

## บทที่ 10

### การผุกร่อน

โดยทั่วไปการผุกร่อน หมายถึง การสูญเสียเนื้อโลหะโดยการเกิดปฏิกิริยากับ สิ่งแวดล้อมอาจจะเป็นปฏิกิริยาเคมีโดยอัตราการกัดกร่อนจะขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของตัว ทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ปัจจัยอื่น ๆ เช่น แรงกดและการกัดกร่อน (erosion) อาจจะเป็น ส่วนสนับสนุนต่อการเกิดการผุกร่อน (corrosion)

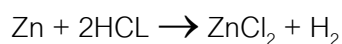
การผุกร่อนของวัสดุส่วนใหญ่จะเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี คือ เกิดการผุกร่อนโดยมี สารละลายที่เป็น electrolyte ร่วมอยู่ด้วย

การผุกร่อนจะเกิดขึ้นกับโลหะเท่านั้น เช่น การเกิดสนิมบนเหล็กซึ่งเป็นผลลัพท์ของ ปฏิกิริยาเคมีระหว่างเหล็กกับสิ่งแวดล้อมโดยโลหะที่ไม่ใช่เหล็กจะไม่เกิดสนิม วิศวกรจะต้องรู้ กลไกของการเกิดการผุกร่อน และต้องเข้าใจถึงสาเหตุและวิธีป้องกัน หรือวิธีลดการเสียหาย เนื่องจากการผุกร่อนให้น้อยที่สุด

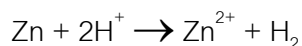
#### 10.1 Electrochemical Corrosion of Metals

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแตกต่างจากปฏิกิริยาเคมีทั่วไปในประเด็นที่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีมี การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโลหะไปสู่สิ่งแวดล้อม และมีการเปลี่ยนแปลงธาตุเป็น ion หรือ ion เป็นธาตุ

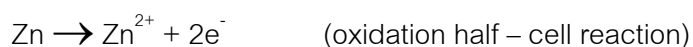
ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าการผุกร่อนส่วนใหญ่เกิดจาก electrochemical ซึ่งจำเป็นที่ว่าจะต้องเข้าใจหลักพื้นฐานของปฏิกิริยา electrochemical เช่น ปฏิกิริยาระหว่างสังกะสีกับกรด HCl



โดยสามารถเขียนเป็นสมการ ionic ได้ดังนี้

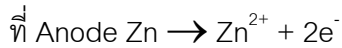


สมการประกอบไปด้วย two half – reactions คือ oxidation ของสังกะสี และ reduction ของ ไฮโดรเจน อีออน จากก๊าซไฮโดรเจน โดย half – cell reactions สามารถเขียนได้เป็น



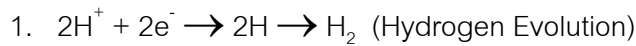
ข้อพิจารณาเกี่ยวกับปฏิกิริยา oxidation – reduction half cell คือ

1. Oxidation reaction จะเกิดขึ้นที่ขั้ว anode โดยจะมีการผลิต electron และอะตอมของโลหะ ซึ่ง anode จะเป็นเขตที่เกิดการผุกร่อนเพราะโลหะที่เป็น anode จะละลายเป็น positive ion ใน electrolyte และเคลื่อนที่ไปหา cathode ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

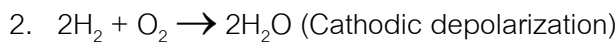


สังกะสีละลายกลายเป็น Zinc ion ใน electrolyte ส่วน electron จะเคลื่อนที่ในเนื้อโลหะจาก anode ไปสู่ cathode

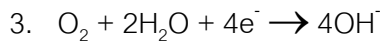
2. Reduction reaction จะเกิดขึ้นที่ขั้ว cathode โดยอาจจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้หลายอย่าง เช่น



ปฏิกิริยานี้มีการเกิดขึ้นในน้ำที่เป็นกรดมาก ๆ ไฮโดรเจนไอออนที่มีอยู่ในน้ำหรือกรด จะทำปฏิกิริยารวมตัวเป็นก๊าซโมเลกุลก๊าซที่เกิดขึ้นอาจจะเกาะตัวอยู่ในบริเวณ cathode ทำให้ไอออนอื่น ๆ ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปรับ  $\text{e}^-$  ได้อีก ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีก็จะหยุดชะงักลง (ไม่มี corrosion) ปรากฏการณ์อันนี้เรียกว่า polarization อย่างไรก็ตาม ปกติในน้ำหรือกรดที่สัมผัสกับอากาศจะมีออกซิเจนละลายปนอยู่เสมอ ดังนั้นออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนเกิดเป็นน้ำ



ด้วยเหตุนี้ น้ำที่ใช้ใน boiler จึงมักจะต้องไล่อากาศออกเสียก่อน (deaerate) หรือเติมสาร sulfite หรือ hydrazine ลงไป หรือขจัดออกซิเจนในน้ำให้หมดไป

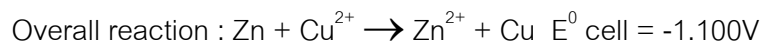
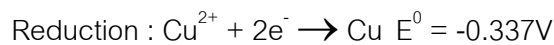
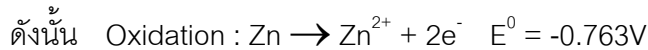


