

ผลกระทบของการสร้างฟิล์มโพลีเอทิลีน/ฟอสเฟตสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนของผิวเหล็กกล้า  
คาร์บอน



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF MOLYBDATE/PHOSPHATE PASSIVATION TREATMENT FOR CORROSION  
PREVENTION OF CARBON STEEL SURFACE

Mr. Wanchat Natpattanit



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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของการสร้างฟิล์มโพลีเอทิลีน/ฟอสเฟตสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนของผิวเหล็กกล้าคาร์บอน
โดย	นายวันฉัตร ญัฐพัชโรดม
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีธรรมาภิบาล

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุณา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีธรรมาภิบาล)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กษิติศ หนูทอง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. สุชาดา เกิดผลภัทร)

วันฉัตร ญัฐพัชร์นิษฐ์ : ผลกระทบของการสร้างฟิล์มโมลิบเดท/ฟอสเฟตสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนของผิวเหล็กกล้าคาร์บอน (EFFECT OF MOLYBDATE/PHOSPHATE PASSIVATION TREATMENT FOR CORROSION PREVENTION OF CARBON STEEL SURFACE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.วีระยุทธ ศรีธรรวานิช, 53 หน้า.

โดยทั่วไประบบท่อและอุปกรณ์ต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ด้วยความที่เป็นวัสดุราคาถูกและสามารถใช้งานได้กว้างขวาง แต่วัสดุชนิดนี้ก็มักจะมีปัญหาการผุกร่อนตามมาเสมอ การศึกษาวิธีการป้องกันการผุกร่อนด้วยการใช้เคมีสร้างฟิล์มป้องกันสนิมหรือการพาสซีเวชันบนผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจึงถูกจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสร้างฟิล์มป้องกันสนิมของสารประกอบโมลิบเดทและสารประกอบฟอสเฟต โดยใช้คู่มือการใช้งานสารเคมีเป็นแนวทางในการปรับเปลี่ยนปัจจัยควบคุมต่างๆในการสร้างฟิล์มบนแผ่นชิ้นงานที่เรียกว่า “แผ่นคูปอง” แผ่นคูปองจะถูกนำมาไหลผ่านด้วยสารละลายของสารประกอบโมลิบเดทที่มีความเข้มข้น 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารละลายของสารประกอบฟอสเฟตที่มีความเข้มข้น 235 470 และ 940 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 0.5 1 2 และ 4 วันตามลำดับ โดยแต่ละการทดลองจะควบคุมความเร็วของสารละลายที่ไหลผ่านแผ่นคูปองเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที ซึ่งทำให้ได้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน 24 สภาวะ ซึ่งแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสซีเวชันจะนำไปทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนและวิเคราะห์การกระจายตัวรวมไปถึงความหนาของชั้นฟิล์ม ในขั้นตอนการตรวจสอบความต้านทานการกัดกร่อน แผ่นคูปองที่ผ่านกระบวนการสร้างฟิล์มแล้วจะถูกนำไปจุ่มในน้ำเป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาอัตราการผุกร่อนจากน้ำหนักที่หายไป ด้วยเครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง ในส่วนของการวัดความหนาและการกระจายตัวของชั้นฟิล์มจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ซึ่งผลการทดลองพบว่า การพาสซีเวชันด้วยเวลาที่นานขึ้นและความเข้มข้นของสารเคมีที่เพิ่มขึ้น จะก่อให้เกิดชั้นฟิล์มป้องกันสนิมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น และยังพบอีกว่าประสิทธิภาพในการสร้างฟิล์มป้องกันสนิมของสารประกอบโมลิบเดท มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าสารประกอบฟอสเฟตทั้งในแง่ของความต้านทานการกัดกร่อนและความหนาของชั้นฟิล์ม ทำให้แผ่นคูปองที่ผ่านการพาสซีเวชัน 4 วัน ด้วยสารประกอบโมลิบเดท มีชั้นฟิล์มที่หนา และทนทานต่อการผุกร่อนมากที่สุด

ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
ปีการศึกษา	2558	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5671033321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MILD STEEL PASSIVATION; SURFACE COATINGS; MOLYBDATE THIN FILM;  
PASSIVE FILM

WANCHAT NATPATTANIT: EFFECT OF MOLYBDATE/PHOSPHATE PASSIVATION  
TREATMENT FOR CORROSION PREVENTION OF CARBON STEEL SURFACE.  
ADVISOR: ASSOC. PROF. MUENDUEN PHISALAPHONG, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST.  
PROF.WERAYUT SRITURAVANICH, Ph.D., 53 pp.

Generally, piping and equipment in most industries are manufactured from mild steel because of its low cost and wide availability. However, corrosion is the main problem associated with this material. Passivation of mild steel is a process of film coating by chemical reaction on the metal surface to prevent flash corrosion. In this work, the Molybdate and Phosphate passivation were studied. The recommended dosages and passivation periods in the manual were used as guidelines for optimizing the experimental conditions. Passivation film performed on mild steel substrat called "Coupon". Coupons were inserted in circulated molybdate solution at 50, 100 and 200 ppm and phosphate solution at 235, 470 and 940 ppm for 0.5, 1, 2, and 4 days respectively. The solution velocity passed through the coupons under those conditions was controlled at 1 m/s. There were 24 samples for corrosion resistance test and surface analysis. In the corrosion resistance analysis, the passivated coupons were immersed in demineralize water for one week and then were estimated for corrosion rate by weight loss measurements. Scanning Electron Microscopy (SEM) was applied for the analysis of surface morphology, film thickness and film distribution on the passivated coupons. The results show that the higher chemical concentration and longer passivation period generate thicker and more effective corrosion resistance film. Between the two passivators, Molybdate was more effective in producing corrosion-resistant film. In conclusion, 4 day passivation of molybdate performed the thickest film and the highest corrosion resistance.

Department: Chemical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Chemical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2015      Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอแสดงความขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ในการให้คำแนะนำตั้งแต่การออกแบบการทดลอง จนถึงการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรยุทธ ศรีธรรวณิช และภาววิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการสนับสนุนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อใช้ในการวัดผลการทดลอง ขอขอบคุณบริษัท นาลโกอินดัสเทรียลเซอร์วิส (ประเทศไทย) จำกัด ในการสนับสนุนอุปกรณ์การทดลองและสารเคมี และขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มอบโอกาสให้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอผลงานวิจัยในงาน PACCON 2016 (pure and applied chemistry international conference 2016) จนได้รับรางวัล "Best Poster Presentations"



## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3. ขอบเขตการศึกษา.....	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาค้นคว้า.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎี.....	6
2.1.1 กลไกของการผุกร่อน.....	6
2.1.2 การสร้างฟิล์มป้องกันสนิม.....	7
2.1.3 การตรวจวัดอัตราการผุกร่อน.....	8
2.1.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	10
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.2.1 Characterization of the passive film on mild steel in CO <sub>2</sub> environment [7].....	13
2.2.2 A two-step roll coating phosphate/molybdate passivation treatment for hot-dip galvanized steel sheet [8].....	15
บทที่ 3 การทดลอง.....	19

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.2 การเตรียมสารเคมีและการพาสติเวชัน.....	20
3.3 การวัดผลการทดลอง.....	21
3.3.1 การวัดผลจากการเปรียบเทียบลักษณะของสีฟิล์ม.....	21
3.3.2 การวัดผลจากการเปรียบเทียบลักษณะของชั้นฟิล์มเพื่อพิจารณาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	22
3.3.3 การวัดผลจากการเปรียบเทียบความต้านทานต่อการผุกร่อน.....	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	25
4.1 ผลการเปรียบเทียบลักษณะของสีฟิล์ม.....	25
4.1.1 การเปรียบเทียบเวลาในการพาสติเวชัน.....	27
4.1.2 การเปรียบเทียบความเข้มข้นสารเคมีที่ใช้ในการพาสติเวชัน.....	29
4.1.3 การเปรียบเทียบชนิดของสารประกอบเคมีที่ใช้ในการพาสติเวชัน.....	31
4.2 ผลการเปรียบเทียบลักษณะของชั้นฟิล์มเพื่อพิจารณาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	31
4.2.1 การเปรียบเทียบเวลาในการพาสติเวชัน.....	32
4.2.2 การเปรียบเทียบความเข้มข้นสารเคมีที่ใช้ในการพาสติเวชัน.....	34
4.2.3 การเปรียบเทียบชนิดของสารประกอบเคมีที่ใช้ในการพาสติเวชัน.....	37
4.3 ผลการเปรียบเทียบความต้านทานต่อการผุกร่อน.....	38
4.3.1 การเปรียบเทียบเวลาในการพาสติเวชัน.....	39
4.3.2 พิจารณาเปรียบเทียบความเข้มข้นสารเคมีที่ใช้ในการพาสติเวชัน.....	41
4.3.3 การเปรียบเทียบชนิดของสารประกอบเคมีที่ใช้ในการพาสติเวชัน.....	43
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	44
5.1 ข้อดีและข้อเสีย.....	44
5.1.1 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัม.....	44



5.1.2 การพาสีเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต.....	44
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	45
รายการอ้างอิง .....	46
ภาคผนวก.....	49
ภาคผนวก ก ตัวอักษรย่อและความหมาย.....	50
ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลอง.....	51
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	53



## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ภาพถ่ายการผุกร่อนของท่อและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของระบบน้ำหล่อเย็น....2	
รูปที่ 1.2: ภาพถ่ายเปรียบเทียบคูโปง เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชนิด MS 1010 ที่ยังไม่ผ่านการพาสสิเวชัน (a) และผ่านการพาสสิเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัม 200 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลา 4 วัน (b).....3	
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดการผุกร่อนของธาตุเหล็ก .....	6
รูปที่ 2.2 เซนเซอร์วัดอัตราการผุกร่อน .....	9
รูปที่ 2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น INSPECT S50 [6].....11	
รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)....11	
รูปที่ 2.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นการเกิดฟิล์มที่เวลาผ่านไป [7].....13	
รูปที่ 2.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นการเกิดฟิล์มที่เวลาผ่านไป 55 ชั่วโมง [7].....14	
รูปที่ 2.7 ภาพผิวเหล็กกล้าไนซ์ ที่ยังไม่ผ่านการพาสสิเวชัน (a), ภาพผิวโลหะที่ผ่านกระบวนการพาสสิเวชันในขั้นตอนแรก (b), ภาพผิวโลหะที่ผ่านกระบวนการพาสสิเวชันในขั้นตอนที่สอง (c), ภาพผิวโลหะที่ผ่านกระบวนการพาสสิเวชันในขั้นตอนที่สอง (d) [8].....15	
รูปที่ 2.8 ภาพสัณของโลหะที่ผ่านกระบวนการพาสสิเวชันแสดงให้เห็นชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น [8].....16	
รูปที่ 2.9 ภาพการผุกร่อนบนผิวโลหะในสภาวะต่างๆคือ ไม่ผ่านการพาสสิเวชัน (a), ผ่านการพาสสิเวชันเพียง 1 ขั้นตอน (b), ผ่านการพาสสิเวชัน 2 ขั้นตอน (c) [8].....16	
รูปที่ 2.10 ภาพชั้นฟิล์มบนผิวโลหะที่ผ่านกระบวนการพาสสิเวชันอย่างสมบูรณ์ด้วยสารเคมี โมโนเคชั่นซิงค์ฟอสเฟต (a), ไบเคชั่นซิงค์แมงกานีสฟอสเฟต (b), ไบเคชั่นซิงค์นิกเกิลฟอสเฟต (c), ไตรเคชั่นซิงค์แมงกานีสนิกเกิลฟอสเฟต (d) [9].....17	
รูปที่ 2.11 การแสดงการวัดผลความต่างศักย์ไฟฟ้าของโลหะที่ผ่านการพาสสิเวชันทั้ง 4 วิธี [9].17	

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความคล้ำของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบเดท เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของโมลิบเดท .....	30
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความคล้ำของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของฟอสเฟต.....	30
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความคล้ำของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบเดท เปรียบเทียบกับเวลาในการพาสติเวชัน .....	28
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความคล้ำของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต เปรียบเทียบกับเวลาในการพาสติเวชัน .....	28
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความหนาของฟิล์มที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยโมลิบเดทที่เวลาต่างๆ .....	33
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความหนาของฟิล์มที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยฟอสเฟตที่เวลาต่างๆ .....	34
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความหนาของฟิล์มที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยโมลิบเดทที่ความเข้มข้น ต่างๆ .....	36
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความหนาของฟิล์มที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยฟอสเฟตที่ความเข้มข้น ต่างๆ .....	36
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอัตราการสุกก่อนของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบ เดทที่เวลาต่างๆ.....	40
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงอัตราการสุกก่อนของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยสารประกอบ ฟอสเฟตที่เวลาต่างๆ .....	40
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงอัตราการสุกก่อนของแผ่นคูปองเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของโมลิบเดท ที่ใช้ในการพาสติเวชัน.....	42
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงอัตราการสุกก่อนของแผ่นคูปองเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของฟอสเฟตที่ ใช้ในการพาสติเวชัน .....	42

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการติดตั้งแผ่นคูปองสำหรับการพาสติเวชั่นเพื่อให้ได้เวลาตามที่ต้องการ ...	20
ตารางที่ 3.2 สภาวะต่างๆที่ทำการทดลองทั้งหมด 24 สภาวะ .....	21
ตารางที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชั่นที่สภาวะควบคุมต่างๆประกอบกับการเทียบเปอร์เซ็นต์ความคล้ำของสี .....	26
ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นการกระจายตัวของชั้นฟิล์มบนแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชั่นที่สภาวะควบคุมต่างๆ.....	31
ตารางที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นความหนาของชั้นฟิล์มบนแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชั่นที่สภาวะควบคุมต่างๆ.....	32
ตารางที่ 4.4 ภาพตัวอย่างการฟูก่อนของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบโมลิบเดทความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 0.5, 1, 2 และ 4 วัน หลังจากนำมาแช่ในน้ำเป็นเวลา 1 สัปดาห์.....	38
ตารางที่ ข-1 ตารางแปลผลค่าเปอร์เซ็นต์ความคล้ำของฟิล์มจากภาพถ่ายที่ผ่านการพาสติเวชั่นที่สภาวะต่างๆ.....	51
ตารางที่ ข-2 ตารางค่าความหนาของฟิล์มจากภาพถ่ายที่ผ่านการพาสติเวชั่นที่สภาวะต่างๆ.....	51
ตารางที่ ข-3 ตารางอัตราฟูก่อนเฉลี่ยของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชั่นที่สภาวะต่างๆ.....	52

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การผุกร่อน เป็นปัญหาหนึ่งของโรงงานอุตสาหกรรมที่พบได้เสมอ ซึ่งเป็นปัญหาที่มักเกิดกับวัสดุโครงสร้าง ระบบท่อและ อุปกรณ์ต่างๆในกระบวนการผลิต ที่มีองค์ประกอบของโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งเป็นโลหะชนิดที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย แต่เป็นโลหะที่ค่อนข้างเกิดปัญหาการผุกร่อนได้ง่าย เพียงสัมผัสกับน้ำหรือความชื้นในอากาศ เหล็กก็จะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดการผุกร่อนเป็นเหล็กออกไซด์ปรากฏให้เห็นเป็นคราบสนิมในเวลารวดเร็ว ทั้งนี้ได้มีการสำรวจจากภาควิชาวิศวกรรมผุกร่อนนานาชาติ (NACE) ในปี พ.ศ. 2558 พบว่ามีความสูญเสียที่เกิดจากการผุกร่อนทั่วโลก คิดเป็นมูลค่ารวมภายในหนึ่งปีประมาณ 2.5 ล้านล้านเหรียญสหรัฐ [1] ดังนั้นปัญหาเรื่องการผุกร่อนจึงเป็นปัญหาที่สำคัญและต้องได้รับการแก้ไขอย่างถูกวิธีและมีประสิทธิภาพเมื่อพิจารณาถึงกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมแล้ว พบว่าระบบน้ำหล่อเย็นเป็นระบบที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาการผุกร่อนสูง เนื่องจากโลหะไม่ว่าจะเป็นระบบท่อหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะมีการสัมผัสกับน้ำอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเมื่อเกิดปัญหาการผุกร่อนขึ้นแล้วมักส่งผลเสียตามมา เช่น ปัญหาอายุการใช้งานของอุปกรณ์ที่สั้นลง ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบที่ลดลงส่งผลให้อัตราการผลิตลดลงตามไปด้วย และอาจร้ายแรงถึงขั้นต้องหยุดกระบวนการผลิตเพื่อซ่อมบำรุง อุปกรณ์ที่ชำรุดจากการผุกร่อน ซึ่งผลกระทบที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ล้วนแล้วแต่ส่งผลให้เกิดการสูญเสียทั้งในด้าน เงินต้นทุน ผลกำไร รวมไปถึงการสูญเสียโอกาสทางการค้าอีกด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาดังกล่าว จึงมีการศึกษาค้นคว้าวิธีการต่างๆ เพื่อลดหรือป้องกันการผุกร่อนของโลหะ ด้วยการยืดอายุการใช้งานของระบบท่ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้ยาวนานขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบวิธีการป้องกันปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีต่างๆแล้ว การใช้เคมีบำบัด เป็นหนึ่งในวิธีการป้องกันปัญหาที่เป็นที่ยอมรับและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ สามารถป้องกันการผุกร่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นวิธีแก้ปัญหาค่าใช้จ่ายที่น้อยส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 1.1 ภาพถ่ายการผุกร่อนของท่อและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของระบบน้ำหล่อเย็น

การบำบัดด้วยเคมีโดยทั่วไปนั้น ทำโดยการเคลือบสารเคมีเป็นชั้นฟิล์มบางๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เนื้อโลหะสามารถสัมผัสกับน้ำได้โดยตรง ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการผุกร่อนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ การใช้เคมีบำบัดนั้นสามารถทำได้หลากหลายกลุ่มเคมี เช่น สารประกอบโครเมต สารประกอบอินทรีย์ เฮเทอโรไซคลิก สารประกอบโมลิบเดท สารประกอบฟอสเฟต และสารประกอบไนไตรท์ ซึ่งในอดีต สารประกอบโครเมต เป็นสารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการสร้างฟิล์มสูง แต่ปัจจุบันสารประกอบโครเมตถูกสั่งห้ามใช้งานโดยกฎหมาย เนื่องจากเป็นสารเคมีอันตรายและเป็นสารก่อมะเร็ง [3]

สำหรับการใช้งานสารเคมีกับระบบในโรงงานอุตสาหกรรมนั้น สารเคมีในการสร้างฟิล์มจะเลือกตามความเหมาะสมและข้อจำกัดของในด้านต่าง เช่น งบประมาณ เวลา และ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการทิ้งน้ำที่มีเคมีผสมอยู่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกสารประกอบที่ใช้ในการทดลองจากคุณสมบัติที่โดดเด่นของสารประกอบสองชนิดนี้คือ

