบัติงาน : อุณหภูมิของเหล็กต้องสูงกว่าจุดน้ำค้างอย่าง
น้อย 3 °ซ. ก่อนพ่นสีและมีการถ่ายเทอากาศที่ดี

เวลาในการแห้ง : ที่ความหนาที่บริษัทแนะนำไว้ และเวลาในการแห้งจะดี
ขึ้น ถ้ามีการถ่ายเทอากาศที่ดี

| อุณหภูมิของพื้นผิว | แห้งสัมผัส ได้หลังจาก | แห้งใช้งาน ได้หลังจาก | ระยะเวลาก่อนทาทับชั้นถัดไป | |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|---------|
| | | | ไม่น้อยกว่า | ไม่เกิน |
| 23 °ซ. | 3-6 ชม. | 7 วัน | 12 ชม. | 36 ชม. |
| 35 °ซ. | 2-5 ชม. | 3-5 วัน | 6 ชม. | 36 ชม. |

หมายเหตุ : ข้อมูลนี้ใช้สำหรับการทาซ้ำด้วยสีระบบเดียวกันเท่านั้น

ระบบสีที่แนะนำ :

เพนการ์ด ไพโรเมอร์ 1 x 50 ไมครอน (ความหนาของฟิล์มสีแห้ง)

เพนการ์ด เอชบี 1 x 100 ไมครอน (ความหนาของฟิล์มสีแห้ง)

เพนการ์ด อีนาเมล 1 x 50 ไมครอน (ความหนาของฟิล์มสีแห้ง)

การจัดเก็บและดูแล

การจัดเก็บ : สีนํ้าจะเก็บในที่เย็นและมีการถ่ายเทที่ดี ไม่ควรเก็บในที่ร้อนและไม่ให้ถูกแสงแดดโดยตรงควรปิดฝาแน่นตลอดเวลา

การขนย้าย : ควรขนย้ายด้วยความระมัดระวัง คนสีให้เข้ากันให้ดีกว่าก่อนใช้

ขนาดของสี : 3.024 ลิตร ของเนื้อสีส่วน A, 0.756 ลิตร ของนํ้ายาทำให้แข็งส่วน B และ 15.14 ลิตร ของเนื้อสีส่วน A, 3.785 ลิตร ของนํ้ายาทำให้แข็งส่วน B

จุดวาบไฟ : 25 °ซ. ± 2

สุขภาพและความปลอดภัย : กรุณาดูข้อควรระวังที่ติดไว้หน้ากระป๋อง การพ่นสีควรทำในที่ที่อากาศถ่ายเท อย่างสุดละเอียงของสี ควรใส่หน้ากากเมื่อพ่นสี และพยายามเลี่ยงมิให้สีถูกผิวหนัง ถ้าสีหกใส่ผิวหนังควรล้างด้วยนํ้าสะอาดกับสบู่ทันที ถ้าถูกตาควรล้างด้วยนํ้าสะอาดและปรึกษาแพทย์ทันที

3. สี C : สีนํ้ามันการ์เด็กซ์ (ยี่ห้อโจตัน)

คุณลักษณะของสี : การ์เด็กซ์เป็นสีที่ทำมาจากอัลคิเดเรซิน

ข้อแนะนำในการใช้ : เหมาะสำหรับงานทั้งภายในและภายนอก ใช้ทาได้ทั้งงานเหล็ก-ไม้ ผิวคอนกรีตและอื่นๆ ให้สีที่คงทนสวยสดงดงาม ทนทานต่อเชื้อราได้เป็นเลิศ

คุณลักษณะทางกายภาพ :

| | |
|--------------------------|---------------------------------------|
| สี | ตามแค็ตตาล็อก |
| เนื้อสี (% โดยปริมาตร) | 50 |
| ความถ่วงจำเพาะ | 1.0-1.2 |
| ความเงา | เงามาก |
| จุดวาบไฟ | 40 °ซ. - 104 °ฟ. |
| ความหนืด | 72-77 เครบยูนิต |
| ความหนาของฟิล์มสีแห้ง | 50 ไมครอน-2.0 มิล |
| ความหนาของฟิล์มสีเปียก | 75 ไมครอน-3.0 มิล |
| ทาได้เนื้อที่ (ตามทฤษฎี) | 16.7 ตร.ม./ลิตร- 63.1 ตร.ม./แกลลอน |

เวลาในการแห้ง (ที่อุณหภูมิ 25 °ซ. -77 °ฟ.) :

แห้งสัมผัสได้ หลังจาก 1-3 ชั่วโมง

แห้งทาบได้ หลังจาก 12 ชั่วโมง

แห้งใช้งานได้ หลังจาก 24 ชั่วโมง

ข้อมูลในการปฏิบัติงาน :

เครื่องมือ : แปรง, ลูกกลิ้งหรือเครื่องพ่นสีระบบธรรมดา

กินเนอร์ : โจตันกินเนอร์ เบอร์ 2

การเตรียมพื้นผิวก่อนการใช้สี : พื้นผิวจะต้องแห้งและสะอาดปราศจากคราบไขมันสิ่งสกปรก

ประกาศนียบัตร/ใบรับรอง : สีน้ำมันการ์เด็กซ์ ได้รับเครื่องหมายมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

4. สี D : สีเคลือบเงาตราเอ็นอีซี (ยี่ห้อเอ็นอีซี)

คุณลักษณะ : สีเคลือบเงาตราเอ็นอีซี เป็นสีน้ำมันที่ผลิตจากเรซินสังเคราะห์ มีลักษณะแห้งเร็ว เงางาม เหมาะสมกับงานโลหะและงานไม้ทุกชนิดหรือผนังปูนที่รองพื้นแล้ว

ข้อมูลจำเพาะ : แห้งสัมผัสได้ภายใน 3 ชั่วโมง แห้งทาบได้ 10-12 ชั่วโมง 1 แกลลอนปกคลุมพื้นที่ได้ประมาณ 40 ตารางเมตรต่อครั้ง ควรเจือจางด้วยกินเนอร์หรือไวท์สปิริต

การใช้งาน : พื้นผิวที่จะทาต้องแห้ง สะอาด ปราศจากสนิม ฝุ่น คราบไขมันและวัสดุที่หลุดล่อน สำหรับงานเหล็กทาสีรองพื้นกันสนิม 1-2 ครั้ง สำหรับงานไม้ทาสีรองพื้นกันเชื้อรา 1-2 ครั้ง หรือสีรองพื้นไม้อลูมิ-เนียม 1 ครั้ง แล้วทาทับด้วยสีเคลือบเงาตราเอ็นอีซี 2 ครั้ง

5. สีรองพื้นเพนการ์ด (ยี่ห้อโจตัน)

คุณลักษณะของสินค้า : สีรองพื้นเพนการ์ด เป็นสีรองพื้นอีพอกซี ชนิด 2 ส่วนผสมกันทำจากอีพอกซีประเภทน้ำหนักโมเลกุลสูง

ข้อแนะนำในการใช้ : เป็นสีรองพื้นป้องกันการกัดกร่อนสำหรับระบบอีพอกซี

คุณลักษณะทางกายภาพ :

| | |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| สี | แดง |
| เนื้อสี (% โดยปริมาตร) | 51 ± 2 |
| ความถ่วงจำเพาะ | 1.25-1.30 |
| | (หลังจากผสม 2 ส่วนเข้าด้วยกัน) |
| ความเงา | ด้าน |
| ความยืดหยุ่น | ดี |
| ความทนน้ำ | ดีเยี่ยม |
| ความทนสารเคมี | ดีเลิศ |
| ความทนทานต่อตัวทำละลาย | ดีเลิศ |
| ความทนทานต่อการขัดถู | ดีเยี่ยม |
| ความสามารถในการปกคลุมพื้นที่ต่อชั้น | ตามตารางข้างล่าง |

| ความหนาของฟิล์มสี | | ทาได้เนื้อที่ (ตามทฤษฎี) |
|-------------------|---------------|--------------------------|
| แห้ง | เปียก | |
| 40-60 ไมครอน | 80-120 ไมครอน | 12.7-8.5 ตร.ม./ลิตร |
| 1.6-2.4 มิล | 3.2-4.8 มิล | 48.1-32.2 ตร.ม./แกลลอน |

ข้อมูลในการปฏิบัติงาน :

เครื่องมือ : เครื่องพ่นสีระบบไฮดรอลิก, แปรงหรือลูกกลิ้งอาจใช้ได้ในการตกแต่งพื้นผิวเล็กน้อยอาจใช้ได้บนพื้นที่ขนาดเล็ก

อัตราส่วนผสม (โดยปริมาตร) : เนื้อสีส่วน A 4 ส่วน ต่อน้ำยาทำให้แข็ง B 1 ส่วน คนให้เข้ากันดี

อายุการใช้งาน (ที่อุณหภูมิ 23 °ซ.) : 8 ชั่วโมง (ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูง)

ทินเนอร์ : โจดันทินเนอร์ เบอร์ 17

ข้อมูลสำหรับการพ่นด้วยเครื่องพ่นสีระบบไฮดรอลิก

แรงดันไฮดรอลิก : 150 กิโลกรัม/ตร.ซม.-2100 ปอนด์/ตร.นิ้ว

ขนาดของหัวพ่น : 0.018-0.023 นิ้ว (0.46-0.58 มม.)

มุมการพ่น : 40 °-80 °

ไส้กรอง : ตรวจสอบว่าไส้กรองจะต้องสะอาดดี

การเตรียมพื้นผิวก่อนการใช้สี : ฟันทรายทำความสะอาดพื้นผิว ระดับ Sa 2 1/2 (ISO 8501-1 : 1988/SIS 05 5900) หรืออย่างน้อย St 2 สำหรับงานซ่อมแซมพื้นที่เล็กๆ

ข้อแนะนำเวลาปฏิบัติงาน : อุณหภูมิของพื้นผิวจะต้องสูงกว่าจุดน้ำค้างอย่างน้อย 3 °ซ. - 5 °ฟ. ก่อนพ่นสี สีรองพื้นเพนการ์ดไม่ควรถูกน้ำและสารเคมีหรือการเสียดสีอย่างแรงก่อนที่สีจะแห้งสนิทดี

เวลาในการแห้ง : ที่ความหนาที่บริษัทแนะนำไว้ และเวลาในการแห้งจะดีขึ้น ถ้ามีการถ่ายเทอากาศที่ดี

| อุณหภูมิของพื้นผิว | แห้งสัมผัสได้หลังจาก | แห้งใช้งานได้หลังจาก | ระยะเวลาก่อนทาทับชั้นถัดไป | |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|----------|
| | | | ไม่น้อยกว่า | ไม่เกิน* |
| 23 °ซ. | 60 นาที | 7 วัน | 12 ชม. | - |
| 35 °ซ. | 30 นาที | 3 วัน | 6 ชม. | - |

หมายเหตุ : * ขึ้นกับจำนวนชั้นและความหนาของฟิล์ม

ระบบสีที่แนะนำ :

สีรองพื้นเพนการ์ด 1 x 50 ไมครอน (ความหนาของฟิล์มสีแห้ง)

สีเพนการ์ด เอชบี 1 x 100 ไมครอน (ความหนาของฟิล์มสีแห้ง)

สีทับหน้าเพนการ์ด 1 x 50 ไมครอน (ความหนาของฟิล์มสีแห้ง)

การจัดเก็บและดูแล

การจัดเก็บ สินค้าจะเก็บในที่เย็นและมีการถ่ายเทที่ดี ไม่ควรเก็บในที่ร้อนและไม่ให้ถูกแสงแดดโดยตรงควรปิดฝาแน่นตลอดเวลา

การขนย้าย ควรขนย้ายด้วยความระมัดระวัง คนสีให้เข้ากันให้ดีก่อนใช้

ขนาดของสี 3.024 ลิตร ของเนื้อสีส่วน A, 0.756 ลิตร ของน้ำยาทำให้แข็งส่วน B และ 15.14 ลิตร ของเนื้อสีส่วน A, 3.785 ลิตร ของน้ำยาทำให้แข็งส่วน B

จุดวาบไฟ 24 °ซ.

สุขภาพและความปลอดภัย : กรุณาดูข้อควรระวังที่ติดไว้หน้ากระป๋อง การพ่นสีควรทำในที่ที่อากาศถ่ายเท อย่าสูดละอองของสี ควรใส่หน้ากากเมื่อพ่นสี และพยายามเลี่ยงมิให้สีถูกผิวหนัง ถ้าสีหกใส่ผิวหนังควรล้างด้วยน้ำสะอาดกับสบู่ทันที ถ้าถูกตาควรล้างด้วยน้ำสะอาดและปรึกษาแพทย์ทันที

6. สีรองพื้นเรดเลดไอออนออกไซด์ 1121 (ยี่ห้อโจตัน)

คุณลักษณะของสินค้า : สีรองพื้นเรดเลดไอออนออกไซด์ 1121 เป็นสีรองพื้นสำเร็จที่มีส่วนผสมของสารที่กันสนิมกับอัลคิเดเรซิน

ข้อแนะนำในการใช้ : เหมาะสำหรับรองพื้นงานเหล็กทั่วไป โดยใช้ควบคู่กับสีการ์เด็กซ์ อีนาเมล ตามระบบสีอัลคิเด

คุณลักษณะทางกายภาพ :

| | |
|-------------------------------------|------------------|
| สี | แดง-น้ำตาล |
| เนื้อสี (% โดยปริมาตร) | 55 ± 2 |
| ความถ่วงจำเพาะ | 1.60-1.65 |
| ความเงา | ด้าน |
| ความยืดหยุ่น | พอใช้ |
| ความหนืด | 86-90 เกรบยูนิต |
| ความสามารถในการปกคลุมพื้นที่ต่อชั้น | ตามตารางข้างล่าง |

| ความหนาของฟิล์มสี | | ทาได้เนื้อที่ (ตามทฤษฎี) |
|-------------------|--------------|--------------------------|
| แห้ง | เปียก | |
| 30-50 ไมครอน | 65-90 ไมครอน | 15.4-11.1 ตร.ม./ลิตร |
| 1.4-2.0 มิล | 2.5-3.5 มิล | 58.3-42.0 ตร.ม./แกลลอน |

ข้อมูลในการปฏิบัติงาน :

เครื่องมือ : เครื่องพ่นสีระบบไฮดรอลิคและระบบธรรมดา, ลูกกลิ้งอาจใช้ในการทาสีชั้นแรกหรือในการตกแต่งพื้นผิวเล็กน้อย

อัตราส่วนผสม (โดยปริมาตร) : สีรองพื้นเรดเลดไอออนออกไซด์ 1121 เป็นสีส่วนเดียว

ทินเนอร์ : โจตันทินเนอร์ เบอร์ 2

ข้อมูลสำหรับการพ่นด้วยเครื่องพ่นสีระบบไฮดรอลิก

แรงดันไฮดรอลิก : 150 กิโลกรัม/ตร.ซม.-2100 ปอนด์/ตร.นิ้ว

ขนาดของหัวพ่น : 0.015-0.021 นิ้ว (0.38-0.53 มม.)

มุมการพ่น : 65°-80°

ไส้กรอง : ตรวจสอบว่าไส้กรองจะต้องสะอาดดี

การเตรียมพื้นผิวก่อนการใช้สี : ต้องแห้งสนิทปราศจากคราบไขมันและสิ่งสกปรก ทำความสะอาดให้ได้ระดับอย่างน้อย St 2 (ISO 8501-1 : 1988/SIS 05 5900) การเตรียมพื้นผิวที่ดีจะช่วยให้อายุการใช้งานนานขึ้น

ข้อแนะนำเวลาปฏิบัติงาน : อุณหภูมิของเหล็กจะต้องสูงกว่าจุดน้ำค้างอย่างน้อย 3 °ซ. ก่อนพ่นสี

เวลาในการแห้ง : ที่ความหนาที่บริษัทแนะนำไว้ และเวลาในการแห้งจะดีขึ้น ถ้ามีการถ่ายเทอากาศที่ดี

| อุณหภูมิของพื้นผิว | แห้งสัมผัสได้หลังจาก | แห้งใช้งานได้หลังจาก | ระยะเวลาก่อนทาทับชั้นถัดไป | |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|---------|
| | | | ไม่น้อยกว่า | ไม่เกิน |
| 23 °ซ. | 1-2 ชม. | 24 ชม. | 8 ชม. | - |
| 35 °ซ. | 1 ชม. | 24 ชม. | 6 ชม. | - |

ระบบสีที่แนะนำ :

สีรองพื้นเรดเลดไอออนออกไซด์ 2 x 40 ไมครอน

(ความหนาของฟิล์มสีแห้ง)

การ์เด็กซ์ อีนาเมล 1 x 35 ไมครอน (ความหนาของฟิล์มสีแห้ง)

การ์เด็กซ์ อีนาเมล 1 x 35 ไมครอน (ความหนาของฟิล์มสีแห้ง)

การจัดเก็บและดูแล

การจัดเก็บ : สินค้าจะเก็บในที่เย็นและมีการถ่ายเทที่ดี ไม่ควรเก็บในที่ร้อนและไม่ให้ถูกแสงแดดโดยตรงควรปิดฝาแน่นตลอดเวลา

การขนย้าย : ควรขนย้ายด้วยความระมัดระวัง คนสีให้เข้ากันให้ดีกว่าก่อนใช้

ขนาดของสี : 1 และ 5 แกลลอน

จุดวาบไฟ : 40 °ซ.