ปฏิกิริยานี้เรียกว่า oxygen reduction จะเกิดขึ้นตามปกติในน้ำธรรมชาติ ซึ่งไม่มีความเป็นกรดหรือด่างมากนัก

## 10.2 Types of Electrochemical Corrosion Cells

ขั้ว anode และ cathode ที่จะเกิดขึ้น อาจจะอยู่ติด ๆ กัน หรือห่างกันมาก ๆ ในโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ ลักษณะของเซลล์ที่จะเกิดขึ้น ได้แก่

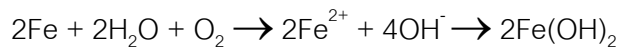
1. Two – metal cell (Galvanic cell) ขั้ว anode และ cathode เป็นโลหะต่างชนิดกัน โลหะที่มี E.P. (Electrode Potentials) ต่ำ จะเป็น anode และจะผุกร่อนไป ปริมาณการผุกร่อนเป็นอัตราส่วนกับปริมาณของกระแสที่ไหลและน้ำหนักอะตอมของธาตุ (Faraday's Law)



2. Single – metal cell ถึงแม้ว่าจะมีโลหะเพียงชนิดเดียวอาจจะเกิด anode และ cathode ขึ้นได้ เพราะโลหะที่ใช้ในอุตสาหกรรม มักจะไม่ใช้โลหะบริสุทธิ์ (ซึ่งอาจจะเป็นเพราะโลหะบริสุทธิ์มีราคาแพงเกินไป หรือมีความแข็งแรงน้อยกว่าโลหะผสม) ตัวอย่างเช่น เหล็กจะมี iron carbide หรือ structure ต่าง ๆ ชนิดของเหล็กปะปนอยู่ หรือแม้แต่ในเนื้อโลหะที่บริสุทธิ์เองตามบริเวณขอบเกรน การเรียงตัวของอะตอมก็ไม่สมบูรณ์ คือ มีจุด dislocations ต่าง ๆ ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (heterogeneity) ในเนื้อโลหะเหล่านี้จะทำให้เกิดขั้วของ corrosion ขึ้นได้ โดยตามบริเวณของเกรนจะเป็น anode



Overall reaction :



precipitate

3. Concentration Cell แม้อันเนื้อโลหะที่ homogeneous จริง ๆ การผุกร่อนก็อาจจะเกิดขึ้นได้ เนื่องจาก electrolyte ที่สัมผัสกับโลหะมีความเข้มข้นแตกต่างกัน เราอาจจะสร้างเซลล์ไฟฟ้าขึ้นได้ โดยเอา iron electrodes 2 อัน โดยอันแรกจุ่มในสารละลาย  $\text{Fe}^{2+}$  ที่เจือจาง (0.001 M) และอีกอันจุ่มในสารละลาย  $\text{Fe}^{2+}$  ที่เข้มข้น (0.01M) โดยถูกกันไว้ด้วย Porous membrane ที่น้ำซึมผ่านได้

$$E_{\text{Fe}^{2+}} = E^0 + 0.0296 \log C_{\text{ion}}$$

$$\text{สำหรับ } 0.001\text{M solution : } E_{\text{Fe}^{2+}} = -0.440\text{V} + 0.0296 \log 0.001 = -0.529\text{V}$$

(anode)

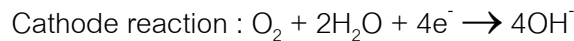
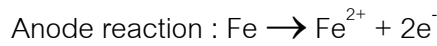
$$\text{สำหรับ } 0.01\text{M solution : } E_{\text{Fe}^{2+}} = -0.440\text{V} + 0.0296 \log 0.01 = -0.499\text{V}$$

(cathode)

จะปรากฏว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลในแท่งเหล็กนั้น โดยขั้วที่เจือจางจะเป็น anode

4. Oxygen – Concentration Cell จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความแตกต่างของ oxygen เข้มข้นบนผิวของโลหะที่ขึ้นที่สามารเกิด oxidize ได้ Oxygen – Concentration Cell จะเป็นการผุกร่อนที่สำคัญสำหรับโลหะที่เกิด oxidize ได้ง่าย เช่น เหล็กที่ไม่ได้มีการสร้าง film ที่ป้องกันการเกิด oxides

Oxygen Concentration Cell ประกอบด้วย iron electrodes จำนวน 2 แท่ง อันแรกจุ่มอยู่ใน electrolyte ของน้ำที่มี  $\text{O}_2$  ละลายอยู่น้อย อันที่เหลือนจุ่มใน electrolyte ของน้ำที่มี  $\text{O}_2$  ละลายอยู่มาก



Corrosion cell อาจจะได้โดยสาเหตุอื่น ๆ เช่น เกิดจากการผ่านกระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปในโลหะจุดที่กระแสไฟฟ้าไหลออกจะเป็น anode หรือเกิดจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันในโลหะปลายที่ร้อนจะเป็น anode

### 10.3 Type of Corrosion

ชนิดของการผุกร่อนสามารถที่จะแบ่งออกได้โดยอาศัยรูปที่มองเห็นของโลหะที่ผุกร่อน โดยที่การผุกร่อนหลาย ๆ ชนิด สามารถที่จะชี้เฉพาะได้ดังนี้