- 1). สารประกอบโมลิบเดท เป็นสารเคมีที่มีประสิทธิภาพในการสร้างฟิล์มที่ดีเทียบเท่ากับสารประกอบไนไตรท์ แต่มีจุดเด่นคือสารประกอบโมลิบเดทนั้นจะไม่ย่อยสลายจากการเป็นอาหารของแบคทีเรีย ทำให้มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสารประกอบอื่นๆ
- 2). สารประกอบฟอสเฟต เป็นสารที่มีราคาไม่สูงมากและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ แต่ประสิทธิภาพในการสร้างฟิล์มค่อนข้างด้อยกว่าเมื่อเทียบกับสารประกอบโมลิบเดทและสารประกอบที่ใช้ในการสร้างฟิล์มอื่นๆ

ในการใช้สารเคมีสร้างฟิล์มโดยทั่วไปแล้วจะแบ่งออกตาม 2 ช่วงการใช้งานคือ

- 1). ช่วงการใช้งานระบบใหม่หรือช่วงที่ระบบเตรียมการเดินเครื่อง ในช่วงนี้ผิวโลหะอาจจะง่ายและเสี่ยงต่อการผุกร่อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากผิวของโลหะยังปราศจากชั้นฟิล์มเคมีที่ใช้ป้องกันการผุกร่อน การใช้เคมีเพื่อสร้างฟิล์มในช่วงนี้จะต้องเป็นเคมีที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถสร้างฟิล์มได้

อย่างรวดเร็วและแข็งแรงเพื่อลดระยะเวลาที่ออกซิเจนในน้ำจะสัมผัสกับเนื้อโลหะให้น้อยที่สุด  
กระบวนการ



**รูปที่ 1.2** ภาพถ่ายเปรียบเทียบคูปอง เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชนิด MS 1010 เมื่อ (a) ยังไม่ผ่านการพาสซีเวชัน และ (b) ผ่านการพาสซีเวชันด้วยสารประกอบโมลิบเดท 200 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลา 4 วัน

สร้างฟิล์มบนผิวโลหะด้วยเคมีประสิทธิภาพสูงนี้เรียกว่า “พาสซีเวชัน” โดยทั่วไปแล้วการพาสซีเวชันจะใช้เวลาประมาณ 2-3 วัน ก่อนที่ระบบจะเดินเครื่อง ซึ่งในทางปฏิบัตินั้น การวัดประสิทธิภาพของการพาสซีเวชันในเชิงตัวเลขนั้นทำได้ยาก สามารถบอกได้เพียงว่าเกิดฟิล์มขึ้นหรือไม่ จากการสังเกตจากสีผิวของแผ่นคูปองที่ติดตั้งไว้ในระบบช่วงที่พาสซีเวชันโดยให้สารละลายเคมีในระบบไหลผ่านแผ่นคูปอง หากการพาสซีเวชันมีการเกิดขึ้นของชั้นฟิล์ม จะสังเกตเห็นได้ว่าผิวของแผ่นคูปองที่เคยเงาสท้อนแสง จะเปลี่ยนเป็นผิวสีด้านไม่สะท้อนแสง ซึ่งการวัดผลจากการสังเกตด้วยตาเพียงอย่างเดียว อาจไม่เพียงพอต่อการตอบข้อสงสัยที่ว่า ฟิล์มที่เกิดขึ้นจากการพาสซีเวชันนั้น มีความสมบูรณ์และแข็งแรงมากน้อยเพียงใด

2). ช่วงการใช้งานที่กระบวนการผลิตมีการเดินเครื่องจักรเป็นปกติ ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบน้ำหล่อเย็นมีการรับความร้อนจากกระบวนการผลิต ในช่วงนี้การใช้สารเคมีบำบัดมีวัตถุประสงค์เพียงเพื่อคงสภาพของชั้นฟิล์มป้องกันสนิม ดังนั้นสารเคมีที่ใช้จะมีประสิทธิภาพในการสร้างฟิล์มต่ำกว่าสารเคมีที่ใช้ในการพาสซีเวชันและมีต้นทุนที่ต่ำลงตามไปด้วย โดยที่สารเคมียังคงสามารถป้องกันการผุกร่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องควบคุมคุณภาพของน้ำหล่อเย็นให้เหมาะสมต่อการสร้างฟิล์มด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ความเป็นกรด-ด่าง จะต้องควบคุมค่า pH ไม่ให้สูงหรือต่ำเกินไป เนื่องจากค่า pH ที่ต่ำ มีผลทำให้ฟิล์มที่เกาะเกิดการสึกกร่อนได้จากความเป็นกรดของน้ำ แต่หาก pH สูงเกินไป ประกอบกับปริมาณแคลเซียมในน้ำสูง จะส่งผลให้สารเคมีที่ใช้สร้างฟิล์มจับตัวแคลเซียมเกิดเป็นชั้น

ตะกรันได้ อย่างไรก็ตามการวัดประสิทธิภาพของการใช้เคมีบำบัดในช่วงนี้ สามารถวัดได้จากอัตราการฟุกร้อนของแผ่นคูปอง ที่ทำขึ้นจากโลหะชนิดเดียวกับระบบโดยทั่วไปมักจะใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด MS-1010 เมื่อติดตั้งแผ่นคูปองดังกล่าวเข้ากับอุปกรณ์ที่มีน้ำคุณภาพเดียวกับระบบน้ำในระบบให้ไหลผ่านแผ่นคูปอง เป็นเวลา 30-90 วัน [2] จากนั้นนำมาแผ่นคูปองซึ่งน้ำหนักที่หายไปคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยการลดลงของแผ่นคูปองต่อระยะเวลาที่ติดตั้งหรือเรียกว่า “อัตราการฟุกร้อน” ได้

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาผลของสภาวะควบคุมต่างๆในช่วงพาสสิเวชันเพียงอย่างเดียวเท่านั้น เนื่องจากเป็นช่วงที่ต้องให้ความสำคัญมากกับการควบคุมปัจจัยต่างๆ เพื่อให้การพาสสิเวชันเกิดประสบความสำเร็จ โดยการทดลองได้ออกแบบการสร้างฟิล์มป้องกันสนิมบนผิวโลหะโดยควบคุมปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดของสารเคมี, ความเข้มข้นของสารเคมี และเวลาในการทำพาสสิเวชัน ที่มีต่อลักษณะของการเกิดขึ้นของชั้นฟิล์มและประสิทธิภาพในการป้องกันสนิม โดยการตรวจสอบลักษณะและวัดความหนาของชั้นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และทดสอบความต้านทานการฟุกร้อนของฟิล์มที่ผ่านกระบวนการพาสสิเวชันซึ่งผู้จัดทำมีความคาดหวังว่างานวิจัยนี้ จะทำให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการทำพาสสิเวชัน และสามารถตอบข้อสงสัยต่างๆเกี่ยวกับการพาสสิเวชัน รวมไปถึงการนำมาปรับใช้ในการสร้างฟิล์มบนผิวโลหะเพื่อป้องกันสนิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของการสร้างฟิล์มของสารประกอบโมลิบดีนัมและฟอสเฟต จากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเคมี และเวลาในการพาสสิเวชัน
- 1.2.2 เพื่อนำผลการทดลองที่ได้ ไปปรับใช้กับการทำงานจริง

## 1.3. ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษากระบวนการพาสสิเวชันจากคู่มือการใช้งานเคมีทั้งสองสารประกอบ (สารประกอบโมลิบดีนัมและสารประกอบฟอสเฟต) เพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนการทดสอบหาปัจจัยควบคุมโดยแบ่งปัจจัยหลักๆในการศึกษาคือ
  - 1.3.1.1 ความเข้มข้นตั้งแต่ 50-200 มิลลิกรัมต่อลิตรของโมลิบดีนัม และ 235-940 มิลลิกรัมต่อลิตรของฟอสเฟต
  - 1.3.1.2 เวลาที่ใช้ในการพาสสิเวชัน ตั้งแต่ 12-96 ชั่วโมง
- 1.3.2 ศึกษาผลของฟิล์มพาสสิเวชันที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสภาวะควบคุมต่างๆในการพาสสิเวชัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพเพื่อเปรียบเทียบความคล้ำของสีฟิล์มบนแผ่นคูปอง



1.3.3 ศึกษาผลของฟิล์มพาสสิเวชันที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสถานะควบคุมต่างๆในการพาสสิเวชัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เปรียบเทียบความสม่ำเสมอของการเกิดฟิล์ม และความหนาของชั้นฟิล์มที่เกิดบนผิวโลหะ

1.3.4 ศึกษาผลของฟิล์มพาสสิเวชันที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสถานะควบคุมต่างๆในการพาสสิเวชัน ต่อสมบัติความต้านทานการผุกร่อนของแผ่นคูปอง โดยนำแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสสิเวชันในสถานะควบคุมต่างๆจุ่มในน้ำเพื่อให้เกิดการผุกร่อน และวัดน้ำหนักที่สูญเสียของแผ่นคูปองเพื่อคำนวณและเปรียบเทียบอัตราการผุกร่อนกับแผ่นคูปองที่ไม่ผ่านการพาสสิเวชัน

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาค้นคว้า

1.4.1 ได้รับความรู้และความเข้าใจในกระบวนการพาสสิเวชันมากยิ่งขึ้นทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

1.4.2 เข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จในกระบวนการพาสสิเวชันและสามารถปรับเปลี่ยนปัจจัยควบคุมต่างๆ เช่นเวลาหรือความเข้มข้นเพื่อให้บรรลุเป้าหมายภายใต้ข้อจำกัดของการทำงานกับระบบจริง

1.4.3 สามารถนำความรู้และผลการทดลองที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการทำงานพาสสิเวชันในอุตสาหกรรมต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎี

##### 2.1.1 กลไกของการผุกร่อน

การผุกร่อน คือกระบวนการที่อะตอมของโลหะหลังจากผ่านการกลุ่ พยายามที่จะกลับไปอยู่ในสภาพเดิมตามธรรมชาติ โดยการเกิดปฏิกิริยาการรับออกซิเจน จากการสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำจากบริเวณโดยรอบ และได้ผลิตภัณฑ์เป็นออกไซด์ของโลหะนั้นๆเพื่อกลับไปเป็นสารประกอบที่มีความเสถียรกว่า เช่น สนิมเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) สนิมทองแดง ( $\text{CuO}$ ) หรือสนิมอะลูมิเนียม ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ปฏิกิริยาการเกิดการผุกร่อนนี้มีความซับซ้อนมากและมีลักษณะเฉพาะตัว สำหรับการผุกร่อนที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้คือการผุกร่อนที่เกิดกับเหล็กกล้าคาร์บอนเพียงอย่างเดียว และเมื่อพิจารณาขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการผุกร่อน ที่เกิดกับเหล็กกล้าคาร์บอนแล้วสามารถจำแนกขั้นตอนการเกิดได้ดังนี้ [2]

2.1.1 เมื่อเหล็กสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำ เหล็กจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดังสมการ



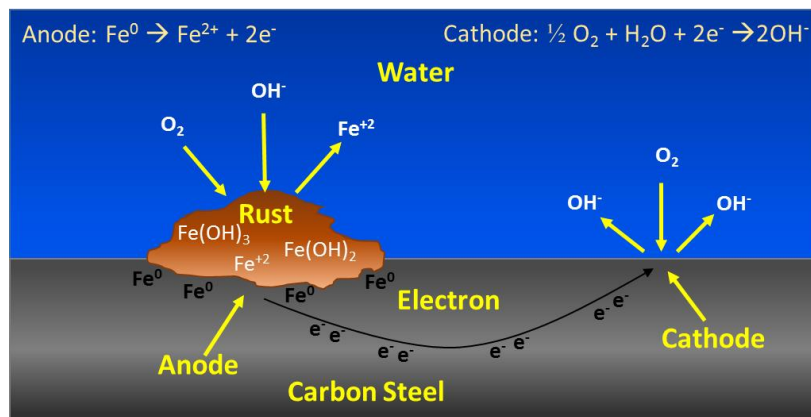
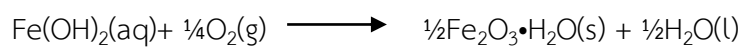
2.1.2 น้ำและออกซิเจนเข้ารับอิเล็กตรอนเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน



2.1.3 เหล็กไอออนรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์



2.1.4 เหล็กไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอีกครั้งเกิดเป็นสนิมเหล็ก



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดการผุกร่อนของธาตุเหล็ก

## 2.1.2 การสร้างฟิล์มป้องกันสนิม

การสร้างฟิล์มป้องกันสนิม คือ กระบวนการของการปรับสภาพผิวโลหะด้วยกระบวนการทางเคมีเพื่อให้ผิวของโลหะบริเวณที่สัมผัสกับสารเคมี เปลี่ยนโครงสร้างและเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางๆ โดยการเกิดเป็นชั้นบางๆ เคลือบที่ผิวหน้าของโลหะ ซึ่งชั้นฟิล์มนี้จะสามารถช่วยลดและป้องกันการสูญเสียอิเล็กตรอน ที่เป็นสาเหตุของการผุกร่อนได้ โดยการกีดกันไม่ให้สารที่มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอน สัมผัสกับเนื้อโลหะ สำหรับสารเคมีที่นำไปใช้ในการสร้างฟิล์มป้องกันสนิม แบ่งออกเป็นกลุ่มต่างๆ เช่น ฟอสเฟต, โครเมต, ไนไตรท และ โมลิบเดท เป็นต้น สารประกอบดังกล่าว มีคุณสมบัติและหลักการการทำงานที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการสร้างฟิล์มป้องกันสนิม จากสารเคมี 2 กลุ่ม คือ

2.1.2.1 การสร้างฟิล์มป้องกันสนิมด้วยสารประกอบโมลิบเดท คือ สารประกอบ โซเดียม โมลิบดินัมและออกซิเจน โดยสารเคมีที่นำมาใช้ในการทดลองนี้มีส่วนประกอบหลักเป็น โซเดียมโมลิบเดท ซึ่งเป็นสารเคมีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ยังไม่สามารถอธิบายขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่แน่ชัดได้ ทั้งนี้ฟิล์มที่เกิดขึ้นนั้น สันนิษฐานว่าเป็นชั้นฟิล์มของ  $FeMoO_4$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเนื้อเหล็ก ออกซิเจนในน้ำ และสารเคมี [3] ซึ่งกระบวนการสร้างฟิล์มป้องกันสนิมด้วยสารประกอบนี้จะประสบความสำเร็จได้โดยอ้างอิงจากคู่มือการใช้งานสารเคมี จำเป็นต้องพาสติเวชันภายใต้การควบคุมปัจจัยต่างๆให้เหมาะสมดังนี้ [2]

- 1) **เวลา** เวลาที่ใช้ในการพาสติเวชัน ควรมากกว่า 48 ชั่วโมง
- 2) **ความเข้มข้น** ความเข้มข้นของโมลิบเดทในน้ำที่ใช้สำหรับการพาสติเวชัน ควรมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3) **คุณภาพน้ำ** คุณภาพน้ำที่ใช้ในกระบวนการพาสติเวชัน จะต้องเป็นน้ำที่สะอาด อาจใช้น้ำปราศจากประจุหรือน้ำที่มีความกระด้างต่ำ เพื่อป้องกันการเกิดตะกอนบนผิวโลหะ อีกทั้งค่า pH จะต้องควบคุมให้อยู่ในช่วง 8-8.5 รวมไปถึงหลีกเลี่ยงแหล่งน้ำที่ไม่มีออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำ เช่นน้ำ ที่ผ่านกระบวนการกลั่น เนื่องจาก ออกซิเจนที่ละลายในน้ำจะมีส่วนช่วยในการออกซิไดซ์ให้เกิดฟิล์มเช่นกัน
- 4) **พื้นผิวของโลหะ** พื้นผิวของโลหะจะต้องสะอาดปราศจากสนิมเหล็ก ตะกอน เศษฝุ่นผงต่างๆ และคราบน้ำมัน เนื่องจากสิ่งสกปรกเหล่านี้อาจเป็นตัวขัดขวางทำให้สารเคมีไม่สามารถเข้าไปสร้างฟิล์มบนผิวโลหะได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ เพราะฉะนั้น จะต้องมีการทำความสะอาดพื้นผิวโลหะก่อนทำการพาสติเวชันทุกครั้ง โดยวิธีการทำความสะอาดนั้นขึ้นอยู่กับสิ่งปนเปื้อนที่เกาะบนผิวโลหะ หากสิ่งปนเปื้อนเป็นอินทรีย์วัตถุ เช่นคราบน้ำมันให้

ทำความสะอาดด้วยต่าง แต่ถ้ำสิ่งปนเปื้อนเป็นอนินทรีย์วัตถุ เช่นตะกอนหรือสนิมเหล็ก ให้ใช้กรดในการทำความสะอาด โดยศึกษาปริมาณและวิธีการใช้อย่างรอบคอบก่อนทุกครั้ง

2.1.2.2 การสร้างฟิล์มป้องกันสนิมด้วยสารประกอบฟอสเฟต คือ สารเคมีที่มีองค์ประกอบของโซเดียมและฟอสเฟต ทำหน้าที่สร้างฟิล์มป้องกันสนิมจากการฟอร์มตัวของเหล็ก ฟอสเฟต และแคลเซียมที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดเป็นฟิล์มบนผิวโลหะ ซึ่งฟอสเฟตจะทำปฏิกิริยากับเหล็กไฮดรอกไซด์เกิดเป็นเหล็กฟอสเฟต  $Fe_3(PO_4)_2$  ดังสมการเคมี  $2(Fe(OH)_2)(aq) + 3(H_3PO_4)(aq) \rightarrow Fe_3(PO_4)_2(s) + H_2O(l)$  [2] ปกคลุมที่ขั้วลบ และฟอสเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมเกิดเป็นตะกอน แคลเซียมฟอสเฟต  $Ca_3(PO_4)_2$  ดังปฏิกิริยา  $3(Ca(OH)_2) + 2(H_3PO_4) = Ca_3(PO_4)_2 + 6(H_2O)$  [2] ปกคลุมที่ขั้วบวก ซึ่งกระบวนการสร้างฟิล์มป้องกันสนิม ด้วยสารประกอบนี้จะประสบความสำเร็จตามคำแนะนำของคู่มือการใช้สารเคมีได้ จำเป็นต้องควบคุมปัจจัยต่างๆให้เหมาะสมดังนี้ [2]