สุขภาพและความปลอดภัย : กรณาดูข้อควรระวังที่ติดไว้ที่หน้ากระป๋อง
การพ่นสีควรทำในที่ที่อากาศถ่ายเท อย่างสุดละอองของสี ควรใส่หน้ากากเมื่อ
พ่นสีและพยายามเลี่ยงมิให้สีถูกผิวหนัง ถ้าสีหกใส่ผิวหนังควรล้างด้วยน้ำสะอาดกับ
สบู่ทันที ถ้าถูกตาควรล้างด้วยน้ำสะอาดและปรึกษาแพทย์ทันที

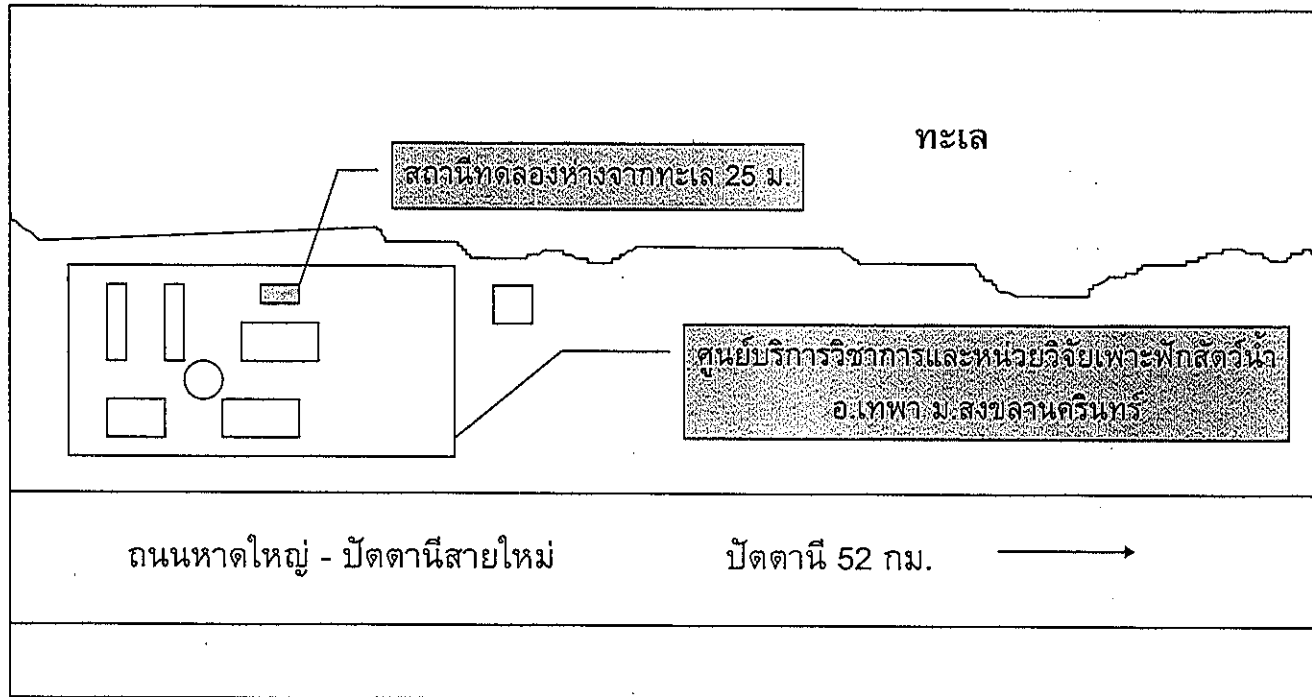
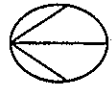
ภาคผนวก ข. รายละเอียดของสถานีทดลองและการติดตั้งชิ้นงาน



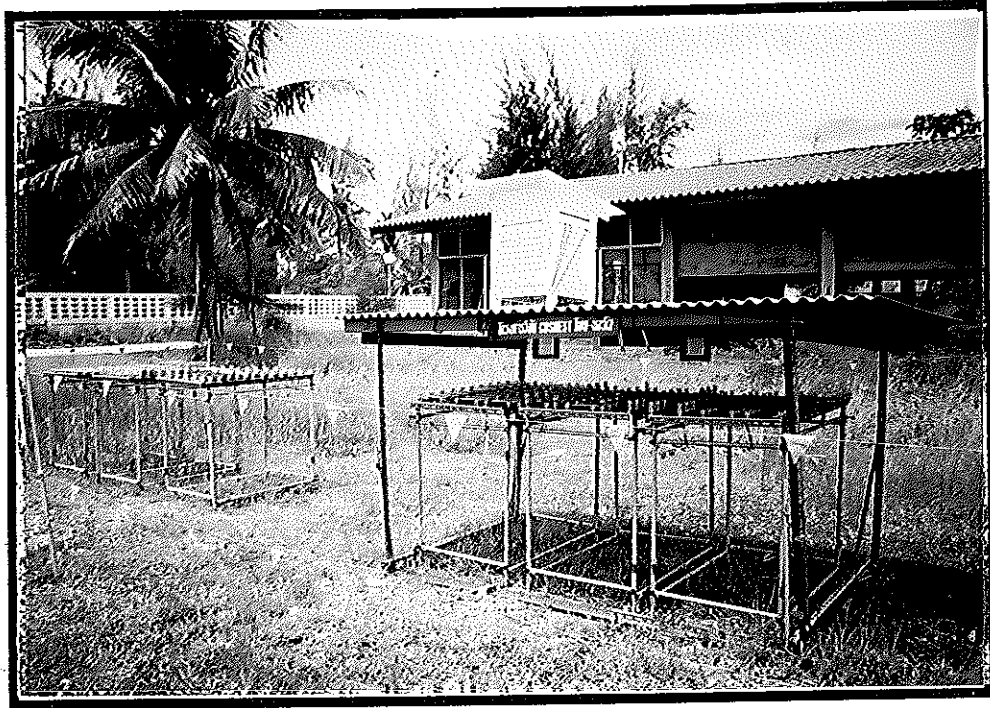
ภาพประกอบ ข.1 สถานีทดลอง ม.อ.



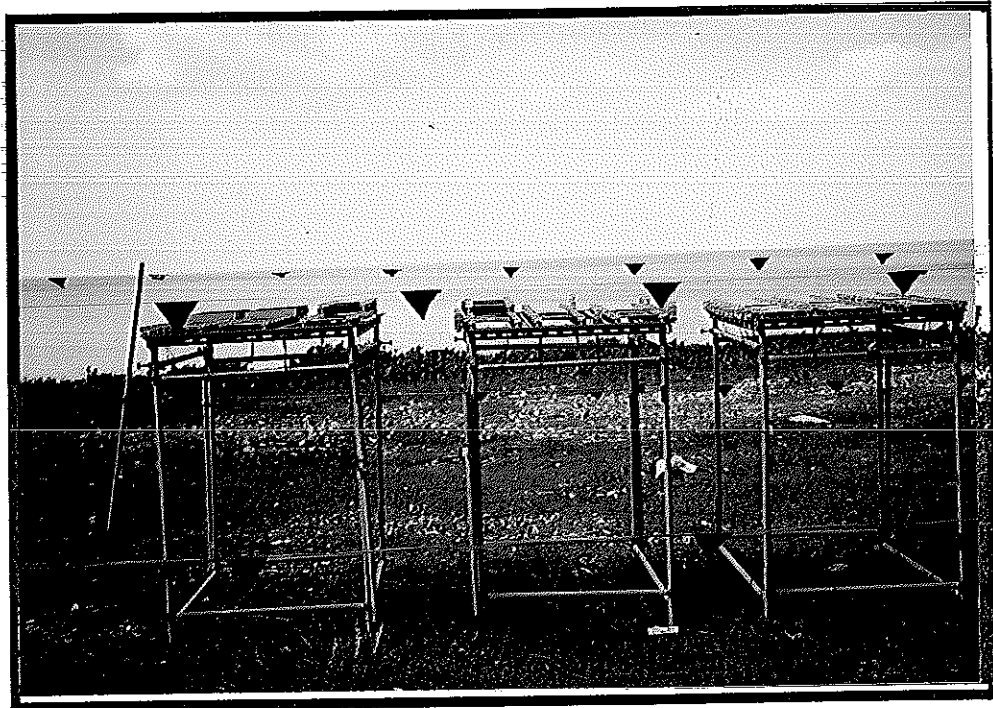
ภาพประกอบ ข.2 สถานีทดลอง ม.อ.



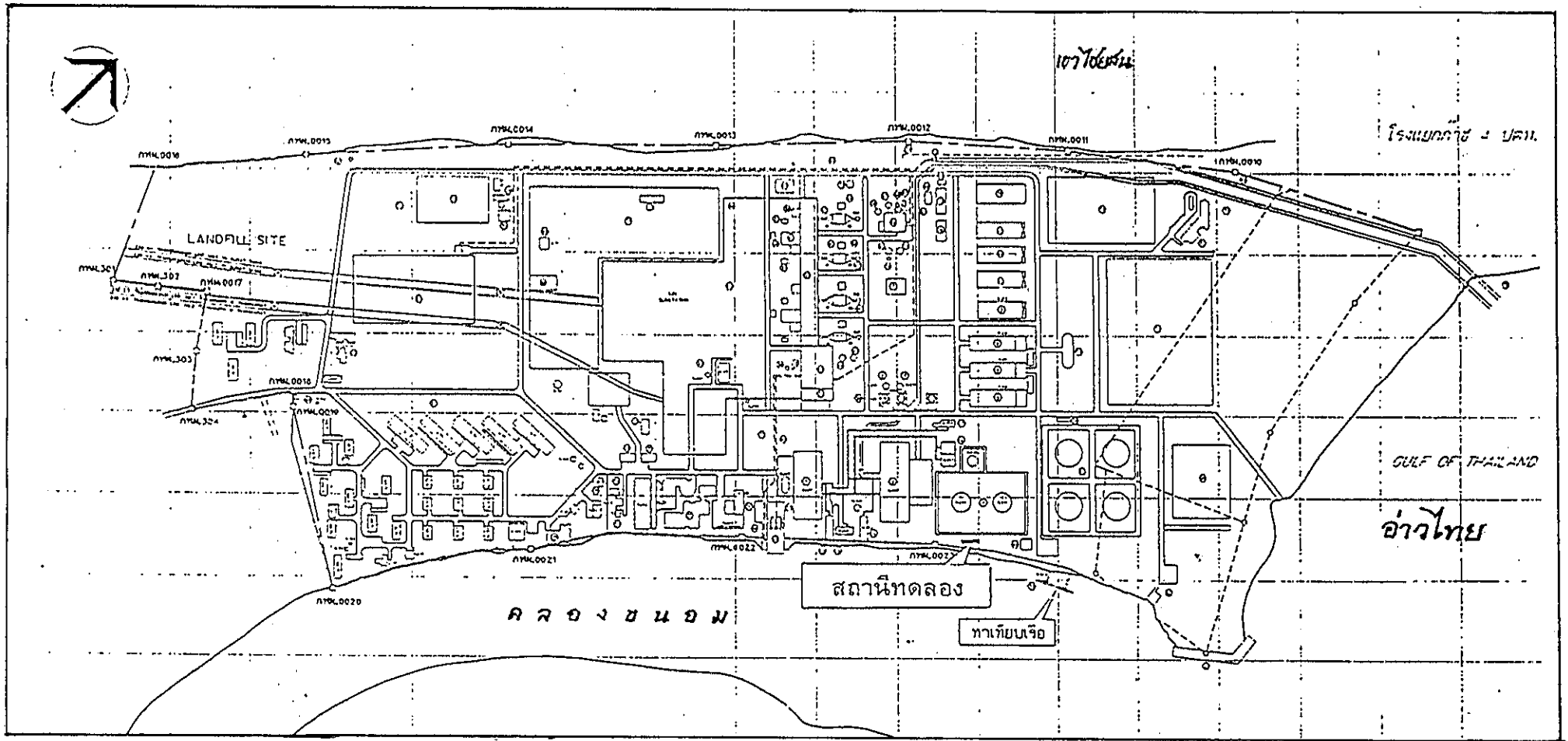
ภาพประกอบ ข.3 แสดงที่ตั้งของสถานีทดลอง อ.เทพา จ.สงขลา



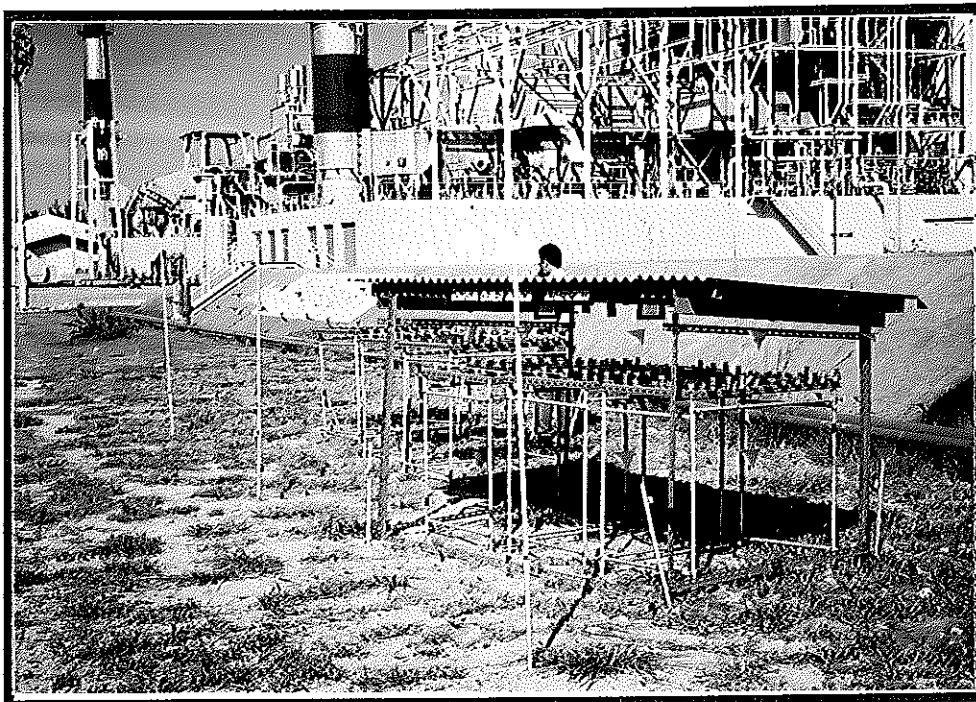
ภาพประกอบ ข.4 สถานีทดลอง อ.เทพา จ.สงขลา



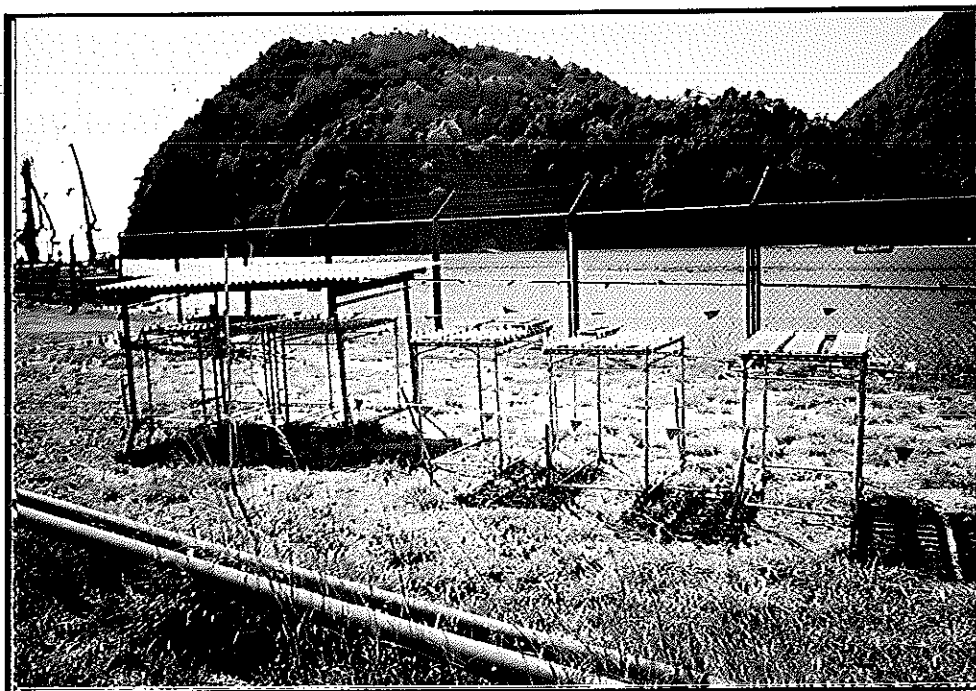
ภาพประกอบ ข.5 สถานีทดลอง อ.เทพา จ.สงขลา



ภาพประกอบ ข.6 แสดงที่ตั้งของสถานีทดลองในบริเวณบริษัทผลิตไฟฟ้าขนอม จำกัด



ภาพประกอบ ข.7 สถานีทดลอง อ.ขนอม จ.นครศรีธรรมราช



ภาพประกอบ ข.8 สถานีทดลอง อ.ขนอม จ.นครศรีธรรมราช

ภาคผนวก ค. ข้อมูลอากาศของสถานีทดลอง

ตาราง ค.1 ข้อมูลอากาศของสถานีตรวจอากาศ เกษตรคองหงส์ ระหว่างเดือน พ.ค.
2539 - เม.ย. 2540

| เดือนที่ | เดือน | อุณหภูมิ (°ซ.) | | | ความชื้นสัมพัทธ์ (%) | ปริมาณฝน (มม./เดือน) |
|----------|--------|-----------------|--------|--------|---------------------------|---------------------------|
| | | สูงสุด | ต่ำสุด | เฉลี่ย | | |
| 1 | พ.ค. | 33.70 | 24.50 | 29.10 | 75.00 | 229.40 |
| 2 | มิ.ย. | 33.10 | 24.60 | 28.90 | 77.00 | 141.00 |
| 3 | ก.ค. | 33.10 | 24.40 | 28.80 | 76.00 | 99.20 |
| 4 | ส.ค. | 32.80 | 24.10 | 28.40 | 75.00 | 229.40 |
| 5 | ก.ย. | 32.80 | 24.00 | 28.40 | 75.00 | 69.00 |
| 6 | ต.ค. | 32.00 | 23.60 | 27.80 | 78.00 | 210.80 |
| 7 | พ.ย. | 30.70 | 25.30 | 27.10 | 82.00 | 345.00 |
| 8 | ธ.ค. | 28.70 | 23.00 | 25.90 | 84.00 | 428.30 |
| 9 | ม.ค. | 30.80 | 23.20 | 27.00 | 74.00 | 7.00 |
| 10 | ก.พ. | 31.90 | 23.90 | 28.00 | 75.00 | 104.50 |
| 11 | มี.ค. | 32.60 | 24.10 | 28.40 | 75.00 | 21.70 |
| 12 | เม.ย. | 33.40 | 24.40 | 28.90 | 76.00 | 58.40 |
| | รวม | | | | | 1943.70 |
| | เฉลี่ย | 32.13 | 24.09 | 28.06 | 76.83 | 161.98 |

