



บทที่ 3

การกัดกร่อน (Corrosion)

ในปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ทำให้มีความเกี่ยวข้องกับการนำเอาวัสดุต่าง ๆ มาใช้งาน เช่น โลหะ โลหะผสมต่าง ๆ พลาสติก ยาง เซรามิก หรือไม้ การเลือกใช้วัสดุในงานประเภทใดนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ความสามารถในการจัดหาได้ ตลอดจนถึงราคาต่อวัสดุชนิดนั้น บ่อยครั้งที่การตัดสินใจเลือกใช้วัสดุใดนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะทางเศรษฐกิจมากกว่าคุณสมบัติในด้านอื่น ในการเลือกใช้วัสดุได้นั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางเคมีของวัสดุนั้นเหมาะสมมากน้อยเพียงใดกับสภาพการใช้งาน ด้วยเหตุผลดังกล่าวในเครื่องควมแน่น ท่อที่มีกนิยมใช้ในการควมแน่น จึงเป็นท่อโลหะหรือโลหะผสม ซึ่งจะต้องมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดี และที่สำคัญต้องทนต่อสภาพการกัดกร่อนของน้ำได้ในระยะเวลาและเศรษฐกิจที่อำนวยและคุ้มค่า

3.1 คำจำกัดความของการกัดกร่อน (Definition of corrosion)

คำจำกัดความของคำว่า "การกัดกร่อน" นั้น มีผู้ให้ความคิดเห็นไว้หลายคน เช่น Fontana และ Greene (1967) ให้คำจำกัดความว่า "การกัดกร่อนคือ การเสื่อมสลายของวัสดุอันเนื่องมาจาก การทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อม การถูกกระทำโดยตรงทางกล หรือ การกลับคืนสู่สภาพเดิมของวัสดุ" Shrier (1977) ให้คำจำกัดความว่า "การกัดกร่อนในแง่ของ Corrosion Science คือ ปฏิกิริยาของของแข็งกับสภาพแวดล้อม แต่ในแง่ของ Corrosion Engineer คือ ปฏิกิริยาของวัสดุในงานวิศวกรรมกับสภาพแวดล้อม ซึ่งมีผลทำให้เกิดการสูญเสียคุณสมบัติของวัสดุไป" NACE (1978) ให้คำจำกัดความว่า "การกัดกร่อนเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เพื่อลดพลังงานโดยกลับคืนจากสภาพที่บริสุทธิ์ หรือเกือบบริสุทธิ์ของโลหะ อโลหะ หรือสารผสม ไปเป็นสารประกอบดั้งเดิม เช่น Oxide หรือสารประกอบเชิงซ้อนอื่น ๆ ฯลฯ ในทางเชิงกล การกัดกร่อนทำให้เกิดการเสีรูปร่างและคุณสมบัติเดิมของวัสดุ สืบเนื่องจากการสัมผัสและทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมที่สัมผัสกับวัสดุที่ใช้" มันทัน ดันกุลเวศม์ และ ไพนพรหม นรประภา (1981) ให้คำจำกัดความว่า "การกัดกร่อนเป็นขบวนการที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ โดยเป็นขบวนการกลับคืนไปสู่สภาวะเดิมของวัสดุ"

3.2 ประเภทของการกัดกร่อน (Classification of Corrosion)

Fontana และ Greene (1967) ได้แบ่งประเภทของการกัดกร่อนไว้ 3 ประเภท ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

1) การกัดกร่อนแบ่งตามอุณหภูมิของการเกิดการกัดกร่อน เช่น การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง และการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

2) การกัดกร่อนแบ่งตามลักษณะของการเกิดปฏิกิริยา เช่น การกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical corrosion) และการกัดกร่อนทางด้านเคมี (Chemical corrosion)