10.3.1 Uniform or General Attack Corrosion เป็นแบบธรรมดาที่สุดของ electrochemical cell การผุกร่อนมีทั่วไปตลอดผิวที่ติดกับ electrolyte โลหะจะบางลงทุกที่จนกระทั่งใช้งานไม่ได้ การผุกร่อนแบบนี้ ถึงแม้จะทำความเสียหายมาก แต่ในแง่วิศวกรรมไม่ถือเป็นปัญหาเพราะการผุกร่อนเป็นไปด้วยอัตราที่คงที่ เราสามารถประมาณอายุการใช้งานของโลหะได้โดยการตรวจสอบง่าย ๆ ตลอดจนสามารถควบคุมได้ง่ายด้วย

การป้องกันและการแก้ไข

- เลือกใช้วัสดุอื่นที่เหมาะสมกว่า
- ใช้สารยับยั้ง (Inhibitor)
- การชุบเคลือบผิวโลหะและการฉาบผิวโลหะด้วยสารอื่น (Coatings)

10.3.2 Galvanic or Two – Metal Corrosion การผุกร่อนแบบนี้ต้องมีโลหะ 2 ชนิด ประกอบกันเป็นเซลล์ไฟฟ้าโดยโลหะที่เป็น anode จะผุกร่อนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การผุกร่อน อาจเกิดเฉพาะจุดหรือมีอาณาเขตกว้างขวางก็ได้

สิ่งที่ควรจำก็คือ

- ก. ในโครงสร้างที่มีโลหะ 2 ชนิดอยู่ติดกัน ควรมีฉนวนกัน
- ข. ถ้าไม่มีฉนวนและจำเป็นจะต้องใช้โลหะต่างชนิดกัน โลหะที่มี E.P. ต่ำ และเป็น anode ต้องมีพื้นที่มากเมื่อเทียบกับ cathode

Effect of Area on Galvanic Corrosion of Iron  
Coupled to Copper in 3% Sodium Chloride

| Relative areas |       |                      |
|----------------|-------|----------------------|
| Cathode        | Anode | Anode (iron) loss, g |
| 1.01           | 1     | 0.23                 |
| 2.97           | 1     | 0.57                 |
| 5.16           | 1     | 0.79                 |
| 8.35           | 1     | 0.94                 |
| 11.6           | 1     | 1.09                 |
| 18.5           | 1     | 1.25                 |

สาเหตุที่ต้องมีพื้นที่ anode มาก ก็เพราะการผุกร่อนแบบนี้เป็นไปตามกฎของ Faraday ที่ว่า การผุกร่อนเป็นไปตามปริมาณกระแสที่ไหล ถ้าพื้นที่ anode เล็ก ค่าความหนาแน่นของกระแสจะมีมาก การผุกร่อนจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว ตรงข้ามกับ anode ที่มีพื้นที่มาก การผุกร่อนก็จะกระจายไปทั่ว อายุการใช้งานก็จะนานขึ้น

10.3.3 Pitting Corrosion การผุกร่อนเป็นแบบรูลึกลงไปโลหะ ปริมาณโลหะที่ถูกกัดกร่อนไปเป็นส่วนเล็ก และโลหะส่วนที่ดีก็มีอยู่มาก แต่ชิ้นส่วนอาจจะใช้ไม่ได้ เพราะร้าวหรือทะลุเสียแล้ว การผุกร่อนแบบนี้เป็นแบบที่จะทำให้เกิดความเสียหายได้มาก การตรวจสอบหรือทดลองก็ทำได้ยาก บางคราวปากรูอาจจะเล็กนิดเดียวจนแทบมองไม่เห็น แต่ข้างในเป็นโพรงใหญ่ก็มี

Pitting มักจะเกิดในสภาพน้ำนิ่ง โดยสาเหตุที่ทำให้เกิด คือ

- ก. เกิดจาก concentration cell ตามบริเวณปะเก็นใต้หัวหมุด ตามมุมอับต่าง ๆ เมื่อเกิดการผุกร่อน สนิมหรือวัตถุแปลกปลอมอื่น ๆ จะช่วยกันให้ concentration ระหว่าง anode กับ cathode ต่างกันมากขึ้น การผุกร่อนจะดำเนินไปเป็นจุด ๆ ลึกลงไปในโลหะมากขึ้นทุกที
- ข. เกิดในน้ำที่มี chloride อยู่ เช่น น้ำทะเลส่วนมากมักจะเกิดกับ aluminum หรือ stainless steel ซึ่งเป็นโลหะที่อาศัย passivation ในรูปของ oxide film ตามผิว เพื่อป้องกันการผุกร่อน ถ้าผิว oxide film เกิดเป็นรูขึ้นมา โลหะที่จุดนั้นก็จะผุกร่อนได้ง่าย ยิ่งถ้าอยู่ในสภาพน้ำนิ่ง ปริมาณออกซิเจนในน้ำก็อาจจะมีน้อย ทำให้เกิดการ oxide film เพื่อป้องกันผิวเป็นไปได้น้อย ฉะนั้น โลหะจะ pit เป็นรูได้ง่าย ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำถ่ายเทไปมาอยู่เสมอ แต่ น้ำมีความเร็วไม่มากนัก โอกาสที่โลหะจะมี oxide film เพื่อทำให้ผิวเป็น passive ก็มีมากขึ้น pitting ในลักษณะนี้ไม่จำเป็นต้องเกิดตามมุมอับเลย