- 1) เวลา เวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มป้องกันสนิม ควรมากกว่า 24 ชั่วโมง
- 2) ความเข้มข้น ความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำที่ใช้สำหรับการสร้างฟิล์มป้องกันสนิม ควรมากกว่า 470 มิลลิกรัมต่อลิตรของฟอสเฟตอนินทรีย์
- 3) คุณภาพน้ำ คุณภาพน้ำที่ใช้ในกระบวนการสร้างฟิล์มป้องกันสนิม จะต้องเป็นน้ำที่สะอาดปราศจากสารแขวนลอย แต่จะต้องมีปริมาณแคลเซียมที่อยู่ในน้ำประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้ฟอสเฟตทำปฏิกิริยาในการสร้างฟิล์ม และ pH จะต้องควบคุมให้อยู่ในช่วง 6.5-7.5
- 4) พื้นผิวของโลหะ พื้นผิวของโลหะจะต้องสะอาดด้วยเหตุผลเดียวกับการสร้างฟิล์มด้วยโปรแกรมอื่นๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว
- 5) อุณหภูมิ อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญมากสำหรับการทำปฏิกิริยากับสารประกอบนี้ ควรควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงกว่า 45 องศาเซลเซียส เนื่องจากฟิล์มที่เกิดขึ้นมีส่วนที่เป็นตะกอนแคลเซียมฟอสเฟต หากระบบมีอุณหภูมิสูงเกินไปจะเร่งให้เกิดตะกอนเร็วขึ้น ทำให้ชั้นฟิล์มเกิดมากที่เฉพาะขั้วบวก จึงทำให้ฟิล์มที่ได้ไม่สามารถป้องกันสนิมได้สมบูรณ์

### 2.1.3 การตรวจวัดอัตราการผุกร่อน

การวัดอัตราการผุกร่อนเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้เคมีบำบัด วิธีการวัดผลสามารถทำได้เป็น 2 แบบหลักๆคือ 1. การวัดผลในช่วงที่มีการซ่อมบำรุง โดยการวัดจากความหนาของท่อหรือความหนาของอุปกรณ์ที่ลดลง ต่อช่วงเวลาใช้งาน และ 2. การวัดในช่วงที่กระบวนการผลิตเดินเครื่อง ซึ่งเป็นที่นิยมมากกว่าเนื่องจากสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการใช้เคมีบำบัดได้ทันทีและสามารถแก้ไขและป้องกันหากเกิดความผิดปกติขึ้นกับระบบ ได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.2 เซนเซอร์วัดอัตราการผุกร่อน

การวัดอัตราการผุกร่อนในขณะที่กระบวนการผลิตเดินเครื่อง ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 2 วิธี คือ การวัดโดยใช้เซนเซอร์วัดอัตราการผุกร่อน ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดการผุกร่อนด้วยการนำเอาเทคนิคทางไฟฟ้าเข้ามาช่วยโดยการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ลดลงจากการผุกร่อนของโลหะที่เคลือบบนหัวเซนเซอร์ ที่เป็นแท่งอิเล็กโทรด ซึ่งการวัดผลวิธีนี้จะรายงานผลเป็นแบบแสดงตัวเลข ที่สามารถอ่านค่าอัตราการผุกร่อน ณ ช่วงเวลานั้นๆ ได้ทันที [2]

การวัดโดยใช้น้ำหนักที่หายไปของ แผ่นคูปอง ซึ่งจะเป็นการวัดค่าเฉลี่ยของการเกิดการผุกร่อนในช่วงเวลาที่ทำการติดตั้ง งานวิจัยนี้จะใช้การวัดอัตราการผุกร่อนด้วยวิธีการวัดการสูญเสีย น้ำหนักของแผ่นคูปอง เพียงเทคนิคเดียวเท่านั้นเนื่องจากสามารถทำได้ง่ายและเห็นผลชัดเจน การวัดอัตราการผุกร่อนด้วยแผ่นคูปองเป็นเทคนิคการวัดอัตราการผุกร่อนของชิ้นงานโลหะที่ติดตั้งให้มีการไหลผ่านของน้ำที่มีคุณภาพเดียวกับระบบ และแผ่นคูปองเป็นโลหะชนิดเดียวกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนและระบบท่อของระบบนั้นๆ หลังจากการติดตั้งผ่านไปช่วงเวลาหนึ่งแผ่นคูปองจะเกิดการผุกร่อนและเกิดการสูญเสียเนื้อโลหะ ทำให้น้ำหนักของแผ่นคูปองลดลง ซึ่งน้ำหนักที่ลดลงนี้ สามารถนำมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยความหนาของ แผ่นคูปองที่ลดลงได้ จากสมการ [4]

$$CR = \frac{W}{(A \times t \times d)}$$

เมื่อ

CR = อัตราการผุกร่อนหรือค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นคูปองที่ลดลง มีหน่วยเป็น  $10^{-3}$  นิ้วต่อปี (MPY)

W = น้ำหนักที่สูญเสียจากการผุกร่อนของแผ่นคูปอง มีหน่วยเป็น กรัม (g)

$t$  = เวลาที่แผ่นคูปองถูกติดตั้งในระบบ มีหน่วยเป็น วัน (day)

$d$  = ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นคูปอง มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{g/cm}^3$ )

$A$  = พื้นที่ผิวของแผ่นคูปอง มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร ( $\text{cm}^2$ )

$K$  = ค่าคงที่สำหรับการแปลงหน่วย ( $\text{day} \cdot \text{mil} \cdot \text{inch}$ ) / ( $\text{Year} \cdot \text{cm}$ )

หมายเหตุ : แผ่นคูปอง ที่ใช้มีขนาด กว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  หนา เท่ากับ  $3 \times 0.5 \times 0.0625$  ลูกบาศก์นิ้ว

และ โลหะที่ใช้เป็นแผ่นคูปอง มีความหนาแน่นเท่ากับ 7.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

#### 2.1.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ถูกประดิษฐ์ขึ้นในปีครั้งแรกในปี ค.ศ. 1937 โดยนักฟิสิกส์ ชื่อ แมนเฟรด วอง เอนเดนนี่ [5] ซึ่งกล้องนี้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างพื้นผิวของ เซลล์ โลหะ หรือวัตถุต่างๆ โดยสามารถแสดงภาพออกมาทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ในรูปแบบ 3 มิติ ที่มีกำลังขยายสูงนับหมื่นเท่า โดยหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดนี้ เริ่มต้นจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขดลวดทั้งสแตนด์เพื่อเร่งให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด และถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก เมื่ออิเล็กตรอนที่หลุดออกมาไหลผ่านเลนส์รวบรวมรังสี จะทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนควบแน่นเกิดเป็นลำอิเล็กตรอน และไหลผ่านเลนส์ปรับโฟกัส เพื่อควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนกระทบบนผิวของวัตถุ ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้เกิดปรากฏการณ์ 3 อย่างคือ

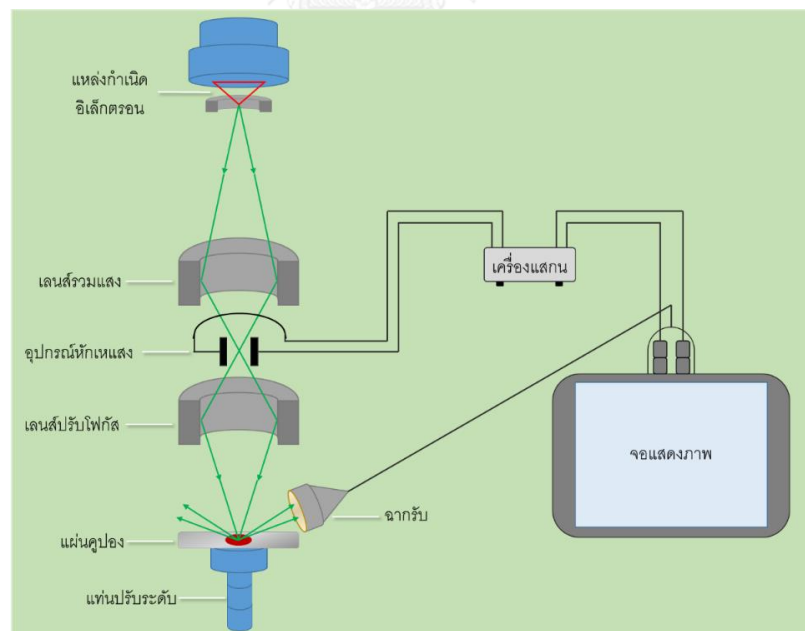
1. เกิดการหลุดออกของอิเล็กตรอนที่อยู่บนผิวของวัตถุเรียกว่า “อิเล็กตรอนทุติยภูมิ” ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถหลุดออกจากวัตถุได้ง่าย เกิดการหลุดออกมาปะทะกับฉากรับ ทำให้เห็นเป็นภาพบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

2. เกิดการกระเจิงกลับของลำแสงอิเล็กตรอนที่ยิงกระทบบนผิวของวัตถุเรียกว่า “อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ” พลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าพลังงานที่แตกต่างกระเจิงกลับมา ขึ้นอยู่กับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุ ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณของพื้นผิวชิ้นงาน

3. เกิดจากอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงวิ่งเข้าชนกับวัตถุ ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นวงโคจรต่างๆ หลุดออกจากวงโคจรและเกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นถัดไป เรียกว่า “รังสีเอกซ์” ซึ่งสเปกตรัมที่หลุดออกมาของรังสีเอกซ์ เมื่อใช้หัววัดรังสีที่ปล่อยออกมา จะสามารถนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณได้



รูปที่ 2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น INSPECT S50 [6]



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สามารถใช้กับชิ้นงานมีลักษณะเป็นของแข็ง ผง फिल्म ชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ หรือแม้กระทั่ง ตัวอย่างทางชีวภาพ โดยมีระบบการวิเคราะห์ 2 ระบบ คือ

1. ระบบที่มีความเป็นสุญญากาศสูง (High Vacuum) เมื่อใช้งานในโหมดนี้ จะให้ได้ภาพที่มีกำลังขยายสูง รายละเอียดของภาพและความคมชัดที่ดี โดยชิ้นงานที่ใช้วิเคราะห์ได้จะต้องสามารถนำไฟฟ้า และไม่มีความชื้น หากตัวอย่างไม่นำไฟฟ้า จำเป็นต้องสามารถเคลือบทองหรือคาร์บอนได้โดยที่ไม่ทำให้ลักษณะผิวของชิ้นงานที่เปลี่ยนไป ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นงานของในงานวิจัยนี้

2. ระบบที่สามารถปรับความเป็นสุญญากาศได้ (Variable Pressure Mode) เมื่อใช้งานในโหมดนี้ จะทำให้ได้กำลังขยายต่ำกว่าแบบที่ 1 ส่งผลให้รายละเอียดของภาพที่ได้ต่ำตามลงไปด้วย โดยชิ้นงานที่ใช้วิเคราะห์ได้จะต้องไม่มีความชื้น แต่ไม่ต้องนำไฟฟ้าและไม่ต้องมีการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทองหรือคาร์บอนก็ได้

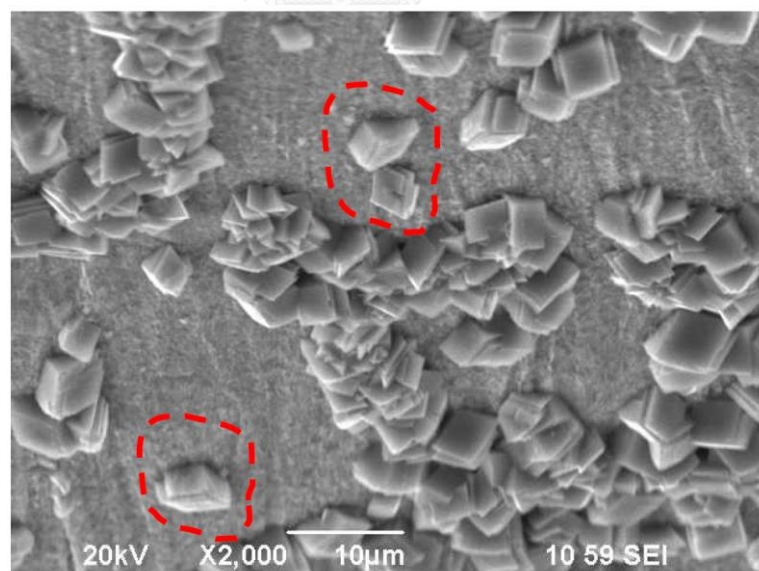




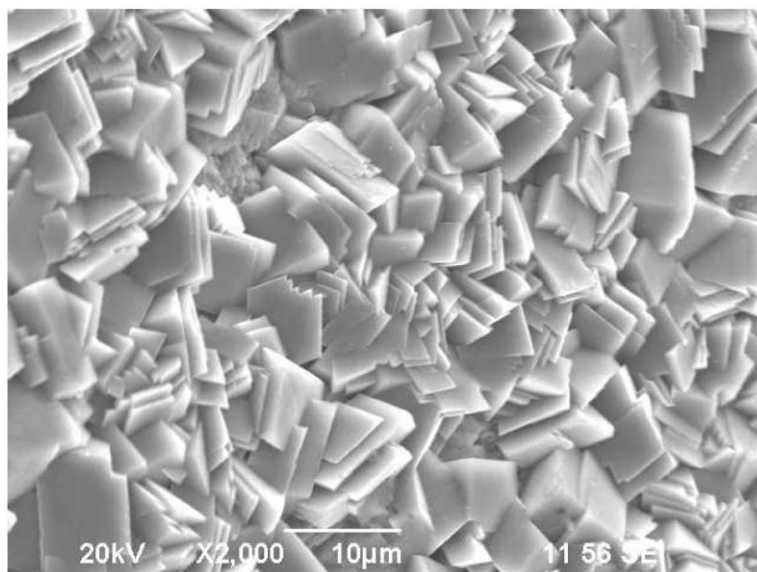
## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 Characterization of the passive film on mild steel in CO<sub>2</sub> environment [7]

งานวิจัยที่จัดทำขึ้นโดย H. Jiabin, Y. David และ N. Srdjan, (2008) ซึ่งเป็นงานวิจัยที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการเกิดฟิล์มป้องกันสนิม ด้วยกระบวนการพาสซีเวชันในสารละลายคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อทำให้เกิดฟิล์มของเหล็กคาร์บอเนต (FeCO<sub>3</sub>) โดยมีการวัดผลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ซึ่งจากการทดลองพบว่าพื้นผิวโลหะถูกปกคลุมด้วยเหล็กคาร์บอเนต (FeCO<sub>3</sub>) 99.6% และเหล็กออกไซด์ (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) 0.4% งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะความเปลี่ยนแปลงของเวลาในการทำพาสซีเวชันที่ส่งผลต่อลักษณะฟิล์มที่เกิดขึ้นบนผิวโลหะเท่านั้น โดยการทดลอง มีการควบคุม อุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ มีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ 53% และโซเดียมคลอไรด์ 1% ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ การสร้างฟิล์มนี้ทำในสภาวะที่ไม่มีการไหล และมีการเก็บตัวอย่างแผ่นคูปอง ที่ 0.5, 12 และ 55 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อทำการวัดผลการทดลอง จากการวัดผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ทำให้เห็นถึงความชัดเจนของการเกิดฟิล์มบนผิวเหล็กที่เวลาต่างๆเป็นอย่างดี ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปด้านล่าง



รูปที่ 2.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นการเกิดฟิล์มที่เวลาผ่านไป [7]

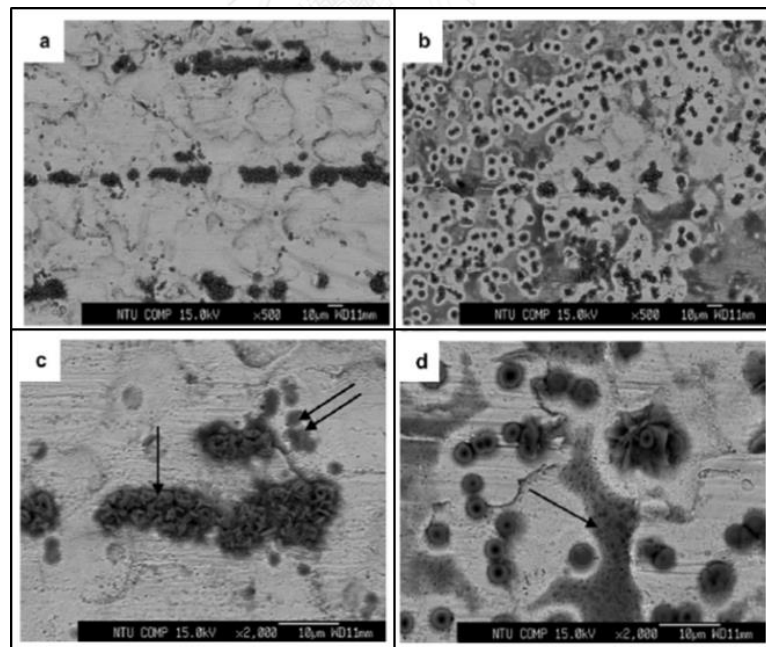


รูปที่ 2.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นการเกิดฟิล์มที่เวลาผ่านไป 55 ชั่วโมง [7]

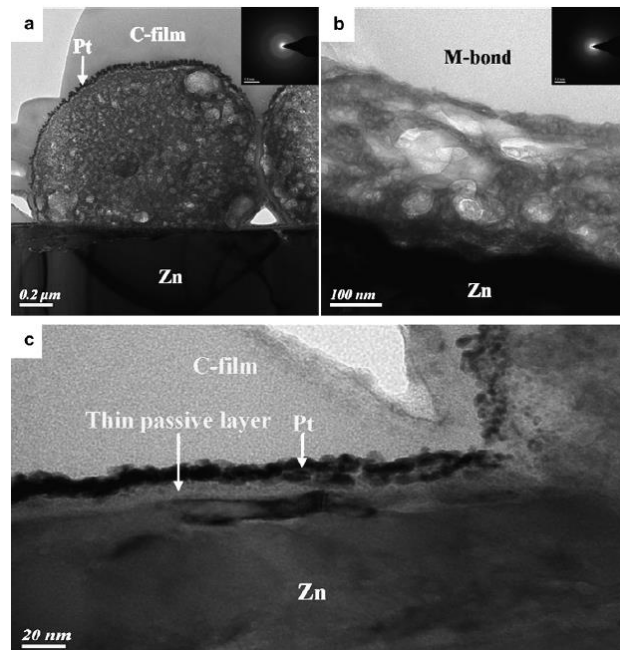
จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาที่ใช้ในการพาสติเวชันที่มากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณผลึกของเหล็กคาร์บอนเนต ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นฟิล์มป้องกันสนิม มีปริมาณปกคลุมบนพื้นผิวโลหะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย จนกระทั่งถึงระยะเวลาหนึ่ง ผลึกที่เกิดขึ้นปกคลุมจนกระทั่งเต็มพื้นผิวของโลหะ ทำให้การพาสติเวชันต่อไปจากระยะเวลาดังกล่าวนี้อาจไม่สามารถส่งผลให้ฟิล์มป้องกันสนิมมีประสิทธิภาพสูงขึ้นอีกต่อไป