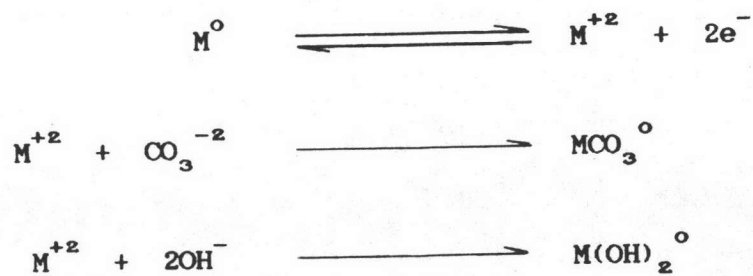
3) การกัดกร่อนแบ่งตามสภาพของการเกิดการกัดกร่อน เช่น การกัดกร่อนแบบเปียก หรือการกัดกร่อนแบบแห้ง (Wet or dry corrosion)

TOMASHOV (1966) ได้แบ่งการกัดกร่อนตามปฏิกิริยาของการกัดกร่อนเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การกัดกร่อนทางด้านเคมี (Chemical corrosion) และการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical corrosion)

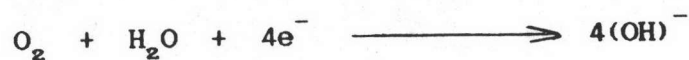
NACE (National Association of Corrosion Engineers) โดย Greene (1953) ให้ความคิดเห็นว่า การกัดกร่อนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปฏิกิริยาเคมี และปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี และได้แบ่งประเภทของการกัดกร่อนตามสาเหตุที่เกิดได้ดังนี้คือ

1) การกัดกร่อนทางเคมี (Chemical corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมีโดยตรง โดยไม่มีความเกี่ยวข้องกับการไหลของอิเล็กตรอน หรือกระแสไฟฟ้า การกัดกร่อนประเภทนี้มักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เช่น การกัดกร่อนใน Non-electrolyte หรือ Dry glasses การรวมตัวของโลหะกับ Sulfur ที่เรียกว่า Sulphiding การแทรกตัวของธาตุบางชนิดเข้าไปในเนื้อโลหะ เช่น การแทรกตัวของ Carbon เข้าไปในเนื้อของโลหะ ที่เรียกว่า Carburizing ซึ่งจะทำให้โลหะบวม หรือหมดอายุการใช้งานในเวลาอันรวดเร็ว

2) การกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical corrosion) เป็นอาการกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยทั่วไปมักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ และเกี่ยวข้องกับน้ำ ซึ่งเป็นสื่อไฟฟ้า (Electrolyte) และไอออน (Ion) ในน้ำ เช่น Cl^- OH^- หรือ H^+ เป็นต้น การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทของอิเล็กตรอนผ่านสื่อไฟฟ้า โดยโลหะที่เป็นผู้ให้อิเล็กตรอน (Anode) จะแตกตัวเป็นไอออนบวกของโลหะลงในน้ำ ซึ่งบางส่วนของไอออนบวกดังกล่าวอาจรวมตัวกับ OH^- ในน้ำกลายเป็น Metal Hydroxide หรืออาจรวมตัวกับไอออนลบอื่นๆ เช่น CO_3^{2-} กลายเป็น Metal carbonate เราเรียกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นที่ Anode นี้ว่า เป็นปฏิกิริยา Oxidation ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการเคมีดังนี้คือ



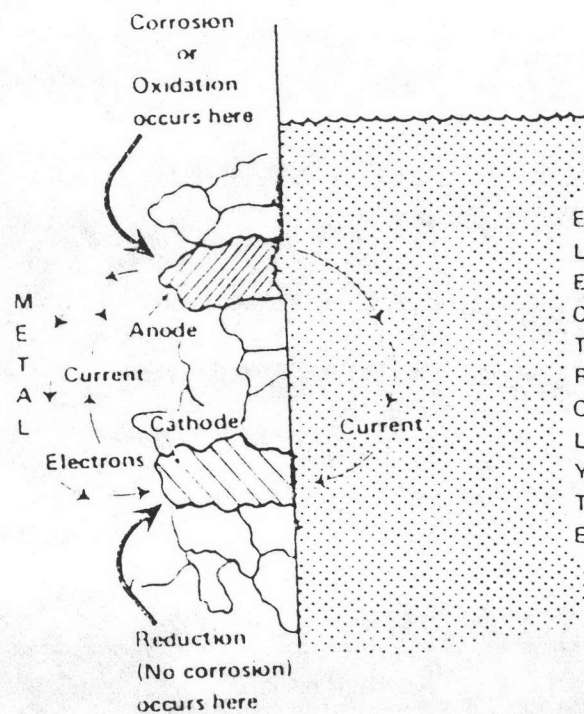
ส่วนโลหะที่เป็นผู้รับอิเล็กตรอน (Cathode) จะให้อิเล็กตรอนแก่ไอออนบวกของโลหะ และกลายเป็นอะตอมของโลหะดังกล่าว สำหรับน้ำที่มี O_2 ละลายอยู่ จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้เกิด Hydroxide ion เราเรียกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นที่ Cathode นี้ว่าเป็นปฏิกิริยา Reduction ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการเคมีดังนี้คือ