ตาราง ค.2 ข้อมูลอากาศของสถานีตรวจอากาศ สงขลา ระหว่างเดือน พ.ค. 2539 -
เม.ย. 2540

| เดือนที่ | เดือน | อุณหภูมิ (°ซ.) | | | ความชื้นสัมพัทธ์ (%) | ปริมาณฝน (มม./เดือน) |
|----------|--------|-----------------|--------|--------|---------------------------|---------------------------|
| | | สูงสุด | ต่ำสุด | เฉลี่ย | | |
| 1 | พ.ค. | 32.7 | 25.37 | 28.51 | 78.35 | 50.40 |
| 2 | มิ.ย. | 32.36 | 25.52 | 28.64 | 77.68 | 111.10 |
| 3 | ก.ค. | 32.7 | 24.98 | 28.46 | 76.30 | 44.20 |
| 4 | ส.ค. | 32.53 | 24.67 | 27.97 | 77.99 | 109.90 |
| 5 | ก.ย. | 32.93 | 24.85 | 28.19 | 74.29 | 211.80 |
| 6 | ต.ค. | 31.04 | 24.21 | 27.72 | 81.76 | 215.10 |
| 7 | พ.ย. | 30.30 | 24.07 | 26.75 | 83.47 | 490.40 |
| 8 | ธ.ค. | 28.00 | 23.54 | 26.63 | 85.11 | 803.60 |
| 9 | ม.ค. | 29.30 | 24.25 | 26.79 | 72.28 | 0.00 |
| 10 | ก.พ. | 30.70 | 24.45 | 27.41 | 77.45 | 49.80 |
| 11 | มี.ค. | 31.14 | 24.83 | 27.99 | 75.30 | 14.80 |
| 12 | เม.ย. | 32.96 | 25.20 | 28.49 | 76.59 | 104.60 |
| | รวม | | | | | 2205.70 |
| | เฉลี่ย | 31.31 | 24.66 | 27.71 | 78.05 | 183.81 |

หมายเหตุ ปริมาณฝนเป็นข้อมูลของ อ.เทพา

ตาราง ค.3 ข้อมูลอากาศของสถานีตรวจอากาศ อ.ชนอม ระหว่างเดือน พ.ค. 2539 -
เม.ย. 2540

| เดือนที่ | เดือน | อุณหภูมิ (°ซ.) | | | ความชื้นสัมพัทธ์ (%) | ปริมาณฝน (มม./เดือน) |
|----------|--------|-----------------|--------|--------|---------------------------|---------------------------|
| | | สูงสุด | ต่ำสุด | เฉลี่ย | | |
| 1 | พ.ค. | - | - | - | - | - |
| 2 | มิ.ย. | 34.70 | 23.20 | 23.90 | 73.48 | 112.28 |
| 3 | ก.ค. | 34.40 | 23.80 | 28.80 | 73.94 | 142.20 |
| 4 | ส.ค. | 34.20 | 22.80 | 28.70 | 71.58 | 93.80 |
| 5 | ก.ย. | 34.60 | 23.50 | 28.50 | 71.58 | 93.80 |
| 6 | ต.ค. | 32.40 | 22.80 | 27.20 | 79.74 | 477.20 |
| 7 | พ.ย. | 34.00 | 22.60 | 27.45 | 77.55 | 565.70 |
| 8 | ธ.ค. | 29.90 | 18.30 | 26.18 | 77.86 | 589.10 |
| 9 | ม.ค. | 31.30 | 20.20 | 27.43 | 68.83 | 21.60 |
| 10 | ก.พ. | 32.50 | 21.50 | 28.17 | 72.11 | 15.80 |
| 11 | มี.ค. | 32.80 | 22.10 | 28.93 | 70.19 | 7.20 |
| 12 | เม.ย. | 33.80 | 24.00 | 29.40 | 71.55 | 181.10 |
| | รวม | | | | | 2350.08 |
| | เฉลี่ย | 33.14 | 22.25 | 27.70 | 73.49 | 213.64 |

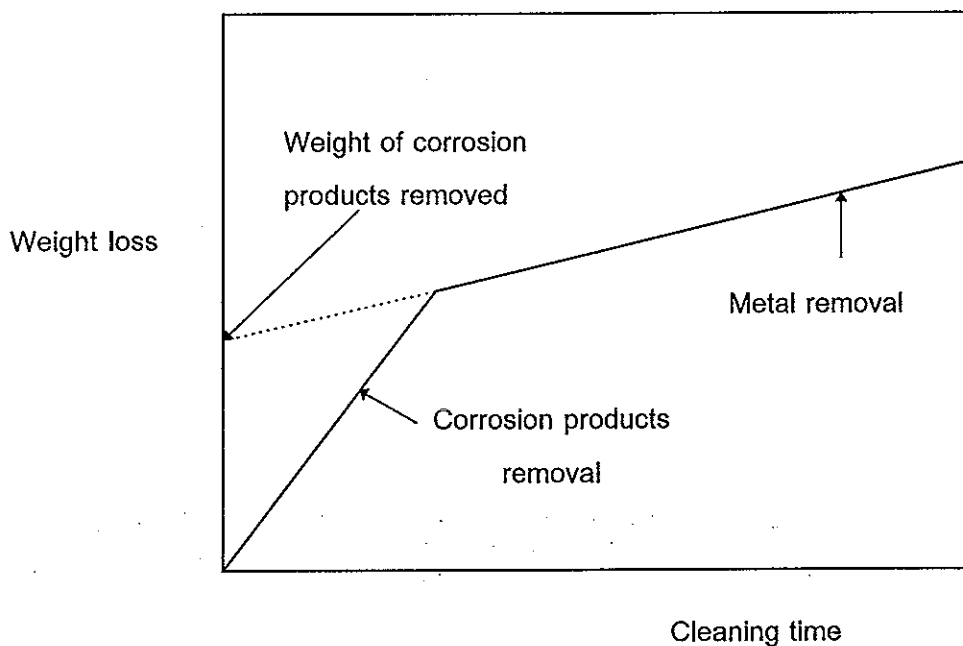
หมายเหตุ เนื่องจากสถานีตรวจอากาศ อ.ชนอมได้ย้ายสถานที่ทำการจึงไม่ได้จัดเก็บ
ข้อมูลในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2539

ภาคผนวก ง. การคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนของโลหะ โดยวิธีน้ำหนัก-
ที่หายไป (weight loss) (ASTM G 1)

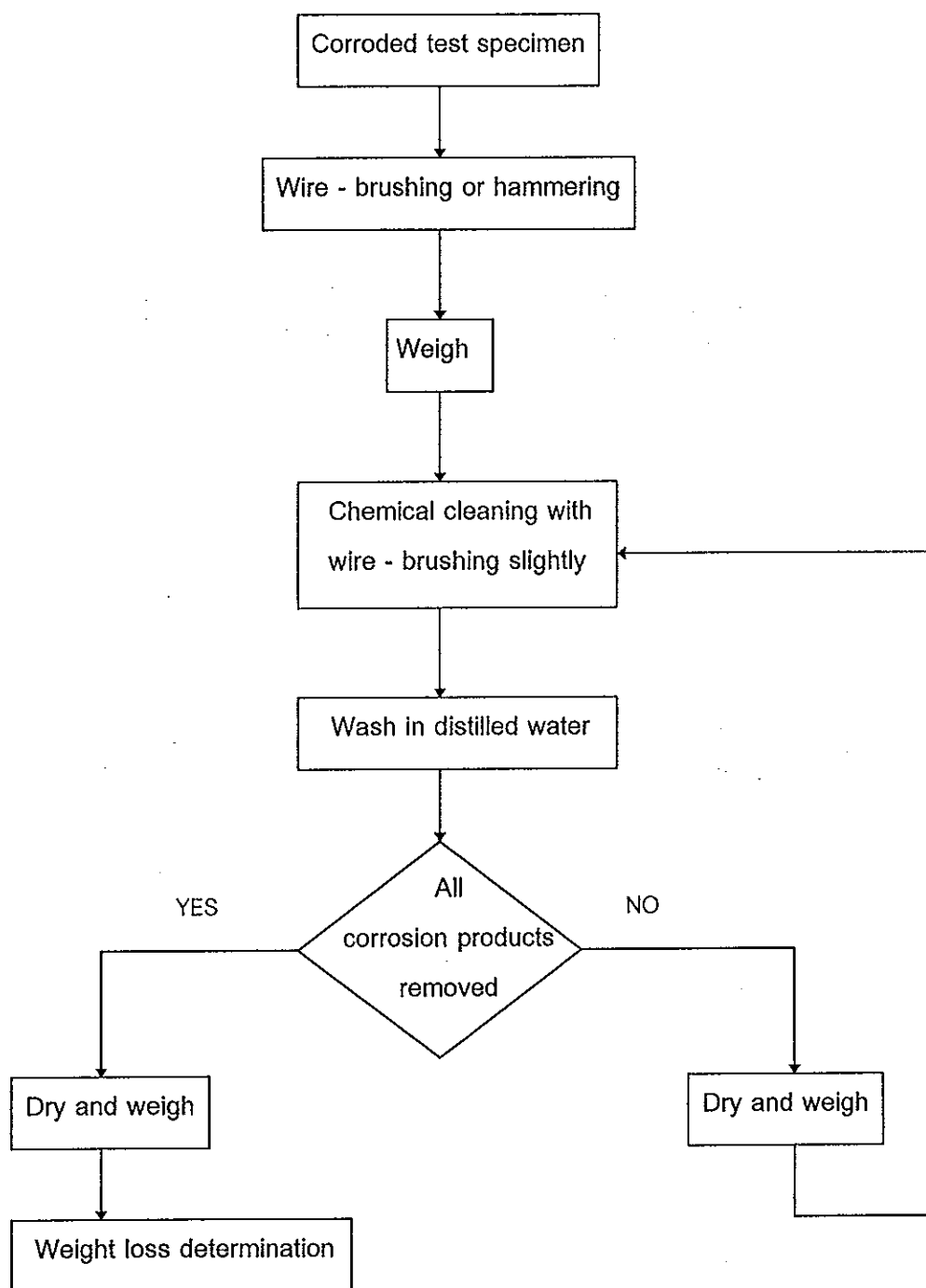
ง.1 วิธีการหาน้ำหนักที่หายไป

ต้องชั่งน้ำหนักเริ่มต้น และคำนวณพื้นที่ผิวของชิ้นงาน ก่อนนำไปติดตั้งตาม
แผงทดลองต่างๆ เมื่อครบกำหนดระยะเวลา เก็บชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักแล้วล้างสนิมที่
เกิดขึ้นด้วยสารเคมีที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (sp.gr. 1.19) 1 ลิตร
ผสมกับแอนติโมนีไตรออกไซด์ (Sb_2O_3) 20 กรัม และสแตนนัสคลอไรด์ ($SnCl_2$) 50
กรัม ซึ่งเวลาที่ใช้ล้างประมาณ 1 - 25 นาที แล้วชั่งน้ำหนักหลังการล้าง ทำการล้าง
จนชิ้นงานสะอาด (ภาพประกอบ ง.2)

หลังจากนั้นนำเวลาของการล้าง กับน้ำหนักที่หายไปมาพล็อตกราฟเพื่อหา
เฉพาะน้ำหนักที่หายไปของผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน (ภาพประกอบ ง.1) แล้วนำ
น้ำหนักที่หายไปของผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน ไปลบน้ำหนักของชิ้นงานที่ผ่านการ
เคาะสนิมด้วยค้อนหรือการขัดด้วยแปรงทองเหลือง จะได้น้ำหนักของชิ้นงานหลังการ
ติดตั้ง ซึ่งผลต่างของได้น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการติดตั้ง และน้ำหนักของชิ้นงาน
หลังการติดตั้งนั้น นำไปคำนวณอัตราการกัดกร่อน



ภาพประกอบ ง.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับเวลาในการล้างชิ้นงาน
ที่มา : ASTM G 1, 1985



ภาพประกอบ ง.2 แสดงขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นงานหลังการติดตั้ง

ตัวอย่างการคำนวณ

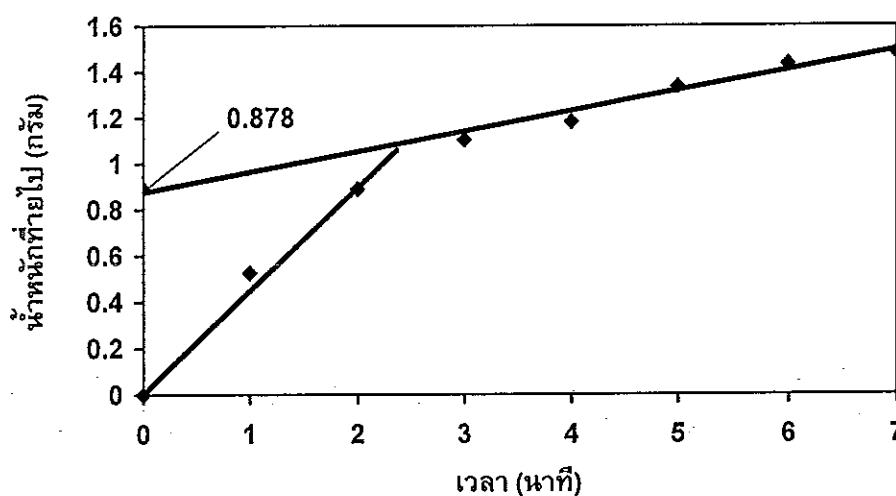
การทำความสะอาดชิ้นงานปกติหลังการติดตั้ง 1 เดือน ที่สถานีทดลอง ม.อ.
(วางชิ้นงานในกลางแจ้ง) แสดงผลดังตาราง ง.1 และภาพประกอบ ง.3

ตาราง ง.1 แสดงน้ำหนักที่หายไปในการล้างแต่ละครั้ง

| ครั้งที่ | น้ำหนัก (กรัม) | น้ำหนักที่หายไป (กรัม) |
|----------|----------------|------------------------|
| 0 | 134.084 | 0 |
| 1 | 133.558 | 0.526 |
| 2 | 133.194 | 0.890 |
| 3 | 132.980 | 1.104 |
| 4 | 132.902 | 1.182 |
| 5 | 132.749 | 1.335 |
| 6 | 132.650 | 1.434 |
| 7 | 132.602 | 1.482 |

หมายเหตุ - เวลาที่ใช้ในการล้างชิ้นงานในแต่ละครั้ง = 1 นาที

- น้ำหนักของชิ้นงานครั้งที่ 0 เป็นน้ำหนักของชิ้นงานที่ผ่านการเคาะสนิมด้วยค้อนหรือการขัดด้วยแปรงทองเหลือง