## 2.2.2 A two-step roll coating phosphate/molybdate passivation treatment for hot-dip galvanized steel sheet [8]

งานวิจัยที่จัดทำขึ้นโดย T. Cheng-Yang, L. Jen-Shou, C. Pei-Li และ L. Chao-Sung (2010) เพื่อศึกษากระบวนการสร้างฟิล์มป้องกันสนิมบนผิวเหล็กกล้าไนซ์ จากการใช้สารละลายฟอสเฟต และ สารละลายโมลิบเดท ด้วยเทคนิค เคลือบม้วน (roll coating) 2 ขั้นตอน โดยการใช้สารละลายฟอสเฟตที่มีส่วนประกอบของเคมี ซิงค์ออกไซด์ 2.4 กรัมต่อลิตร โซเดียมไนเตรต 30 กรัมต่อลิตร กรด ฟอสฟอริก 22 มิลลิกรัมต่อลิตร และแมกนีเซียมไนเตรต 5 กรัมต่อลิตร และปรับค่า pH ให้อยู่ที่ 2.5 ด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นตามด้วยสารละลายโมลิบเดทในขั้นตอนที่ 2 ที่เป็นสารละลาย โซเดียมโมลิบเดท 30 กรัมต่อลิตร ที่ต้องปรับ pH ให้อยู่ที่ 4.5 ด้วยการเติมกรดฟอสฟอริก โดยการตรวจวันผลในงานวิจัยนี้มีการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในการวัดผลเช่นกัน ซึ่งภาพที่ได้จากการทดลอง แสดงให้เห็นถึงการสร้างฟิล์มบนผิวโลหะ ทั้งในแนวตั้งฉากและแนวตัดขวาง เมื่อถ่ายภาพที่ได้จากแนวตั้งฉากกับแผ่นคูปอง จะเห็นเป็นจุดเล็กสีดำตัดกับสีของเนื้อโลหะซึ่งมีสีเทา เริ่มก่อตัวขึ้น ส่วนภาพถ่ายที่ได้จากการถ่ายในแนวตัดขวางจะทำให้เห็นชั้นของฟิล์มที่เกิดขึ้นบนผิวโลหะอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพด้านล่าง

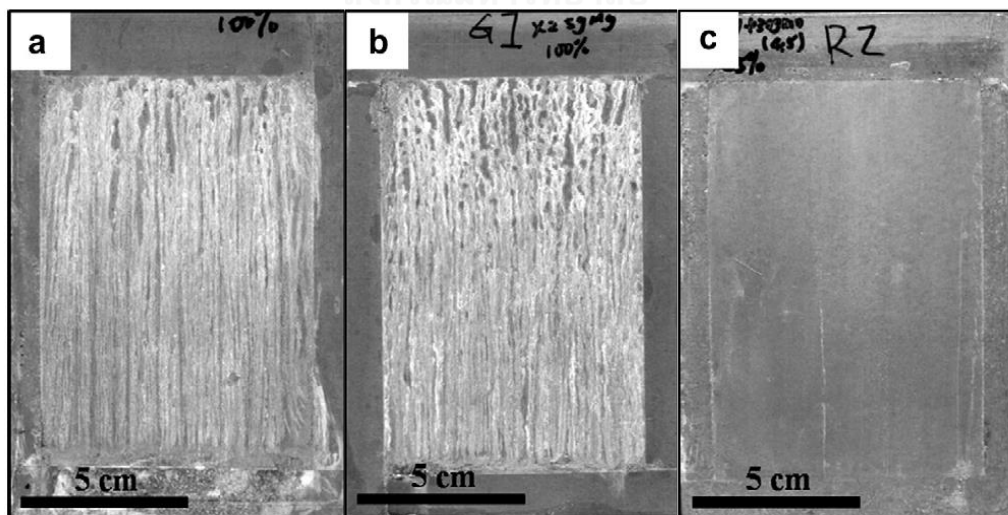


**รูปที่ 2.7** ภาพผิวเหล็กกล้าไนซ์ เมื่อ (a) ผ่านกระบวนการพาสซีเวชันในขั้นตอนแรกที่กำลังขยาย 500 เท่า, (b) ผ่านกระบวนการพาสซีเวชันในขั้นตอนที่สองกำลังขยาย 500 เท่า, (c) ผ่านกระบวนการพาสซีเวชันในขั้นตอนแรกที่กำลังขยาย 2000 เท่า และ (d) ผ่านกระบวนการพาสซีเวชันในขั้นตอนที่สองกำลังขยาย 2000 เท่า [8]



รูปที่ 2.8 ภาพสัณของโลหะที่ผ่านกระบวนการพาสสิเวชันแสดงให้เห็นชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น [8]

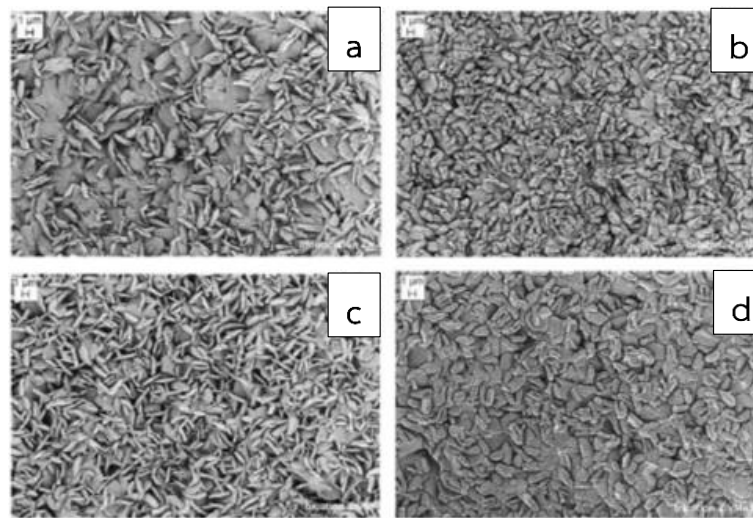
เมื่อนำแผ่นโลหะที่ผ่านการพาสสิเวชันแบบ 2 ขั้นตอนมาทดสอบเปรียบเทียบกับ การพาสสิเวชัน 1 ขั้นตอน และการไม่พาสสิเวชัน โดยการสเปรย์ด้วยน้ำเกลือ พบว่า การพาสสิเวชันแบบ 2 ขั้นตอนสามารถป้องกันการผุกร่อนได้ดีที่สุด ดังแสดงในรูปด้านล่าง



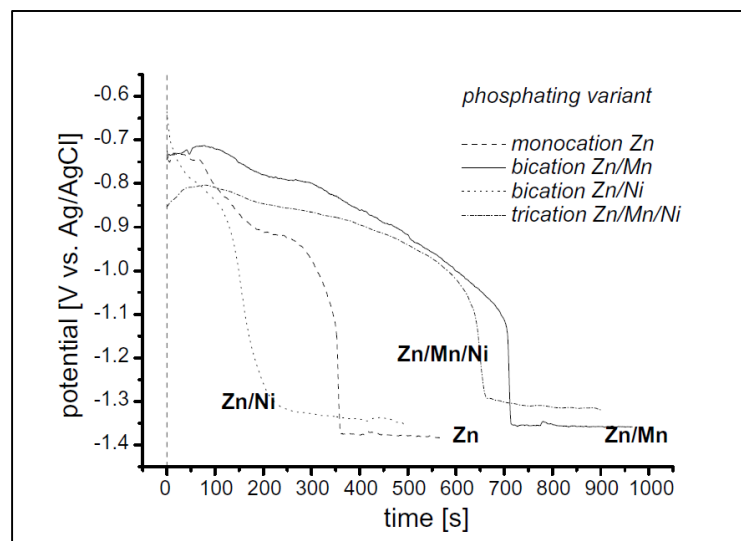
รูปที่ 2.9 ภาพการผุกร่อนบนผิวโลหะในสถานะต่างๆ เมื่อ (a) ไม่ผ่านการพาสสิเวชัน, (b) ผ่านการพาสสิเวชันเพียง 1 ขั้นตอน และ (c) ผ่านการพาสสิเวชัน 2 ขั้นตอน [8]

### 2.3 The alkaline stability of phosphate coatings [9]

งานวิจัยที่จัดทำขึ้นโดย A. Tomandl, M. Wolpers, K. Ogle (2004) เป็นการศึกษาความเสถียรของฟิล์มป้องกันสนิมของสารประกอบฟอสเฟต 4 กลุ่มคือ 1. โมโนเคชั่นซิงค์ฟอสเฟต 2. ไบเคชั่นซิงค์แมงกานีสฟอสเฟต 3. ไบเคชั่นซิงค์นิกเกิลฟอสเฟต 4. ไตรเคชั่นซิงค์แมงกานีสนิกเกิลฟอสเฟต



รูปที่ 2.10 ภาพชั้นฟิล์มบนผิวโลหะที่ผ่านกระบวนการพาสซีเวชันอย่างสมบูรณ์ด้วยสารเคมี เมื่อ (a) โมโนเคชั่นซิงค์ฟอสเฟต, (b) ไบเคชั่นซิงค์แมงกานีสฟอสเฟต, (c) ไบเคชั่นซิงค์นิกเกิลฟอสเฟต และ (d) ไตรเคชั่นซิงค์แมงกานีสนิกเกิลฟอสเฟต [9]



รูปที่ 2.11 การแสดงการวัดผลความต่างศักย์ไฟฟ้าของโลหะที่ผ่านการพาสซีเวชันทั้ง 4 วิธี [9]

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อนำฟิล์มที่ผ่านการพาสซีเวชันที่สมบูรณ์แล้วมาทดสอบการผุกร่อนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์วัดผลความต่างศักย์ทางไฟฟ้าและส่องด้วยกล้องสเปกโตรสโคปี สามารถสรุปไปในทางเดียวกันได้ว่า ฟิล์มป้องกันสนิมที่มีองค์ประกอบแมงกานีส อยู่ในผลึกฟอสเฟตจะทำให้ฟิล์มที่ได้มีความเสถียรและมีความต้านทานการผุกร่อนได้ดีที่สุด เนื่องจากการลดลงของความต่างศักย์ที่ช้ากว่า และเมื่อนำแผ่นโลหะส่องด้วยกล้องสเปกโตรสโคปี แล้วพบว่ายังคงพบชั้นแมงกานีสออกไซด์หลงเหลืออยู่มากกว่า

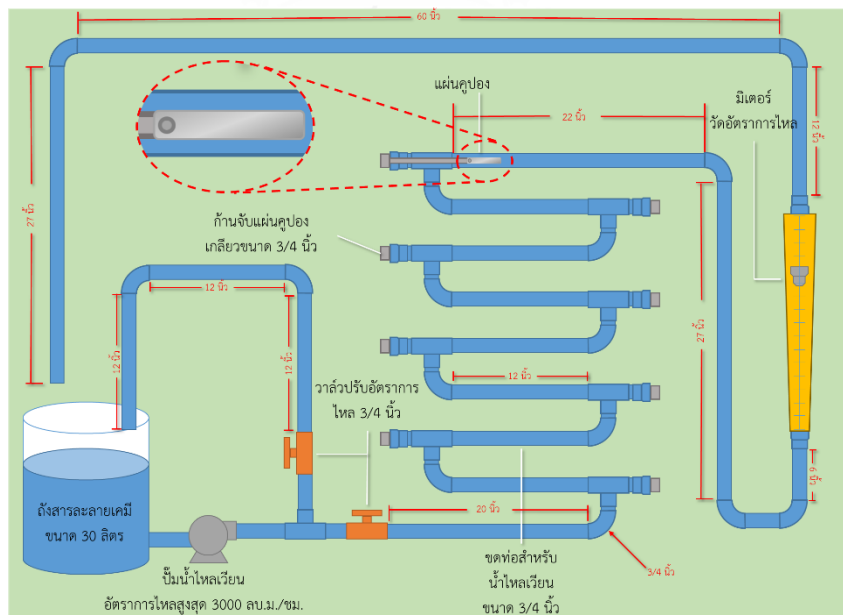


## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ปั๊มน้ำไหลเวียน
- 2) ถังสารละลายเคมี
- 3) อุปกรณ์สำหรับวัดอัตราการไหล
- 4) ชุดท่อสำหรับน้ำไหลเวียนที่มีช่องสำหรับติดตั้งแผ่นคูปอง 8 ช่อง
- 5) ก้านจับแผ่นคูปอง
- 6) แผ่นคูปองเหล็กกล้าคาร์บอนชนิด MS 1010
- 7) เขยือกดวงน้ำ ขนาด 5 ลิตร
- 8) กระบอกฉีดยา ขนาด 10 มิลลิลิตร
- 9) กระดาษทรายเบอร์ 600, 800, 1000 สำหรับขัดผิวคูปอง
- 10) เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง สำหรับชั่งน้ำหนักคูปอง
- 11) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน



รูปที่ 3.1 ภาพแสดงอุปกรณ์และการจัดเรียงของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2 การเตรียมสารเคมีและการพาสีเวชั่น

- 1) เติมน้ำปริมาณ 20 ลิตร ลงในถัง สำหรับใช้ในการเจือจางสารเคมี
- 2) เติมสารเคมี A ที่มีส่วนประกอบของโมลิบเดทปริมาณ 3.64 มิลลิลิตร ลงในถัง เพื่อให้ได้ความเข้มข้นสุดท้ายที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรของโมลิบเดท และใช้ไม้กวนสารเคมีให้เข้ากัน
- 3) ตรวจสอบความเข้มข้นของสารเคมีให้แน่ใจว่าตรงตามความเข้มข้นที่ต้องการหรือไม่ หากความเข้มข้นไม่ได้ตามค่าที่กำหนด ให้คำนวณการเติมน้ำหรือสารเคมีเพิ่ม โดยกำหนดความคลาดเคลื่อนไว้ที่ต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์
- 4) เปิดปั้มน้ำเพื่อให้เกิดการไหลเวียน ปรับอัตราการไหลให้อยู่ที่ประมาณ 1026 ลิตร/ชั่วโมง เพื่อให้ได้ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านท่อ 3/4 นิ้ว ที่ 1 เมตร/วินาที โดยการปรับวาล์วบริเวณออกจากปั้ม
- 5) เริ่มกระบวนการพาสีเวชั่นด้วยการติดตั้งแผ่นคูปองเข้าเป็นชุด ชุดละ 2 แผ่น (แผ่นที่ 1 สำหรับการวัดผลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แผ่นที่ 2 สำหรับทดสอบความต้านทานการผุกร่อน) เข้ากับขดท่อ จากนั้นเปิดสวิตช์ปั้มให้น้ำไหลผ่านแผ่นคูปอง การติดตั้งแผ่นคูปองจะติดตั้งตามระยะเวลาที่กำหนดในตารางด้านล่างเพื่อให้ได้เวลาในการทำพาสีเวชั่นที่แตกต่างกัน คือ 96, 48, 24 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ

**หมายเหตุ :** การติดตั้งแผ่นคูปองนั้นจะต้องติดตั้งให้แผ่นคูปองตั้งฉากกับพื้นเพื่อให้การเกิดความหนาของฟิล์มที่เท่ากันทั้งแผ่น

**ตารางที่ 3.1** ขั้นตอนการติดตั้งแผ่นคูปองสำหรับการพาสีเวชั่นเพื่อให้ได้เวลาตามที่ต้องการ

เวลา	ขั้นตอนการดำเนินการ
0 ชั่วโมง	ติดตั้งแผ่นคูปอง สองแผ่นแรก
48 ชั่วโมง	ติดตั้งแผ่นคูปอง คู่ที่ 2
72 ชั่วโมง	ติดตั้งแผ่นคูปอง คู่ที่ 3
84 ชั่วโมง	ติดตั้งแผ่นคูปอง คู่ที่ 4
96 ชั่วโมง	ถอดแผ่นคูปองทั้งหมดพร้อมกัน

- 6) ตรวจสอบความเข้มข้นของสารเคมีทุกๆ 24 ชั่วโมง และคำนวณปริมาณเคมีที่ต้องเติมเพิ่มเพื่อชดเชยกับสารเคมีสูญเสียไปกับการสร้างฟิล์ม



- 7) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 1 ถึง 6 แต่เปลี่ยนชนิดของสารเคมีเป็นสารเคมี B ที่มี ส่วนประกอบฟอสเฟต ที่ความเข้มข้น 235, 470 และ 940 มิลลิกรัมต่อลิตรของ ด้วยการเติม สารเคมี B ปริมาณ 27, 54 และ 108 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในน้ำ 20 ลิตร ตามลำดับ เมื่อทำ การทดลองครบทุกสภาวะควบคุม จะทำให้ได้ตัวอย่างการทดลองที่แตกต่างกันทั้งหมด 24 สภาวะดังตารางด้านล่าง

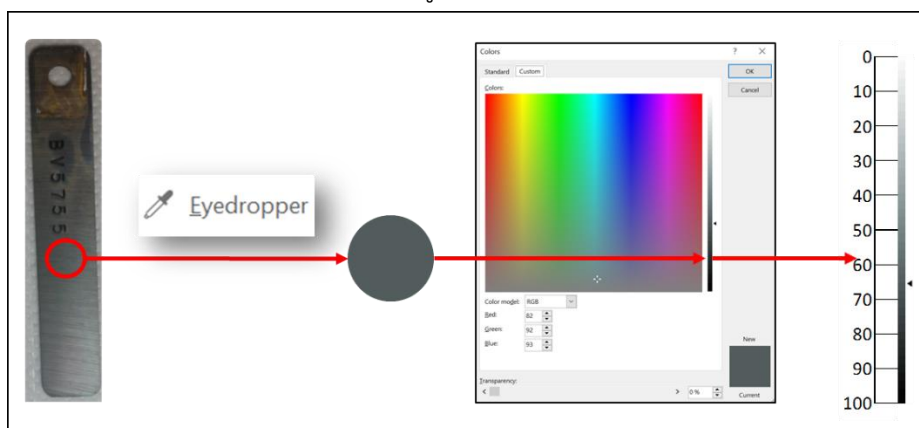
ตารางที่ 3.2 สภาวะต่างๆที่ทำการทดลองทั้งหมด 24 สภาวะ

สารประกอบ	เวลาในการพาสติเวชั่น	0.5 วัน	1 วัน	2 วัน	4 วัน
	ความเข้มข้นของเคมี				
โมลิบเดท (สารเคมี A)	50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ต.ย.ที่ 1	ต.ย.ที่ 2	ต.ย.ที่ 3	ต.ย.ที่ 4
	100 มิลลิกรัมต่อลิตร	ต.ย.ที่ 5	ต.ย.ที่ 6	ต.ย.ที่ 7	ต.ย.ที่ 8
	200 มิลลิกรัมต่อลิตร	ต.ย.ที่ 9	ต.ย.ที่ 10	ต.ย.ที่ 11	ต.ย.ที่ 12
ฟอสเฟต (สารเคมี B)	235 มิลลิกรัมต่อลิตร	ต.ย.ที่ 13	ต.ย.ที่ 14	ต.ย.ที่ 15	ต.ย.ที่ 16
	470 มิลลิกรัมต่อลิตร	ต.ย.ที่ 17	ต.ย.ที่ 18	ต.ย.ที่ 19	ต.ย.ที่ 20
	940 มิลลิกรัมต่อลิตร	ต.ย.ที่ 21	ต.ย.ที่ 22	ต.ย.ที่ 23	ต.ย.ที่ 24