เนื่องจากที่ Cathode เกิด OH^- ตามสมการเคมีดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าค่า pH ของน้ำจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อเกิดการผุกร่อน และรวมเรียกปฏิกิริยา Oxidation และ Reduction ที่เกิดที่ Anode และ Cathode นี้ว่า ปฏิกิริยา Redox ตามรูปที่ 3.1 อัตราการกัดกร่อนตามปฏิกิริยา Redox จะเกิดช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับ

- ความแตกต่างของ Electrode potential หรือ Half cell volts ตามตารางที่ 3.1 ยิ่งค่าของ Electrode potential แตกต่างกันมากเท่าใด อัตราการผุกร่อนจะเกิดขึ้นรวดเร็วมากขึ้นตามลำดับ

- เนื่องจากค่าของ Electrode potential ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นหากอุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้อัตราการกัดกร่อนเร็วมากขึ้น
- ความเข้มข้นของไอออนในน้ำ ยิ่งมีความเข้มข้นของไอออนมากจะทำให้อัตราการกัดกร่อนเร็วมากขึ้น
- การเป็นสื่อไฟฟ้าที่ดีของน้ำ จะทำให้อิออนของโลหะเคลื่อนไหวได้รวดเร็ว ซึ่งทำให้อัตราการกัดกร่อนเกิดรวดเร็วมากขึ้น



รูปที่ 3.1 การเกิด Anode และ Cathode ของโลหะในสารละลายที่นำไฟฟ้า
 [จาก NACE basic corrosion course, Parker, M.E., (1969) p. 6.3]

ตารางที่ 3.1 ค่า Standard Electrode Potentials ที่อุณหภูมิ 77 °F
 [จาก Piping Handbook, King, R.C., (1967) p. 9-3]

ชนิดโลหะ	สัญลักษณ์	Standard Electrode Potential (volts ²)
Lithium.....	Li ⁺	-2.959(6) ³
Rubidium.....	Rb ⁺	-2.925(9)
Potassium.....	K ⁺	-2.924(1)
Calcium.....	Ca ⁺⁺	-2.7(63)
Sodium.....	Na ⁺	-2.714(6)
Aluminium.....	Al ⁺⁺⁺	-1.662
Zinc.....	Zn ⁺	-0.761(8)
Chromium (ate).....	Cr ⁺⁺	-0.557
Chromium (ic).....	Cr ⁺⁺⁺	-0.50(a) ³
Iron (ous).....	Fe ⁺⁺	-0.44(1)
Cadmium.....	Cd ⁺⁺	-0.401(3)
Nickel.....	Ni ⁺⁺	-0.23(1)
Tin.....	Sn ⁺⁺	-0.13(6)
Lead.....	Pb ⁺⁺	-0.12(2)
Iron (ic).....	Fe ⁺⁺⁺	-0.045 ⁵
Hydrogen.....	H ⁺	-0.000
Copper (ic).....	Cu ⁺⁺	+0.344(1)
Copper (ous).....	Cu ⁺	+0.552 ⁴
Iodine.....	I ⁻	+0.534(5)
Silver.....	Ag ⁺	+0.797(8)
Mercury.....	Hg ⁺⁺	+0.798(6)
Bromine.....	Br ⁻	+1.064(8)
Chlorine.....	Cl ⁻	+1.358(3)
Gold.....	Au ⁺⁺⁺	+1.3(6)