ภาพประกอบ ง.3 แสดงน้ำหนักที่หายไปเนื่องจากผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่าน้ำหนักหลังการติดตั้ง} &= 134.084 - 0.878 && \text{กรัม} \\ &= 133.206 && \text{กรัม} \end{aligned}$$

และคิดอัตราการกัดกร่อนในหน่วย $\mu\text{m/y}$ โดยมีข้อมูลของชิ้นงาน ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักก่อนการติดตั้ง} &= 133.966 && \text{กรัม} \\ \text{ขนาดของชิ้นงาน} &= 8.00 \times 17.95 \times 0.12 && \text{ซม.}^3 \\ \text{ระยะเวลาในการติดตั้ง} &= 30 && \text{วัน} \end{aligned}$$

จากสมการ

$$\text{เมื่อ} \quad \text{อัตราการกัดกร่อน} = \frac{K \times W}{A \times T \times D}$$

K = ค่าคงที่ที่ใช้ในการเปลี่ยนหน่วยของอัตราการกัดกร่อน
(ตาราง ง. 2)

$$= 8.76 \times 10^7$$

W = ผลต่างของน้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังวางทดสอบ (กรัม)

$$= 0.760$$

A = พื้นที่ผิว (ซม.²)

$$= 293.428$$

T = เวลาที่ใช้ในการวางทดสอบ (ชั่วโมง)

$$= 720$$

D = ความหนาแน่นของโลหะ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$$= 7.86$$

ดังนั้น อัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานปกติ = $39.92 \mu\text{m/y}$

ตาราง ง.2 แสดงค่าคงที่ในสมการการหาอัตราการกัดกร่อนในหน่วยต่าง ๆ

| Corrosion rate units desired | Constant (K) in corrosion rate equation |
|--|---|
| Mils per year (mpy) | 3.45×10^6 |
| inches per year (ipy) | 3.45×10^3 |
| inches per month (ipm) | 2.87×10^2 |
| millimeters per year (mm/y) | 8.76×10^4 |
| micrometers per year ($\mu\text{m}/\text{y}$) | 8.76×10^7 |
| picometers per second (pm/s) | 2.78×10^6 |
| grams per square meter per hour ($\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) | $1.00 \times 10^4 \times D$ |
| milligrams per square decimeter per day (mdd) | $2.40 \times 10^6 \times D$ |
| micrograms per square meter per second ($\text{g}/\text{m}^2\text{s}$) | $2.78 \times 10^6 \times D$ |

ที่มา : ASTM G 1, 1985

ง.2 ผลการคำนวณน้ำหนักที่หายไป อัตราเร็วและเร่งของการกักกร่อน
 ในชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ., อ.เทพา และ อ.ขนอม ที่ระยะ-
 เวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

ตาราง ง.3 น้ำหนักที่หายไป (g) ของชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ., อ.เทพา
 และ อ.ขนอม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

| น้ำหนักที่หายไป (g) | | | | | | | | |
|---------------------|-------------|--------|----------------------|--------|----------|--------|-----------------------|--------|
| สถานีทดลอง ม.อ. | | | | | | | | |
| เวลา (เดือน) | ชิ้นงานปกติ | | ชิ้นงานหักงอ 90 องศา | | | | ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม | |
| | | | วางคว่ำ | | วางหงาย | | | |
| | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม |
| 1 | 0.760 | 0.805 | 0.939 | 0.918 | 1.004 | 0.910 | 0.824 | 0.941 |
| 3 | 1.632 | 1.378 | 1.552 | 1.218 | 1.552 | 1.458 | 1.717 | 1.457 |
| 6 | 2.949 | 1.711 | 2.679 | 2.029 | 3.011 | 2.301 | 3.071 | 2.380 |
| 9 | 4.287 | 2.418 | 3.994 | 2.955 | 4.750 | 3.131 | 4.454 | 3.094 |
| 12 | 5.474 | 3.105 | 5.013 | 3.736 | 5.650 | 3.919 | 5.405 | 4.017 |
| สถานีทดลอง อ.เทพา | | | | | | | | |
| เวลา (เดือน) | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม |
| 1 | 1.217 | 1.204 | 1.350 | 1.347 | 1.443 | 1.460 | 1.320 | 1.361 |
| 3 | 2.529 | 2.740 | 2.723 | 2.714 | 3.157 | 2.908 | 2.447 | 2.629 |
| 6 | 3.651 | 3.664 | 3.393 | 3.769 | 3.331 | 3.648 | 2.933 | 4.041 |
| 9 | 19.472 | 19.699 | 33.058 | 26.831 | 34.011 | 31.697 | 17.453 | 17.588 |
| 12 | 73.927 | 60.019 | 97.052 | 58.575 | 101.997 | 65.68 | 64.647 | 33.959 |
| สถานีทดลอง อ.ขนอม | | | | | | | | |
| เวลา (เดือน) | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม |
| 1 | 1.357 | 1.237 | 1.095 | 1.176 | 1.212 | 1.233 | 1.203 | 1.236 |
| 3 | 2.143 | 2.340 | 2.083 | 2.372 | 2.512 | 2.767 | 2.451 | 2.136 |
| 6 | 3.931 | 3.754 | 3.666 | 3.917 | 4.317 | 4.143 | 3.810 | 3.650 |
| 9 | 5.955 | 5.694 | 5.598 | 5.457 | 6.504 | 6.728 | 6.142 | 5.641 |
| 12 | 6.75 | 6.578 | 7.263 | 6.315 | 7.544 | 7.230 | 6.792 | 6.406 |

ตาราง ง.4 น้ำหนักที่หายไป (g/m^2) ของชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ.,
อ.เทพา และ อ.ขนอม ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

| น้ำหนักที่หายไป (g/m^2) | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------|---------|----------------------|---------|----------|---------|-----------------------|---------|
| สถานีทดลอง ม.อ. | | | | | | | | |
| | ชิ้นงานปกติ | | ชิ้นงานหักงอ 90 องศา | | | | ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม | |
| | | | วางคว่ำ | | วางหงาย | | | |
| เวลา (เดือน) | กลางแจ้ง | โน้ม | กลางแจ้ง | โน้ม | กลางแจ้ง | โน้ม | กลางแจ้ง | โน้ม |
| 1 | 25.80 | 27.30 | 31.74 | 31.06 | 34.12 | 30.97 | 28.20 | 31.13 |
| 3 | 56.47 | 46.83 | 52.82 | 41.39 | 52.82 | 49.69 | 58.47 | 48.66 |
| 6 | 100.52 | 58.27 | 90.85 | 68.92 | 102.61 | 78.20 | 101.75 | 79.74 |
| 9 | 145.75 | 82.11 | 135.67 | 82.11 | 161.66 | 106.47 | 151.24 | 103.94 |
| 12 | 186.44 | 106.10 | 170.37 | 126.97 | 192.29 | 133.38 | 179.53 | 133.24 |
| สถานีทดลอง อ.เทพา | | | | | | | | |
| เวลา (เดือน) | กลางแจ้ง | โน้ม | กลางแจ้ง | โน้ม | กลางแจ้ง | โน้ม | กลางแจ้ง | โน้ม |
| 1 | 41.28 | 41.17 | 45.87 | 45.84 | 49.01 | 49.76 | 44.12 | 45.47 |
| 3 | 85.99 | 93.12 | 92.41 | 92.37 | 106.27 | 99.30 | 82.08 | 87.13 |
| 6 | 123.93 | 124.59 | 115.63 | 128.09 | 112.90 | 123.81 | 97.86 | 136.48 |
| 9 | 661.64 | 668.87 | 1126.61 | 911.87 | 1158.14 | 1077.84 | 597.56 | 590.28 |
| 12 | 2511.02 | 2306.96 | 3304.80 | 1990.72 | 3475.08 | 2238.35 | 2212.42 | 1132.23 |
| สถานีทดลอง อ.ขนอม | | | | | | | | |
| เวลา (เดือน) | กลางแจ้ง | โน้ม | กลางแจ้ง | โน้ม | กลางแจ้ง | โน้ม | กลางแจ้ง | โน้ม |
| 1 | 46.25 | 41.86 | 37.36 | 40.04 | 41.19 | 42.03 | 40.08 | 41.65 |
| 3 | 73.03 | 79.37 | 70.83 | 80.81 | 85.47 | 94.09 | 81.80 | 72.30 |
| 6 | 134.17 | 127.65 | 124.63 | 133.20 | 146.92 | 140.80 | 129.28 | 123.77 |
| 9 | 202.76 | 192.55 | 189.73 | 185.92 | 221.04 | 228.66 | 208.34 | 191.34 |
| 12 | 229.62 | 223.22 | 246.84 | 214.26 | 256.32 | 246.06 | 231.61 | 218.45 |

ตาราง ง.5 อัตราเร็วและแรงของการกัดกร่อน ในชั้นงานเปลือยของสถานีทดลอง
ม.อ. ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

| สถานีทดลอง ม.อ. | | | | | | |
|---------------------------------|--|--------|--|-------|--|--------|
| ชั้นงานปกติ | | | | | | |
| เวลา (เดือนที่) | อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย ($g/m^2/mo$) | | อัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ ($g/m^2/mo$) | | อัตราแรงการกัดกร่อนขณะใดๆ ($g/m^2/mo^2$)* | |
| | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม |
| 1 | 25.80 | 27.30 | 25.80 | 27.30 | 25.80 | 27.30 |
| 3 | 18.82 | 46.83 | 15.34 | 9.77 | -5.23 | -8.77 |
| 6 | 16.75 | 58.27 | 14.68 | 3.81 | -0.22 | -1.98 |
| 9 | 16.19 | 82.11 | 15.08 | 7.95 | 0.13 | 1.38 |
| 12 | 15.54 | 106.10 | 13.56 | 8.00 | -0.50 | 0.02 |
| ชั้นงานหึ่งงอ 90 องศา (วางคว่ำ) | | | | | | |
| 1 | 31.74 | 31.06 | 31.74 | 31.06 | 31.74 | 31.06 |
| 3 | 17.61 | 13.80 | 10.54 | 5.17 | -10.60 | -12.95 |
| 6 | 15.14 | 11.49 | 12.68 | 9.18 | 0.71 | 1.34 |
| 9 | 15.07 | 11.17 | 14.94 | 10.55 | 0.75 | 0.46 |
| 12 | 14.20 | 10.58 | 11.57 | 8.80 | -1.12 | -0.58 |
| ชั้นงานหึ่งงอ 90 องศา (วางหงาย) | | | | | | |
| 1 | 34.12 | 30.97 | 34.12 | 30.97 | 34.12 | 30.97 |
| 3 | 17.61 | 16.56 | 9.35 | 9.36 | -12.39 | -10.81 |
| 6 | 17.10 | 13.03 | 16.60 | 9.50 | 2.42 | 0.05 |
| 9 | 17.96 | 11.83 | 19.68 | 9.42 | 1.03 | -0.03 |
| 12 | 16.02 | 11.12 | 10.21 | 8.97 | -3.16 | -0.15 |
| ชั้นงานที่มีรอยเชื่อม | | | | | | |
| 1 | 28.20 | 31.13 | 28.20 | 31.13 | 28.20 | 31.13 |
| 3 | 19.49 | 48.66 | 15.14 | 8.77 | -6.53 | -11.18 |
| 6 | 16.96 | 79.74 | 14.43 | 10.36 | -0.24 | 0.53 |
| 9 | 16.80 | 103.94 | 16.50 | 8.07 | 0.69 | -0.76 |
| 12 | 14.96 | 133.24 | 9.43 | 9.77 | -2.36 | 0.57 |

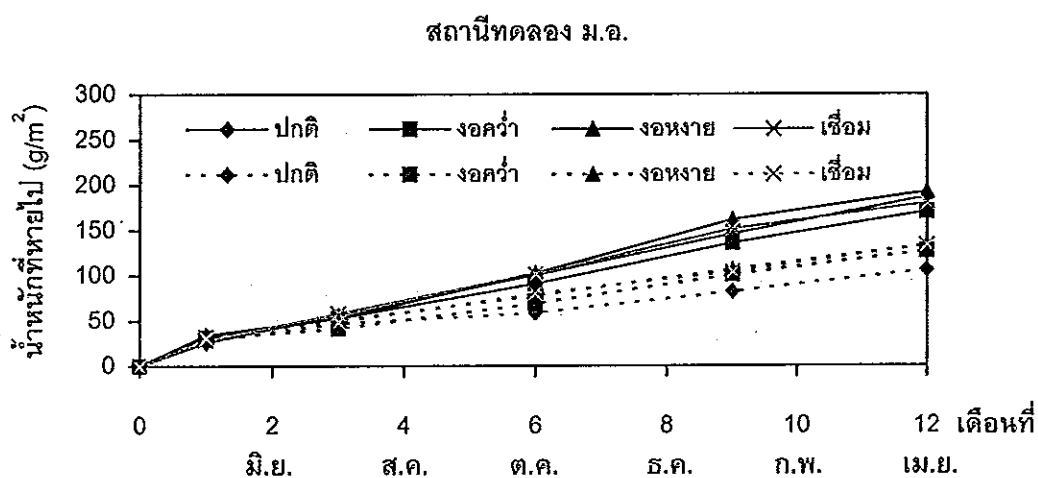
* (กรัม/ตารางเมตร/เดือน²)

ตาราง ง.6 อัตราเร็วและเร่งของการกักตร่อน ในชั้นงานเปลือยของสถานีทดลอง
อ.เทพา ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

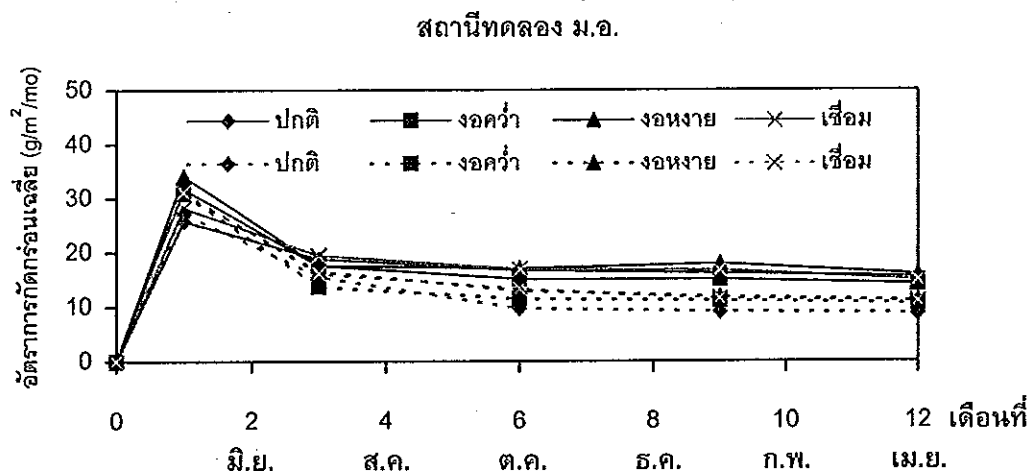
| สถานีทดลองอ.เทพา | | | | | | |
|---------------------------------|--|--------|--|--------|--|--------|
| ชั้นงานปกติ | | | | | | |
| เวลา (เดือนที่) | อัตราการกักตร่อนเฉลี่ย (g/m ² /mo) | | อัตราการกักตร่อนขณะใดๆ (g/m ² /mo) | | อัตราเร่งการกักตร่อนขณะใดๆ (g/m ² /mo ²) | |
| | กลางแจ้ง | โน้รม | กลางแจ้ง | โน้รม | กลางแจ้ง | โน้รม |
| 1 | 41.28 | 41.17 | 41.28 | 41.17 | 41.28 | 41.17 |
| 3 | 28.66 | 31.04 | 22.36 | 25.98 | -9.46 | -7.60 |
| 6 | 20.66 | 20.77 | 12.65 | 10.49 | -3.24 | -5.16 |
| 9 | 73.52 | 74.32 | 179.24 | 181.43 | 55.53 | 56.98 |
| 12 | 209.25 | 169.75 | 616.46 | 456.03 | 145.74 | 91.53 |
| ชั้นงานหึ่งงอ 90 องศา (วางคว่ำ) | | | | | | |
| 1 | 45.87 | 45.84 | 45.87 | 45.84 | 45.87 | 45.84 |
| 3 | 30.80 | 30.79 | 23.27 | 23.27 | -11.30 | -11.29 |
| 6 | 19.27 | 21.35 | 7.74 | 11.91 | -5.18 | -3.79 |
| 9 | 125.18 | 101.32 | 336.99 | 261.26 | 109.75 | 83.12 |
| 12 | 275.40 | 165.89 | 726.06 | 359.62 | 129.69 | 32.79 |
| ชั้นงานหึ่งงอ 90 องศา (วางหงาย) | | | | | | |
| 1 | 49.01 | 49.76 | 49.01 | 49.76 | 49.01 | 49.76 |
| 3 | 35.42 | 33.10 | 28.63 | 24.77 | -10.19 | -12.50 |
| 6 | 18.82 | 20.64 | 2.21 | 8.17 | -8.81 | -5.53 |
| 9 | 128.68 | 119.76 | 348.41 | 318.01 | 115.40 | 103.28 |
| 12 | 289.59 | 186.53 | 772.31 | 386.84 | 141.30 | 22.94 |
| ชั้นงานที่มีรอยเชื่อม | | | | | | |
| 1 | 44.12 | 45.47 | 44.12 | 45.47 | 44.12 | 45.47 |
| 3 | 27.36 | 29.04 | 18.98 | 20.83 | -12.57 | -12.32 |
| 6 | 16.31 | 22.75 | 5.26 | 16.45 | -4.57 | -1.46 |
| 9 | 66.40 | 65.59 | 166.57 | 151.27 | 53.77 | 44.96 |
| 12 | 184.37 | 94.35 | 538.29 | 180.65 | 123.91 | 9.79 |