การป้องกันและแก้ไข

- กรรมวิธีป้องกันและแก้ปัญหาการผุกร่อนแบบ concentration cell จะช่วยผ่อนคลายการผุกร่อนทาง pitting ด้วยเสมอ
- ไม่ควรนำโลหะที่เกิด pitting ได้ง่าย หรือมีแนวโน้มอย่างชัดว่าจะเกิด pitting ไปใช้ผลิตเป็นอุปกรณ์โรงงาน
- โลหะบางชนิดมีความสามารถต้านทานต่อการเกิด pitting ได้ดีกว่าโลหะอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนจากเหล็กสแตนเลส ชนิด 18 – 8 ที่มีโมลิบดีนัม 2% เป็นเหล็กสแตนเลส ชนิด 316 จะทำให้ความต้านทานการเกิด pitting เพิ่มขึ้นอย่างมากมาย การเติมโลหะโมลิบดีนัมช่วยเพิ่มความสามารถในการป้องกัน ซึ่งเป็นผลมาจาก passive surface มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นมากนั่นเอง เหล็กสแตนเลส 304 (18-8) กับ 316 จึงมีพฤติกรรมที่ต่างกันมาก ชนิด 304 จัดว่าไม่เหมาะในการใช้งานกับน้ำทะเล แต่ชนิด 316 ใช้งานในน้ำทะเลได้ดี

■ การใช้สารยับยั้ง (inhibitors) เดิมลงไปในเรื่องแวดล้อมที่อาจจะก่อให้เกิด pitting ได้ง่าย ซึ่งสารยับยั้งนี้คือ สารเคมีที่เข้าไปขัดขวางไม่ให้องค์ประกอบหลังของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นครบถ้วนทั้ง 3 ประการ ในเวลาเดียวกัน ดังนั้น corrosion จึงไม่เกิดขึ้น

10.3.4 Intergranular and knife-line attack การผุกร่อนแบบนี้มักจะเกิดกับ stainless steel Type 18-8 (คือ โครเมียม 18% นิกเกิล 8%) ที่ได้รับ heat treatment มาไม่ถูกต้อง ถ้า 18-8 Stainless steel ถูกทำให้ร้อนระหว่าง 510 – 760°C เช่น ในการเชื่อมเป็นเวลานานพอสมควร (เรียกว่า Sensitization) โครเมียมในเหล็กจะทำปฏิกิริยากับ carbon เป็น chromium carbide ตกตะกอนมาอยู่ตามบริเวณขอบ grain ฉะนั้น ปริมาณของโลหะโครเมียมตามบริเวณใกล้ ๆ ขอบ grain จะมีน้อยกว่าปกติ โดยที่เหล็กชนิดนี้อาศัยโครเมียมเป็นตัวป้องกันการผุกร่อน (เพราะเกิดเป็น Chromium oxide film ป้องกันผิว) ถ้าตามขอบ grain มีโครเมียมเมื่อใช้งานในน้ำหรือกรด ก็จะเกิดการผุกร่อนโดย eletrochemical corrosion cells ได้โดยรวดเร็วตามบริเวณนั้น บางคราวเนื้อเหล็กถึงกับร่อนหล่นลงมาเป็นเม็ด ๆ วิธีป้องกันก็คือ ต้องเผาเหล็กชนิดนี้ให้ร้อนถึง 1010 – 1120°C เพื่อให้ chromium carbide กลับคืนมาเป็นโครเมียมดั้งเดิม แล้วทำให้เย็นผ่านช่วง sensitization temp (510 – 760°C) โดยเร็ว

การป้องกันและแก้ไขปัญหา Intergranular Corrosion

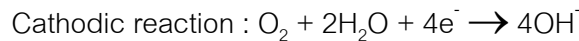
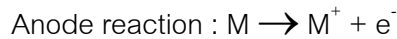
■ ทำให้เหล็กสเตนเลสที่ร้อนถึงอุณหภูมิ 1065 – 1120°C แล้วทำให้เย็นโดยเร็ว ตะกอนโครเมียมคาร์ไบด์ จะละลายและการทำให้เย็นโดยเร็วทำให้ไม่มีเวลาพอที่จะเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ใหม่

■ ใส่โลหะอื่นที่รวมตัวกับคาร์บอน เป็นคาร์ไบด์ได้ดีกว่าโครเมียม เช่น Nb, Ta, Ti ในปริมาณมากพอที่จะรวมตัวกับคาร์บอนในเหล็กแล้วทำให้ไม่เกิดโครเมียมคาร์ไบด์

