

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อลูมิเนียม (Aluminum)

2.1.1 สมบัติทั่วไปของอลูมิเนียม [5]

อลูมิเนียม เป็นโลหะที่สำคัญ ได้รับการใช้งานมากที่สุด ในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light metals) ทั้งนี้เพราะ อลูมิเนียมมีสมบัติที่เด่นหลายประการ

1) มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา และมีกำลังวัสดุต่อน้ำหนักสูงจึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้สอย ตลอดจนชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด ขีปนาวุธ และอุปกรณ์ในรถยนต์ เพื่อลดน้ำหนักของรถให้น้อยลง จะได้ประหยัดเชื้อเพลิง

2) มีความเหนียวมาก สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก

3) จุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมได้ง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง

4) ค่าการนำไฟฟ้าคิดเป็น 64.94% IACH (International Association of Classification Societies) ซึ่งไม่สูงมากนัก แต่เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ดังนั้นจึงใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ในกรณีที่กำลังถึงเรื่องน้ำหนักเป็นสำคัญ

5) เป็นโลหะที่ไม่มีพิษต่อร่างกาย และไม่มีค่าการนำความร้อนสูง ใช้ทำภาชนะหุงต้มอาหาร และห่ออาหารได้

6) ผิวหน้าของอลูมิเนียมบริสุทธิ์ มีดัชนีการสะท้อนแสงสูงมาก จึงใช้ทำแผ่นสะท้อนในกล้องถ่ายรูป งานสะท้อนแสงในโคมไฟ และไฟหน้ารถยนต์

7) ทนทานต่อการเกิดเป็นสนิม และการผุกร่อนในบรรยากาศการใช้งานทั่วไปได้ดี แต่ไม่ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดแก่ และด่างต่างๆ ไป

8) ซื้อง่ายในท้องตลาด และราคาไม่แพงมากนัก

9) ใช้ในการตกแต่งในงานเฟอร์นิเจอร์ ตลอดจนใช้เป็นอุปกรณ์ตกแต่งบ้าน

10) เป็นโลหะที่ยังมีการพัฒนาอย่างไม่หยุดยั้ง

2.1.2 มาตรฐานอลูมิเนียมเกรด 1100

สมบัติ อลูมิเนียม 1100 คืออลูมิเนียมบริสุทธิ์ในทางการค้า เป็นอลูมิเนียม ที่มีปริมาณอลูมิเนียมต่ำสุด 99.3% ถึง 99.7% เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน เช่น ตัวนำไฟฟ้า และแผ่นสะท้อนแสง เป็นต้น โดยเพิ่มธาตุเหล็ก และทองแดงเข้าไป จะทำให้มีความยืดหยุ่น ความอ่อนตัว และคุณสมบัติการเชื่อมดี อลูมิเนียมบริสุทธิ์ทางการค้าจะถูกนำไปใช้งาน ทางด้านเครื่องตกแต่ง นำไปขึ้นรูป หรือทำเป็นบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ [6]

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมเกรด 1100 [6]

ธาตุผสม	ปริมาณ	ธาตุผสม	ปริมาณ
อลูมิเนียม (Al)	99.50	แมงกานีส (Mn)	0.05
ซิลิกอน (Si)	0.10	สังกะสี (Zn)	0.10
เหล็ก (Fe)	0.10	ทองแดง (Cu)	0.05-0.02
อื่นๆ	0.1		

2.2 เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain carbon steel)

ลักษณะทั่วไปเหล็กคาร์บอน (Carbon steel) เป็นวัสดุช่างประเภทเดียวที่มีคุณสมบัติทางความแข็งแรง (Strength) และความอ่อนตัว

2.2.1 สมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน

จากที่ทราบว่า ธาตุคาร์บอนเป็นธาตุที่อยู่ได้ในเหล็กกล้าสองลักษณะคือ ในสภาพสารละลายของแข็ง (Solid solution) และธาตุคาร์บอนอ่อนตัว (Ductility) ที่เปลี่ยนแปลงได้กว้างมากตามปริมาณของคาร์บอนที่มีอยู่ในเหล็ก ทำให้เหมาะที่จะเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของลักษณะงาน ดังตัวอย่างเช่นในเหล็กคาร์บอน ถ้ามีปริมาณของคาร์บอนต่างกันเพียงเล็กน้อยจะทำให้การชุบแข็งด้วยวิธีแตกต่างกันหรือทำการขึ้นรูป (Mechanical forming) แตกต่างกันอีก อาจจะทำให้เหล็กมีความแข็งแรงแตกต่างกันได้อย่างมากมาย คืออาจจะแปรค่าความแข็งแรงได้ถึงจำนวน 10 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร อัตราการยืดตัว (Elongation) ก็อาจจะแตกต่างกันได้ตั้งแต่ 50% ถึง 0.1% [6]

การศึกษาถึงสมบัติและการควบคุมคุณสมบัติของเหล็กคาร์บอน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยการอธิบายร่วมกับ แผนภาพความสมดุล (Equilibrium diagram) ของเหล็กคาร์บอน ซึ่งเราทราบว่าปริมาณของคาร์บอนในเหล็กมีความสำคัญมากต่อความแข็งแรง และความอ่อนตัว ก่อนที่จะศึกษาถึง แผนภาพความสมดุลของเหล็กกับคาร์บอนควรจะต้องทราบคาบการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับแผนภาพ เสียก่อน ดังนั้นออสเทนไนต์ หรือที่เรียกว่าเหล็กแกมมา (γ) คือ สารละลายของแข็ง (Solid solution) ของเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กมากที่สุดถึง 2% (บางกรณีใช้ 1.7%) ที่อุณหภูมิ 1130 องศาเซลเซียส มีระบบผลึก (Crystal system) เป็นโครงสร้างแบบที่มีอะตอมอยู่ตรงกลางผิวหน้าของผลึก [7]

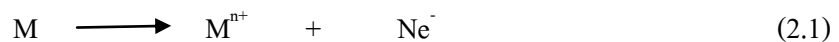
เฟอร์ไรต์ หรือที่เรียกว่าเหล็กแอลฟา (α) คือ สารละลายของแข็งของเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กมากที่สุด 0.025% ที่อุณหภูมิ 723 °C มีระบบผลึกเป็นโครงสร้างลูกบาศก์ที่มีอะตอมอยู่ตรงกลาง [7]

ซีเมนต์ไต์ หรือ เหล็กคาร์ไบด์ บางที่ก็เรียกว่าคาร์ไบด์เฉยๆ เป็นโลหะผสม (Intermetallic compound) ระหว่างเหล็กกับคาร์บอนมีสูตร Fe_3C ซึ่งมีความแข็งสูงมาก แต่เปราะรับแรงกระแทกไม่ได้ [7]

2.3 ทฤษฎีความเร็วการกัดกร่อน

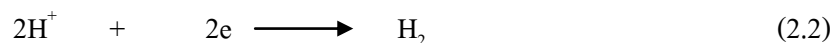
2.3.1 กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อน

การกัดกร่อนของโลหะที่อยู่ในน้ำ เกิดขึ้นเหมือนกับปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ ในกระบวนการกัดกร่อนที่กำลังดำเนินอยู่นั้น โลหะ (M) จะสูญเสียแรงยึดระหว่างอะตอมของโลหะแล้วอะตอมนั้นก็กลายเป็นไอออนหลุดเข้าไปในสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น [8]

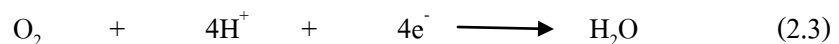


ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันมีการปล่อยอิเล็กตรอนเกิดขึ้นแอโนดเพื่อให้เกิดสมดุลภายในระบบ และจะมีการเกิดปฏิกิริยารีดักชันขึ้นที่แคโทด โดยปกติทั่วไปของรีดักชันแบ่งออกเป็น 4 แบบ ได้ดังนี้ [8]

1) มีไฮโดรเจนเกิดขึ้น (ภายในน้ำมีฤทธิ์เป็นกรด)

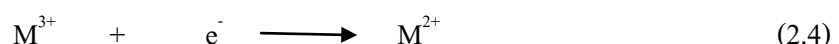


2) เกิดรีดักชันของออกซิเจน (ภายในน้ำมีฤทธิ์เป็นกรด)



3) เกิดรีดักชันของออกซิเจน (ภายในน้ำมีฤทธิ์เป็นกลางหรือเป็นด่าง)

4) เกิดรีดักชันของโลหะ



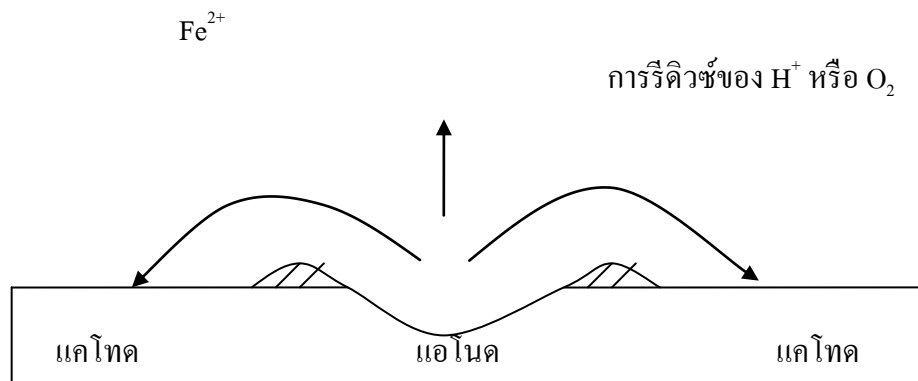
ปฏิกิริยาของแอโนดและปฏิกิริยาแคโทดอาจจะเกิดขึ้นบนตำแหน่งเดียวกันของผิวโลหะก็ได้ โดยมากแล้วปฏิกิริยาทั้งสองจะเกิดคนละตำแหน่ง กล่าวคือ ปฏิกิริยาจะเกิดบนผิวของ

โลหะ แต่อีกปฏิกิริยาหนึ่งมักจะเกิดในตำแหน่งที่แตกต่างไปเนื่องตามความไม่สม่ำเสมอของผิวโลหะหรือของสารละลายที่สัมผัสอยู่บนผิวของโลหะ

ความไม่สม่ำเสมอของผิวโลหะนั้น มีสาเหตุต่างๆ เช่น เกิดจากส่วนผสมทางเคมีของโลหะ โครงสร้างของโลหะ ทิศทางของการเกิดผลึก แรงเค้นที่ยังหลงเหลืออยู่ ผิวฟิล์มที่เกิดการออกซิเดชัน และลักษณะของผิวโลหะ เป็นต้น

ความไม่สม่ำเสมอของสารละลายที่สัมผัสอยู่กับผิวโลหะนั้น ก็มีสาเหตุต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ความเข้มข้นของก๊าซต่างๆ อุณหภูมิของสารละลาย ความเร็วของการไหลของสารละลายนั้น เป็นต้น

การเกิดเซลล์ไฟฟ้าเล็กๆ เป็นจุดๆ บนผิวของโลหะนั้น เรียกว่า การกัดกร่อนในหน่วยเซลล์ (Corrosion cell) ลักษณะการเกิดการกัดกร่อนในหน่วยเซลล์ขึ้นบนผิวหน้าของโลหะได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.1



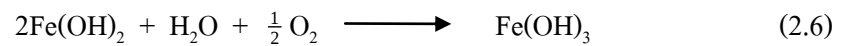
รูปที่ 2.1 การเกิดการกัดกร่อนที่หน่วยเซลล์ [8]

เมื่อเกิดการกัดกร่อนขึ้นถ้าปฏิกิริยาแคโทดเป็นไปตามสมการ 2.2 เรียกว่าการกัดกร่อนแบบมีไฮโดรเจนเกิดขึ้น หากเป็นตามสมการ 2.3 หรือ 2.4 เรียกว่าการกัดกร่อนแบบที่ออกซิเจนถูกใช้ไป