ตาราง ง.7 อัตราเร็วและแรงของการกัดกร่อน ในชั้นงานเปลือยของสถานีทดลอง
อ.ขอนแก่น ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

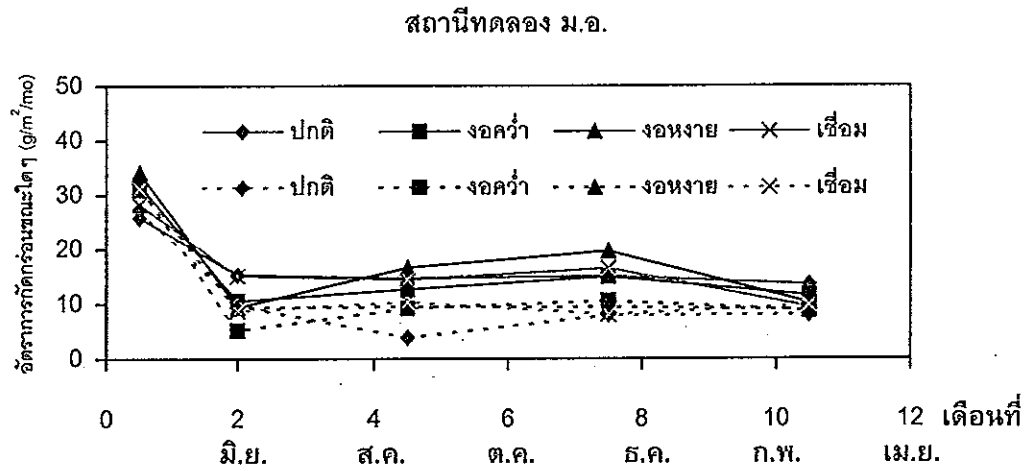
| สถานีทดลองอ.ขอนแก่น | | | | | | |
|--------------------------------|--|-------|--|-------|---|--------|
| ชั้นงานปกติ | | | | | | |
| เวลา (เดือนที่) | อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย ($g/m^2/mo$) | | อัตราการกัดกร่อนขณะใดๆ ($g/m^2/mo$) | | อัตราแรงการกัดกร่อนขณะใดๆ ($g/m^2/mo^2$) | |
| | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม | กลางแจ้ง | ในร่ม |
| 1 | 46.25 | 41.86 | 46.25 | 41.86 | 46.25 | 41.86 |
| 3 | 24.34 | 26.46 | 13.39 | 18.76 | -16.43 | -11.55 |
| 6 | 22.36 | 21.28 | 20.38 | 16.09 | 2.33 | -0.89 |
| 9 | 22.53 | 21.39 | 22.86 | 21.63 | 0.88 | 1.85 |
| 12 | 19.14 | 18.60 | 8.95 | 10.22 | -4.64 | -3.80 |
| ชั้นงานห้กงอ 90 องศา (วางคว่ำ) | | | | | | |
| 1 | 37.36 | 40.04 | 37.36 | 40.04 | 37.36 | 40.04 |
| 3 | 23.61 | 26.94 | 16.74 | 20.39 | -10.31 | -9.83 |
| 6 | 20.77 | 22.20 | 17.93 | 17.46 | 0.40 | -0.97 |
| 9 | 21.08 | 20.66 | 21.70 | 17.57 | 1.26 | 0.04 |
| 12 | 20.57 | 20.51 | 19.04 | 20.05 | -0.89 | 0.82 |
| ชั้นงานห้กงอ 90 องศา (วางหงาย) | | | | | | |
| 1 | 41.19 | 42.03 | 41.19 | 42.03 | 41.19 | 42.03 |
| 3 | 28.49 | 31.36 | 22.14 | 26.03 | -9.53 | -8.00 |
| 6 | 24.49 | 23.47 | 20.48 | 15.57 | -0.55 | -3.49 |
| 9 | 24.56 | 25.41 | 24.71 | 29.29 | 1.41 | 4.57 |
| 12 | 21.36 | 20.51 | 11.76 | 5.80 | -4.32 | -7.83 |
| ชั้นงานที่มีรอยเชื่อม | | | | | | |
| 1 | 40.08 | 41.65 | 40.08 | 41.65 | 40.08 | 41.65 |
| 3 | 27.27 | 24.10 | 20.86 | 15.33 | -9.61 | -13.16 |
| 6 | 21.55 | 20.63 | 15.83 | 17.16 | -1.68 | 0.61 |
| 9 | 23.15 | 21.26 | 26.35 | 22.52 | 3.51 | 1.79 |
| 12 | 19.30 | 18.20 | 7.76 | 9.04 | -6.20 | -4.50 |



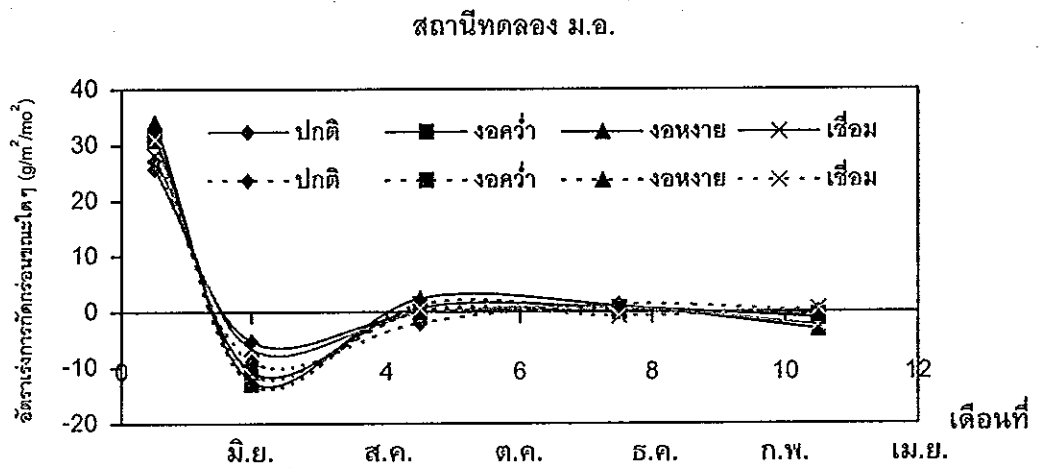
ภาพประกอบ ง.4 แสดงน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง(เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



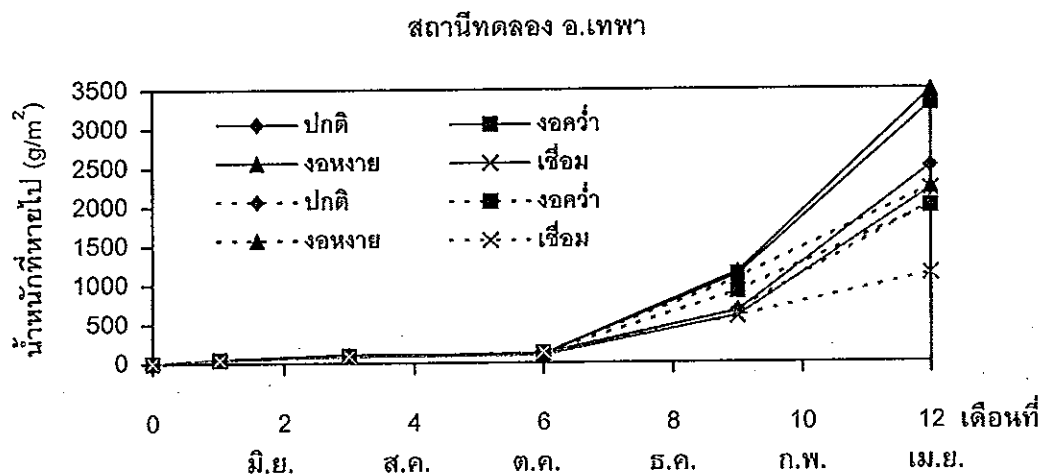
ภาพประกอบ ง.5 แสดงอัตราการกักความร้อนเฉลี่ยของชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



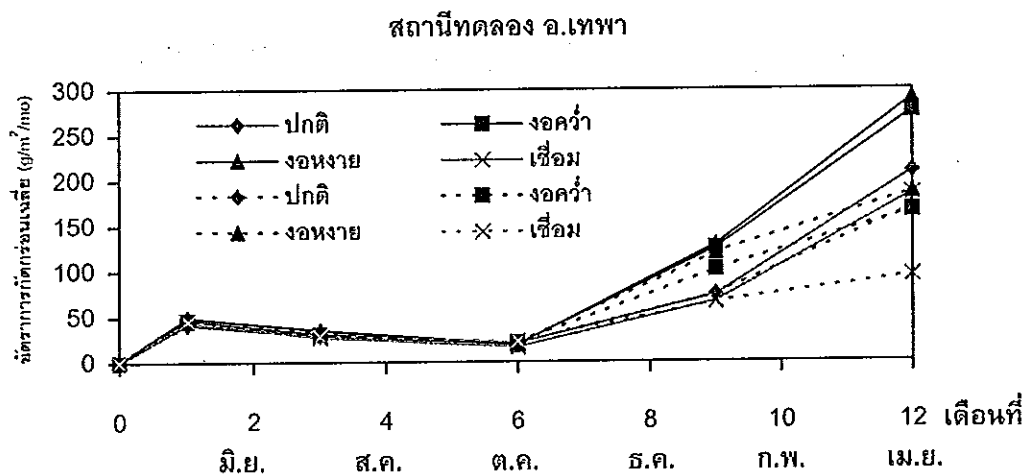
ภาพประกอบ ง.6 แสดงอัตราการกักกร่อนขณะใดๆ ของชั้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชั้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และไนรม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



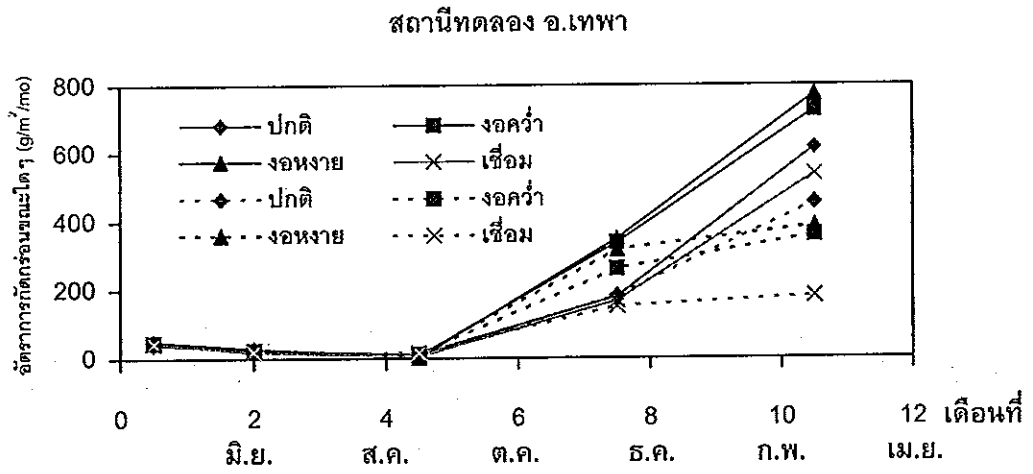
ภาพประกอบ ง.7 แสดงอัตราเร่งการกักกร่อนขณะใดๆ ของชั้นงานเปลือยของสถานีทดลอง ม.อ. เมื่อวางชั้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และไนรม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



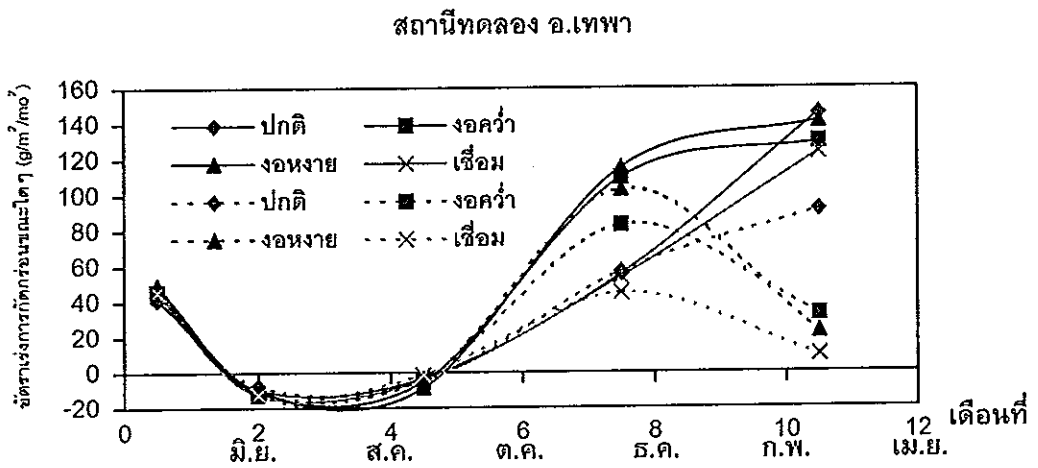
ภาพประกอบ ง.8 แสดงน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง(เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



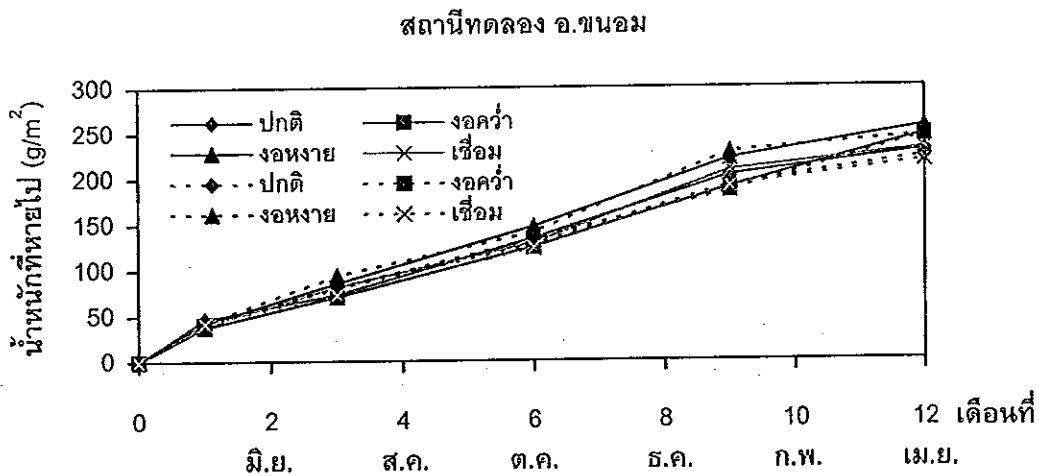
ภาพประกอบ ง.9 แสดงอัตราการกักไอน้ำของชิ้นงานเปลือยของสถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



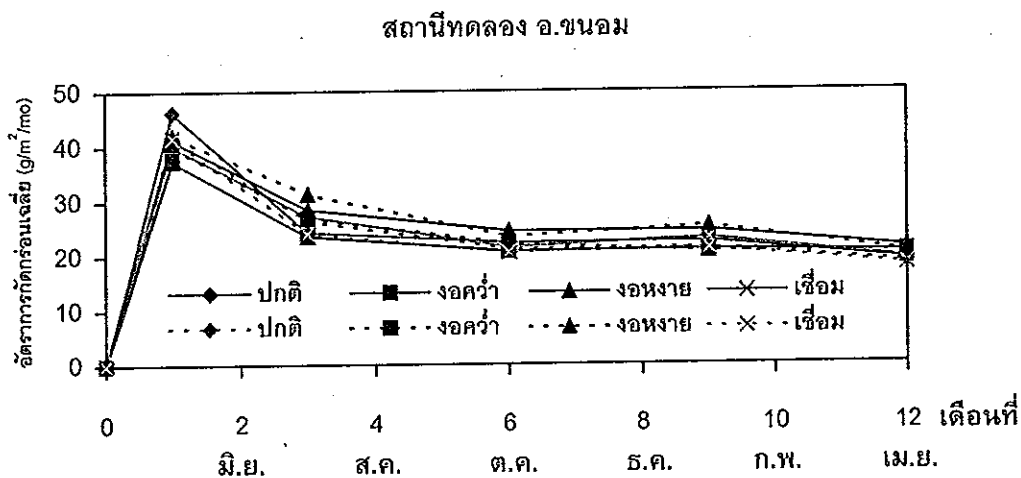
ภาพประกอบ ง.10 แสดงอัตราการกักความร้อนขณะใดๆ ของชั้นงานเปลี่ยนของสถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชั้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