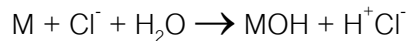
■ ใช้เหล็กสเตนเลสที่มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.03% ที่เรียกว่า knife-line attack ก็เพราะว่าการผุกร่อนแบบ intergranular corrosion นี้ เกิดขึ้นกับเหล็กสเตนเลสที่มีโลหะจำพวก Nb, Ta, Ti เจืออยู่ด้วยโดยเฉพาะ ซึ่งเราเรียกว่าเป็นเหล็กสเตนเลสที่มีโลหะที่ถูก stabilized เพื่อป้องกันปัญหา intergranular corrosion แต่บางครั้งยังค้นพบว่า Nb, Ta, Ti ประสิทธิภาพล้มเหลวในการทำหน้าที่แย่งคาร์บอนมารวมตัวเป็นคาร์ไบด์ ทำให้ยังคงเกิดตะกอนโครเมียมคาร์ไบด์ได้ แต่การผุกร่อนที่เกิดขึ้นมีลักษณะเด่นเป็นพิเศษคือ เกิดเป็นแนวแคบมากจนมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังนั้นโลหะจะขาดออกจากกันเหมือนถูกตัดด้วยมีด

การป้องกันและหลีกเลี่ยงปัญหา knife-line attack คือ การอบเหล็กสแตนเลสขึ้นให้ร้อนประมาณ 1065 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่โครเมียมคาร์ไบด์ละลายเข้าสู่เนื้อเกรน แต่เกิดตะกอนไนโอเบียมคาร์ไบด์ (หรือคาร์ไบด์ของ Ta, Ti) ขึ้น ทำให้มีความต้านทานต่อทั้ง knife-line attack และ Intergranular Corrosion แบบทั่ว ๆ ไป

10.3.5 Crevice Corrosion เป็นรูปแบบของ electrochemical corrosion ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในรอยแยก รอยร้าว และภายใต้เกราะป้องกันผิวที่มีสารละลาย (นิ่ง) อยู่ Crevice corrosion มีความสำคัญทางด้านวิศวกรรม เมื่อมันเกิดขึ้นภายใต้ประเก็น rivets และ bolts ซึ่งอยู่ระหว่าง valve disks และ seats ซึ่ง Crevice corrosion เกิดขึ้นในโลหะผสม เช่น stainless steels และ titanium, aluminum และ copper alloys



เมื่อ balance ประจุด้วยคลอไรด์ไอออน



การป้องกัน

- ใช้การเชื่อมแทนที่การใช้ riveted หรือ bolted ในโครงสร้างทางวิศวกรรม
- ออกแบบภาชนะที่มีรูระบาย เพื่อป้องกันการสะสมตัวของสารละลาย
- ใช้ประเก็นที่ไม่ดูดซับสารละลาย เช่น Teflon

10.3.6 Erosion Corrosion แบบนี้ มักจะมีให้เห็นได้มากในเครื่องจักร หรืออุปกรณ์ที่ต้องใช้กับน้ำหรือในของเหลวที่มีความเร็วสูง เช่น ใบพัดของเครื่องสูบน้ำ ข้อเสี้ยวของท่อ ฯลฯ การผุกร่อนเป็นไปด้วยเหตุ 2 อย่างร่วมกัน คือ electrochemical corrosion ธรรมดา และจากแรงกระแทกของน้ำหรือผงอื่น ๆ ที่มากับน้ำ โลหะบางชนิดอาจจะทนกับสภาพน้ำนิ่งได้ดี เพราะมี oxide film เกิดขึ้น แต่เมื่ออยู่ในสภาพน้ำไหลแรงหรือมีแรงกระแทกต่าง ๆ oxide film จะถูกทำลายไป โลหะก็จะผุกร่อนโดยเร็ว วิธีป้องกันก็คือ ต้องเลือกโลหะโดยตรวจสอบความคงทนของมันในสภาพที่มีการเคลื่อนไหวจริง ๆ

10.3.7 Dezincification แบบนี้เกิดกับทองเหลือง โดยเฉพาะมักเกิดกับทองเหลืองที่ใช้งานในน้ำเค็ม สังกะสีในทองเหลืองจะถูกละลายไปเหลือทองแดง ทำให้ทองเหลืองจะมีลักษณะพรุน ทำให้ขาดความแข็งแรง จะสังเกตได้ง่ายเพราะส่วนที่ถูก dezincification จะมีสีคล้ายทองแดง วิธีป้องกันก็คือ ต้องใช้ทองเหลืองซึ่งมีดีบุก antimony, arsenic, phosphorus

ปนอยู่บ้าง เช่น admiralty metal (1% tin, 29% zinc, 70% copper) เป็นทองเหลืองที่ใช้งานในน้ำทะเลโดยเฉพาะ

ปรากฏการณ์ที่ธาตุหนึ่งในโลหะผสมถูกกัดละลายออกไป เหลือแต่อีกธาตุหนึ่งอย่างนี้ไม่ได้เกิดเฉพาะแต่กับทองเหลืองเท่านั้น โลหะผสมอย่างอื่น ๆ ก็อาจจะเกิดได้เช่นกัน

10.3.8 Stress Corrosion การผุกร่อนแบบนี้เป็นผลของ corrosion รวมกับ stress ในเนื้อโลหะ Stress มี 2 แบบ คือ Stress ภายนอกที่กระทำกับโลหะเนื่องจากการใช้งาน และ Stress ภายในเนื้อโลหะเนื่องจากการขึ้นรูปโลหะหรือการเชื่อม

