

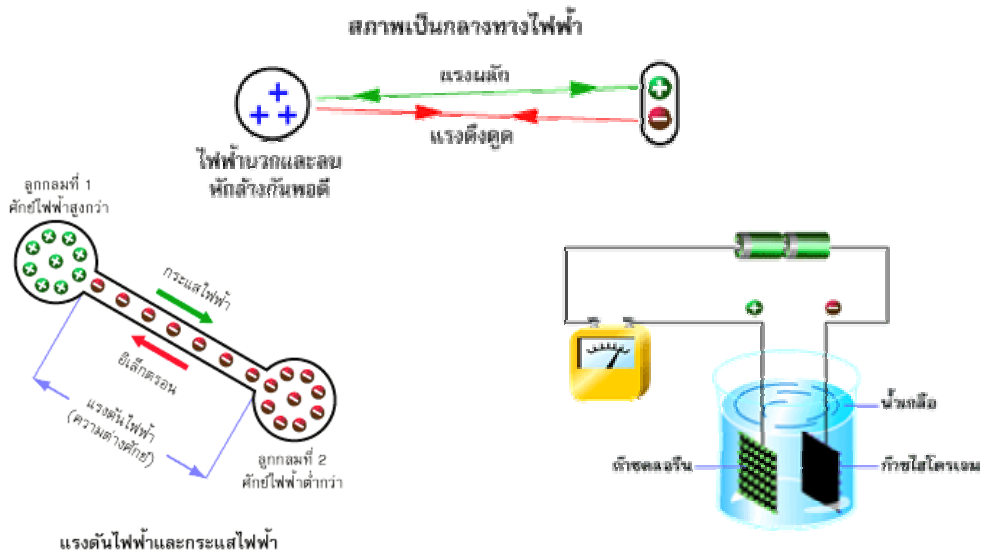


## บทที่ 2 การกัดกร่อน

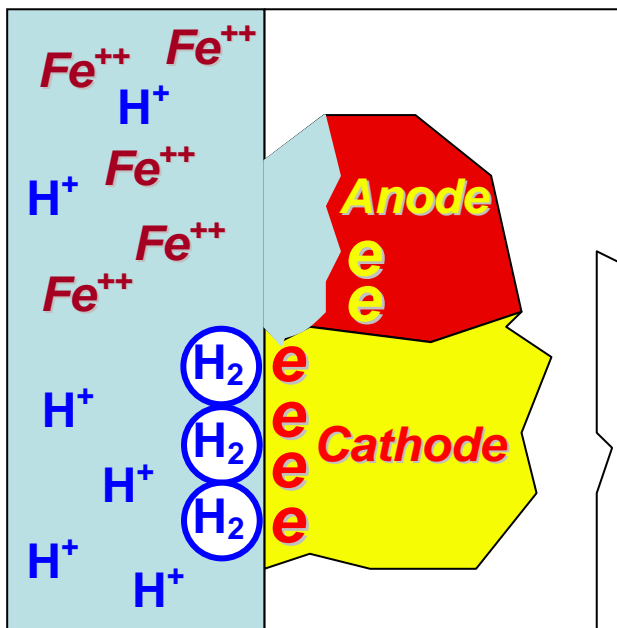
### บทนำ

การกัดกร่อน หรือ corrosion คือ การเสื่อมสภาพของโลหะที่ทำให้สมบัติของโลหะ เปลี่ยนไปในทางเลวลง โดยโลหะเปลี่ยน ไปเป็นสารประกอบของโลหะหรือที่เรียกว่าสนิม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของการกัดกร่อนเป็นเหตุให้โลหะเกิดความเสียหาย ในแต่ละปีโลกมีค่าใช้จ่าย จากปัญหาการกัดกร่อนมากมาย ทั้งที่เป็นการซ่อมแซม บำรุงรักษา หรือ การรีไซเคิลใหม่ทดแทน ส่วนที่ซำรุดเสียหายจนไม่อาจใช้การได้อีกต่อไป บางครั้งก็เป็นค่าใช้จ่ายที่มากเกินไปจนเกินควร เช่น การออกแบบเพื่อ ใช้โลหะหนาเกินความจำเป็น นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายของการค้นคว้าวิจัย เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้พัฒนาให้มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง สามารถใช้ได้แม้ในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน

การกัดกร่อน คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ของโลหะซึ่งเป็นปฏิกิริยาให้อิเล็กตรอน โดยที่โลหะประกอบด้วยอะตอมโลหะเกาะเกี่ยวกันตลอดเนื้อโลหะด้วยพันธะโลหะซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ ที่มีคู่อิเล็กตรอนที่พันธะเป็นชนิดไม่ประจำ โลหะจึงมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนย้ายได้ ที่ยึดเหนี่ยวทั้งหมดเข้าด้วยกัน โลหะจึงมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อโลหะเกิดการกัดกร่อน อิเล็กตรอนที่พันธะจะหลุดออก ทำให้อะตอมโลหะเปลี่ยนเป็นไอออนโลหะประจุบวก เมื่อมีการให้และรับอิเล็กตรอนครบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า เซลล์การกัดกร่อน โลหะที่ให้อิเล็กตรอนเป็นขั้วแอโนด (anode) อิเล็กตรอนเดินทางไปตามเนื้อโลหะ สิ่งแวดล้อมที่รับอิเล็กตรอนเป็นขั้วคาโทด (cathode) และความชื้นหรือสารละลายที่ผิวโลหะเป็นอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ให้อิออนเดินทางให้ครบเซลล์



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน



ตัวอย่างเช่น การจุ่มโลหะลงในน้ำ บริเวณผิวโลหะที่เป็นขั้วบวก (Anode: +) จะมีการถ่ายเทประจุบวกของเหล็กออกไปสู่สารละลาย (น้ำ) คงเหลือไว้เฉพาะอิเล็กตรอน (ประจุลบ: -) ไว้บริเวณผิวของโลหะเป็นผลให้ออกซิเจนไหลมารวมตัวกันและเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนขึ้น ส่วนที่ผิวโลหะที่มีประจุลบอยู่จะดึงเอาไฮโดรเจนที่อยู่โดยรอบสร้างเป็นฟองก๊าซไฮโดรเจนคลุมที่ผิวโดยรอบ