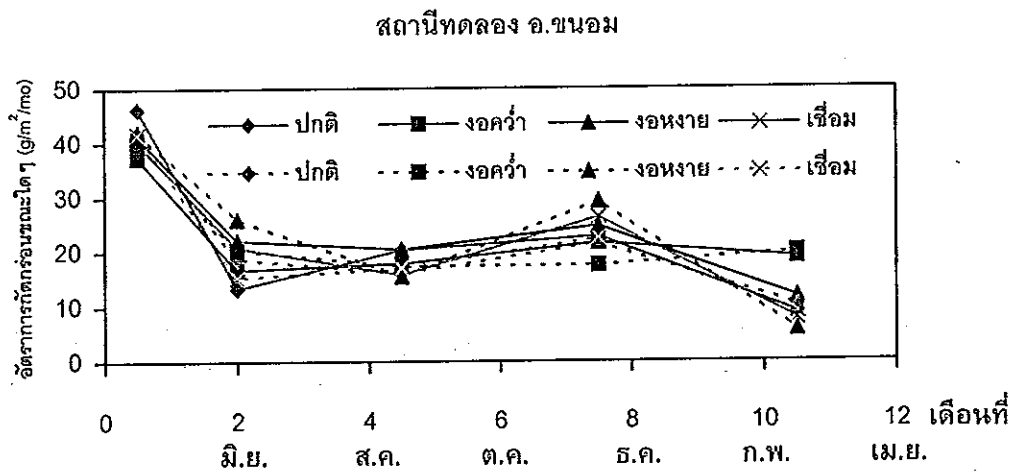
ภาพประกอบ ง.11 แสดงอัตราเร่งการกักความร้อนขณะใดๆ ของชั้นงานเปลี่ยนของสถานีทดลอง อ.เทพา เมื่อวางชั้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



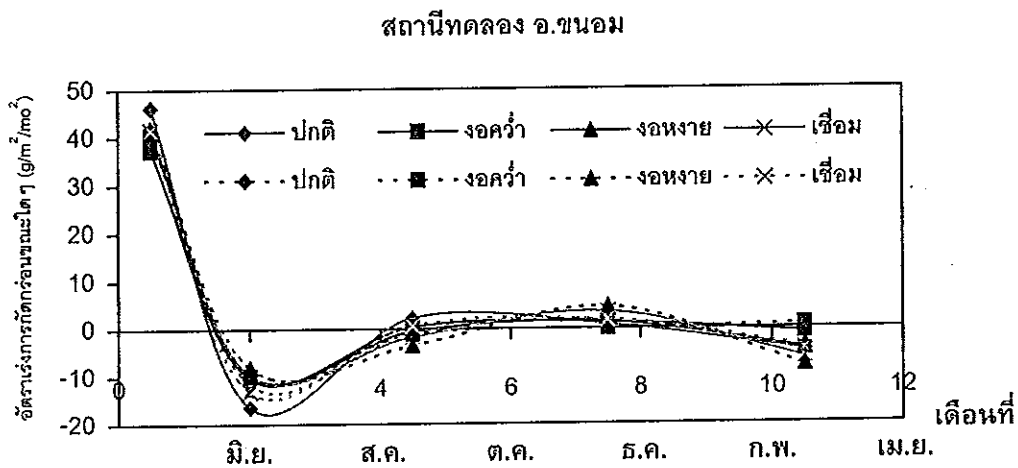
ภาพประกอบ ง.12 แสดงน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานเปลี่ยนของสถานีทดลอง อ.ชนอม เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง(เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



ภาพประกอบ ง.13 แสดงอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของชิ้นงานเปลี่ยนของสถานีทดลอง อ.ชนอม เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



ภาพประกอบ ง.14 แสดงอัตราการกักต่อนขณะใดๆ ของชิ้นงานเปลี่ยนของสถานีทดลอง อ.ชนอม เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน



ภาพประกอบ ง.15 แสดงอัตราเร่งการกักต่อนขณะใดๆ ของชิ้นงานเปลี่ยนของสถานีทดลอง อ.ชนอม เมื่อวางชิ้นงานกลางแจ้ง (เส้นทึบ) และในร่ม (เส้นประ) ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 9 และ 12 เดือน

ภาคผนวก จ. การหาปริมาณมลสารในบรรยากาศ

จ.1 การหาปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ โดยวิธี alkali filter paper
(JIS K 0101)

การเตรียมสารเคมี

- ก. 2,5 ไดไนโตรฟินอล อินดิเคเตอร์
ผสม 2,5 ไดไนโตรฟินอล 0.1 กรัม กับ เอทานอล 95 %
50 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- ข. สารละลายโซเดียมอะซิเตท ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ (M)
ซังโซเดียมอะซิเตท ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 2.7216 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่น
ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- ค. สารละลายกรดอะซิติก ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์
ปิเปตกรดอะซิติก 5.72 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้
ปริมาตร 500 มิลลิลิตร
- ง. สารละลายบัพเฟอร์
นำสารละลายโซเดียมอะซิเตทความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ จำนวน
36 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 0.2 โมลาร์
จำนวน 164 มิลลิลิตร
- จ. สารละลายมาตรฐานของซัลเฟตไอออน
ซังแอมโมเนียมซัลเฟต 0.825 กรัม (อบแห้งที่ 100 °ซเป็นเวลา 3 ชั่วโมง)
แล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานที่มีความ
เข้มข้นของซัลเฟตไอออน 0.6 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร
- ฉ. สารละลายโปตัสเซียมคาร์บอเนต 50 % โดยน้ำหนัก (W/W)
ซังโปตัสเซียมคาร์บอเนต 50 กรัม แล้วเติมลงในน้ำกลั่นจำนวน 50
มิลลิลิตร
- ช. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)
- ซ. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 นอร์มัล (N)
ปิเปตกรดไฮโดรคลอริก 37.8 % จำนวน 82.89 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่น
ให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

ฉ. สารละลายกรดคลอราินิก ความเข้มข้น 0.1 %

ซึ่งกรดคลอราินิก จำนวน 1 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

ญ. สารละลายแบเรียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5%

ซึ่งแบเรียมคลอไรด์ จำนวน 50 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

ฎ. แบเรียมคลอราโนเลด

- ผสมสารละลายกรดคลอราินิก ความเข้มข้น 0.1 % จำนวน 1 ลิตรกับ สารละลายแบเรียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 % จำนวน 1 ลิตร กวนให้ เข้ากันแล้วทิ้งไว้ 1 คืนที่อุณหภูมิห้อง
- ล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ลอยอยู่ข้างบนปราศจาก คลอไรด์ไอออน (ทดสอบด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3))
- ล้างตะกอนด้วยอีเทอร์ อีก 1 ครั้ง
- อบตะกอนให้แห้งที่ 60°C .

การเตรียมกระดาษกรอง

- ตัดกระดาษกรองโครมาโตกราฟฟี ให้ได้ขนาด 5 x 13 ซม.
- ชุบกระดาษกรองในสารละลายโปตัสเซียมคาร์บอเนต 50 % โดยน้ำหนัก ให้ทั่ว
- อบกระดาษกรองให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เก็บใส่ถุงพลาสติกปิดให้สนิทเก็บในโถดูดความชื้น

การเก็บตัวอย่างโดยวิธีฝัง (exposing method)

นำกระดาษที่เตรียมไว้แล้วไปแขวนในที่ร่ม ที่อากาศถ่ายเทได้สะดวกภายใน ระยะเวลาที่กำหนด (ปกติ 30 วัน) เมื่อครบกำหนดให้ทำการเก็บตัวอย่างใส่ถุง พลาสติกปิดให้สนิทและเก็บในโถดูดความชื้น เพื่อรอการวิเคราะห์ทางเคมีต่อไป

การเตรียมสารละลายตัวอย่าง (test solution)

- ตัดกระดาษกรองเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ในบีกเกอร์
- เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร อยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ที่อุณหภูมิ 65°C . นาน 15 นาที
- ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- กรองด้วยกระดาษกรอง

- เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ขั้นตอนการวิเคราะห์

- นำสารละลายตัวอย่างมา 40 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์แล้วเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 หยด ทิ้งไว้ 30 นาที แล้วทำให้เป็นกลางด้วย สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 นอร์มัล โดยมี 2,5 ไดไนโตรฟีนอล อินดิเคเตอร์ เป็นอินดิเคเตอร์
- นำสารละลายที่ได้ไปต้มเพื่อไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
- ทำให้เป็นกลางอีกครั้งด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 นอร์มัล แล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- ปิเปตสารละลายตัวอย่าง สารละลายมาตรฐานของซัลเฟตไอออนและสารละลายตัวเปรียบเทียบ (blank solution) อย่างละ 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองที่มีจุกปิด
- เติมสารละลายบัพเฟอร์ 5 มิลลิลิตร แล้วเติมเอทานอล 10 มิลลิลิตรและแบเรียมคลอไรด์ 0.1 กรัม
- ทำการเขย่าประมาณ 10 นาที
- นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง
- ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร

การคำนวณ

$$SO_x \text{ (mgSO}_3\text{/d/dm}^2\text{)} = 0.6 [(A_1 - A_2)/A_3] \times \frac{1}{\text{พ.ท.}} \times \frac{50}{40} \times \frac{80}{96} \times \frac{100}{N}$$

- เมื่อ A_1 = ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่าง
 A_2 = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวเปรียบเทียบ
 A_3 = ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานซัลเฟตไอออน
 N = จำนวนวันในการทดลอง
 0.6 = ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายมาตรฐานซัลเฟตไอออน (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)

- พ.ท. = พื้นที่ผิวทั้ง 2 ด้านของ alkali filter paper
 80/96 = $\text{SO}_3/\text{SO}_4^{2-}$
 50/40 = การเจือจาง
 100 = ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)

จ.2 การหาปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ โดยวิธี dry gauze (JIS Z 2381)

การเตรียมสารเคมี

ก. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (III) ซัลเฟต

- ละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (III) ซัลเฟต จำนวน 60 กรัมใน 1 ลิตร ของกรดไนตริกความเข้มข้น 5 นอร์มัล
- เก็บสารละลายไว้ในขวดสีชา

ข. สารละลายเอทานอลเมอร์คิวริก (II) ไฮโอไซยาเนต

- ละลายเมอร์คิวริก (II) ไฮโอไซยาเนต จำนวน 1.5 กรัม ใน 500 มิลลิลิตรของเอทานอล 95%
- เก็บสารละลายไว้ในขวดสีชา

ค. สารละลายมาตรฐานของคลอไรด์ไอออน

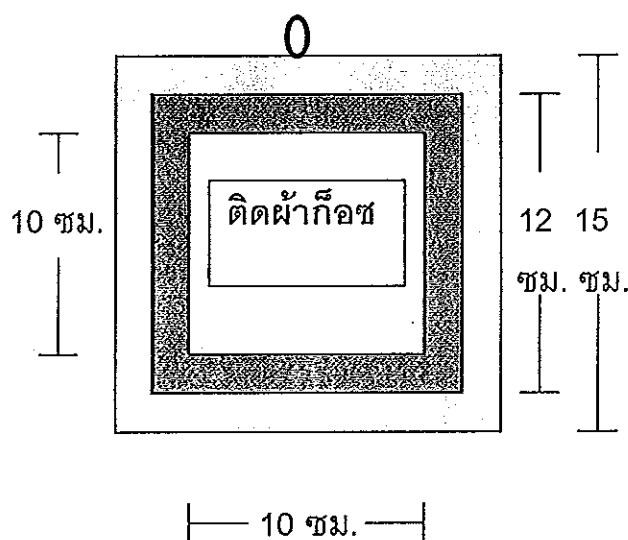
- ออบโซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 500 ถึง 650 °ซ. เป็นเวลา 40 ถึง 50 นาที แล้วทำให้เย็นลงในโถดูดความชื้น
- ชั่งจำนวน 0.824 กรัม แล้วละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรจนได้ 1 ลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานของคลอไรด์ไอออน ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร

ง. สารละลายมาตรฐานคลอไรด์ไอออน ความเข้มข้น 0.01 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร

- บีเปิด 20 มิลลิลิตรของ สารละลายมาตรฐานคลอไรด์ไอออน ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ 1 ลิตร

เตรียมกรอบไม้สำหรับการเก็บตัวอย่างอนุภาคเกลือในบรรยากาศ

ทำกรอบไม้จตุรัส 2 ชั้น (ภาพประกอบ จ.1) กรอบวงในสามารถถอดออกได้ เมื่อใส่ผ้าก๊อซ จำนวนพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างทั้ง 2 ด้าน รวม 200 ตารางเซนติเมตร



ภาพประกอบ จ.1 อุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างอนุภาคเกลือในบรรยากาศ
ที่มา : JIS Z 2381, 1987 : 122

การเตรียมผ้าก๊อซ

ตัดผ้าก๊อซให้ได้ขนาด 12 x 24 ซม. ต้มและซักล้างให้สะอาด เพื่อกำจัดคลอไรด์ไอออนที่อาจติดอยู่ออกไป แล้วเก็บไว้ในถุงพลาสติกและนำไปเก็บในโถดูดความชื้น

การเก็บตัวอย่าง

พับผ้าก๊อซทบ 2 ชั้น แล้วติดในกรอบไม้ แหวนไว้ในที่อากาศถ่ายเทได้สะดวก โดยอย่าให้ถูกฝนโดยตรงภายในระยะเวลาที่กำหนด (ปกติ 30 วัน) เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วแกะผ้าก๊อซออกจากกรอบไม้และเก็บในถุงพลาสติกปิดให้สนิท เก็บในโถดูดความชื้น เพื่อรอการวิเคราะห์ทางเคมีต่อไป

การเตรียมสารละลายตัวอย่าง

- ตัดผ้าก๊อซให้เป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ในบีกเกอร์
- เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร นำไปต้มโดยอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 65 °ซ. เป็นเวลา 20 นาที
- ทิ้งไว้ให้เย็นในอากาศ
- กรองด้วยกระดาษกรอง

- ปรับสารละลายให้ได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- ขั้นตอนการวิเคราะห์
- บีบสารละลายตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานคลอไรด์ไอออน ใส่หลอดทดลองขนาด 20 มิลลิลิตร หลอดละ 10 มิลลิลิตร
 - เติมสารละลายแอมโมเนียมไอโรอน (III) ซัลเฟต ในแต่ละหลอด หลอดละ 2 มิลลิลิตรและเติมสารละลายเอธานอลเมอร์คิวรี (II) ไฮโอไซยาเนต ในแต่ละหลอด หลอดละ 1 มิลลิลิตร
 - เขย่าให้สารละลายเข้ากันประมาณ 3 นาที ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
 - นำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 460 นาโนเมตร
- การคำนวณ

$$\text{NaCl (mgNaCl/d/100cm}^2) = 41.2 (C-C_0)/N$$

เมื่อ C = ค่าการดูดกลืนแสงของคลอไรด์ไอออนในสารละลายตัวอย่าง (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)

C₀ = ค่าการดูดกลืนแสงของคลอไรด์ไอออนในตัวเปรียบเทียบ (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)

N = จำนวนวันที่ทำการทดลอง

$$41.2 = \frac{\text{NaCl}}{\text{Cl}} \times 50 \text{ มล.} \times \frac{100 \text{ ซม.}^2}{200 \text{ ซม.}^2}$$

ภาคผนวก ฉ. ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสี

ฉ.1 การคำนวณหาความผิดแผกของสี (color differences)

ความผิดแผกของสี (ΔE) สามารถคำนวณได้โดยใช้ค่า A, B และ G จากเครื่องวัดความผิดแผกของสี (Reflection meter : Photovolt model 577) แล้วนำไปแทนค่าลงในสมการตามมาตรฐาน ASTM D 2244