หลังจากการเกิดปฏิกิริยาของการกัดกร่อนเบื้องต้น ต่อไปก็คือ การรวมตัวของไอออนในสารละลาย ทำให้ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนเกิดขึ้นในกรณีที่เกิดการกัดกร่อนในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกลาง ปฏิกิริยาของการกัดกร่อนทั้งหมดจะเป็นไปตามสมการ 2.1 และ 2.4 รวมกันจะทำให้เกิดสารประกอบของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ Fe(OH)_2 ขึ้นที่ผิวของเนื้อเหล็กตามสมการข้างล่างนี้ [8]



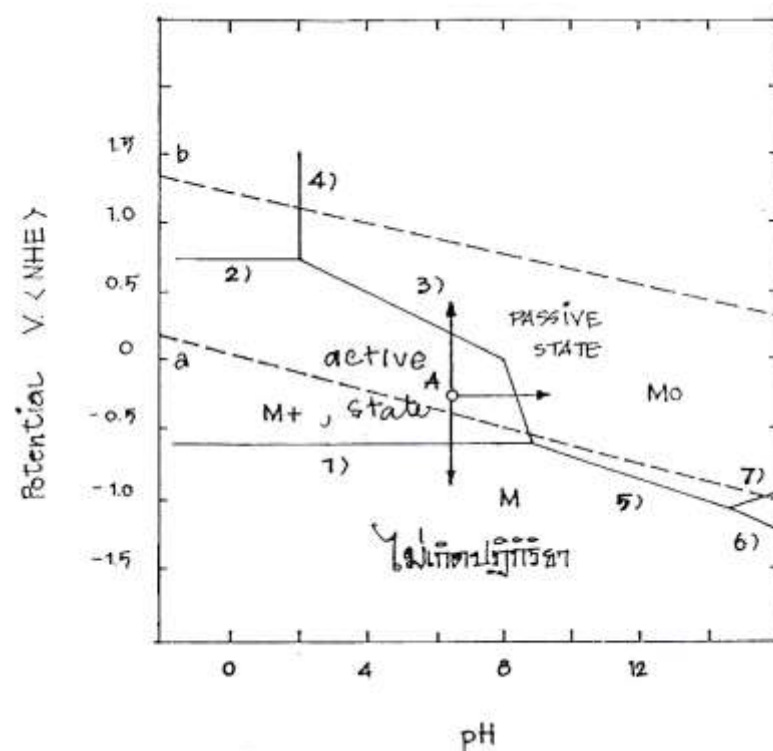
สารประกอบนี้ยังเกิดการออกซิเดชันได้อย่างรวดเร็วด้วยออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบทำให้เกิด Fe(OH)_3 ดังสมการต่อไปนี้



กระบวนการต่อไปนี้ก็คือ การที่สารประกอบนี้จะสูญเสียน้ำ กลายเป็นสารประกอบตัวใหม่ คือ FeOOH หรือ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (สนิมเหล็กสีแดง) แต่ถ้าปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอปฏิกิริยาจะไม่ดำเนินไปจนได้ Fe_2O_3 แต่จะหยุดอยู่ในรูปของ $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (สนิมเหล็กสีดำ) [9]

2.3.2 ทฤษฎีความสมดุลของการกัดกร่อน

ปฏิกิริยาของโลหะกับน้ำอย่างที่ได้กล่าวมาแล้วเป็นปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งความสมดุลขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความรุนแรงของสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา การศึกษาถึงความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาที่ต้องอาศัยสมการของเนิร์นสต์ และการละลายของสารประกอบแต่ละชนิดของโลหะ นอกจากนั้นอาจตรวจสอบดูได้ว่า โลหะไอออน หรือสารประกอบที่เกิดจากการกัดกร่อนมีเสถียรภาพในสภาวะใด จากแผนภูมิของความต่างศักย์และค่า pH รูปที่ 2.2 นั้นเป็นแผนภูมิของระบบ $\text{Fe} - \text{H}_2\text{O}$ ซึ่งแสดงความสมดุลของปฏิกิริยาทั้ง 7 ในตำแหน่งต่างๆ กัน บางทีเรียกแผนภูมินี้ว่า แผนภูมิปูปแย็ก (Pourbaix diagram)



รูปที่ 2.2 แผนภูมิของความต่างศักย์หรือแผนภูมิปูปแย็ก [8]

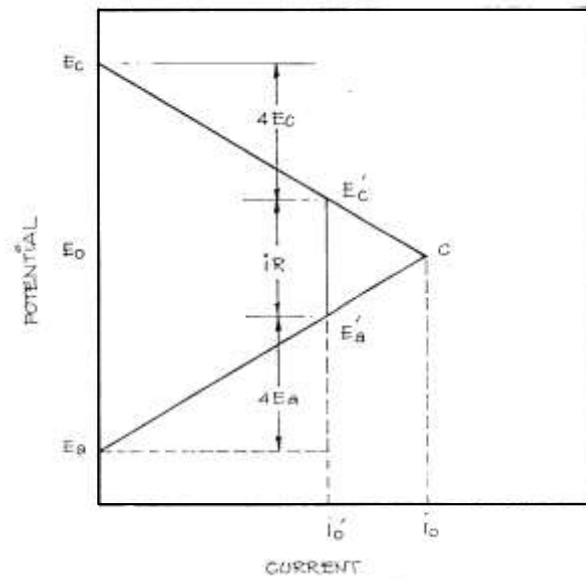
เส้นตรงต่างๆ ที่ลากแต่ละเส้นจะแสดงถึงเงื่อนไขของความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกของสารประกอบแต่ละชนิด ส่วนเส้นประ a และ b นั้นแสดงถึงความต่างศักย์ ที่มีความสมดุลของขั้วที่เกิดก๊าซไฮโดรเจนและขั้วที่เกิดออกซิเจนบริเวณใต้เส้นประ a จะเป็นสถานะที่สามารถเกิดก๊าซไฮโดรเจนได้ ส่วนบริเวณเหนือเส้นประ b นั้นจะเกิดออกซิเจนได้

จากแผนภูมิแบ่งเป็นบริเวณใหญ่ๆ 3 บริเวณด้วยกันคือ บริเวณที่จะไม่เกิดการกัดกร่อน (เขตไม่เกิดปฏิกิริยา) บริเวณที่เกิดการกัดกร่อนจะดำเนินไปได้ (เขตมีการเกิดการกัดกร่อน) และบริเวณที่มีฟิล์มป้องกันเคลือบคลุมอยู่ ซึ่งจะเป็นบริเวณที่การกัดกร่อนจะไม่ดำเนินต่อไป (เขตที่เกิดฟิล์มป้องกัน)

จากแผนภูมินี้ สามารถทำนายเกี่ยวกับเงื่อนไขการเกิดการกัดกร่อนและการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะได้ ยกตัวอย่างเช่น เหล็กจะมีการเกิดการกัดกร่อนแบบมีไฮโดรเจนขึ้น ในอาณาบริเวณที่อยู่ใต้เส้นประ a และในเขตที่มีการเกิดการกัดกร่อน ส่วนในอาณาบริเวณระหว่างเส้นประ a และ b บวกกับบริเวณที่การกัดกร่อน ก็จะเกิดการกัดกร่อนแบบก๊าซออกซิเจนถูกใช้ไปในกรณีที่มี pH มากกว่า 9.5 ก็จะไม่เกิดการกัดกร่อน นอกจากนั้นหากนำชิ้นเหล็กแช่ในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกลาง เช่น จุด A จะสามารถคาดการณ์ได้ว่าจะสามารถป้องกันขึ้นเหล็กนี้ไม่ให้เกิดการกัดกร่อนได้โดยปรับให้ความต่างศักย์ไปทางขั้วบวก คือเข้าไปในเขตของ การเกิดฟิล์มป้องกัน (Passivation) หรือเลื่อนตำแหน่งความต่างศักย์ให้ลงไปทางลบ หรือเพิ่มค่าของ pH ให้มากขึ้นวิธีใดวิธีหนึ่ง ในปัจจุบันได้มีการสร้างแผนภูมิประเภทนี้ของโลหะชนิดต่างๆ มากมาย

2.4 ทฤษฎีการกัดกร่อน

แผนภูมิของความต่างศักย์ หรือแผนภูมิโป่งเปิดแสดงความสมดุลและจะช่วยให้อาการการณ์ได้ถึงแนวโน้มของการเกิดการกัดกร่อนได้ แต่ก็ไม่ได้แสดงเกี่ยวกับอัตราเร็วของการเกิดการกัดกร่อนว่าช้าเร็วเพียงใด ส่วนความสัมพันธ์ของความต่างศักย์และกระแสของปฏิกิริยาแอโนดและแคโทดบนพื้นผิวของโลหะที่กำลังเกิดการกัดกร่อนอยู่นั้นได้แสดงตามรูปที่ 2.3 คือ E_a และ E_c ก็คือความสมดุลของความต่างศักย์ของปฏิกิริยาของแอโนดและปฏิกิริยาแคโทด เมื่อปฏิกิริยาทั้งสองนี้ดำเนินการแล้วขั้วปฏิกิริยาเคมี (Polarization) ก็จะเกิดขึ้นหมายความว่า เมื่อมีกระแสไหลผ่านขั้วไฟฟ้าที่ผิว ความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทั้งสองก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นเป็น E_{aC} และ E_{cC} ความต่างศักย์ของแอโนดก็จะเปลี่ยนค่าไปทางบวก ส่วนความต่างศักย์ของแคโทดก็จะเปลี่ยนค่าไปทางลบ ในลักษณะเช่นนี้ $E'_a - E_a = E_a$ และ $E'_c - E_c = E_c$ จะแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาของขั้วทั้งสองนอกจากนั้นถ้า R เป็นความต้านทานของของเหลวที่อยู่ระหว่างขั้ว iR ก็แสดงถึงการลดลงของแรงดันไฟฟ้าของขั้วดังกล่าวและเป็นเพราะว่าปฏิกิริยาของการกัดกร่อนที่แท้จริงของผิวหน้าของโลหะนั้นเกิดจากการรวมตัวเอาปฏิกิริยาทั้งสองของแอโนดและแคโทด ฉะนั้นถ้าการเป็นตัวนำของของเหลวนั้นมีค่ามากและถ้าค่า iR สามารถละไว้ได้ ความต่างศักย์ของโลหะก็จะกำหนดโดย



รูปที่ 2.3 กราฟขั้วปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนในหน่วยเซลล์ [8]

จุดตัด (C) ของเส้นกราฟของขั้วทั้งสอง ซึ่งจะปรากฏอยู่พอดีตรงกลางของความต่างศักย์รวมของทั้งคู่ ความต่างศักย์ของจุดตัดนี้ ก็คือความต่างศักย์ของการกัดกร่อน (Corrosion potential) ส่วนกระแสที่ติดตามมาก็คือ กระแสของการกัดกร่อน (Corrosion current) [8]

ในกรณีที่โลหะเกิดการกัดกร่อนโดยลักษณะไฟฟ้าเคมีนี้ บริเวณของโลหะที่เกิดการกัดกร่อนต่อหน่วยเวลา (W/t) จะเป็นสัดส่วนกับ กระแสของการกัดกร่อน (i) ทั้งนี้เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ [8]

$$\frac{W}{t} = Ki \quad (2.7)$$

กล่าวคือ ปริมาณของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นต่อหน่วยของเวลาและต่อหน่วยของพื้นที่ หรือหาอัตราเร็วของการกัดกร่อนนั้น สามารถแสดงในรูปของกระแสต่อหน่วยของพื้นที่หรือความหนาแน่นของกระแสนั่นเอง

การกัดกร่อนก็คือ การรวมเอาปฏิกิริยาที่แอโนดและแคโทด ซึ่งมีความเร็วเท่ากันเข้าด้วยกัน ความเร็วของการกัดกร่อนจึงมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับปฏิกิริยาของขั้วทั้งสองนี้ แบ่งตามลักษณะการดำเนินการกัดกร่อนได้ 3 ชนิดด้วยกัน คือ