รูปที่ 2.2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของไอออน + และ ไอออน - ของโลหะในสารละลาย

ดังนั้น การกัดกร่อนจึงสามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไป อาจกล่าวได้ว่า โลหะเกือบทุกชนิดเกิดการกัดกร่อนได้เสมอ ต่างกันที่ความยากง่ายของการเกิดการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนเร็ว-ช้า สาเหตุของการเกิดการกัดกร่อนจึงมาจากทั้งโลหะและสิ่งแวดล้อม

### รูปแบบโดยทั่วไปของการกัดกร่อน

การกัดกร่อนสามารถจำแนกออกเป็นหมวดหมู่ได้หลายลักษณะโดยใช้เกณฑ์ต่าง ๆ กัน เช่น จำแนกตามกลไกของการกัดกร่อน ตามลักษณะทางกายภาพของการกัดกร่อน หรือตามตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกัดกร่อน

- การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion)
- การกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (Localized corrosion)
  - แบบมหภาค (Macroscopic scale)
    - การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion)
    - การสูญเสียส่วนเนื้อ (Dealloying)
    - การกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion)
    - การกัดกร่อนบริเวณซอก (Crevice corrosion)
    - การกัดเซาะ (Erosion corrosion)
    - การกัดกร่อนจากการถูครูด (Fretting corrosion)



- แบบจุลภาค (Microscopic scale)
  - การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular corrosion)
  - การแตกร้าวจากแรงเค้นและการกัดกร่อน (Stress corrosion cracking)
  - การกัดกร่อนร่วมกับความล้า (Corrosion fatigue)
  - การแตกร้าวจากไฮโดรเจน (Hydrogen embrittlement)

ถ้าแบ่งตามสภาวะแวดล้อมที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งการกัดกร่อนออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

- การกัดกร่อนในสภาพชื้น (Wet corrosion) การกัดกร่อนประเภทนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ โลหะ ได้รับความเปียกชื้นจากน้ำหรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับวัสดุประเภทโลหะมากที่สุด เช่น การเกิดสนิมเหล็ก เป็นต้น
- การกัดกร่อนในสภาพแห้ง (Dry corrosion) การกัดกร่อนประเภทนี้ เกิดเนื่องจากสภาพอุณหภูมิการใช้งานที่สูง เช่น การกัดกร่อนที่เกิดกับเหล็กกล้า เนื่องจากก๊าซภายในเตาสูง

นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกประเภทของการกัดกร่อนตามสภาพการใช้งานของวัสดุได้อีก เช่น การกัดกร่อนในบรรยากาศ (Atmospheric corrosion) การกัดกร่อนโดยจุลินทรีย์ (Microbial corrosion) การกัดกร่อนของวัสดุทางการแพทย์ที่ใช้ฝังในร่างกาย (Corrosion of implant materials) การกัดกร่อนในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี (Corrosion in petroleum and petrochemical industry)

### การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอทั่วผิวหน้า (General or Uniform Corrosion)

การกัดกร่อนแบบนี้เห็นอยู่ทั่วไป โลหะจะถูกกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวของโลหะนั้น โดยปกติจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า การกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่าง สม่ำเสมอบนผิวหรือเป็นบริเวณกว้าง มีผลให้โลหะบางเรื่อยๆ หรือมีน้ำหนักรหายไป คือ เบาลงเรื่อยๆ การกัดกร่อนประเภทนี้ในแง่ของเทคนิคไม่ค่อยเป็นปัญหาและไม่ก่อให้เกิด อันตรายรุนแรงเท่าใดนัก เนื่องจากสามารถหาอัตราการกัดกร่อนและออกแบบเพื่อ พร้อมทั้งทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ได้ และเปลี่ยนใหม่เมื่อถึงเวลาอันควร

Thickness is reduced uniformly



**Uniform Corrosion**



รูปที่ 2.3 ลักษณะการกัดกร่อนแบบ Uniform Corrosion



การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอสามารถป้องกันหรือลดปริมาณการกัดกร่อนได้โดย

- (1) เลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมและอาจทำการเคลือบผิว
- (2) ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน
- (3) ใช้การป้องกันแบบคาโทดิก (cathodic protection)

### การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion)

โลหะแต่ละชนิดจะมีค่าศักย์เฉพาะตัว ดังนั้นถ้าหากมีโลหะ 2 ชนิด สัมผัสกันอยู่และมี สารละลายอิเล็กโตรไลต์และส่วนโลหะเชื่อมต่อนำไฟฟ้า หรือต่อกันอย่างครบวงจรไฟฟ้าเคมี เมื่อเวลาผ่านไป โลหะที่ศักย์ต่ำกว่าจะเกิดการกัดกร่อน (อโนด) ขณะที่โลหะที่มีศักย์สูงกว่าจะไม่กัดกร่อน (คาโทด) ความต่างศักย์ของโลหะทั้งสอง ยิ่งมากเท่าไรความรุนแรงก็มากขึ้นเท่านั้น

ความต่างศักย์จะทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุทั้งสอง ทำให้เพิ่มอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนน้อย และจะลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีค่าความต้านทานมากกว่า โดยปกติโลหะที่มีค่าความต่างศักย์มากจะมีการกัดกร่อนค่อนข้างน้อยหรือแทบจะไม่เกิดเลย เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าและความแตกต่างของโลหะ จึงมีการเรียกการกัดกร่อนแบบนี้ว่า Galvanic Corrosion หรือ Two-metal Corrosion ปริมาณกระแสและการกัดกร่อนขึ้นกับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะทั้งสอง



รูปที่ 2.4 ลักษณะการกัดกร่อนแบบ Galvanic Corrosion

วิศวกรรมการออกแบบจะต้องทราบถึงความเป็นไปได้ของการกัดกร่อนแบบ galvanic ตั้งแต่การระบุรายละเอียดของวัสดุที่จะนำไปใช้ในเครื่องจักร บางครั้งเพื่อเป็นการประหยัดอาจ ใช้วัสดุต่างชนิดกันมาเชื่อมกัน โดยเฉพาะโลหะที่มีค่าความต่างศักย์กันมากควรระมัดระวังให้ดี ความต่างศักย์ที่เกิดจาก galvanic Cell สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลา เนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน ที่สะสมอยู่ที่ขั้วคาโทดหรืออโนดจะทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง



## การป้องกัน

วิธีการลดหรือป้องกันการกัดกร่อนแบบ galvanic มีหลายวิธีดังนี้

1. เลือกใช้วัสดุที่มีค่า galvanic Series ใกล้เคียงกันเท่าที่เป็นได้
2. หลีกเลี่ยงอัตราส่วนของพื้นที่คาโทด/แอโนด ปรับให้พื้นที่ทั้งสองใกล้เคียงกัน
3. ใช้ฉนวนกันบริเวณที่ใช้โลหะต่างชนิดกันมาสัมผัสกัน
4. ใช้สารเคลือบผิวอย่างระมัดระวัง ดูแลการเคลือบผิวให้อยู่ในสภาพดี
5. เติมน้ำยาขี้ผึ้ง เพื่อลดความรุนแรงของการกัดกร่อน
6. ออกแบบที่ให้อาจเปลี่ยนชิ้นงานที่เป็นแอโนดได้ง่าย
7. คิดตั้งวัสดุที่สามที่มีค่าความต่างศักย์น้อยกว่าโลหะทั้งสอง เพื่อให้เกิดการกัดกร่อนแทน

## การกัดกร่อนในที่อับ (Crevice Corrosion)

การกัดกร่อนในที่อับคือการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่อับบนผิวโลหะที่สัมผัสโดยตรงกับสารกัดกร่อน การกัดกร่อนประเภทนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณของสารละลายที่ค้างอยู่ตามพื้นที่ที่เป็นหลุม หรือพื้นที่ที่เป็นซอก บริเวณแคบๆ ที่มีสารละลายเข้าไปขังอยู่ได้เป็นเวลานาน โดยไม่มีการถ่ายเท ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจน ในน้ำหรือสารละลายภายในซอกไม่เท่ากับภายนอก ทำให้เกิดการครบเซลล์การกัดกร่อนชนิดเซลล์ความเข้มข้น โดยบริเวณในซอกจะเกิดเป็นขั้วแอโนดคือเกิดการสูญเสียเนื้อโลหะ

การสัมผัสระหว่างผิวโลหะและผิวที่ไม่ใช่โลหะ สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนในที่อับได้เช่นกัน ปะเก็นรอยต่อระหว่างยางกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่จุ่มอยู่ในน้ำทะเล เนื่องจากสารละลายที่ขังอยู่มีปริมาณจำกัดและหยุดนิ่ง ออกซิเจนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาคาโทดจึงลดจำนวนลดลงเรื่อยๆ จนหมด แต่ปฏิกิริยาแอโนดยังคงดำเนินอยู่ จึงทำให้ความเข้มข้นของประจุบวกสูง ดังนั้นเพื่อรักษาสสมดุลของประจุไว้ ถ้ามีสารเจือปน โดยเฉพาะคลอรีน ประจุลบของคลอรีนจะเคลื่อนที่เข้ามาในรอยแตก และทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เป็นโลหะ ไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริก กรณีนี้จะกัดผิวของโลหะออกมาทีละน้อย ส่งผลให้รอยแตกและรอยร้าวขยายตัวไปเรื่อยๆ

## รูปที่ 2.5 ลักษณะการกัดกร่อนแบบ Crevice Corrosion



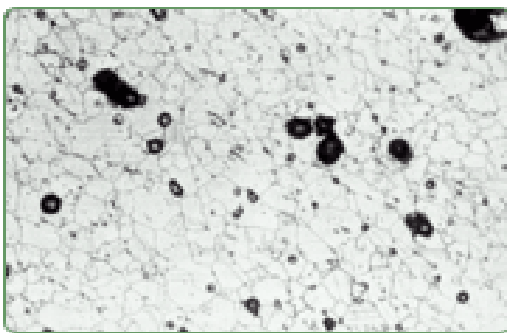
### การป้องกัน

1. ใช้การเชื่อมแบบ butt joint แทนการย้าหมุดหรือการยึดด้วยสลักเกลียว
2. ปิดบริเวณที่เป็นที่อับโดยการเชื่อมหรือการบัดกรี
3. ออกแบบถึงความดันให้สามารถระบายน้ำได้ดี พยายามหลีกเลี่ยงรูปร่างที่เป็นมุม
4. ตรวจสอบเครื่องมือและสารแปลกลอมอยู่เสมอ
5. กำจัดของแข็งที่ลอยอยู่ก่อนเข้ากระบวนการผลิต
6. กำจัดวัสดุเปือกที่ตกค้างอยู่ในระหว่างการหยุดซ่อมประจำปี
7. จัดสภาวะสิ่งแวดล้อมให้มีความสม่ำเสมอ
8. ใช้ปะเก็นที่เป็นของแข็งและไม่มีการดูดซึม
9. ใช้การเชื่อมแทนการม้วนเป็นท่อ

### การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion)

การกัดกร่อนแบบสนิมขุมหรือการกัดกร่อนแบบรูเข็ม เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมาก โดยเฉพาะกับโลหะที่ได้พัฒนาให้มีฟิล์ม ป้องกันการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าได้แล้ว แต่เมื่อฟิล์มบางแตกแยกออกเฉพาะบางที่ ก็จะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่และกัดกร่อนลึกลงไปเรื่อยๆ ทำให้สังเกตเห็นได้ยากเนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนได้ปกคลุมเอาไว้ การกัดกร่อน แบบนี้ทำให้ทำนายได้ยาก โดยทั่วไปสนิมขุมมักจะเกิดทิศทางเดียวกันกับแรงโน้มถ่วงของโลก การเกิดการกัดกร่อน ในแนวอื่นก็เกิดได้แต่น้อย

Pitting เป็นลักษณะที่ทำให้เป็นรูหรือหลุมในเนื้อโลหะ รูเหล่านี้อาจมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้ แต่โดยส่วนมากจะมีขนาดเล็ก บางครั้งจะเห็นรูกระจายอยู่ห่างกัน หรืออาจอยู่ใกล้กันจนดูคล้ายผิวโลหะที่ขรุขระ