การใช้เครื่องวัดความผิดแผกของสี

1. ต่อหัววัด Y เข้ากับเครื่องวัด พร้อมกับใส่แผ่นสีที่ต้องการวัด (เหลือง น้ำเงิน และเขียว) เข้าไปในหัววัด
2. ตั้งค่าศูนย์และค่ามาตรฐานจากแผ่นมาตรฐานให้กับเครื่องวัด โดยเลือกค่ามาตรฐานให้ตรงกับแผ่นสีที่ต้องการวัด
3. อ่านค่าสีที่วัดได้ โดยกดปุ่ม A, B หรือ G ตามแผ่นสีที่ใส่เข้าไป ซึ่ง
 - A หมายถึง สีเหลือง (amber)
 - B หมายถึง สีน้ำเงิน (blue)
 - G หมายถึง สีเขียว (green)
4. เปลี่ยนแผ่นสีใหม่ แล้วทำตาม 2 และ 3 จนครบ 3 สี
5. นำค่า A, B และ G ไปใช้ในมาตรฐาน ASTM D 2244 โดยที่

$$X = 0.8A + 1.8B/100$$

$$Y = 1.0G/100$$

$$Z = 1.18B/100$$

การคำนวณหาความผิดแผกของสีจากมาตรฐาน ASTM D 2244

ใช้สมการความผิดแผกของสี (ΔE) ของ CIE 1976 $L^*a^*b^*$ โดยที่

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

เมื่อ

$$\Delta L^* = L^* - L_0^*$$

$$\Delta a^* = a^* - a_0^*$$

$$\Delta b^* = b^* - b_0^*$$

ซึ่งค่า L_0^* , a_0^* และ b_0^* เป็นค่าอ้างอิงที่เวลาเริ่มต้น ส่วนค่า L^* , a^* และ b^* เป็นค่าที่เวลาใดๆ โดยที่ ΔL^* , Δa^* และ Δb^* มีความหมายดังนี้

$+\Delta L^*$ = ขาวขึ้น (lighter)

$-\Delta L^*$ = ดำขึ้น (darker)

$+\Delta a^*$ = แดงขึ้น (redder) หรือเขียวน้อยลง (less green)

$-\Delta a^*$ = เขียวขึ้น (greener) หรือแดงน้อยลง (less red)

$+\Delta b^*$ = เหลือง (yellow) หรือน้ำเงินน้อยลง (less blue)

$-\Delta b^*$ = น้ำเงินขึ้น (bluer) หรือเหลืองน้อยลง (less yellow)

สำหรับค่า L^* , a^* และ b^* สามารถหาได้จากสมการ

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}]$$

$$b^* = 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}]$$

เมื่อ

$$X/X_n, Y/Y_n \text{ และ } Z/Z_n > 0.01$$

X_n , Y_n และ Z_n หาได้โดยการแทนค่ามาตรฐานของ A, B และ

G จากแผ่นมาตรฐานลงในสมการหาค่า X, Y และ Z

ตัวอย่างการคำนวณ

ชิ้นงานเคลือบสี A โดยวิธีพ่น ความหนา 300 ไมครอน เมื่อวางชิ้นงานใน
กลางแจ้ง เป็นระยะเวลา 1 เดือน

| ตัวอย่าง | เวลา 0 เดือน | | | เวลา 1 เดือน | | |
|----------|--------------|------|------|--------------|------|------|
| | A | B | G | A | B | G |
| 1C11A3 | 23.8 | 18.8 | 22.0 | 21.3 | 17.2 | 21.1 |
| 1C12A3 | 23.7 | 18.9 | 23.0 | 21.6 | 17.4 | 21.4 |
| 1C13A3 | 23.7 | 18.9 | 23.0 | 21.6 | 17.4 | 21.4 |

จากสมการ

$$X = 0.8A + 1.8B/100$$

$$Y = 1.0G/100$$

$$Z = 1.18B/100$$

ค่ามาตรฐาน $A = 72.6$, $B = 70.6$, $G = 72.6$

$$\begin{aligned} X_n &= 0.8 \times 72.6 + (1.8 \times 70.6)/100 \\ &= 59.6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_n &= (1.0 \times 72.6)/100 \\ &= 0.73 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_n &= (1.18 \times 70.6)/100 \\ &= 0.83 \end{aligned}$$

| ตัวอย่าง | เวลา 0 เดือน | | | เวลา 1 เดือน | | |
|----------|--------------|------|------|--------------|------|------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z |
| 1C11A3 | 19.4 | 0.22 | 0.22 | 17.3 | 0.21 | 0.20 |
| 1C12A3 | 19.3 | 0.23 | 0.22 | 17.6 | 0.21 | 0.20 |
| 1C13A3 | 19.3 | 0.23 | 0.22 | 17.6 | 0.21 | 0.21 |

หาค่า X/X_n , Y/Y_n และ Z/Z_n

| ตัวอย่าง | เวลา 0 เดือน | | | เวลา 1 เดือน | | |
|----------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|
| | X/X_n | Y/Y_n | Z/Z_n | X/X_n | Y/Y_n | Z/Z_n |
| 1C11A3 | 0.33 | 0.30 | 0.27 | 0.29 | 0.29 | 0.24 |
| 1C12A3 | 0.33 | 0.32 | 0.27 | 0.30 | 0.29 | 0.25 |
| 1C13A3 | 0.33 | 0.32 | 0.27 | 0.30 | 0.29 | 0.25 |

จะเห็นว่าค่า X/X_n , Y/Y_n และ $Z/Z_n > 0.01$ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไข จึงทำให้สามารถหาค่าอื่นๆ ต่อไปได้

หาค่า L^* , a^* และ b^* จากสมการ

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}]$$

$$b^* = 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}]$$

| ตัวอย่าง | เวลา 0 เดือน | | | เวลา 1 เดือน | | |
|----------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| | L^* | a^* | b^* | L^* | a^* | b^* |
| 1C11A3 | 61.9 | 8.35 | 5.73 | 60.9 | 0.44 | 7.69 |
| 1C12A3 | 63.0 | 3.35 | 7.44 | 61.1 | 0.68 | 7.67 |
| 1C13A3 | 63.1 | 3.17 | 7.51 | 61.1 | 0.87 | 7.57 |

หาค่า ΔL^* , Δa^* และ Δb^*

| ตัวอย่าง | เวลา 1 เดือน | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|
| | ΔL^* | Δa^* | Δb^* |
| 1C11A3 | -1.1 | -7.9 | 1.96 |
| 1C12A3 | -1.9 | -2.7 | 0.24 |
| 1C13A3 | -1.9 | -2.3 | 0.06 |

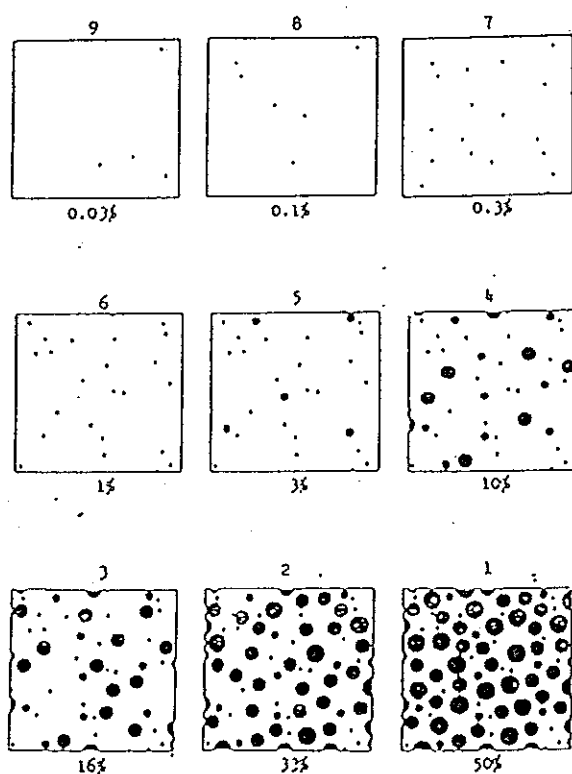
หาค่า ΔE จากสมการ

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

| ตัวอย่าง | เวลา 1 เดือน |
|----------|--------------|
| | ΔE |
| 1C11A3 | 8.22 |
| 1C12A3 | 3.29 |
| 1C13A3 | 3.01 |
| เฉลี่ย | 4.84 |

จ.2 การเกิดสนิม (rusting)

มาตรฐาน ASTM D 610 ได้เสนอวิธีการประเมินผลการเกิดสนิม โดยอัตราการเกิดสนิมจะอยู่บนสเกลระหว่าง 10 ถึง 0 โดยที่ 10 หมายถึงไม่มีสนิมเกิดขึ้น และ 0 หมายถึงเกิดสนิมทั่วทั้งแผ่น ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับรูปมาตรฐาน (ภาพประกอบ จ.1) ดังนี้

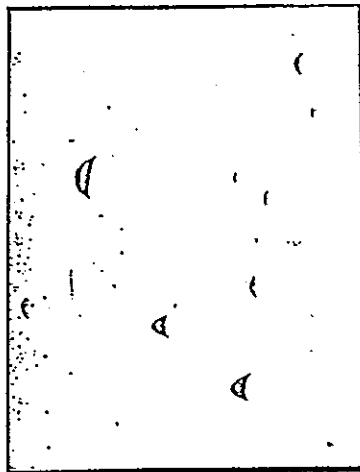


ภาพประกอบ จ.1 แสดงเลขอัตราและเปอร์เซ็นต์การเกิดสนิมบนชิ้นงานเคลือบสี
ที่มา : ASTM D 610, 1985

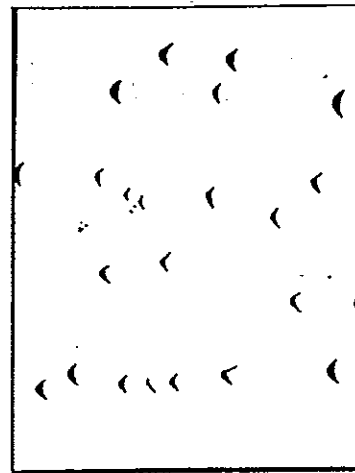
จ.3 การโป่งพอง (blistering)

มาตรฐาน ASTM D 714 ได้เสนอวิธีการประเมินค่าการโป่งพอง ทำได้โดยนำชิ้นงานหลังการทดสอบมาเปรียบเทียบกับรูปมาตรฐาน (ภาพประกอบ จ.2 - ภาพประกอบ จ.6) วิธีการวัดการโป่งพองของสารที่เคลือบผิวชิ้นงาน วัดเทียบกับขนาดและความถี่ของการโป่งพอง ซึ่งขนาดเริ่มสเกลจาก 0 ถึง 10 โดยที่ 10 หมายถึงไม่มีการโป่งพองเกิดขึ้นและ 0 หมายถึงฟิล์มที่เคลือบผิวถูกทำลายหมด ส่วน 8 หมายถึง

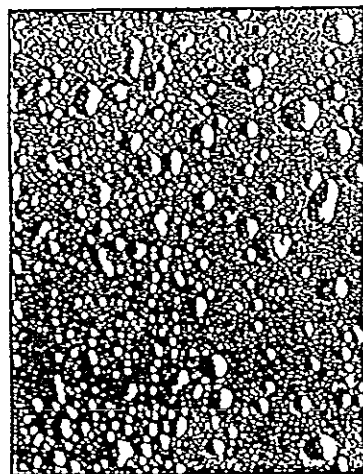
การโป่งพองขนาดเล็กที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สำหรับ 6, 4 และ 2 แสดงถึงขนาดของการโป่งพองที่โตขึ้น นอกจากนี้ความถี่ของการโป่งพอง แสดงในเทอมของความหนาแน่น คือ ความหนาแน่น (dense, D), ความหนาแน่นปานกลาง (medium dense, MD), ปานกลาง (medium, M) และเล็กน้อย (few, F)



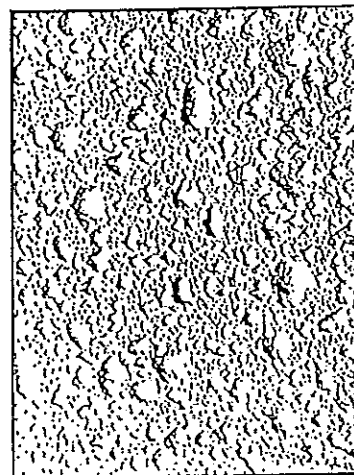
Few



Medium

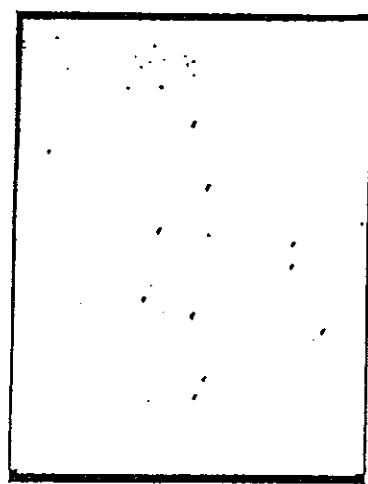


Medium dense

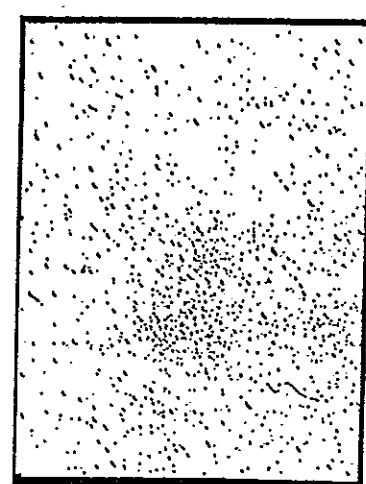


Dense

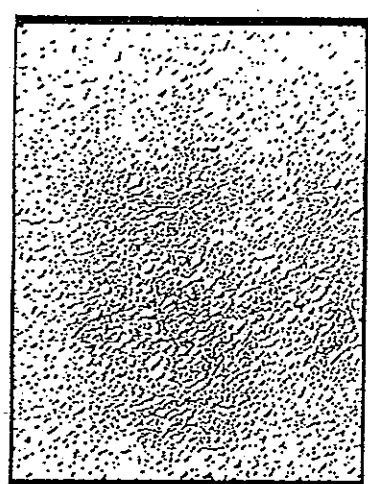
ภาพประกอบ จ.2 ความถี่และขนาดของการโป่งพองหมายเลข 2
ที่มา : ASTM D 714, 1987



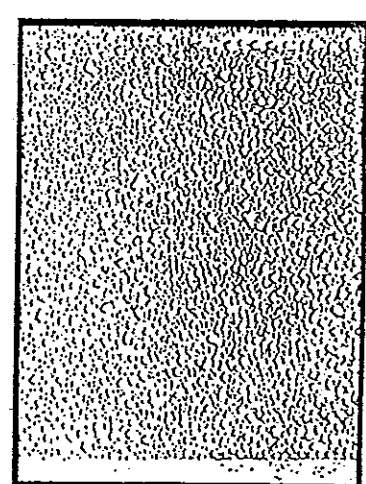
Few



Medium

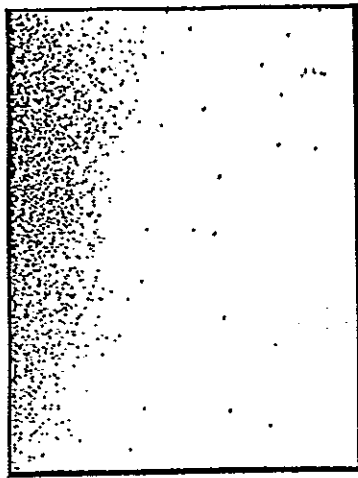


Medium dense

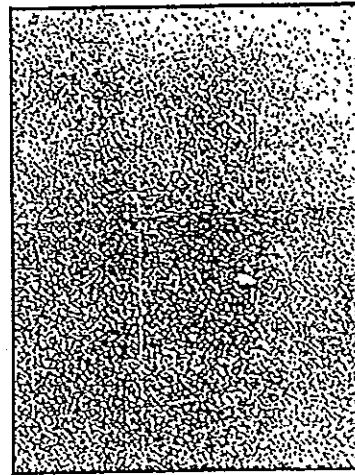


Dense

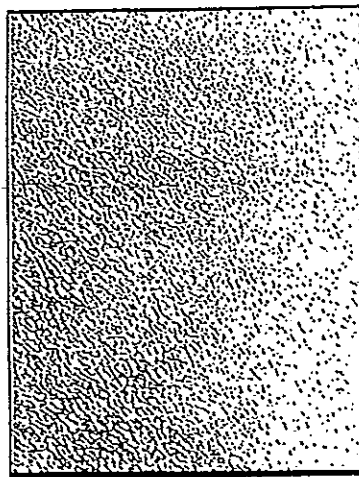
ภาพประกอบ จ.3 ความถี่และขนาดของการไป่งพองหมายเลข 4
ที่มา : ASTM D 714, 1987