การเกิด Stress Corrosion มักเริ่มจาก corrosion ที่จุดใดจุดหนึ่งบนผิวโลหะแบบ pitting ซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นของ Stress Corrosion ที่ก้นของ pit จะมี stress เพิ่มขึ้นมาก จนทำให้โลหะแยกออกจากกันได้ โลหะก็จะขาดต่อไปอีกโดยเร็ว เพราะมี stress ในเนื้อโลหะอยู่แล้ว ตัวอย่างเช่น ปลอกกระสุนทองเหลืองซึ่งถูก cold working มาก ๆ อาจเกิด stress corrosion ขึ้นได้โดยเฉพาะเมื่อถูกกับแอมโมเนีย

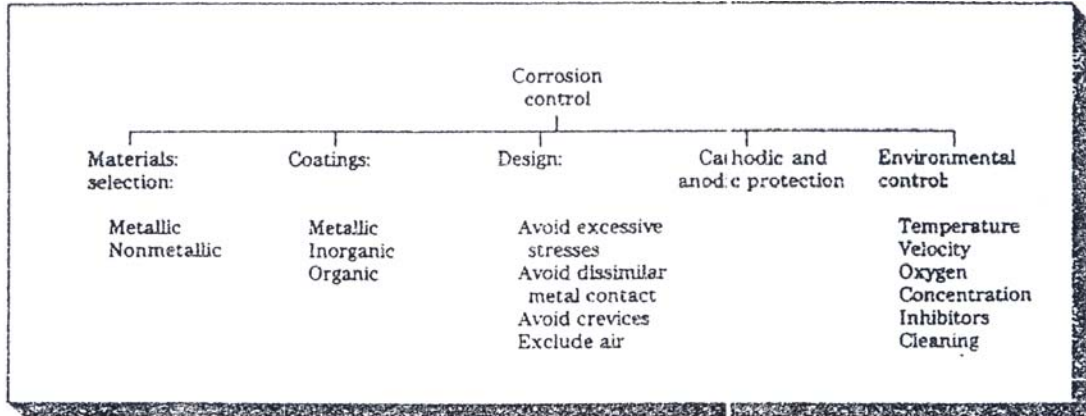
การป้องกันและการแก้ไข

- การอบโลหะที่อุณหภูมิสูง เพื่อคลายความเครียด และลด stress ในเนื้อโลหะ (Stress Relief)
- ลดความรุนแรงของสิ่งแวดล้อมโดยรอบโลหะนั้น เช่น ลดอุณหภูมิ ลดความเข้มข้นของสาร และการใช้สารยับยั้ง

10.3.9 Fretting corrosion การผุกร่อนแบบนี้เป็น corrosion ที่เกิดจากการขัดสี ซึ่งไม่เกี่ยวกับทฤษฎี electrochemical cell เลย ตัวอย่างเช่น ที่เพลาล้อรถที่จอดอยู่นาน ๆ (เช่น อยู่บนเรือเดินทะเล) ตรงที่เพลากับแบร็ง จะมีการขยับตัวเคลื่อนไหวเพียงเล็กน้อยอยู่เสมอ การขัดสีระหว่างผิวทั้งสองจะทำให้อนุภาคของเหล็กหลุดออกมา และถูก oxidized โดยอากาศเป็นเหล็กออกไซด์ ยิ่งถ้ามีน้ำหนักกด การผุกร่อนก็จะมีมากยิ่งขึ้น การหล่อลื่นด้วยน้ำมันจะช่วยลดปริมาณการผุกร่อนลงได้บ้างแต่ไม่หมด วิธีป้องกันที่แท้จริงก็คือ ต้องไม่ให้มีการขยับเขยื้อน หรือขัดสีกันระหว่างผิวทั้งสอง หรือมิฉะนั้นก็ให้มีการเคลื่อนไหวมาก ๆ ไปเลย

## 10.4 Prevention and Maintenance against Corrosion

การป้องกันและบำรุงรักษาเครื่องจักร อุปกรณ์ต่าง ๆ ไม่ให้ผุกร่อนไปโดยเร็ว อาจจะทำให้ได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับราคา และสภาพสิ่งแวดล้อมที่มีอยู่ วิธีที่ใช้โดยทั่วไป ได้แก่



### 10.4.1 Alloying or Using Better Corrosion resistant Materials

วิธีนี้ใช้กันกว้างขวางในอุตสาหกรรมเคมีซึ่งมักจะมีการผุกร่อนรุนแรงจนเหล็กธรรมดา หรือ steel ทนทานไม่ได้ จำเป็นต้องใช้โลหะผสมชนิดอื่น ๆ แทน ตัวอย่างเช่น ใช้ stainless steel กับ nitric acid ใช้ nickel หรือ high nickel alloy กับสภาพที่เป็นด่างรุนแรง เป็นต้น ในหนังสือคู่มือต่าง ๆ ทางเคมี หรือทาง Chemical Engineering มักจะมีตารางบอกไว้ว่าโลหะชนิดใดควรจะเข้ากับสภาพ corrosion อย่างไรก็ดีควรระวังว่าตารางประเภทนี้จะบอกความคงทนของโลหะต่อสภาพ corrosion โดยประมาณเท่านั้น ก่อนที่จะใช้โลหะชนิดใด ควรจะได้มีการทดลองโลหะนั้น ๆ ในสภาพที่ใกล้เคียงกับความจริงเสียก่อน stainless steel ในสภาพปกติ อาจจะทนต่อกรด  $\text{HNO}_3$  เป็นอย่างดี แต่ถ้าเหล็ก stainless นี้ได้รับการ sensitization คือ ถูกเผาให้ร้อนจาก  $900 - 1400^\circ\text{C}$  เช่น ในการเชื่อมเหล็กประเภทนี้ จะผุกร่อนได้โดยรวดเร็ว โดยเกิด intergranular corrosion