1) การควบคุมที่แคโทด (Cathodic control)

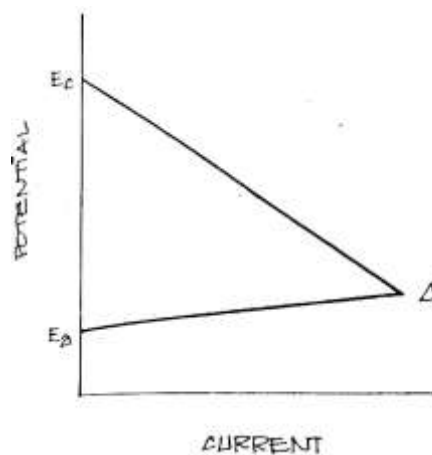
ลักษณะดังรูปที่ 2.4 (ก) เมื่อเกิดปฏิกิริยาของขั้วที่แคโทดมีค่ามากกว่าแอโนดเรียกการกัดกร่อนแบบนี้ว่าเป็นแบบ การควบคุมที่ขั้วแคโทด ตัวอย่างเช่น การกัดกร่อนของเหล็กที่แช่อยู่ในน้ำธรรมชาติ

2) การควบคุมที่แอโนด (Anodic control)

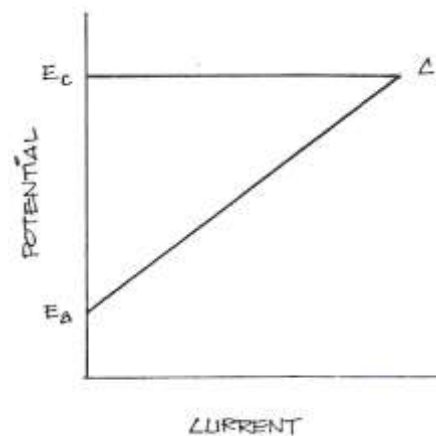
ลักษณะดังรูปที่ 2.4 (ข) เมื่อเกิดปฏิกิริยาของขั้วที่แอโนดมีค่ามากกว่าแคโทดเรียกการกัดกร่อนแบบนี้ว่าเป็นแบบ การควบคุมที่ขั้วแอโนด ตัวอย่างเช่น การกัดกร่อนของเหล็กที่แช่อยู่ในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด

3) การควบคุมทั้งคู่ (Mixed control)

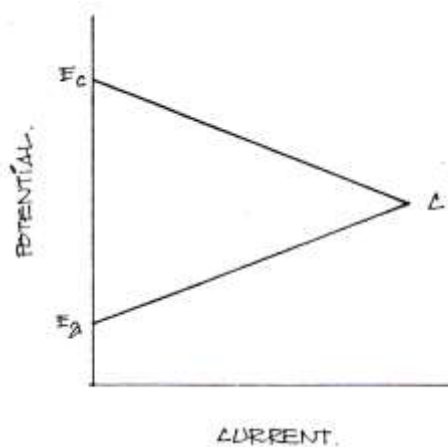
ลักษณะดังรูปที่ 2.4 (ค) เมื่อเกิดปฏิกิริยาของขั้วทั้งคู่มีค่าเท่ากัน เรียกการกัดกร่อนแบบนี้ว่าการควบคุมทั้งคู่ระดับการเกิดเกิดปฏิกิริยาของขั้วนั้นไม่เพียงจะขึ้นอยู่กับสมบัติของโลหะและของสารละลายเท่านั้น แต่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ของขั้วทั้งคู่ที่ทำปฏิกิริยากันอยู่ด้วย



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.4 ชนิดของการควบคุมปฏิกิริยาการกัดกร่อน [8]

โดยสรุปแล้ว เมื่อคำนึงถึงปฏิกิริยาของการกัดกร่อนโดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ควรทราบลักษณะของ เส้นโค้งโพลาไรเซชัน (Polarization curve) ของปฏิกิริยาที่แอโนดและที่แคโทด เพื่อที่จะเข้าใจว่าปฏิกิริยาของทั้งคู่มีช่วงของการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนของการควบคุมแบบใด

โดยทั่วไปแล้ว จะไม่เกิดการเกิดปฏิกิริยาของขั้วจากความเข้มข้นเพียงอย่างเดียว แต่จะมีการเกิดจากการกระตุ้นพร้อมกันไป ดังนั้นในโพลาไรเซชัน (Polarization) รวมจะได้มาจากผลรวมของทั้งสองแบบนี้คือ [9]

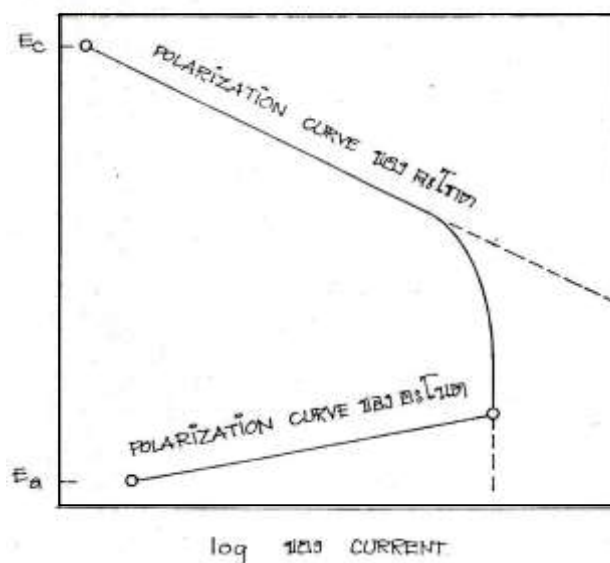
$$n = n_a + n_c \quad (2.8)$$

สำหรับโพลาไรเซชันของแอโนดนั้น ขึ้นอยู่กับสมบัติพิเศษของโลหะนั้นๆ ปฏิกิริยาแอโนดจะไม่ขึ้นกับโพลาไรเซชันจากความเข้มข้น และโพลาไรเซชันของแอโนดแต่จะเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้ [9]

$$n = \frac{\beta \ln i}{i_0} \quad (2.9)$$

การเกิดไฮโดรเจนและการเกิดรีดักชันของออกซิเจน เป็นปฏิกิริยาแคโทดนั้น เมื่ออัตราเร็วของการเกิดรีดักชันเข้าใกล้กับค่า ความหนาแน่นของกระแสแล้ว โพลาไรเซชันก็จะมีค่ามากขึ้น และโพลาไรเซชันของแคโทดจะเป็นดังนี้ [9]

$$n = \frac{\beta \ln i}{i_0} + \frac{RT}{nF} \times \ln(1 - i_L) \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.5 กราฟโพลาไรเซชันซึ่งถูกควบคุมด้วยโพลาไรเซชันจากการกระตุ้นและความเข้มข้น [8]

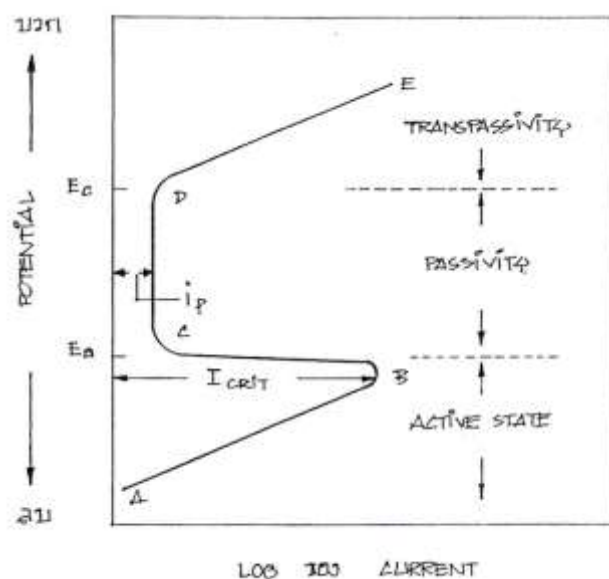
2.5 ทฤษฎีการเกิดฟิล์มป้องกัน (Passivity)

เหล็กจะเกิดการกัดกร่อนอย่างรวดเร็วในกรดไนตริกที่เจือจาง แต่จะไม่เกิดการกัดกร่อนเลยในกรดไนตริกที่เข้มข้นมากกว่า 65% ดังนั้นถ้าย้ายเอาเหล็กที่จุ่มอยู่ในกรดไนตริกไปจุ่มในกรดเจือจาง จะปรากฏว่าเหล็กขึ้นทนต่อการกัดกร่อนได้ชั่วขณะหนึ่ง สภาพเช่นนี้เรียกว่าปรากฏการณ์การเกิดฟิล์มป้องกัน (Passivity) ทางเคมีเช่นเดียวกันเมื่อนำเหล็กจุ่มอยู่ในกรดกำมะถันนั้น ก็จะเป็นแอโนด และความต่างศักย์ก็จะเปลี่ยนไปเป็นค่าบวก พร้อมๆ กับการเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์นี้ อัตราเร็วการละลายตัวของเหล็กก็จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อความต่างศักย์นี้มีค่าสูงขึ้นระดับหนึ่ง จนไม่มีการละลายของเหล็ก ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่าการเกิดฟิล์มป้องกัน (Passivity) ทางไฟฟ้าเคมี

จากสมบัติทางไฟฟ้าเคมี เมื่อโลหะที่ไม่มีตระกูลสูญเสียวัดต่อปฏิกิริยาเคมีที่มีอยู่นั้นไป มีลักษณะเช่นเดียวกับโลหะมีตระกูลนั้น เรียกการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า การเกิดฟิล์มป้องกัน (Passivation) สภาพที่เปลี่ยนไปเรียกว่าสภาพการเกิดฟิล์มป้องกัน ส่วนในกรณีนำเหล็กจุ่มลงในกรดไนตริกเจือจางนั้น เรียกสภาพที่เกิดขึ้นว่าสภาวะตื่นตัว ปรากฏการณ์การเกิดฟิล์มป้องกันจะเกิดขึ้นได้กับเหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ อลูมิเนียม ไทเทเนียม เซอร์โคเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม โมเนล (70% นิกเกิล และ 30% ทองแดง) เป็นต้น

2.5.1 สภาพการเกิดฟิล์มป้องกันโดยทางไฟฟ้าเคมี

นำเหล็กจุ่มลงในกำมะถัน 1 นอร์มัล ซึ่งได้ขจัดออกซิเจนไปแล้วโดยมีทองคำขาวเป็นขั้วที่ต่อเข้าด้วยกัน ตั้งให้มีความต่างศักย์ระดับปกติของเหล็ก ค่อยๆ ให้มีค่าเป็นบวกทีละขั้นโดยอาศัยอุปกรณ์ปรับสถานะความต่างศักย์ แล้วก็วัดค่าของกระแสซึ่งเปลี่ยนแปลงไปนั้น แล้วนำค่าที่ได้เขียนเป็นความสัมพันธ์ของความต่างศักย์กับความหนาแน่นของกระแส ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิดฟิล์มป้องกันที่ขั้วแอโนด [8]

2.5.2 ทฤษฎีการเกิดฟิล์มป้องกัน

สภาพการเกิดฟิล์มนั้น จะมีการเกิดฟิล์มบางมาก ซึ่งเรียกว่าฟิล์มป้องกันบนผิวของโลหะ นิยมอธิบายด้วยสมมติฐานของฟิล์มออกไซด์ชั้น กับสมมติฐานของการดูดซับ [11]

1) สมมติฐานของฟิล์มออกไซด์ชั้น

สมมติฐานนี้กล่าวไว้ว่าเป็นการเกิดของฟิล์ม ซึ่งบางมากราว 20-80 Å บนผิวของโลหะฟิล์มจะเกิดจากไฮดรอกไซด์หรือสารประกอบอื่นๆ จากปฏิกิริยาฟิล์มนี้เป็นเสมือนเกราะป้องกันการเกิดการแพร่ ทำให้เนื้อโลหะถูกตัดจากสภาพแวดล้อม จึงทำให้ความเร็วของการกัดกร่อนลดลง สำหรับส่วนประกอบของฟิล์มป้องกันยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่จากการวิเคราะห์โดยอาศัยรังสีอิเล็กตรอน ทำให้ทราบได้ว่าฟิล์มป้องกัน ของเหล็กนั้นก็คือ - Fe_2O_3 ในปัจจุบันมีผู้พบว่าฟิล์มนี้ เกิดจากฟิล์มซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยฟิล์มสองชั้นของ Fe_3O_4 กับ - Fe_2O_3 หรือ - Fe_2O_3 กับ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ [10]