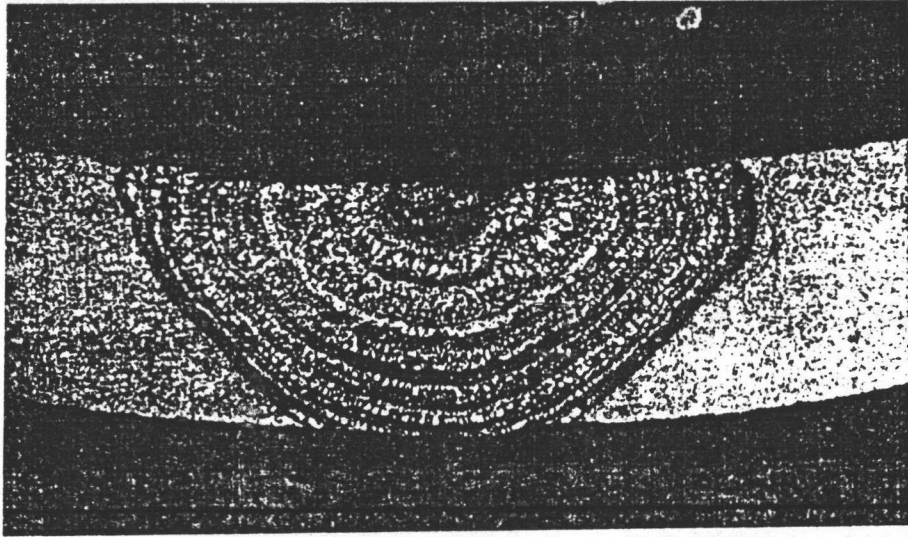
3) การสูญเสียส่วนผสม หรือธาตุประกอบบางชนิดไป เช่นการเกิดการกัดกร่อนแบบ Dezincification ตามรูปที่ 3.2 รูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น เนื่องจากการสูญเสียส่วนผสมที่เป็นสังกะสีออกไปจากส่วนประกอบเดิมของเนื้อโลหะ หรือการสูญเสียส่วนที่เป็น Aluminium ไปจากส่วนผสมของ Aluminium brass ซึ่งเราเรียกว่า Dealuminization



รูปที่ 3.2 การกัดกร่อนแบบ Uniform dezincification ของท่อทองเหลือง



รูปที่ 3.3 การกัดกร่อนแบบ Plug-type dezincification ของท่อความแน่น
[จาก Material Science and Engineering Series, Fontana and
Greene (1967) p.68]



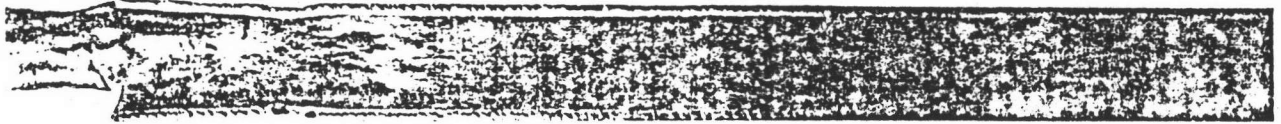
รูปที่ 3.4 การกัดกร่อนแบบ Plug type dezincification ของท่อทองเหลือง
[จาก NACE basic corrosion course, Laque, F.L., (1969) p. 2-20]

4) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสัมผัสกับสารเคมีบางชนิด เช่น การเกิด Caustic embrittlement ของเหล็กซึ่งเกิดขึ้น เนื่องจากการที่เหล็กอยู่ภายใต้แรงเค้น (Stress) และสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีลักษณะเป็นด่าง ซึ่งจะทำให้เหล็กเปราะและแตกง่าย