### 3.3 การวัดผลการทดลอง

#### 3.3.1 การวัดผลจากการเปรียบเทียบลักษณะของสีฟิล์ม

- นำคูปองที่ผ่านการพาสติเวชั่นแล้วมาซบให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู
- นำแผ่นคูปองที่แห้งแล้วมาถ่ายรูปด้วยกล้องดิจิทัล โดยที่การถ่ายทุกครั้งแสงและมุมกล้องที่ ถ่ายภาพจะต้องเท่ากันเสมอ
- ใช้โปรแกรม power point ในการเก็บตัวอย่างสีเพื่อใช้เปรียบเทียบความคล้ำของแผ่นคูปอง โดยเก็บตัวอย่างจากตำแหน่งของแผ่นคูปองที่บริเวณใกล้เคียงกัน

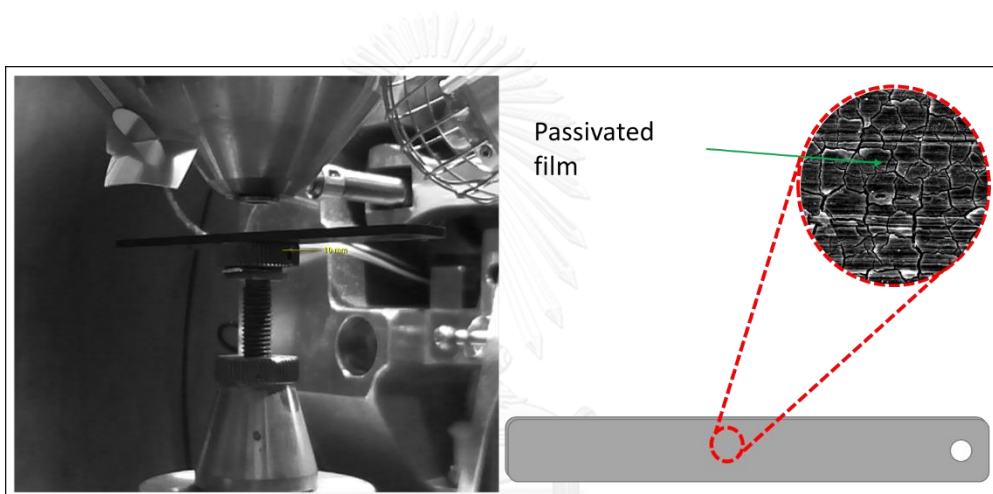


รูปที่ 3.2 แสดงวิธีการเทียบความคล้ำสีของแผ่นคูปองโดยใช้โปรแกรม power point

- 4) นำค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นที่ได้จากคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันที่สภาวะควบคุมต่างๆ มาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นกับเวลาที่ใช้ในการพาสติเวชันและความเข้มข้นของสารเคมี

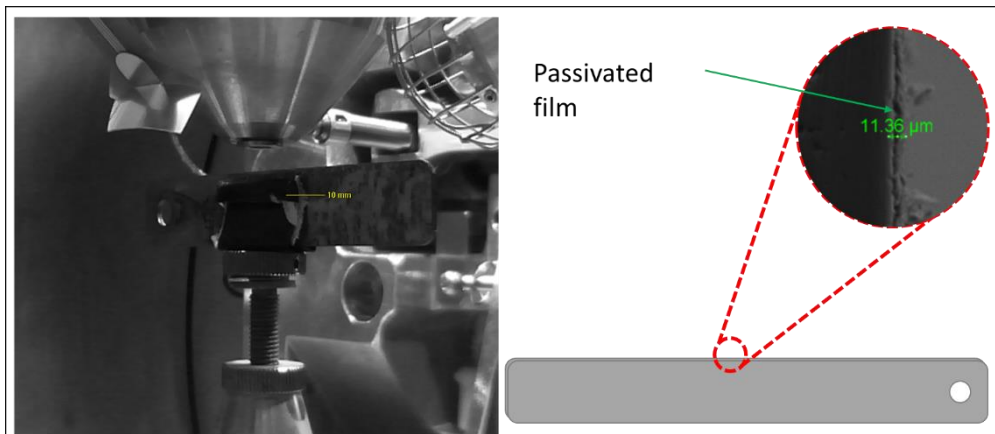
### 3.3.2 การวัดผลจากการเปรียบเทียบลักษณะของชั้นฟิล์มเพื่อพิจารณาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

- 1) นำคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันแล้วมาซับให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู
- 2) นำแผ่นคูปองที่แห้งแล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนบริเวณพื้นผิว เพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของชั้นฟิล์มที่ปกคลุมบนผิวโลหะ



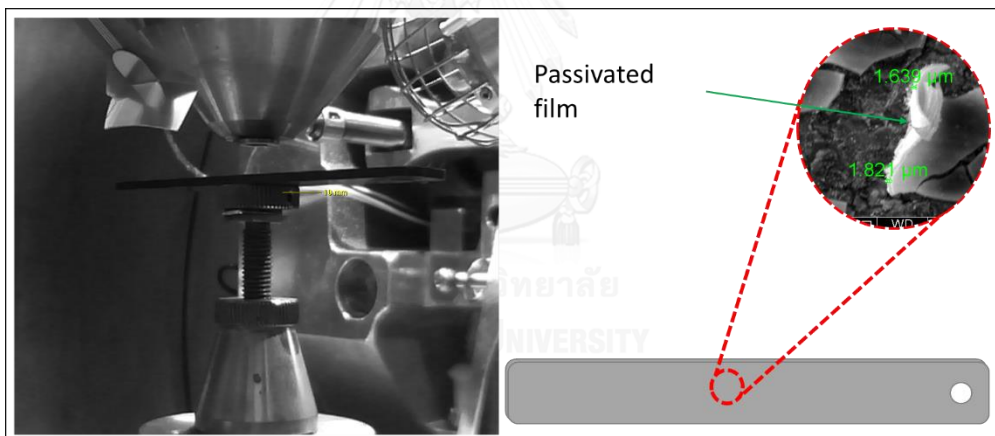
รูปที่ 3.3: แสดงบริเวณพื้นผิวของแผ่นคูปองที่ต้องการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

- 3) จากนั้นนำแผ่นคูปองที่ได้ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนบริเวณพื้นสันของแผ่นคูปอง โดยใช้กระดาษทรายขัดผิวด้านข้างของแผ่นคูปองจากความละเอียดต่ำไปสูง (No.600, No.800 และ No.1000 ตามลำดับ) เพื่อให้ผิวโลหะด้านข้างที่เกิดฟิล์มแล้วถูกเปิดออกแบบราบเรียบ จากนั้นนำแผ่นคูปองไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อเปรียบเทียบหน้าของชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นบนผิวโลหะ



รูปที่ 3.4 แสดงบริเวณสันของแผ่นคูปองที่ต้องการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

- 4) สำหรับคูปองที่มีฟิล์มบางมากการส่องหาความหนาของฟิล์มจากด้านสันนั้นทำได้ยาก จึงจำเป็นต้อง วัดความหนาโดยอาศัยการม้วนของแผ่นฟิล์มที่มีสันของฟิล์มตั้งฉากกับกล้อง



รูปที่ 3.5 แสดงบริเวณสันของฟิล์มที่ต้องการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

- 5) นำค่าความหนาของฟิล์มที่ได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน มาพหุคูณกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับเวลาที่ใช้ในการพาสซีเวชัน และความเข้มข้นของสารเคมี

### 3.3.3 การวัดผลจากการเปรียบเทียบความต้านทานต่อการผุกร่อน

- 1) นำแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันแล้วแช่ในน้ำที่ผ่านการกำจัดแร่ธาตุ (ไม่จำเป็นต้องทำให้แผ่นคูปองแห้ง) เป็นเวลา 7 วัน
- 2) นำแผ่นคูปองที่เกิดการผุกร่อน ทำความสะอาด อบให้แห้ง และชั่งน้ำหนักที่หายไปเพื่อคำนวณ อัตราการผุกร่อน
- 3) นำค่าอัตราการผุกร่อนของแผ่นคูปองที่ มาสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผุกร่อนกับเวลาที่ใช้ในการพาสติเวชัน และความเข้มข้น ของสารเคมี



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองพาสีเวชั่นที่สภาวะควบคุมต่างๆ 24 สภาวะ ที่ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารเคมี เวลาที่ใช้ในการพาสีเวชั่น และชนิดของสารเคมี ได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันทั้งในลักษณะของสีฟิล์ม ความหนาและการกระจายตัวของชั้นฟิล์ม และความต้านทานต่อการฟุกร่อน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งการพิจารณาผลการทดลองออกเป็น 3 หัวข้อดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการเปรียบเทียบลักษณะของสีฟิล์ม

การพิจารณาลักษณะของสีฟิล์มที่เกาะบนแผ่นคูปองด้วยภาพถ่ายนั้นเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและรวดเร็วแต่จำเป็นต้องถ่ายแผ่นคูปองที่แห้งแล้วในสภาวะที่มีสภาพแสงและมุมกล้องเดียวกัน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของสีแผ่นคูปอง ซึ่งการวัดผลวิธีนี้สามารถทำให้เห็นถึงความแตกต่างที่เกิดขึ้นของสีชั้นฟิล์มบนแผ่นคูปองที่ผ่านกระบวนการพาสีเวชั่นได้อย่างชัดเจน แผ่นคูปองที่ได้รับการพาสีเวชั่นที่ดีนั้นจะต้องไม่เกิดการฟุกร่อนจนกระทั่งเกิดเป็นสนิมเหล็ก และสีของแผ่นคูปองจะต้องเปลี่ยนจากเงาสะท้อนแสงเป็นด้านคล้ำและเข้มไม่สะท้อนแสง ซึ่งระดับความเข้มของสีที่เกิดขึ้นนั้นเป็นจุดบ่งชี้ถึงความหนาของชั้นฟิล์มที่เกาะบนผิวคูปอง [10] การทดลองนี้ใช้กล้องดิจิทัลถ่ายภาพแผ่นคูปองพาสีเวชั่น โดยผลการเปรียบเทียบลักษณะของฟิล์มแสดงดังรูปที่ 14

จากภาพถ่ายแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสีเวชั่นทั้ง 24 สภาวะสามารถใช้เทคนิคการเทียบเคียงแถบสีเป็นเปอร์เซ็นต์ความคล้ำของสีแผ่นคูปอง เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบลักษณะสีของชั้นฟิล์มโดยได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชั่นที่สภาวะควบคุมต่างๆประกอบกับการเทียบเปอร์เซ็นต์ความคล้ำของสี

กลุ่มสารเคมี	โมลิบดีต (สารเคมี A)			ฟอสเฟต (สารเคมี B)		
ความเข้มข้น เวลาใน การพาสติเวชั่น	50 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	200 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	235 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	470 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	940 มิลลิกรัมต่อ ลิตร
คูปองที่ไม่การ พาสติเวชั่น						
0.5 วัน						
1 วัน						
2 วัน						
4 วัน						

#### 4.1.1 การเปรียบเทียบเวลาในการพาสติเวชั่น

เมื่อพิจารณาจากคูปองที่ความเข้มข้นของสารเคมีที่เท่ากันและชนิดของสารเคมีเดียวกัน พบว่า เวลาที่ใช้ในการพาสติเวชั่นที่นานขึ้น ส่งผลให้คูปองมีสีด้านและคล้ำมากขึ้น ส่งผลให้มีความเงาและสะท้อนแสงลดลง ซึ่งเรียงจากสีอ่อนไปเข้มตามเวลาในการพาสติเวชั่นได้เป็น 0.5, 1, 2 และ 4 วัน ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้ที่ความสอดคล้องกับงานวิจัยอ้างอิง [1] เช่นกัน และเมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์ความคล้ำของสีคูปองมาพล็อตกราฟเทียบกับเวลาแล้ว สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความคล้ำที่แปรผันกับเวลาเป็นสมการลอการิทึมได้ดังนี้

4.1.1.1 การพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบโมลิบดีนัม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\%DN = 9.9546\ln(t)+65.3 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.957$$

4.1.1.2 การพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบโมลิบดีนัม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\%DN = 8.367\ln(t)+71.1 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9894$$

4.1.1.3 การพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบโมลิบดีนัม 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\%DN = 10.676\ln(t)+74.3 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9709$$

4.1.1.4 การพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบฟอสเฟต 235 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\%DN = 11.686\ln(t)+59.2 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9918$$

4.1.1.5 การพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบฟอสเฟต 470 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\%DN = 9.9546\ln(t)+65.8 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9418$$

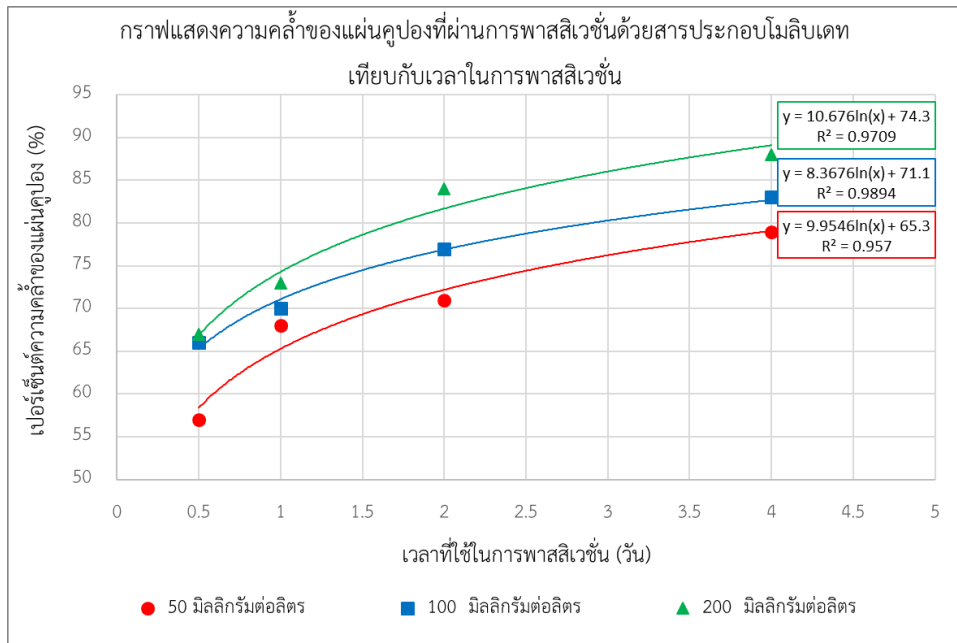
4.1.1.6 การพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบฟอสเฟต 940 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\%DN = 9.5218\ln(t)+72.2 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9268$$

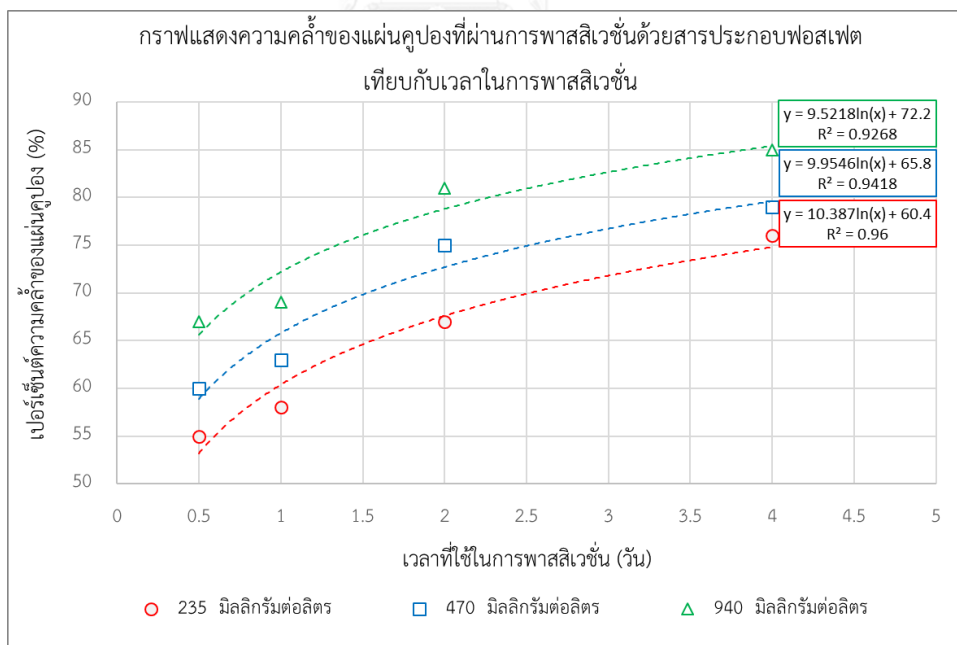
เมื่อ

$\%DN$  = ค่าเปอร์เซ็นต์ความคล้ำของแผ่นคูปองเมื่อเทียบกับแอมสียมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

$t$  = เวลาในที่ใช้ในการพาสติเวชั่นมีหน่วยเป็นวัน



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความคล้าของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบเดท  
เปรียบเทียบกับเวลาในการพาสติเวชัน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความคล้าของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต  
เปรียบเทียบกับเวลาในการพาสติเวชัน



#### 4.1.2 การเปรียบเทียบความเข้มข้นสารเคมีที่ใช้ในการพาสติเวชั่น

เมื่อพิจารณาจากคูปองที่ใช้เวลาในการพาสติเวชั่นที่เท่ากันและชนิดของสารเคมีเดียวกันพบว่า ความเข้มข้นของสารเคมี ที่ใช้ในการพาสติเวชั่นที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สีของแผ่นคูปองมีลักษณะด้านคล้ำขึ้น และมีความเงาสะท้อนแสงลดลง โดยเมื่อพิจารณาสารประกอบโมลิบเดท จะเรียงลำดับความคล้ำของฟิล์มน้อยไปหามากจากความเข้มข้นสารเคมีที่ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสารประกอบฟอสเฟต จะเรียงลำดับความคล้ำของฟิล์มน้อยไปหามากจากความเข้มข้นสารเคมีที่ 235, 470 และ 980 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และเมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์ความคล้ำของสีคูปองมาพล็อตกราฟเทียบกับความเข้มข้นของสารเคมีแล้วสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความคล้ำที่แปรผันกับความเข้มข้นของสารเคมีเป็นสมการถ้อยการที่มิได้ดังนี้

##### 4.1.2.1 การพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบโมลิบเดทเป็นเวลาครึ่งวัน

$$\%DN = 7.2135\ln(Cmo)+30.114 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.8242$$

##### 4.1.2.2 การพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบโมลิบเดทเป็นเวลา 1 วัน

$$\%DN = 3.6067\ln(Cmo)+53.724 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9868$$

##### 4.1.2.3 การพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบโมลิบเดทเป็นเวลา 2 วัน

$$\%DN = 9.3775\ln(Cmo)+34.148 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.998$$