2) สมมติฐานของการดูดซับ

สมมติฐานนี้กล่าวไว้ว่าเป็นเพราะออกซิเจน หรือไอออนของออกไซด์เกิดการดูดซับทางเคมีกับโมเลกุลของโลหะ ทำให้น้ำซึ่งถูกดูดซับอยู่ก่อนที่ผิวของโลหะนั้น ถูกขับไล่ออกไป ผลก็คือ ความเร็วของการละลายของโลหะจะช้าลง โดยเฉพาะโลหะประเภททรานซิชัน จะเกิดปฏิกิริยาการเกิดฟิล์มป้องกันได้ง่าย เพราะภายในอะตอมของโลหะประเภทนี้ที่ระดับพลังงานย่อย (d) จะมีอิเล็กตรอนเดี่ยวอยู่ อิเล็กตรอนนี้สามารถจะเกิดพันธะโควาเลนต์อย่างเหนียวแน่นกับอิเล็กตรอนเดี่ยวของออกซิเจนได้ดี [11]

2.6 รูปแบบของการกัดกร่อนและกลไกการเกิด

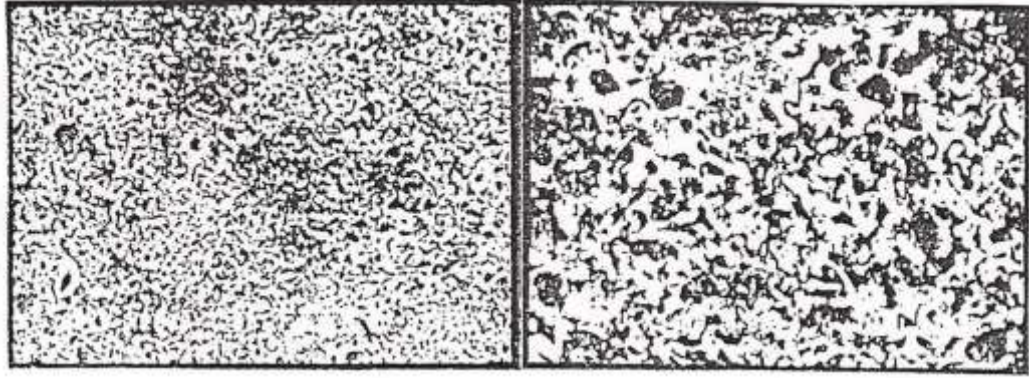
2.6.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ

เป็นรูปแบบที่ธรรมดาที่สุดของการกัดกร่อน และเป็นการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ จะเกิดขึ้นตลอดพื้นผิวของชิ้นงานโลหะ เป็นผลให้เกิดโลหะบางลงทั่วพื้นผิวที่เกี่ยวข้อง การกัดกร่อนรูปแบบนี้สามารถจะคาดคะเนได้อย่างค่อนข้างแน่นอนถึงอายุการใช้งาน จึงแตกต่างกันกรณีอื่นๆ ที่การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นในตำแหน่งเฉพาะเจาะจง ซึ่งถ้าโลหะนั้นสามารถเกิดการชำระได้เร็วกว่าความคาดหมาย จึงเกิดอันตรายได้งายมาก ในการออกแบบเพื่อรับการกัดกร่อนในรูปแบบนี้ ทำได้โดยการเพิ่มความหนาของวัสดุไว้แต่แรก [1][8]

อัตราการกัดกร่อนสามารถใช้เปรียบเทียบระหว่างโลหะชนิดเดียวกันได้สะดวก แต่อัตราการซึมลึกของโลหะเบาจะมีค่ามากกว่าของโลหะหนัก ดังนั้นในกรณีโลหะต่างชนิดกัน เปรียบเทียบโดยอาศัยอัตราการซึมลึกจะสะดวกกว่า

การป้องกัน

1) ใช้วัสดุที่เหมาะสมรวมทั้งการเคลือบผิวชิ้นงานที่ถูกต้อง

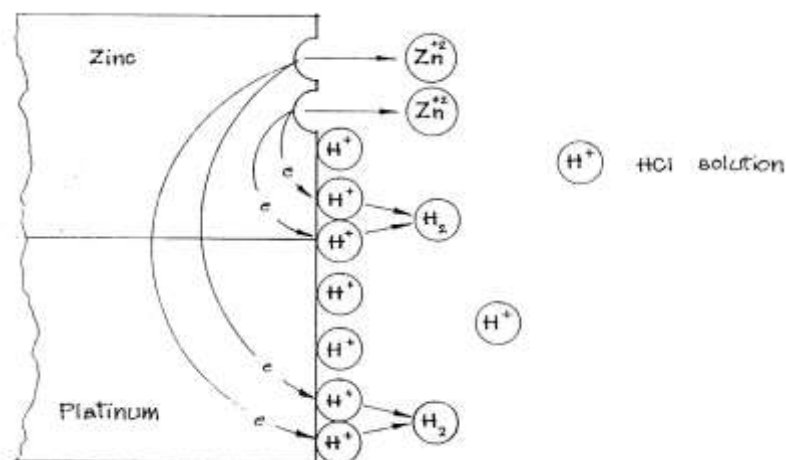


รูปที่ 2.7 ไมโครกราฟของการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ [8]

- 2) ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนในสิ่งแวดล้อม
- 3) ใช้การป้องกันแบบแคโทดิก

2.6.2 การกัดกร่อนแบบโลหะต่างชนิด

เป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นได้เมื่อมีองค์ประกอบอยู่พร้อมกันทั้ง 3 อย่างคือ โลหะต่างชนิด 2 ชนิด สารอิเล็กโทรไลต์ และตัวนำกระแสไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อนำโลหะต่างชนิดกันมาจุ่มลงในสารละลาย และนำโลหะต่างชนิดมาเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า จะทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างโลหะทั้ง 2 ชนิดขึ้น จะเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อน โดยที่ตัวหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแอโนด อีกตัวหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแคโทด สำหรับค่าความต่างศักย์ของโลหะว่าตัวใดจะมีศักย์สูงกว่าหรือต่ำกว่ากัน พิจารณาได้จากตารางความต่างศักย์มาตรฐานโดยใช้ไฮโดรเจนเป็นธาตุอ้างอิง โดยมีความต่างศักย์เท่ากับศูนย์ [1][8]



รูปที่ 2.8 การกัดกร่อนเนื่องจากโลหะต่างชนิด [8]

ตัวอย่างเช่น นำแผ่นอลูมิเนียมและแผ่นทองแดงมาเชื่อมติดกันแล้วจุ่มลงไปใต้น้ำทะเล อธิบายตามหลักการของความต่างศักย์ทองแดงจะมีความต่างศักย์สูงกว่าอลูมิเนียม ทองแดงจึงเป็นแคโทด และอลูมิเนียมจึงเป็นแอโนด เมื่อโลหะ 2 ชนิดสัมผัสกัน และเกิดการกัดกร่อนแบบโลหะต่างชนิด ความรุนแรงของการกัดกร่อนที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อโลหะ 2 ตัวนั้นอยู่ห่างกันมากขึ้นในตารางความต่างศักย์ และยังพบอีกว่าบริเวณที่ใกล้รอยต่อของโลหะทั้ง 2 ชนิดจะเกิดการกัดกร่อนที่มากกว่าบริเวณที่ไกลออกไป อัตราส่วนของพื้นที่ของแคโทดกับแอโนดยังมีผลต่อความรุนแรงของการกัดกร่อนแบบนี้อีกด้วย ถ้าพื้นที่แคโทดใหญ่ พื้นที่แอโนดเล็ก จะเกิดการกัดกร่อนด้วยอัตราเร็วที่สูงกว่าในทางกลับกันถ้าพื้นที่แอโนดใหญ่ พื้นที่แคโทดเล็ก อัตราการกัดกร่อนก็จะต่ำลง

ตารางที่ 2.2 ค่าต่างศักย์มาตรฐานของโลหะต่างๆ [8]

	<i>Metal-metal ion equilibrium (unit activity)</i>	<i>Electrode potential vs. normal hydrogen electrode at 25°C, volts</i>
Noble or cathodic ↑	Au-Au ⁺	+1.498
	Pt-Pt ²⁺	+1.2
	Pd-Pd ²⁺	+0.987
	Ag-Ag ⁺	+0.799
	Hg-Hg ₂ ²⁺	+0.788
	Cu-Cu ²⁺	+0.337
	H ₂ -H ⁺	0.000
Active or anodic ↓	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
	Mg-Mg ²⁺	-2.363
	Na-Na ⁺	-2.714
	K-K ⁺	-2.925

SOURCE: A. J. de Bethune and N. A. S. Loud, "Standard Aqueous Electrode Potentials and Temperature Coefficients at 25°C," Clifford A. Hampel, Skokie, Ill., 1964. See also Table 9-1.

- 1) ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการควบคุมการกัดกร่อนแบบโลหะต่างชนิด ได้แก่
 - ความต่างศักย์ที่ได้จากตารางความต่างศักย์คิดเป็นค่าสัมบูรณ์
 - อิทธิพลของสิ่งแวดล้อมจะพิจารณาจากธรรมชาติและระดับความรุนแรงของสิ่งแวดล้อม
 - อัตราพื้นที่แคโทดและแอโนด ถ้าพื้นที่แคโทดมากกว่าและพื้นที่ของแอโนดน้อยอัตราการกัดกร่อนสูงเนื่องจากมีตัวรับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการกระตุ้นการละลายของเนื้อโลหะเร็วขึ้น
- 2) การป้องกัน อาจใช้ 1 วิธี หรือหลายวิธีรวมกัน ได้แก่
 - เลือกใช้วัสดุให้มีความต่างศักย์ใกล้เคียงกัน พิจารณาจากตารางค่าความต่างศักย์เป็นหลัก
 - หลีกเลี่ยงการใช้อัตราส่วนของพื้นที่ ของแคโทดต่อพื้นที่ของแอโนดสูงๆ โดยพยายามปรับอัตราส่วนของพื้นที่ทั้ง 2 ชนิดใกล้เคียงกัน
 - ใช้ฉนวนหรือวัสดุอื่นกั้นในบริเวณที่โลหะต่างชนิดมาสัมผัสกัน
 - เติมนสารยับยั้งเพื่อลดความรุนแรงของสิ่งแวดล้อม
 - เลือกและออกแบบให้มีความหนามากขึ้น หรือทำให้ชิ้นงานเป็นแอโนดนั้นมีการถอดเปลี่ยนง่าย เพื่อง่ายต่อการซ่อมบำรุง
 - การเชื่อม การขึ้นรูปชิ้นงาน ควรผ่านกระบวนการกำจัดแรงเค้น เพื่อลดการกระตุ้นการเกิดการกัดกร่อน
 - ใช้วัสดุตัวที่สามซึ่งเป็นแอโนดต่อตัวโลหะทั้ง 2 ชนิด เพื่อให้เกิดการกัดกร่อนแทน วิธีการนี้เรียกว่า การป้องกันแบบโมดิก
- 3) การกัดกร่อนอื่นๆ ที่มีพฤติกรรมคล้ายรูปแบบการกัดกร่อนแบบโลหะต่างชนิด ได้แก่
 - การกัดกร่อนแบบต่างความเข้มข้น (Concentration-cell corrosion) ตัวอย่างเช่น นำเหล็กจุ่มลงในน้ำที่มีเฟอร์รัสไอออน (Fe^{+2}) ซึ่งมีความเข้มข้นด้านล่างมากกว่าด้านบนเล็กน้อย เหล็กด้านบนจะถูกกัดกร่อนเร็วขึ้น หรือถ้านำเหล็กจุ่มลงในน้ำเกลือ ให้ด้านล่างอยู่ในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นมาก ด้านบนอยู่ในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นน้อย เหล็กด้านล่างก็จะถูกกัดกร่อนเร็วกว่าด้านบน
 - การกัดกร่อนโดยออกซิเจน (Oxygen cell corrosion) ตัวอย่างเช่น เหล็กฝังในดินมีออกซิเจนด้านบนสูง ด้านล่างต่ำ ด้านล่างของเหล็กก็จะถูกกัดกร่อนได้เร็ว
 - การกัดกร่อนแบบต่างอุณหภูมิ (Temperature cell corrosion) เช่น ท่อฝังดินที่ส่วนหนึ่งร้อนและอีกส่วนหนึ่งเย็น ส่วนที่ร้อนกว่าจะถูกกัดกร่อนเร็วขึ้น