รูปที่ 2.6 ลักษณะการกัดกร่อนแบบ Pitting Corrosion

pitting เป็นการกัดกร่อนที่ก่อให้เกิดความเสียหายและรุนแรงที่สุด ซึ่งทำให้อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือชิ้นส่วนต่างๆ เกิดความเสียหายเนื่องจากการเจาะลึกด้วยเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของโครงสร้างทั้งหมดที่น้อย ลักษณะมักยากที่จะตรวจสอบพบยากเพราะมีขนาดเล็ก นอกจากนั้นยังยากที่จะตรวจวัดเชิงปริมาณและ ตรวจวัดการขยายตัวของ



สภาพการกัดกร่อนของ pitting ได้ เพราะความลึกและจำนวนของรูที่เปลี่ยนแปลง ภายใต้สภาวะเฉพาะ สภาวะใด สภาวะหนึ่ง การเกิด pitting ยังยากที่จะทำนายได้จากการทดสอบในห้องทดลองอีกด้วย บางครั้งอาจใช้เวลานานจึง ปรากฏสภาพของการกัดกร่อน การเกิด pitting เป็นการเกิดเฉพาะที่และ เป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่รุนแรง ความ เสี่ยงภัยที่เกิดขึ้นมักจะเกิดอย่างฉับพลัน

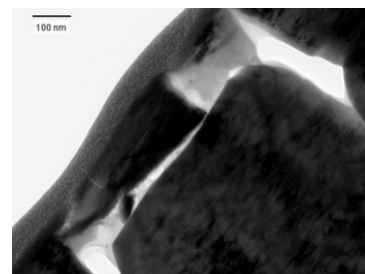
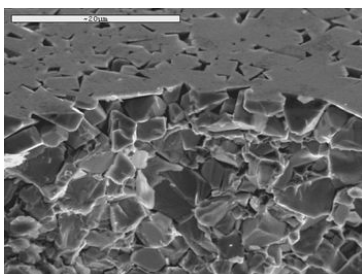
### การป้องกัน

โดยทั่วไป วิธีที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนในที่อับก็สามารถนำมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนแบบ pitting ได้เช่นกัน วัสดุที่มีการกัดกร่อนหรือมีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนแบบ pitting ไม่ควรนำมาใช้ในการสร้าง โรงงานหรือเครื่องมือ วัสดุแต่ละชนิดมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ต่างกัน เช่น การเติมโมลิบดีนัมลงไป ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในปริมาณ 2 % ซึ่งทำให้ได้เหล็กกล้าไร้สนิม 316 โดยจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบ pitting โดยจะทำให้เกิดผิว passive ที่มีความเสถียรมากกว่า คือมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนมาก วัสดุ 2 ชนิดนี้ประพฤติตัวต่างกันคือ ชนิดหนึ่ง ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในน้ำทะเลแต่อีกชนิดหนึ่งสามารถใช้ได้ในบาง กรณี

### การสูญเสียส่วนผสมบางตัว (Selective leaching)

เป็นรูปแบบหนึ่งของการกัดกร่อนซึ่งเกิดโดยการละลายของธาตุบางตัวจาก โลหะอัลลอยด์ เป็นผลจากการ กระทำซึ่งสิ่งแวดล้อมได้โลหะที่ว่องไวที่สุด ออกจากอัลลอยด์ เหลือไว้แต่โครงสร้างพูนซึ่งเต็มไปด้วยโลหะที่เสถียร ที่สุด วัสดุที่เหลือจึงสูญเสียความแข็งแรงทางกายภาพไปมาก การกัดกร่อนแบบนี้มักมีชื่อตามธาตุที่ละลายออกมา เช่น ถ้าสังกะสีละลายออกมาเรียกว่า Dezincification

โลหะผสมประกอบด้วยโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป จากที่กล่าวมาว่าโลหะจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉพาะตัว ดังนั้น โลหะที่เป็นส่วนผสมที่มีศักย์ต่ำกว่า จะถูกกัดกร่อนไป ตัวอย่างที่พบบ่อยคือทองเหลือง (ประกอบด้วยทองแดงและ สังกะสี) สูญเสียสังกะสีไปทำให้ทองเหลืองที่เหลืออยู่เป็นทองแดง ส่วนมากและพูน ความแข็งแรงต่ำลง การสูญเสีย สังกะสีอาจสังเกตได้จากที่เดิมที่เคยมีสีเหลือง เมื่อสูญเสียสังกะสีไป จะทำให้มีสีแดงขึ้น ทองเหลืองที่มีปริมาณสังกะสี ผสมอยู่มากจะเกิดการสูญเสียสังกะสีได้ง่าย



รูปที่ 2.7 ซ้าย: ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) แสดงการสูญเสียโคบอลต์ของซีเมนต์ที่ ทั้งสแตนคาร์ไบด์เนื่องจากการกัดกร่อน

ขวา: ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังจากการกัดกร่อน

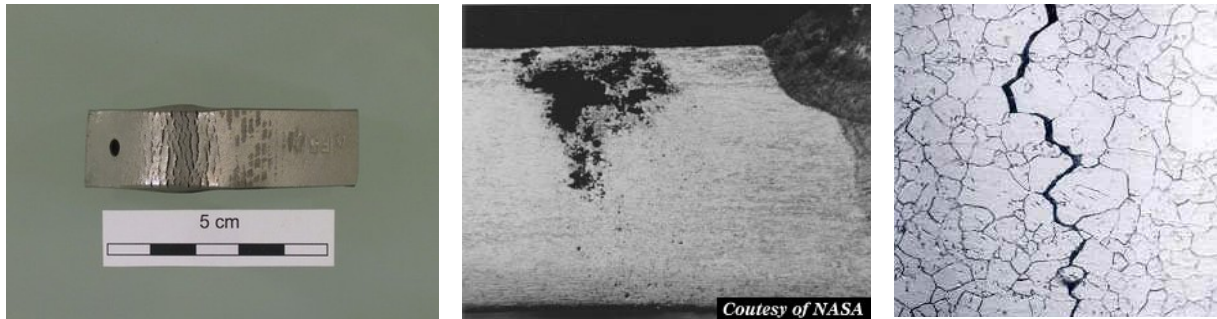


## การป้องกัน

1. ลดความรุนแรงของสภาวะแวดล้อม เช่น กำจัดออกซิเจนจากสารละลาย
2. ใช้การป้องกันแบบคาโธด

### การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

โดยปกติขอบเกรนมักจะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าเนื้อเกรนอยู่แล้ว โดยขอบเกรนจะแสดงตัวเป็นขั้วแอโนด (สูญเสียเนื้อโลหะ) ภายในเกรนจะแสดงตัวเป็นขั้วคาโธด หากบริเวณขอบเกรนมีอนุภาคอื่น ๆ มาตกตะกอนอยู่ หรือมีธาตุหนึ่งมากหรือน้อยเกินไป ขอบเกรนอาจจะถูกกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นอีก เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้ระยะเวลาหนึ่ง บริเวณพื้นที่ที่แสดงตัว เป็นแอโนดจะเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป การกัดกร่อนก็จะเกิดกระจายอยู่ทั่วไป เป็นแบบ Uniform attack กัดเซาะทั้งก้อน บริเวณที่เป็นแอโนด คาโธด จะเปลี่ยนตลอดเวลา



รูปที่ 2.8 ซ้าย: การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน เห็นได้ชัดเจนหลังจากตัดจองชิ้นงาน

กลาง: ลักษณะรอยสึกตามขอบเกรนข้างแนวเชื่อม ขวา: ลักษณะรอยแตกตามขอบเกรน

แต่ถ้าบริเวณขอบเกรนแสดงตัวเป็นแอโนดตลอดเวลา การกัดกร่อนก็จะเกิดเฉพาะบริเวณขอบเกรนตลอดเวลา เป็นการกัดกร่อนที่เรียกว่าการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้ หากนำไปใช้งานอย่างไม่เหมาะสม โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกทนการกัดกร่อนได้ดี แต่ถ้าเหล็กประเภทนี้ได้รับอุณหภูมิในช่วง 500-800 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานพอสมควร จะทำให้เกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน โครเมียมที่เดิมเคยอยู่ในเนื้อเหล็กและคอยป้องกันการกัดกร่อนให้เหล็กก็จะมารวมตัวกับคาร์บอน ทำให้บริเวณใกล้ๆ หรือชิดกับขอบเกรนมีโครเมียมต่ำกว่าร้อยละ 12 ซึ่งถือว่าบริเวณนี้ไม่ใช่เหล็กกล้าไร้สนิมอีกต่อไป ดังนั้นบริเวณที่มีโครเมียมต่ำตามขอบเกรนจึงถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น

การควบคุมหรือลดการกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก สามารถทำได้ 3 วิธีคือ

1. การทำ heat treatment ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งปกติจะเรียกว่า quench annealing หรือ solution quenching
2. การเติมธาตุบางตัวที่สามารถรวมตัวเป็นคาร์ไบด์ได้ดี (stabilizer)
3. การลดปริมาณคาร์บอนให้ต่ำกว่า 0.03 เปอร์เซ็นต์





### การกัดกร่อน-สึกกร่อน (Erosion Corrosion)

เมื่อมีการเสียดสีและการสึกกร่อนต่อโลหะในสิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ด้วยนั้น จะมีผลรวมของการกระทำต่อโลหะ อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เชิงกล และเชิงเคมีซึ่งส่งผลให้เกิดการการทำลายและการเสื่อมสภาพของโลหะอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.9 การกัดกร่อนการกัดกร่อน-สึกกร่อน (Erosion Corrosion)

การกัดกร่อนประเภทนี้เริ่มจากการกัดกร่อนที่มีของไหล ไหลผ่านโลหะและมักไหลด้วยความเร็วสูง หากของไหลนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง เมื่อโลหะเริ่มสึกจะทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้น หากโลหะนั้นมีฟิล์มปกคลุมผิวได้ การไหลของของไหล อาจทำให้ฟิล์มถูกทำลายไปบางส่วน ถ้าฟิล์มนี้สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้อย่างง่ายและรวดเร็ว การกัดกร่อนก็จะไม่รุนแรงนัก แต่ถ้าฟิล์มใหม่เกิดขึ้นได้ช้าก็จะทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นรุนแรง และรวดเร็ว

### การกัดกร่อน-ความล้า (Fatigue Corrosion)

ความล้าหรือ Fatigue เป็นอาการของโลหะที่ถูกแรงกระทำซ้ำๆ กัน หรือซ้ำแล้วซ้ำเล่า แรงที่กระทำเป็นได้ทั้ง tensile และ compressive stress จนที่สุดแล้วโลหะนั้นก็แตกหักเสียหาย (fracture) โดยปกติแล้ว การกัดกร่อนแบบนี้เกิดเมื่อขนาดแรงเค้นต่ำกว่าค่า yield point และเกิดเมื่อถูกกระทำซ้ำแล้วซ้ำเล่าในช่วงเวลาหนึ่ง และในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนด้วย ดังนั้นจึงถูกกระทำทั้งทางกล และทางเคมี โดยมีผลไปลดความต้านทานของโลหะจนถึงจุดที่เกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.10 ลักษณะของรอยแตกหักของโลหะเนื่องจากความล้า



## การกัดกร่อนแบบถูครูด (Fretting Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดในสภาวะบรรยากาศปกติ บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะ เมื่อโลหะนั้นกำลังถูกแรงกระทำ

ปัจจัยพื้นฐานของการเกิด Fretting Corrosion

1. โลหะที่หันหน้าเข้าหากันนั้น กำลังถูกแรงกระทำ
2. มีการสั่นสะเทือนบริเวณผิวหน้าสัมผัส ผิวด้านหนึ่งตีกระทบหรืออยู่อีกผิวหน้าหนึ่ง
3. ระหว่างผิวหน้าโลหะทั้งสองมีการลื่นไถล (เช่นผิวสัมผัสระหว่าง Bearing กับเพลา)