##### 4.1.2.4 การพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบโมลิบเดทเป็นเวลา 4 วัน

$$\%DN = 6.4921\ln(Cmo)+53.436 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9959$$

##### 4.1.2.5 การพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบฟอสเฟตเป็นเวลาครึ่งวัน

$$\%DN = 8.6562\ln(Cpo)+7.4076 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9908$$

##### 4.1.2.6 การพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบฟอสเฟตเป็นเวลา 1 วัน

$$\%DN = 7.9348\ln(Cpo)+14.512 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9973$$

##### 4.1.2.7 การพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบฟอสเฟตเป็นเวลา 2 วัน

$$\%DN = 10.099\ln(Cpo)+12.198 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9932$$

##### 4.1.2.8 การพาสติเวชั่นด้วยสารประกอบฟอสเฟตเป็นเวลา 4 วัน

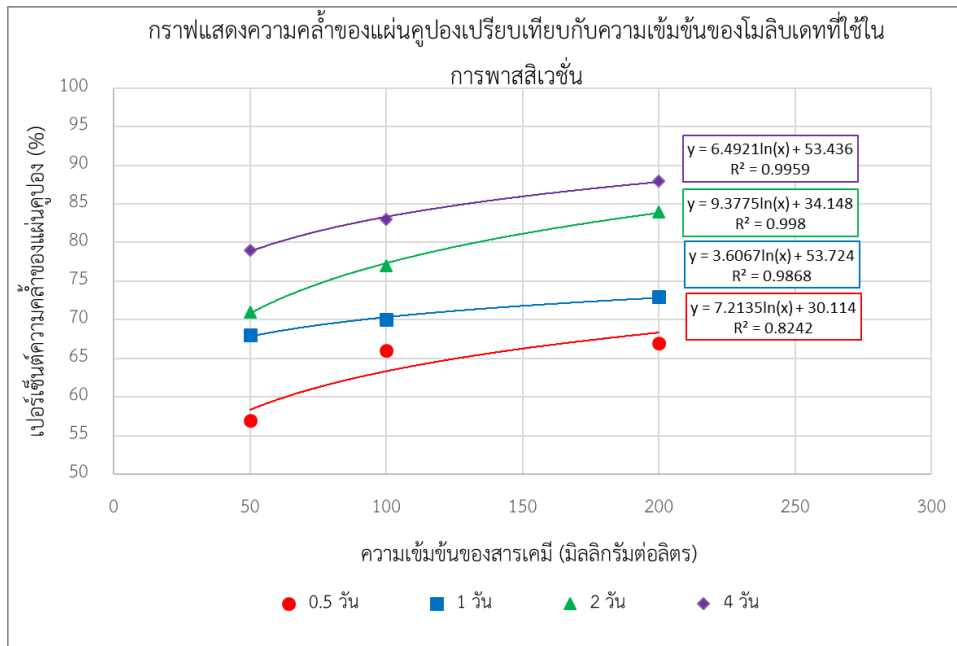
$$\%DN = 6.4921\ln(Cpo)+40.056 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9643$$

เมื่อ

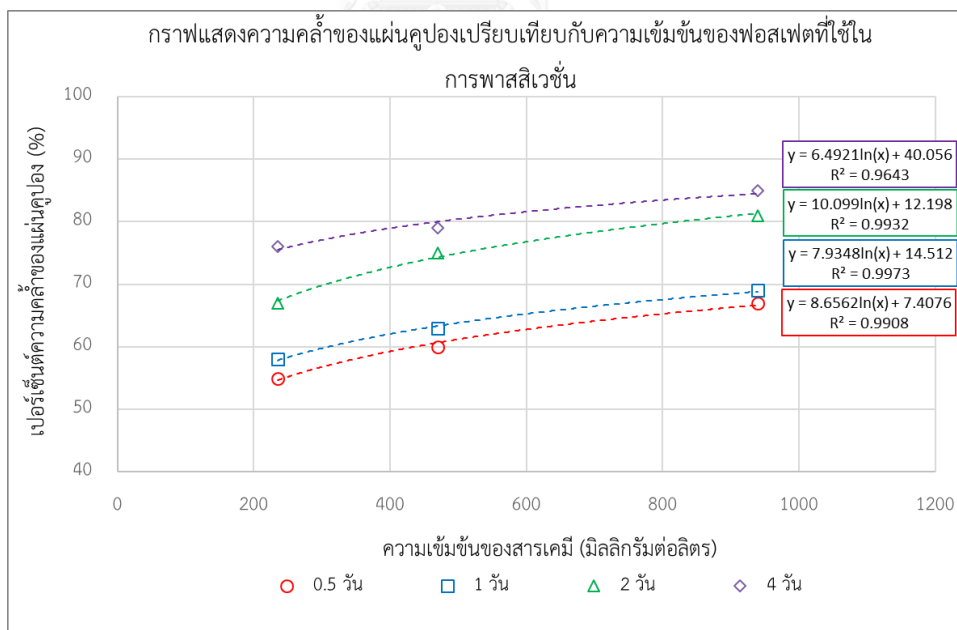
$$\%DN = \text{ค่าเปอร์เซ็นต์ความคล้ำของแผ่นคูปองเมื่อเทียบกับแถมสี}$$

Cmo = ความเข้มข้นของโมลิบเดทที่ใช้พาสติเวชั่นมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

Cpo = ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่ใช้พาสติเวชั่นมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความคล้าของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสสิเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัมเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของโมลิบดีนัม



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความคล้าของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสสิเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟตเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของฟอสเฟต

#### 4.1.3 การเปรียบเทียบชนิดของสารประกอบเคมีที่ใช้ในการพาสีเวชัน

เมื่อพิจารณาจากคูปองที่ใช้เวลาในการพาสีเวชันที่เท่ากันและความเข้มข้นของสารเคมีที่มีช่วงการใช้งานที่เทียบเคียงกันแล้วพบว่า สารประกอบโมลิบเดทให้สีของฟิล์มที่ดำคล้ำกว่า สารประกอบฟอสเฟต ตัวอย่างเช่นแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสีเวชันด้วยโมลิบเดทความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลา 2 วัน และแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสีเวชันด้วยฟอสเฟตความเข้มข้น 470 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลา 2 วัน อ่านค่าเปอร์เซ็นต์ความคล้ำของสีได้ 77 และ 75 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

#### 4.2 ผลการเปรียบเทียบลักษณะของชั้นฟิล์มเพื่อพิจารณาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นการกระจายตัวของชั้นฟิล์มบนแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสีเวชันที่สภาวะควบคุมต่างๆ

กลุ่มสารเคมี เวลาใน การพาสีเวชัน	ความเข้มข้น สารเคมี	โมลิบเดท (สารเคมี A)				ฟอสเฟต (สารเคมี B)	
		50 มิลลิกรัมต่อลิตร	100 มิลลิกรัมต่อลิตร	200 มิลลิกรัมต่อลิตร	235 มิลลิกรัมต่อลิตร	470 มิลลิกรัมต่อลิตร	940 มิลลิกรัมต่อลิตร
คูปองที่ไม่ผ่านการพาสีเวชัน							
0.5 วัน							
1 วัน							
2 วัน							
4 วัน							

ตารางที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นความหนาของชั้นฟิล์มบนแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันที่สภาวะควบคุมต่างๆ

กลุ่มสารเคมี ความเข้มข้น เวลาในการพาสติเวชัน	โมลิบดีต (สารเคมี A)				ฟอสเฟต (สารเคมี B)	
	50 มิลลิกรัมต่อลิตร	100 มิลลิกรัมต่อลิตร	200 มิลลิกรัมต่อลิตร	235 มิลลิกรัมต่อลิตร	470 มิลลิกรัมต่อลิตร	940 มิลลิกรัมต่อลิตร
0.5 วัน						
1 วัน						
2 วัน						
4 วัน						

จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นวิธีที่ ทำให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของชั้นฟิล์มเป็นอย่างดี [1] อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้งานเพื่อวัดความหนาของชั้นฟิล์มได้ [2] ภาพชั้นฟิล์มที่เห็นจากกล้องจากทุกๆสภาวะควบคุม โดยปกติแล้วฟิล์มที่ผ่านการพาสติเวชัน จะเกาะบนผิวคูปองแบบราบเรียบเป็นแผ่นเดียวกัน แต่จากภาพจะเห็นว่าชั้นฟิล์มเกิดเป็นรอยแยกแตกกระแหว่งออกจากกันซึ่งเกิดจากการหดตัวในขณะที่แผ่นคูปองถูกทำให้แห้ง [5] เพื่อส่องกล้อง และจากผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนปัจจัยควบคุมได้ดังนี้

#### 4.2.1 การเปรียบเทียบเวลาในการพาสติเวชัน

เมื่อพิจารณาสภาวะควบคุมการพาสติเวชันที่ความเข้มข้นของสารเคมีและชนิดของสารเคมีที่เท่ากันใดๆพบว่า เวลาที่ใช้ในการพาสติเวชันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชั้นฟิล์มหนาและแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนั้นสามารถเห็นได้ชัดเจนว่าเวลาในการพาสติเวชันที่น้อยกว่า 2 วัน ส่งผลให้คูปองมีลักษณะบางและหลุดร่อนได้ง่าย ส่วนลักษณะของชั้นฟิล์มที่ผ่านการพาสติเวชัน ตั้งแต่ 2 วันขึ้นไป ฟิล์มจะเกาะตัวกันแน่นไม่หลุดร่อน เมื่อสร้างกราฟระหว่างค่าความหนาของชั้นฟิล์มกับเวลาแล้วสามารถอธิบายความสัมพันธ์เป็นสมการลอการิทึมสำหรับการพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีต และได้

ความสัมพันธ์เป็นการแกสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลสำหรับการพาสซีเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต ดังนี้

4.2.1.1 การพาสซีเวชันด้วยสารประกอบโมลิบเดท 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$T = 3.4962\ln(t) + 2.194 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9557$$

4.2.1.2 การพาสซีเวชันด้วยสารประกอบโมลิบเดท 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$T = 3.8774\ln(t) + 4.0319 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9833$$

4.2.1.3 การพาสซีเวชันด้วยสารประกอบโมลิบเดท 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$T = 4.0882\ln(t) + 4.9045 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9601$$

4.2.1.4 การพาสซีเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต 235 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$T = 0.0713e^{0.7041t} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9363$$

4.2.1.5 การพาสซีเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต 470 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$T = 0.0844e^{0.7258t} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9462$$

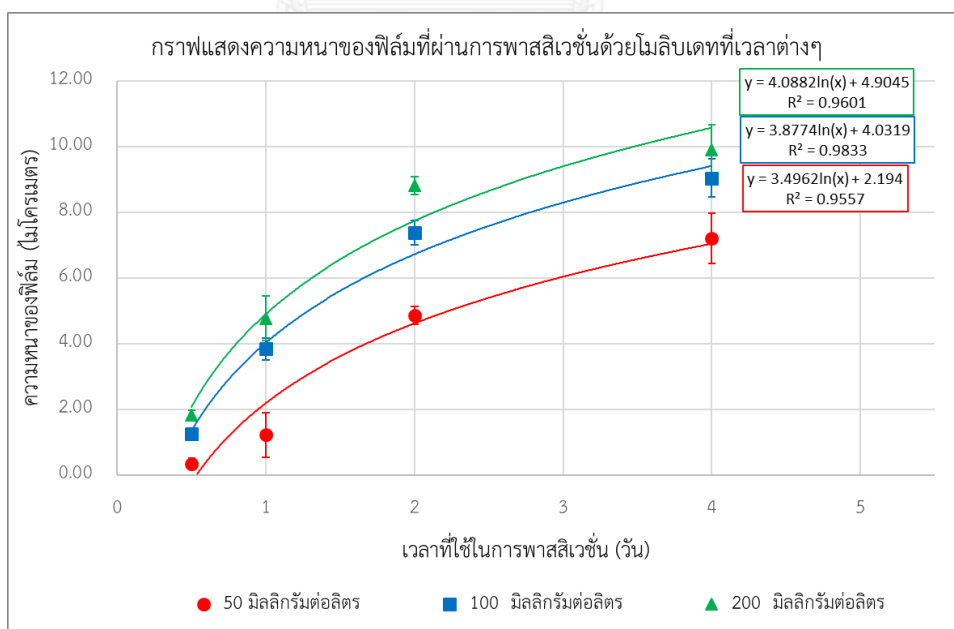
4.2.1.6 การพาสซีเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต 940 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$T = 0.2031e^{0.5168t} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9966$$

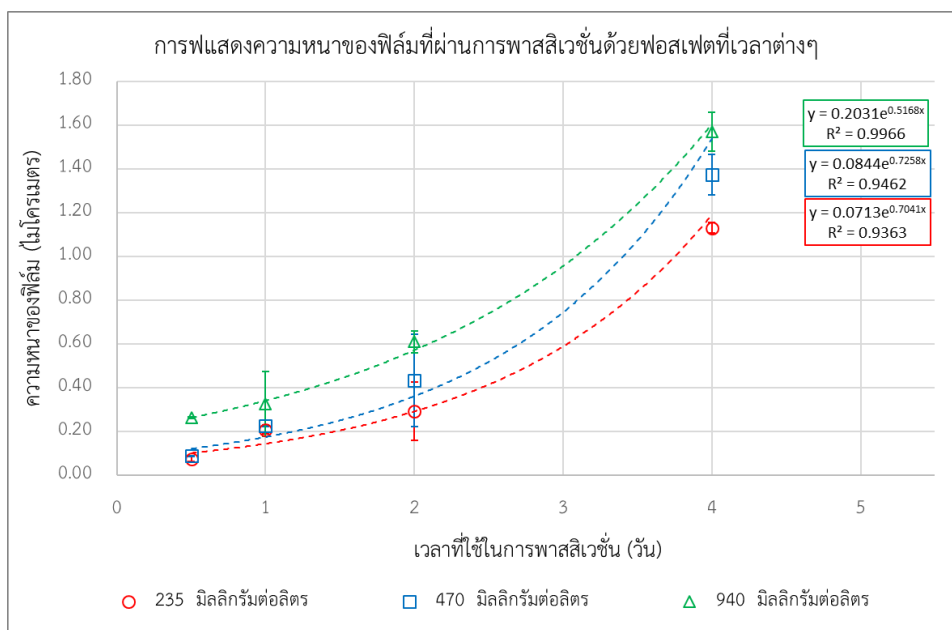
เมื่อ

T = ค่าความหนาของฟิล์มมีหน่วยเป็นไมโครเมตร

t = เวลาที่ใช้ในการพาสซีเวชันมีหน่วยเป็นวัน



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความหนาของฟิล์มที่ผ่านการพาสซีเวชันด้วยโมลิบเดทที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความหนาของฟิล์มที่ผ่านการพาสสิเวชันด้วยฟอสเฟตที่เวลาต่างๆ

เหตุผลที่การพาสสิเวชันด้วยสารประกอบโมลิบเดตได้ความสัมพันธ์ของความหนาชั้นฟิล์มกับเวลาในการพาสสิเวชันเป็นรูปแบบสมการลอการิทึมคืออัตราการความหนาของฟิล์มที่เกิดขึ้นเพราะการฟอร์มตัวของฟิล์มโมลิบเดตเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโมลิบเดตกับผิวเหล็กซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีในช่วงแรกเนื่องจากผิวเหล็กที่เปรียบเสมือนสารตั้งต้นปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเคมีมาก แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปอัตราการความหนาของการสร้างฟิล์มจะลดลงเนื่องจากชั้นฟิล์มเริ่มเกิดการก่อตัวขึ้นทำให้เคมีแทรกตัวมาทำปฏิกิริยากับผิวเหล็กได้ยากขึ้น[4] ส่วนการพาสสิเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟตให้ผลลัพธ์ในทางกลับกันทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ของความหนาชั้นฟิล์มกับเวลาในการพาสสิเวชันเป็นรูปแบบสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล เนื่องจากการสร้างฟิล์มด้วยสารประกอบฟอสเฟต อาศัยการเกิดตะกอนของแคลเซียมฟอสเฟตในการสร้างฟิล์มเป็นหลัก การสร้างฟิล์มในช่วงแรกที่ผิวโลหะยังราบเรียบอยู่นั้นทำได้ยาก แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเกิดฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟิล์มเริ่มเกาะบนผิวคูปองทำให้ผิวคูปองมีความราบเรียบลดลงและตะกอนสามารถเกาะที่ผิวเป็นฟิล์มได้ง่ายขึ้น [3, 7-9]

#### 4.2.2 การเปรียบเทียบความเข้มข้นสารเคมีที่ใช้ในการพาสสิเวชัน

เมื่อพิจารณาภาวะควบคุมการพาสสิเวชันที่เวลาและชนิดของสารเคมีที่เท่ากันใดๆพบว่าความเข้มข้นของสารเคมีที่เพิ่มขึ้นนั้นมีผลต่อความหนาและการกระจายตัวที่ดีขึ้นของฟิล์มทั้งชนิดที่

พาสสิเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัมและสารประกอบฟอสเฟต ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้จากการสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นเทียบกับเวลาแล้วสามารถอธิบายเป็นสมการลอการิทึมได้ดังนี้

4.2.2.1 การพาสสิเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัมเป็นเวลาครึ่งวัน

$$T = 0.6201(C_{mo}) - 1.5175 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9722$$

4.2.2.2 การพาสสิเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัมเป็นเวลา 1 วัน

$$T = 1.365 \ln(C_{mo}) - 2.4628 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9998$$

4.2.2.3 การพาสสิเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัมเป็นเวลา 2 วัน

$$T = 1.93 \ln(C_{mo}) - 1.4509 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9984$$

4.2.2.4 การพาสสิเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัมเป็นเวลา 4 วัน

$$T = 1.0777 \ln(C_{mo}) + 4.1558 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9905$$

4.2.2.5 การพาสสิเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟตเป็นเวลาครึ่งวัน

$$T = 0.136 \ln(C_{po}) - 0.6957 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.8061$$

4.2.2.6 การพาสสิเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟตเป็นเวลา 1 วัน

$$T = 0.0849 \ln(C_{po}) - 0.2688 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.8502$$

4.2.2.7 การพาสสิเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟตเป็นเวลา 2 วัน

$$T = 0.2297 \ln(C_{po}) - 0.9686 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9959$$

4.2.2.8 การพาสสิเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟตเป็นเวลา 4 วัน