- การกัดกร่อนจากความเค้น (Stress cell corrosion) เช่น เหล็กที่ผ่านการดัดงอหรือการเชื่อมแล้วนำไปแช่น้ำ บริเวณที่มีแรงเค้นภายในสูงจากการดัดหรือเชื่อมจะถูกกัดกร่อนเร็วขึ้น
- การกัดกร่อนจากกระแสไฟฟ้า (Electric current cell corrosion) เช่น ท่อเหล็กฝังในดินอยู่ในทางเดินของกระแสไฟฟ้า บริเวณที่กระแสไฟฟ้าไหลออกจะผุเร็วเกิดการกัดกร่อนได้เร็วกว่า
- การกัดกร่อนแบบต่างความเก่า-ใหม่ (Old – new surface cell) เช่น กรณีที่ฝังท่อเหล็กไว้ในดินนานถ้าจะต่อท่อเหล็กใหม่ขนานกับท่อเก่า ท่อใหม่จะเกิดการกัดกร่อนเร็วกว่าท่อเก่า เนื่องจากพื้นผิวของท่อใหม่จะว่องไวต่อปฏิกิริยาสูงกว่าผิวท่อเก่า

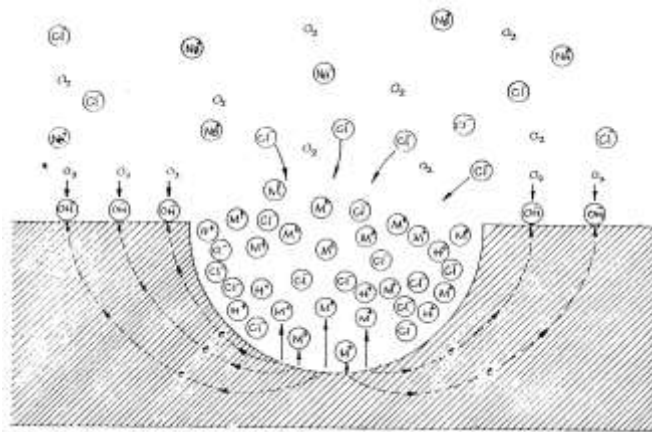
2.6.3 การกัดกร่อนแบบจุด [8]

การกัดกร่อนแบบจุด เป็นรูปแบบของการเกิดการกัดกร่อนแบบจุดเล็กๆ ในแนวตั้ง โดยตอนแรกจะเกิดที่บริเวณผิวโลหะเฉพาะตำแหน่ง แล้วขยายลึกเข้าไปในเนื้อโลหะลึกเข้าทุกทีจนอาจจะลุได้ทั้งๆ ที่เนื้อโลหะหรือส่วนอื่นๆ ยังคงอยู่ในสภาพที่ดี การกัดกร่อนแบบนี้เป็นรูปแบบของการกัดกร่อนที่อันตรายที่สุด เพราะไม่สามารถคาดคะเนได้แน่นอนถึงอายุการใช้งาน มักจะเกิดจากสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออน (Cl^-) อยู่ด้วย จุดเริ่มต้นอาจเกิดจากรอยขีดข่วนบนผิวโลหะ หรือเนื่องจากสารเคมีที่มีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงเป็นจุด เริ่มต้นทำให้ผิวโลหะเกิดความต่างศักย์แสดงเป็นบริเวณแอโนดและแคโทดเล็กๆ ขึ้น เมื่อบริเวณแอโนดถูกกัดกร่อนไปจนเกิดเป็นหลุม คลอไรด์ไอออนก็จะแพร่เข้าไปในหลุมนั้น และจะเป็นการเร่งการเกิดการกัดกร่อนของโลหะ [9]

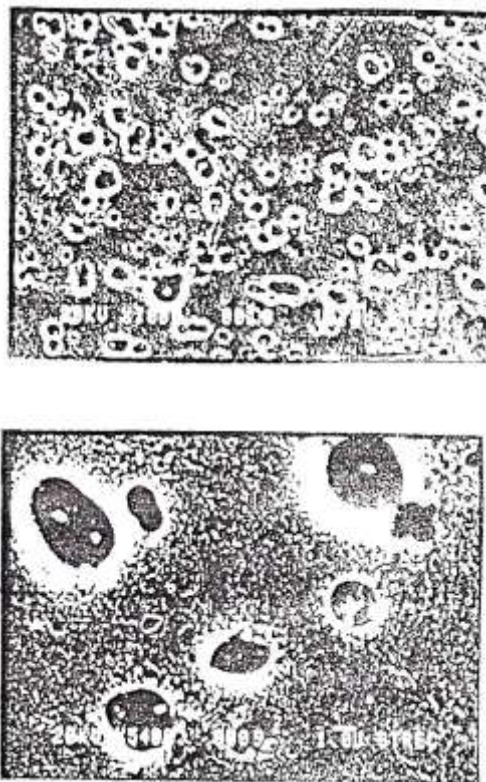
โลหะในหลุมจะเกิดออกซิเดชัน ให้โลหะไอออนออกมาอย่างรวดเร็ว ขณะที่รีดักชันของออกซิเจนจะเกิดขึ้นบริเวณผิวโลหะที่บริเวณห่างจากหลุมไป ปริมาณโลหะไอออนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มากขึ้นในหลุมคลอไรด์ไอออนก็ยิ่งแพร่เข้ามามากขึ้น และทำปฏิกิริยารวมกันเป็นโลหะคลอไรด์ และทำปฏิกิริยาต่อไปกับความชื้นหรือน้ำให้กรดเกลือ ซึ่งจะเกิดกัดกร่อนโลหะอย่างรุนแรงภายในหลุมจะไม่มีออกซิเจน เพราะออกซิเจนละลายในสารละลายที่มีโลหะไอออนเข้มข้นได้น้อยมาก ปฏิกิริยารีดักชันจึงเกิดบนผิวของโลหะที่อยู่ถัดจากหลุมออกไป [8]

ปฏิกิริยาที่อธิบายกลไกของการเกิดการกัดกร่อนแบบจุด อาจแสดงได้ดังนี้

- ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ ; $\text{M} \longrightarrow \text{M}^+ + \text{e}^-$
- ปฏิกิริยารีดักชัน ได้แก่ ; $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \longrightarrow 4\text{OH}^-$



รูปที่ 2.9 แผนภูมิของการเกิดการกัดกร่อนแบบจุด [8]



รูปที่ 2.10 ไมโครกราฟของการกัดกร่อนแบบจุด [8]

- ปฏิกริยาแทนที่อย่างง่าย ได้แก่ ; $\text{Cl}^- + \text{M}^+ \longrightarrow \text{MCl}$
- ปฏิกริยาการแตกตัวในน้ำ ได้แก่ ; $\text{MCl} \longrightarrow \text{M}^+ + \text{Cl}^-$

โลหะยังมีแนวโน้มสูงในการกัดกร่อนแบบนี้ได้แก่ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม ควรหลีกเลี่ยงไม่นำมาใช้ในสิ่งแวดล้อมที่มีพวกคลอไรด์ โบรไมด์ ไฮโปคลอไรด์ หรือกล่าวได้ว่าสำหรับอุปกรณ์หรือเครื่องจักรหรือท่อใช้กับน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย สำหรับการ

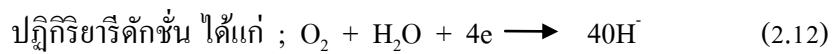
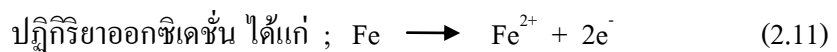
เตรียมพื้นผิวของชิ้นโลหะ มีผลโดยตรงกับความต้านทานการกัดกร่อนแบบจุดของโลหะผิวขัดมัน จะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบนี้สูงกว่าผิวที่ผ่านการกัดผิวหน้าด้วยกรดหรือผิวหยาบ แต่ถ้าเกิดหลุมขึ้นบนผิวขัดมันแล้วมักจะเกิดหลุมที่มีขนาดใหญ่ และมีการกัดกร่อนเพิ่มขนาดของหลุมได้เร็วกว่าพวกผิวขรุขระหรือผิวหยาบ พวกเหล็กกล้าธรรมดาจะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบจุด ได้สูงกว่าพวกเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งตรงกันข้ามกับการกัดกร่อนแบบอื่นๆ ที่เหล็กกล้าไร้สนิมจะมีความต้านทานที่สูงกว่าเหล็กกล้าธรรมดา ได้มีการปรับปรุงคุณภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมให้มีความต้านทานการกัดกร่อนได้สูงขึ้น โดยการทำให้ร้อนที่อุณหภูมิสูง 18°F แล้วทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว ตามกระบวนการที่เรียกว่าการจุ่มในสารละลาย (Solution quenching) หรืออาจเลือกใช้เหล็กให้ได้ฟิล์มที่มีความเสถียรมากขึ้น หรืออาจช่วยโดยการเพิ่มสารยับยั้งเข้าไป แต่ต้องควบคุมปริมาณให้ถูกต้อง

การป้องกันอาจทำได้หลายวิธี หรือเลือกวิธีใดวิธีหนึ่งตามความเหมาะสม

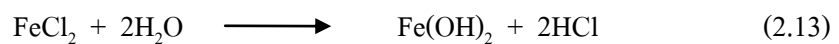
- 1) เลือกโลหะหรือวัสดุที่เหมาะสม ถ้าจำเป็นให้มีการตรวจสอบส่วนผสมก่อนใช้งาน ได้ก็เป็นการดี
- 2) กำหนดความเร็วของการไหลให้มีความเร็วที่พอสมควร ซึ่งจะช่วยให้ไม่เกิดการตกค้างของตะกอนหรือของแข็งบนผิวโลหะหรือผิวชิ้นงาน
- 3) หมั่นล้างทำความสะอาดผิวโลหะไม่ให้มีคราบ หรือสิ่งสกปรกเกาะติด อันจะเป็นสาเหตุให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration cell) ได้
- 4) อุปกรณ์หรือเครื่องจักร ควรผ่านกระบวนการเคลือบผิวก่อนใช้งาน
- 5) เพิ่มความระมัดระวังในการติดตั้งเคลื่อนย้าย อย่าให้เกิดการกระแทกหรือรอยขีดบนผิวโลหะอันเป็นจุดหรือเริ่มต้นของการกัดกร่อนแบบจุด
- 6) การเติมสารยับยั้งในสารละลายหรือของไหล เพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะ

2.6.4 การกัดกร่อนที่มุมอับ [8]