### 10.4.2 Cathodic Protection

วิธีนี้อาศัยหลักที่ว่า anode เท่านั้นที่จะผุกร่อน ฉะนั้นถ้าหาโลหะอื่นที่มี E.P. ต่ำ ราคาถูกมาเป็น anode และยอมให้โลหะนี้ผุกร่อนแทนเครื่องอุปกรณ์ที่มีราคาแพงได้ ก็เป็นวิธีรักษาเครื่องอุปกรณ์แบบหนึ่ง ตัวอย่างเช่น ท่อน้ำมันที่ฝังในดิน เราอาจจะใช้โลหะอื่น ๆ เช่น สังกะสี aluminum ฯลฯ ต่อกับท่อเพื่อให้โลหะเหล่านี้ทำหน้าที่เป็น anode และผุกร่อนไป ส่วนตัวท่อ ซึ่งเป็น cathode จะไม่มีการผุกร่อน ในบางคราวเราอาจจะต้องผ่านกระแสจาก

ภายนอกเข้าไปในโลหะด้วย เพื่อบังคับให้ส่วนที่เราต้องการป้องกันทำหน้าที่เป็น cathode จริง ๆ (ส่วนที่กระแสไฟฟ้าไหลออกไปสู่ electrolyte คือ ส่วนที่จะเป็น anode) เหล็กชุบสังกะสีก็เป็นตัวอย่างหนึ่งของ cathodic protection ในกรณีที่มีแผ่นเหล็กถูกขีดข่วนหรือทะลุเป็นรูสังกะสี ซึ่งมี E.P. ต่ำ จะทำหน้าที่เป็น anode ป้องกันเนื้อเหล็กซึ่งเป็น cathode ได้พอสมควร

#### 10.4.3 Metallic and Inorganic Coating

เราอาจจะป้องกันเนื้อโลหะโดยการฉาบผิวด้วยโลหะอื่น เช่น ชุบโครเมียม nickel ฯลฯ ซึ่งมีความคงทนดีกว่า จุดประสงค์ของวิธีนี้ก็เพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งแวดล้อมที่ผู้กร่อนเข้ามาสัมผัสกับเนื้อโลหะได้ coating อาจจะเป็นสารอโลหะ เช่น กระเบื้องเคลือบก็ได้

#### 10.4.4 Organic Coating

ป้องกันโดยฉาบผิวด้วยสี ยางแอสฟัลท์ ฯลฯ อย่างไรก็ตามสีที่ทาบนโลหะจะไม่สามารถป้องกันการผุกร่อนไปทั้งหมด เพราะสีทุกชนิดจะมีรูพรุนขนาด microscopic อยู่บาง ๆ รูเล็ก ๆ เหล่านี้จะทำให้เกิดการผุกร่อนขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ในกรณีที่มีโลหะ 2 ชนิดอยู่ติดกัน สิ่งที่ต้องพิจารณาที่สำคัญก็คือ ควรจะต้องทาสีคลุมให้หมด ทั้งโลหะที่มี E.P. ต่ำ และโลหะที่มี E.P. สูง หรือถ้าจำเป็นควรจะทำกับโลหะที่มี E.P. สูง คือ โลหะที่ noble กว่าเท่านั้น ตัวอย่างในเรื่องนี้ก็คือ ถังเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งมีการผุกร่อนมาก เพื่อป้องกันการผุกร่อน เจ้าของโรงงานจึงสร้างถังโดยบุกกันถัง (ซึ่งยังเป็นเหล็กธรรมดา) แต่ไม่ทาสีกับ stainless steel ด้วย เพราะเข้าใจว่า stainless สามารถทนต่อการผุกร่อนได้ดีอยู่แล้ว ปรากฏว่าเมื่อใช้งาน ถังใบนี้เกิดผุกร่อนขึ้นตามด้านข้าง (ซึ่งเป็นเหล็กธรรมดาทาสีกับ) อย่างรวดเร็ว จนทะลุภายในเวลา 3 เดือน สาเหตุที่เป็นดังนี้เพราะสีที่ใช้ทาทุกชนิดจะมีรูพรุนอยู่บ้าง ทำให้น้ำยาเข้าสัมผัสกับเหล็ก เหล็กก็จะทำหน้าที่เป็น anode และมีแผ่น stainless ที่กันถังเป็น cathode ในกรณีนี้ anode มีขนาดพื้นที่เล็กมาก เทียบกับพื้นที่ cathode การผุกร่อนซึ่งเป็นแบบ pitting จึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว วิธีป้องกันที่ถูกควรจะเป็นทาสีกับที่ stainless steel เท่านั้น หรือไม่ก็ทาสีกับหมดทั้งถัง