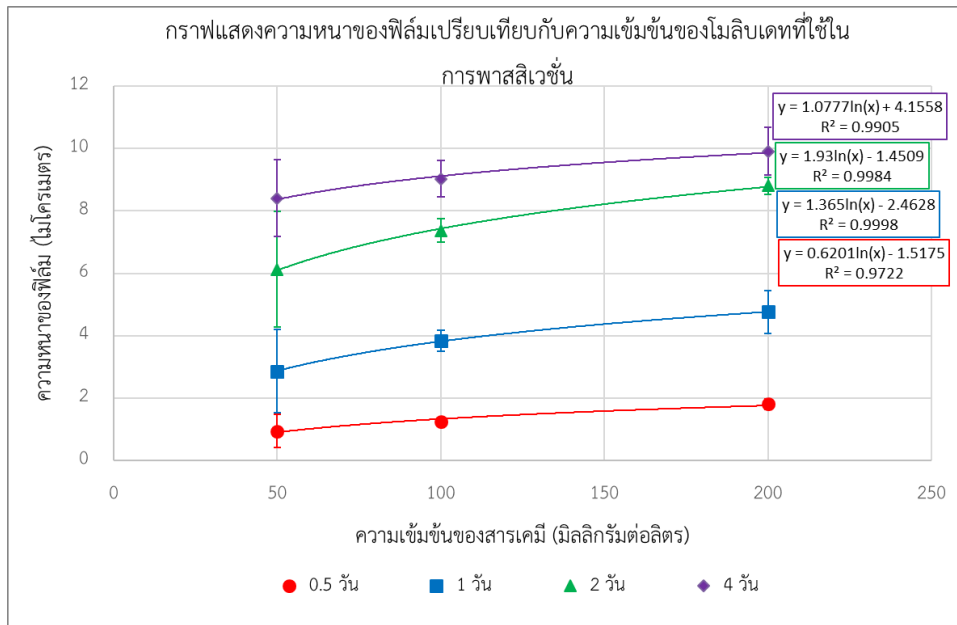
$$T = 0.3167 \ln(C_{po}) - 0.5911 \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9962$$

เมื่อ

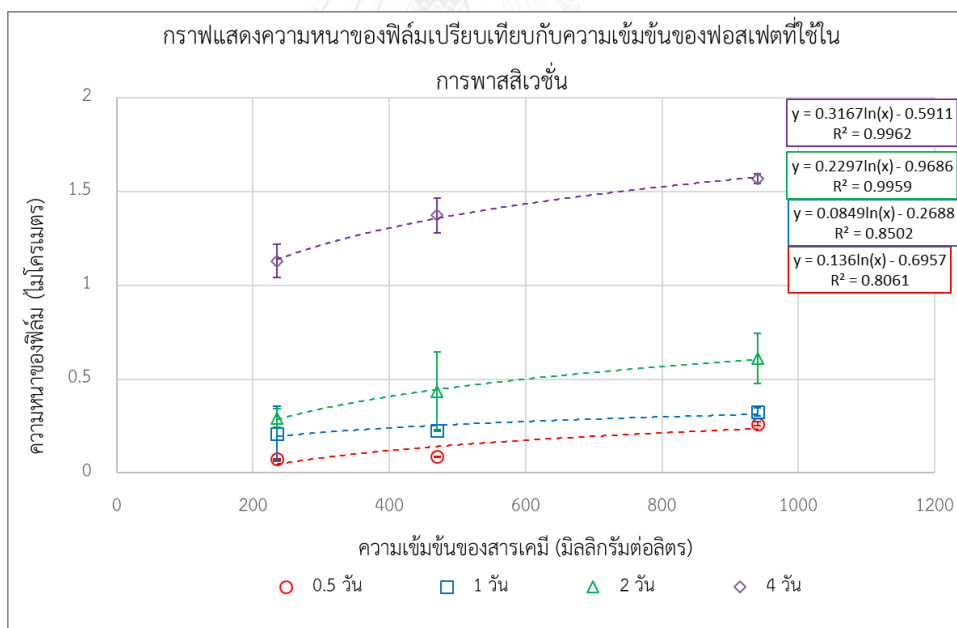
$T$  = ค่าความหนาของฟิล์มมีหน่วยเป็นไมโครเมตร

$C_{mo}$  = ความเข้มข้นของโมลิบดีนัมที่ใช้พาสสิเวชันมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

$C_{po}$  = ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่ใช้พาสสิเวชันมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความหนาของฟิล์มที่ผ่านการพาสลิเวชั่นด้วยโมลิบเดทที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความหนาของฟิล์มที่ผ่านการพาสลิเวชั่นด้วยฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ








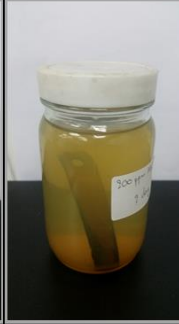






เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นเทียบกับความหนาแล้วพบว่า ค่าความหนาเป็นผลมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของเคมี ในช่วงแรก (ช่วง 50-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ของโมลิบเดท และช่วง 235-470 มิลลิกรัมต่อลิตรของฟอสเฟต) นั้นความหนาจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และมากกว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเคมีในช่วงท้าย (ช่วง 100-200 มิลลิกรัมต่อลิตรของโมลิบเดท และช่วง 470-940 มิลลิกรัมต่อลิตรของฟอสเฟต) ซึ่งทั้งนี้หากทำการทดลองที่เพิ่มความเข้มข้นไปเรื่อยๆ อาจพบจุดที่ความเข้มข้นของเคมี จะไม่มีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มอีกต่อไป ซึ่งอาจเปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นสองชนิด ที่มีการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นชนิดที่หนึ่งเพียงตัวเดียว จนถึงจุดที่สารตั้งต้นตัวที่หนึ่งมากเกินไป เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นจนกระทั่งสารตั้งต้นตัวที่สองไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา การเกิดปฏิกิริยาก็จะจบลง

#### 4.2.3 การเปรียบเทียบชนิดของสารประกอบเคมีที่ใช้ในการพาสติเวชัน

เมื่อพิจารณาจากคู่มือที่ใช้เวลาในการพาสติเวชันที่เท่ากันและความเข้มข้นของสารเคมีที่มีช่วงการใช้งานที่เทียบเคียงกันพบว่า สารประกอบโมลิบเดทให้ฟิล์มที่หนากว่าสารประกอบฟอสเฟต ตัวอย่างเช่นแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยโมลิบเดทความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลา 2 วัน และแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยฟอสเฟตความเข้มข้น 470 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 2 วัน อ่านค่าความหนาของแผ่นคูปองได้ 7.376 และ 0.492 ไมโครเมตร ตามลำดับ

### 4.3 ผลการเปรียบเทียบความต้านทานต่อการผุกร่อน

ตารางที่ 4.4 ภาพตัวอย่างการผุกร่อนของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบเดท ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 0.5, 1, 2 และ 4 วัน หลังจากนั้นนำมาแช่ในน้ำเป็น เวลา 1 สัปดาห์

เวลาในการจุ่มแผ่น คูปองในน้ำ เวลาใน การพาสติเวชัน	เวลาในการจุ่มแผ่น คูปองในน้ำ	หลังจากผ่านไป 3 วัน	หลังจากผ่านไป 1 สัปดาห์
0.5 วัน			
1 วัน			
2 วัน			
4 วัน			

จากการทดสอบความต้านทานการผุกร่อนโดยการนำแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันในสภาวะควบคุมต่างๆ จุ่มลงในน้ำเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ทำให้เห็นถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นคูปองที่แดงขึ้น ซึ่งเป็นสัญญาณบ่งบอกว่าชั้นฟิล์มเริ่มถูกทำลายทำให้น้ำสามารถซึมเข้าไปยังผิวเหล็กและเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมแดง และเมื่อนำแผ่นคูปองที่ผ่านการผุกร่อนมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาอัตราการผุกร่อนแล้ว สามารถวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบผลจากการปรับเปลี่ยนปัจจัยควบคุมได้ดังนี้

#### 4.3.1 การเปรียบเทียบเวลาในการพาสติเวชัน

เมื่อพิจารณาสภาวะควบคุมการพาสติเวชันที่ความเข้มข้นของสารเคมีและชนิดของสารเคมีที่เท่ากันใดๆ พบว่า เวลาที่ใช้ในการพาสติเวชันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการผุกร่อนลดลงหรือกล่าวได้ว่าแผ่นคูปองมีความต้านทานต่อการผุกร่อนที่ดีขึ้น [3, 7-9] โดยเฉพาะช่วง 2 วันแรกจะเห็นความแตกต่างของอัตราการผุกร่อนได้อย่างชัดเจน ซึ่งเมื่อนำค่าอัตราการผุกร่อนมาสร้างกราฟเทียบกับเวลาในการพาสติเวชันแล้วสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้เป็นสมการยกกำลังดังนี้

4.3.1.1 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$CR = 5.5759t^{-0.42} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9862$$

4.3.1.2 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$CR = 4.0574t^{-0.699} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9893$$

4.3.1.3 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัม 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$CR = 2.7866t^{-0.597} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9834$$

4.3.1.4 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต 235 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$CR = 9.4625t^{-0.435} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9607$$

4.3.1.5 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต 470 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$CR = 8.4186t^{-0.372} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9835$$

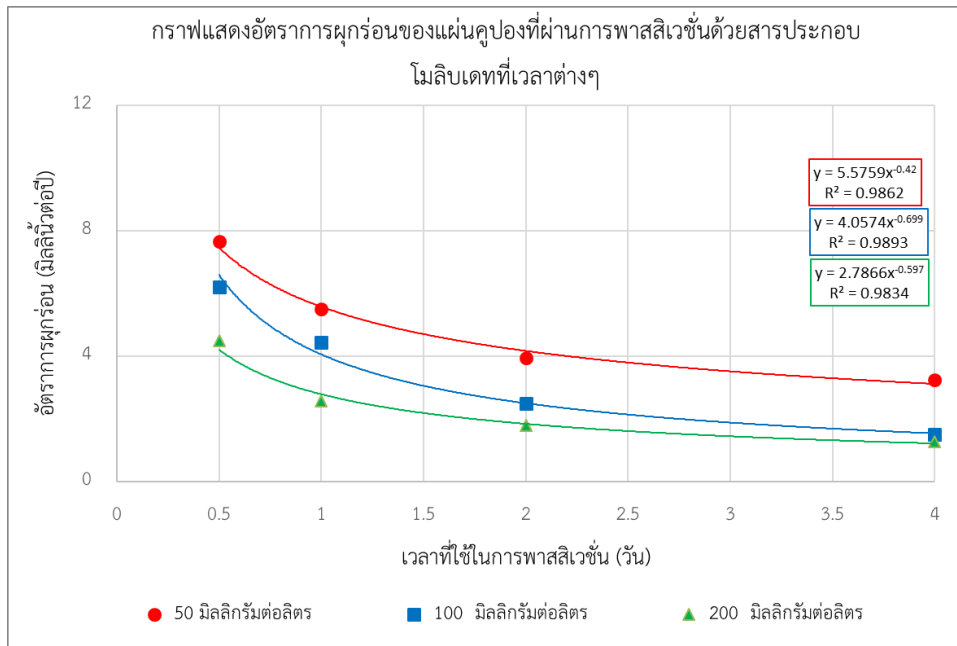
4.3.1.6 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต 940 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$CR = 7.1076t^{-0.315} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9567$$

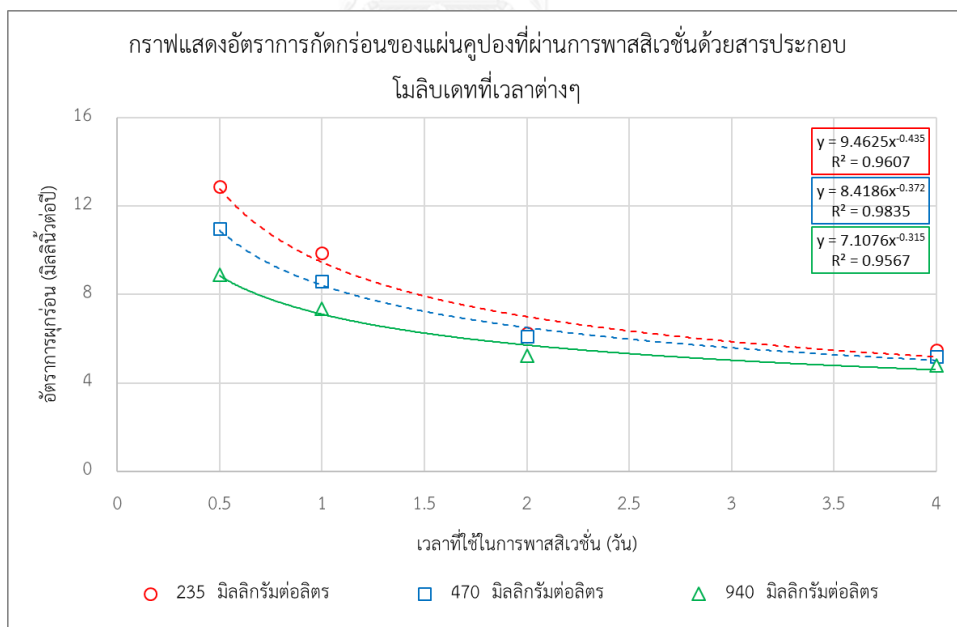
เมื่อ

CR = ค่าอัตราการผุกร่อนมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อปี

t = เวลาที่ใช้ในการพาสติเวชันมีหน่วยเป็นวัน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอัตราการฟุกร่อนของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสซิเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัมที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงอัตราการฟุกร่อนของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสซิเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟตที่เวลาต่างๆ

#### 4.3.2 พิจารณาเปรียบเทียบความเข้มข้นสารเคมีที่ใช้ในการพาสติเวชัน

เมื่อพิจารณาสถานะควบคุมการพาสติเวชันที่เท่ากันเวลาและชนิดของสารเคมีชนิดเดียวกัน ใดๆพบว่า ความเข้มข้นของสารเคมีที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลต่อความต้านทานการฟุกร่อนอย่างชัดเจน [8] โดยสามารถอธิบายเป็นสมการยกกำลัง ได้ดังนี้

##### 4.3.2.1 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัมครั้งวัน

$$CR = 35.183Cmo^{-0.385} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9858$$

##### 4.3.2.2 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัม 1 วัน

$$CR = 49.798Cmo^{-0.549} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9386$$

##### 4.3.2.3 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัม 2 วัน

$$CR = 36.289Cmo^{-0.573} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.991$$

##### 4.3.2.4 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบดีนัม 4 วัน

$$CR = 40.678Cmo^{-0.672} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.8734$$

##### 4.3.2.5 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟตครั้งวัน

$$CR = 55.877Cpo^{-0.267} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9945$$

##### 4.3.2.6 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต 1 วัน

$$CR = 32.079Cpo^{-0.215} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.999$$

##### 4.3.2.7 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต 2 วัน

$$CR = 12.789Cpo^{-0.127} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.8446$$

##### 4.3.2.8 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต 4 วัน

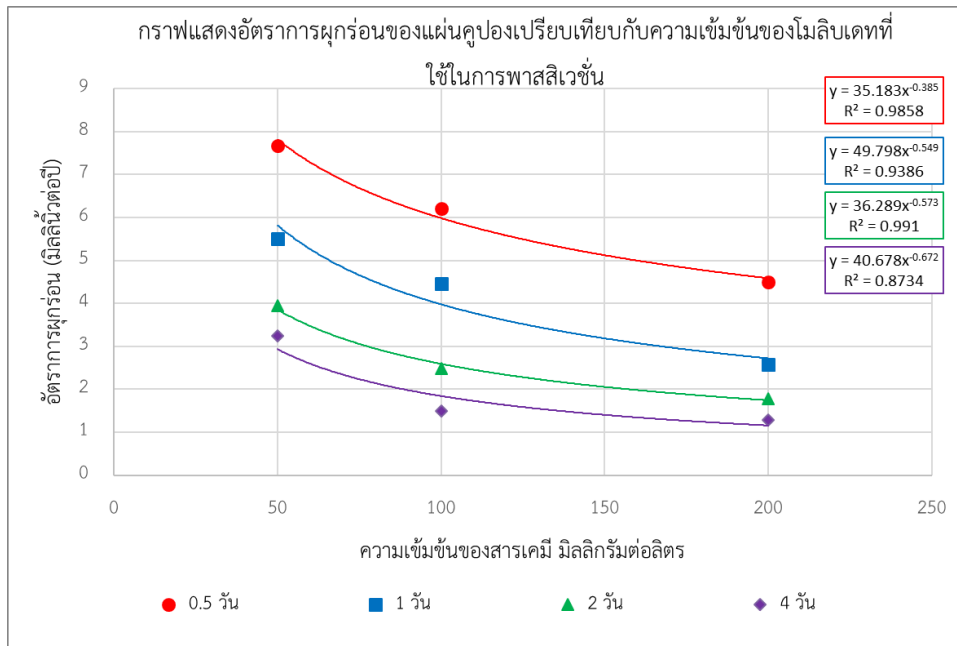
$$CR = 9.3588Cpo^{-0.097} \text{ โดยมีค่า } R^2 = 0.9912$$

เมื่อ

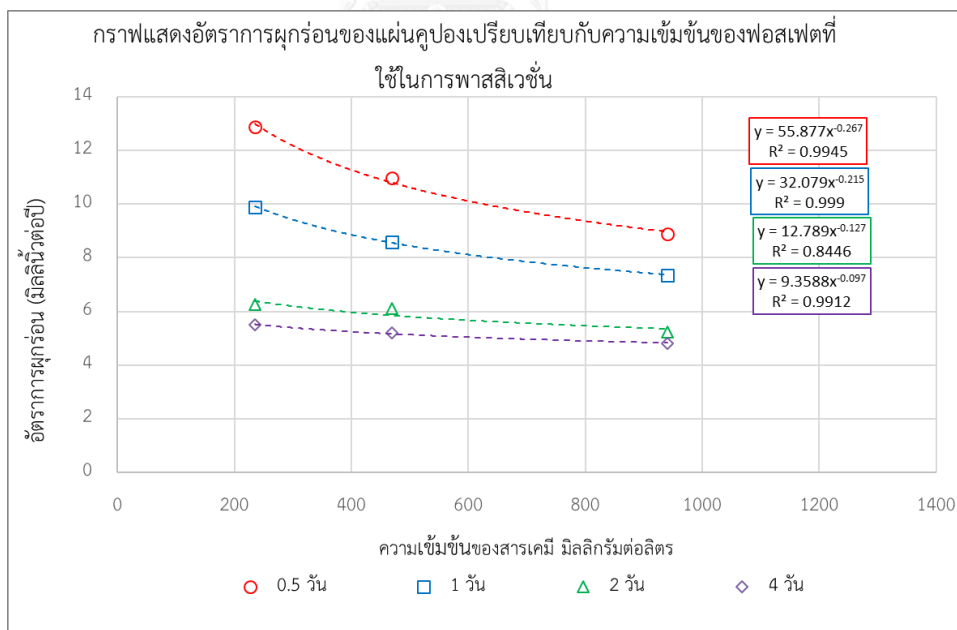
CR = ค่าอัตราการฟุกร่อนมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อปี

Cmo = ความเข้มข้นของโมลิบดีนัมที่ใช้พาสติเวชันมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