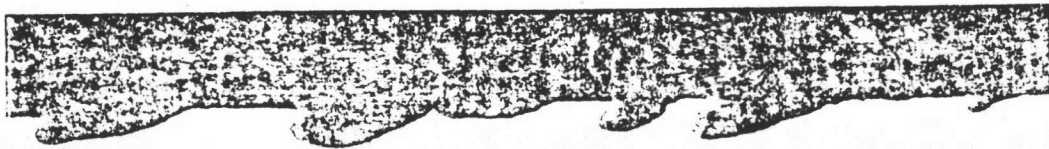
5) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนไหว เช่น การเกิด Fatigue ของท่อในหม้อน้ำ (Boiler) ที่ภายนอกท่อถูกไอความร้อนสัมผัส ส่วนภายในมีน้ำที่จะทำให้น้ำไหลผ่านทำให้ผิวท่อเดือวร้อนเดือวเย็น จึงเกิดการหดและขยายตัวของผิวท่อ จนชั้นผิวป้องกันการกัดกร่อน (Protective oxide Layer) ของท่อเสียหาย และเกิดการกัดกร่อนของเนื้อโลหะต่อไป หรือการเกิด Fretting ของท่อควมแน่นที่สั่นและเสียดสีกับ Tube sheet ทำให้ชั้นผิวป้องกันการกัดกร่อนของท่อเสียหาย และเกิดการกัดกร่อนของเนื้อโลหะในที่สุด

6) การกัดกร่อนที่เกิดเนื่องจากการไหล เช่น การเกิด Impingement attack ของท่อควมแน่น ซึ่งเกิดจากการชนกระทบของน้ำหล่อเย็นที่มีทรายปะปน ตามรูปที่ 3.5 หรือการเกิด Cavitation ของใบพัดเครื่องสูบน้ำ ที่เกิดจากการกระทบของน้ำอย่างรุนแรงขณะใบพัดหมุน ทำให้ชั้นผิวป้องกันการกัดกร่อนเสียหาย และเกิดการกัดกร่อนของเนื้อโลหะ

อย่างรวดเร็วต่อไป



ก) การกัดกร่อนแบบ Impingement attack บริเวณทางเข้าและทางออก
ของท่อความดัน

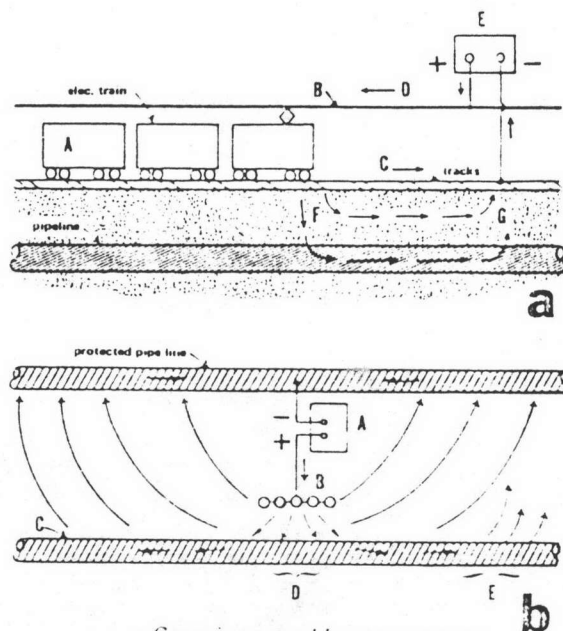


ข) ภาพตัดแสดงบริเวณท่อความดันที่ได้รับการกัดกร่อน

รูปที่ 3.5 การกัดกร่อนแบบ Impingement attack

[จาก NACE basic corrosion, Laque, F.L., (1969) p. 2-23]

7) การกัดกร่อนเนื่องจาก Stay current การกัดกร่อนประเภทนี้จะต้องอาศัย
ตัวนำไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ น้ำ หรือความชื้น เป็นองค์ประกอบ เช่น การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าผ่าน
เข้า-ออกของโลหะ หรือท่อที่ฝังอยู่ใต้ดิน บริเวณของโลหะที่กระแสไฟฟ้าไหลออกจะเกิดการ
กัดกร่อนอย่างรวดเร็ว



- Corrosion caused by stray current.

(a) Variable stray current from traction system. A-Train with electric motor prime movers. B-Overhead conductor. C-Tracks, return ground. D-Load current, variable. E-DC substation supplying current to railroad. F-Part of load current flows from track to earth. Metallic structures in earth path from train to substation will pick up current as shown and tend to be cathodically protected in pickup areas. G-Current discharging from pipeline to earth (corroding the pipe) in substation vicinity to return to negative terminal (ground) and complete the circuit.