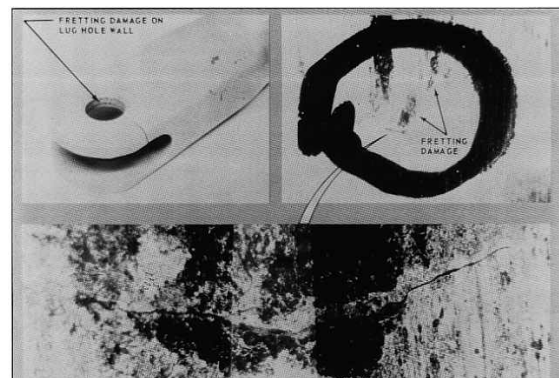
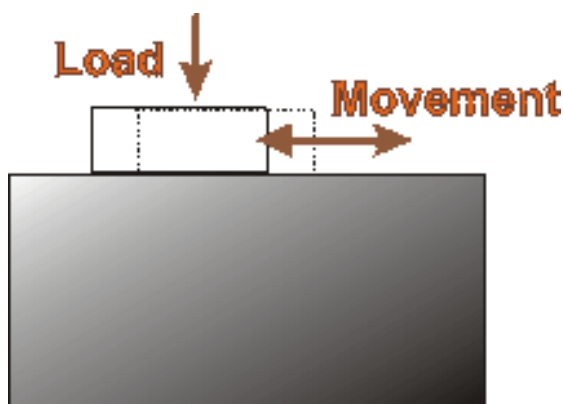
ผลที่เกิดจาก Fretting Corrosion

1. สูญเสียเนื้อโลหะบริเวณพื้นผิวสัมผัสเป็นโลหะออกไซด์ เกิดกับเหล็ก เหล็กกล้า (ferric oxide)
2. ทำให้ Size tolerance เสีย จากที่เคยเข้ากันได้ดีก็จะหลวม
3. Fretting corrosion ทำให้เกิดการหลวมแล้วก็จะเกิด excessive strain นำไปสู่การเกิดร่องซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของรอยร้าว และเป็น fatigue fracture ในที่สุด

กลไกการเกิด Fretting corrosion 2 แนวคิด

1. เนื้อโลหะเป็น Particle เล็กๆ ของผิวโลหะที่สัมผัสกัน
2. เกิดเป็น Oxide แล้วหลุดออกมา

ความชื้นลดความเสียหายจาก fretting corrosion ความชื้นเป็นสารหล่อลื่นเพราะว่า hydrate rust (สนิม+น้ำ) ก่อให้เกิดความเสียหายจากการเสียดสีน้อยกว่าออกไซด์ที่มีสภาพแห้ง และบริเวณที่ขาดออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจนจะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบถูครูดน้อยลง fretting จะเกิดมากขึ้นเมื่อมีน้ำหนักหรือความเค้นมากกระทำมากขึ้นและถ้าอากาศดึงเอา particles ของโลหะเข้ามาพร้อมด้วยแสดงว่ามี tension, shear stress ร่วมด้วย fretting corrosion บางที่เรียกว่า friction oxidation, wear oxidation, false brinelling



รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกิดการกัดกร่อนแบบ fretting corrosion



### การป้องกัน

1. หล่อด้วยน้ำมันที่มีความหนืดต่ำ คุณสมบัติการเกาะยึดสูง
2. เพิ่ม load เพื่อลด slip ระหว่างผิวหน้าสัมผัส
3. ใช้ปะเก็นเพื่ออุดซักรันสะเทือน ป้องกันออกซิเจน
4. เพิ่มความแข็งแรงผิวหน้าสัมผัส
5. ใช้ coating หรือ surface treatment เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของผิวโลหะที่สัมผัสกัน
6. เพิ่มความแข็งแรงด้วยการยิงทราย (Shot preening)

### การกัดกร่อนแบบรูพรุน (Cavitations corrosion)

เป็นรูปแบบหนึ่งของการกัดกร่อนเฉพาะที่ ซึ่งเกิดจากผลรวมของความเสียหายบนผิวโลหะเป็นแห่งๆ อันเนื่องมาจากฟองอากาศที่มาจับตัวกันแล้วซ่าแล้ว หรือเนื่องมาจากการกัดเซาะทางเคมีต่อพื้นที่ที่ถูกทำลาย การกัดกร่อนแบบนี้อาจพบได้ในสภาพไหลปั่นป่วน (Turbulent flow) ของของเหลว เช่น โกล้ำๆ ใบบัดเรือและในปั้มน้ำ

การเกิดและการแตกของฟองก๊าซซ่าแล้วซ่าแล้วอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความดันในบางบริเวณซึ่งลดต่ำกว่าหรือเพิ่มสูงกว่าความดันไอของของเหลว การสั่นตัวอย่างรวดเร็วของการเกิดและการแตกของฟองอากาศนี้ทำให้เกิด shock ที่ทรงพลังซึ่งสามารถทำลายผิวโลหะหรือวัสดุได้เป็นจุดๆ ถ้ามีผิวออกไซด์บางบนโลหะ shock wave จะไปฉีกเอา protective film ออก ทำให้โลหะเปลือยและว่องไวต่อการกัดกร่อน โดยโลหะเปลือยจะสัมผัสกับอิเล็กโตรไลต์ในบางจุด พื้นผิวตรงนั้นอาจปรากฏให้เห็นลักษณะรูพรุนๆ คล้ายฟองน้ำ ลักษณะการเสียหายจะคล้ายกับ pitting

#### กลไกการเกิด cavitations

1. การเกิดฟองบน protective film
2. ฟองก๊าซแตกสลายและทำลาย protective film
3. เนื้อโลหะใต้ protective film ถูกทำลายเกิดการกัดกร่อนต่อมาเกิด protective film ขึ้นใหม่
4. ต่อมาฟองก๊าซฟองใหม่มาสัมผัสตำแหน่งเดิมอีก
5. ฟองก๊าซใหม่แตกสลายทำลาย protective film อีก
6. เนื้อโลหะบริเวณที่ฟิล์มถูกทำลายกัดกร่อนต่อไปอีก ต่อมาเกิด protective film ขึ้นใหม่อีก
7. กระบวนการกัดกร่อนเกิดซ้ำซาก จนรอยกัดกร่อนเป็นรูลึก

Cavitations ที่เกิดส่วนใหญ่ มีสาเหตุรวมกันกับการกัดกร่อนและแรงกระทำทางกล ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะไปลดประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมสูงขึ้น



### การป้องกัน

1. ปรับปรุงการออกแบบ เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงของ hydrodynamic pressure น้อยที่สุด
2. เลือกใช้โลหะที่แข็งแรงกว่า มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีกว่า
3. ชิ้นส่วนบริเวณที่มีโอกาสเกิด cavitations มาก ให้แต่งผิวให้เรียบมากที่สุดเป็นกรณีพิเศษ
4. หุ้มด้วยวัสดุที่ยึดหยุ่นได้ เช่น ยาง

### การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress Corrosion)

การกัดกร่อนชนิดนี้จะเกิดกับโลหะที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารกัดกร่อน และมีความเค้นแรงดึงกระทำกับโลหะ ความเค้นนี้อาจเป็นความเค้นตกค้าง หรือความเค้นภายนอกที่มากระทำ การเสียหายแบบนี้ผิวโลหะอาจไม่ถูกกัดกร่อน หรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย แต่ในเนื้อโลหะจะมีรอยร้าวเล็กๆ อยู่มากมาย ตัวอย่างโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ เช่น ทองเหลืองจะไม่ทนต่อแอมโมเนีย ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่ทนต่อไอออนของคลอไรด์ เป็นต้น ลักษณะของการกัดกร่อนที่มีความเค้นเข้ามาเกี่ยวข้อง จะมีลักษณะรอยร้าวเป็นกิ่งก้าน โดยที่รอยร้าวนี้อาจเกิดตามขอบเกรนหรือผ่าเกรนก็ได้

### รูปที่ 2.12 การแตกร้าวจากแรงเค้นและการกัดกร่อนของเหล็กสมัยแข็งดัด

ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อน

1. ความเค้น ต้องเป็นความเค้นดึงซึ่งอาจเป็นความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุ ความเค้นมาจากภายนอก ความเค้นเนื่องจากความร้อนหรืออาจจะเกิดจากการเชื่อมก็ได้
2. สภาวะแวดล้อม

การกัดกร่อนแบบนี้ทำให้โลหะเกิดความเสียหายเนื่องจาก cracking ที่เกิดขึ้น โดยการกระทำร่วมกันของสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อกรกัดกร่อนกับ tensile stress คำว่า tensile stress มุ่งหมายเอาความเค้นที่กระทำกับโลหะ (applied stress) และความเค้นภายใน (internal residual stress) ในบางกรณีความเค้นอาจเกิดจากการสะสมตัวของผลิตภัณฑ์อันเนื่องจากการกัดกร่อน ตัวอย่าง เช่น นี้อตและสกรู เมื่อถูกวางไว้ในสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อการกัดกร่อน ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนจะถูกสะสมตัวอยู่ระหว่างนี้อตและสกรู อย่างไรก็ตามปริมาณของ ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มากกว่า ปริมาตรดั้งเดิมของโลหะ มันจึงทำให้เกิด tensile stress ขึ้นบนสกรูซึ่งก็จะเสียหายด้วยกระบวนการ cracking



การกัดกร่อนแบบนี้ปกติมีลักษณะพิเศษคือ

1. ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเฉพาะในโลหะผสมเท่านั้น ในโลหะบริสุทธิ์ไม่เกิด
2. ประเภทของสิ่งแวดล้อมที่จะให้เกิดการแตกหักนั้นมีลักษณะเฉพาะตัว สำหรับโลหะผสมแต่ละชนิด
3. การอบชุบด้วยความร้อนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปมีผลกับการแตกหัก
4. การป้องกันแบบคาโธดิกเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด

ตัวแปรที่มีอิทธิพลกับ Stress corrosion cracking ได้แก่

- อุณหภูมิ
- องค์ประกอบสารละลาย
- องค์ประกอบของโลหะ
- ขนาดของแรงเค้น
- โครงสร้างของโลหะ

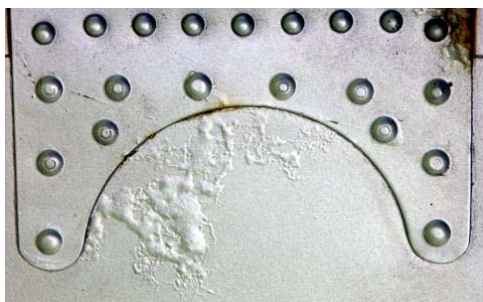
การแตกหักเสียหาย (Cracking) พบว่ามีทั้งแบบ แตกไปตามขอบเกรน (intergranular cracking) และแบบผ่ากลางเกรน (transgranular cracking)

การป้องกัน

1. ลดความเค้นในเนื้อโลหะลง หรือลดความเค้นที่กระทำกับผิวโลหะ
2. ลดความรุนแรงของสภาวะแวดล้อม
3. เลือกโลหะที่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน
4. ใช้การป้องกันแบบคาโธด
5. ใช้สารยับยั้ง

**การกัดกร่อนแบบใต้ชั้นเคลือบ (filiform corrosion)**

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นภายใต้ชั้นเคลือบ เช่น การทาสีพลาสติกบนผิวเหล็กกล้า หรือ การเคลือบแลกเกอร์บนผิวแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก จัดเป็นการกัดกร่อนแบบ Crevice ประเภทหนึ่ง ซึ่งเป็นแบบ under film corrosion พบได้กับโลหะที่มีการทาเคลือบผิวเพื่อป้องกัน การกัดกร่อนทั่วผิวหน้า เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน แมกนีเซียม และอลูมิเนียม ที่เคลือบผิวด้วยดีบุก เงิน ทอง ฟอสเฟต สีน้ำมันและแลกเกอร์



รูปที่ 2.12 ลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นภายใต้ผิวที่เคลือบหรือทาสีไว้



การกัดกร่อนแบบนี้มีผลให้สภาพผิวของชิ้นงานเสียไปเท่านั้น แต่ไม่ได้ทำความเสียหายแก่โครงสร้างของชิ้นงาน ดังนั้นงานที่ต้องการผิวที่ดี เช่น กระจ้อองอาหาร รถยนต์ จึงต้องระวังปัญหาจาก filiform corrosion ภายใต้วีวเคลือบจะเกิดการกัดกร่อนลุกลามเป็นบริเวณ ซึ่งเป็นผลจากการเกิดการกัดกร่อนภายใต้บริเวณจำกัดคือ ภายใต้วีวเคลือบ ทำให้สนิมและอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น วนเวียนอยู่ภายใต้วีวเคลือบแล้วส่งผลต่อเนื่องให้เกิดเป็นบริเวณกว้างขึ้น การกัดกร่อนแบบริเริ่มจากบริเวณหนึ่งซึ่งเรียกว่าส่วนหัว (active head) แล้วไปปรากฏสนิมเช่น สีน้ำตาลแดงของสนิมเหล็กในส่วนหาง (inactive tail) ดังนั้นปฏิกิริยาการกัดกร่อนดำเนินไปในบริเวณส่วนหัว สำหรับเหล็กจะเกิดเป็นอ็อกไซด์เหล็ก  $Fe^{2+}$  ที่จะให้ผลทดสอบสีน้ำเงินเขียวกับสารละลายไซยาไนด์ที่ใช้ทดสอบเฉพาะบริเวณหัวและจะเห็นคราบสนิมเหล็กที่บริเวณหาง

การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นเมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 65-90% ทั้งนี้ชนิดของการเคลือบผิวสีน้ำมัน แล็กเกอร์ และ โลหะชนิดที่ยินยอมให้น้ำซึมผ่านได้น้อยจะช่วยลดการเกิด Filiform corrosion นอกจากนั้นการขัดผิวโลหะก่อนการเคลือบก็มีผลเพราะพบว่า ทิศทางการขยายตัวของการกัดกร่อนจะไปตามรอยขีดหรือรอยขัดผิวก่อนเคลือบ

การกัดกร่อนแบบนี้เริ่มจากจุดหนึ่งบนผิวโลหะด้วยการซึมผ่านแบบออสโมซิส เพราะบริเวณนั้นมีอ็อกไซด์เหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) เกิดขึ้นมาก่อนและมีความเข้มข้นสูง น้ำจากภายนอกจึงผ่านเข้ามาได้ในบริเวณ active head แต่ในส่วนของ active tail จะปรากฏสนิมเหล็กจะมีการซึมออกของน้ำออกไป ขณะนี้ออกซิเจนซึมผ่านแผ่นฟิล์มได้ทั่วผิว ในส่วนหางจะเกิดสภาพกรด จากการเกิดปฏิกิริยาของสนิมกับน้ำ ทำให้การกัดกร่อนเกิดการลุกลามได้ต่อไป

#### การป้องกัน

1. เก็บชิ้นงานที่เคลือบผิวเสร็จแล้วในบริเวณที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ
2. เลือกวัสดุเคลือบผิวที่เหนียวเพราะจะช่วยให้ออกไซด์ฟิล์มไม่แตกและการลุกลามไม่รุนแรง
3. เลือกใช้วัสดุเคลือบที่ยินยอมให้น้ำซึมผ่านได้น้อย

#### Graphitic Corrosion หรือ Graphitization

เป็นปัญหาของความเสียหายแบบการสูญเสียส่วนผสมบางตัว (Selective leaching) อีกรูปแบบหนึ่งที่เกิดกับเหล็กหล่อเทาเมื่อถูกใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนพอสมควร (โดยสารละลายจะต้องไม่รุนแรงเกินไป) การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นโดยเนื้อเหล็กหล่อเทาที่ผิวชั้นนอก ถูกกัดกร่อนเหลือกราไฟต์ปรากฏให้เห็น จึงเข้าใจผิดเรียกว่า graphitization และบางคนก็เรียกผิดๆ ว่า graphitic corrosion สาเหตุก็เพราะว่าในเหล็กหล่อเทา กราไฟต์จะมีขั้วเป็นแคโทดเมื่อเทียบกับเนื้อเหล็กที่มีขั้วเป็นแอโนด



รูปที่ 2.14 ลักษณะการกัดกร่อนแบบ graphitization



การเกิด Selective leaching โดยเนื้อเหล็กส่วนที่เป็นเนื้อโลหะหลัก (matrix) เป็นขั้วแอโนด (anode) ถูกละลายออกไป ส่วนที่เป็นร่างแหกราไฟต์ซึ่งคือคาร์บอน จะแสดงตัวเป็นแคโทด (cathode) เหล็กจะถูกละลายออกไปเหลือมวลสารที่เป็นรูปของ complex iron oxide โดยผลจะทำให้เหล็กหล่อเทาสูญเสียความแข็งแรงไปมากและสูญเสียคุณสมบัติของโลหะไปด้วย แต่มีติภายนอกจะไม่เปลี่ยนแปลง

ดังนั้นถ้าไม่ตรวจสอบพบสภาพความบกพร่องก่อน จะเป็นสภาพที่ก่อให้เกิดอันตรายมาก และขั้นตอนการเกิดจะซ้ำถ้าอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน (Corrosive) มาก ผิวทั้งหมดจะถูกชะละลายออกมา กลายเป็นการกัดกร่อนทั่วผิวหน้า (uniform attack) ส่วนเหล็กหล่อกราไฟต์กลม (nodular iron) และเหล็กหล่ออบเหนียว (malleable iron) จะไม่เกิด graphitization เพราะไม่มีร่างแหของกราไฟต์ที่จะช่วยพยุงเนื้อเหล็กหล่อส่วนที่เหลือให้คงรูปร่างไว้ได้

เอกสารอ้างอิง :

<http://www.mtec.or.th/th/research/famd/lcenter/gencorro.html>

<http://www.isit.or.th/techinfoview.asp?lnk=/object/1000000000/MetallicCorrosionandItsPrevention.htm&ContentID=856&CatID=1000000000#top>

[http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/elec\\_knowledge01.php](http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/elec_knowledge01.php)

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	ตารางธาตุไทย1) 2 (Eng)
พจนานุกรมฟิสิกส์	ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์
ธรรมชาติมหัศจรรย์	สูตรพื้นฐานฟิสิกส์
การทดลองมหัศจรรย์	ดาราศาสตร์ราชมงคล
แบบฝึกหัดกลาง	
แบบฝึกหัดโลหะวิทยา	แบบทดสอบ
ความรู้รอบตัวทั่วไป	อะไรเอ่ย ?
ทดสอบ)เกมเศรษฐี(	คติปริศนา
ข้อสอบเอนทรานซ์	เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์
คำศัพท์ประจำสัปดาห์	
ความรู้รอบตัว	
การประดิษฐ์ของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	



 <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1</b> <span style="float: right;"></span>	
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</b> <span style="float: right;"></span>	
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</b> <span style="float: right;"></span>	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