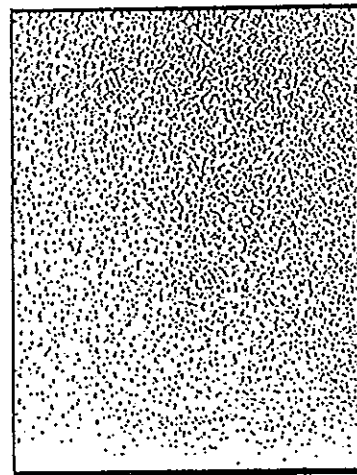
Few



Medium

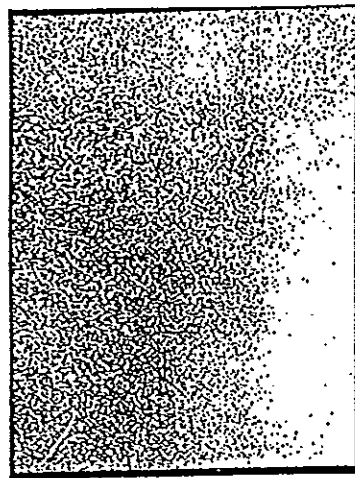


Medium dense

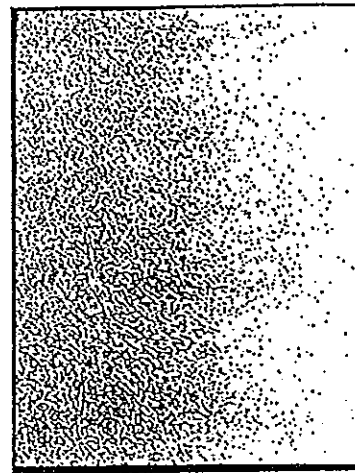


Dense

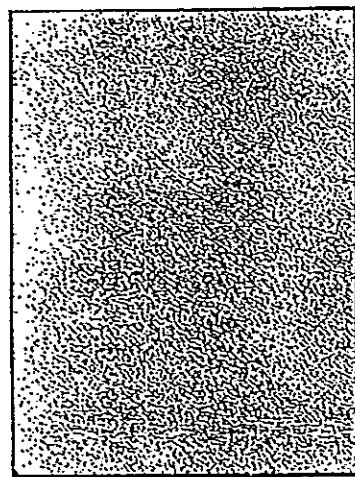
ภาพประกอบ ฉ.4 ความถี่และขนาดของการโป่งพองหมายเลข 6
ที่มา : ASTM D 714, 1987



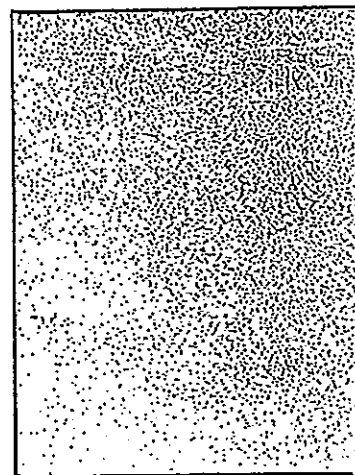
Few



Medium



Medium dense



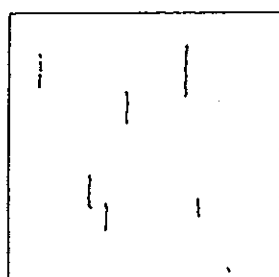
Dense

ภาพประกอบ จ.5 ความถี่และขนาดของการโป่งพองหมายเลข 8
ที่มา : ASTM D 714, 1987

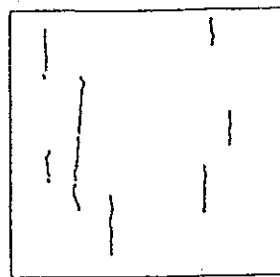
จ.4 การแตกลายงา (checking)

มาตรฐาน ASTM D 660 ได้เสนอวิธีประเมินค่าการแตกลายงา โดยเปรียบเทียบกับรูปมาตรฐาน (ภาพประกอบ จ.6 - ภาพประกอบ จ.14) โดยแยกตามประเภทของการแตกลายงา เช่น

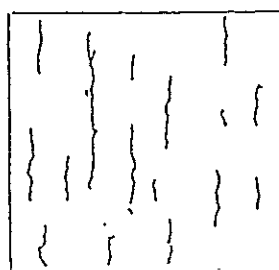
- แบบรูปร่างไม่แน่นอน (irregular pattern type)
- แบบเส้นขนานขนาดยาวและสั้น (line and short parallel type)
- แบบเส้นตัดกัน (switch type)
- แบบตีนกา (crow foot type)
- แบบตาราง (mosaic type)
- แบบการหดตัว (shrinkage type)
- แบบรูปร่างไม่แน่นอนขนาดสั้น (short, random type)
- แบบวงรีไม่สมบูรณ์ (sigmoid type)



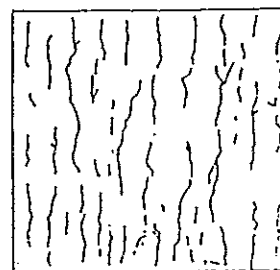
ASTM 8
TRD 2



ASTM 6
TRD 4



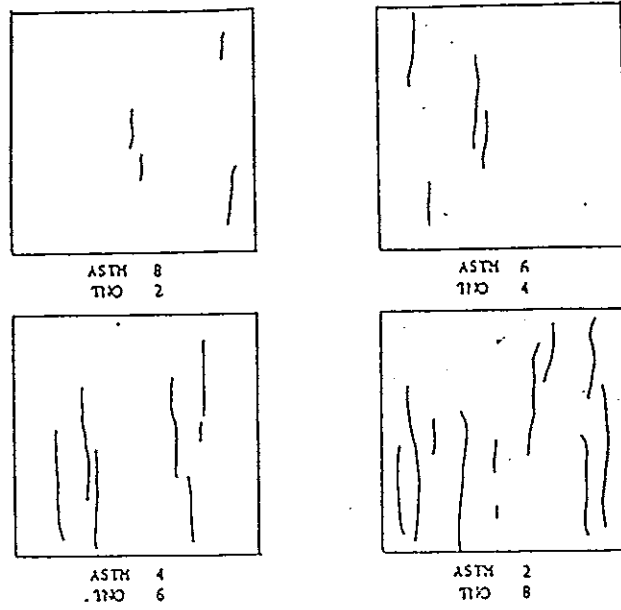
ASTM 4
TRD 6



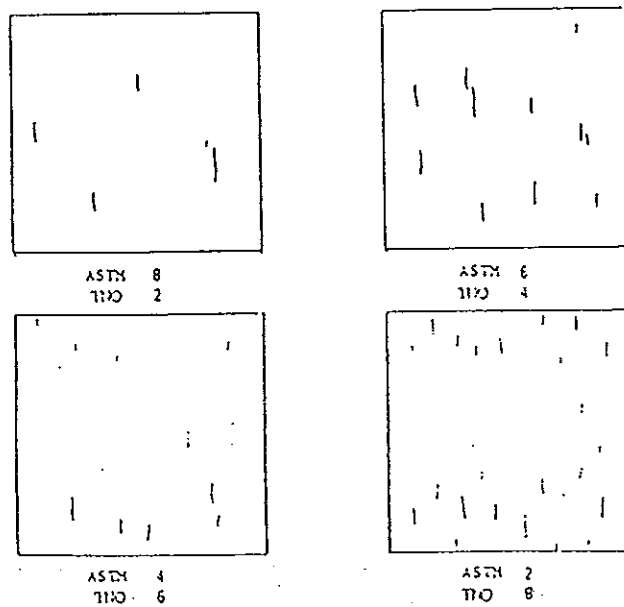
ASTM 2
TRD 8

ภาพประกอบ จ.6 แบบรูปร่างไม่แน่นอน

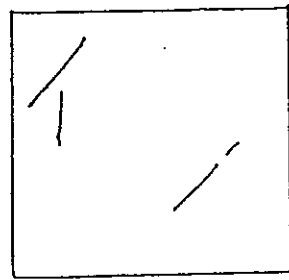
ที่มา : ASTM D 660, 1985



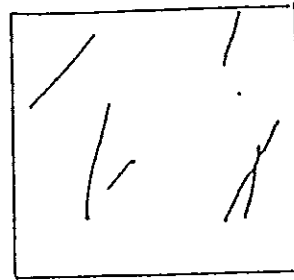
ภาพประกอบ จ.7 แบบเส้นขนานขนาดยาว
ที่มา : ASTM D 660, 1985



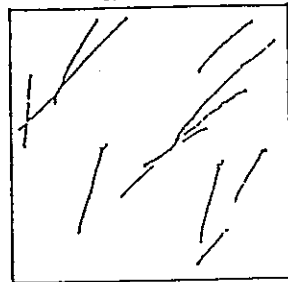
ภาพประกอบ จ.8 แบบเส้นขนานขนาดสั้น
ที่มา : ASTM D 660, 1985



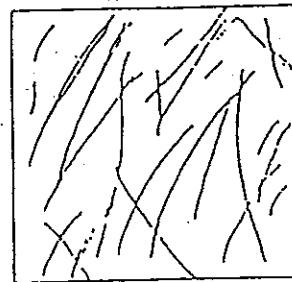
ASTM 8
TPO 2



ASTM 6
TPO 4

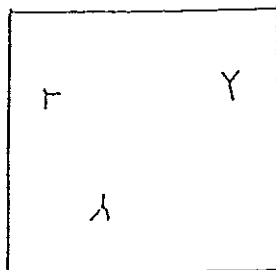


ASTM 4
TPO 6

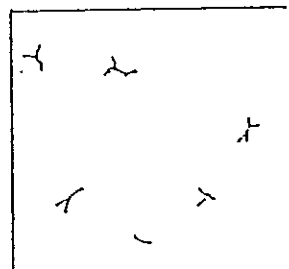


ASTM 2
TPO 8

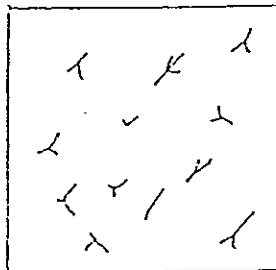
ภาพประกอบ ฉ.9 แบบเส้นตัดกัน
ที่มา : ASTM D 660, 1985



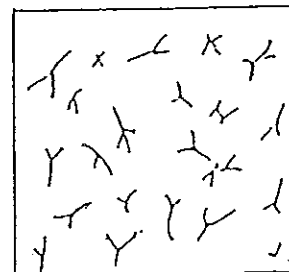
ASTM 8
TPO 2



ASTM 6
TPO 4

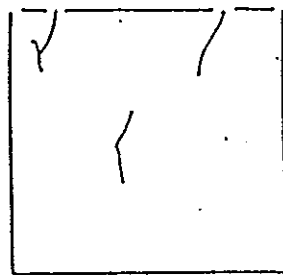


ASTM 4
TPO 6

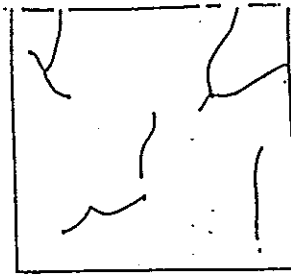


ASTM 2
TPO 8

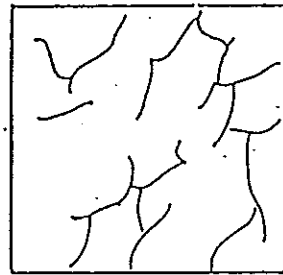
ภาพประกอบ ฉ.10 แบบดินกา
ที่มา : ASTM D 660, 1985



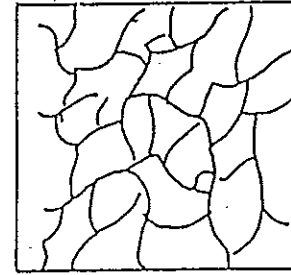
ASTM 8
TNO 2



ASTM 6
TNO 4



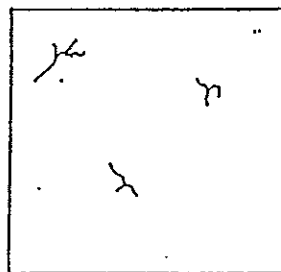
ASTM 4
TNO 6



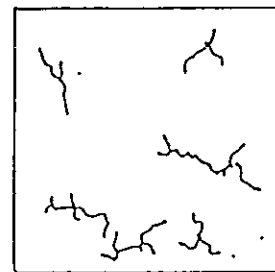
ASTM 2
TNO 8

ภาพประกอบ จ.11 แบบตาราง

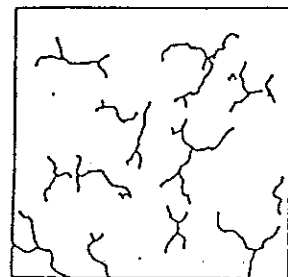
ที่มา : ASTM D 660, 1985



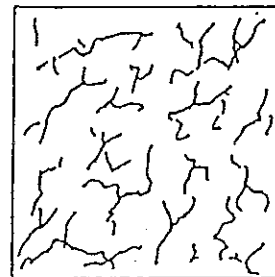
ASTM 8
TNO 2



ASTM 6
TNO 4



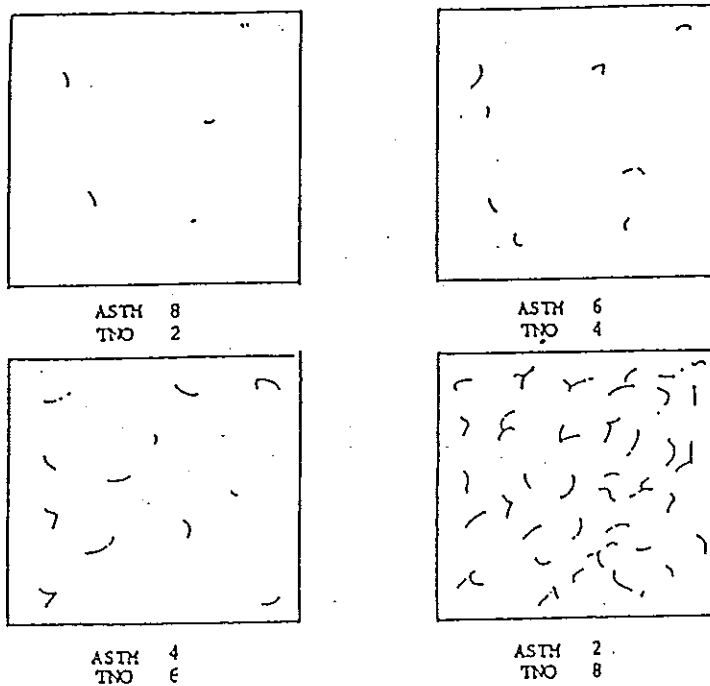
ASTM 4
TNO 6



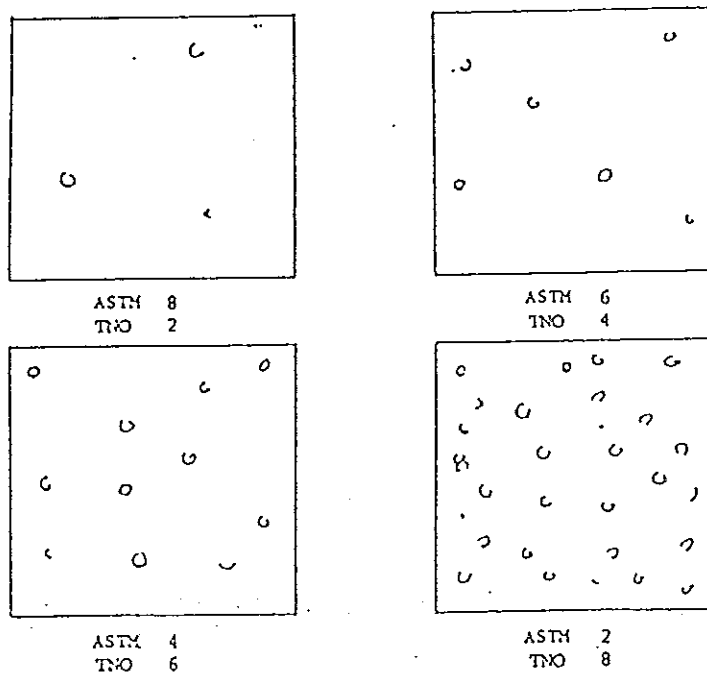
ASTM 2
TNO 8

ภาพประกอบ จ.12 แบบการหดตัว

ที่มา : ASTM D 660, 1985



ภาพประกอบ จ.13 แบบรูปร่างไม่แน่นอนขนาดสั้น
ที่มา : ASTM D 660, 1985



ภาพประกอบ จ.14 แบบวงรีไม่สมบูรณ์
ที่มา : ASTM D 660, 1985

ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์สัณนิมเหล็กโดย XRD

ตาราง ข.1 แสดงผลการวิเคราะห์สัณนิมเหล็กโดย XRD ของชิ้นงานเปลี่ยนใน
บรรยากาศต่าง ๆ เมื่อวางชิ้นงานเป็นระยะเวลา 1 ปี

| สารประกอบ | บรรยากาศ | | |
|---|----------|---------|--------------------|
| | ชนบท | ชายทะเล | ชายทะเล-อุตสาหกรรม |
| magnetite (Fe_3O_4) | ตรวจพบ | - | ตรวจพบ |
| lepidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$) | ตรวจพบ | - | ตรวจพบ |
| goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) | ตรวจพบ | - | ตรวจพบ |
| akaganetite ($\beta\text{-FeOOH}$) | - | ตรวจพบ | - |

หมายเหตุ วิเคราะห์โดย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายทรงธรรม โพธิ์ถาวร

วัน เดือน ปีเกิด 14 มีนาคม 2511

วุฒิการศึกษา

| วุฒิ | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
|-------------------------|-----------------|---------------------|
| วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) | ม.สงขลานครินทร์ | 2533 |