#### 10.4.5 Metal Purification

โลหะบริสุทธิ์จะมีอำนาจต้านทานการผุกร่อนได้ดีกว่าโลหะผสม อย่างไรก็ตามโลหะบริสุทธิ์มักจะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าโลหะผสม ฉะนั้นวิธีนี้จึงใช้ได้เฉพาะกรณีพิเศษเท่านั้น เช่น ใช้ aluminum บริสุทธิ์ 99% ในอุปกรณ์ที่ต้องสัมผัสกับ hydrogen peroxide ถ้า aluminum มีสารอื่นปน การผุกร่อนจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว

#### 10.4.6 Altenation of Environment




คือ แก๊ซสภาพสิ่งแวดล้อมให้มีอำนาจกัดกร่อนน้อยลง โดยการใช้สารยับยั้ง (inhibitors) ตัวอย่างเช่น เต็มสารประเภท sulfite ลงในน้ำที่จะใช้ใน steam boiler เพื่อขจัด ออกซิเจน เป็นการป้องกันการ ผุกร่อนโดยออกซิเจนใน boiler วิธีหนึ่ง

#### 10.4.7 Use of Non-Metallics

กรณีที่ไม่มีโลหะที่จะทนต่อสภาพการผุกร่อนได้ เราอาจจะต้องใช้สารอโลหะ

-----๑๐๑๐๑๐๑๐๑๐๑๐-----

| หนังสืออิเล็กทรอนิกส์    |                               |
|--------------------------|-------------------------------|
| ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(   | ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)          |
| ฟิสิกส์ 2                | กลศาสตร์เวกเตอร์              |
| โลหะวิทยาฟิสิกส์         | เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1          |
| ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(       | แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C     |
| ฟิสิกส์พิศวง             | สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต |
| ทดสอบออนไลน์             | วิดีโอการเรียนการสอน          |
| หน้าแรกในอดีต            | แผ่นใสการเรียนการสอน          |
| เอกสารการสอน PDF         | กิจกรรมการทดลองทางวิทยาศาสตร์ |
| แบบฝึกหัดออนไลน์         | สุดยอดสิ่งประดิษฐ์            |
| การทดลองเสมือน           |                               |
| บทความพิเศษ              | ตารางธาตุ(ไทย1) 2 (Eng)       |
| พจนานุกรมฟิสิกส์         | ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์        |
| ธรรมชาติมหัศจรรย์        | สูตรพื้นฐานฟิสิกส์            |
| การทดลองมหัศจรรย์        | ดาราศาสตร์ราชมงคล             |
| แบบฝึกหัดกลาง            |                               |
| แบบฝึกหัดโลหะวิทยา       | แบบทดสอบ                      |
| ความรู้รอบตัวทั่วไป      | อะไรเอ่ย ?                    |
| ทดสอบ)เกมเศรษฐี(         | คดีปริศนา                     |
| ข้อสอบเอนทรานซ์          | เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์          |
| คำศัพท์ประจำสัปดาห์      |                               |
| ความรู้รอบตัว            |                               |
| การประดิษฐ์ของโลก        | ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์     |
| นักวิทยาศาสตร์เทศ        | นักวิทยาศาสตร์ไทย             |
| ดาราศาสตร์พิศวง          | การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์  |
| การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ |                               |

|  <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต</b>          |   |
|---|---|
| 1. การวัด   | 2. เวกเตอร์                                   |
| 3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ  | 4. การเคลื่อนที่บนระนาบ                       |
| 5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน   | 6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน        |
| 7. งานและพลังงาน  | 8. การดลและโมเมนตัม                           |
| 9. การหมุน  | 10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง                    |
| 11. การเคลื่อนที่แบบคาบ   | 12. ความยืดหยุ่น                              |
| 13. กลศาสตร์ของไหล  | 14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน |
| 15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก  | 16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร               |
| 17. คลื่น   | 18. การสั่น และคลื่นเสียง                     |
|  <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต</b>          |   |
| 1. ไฟฟ้าสถิต  | 2. สนามไฟฟ้า                                  |
| 3. ความกว้างของสายฟ้า   | 4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน            |
| 5. ศักย์ไฟฟ้า   | 6. กระแสไฟฟ้า                                 |
| 7. สนามแม่เหล็ก   | 8. การเหนี่ยวนำ                               |
| 9. ไฟฟ้ากระแสสลับ   | 10. ทรานซิสเตอร์                              |
| 11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ  | 12. แสงและการมองเห็น                          |
| 13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ   | 14. กลศาสตร์ควอนตัม                           |
| 15. โครงสร้างของอะตอม   | 16. นิวเคลียร์                                |
|  <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป ผ่านทางอินเทอร์เน็ต</b>  |   |
| 1. จลศาสตร์ (kinematic)   | 2. จลพลศาสตร์ (kinetics)                      |
| 3. งานและโมเมนตัม   | 4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง            |
| 5. ของไหลกับความร้อน  | 6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า                     |
| 7. แม่เหล็กไฟฟ้า  | 8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง                   |
| 9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์  |   |