การกัดกร่อนที่มุมอับ เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในบริเวณของโลหะที่เป็นช่องแคบๆ หรือบริเวณที่ถูกปกปิด เช่น บริเวณที่อยู่ใต้หัวน็อต หรือที่ได้หมวกของตะปูหัวเห็ดหรือตรงตะเข็บรอยต่อของโลหะ บริเวณที่เป็นช่องแคบๆ นี้ จะได้รับออกซิเจนหรือไอออนจากสารละลายได้ไม่เพียงพอ จึงทำให้บริเวณที่ขาดออกซิเจนทำหน้าที่เป็นแอโนด ในขณะที่พื้นมีด้านนอกมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนตลอดเวลาทำตัวเป็นแคโทด ทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น พร้อมกันนี้บริเวณภายในช่องแคบๆ นั้น ก็จะเกิดการสะสมของเกลือของโลหะขึ้น ทำให้ pH ลดลง ทำให้สารละลายมีฤทธิ์ไปทางกรด แล้วทำให้ผิวโลหะบริเวณภายในนั้นถูกกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อน ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับการเกิดการกัดกร่อนแบบจุด กลไกการเกิดการกัดกร่อนจะเป็นดังนี้ เช่น ถ้านำแผ่นเหล็ก 2 แผ่นมาประกบกัน และร้อยด้วยน็อต จะเกิดกลไกดังนี้ [12]



เมื่อเวลาผ่านไป ออกซิเจนที่อยู่ในช่องแคบจะถูกใช้หมดไป เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชัน ส่วนปฏิกิริยาออกซิเดชันยังคงดำเนินต่อไป เป็นผลให้บริเวณช่องแคบมีความเข้มข้นของเหล็กไอออน (Fe^{2+}) เพิ่มขึ้น เพื่อเป็นการสมดุลทางประจุไฟฟ้าของคลอไรด์ไอออน (Cl^-) จากอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งแพร่ได้รวดเร็วกว่าออกซิเจน จะซึมเข้าไปในช่องแคบ ทำให้เกิดเป็นเฟอร์รัสไอออน (FeCl_2) ขึ้น FeCl_2 นี้เมื่อถูกความชื้นก็จะแตกตัวให้ Fe(OH)_2 และกรดเกลือ (HCL) ตามสมการเคมี [1]

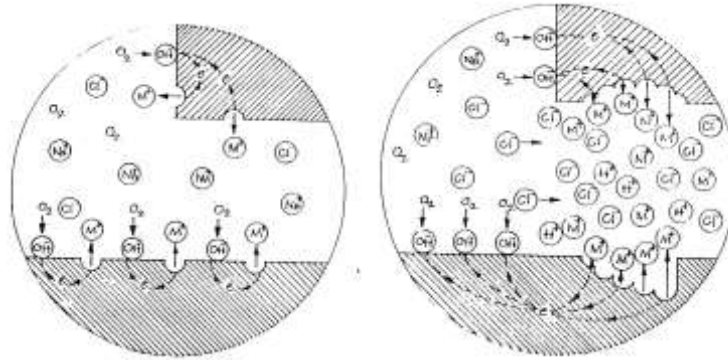
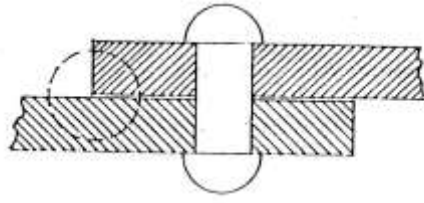


ส่วน Fe(OH)_2 จะตกตะกอนอยู่ในช่องแคบ ขณะที่ไฮโดรคลอริก (HCl) จะกัดแผ่นเหล็ก ทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงโดยเฉพาะในน้ำทะเลที่มีคลอไรด์ผสมอยู่เป็นจำนวนมาก เป็นตัวอย่างของสภาพแวดล้อมที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงได้ง่าย แต่อย่างไรแล้ว โลหะชนิดต่างๆ ก็มีความต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อนได้ไม่เท่ากัน

ไททานเนียม เป็นโลหะที่เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงได้ยากที่สุด แต่ถ้าอยู่ภายใต้อุณหภูมิที่สูง และอยู่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงมากๆ ก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงที่รุนแรงมากได้เหมือนกัน

วิธีป้องกันหรือลดการเกิดการกัดกร่อนที่รุนแรง อาจทำได้หลายวิธี ได้แก่

- 1) ใช้การเชื่อมแผ่นโลหะ 2 แผ่นให้ติดกัน แทนการยึดด้วยน็อต และปิดรอยแยกต่างๆ ด้วยการเชื่อม หรือบัดกรี
- 2) การออกแบบเครื่องจักรกล และภาชนะบรรจุสารเคมีไม่ให้เกิดตะกอนนอนก้น พยายามให้เกิดการระบายของไหลอย่างสมบูรณ์ หลีกเลี่ยงมุมฉากและพื้นที่อับ เพื่อป้องกันการตกตะกอนของพวกของแข็งที่กั้นภาชนะ
- 3) ตรวจตราเครื่องมือและอุปกรณ์ ควรหมั่นทำความสะอาดเพื่อกำจัดพวกสารตกค้างออกให้หมด
- 4) กำจัดของแข็งที่ปะปนเข้ามา กับสารละลายออกตั้งแต่ก่อนเข้ากระบวนการ
- 5) เช็ดหรือทำให้แห้ง โดยเฉพาะวัสดุที่บรรจุหีบห่อแล้ว ในขณะที่มีการปิดโรงงาน หรือหยุดทำงานระยะยาว

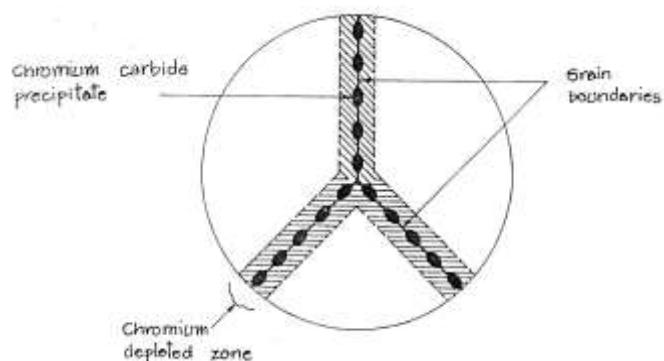


รูปที่ 2.11 การกัดกร่อนที่มุมอับ [8]

2.6.5 การกัดกร่อนตามขอบเกรน [8]

เป็นการกัดกร่อนบริเวณขอบของผลึกของโลหะ อันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุบางอย่างที่บริเวณขอบ สาเหตุสำคัญเกิดจากสิ่งเจือปนที่ขอบของเกรนของโลหะจากการที่ปริมาณส่วนผสมของโลหะบางอย่างมากเกินไปหรือน้อยไป ทำให้มีการตกผลึกของโลหะ หรือการหายไปหรือการลดลง ของโลหะที่ขอบเกรน

โลหะและโลหะผสมทุกชนิดมีโอกาสเกิดการกัดกร่อนแบบนี้ได้เสมอโลหะที่เกิดบ่อยได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม โดยเฉพาะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic) เมื่อทำให้ร้อนขึ้นถึง 510-788 องศาเซลเซียส คาร์บอนซึ่งเป็นองค์ประกอบในเหล็กจะรวมตัวกับโครเมียม เป็นโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_4C หรือ Cr_{23}C_6) และจะตกตะกอนที่ขอบเกรน ในเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 304 จะมีปริมาณของคาร์บอนประมาณ 0.02% หรือมากกว่าปริมาณคาร์บอนนี้มากพอที่จะเกิดการรวมตัวกับโครเมียมเป็นคาร์ไบด์ การเกิดคาร์ไบด์มักจะเกิดที่ขอบเกรนได้ง่ายกว่าในเนื้อเกรน เป็นผลทำให้ปริมาณโครเมียมใกล้ๆ ขอบเกรนเหลือน้อยกว่าในเนื้อเกรน เนื่องจากโมเลกุลของโครเมียมเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าโมเลกุลของคาร์บอน เช่น ในเนื้อเกรนมีโครเมียม 18% บริเวณขอบเกรนซึ่งโครเมียมบางส่วนเปลี่ยนไปเป็นคาร์ไบด์จะเหลือโครเมียมน้อยกว่า 18% ทำให้เป็นแอโนดเมื่อเทียบกับเนื้อเกรนและการกัดกร่อนก็จะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบเกรน นอกจากนี้สำหรับเหล็กยังมีสารบางชนิดที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ได้เช่น H_2S NH_4X NaOH (สำหรับทองเหลือง NH_4X Hg-NO_3) [1]



รูปที่ 2.12 แผนภูมิการกัดกร่อนที่ขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 304 [8]



รูปที่ 2.13 ไมโครกราฟของการกัดกร่อนแบบขอบเกรนของทองเหลือง [8]

2.7 การทดสอบการกัดกร่อนแบบจุ่ม (Immersion test)

2.7.1 มาตรฐาน ASTM G31-72 [20]

- 1) การทดสอบการกัดกร่อนจะต้องอยู่ในสภาวะปิด โดยส่วนประกอบการทดลองจะประกอบด้วย อุปกรณ์จับยึดวัสดุทดสอบ วัสดุทดสอบ ท่อเป่าอากาศ เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ ปล่องระบายอากาศออกเพื่อระบายแรงดันที่เกิดขึ้น อุปกรณ์กำเนิดความร้อน
- 2) อุณหภูมิของน้ำทะเลในฤดูร้อนจะอยู่ในช่วง 40-45 องศาเซลเซียส
- 3) ปริมาณของสารละลายอย่างน้อยที่สุดคือ 20 มิลลิลิตรต่อตารางเซนติเมตร
- 4) หลีกเลี่ยงการสัมผัสของออกซิเจนกับวัสดุทดสอบ
- 5) หลังจากการทดสอบจะต้องมีการล้างวัสดุทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G1-90
- 6) หน่วยของอัตราการกัดกร่อนจะเป็นหน่วยต่อปี เช่น มิลลิเมตรต่อปี

7) เครื่องวิเคราะห์และทดสอบพฤติกรรม และอัตราการกัดกร่อนของวัสดุต่างๆ (Potentiostat and galvanostat) เป็นเครื่องมือสำหรับวัดค่าอัตราการกัดกร่อนของวัสดุในสิ่งแวดล้อม โดยการจำลองสภาพการใช้งานจริง ตัวอย่างเช่น ชนิดของวัสดุ สารเคมี อุณหภูมิ เป็นต้น อาศัยหลักการผ่านกระแสไฟฟ้า หรือความต่างศักย์ให้ระบบด้วยวิธีการทางไฟฟ้า เพื่อวัดความต่างศักย์ หรือกระแสไฟฟ้า และนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนตามกฎของฟาราเดย์ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ข้อมูลเบื้องต้นของเครื่อง

8) เครื่องวิเคราะห์ และทดสอบอัตราการกัดกร่อนชนิดแบบเคลื่อนที่ (Portable corrosion rate test system) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดอัตราการกัดกร่อนที่พัฒนาขึ้นเพื่อความสะดวก และรวดเร็วในการประเมินสภาพของโลหะที่กำลังใช้งาน และสามารถตรวจสอบการกัดกร่อนที่เวลาจริง (Real time) และเนื่องจากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคอื่นโดยส่วนมากจำเป็นต้องนำชิ้นงานและสารละลายมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ในการทดลองต้องตั้งค่าตัวแปรต่างๆ ให้ใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงของวัสดุนั้น ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดลองจึงอาจจะไม่ตรงกับความ เป็นจริง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบประกอบด้วยโพรบ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีเกรดเดียวกันหรือใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้งานจริง โดยโพรบที่ใช้ในการทดสอบสามารถทนแรงดันได้ถึง 3,600 psi (24.8 MPa) และทนอุณหภูมิได้ประมาณ 230 องศาเซลเซียส เทคนิคการทดสอบนี้สามารถนำไปประยุกต์ในการตรวจสอบการกัดกร่อนต่างๆได้ ดังนี้

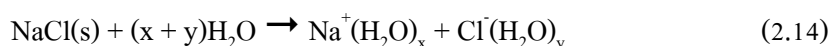
- 1) การกัดกร่อนใต้ดิน (Underground corrosion) เช่น ท่อที่ฝังอยู่ใต้ดินและมีการไหลอยู่ภายใน
- 2) การตรวจการกัดเซาะ (Erosion monitoring) ประยุกต์ใช้ในการวัดผลที่เกิดจากความเร็วของสารละลายต่อค่าอัตราการกัดกร่อน
- 3) การกัดกร่อนชั้นบรรยากาศ (Atmospheric corrosion) วัดอัตราการกัดกร่อนของวัสดุเมื่อสัมผัสอยู่กับบรรยากาศทั่วไป
- 4) นอกจากนั้นยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการได้