Cpo = ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่ใช้พาสติเวชันมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงอัตราการสุกก่อนของแผ่นคูปองเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของโมลิบดีตัมที่ใช้ในการพาสติเวชัน



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงอัตราการสุกก่อนของแผ่นคูปองเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของฟอสเฟตที่ใช้ในการพาสติเวชัน

#### 4.3.3 การเปรียบเทียบชนิดของสารประกอบเคมีที่ใช้ในการพาสติเวชัน

เมื่อพิจารณาจากคูปองที่ใช้เวลาในการพาสติเวชันที่เท่ากันและความเข้มข้นของสารเคมีที่มีช่วงการใช้งานที่เทียบเคียงกัน พบว่าสารประกอบฟอสเฟตสามารถสร้างฟิล์มป้องกันสนิมที่ทนต่อการผุกร่อนได้ดีกว่าฟิล์มที่สร้างจากสารประกอบฟอสเฟต ตัวอย่างเช่นแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยโมลิบเดทความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลา 2 วัน และแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสติเวชันด้วยฟอสเฟตความเข้มข้น 470 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 2 วัน วัดอัตราการผุกร่อนของแผ่นคูปองได้ 2.48 และ 6.11 มิลลิเมตรต่อปี



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองทั้ง 3 แบบ สามารถสรุปได้ว่า เวลาและความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการพาสติเวชันที่เพิ่มขึ้น ทำให้ชั้นฟิล์มสีที่เคล้าขึ้น มีความหนาที่เพิ่มขึ้น และส่งผลให้ทนต่อการถูร่อนได้ดีขึ้น [3, 7-9] ในขณะที่เวลาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จในการพาสติเวชันมากกว่าความเข้มข้นของสารเคมี เนื่องจากฟิล์มที่ผ่านการพาสติเวชันที่น้อยกว่า 2 วัน จะไม่แข็งแรงและหลุดร่อนได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับคำแนะนำในการใช้สารเคมีของงานวิจัย [2] ที่ได้แนะนำว่าเวลาในการพาสติเวชันจำเป็นต้องใช้อย่างน้อย 2 วัน จึงได้ฟิล์มที่มีประสิทธิภาพดี และยังพบอีกว่าสารประกอบโมลิบเดทสามารถสร้างฟิล์มที่มีประสิทธิภาพดีกว่าสารประกอบฟอสเฟต ทั้งในแง่ของความหนาของชั้นฟิล์มและความทนทานต่อการถูร่อน เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบเรื่องของราคาสารเคมีและประสิทธิภาพในการสร้างฟิล์มแล้วนั้น มีความสมเหตุสมผลที่สารประกอบโมลิบเดทซึ่งมีราคาสูงกว่าจะสามารถสร้างฟิล์มที่มีประสิทธิภาพดีกว่า ยิ่งไปกว่านั้นหากต้องการลดค่าใช้จ่ายเรื่องเคมี การลดความเข้มข้นของสารเคมีในการพาสติเวชันสามารถชดเชยด้วยเวลาในการพาสติเวชันที่นานขึ้นนั้น แต่ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการเดินปั๊มกับค่าใช้จ่ายของสารเคมีที่ลดลงว่ามีความคุ้มค่าหรือไม่ และอาจมีปัจจัยเสี่ยงอื่นๆ เช่น ปั๊มอาจเกิดการขัดข้องทำให้สารละลายเคมีไม่สามารถไหลเวียนได้ ซึ่งอาจทำให้การพาสติเวชันล้มเหลวได้

#### 5.1 ข้อดีและข้อเสีย

##### 5.1.1 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบโมลิบเดท

- ข้อดี**
1. สามารถสร้างฟิล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีมาก
  2. สามารถพาสติเวชันได้โดยไม่ต้องเติมสารเคมีปรับพีเอช

- ข้อเสีย**
1. ราคาแพงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารเคมีชนิดอื่นๆ

##### 5.1.2 การพาสติเวชันด้วยสารประกอบฟอสเฟต

- ข้อดี**
1. สามารถสร้างฟิล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี
  2. ราคาถูก

- ข้อเสีย**
1. จำเป็นต้องเติมปูนขาวในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อเป็นตัวช่วยในการสร้างฟิล์ม



2. จำเป็นต้องเติมสารกรดเพื่อปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.5-7.5 ก่อนเติมสารประกอบฟอสเฟต ซึ่งหากเติมมากเกินไปอาจทำให้ระบบเกิดการผูกกร่อนเสียหายได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยชิ้นนี้มีปัจจัยหลายอย่างที่อาจส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนต่อการวัดผลได้ ไม่ว่าจะเป็นการเตรียมสารเคมี ซึ่งจำเป็นต้องคำนวณปริมาณเคมีที่ใช้ด้วยความแม่นยำและมีการวัดผลเทียบจากห้องปฏิบัติการ การวัดผลการทดลองด้วยภาพถ่ายจำเป็นต้องถ่ายภาพจากสภาวะแสงและมุมกล้องเดียวกันเพื่อให้ภาพที่จะใช้ในการเทียบสีมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด การวัดผลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การเก็บแผ่นคูปองเพื่อวัดผล จะต้องทำให้แผ่นคูปองแห้งและไม่ทิ้งระยะเวลาให้นานเพื่อหลีกเลี่ยงโอกาสที่ฟิล์มจะเกิดความเสียหาย การวัดผลด้วยการทดสอบความต้านทานการผูกกร่อน จำเป็นต้องทำทันทีหลังจากที่การพาสลิเวชันเสร็จ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่ฟิล์มเกิดความเสียหายจากความแห้งจนเกิดรอยแยกซึ่งอาจทำน้ำซึมผ่านฟิล์มและเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย

หากผู้อ่านมีความสนใจที่ต้องการจะศึกษาต่อยอดจากงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำมีข้อเสนอแนะให้ทำการทดลองและศึกษาเพิ่มเติมในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพสารเคมีพาสลิเวชันชนิดอื่นๆ เช่น สารประกอบไนไตรต์ หรือสารประกอบสังกะสี เป็นต้น และศึกษาปัจจัยอื่นๆที่อาจมีผลต่อการพาสลิเวชัน เช่น อุณหภูมิ ค่าพีเอช และความเร็วของสารละลายเคมีที่ไหลผ่านแผ่นคูปอง เพื่อให้ทราบว่าปัจจัยใดอีกที่มีผลต่อความสำเร็จในการพาสลิเวชัน ซึ่งผลที่ได้ก็นำไปใช้พัฒนาการพาสลิเวชันกับระบบในโรงงานอุตสาหกรรมได้ต่อไป

## รายการอ้างอิง

1. NACE International, "NACE study estimates global cost of corrosion at \$2.5 trillion annually". [Online] March 8, 2016; Available from: <https://inspectioneering.com/news/2016-03-08/5202/nace-study-estimates-global-cost-of-corrosion-at-25-trillion-ann>.
2. Flynn, D.J., The Nalco Water Handbook. 3rd ed. 2009: MC Graw Hill.
3. Kakaroglou, A., M. Domini, and I. De Graeve, Encapsulation and incorporation of sodium molybdate in polyurethane coatings and study of its corrosion inhibition on mild steel. Surface and Coatings Technology, 2016.
4. American National Standard, Standard Test Method for Corrosivity of Water in the Absence of Heat Transfer (Weight Loss Method). ASTM International, 2005.
5. Wikipedia, t.f.e. "Scanning electron microscope". [Online] Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning\\_electron\\_microscope](https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope).
6. Company, F. "Inspect S50 for Materials Science". [Online] Available from: <http://www.fei.com/products/sem/Inspect-S50-for-Materials-Science>.
7. Han, J., D. Young, and S. Nescic. Characterization of the passive film on mild steel in CO<sub>2</sub> environments. Proceedings of the 17th International Corrosion Congress. 2008.
8. Tsai, C.-Y., J.-S. Liu, P.-L. Chen, and C.-S. Lin, A two-step roll coating phosphate/molybdate passivation treatment for hot-dip galvanized steel sheet. Corrosion Science, 2010. 52(10): 3385-3393.
9. Ogle, K., A. Tomandl, N. Meddahi, and M. Wolpers, The alkaline stability of phosphate coatings I: ICP atomic emission spectroelectrochemistry. Corrosion Science, 2004. 46(4): 979-995.
10. Jegannathan, S., T.S.N. Sankara Narayanan, K. Ravichandran, and S. Rajeswari, Performance of zinc phosphate coatings obtained by cathodic electrochemical treatment in accelerated corrosion tests. Electrochimica Acta, 2005. 51(2): 247-256.

11. Jegannathan, S., T.S.N. Sankara Narayanan, K. Ravichandran, and S. Rajeswari, Formation of zinc–zinc phosphate composite coatings by cathodic electrochemical treatment. Surface and Coatings Technology, 2006. 200(12–13): 4117-4126.
12. Han, J., S. Nešić, Y. Yang, and B.N. Brown, Spontaneous passivation observations during scale formation on mild steel in CO<sub>2</sub> brines. Electrochimica Acta, 2011. 56(15): 5396-5404.
13. Uhlich, J.J., J. Sainio, Y. Lei, D. Edwards, R. Davies, M. Bowker, S. Shaikhutdinov, and H.J. Freund, Preparation and characterization of iron–molybdate thin films. Surface Science, 2011. 605(15–16): 1550-1555.
14. Zhou, Y. and Y. Zuo, The inhibitive mechanisms of nitrite and molybdate anions on initiation and propagation of pitting corrosion for mild steel in chloride solution. Applied Surface Science, 2015. 353: 924-932.
15. Wolpers, M. and J. Angeli, Activation of galvanized steel surfaces before zinc phosphating — XPS and GDOES investigations. Applied Surface Science, 2001. 179(1–4): 281-291.
16. Shams El Din, A.M., R.A. Mohammed, and H.H. Haggag, Corrosion inhibition by molybdate/polymaliate mixtures. Desalination, 1997. 114(1): 85-95.
17. Vukasovich, M.S. and J.P.G. Farr, Molybdate in corrosion inhibition—A review. Polyhedron, 1986. 5(1): 551-559.
18. Sakashita, M. and N. Sato, The effect of molybdate anion on the ion-selectivity of hydrous ferric oxide films in chloride solutions. Corrosion Science, 1977. 17(6): 473-486.
19. Ben Salah, M., R. Sabot, P. Refait, I. Liascukiene, C. Méthivier, J. Landoulsi, L. Dhouibi, and M. Jeannin, Passivation behaviour of stainless steel (UNS N-08028) in industrial or simplified phosphoric acid solutions at different temperatures. Corrosion Science, 2015. 99: 320-332.
20. Zhou, H., S. Hou, M. Zhang, M. Yang, L. Deng, X. Xiong, and X. Ni, Deposition of calcium phosphate coatings using condensed phosphates (P<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>4-</sup> and P<sub>3</sub>O<sub>10</sub><sup>5-</sup>) as phosphate source through induction heating. Materials Science and Engineering, 2016, 69: 337-342.

21. Niu, L., R. Guo, C. Tang, H. Guo, and J. Chen, Surface characterization and corrosion resistance of fluoferrite conversion coating on carbon steel. Surface and Coatings Technology, 2016. 300: 110-117
22. Zuo, J., F. Guo, J. Zhu, A. Chen, Y. Hu, C. Lin, and C. Jiang, Effects of benzotriazole on the magnesium phosphate coating. Applied Surface Science, 2015. 359: 166-171.
23. Fachikov, L. and D. Ivanova, Surface treatment of zinc coatings by molybdate solutions. Applied Surface Science, 2012. 258(24): 10160-10167.
24. Yong, Z., J. Zhu, C. Qiu, and Y. Liu, Molybdate/phosphate composite conversion coating on magnesium alloy surface for corrosion protection. Applied Surface Science, 2008. 255(5, Part 1): 1672-1680.
25. Lin, B.-L., J.-T. Lu, and G. Kong, Effect of molybdate post-sealing on the corrosion resistance of zinc phosphate coatings on hot-dip galvanized steel. Corrosion Science, 2008. 50(4): 962-967.
26. Magalhães, A.A.O., I.C.P. Margarit, and O.R. Mattos, Molybdate conversion coatings on zinc surfaces. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2004. 572(2): 433-440.
27. Lin, B.-i., J.-t. Lu, G. Kong, and J. Liu, Growth and corrosion resistance of molybdate modified zinc phosphate conversion coatings on hot-dip galvanized steel. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007. 17(4): 755-761.
28. Hamlaoui, Y., L. Tifouti, and F. Pedraza, Corrosion behaviour of molybdate–phosphate–silicate coatings on galvanized steel. Corrosion Science, 2009. 51(10): 2455-2462.
29. Du, Z., H. Zhao, C. Yang, Y. Shen, C. Yan, and Y. Zhang, Optimization of strontium molybdate based composite anode for solid oxide fuel cells. Journal of Power Sources, 2015. 274: 568-574.
30. Sako, R. and J.i. Sakai, Effect of curing temperature on coating structure and corrosion resistance of ammonium zirconium carbonate on galvanized steel surface. Surface and Coatings Technology, 2013. 219: 42-49.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### ภาคผนวก ก ตัวอักษรย่อและความหมาย

CR = อัตราการผุกร่อนหรือค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นคูปองที่ลดลง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อปี (MPY)

W = น้ำหนักที่สูญเสียจากการผุกร่อนของแผ่นคูปอง มีหน่วยเป็น กรัม (g)

t = เวลาที่แผ่นคูปองถูกติดตั้งในระบบ มีหน่วยเป็น วัน (day)

d = ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นคูปอง มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{g/cm}^3$ )

A = พื้นที่ผิวของแผ่นคูปอง มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร ( $\text{cm}^2$ )

K = ค่าคงที่สำหรับการแปลงหน่วย (day•miliinch) / (Year•cm)

%DN = ค่าเปอร์เซ็นต์ความคล้ำของแผ่นคูปองเมื่อเทียบกับแกมมา มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์ (%)

Cmo = ความเข้มข้นของโมลิบดีนัมที่ใช้พาสสิเวชัน มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)

Cpo = ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่ใช้พาสสิเวชัน มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)

T = ค่าความหนาของฟิล์มมีหน่วยเป็นไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ )

ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ตารางแปลผลค่าเปอร์เซ็นต์ความคล้ำของฟิล์มจากภาพถ่ายที่ผ่านการพาสติเวชันที่สภาวะต่างๆ

กลุ่มสารเคมี เวลาใน การพาสติเวชัน	โมลิบดีนัม (สารเคมี A)			ฟอสเฟต (สารเคมี B)		
	50 มิลลิกรัม ต่อลิตร	100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	200 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	235 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	470 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	940 มิลลิกรัมต่อ ลิตร
0.5 วัน	57%	66%	67%	55%	60%	67%
1 วัน	68%	70%	73%	58%	63%	69%
2 วัน	71%	77%	84%	67%	75%	81%
4 วัน	79%	83%	88%	76%	79%	85%

ตารางที่ ข-2 ตารางค่าความหนาของฟิล์มจากภาพถ่ายที่ผ่านการพาสติเวชันที่สภาวะต่างๆ

กลุ่มสารเคมี เวลาใน การพาสติเวชัน	โมลิบดีนัม (สารเคมี A)			ฟอสเฟต (สารเคมี B)		
	50 มิลลิกรัม ต่อลิตร	100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	200 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	235 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	470 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	940 มิลลิกรัมต่อ ลิตร
0.5 วัน	0.339 $\mu\text{m}$	1.251 $\mu\text{m}$	1.810 $\mu\text{m}$	0.074 $\mu\text{m}$	0.088 $\mu\text{m}$	0.262 $\mu\text{m}$
1 วัน	1.219 $\mu\text{m}$	3.839 $\mu\text{m}$	4.762 $\mu\text{m}$	0.133 $\mu\text{m}$	0.225 $\mu\text{m}$	0.327 $\mu\text{m}$
2 วัน	4.862 $\mu\text{m}$	7.376 $\mu\text{m}$	8.805 $\mu\text{m}$	0.291 $\mu\text{m}$	0.492 $\mu\text{m}$	0.610 $\mu\text{m}$
4 วัน	7.203 $\mu\text{m}$	9.034 $\mu\text{m}$	9.908 $\mu\text{m}$	1.130 $\mu\text{m}$	1.373 $\mu\text{m}$	1.569 $\mu\text{m}$

ตารางที่ ข-3 ตารางอัตราการผุกร่อนเฉลี่ยของแผ่นคูปองที่ผ่านการพาสสิเวชันที่สภาวะต่างๆ

สารเคมีที่ใช้พาสสิเวชัน	ความเข้มข้นของสารเคมี	เวลาในการพาสสิเวชัน	น้ำหนักแผ่นคูปองเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักแผ่นคูปองสุดท้าย (กรัม)	อัตราการผุกร่อน ( $10^{-3}$ นิ้วต่อปี)
โมลิบเดท	200 มิลลิกรัมต่อลิตร	0.5	10.8804	10.8422	4.50
		1	10.5176	10.4931	2.89
		2	10.0355	10.0204	1.78
		4	10.6263	10.6154	1.28
	100 มิลลิกรัมต่อลิตร	0.5	10.4637	10.4110	6.21
		1	10.4749	10.4371	4.45
		2	10.8257	10.8046	2.48
		4	10.4702	10.4575	1.50
	50 มิลลิกรัมต่อลิตร	0.5	10.8804	10.8153	7.67
		1	10.5176	10.4709	5.50
		2	10.0355	10.0020	3.95
		4	10.6263	10.5987	3.25
ฟอสเฟต	940 มิลลิกรัมต่อลิตร	0.5	10.3758	10.3002	8.90
		1	11.0294	10.9670	7.35
		2	10.3758	10.3313	5.24
		4	11.0243	10.9835	4.80
	470 มิลลิกรัมต่อลิตร	0.5	10.3405	10.2474	10.96
		1	10.9429	10.8699	8.60
		2	10.2838	10.2319	6.11
		4	10.3852	10.3410	5.21
	235 มิลลิกรัมต่อลิตร	0.5	11.0212	10.9117	12.90
		1	11.128	11.0439	9.90
		2	11.0087	10.9556	6.25
		4	10.9747	10.9280	5.50



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วันฉัตร ญัฐพัทธนิษย์ เกิดเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2532 ที่ จังหวัด จันทบุรี ประเทศไทย จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษา เมื่อปีพ.ศ. 2549 จาก โรงเรียนท่าใหม่"พลสวัสดิ์ ราษฎร์นุกูล" อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี และจบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี เมื่อปีพ.ศ. 2554 จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา เมื่อจบการศึกษาระดับปริญญาตรี ได้เริ่มทำงานที่บริษัท นาลโกอินดัสเทรียลเซอร์วิส (ประเทศไทย) จำกัด เมื่อปีพ.ศ. 2555 ในปี พ.ศ. 2556 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชา วิศวกรรมเคมีภาคนอกเวลาราชการ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร และจบ การศึกษาในปีพ.ศ. 2559