2.8 สารละลายการกัดกร่อน (Corrosion media)

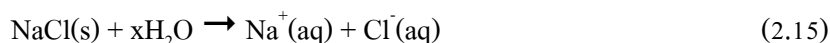
2.8.1 สารละลายโซเดียมคลอไรด์

โซเดียมคลอไรด์ เป็นสารประกอบไอออนประกอบด้วยไอออนยึดเหนี่ยวกันอยู่ภายในแลตทิซผลึก ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างประจุต่างชนิด ในการที่ตัวทำละลายจำพวกนี้จะละลายลงในสารละลายได้ ไอออนบวกและไอออนลบเหล่านั้นจะต้องแยกออกจากกัน เมื่อใส่โซเดียมคลอไรด์ลงไปในน้ำ โมเลกุลน้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้วไดโพล คือ เหมือนกับมีสองขั้วเป็นขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อก้อนของแข็งอยู่ในน้ำจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้ำกับไอออนของ

ของแข็ง โมเลกุลน้ำหันด้านที่เป็นบวก (ด้านไฮโดรเจน) เข้าหาไอออนลบที่อยู่ตามผิวของแข็ง บางโมเลกุลก็หันด้านที่เป็นลบ (ด้านออกซิเจน) เข้าหาไอออนบวก ไอออนลบถูกโมเลกุลน้ำเข้ามาล้อมรอบดึงดูด และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้ำกับไอออนแรงยิ่งกว่าแรงดึงดูดระหว่างไอออนด้วยกันเองในแลตทิซ ไอออนจึงถูกดึงหลุดไปอยู่กับโมเลกุลของน้ำกลายเป็นไอออนที่ถูกไฮเดรต ดังสมการ [14]



หรืออาจเขียนได้ว่า



2.8.2 ความเข้มข้นของสารละลาย

เนื่องจากสารละลายสามารถมีสัดส่วน ขององค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไป เป็นเหตุทำให้ไม่อาจเขียนสูตรเคมีที่แน่นอนได้ ยิ่งไปกว่านั้นนั้นสมบัติของสารละลายขึ้นกับปริมาณของตัวถูกละลายในตัวทำละลาย จึงต้องมีวิธีระบุความสัมพันธ์ของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย ความสัมพันธ์นี้ถ้าระบุเป็นปริมาณ เรียกว่าความเข้มข้น

1) เปอร์เซ็นต์ การบอกความเข้มข้นเป็นเปอร์เซ็นต์หรือร้อยละ นิยมใช้ในงานกิจการทั่วไป เช่น กล่าวว่าน้ำเกลือเข้มข้น 3% แต่ในวิชาการทางเคมีไม่ค่อยนิยมใช้ การวัดเป็นเปอร์เซ็นต์นี้อาจเป็น % น้ำหนักต่อน้ำหนัก ซึ่งบางทีเรียกว่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หมายถึง น้ำหนักตัวละลายต่อน้ำหนักสารละลาย 100 หน่วยในน้ำหนักเดียวกัน เช่น สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% คือสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ 3 กรัม รวมกับน้ำ 97 กรัม เป็นสารละลาย 100 กรัม อีกอย่างหนึ่งอาจเป็น % ปริมาตรต่อปริมาตร บางทีเรียกเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งหมายถึงปริมาตรตัวละลายต่อปริมาตรสารละลาย 100 หน่วย มักใช้ในกรณีที่ทั้งตัวละลายและตัวทำละลายต่างเป็นของเหลวทั้งคู่ อีกอย่างหนึ่งอาจเป็น % น้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งหมายถึงน้ำหนักตัวละลายต่อปริมาตรสารละลาย 100 หน่วย แต่ถ้าพูดถึงความเข้มข้นเป็น % โดยที่ไม่บ่งชี้ชนิดไหนมาก็หมายถึงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [12][13]

2) โมลาริตี โมลาริตีเป็นการบอกความเข้มข้นของสารละลายในอัตราส่วนของจำนวนโมลตัวละลายต่อปริมาตรสารละลาย เราทำสารละลายเช่นนี้ขึ้นมาได้โดยละลายตัวละลายลงในตัวทำละลายจำนวนหนึ่งแล้วเติมตัวทำละลายจนครบปริมาตรโมลาร์ (M) คือจำนวนโมลของสารละลายหนึ่งลิตร (ลูกบาศก์เดซิเมตร) ตัวอย่าง เช่น สารละลาย 2M H_2SO_4 หมายความว่าสารละลายนั้น 1 ลิตรมี H_2SO_4 2 โมล หรือ $(2 \times 98) = 196$ กรัม สารละลายที่มีปริมาตรเพียง 500

มิลลิลิตร ถ้ามี H_2SO_4 ละลายอยู่ 1 โมล ก็มีความเข้มข้น 2M เท่ากัน ปริมาณอาจต่างกันในการละลายปริมาตรต่างกันโดยความเข้มข้นของสารละลายคงตัว สารที่เราเน้นจำนวนโมลในการละลายนั้น อาจเป็นโมเลกุลอะตอม หรือไอออนก็ได้ ดังนั้นถ้าเราละลาย MgCl_2 0.1 โมลในน้ำ แล้วทำเป็นสารละลาย 1 ลิตร MgCl_2 แยกออกเป็น Mg^{2+} และ Cl^- สารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้นของ Mg^{2+} เป็น 0.1 M และของ Cl^- เป็น 0.2 M [13]

3) นอร์แมลิตี เป็นการบอกความเข้มข้นของสารละลาย ด้วยอัตราส่วนจำนวนกรัมสมมูลของตัวละลายต่อปริมาตรสารละลายทำนองเดียวกับโมลาริตี นอร์แมล (N) คือ จำนวนกรัมสมมูลของตัวละลายในสารละลาย 1 ลิตร เช่น สารละลาย $2\text{N H}_2\text{SO}_4$ หมายความว่าสารละลายนั้น 1 ลิตร มี H_2SO_4 2 กรัมสมมูล หรือ $(2 \times 49) = 98$ กรัม นอร์แมลิตีเคยเป็นที่นิยมใช้ระบุความเข้มข้นของสารละลาย เนื่องจากในการทำปฏิกิริยากัน สารมีความสัมพันธ์เทียบกันตามจำนวนกรัมสมมูล กรด 1 กรัมสมมูลทำปฏิกิริยาพอดีกับเบส 1 กรัมสมมูล, ตัวออกซิไดซ์ 1 กรัมสมมูลทำปฏิกิริยาพอดีกับตัวรีดิวซ์ 1 กรัมสมมูล เป็นต้น ดังนั้น ถ้าเพียงแต่ทราบจำนวนกรัมสมมูลของสารหนึ่งสารใดก็จะทราบจำนวนกรัมสมมูลของอีกสารหนึ่งที่ทำปฏิกิริยาพอดีกันด้วย น้ำหนักกรัมสมมูลของกรดและเบสหาได้โดยเทียบกับหนึ่งกรัมสมมูลของไฮโดรเจนที่กรดนั้นให้ หรือที่เบสทำปฏิกิริยาด้วย นั่นก็คือ น้ำหนักกรัมสมมูลของกรดมีค่าเท่ากับน้ำหนักกรัมสูตรหารด้วยจำนวนไฮโดรเจนอะตอมที่ถูกแทนที่ได้ด้วยโลหะ และน้ำหนักกรัมสมมูลของเบส มีค่าเท่ากับน้ำหนักกรัมสูตรหารด้วยจำนวนไฮดรอกไซด์ไอออนหรือจำนวนไฮโดรเจนอะตอมที่เบสนั้นทำปฏิกิริยาด้วย ส่วนน้ำหนักกรัมสมมูลของเกลือมีค่าเท่ากับน้ำหนักกรัมสูตรหารด้วยเวเลนซ์ทั้งหมดของไอออนบวกหรือลบของเกลือ นั้น [12][13]

4) โมแลลิตี โมแลลิตีเป็นการบอกความเข้มข้นของสารละลาย ด้วยอัตราส่วนน้ำหนักของตัวละลายต่อน้ำหนักตัวทำละลาย น้ำหนักของตัวละลายใช้เป็นโมล เช่นเดียวกับการบอกความเข้มข้นเป็นโมลาริตี โมแลล (m) คือ จำนวนโมลของตัวละลาย 1000 กรัม เช่น สารละลาย $2\text{m C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ หมายถึง สารละลายที่มี $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 2 โมล หรือ $(2 \times 180) = 360$ กรัม ในน้ำ 1000 กรัม หน่วยวัดเป็นโมแลลนี้ โดยปกติไม่นิยมใช้เพราะไม่สะดวกที่จะชั่งสารละลายของเหลว ซึ่งผู้วิจัยควรพิจารณาไม่ได้ มักใช้โมแลล เมื่อเราพูดถึงสมบัติบางประการของสารละลาย เช่น จุดเดือดสูงขึ้นหรือจุดเยือกแข็งต่ำกว่าของตัวทำละลายบริสุทธิ์ [13]

5) เศษส่วนโมล เป็นการบอกความเข้มข้นของสารละลายอีกวิธีหนึ่ง ได้แก่ การกล่าวเป็นเศษส่วนโมล คือ พูดยถึงจำนวนโมลของตัวละลายหรือของตัวทำละลายต่อจำนวนโมลทั้งหมดในสารละลาย [12]

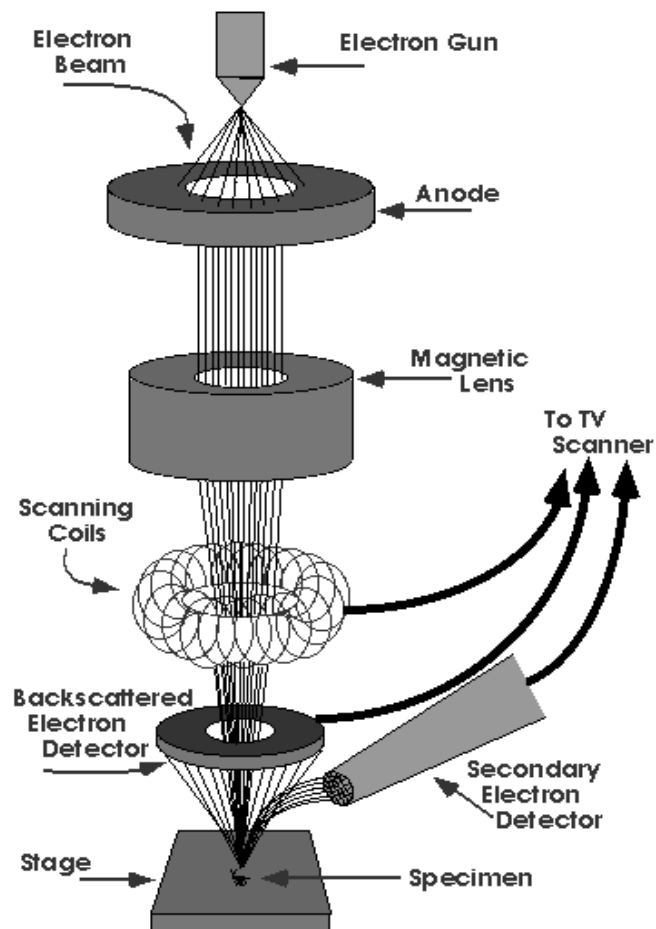
2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [15]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นเทคนิคเฉพาะทางที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติบางประการของสาร ที่มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แสง ทั้งนี้เป็นเพราะ SEM จะใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะได้ถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ทำให้ภาพมีความชัดลึกสูง นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น การวิเคราะห์การกระจายตัวรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectrometry, EDS) และเวฟเล็งธิดิสเพอร์ซีฟสเปกโตรเมตรี (Wavelength Dispersive Spectrometry, WDS) เพื่อให้ข้อมูลในเชิงเคมีด้วย



รูปที่ 2.14 ภาพแสดงอำนาจแยกแยะของ SEM [16]

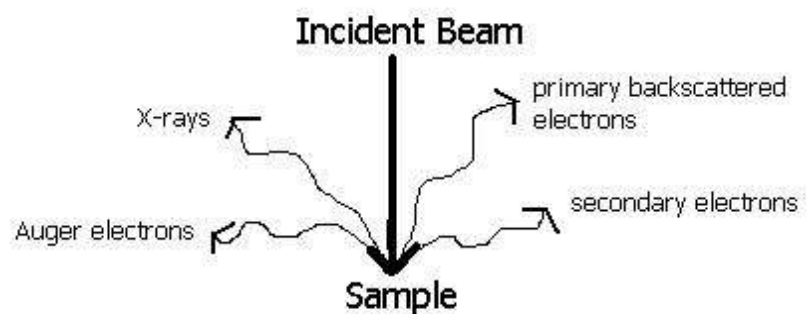
ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่อง SEM ในส่วนบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron source) หรือ ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งนับได้ว่าเป็นหัวใจของ SEM อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งภายในมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์ในช่วง 0-30 kV (บางครั้งเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดย แอพเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กันตามลักษณะการใช้งาน เลนส์คอนเดนเซอร์อันแรก (First condenser lens) อาจนับเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสูงสุดต่อการควบคุมทรานส์พอร์ตของอิเล็กตรอน (Electron optics) เนื่องจากเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง (Demagnification) ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้นทำหน้าที่โฟกัสอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิวของวัตถุเป้าหมายโดยคอยกราดภาพ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยม คล้ายกับการกราดภาพบนจอโทรทัศน์



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [16]

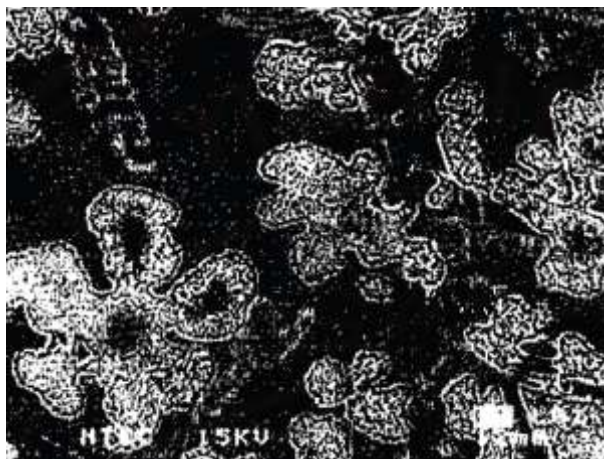
2.9.1 สัญญาณต่าง ๆ (Various types of signal)

สัญญาณแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสสาร และอันตรกิริยาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นตามมา แสดงดังรูปที่ 2.16



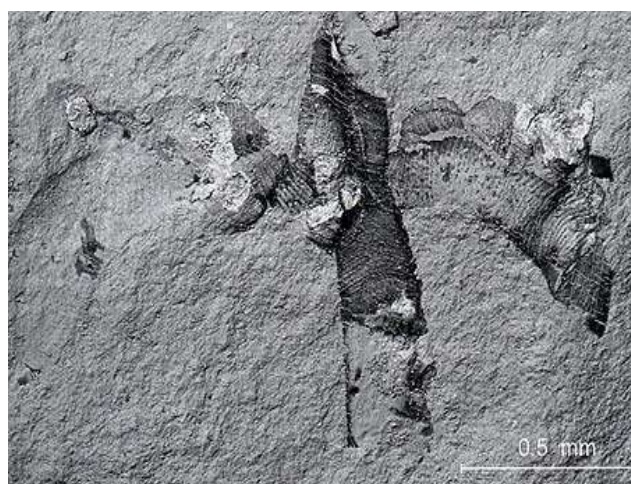
รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงสัญญาณต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร[16]

1) สัญญาณแบบอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron, SE) ให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิว และเป็นสัญญาณที่เรานำมาสร้างภาพมากที่สุด อิเล็กตรอนทุติยภูมิยังมีแบบย่อย ๆ อีกหลายแบบตามกลไกและแหล่งกำเนิด



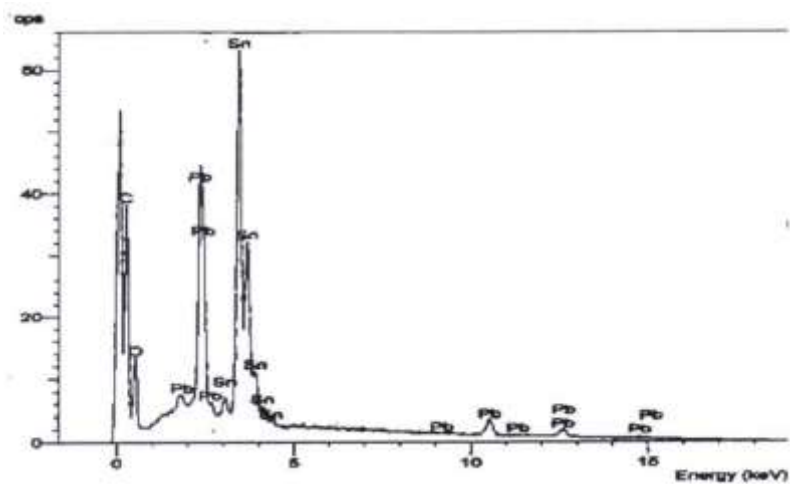
รูปที่ 2.17 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ [16]

2) สัญญาณแบบอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Back Scattered Electron, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมี และลักษณะโทโพกราฟฟีของพื้นผิว



รูปที่ 2.18 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ [16]

3) สัญญาณแบบเอ็กซ์เรย์ (X-ray) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของธาตุองค์ประกอบ เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDS และ WDS



รูปที่ 2.19 สเปกตรัมของเทคนิคเอนอร์จีดีสเพอร์ซีฟสเปกโทรเมตรี (EDS) แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตะกั่วบัดกรี ซึ่งประกอบด้วย ตะกั่ว (Pb) และดีบุก (Sn) [16]

2.10 การคำนวณน้ำหนักที่สูญเสียและอัตราการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบ [21]

2.10.1 การคำนวณน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ

น้ำหนักที่สูญเสีย คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่ลดลงหลังจากทำการทดสอบการกัดกร่อนโดยการจุ่มในน้ำแต่ละชนิด สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\text{น้ำหนักที่สูญเสีย (g)} = \text{น้ำหนักก่อนจุ่ม (g)} - \text{น้ำหนักหลังจุ่ม (g)} \quad (2.16)$$

2.10.2 การคำนวณอัตราการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบ

อัตราการกัดกร่อน หมายถึง ความหนาของชิ้นทดสอบที่ลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป หลังจากการจุ่มในน้ำต่างๆ

$$\text{อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)} = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad (2.17)$$

เมื่อ $K = \text{ค่าคงที่ } (8.76 \times 10^4)$

$T = \text{เวลา (ชั่วโมง)}$

$A = \text{พื้นที่ (ตารางเซนติเมตร)}$

$W = \text{น้ำหนักที่สูญเสีย (กรัม)}$

$D = \text{ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)}$

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.11.1 Almeida และ Morcillo [17] ศึกษาการเกิดการกัดกร่อนในรอยต่อของวัสดุเหล็กกล้าอิเล็กโทรกลวไนซ์ หรือเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีด้วยวิธีการทางไฟฟ้า โดยการทดสอบในสถานะพ่นน้ำเกลือ (Salt-spray) และทำการศึกษากลไกการเกิดการกัดกร่อนภายในรอยต่อภายหลังจากการพ่นน้ำเกลือเป็นระยะเวลาที่สั้น พบว่าคลอไรด์ไอออนจากภายนอกถูกดึงเข้าไปในรอยต่อของบริเวณที่ไม่มีออกซิเจนเพื่อทำให้เกิดความสมดุลภายในพื้นที่แคบ และก่อให้เกิดการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดกรดไฮโดรคลอริกภายในพื้นที่แคบๆ

2.11.2 Almeida และ Morcillo [18] ศึกษาการเกิดการกัดกร่อนในรอยต่อของวัสดุเหล็กกล้ากัลวานีล หรือเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี โดยการทดสอบในสถานะพ่นน้ำเกลือ และทำการศึกษากลไกการเกิดการกัดกร่อนภายในรอยต่อของระหว่างเหล็กกล้ากัลวานีล หลังจากทำการพ่นน้ำเกลือเป็นระยะเวลาที่สั้น พบว่ากลไกการเกิดการกัดกร่อนมีลักษณะเดียวกันกับรอยต่อของระหว่างเหล็กกล้าอิเล็กโทรกลวไนซ์ ภายในพื้นที่แคบๆ พบสังกะสีออกไซด์ก่อตัวขึ้น และพบการก่อตัวขึ้นของกรดไฮโดรคลอริกเช่นเดียวกับรอยต่อของระหว่างเหล็กกล้าอิเล็กโทรกลวไนซ์ อย่างไรก็ตามอัตราการเกิดการกัดกร่อนมีค่าน้อยกว่ารอยต่อของระหว่างเหล็กกล้าอิเล็กโทรกลวไนซ์

3.11.3 Almeida และ Morcillo [19] ศึกษาการเกิดการกัดกร่อนในรอยต่อของระหว่างวัสดุเหล็กกล้าอิเล็กโทรกลวไนซ์และเหล็กกล้ากัลวานีลโดยการทดสอบในสถานะพ่นน้ำเกลือ และทำการศึกษากลไกการเกิดการกัดกร่อนภายในรอยต่อของระหว่างวัสดุเหล็กกล้าอิเล็กโทรกลวไนซ์และเหล็กกล้ากัลวานีลหลังจากทำการพ่นน้ำเกลือเป็นระยะเวลาที่สั้น พบว่าการเกิดการกัดกร่อนภายในรอยต่อของระหว่างวัสดุเหล็กกล้าอิเล็กโทรกลวไนซ์และเหล็กกล้ากัลวานีลมีค่าที่แตกต่างกัน อัตราการกัดกร่อนมีค่าลดลงในด้านเหล็กกล้ากัลวานีลและเพิ่มขึ้นในด้านของเหล็กกล้าอิเล็กโทรกลวไนซ์ ปริมาณสังกะสีด้านเหล็กกล้าอิเล็กโทรกลวไนซ์มีการถูกใช้ที่มากกว่าเนื่องจากความแตกต่างกันของอนุกรมกัลวานิก

2.11.4 Chico และคณะ [20] ศึกษาการเกิดการกัดกร่อนในรอยต่อที่ใช้ในงานก่อสร้างระหว่างเหล็กกล้าเคลือบผิว เช่น เหล็กที่ผ่านการทาสี การจุ่มชุบเคลือบผิวสังกะสี โดยการทดสอบในสถานะพ่นน้ำเกลือในรอยต่อของ พบการกัดกร่อนที่มีความแตกต่างกัน พบว่าในรอยต่อของเหล็กกล้าเคลือบผิวด้วย 55%Al-Znการกัดกร่อนเกิดในบริเวณที่มีปริมาณของสังกะสีมากจนกระทั่งถึงผิวของเหล็กกล้าขณะที่บริเวณที่มีออกซิเจนไม่เกิดการกัดกร่อน ขณะที่ในรอยต่อของที่เคลือบด้วยผิวเคลือบผสมระหว่างโลหะและสารอินทรีย์ให้ค่าอัตราการกัดกร่อนปานกลางในสถานะปกติ อย่างไรก็ตามในสถานะที่มีการเร่งการทดลองการกัดกร่อนเริ่มเกิดในรอยต่อและขยายไปที่พื้นที่ที่ไม่ใช่รอยต่อของผิวเคลือบ