(b) Steady state current from nearby cathodic protection system. A-Rectifier for impressed current cathodic protection system. B-Groundbed. C-Pipeline electrically separated from cathodically protected pipeline. D-Pipeline picks up current from groundbed in this area and is protected. E-Current leaves line in this area to flow to protected pipeline to complete circuit. *Pipe corrodes where current leaves it.*

รูปที่ 3.6 การเกิดการกัดกร่อนแบบ Stray current

[จาก NACE basic corrosion course, Peabody, A.W., (1970) p. 5-23]

8) การกัดกร่อนที่เกิดจากการแทรกตัวของธาตุบางชนิด เข้าไปในเนื้อโลหะ เช่น การเกิด Hydrogen attack ของ Hydrogen atom แทรกเข้าไปในเนื้อของโลหะ และเกิดการรวมตัวได้ 2 แบบ แบบแรกเกิดการรวมตัวของ Hydrogen atom เป็น H_2 ซึ่งมี

ขนาดใหญ่ และไม่สามารถออกมาจากเนื้อโลหะได้ แบบที่สองเกิดการรวมตัวของ Hydrogen atom กับส่วนประกอบของเนื้อโลหะ เช่น Titanium จะกลายเป็น Titanium Hydride หรือ คาร์บอนในเหล็ก เกิดการรวมตัวกับ Hydrogen atom กลายเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งมีโมเลกุลใหญ่ไม่สามารถออกมาได้จากเนื้อของโลหะ ทำให้โลหะบวมและอาจปริแตกได้หากความดันของก๊าซสูงพอ

9) Dew point corrosion เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการเย็นลงของสภาวะแวดล้อมจนทำให้ก๊าซกลั่นตัวมาเป็นของเหลวที่มีสภาพเป็นกรด เช่น ก๊าซจากการเผาไหม้ของ SO_2 หรือ SO_3 ภายหลังการสัมผัสกับไอน้ำ และเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิต่ำกว่า 140°C จะกลายเป็นกรดกำมะถัน (Sulfuric acid) ที่กัดกร่อนอย่างรุนแรง

3.3 รูปแบบของการกัดกร่อน (Type of corrosion)

การแบ่งรูปแบบของการกัดกร่อนนั้น มีผู้ให้แนวความคิดเห็นไว้หลายคน เช่น Shreir (1977) ได้แบ่งรูปแบบของการกัดกร่อนออกเป็น 5 แบบ ได้แก่

ก) แบบ Uniform หรือ Almost uniform การกัดกร่อนประเภทนี้ บริเวณที่เกิดการกัดกร่อนจะมีอัตราการกัดกร่อนเดียวกันกับบริเวณอื่น เช่น การเกิด Oxidation ของโลหะ

ข) แบบ Localized การกัดกร่อนประเภทนี้ บริเวณที่เกิดการกัดกร่อนจะมีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่าบริเวณอื่น สาเหตุของการกัดกร่อนได้แก่ ความไม่สม่ำเสมอของเนื้อโลหะ และสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสม เช่น การเกิด Crevice corrosion, Deposit attack หรือ Intergranular corrosion การกัดกร่อนประเภทนี้มีขนาดของการกัดกร่อนตั้งแต่เล็กมากจนถึงมีขนาดใหญ่ และความรุนแรงมาก

ค) แบบ Pitting การกัดกร่อนประเภทนี้มีอัตราการกัดกร่อน ขนาด และความรุนแรงของการกัดกร่อนอย่างมาก จะทำให้เกิดการทะลุทะลวงลงในเนื้อโลหะ เช่น การเกิด Pitting ของ Aluminium alloys หรือ Copper alloys ในสารละลายที่มี Cl^- อีออน

ง) Selective dissolution การกัดกร่อนประเภทนี้เกิดจากการหลุดของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของโลหะผสม เช่น การหลุดของสังกะสี (Dezincification) จากส่วนประกอบของทองเหลือง หรือการหลุดของอะลูมิเนียม (Dealuminification) จากส่วนประกอบของอะลูมิเนียมบรอส

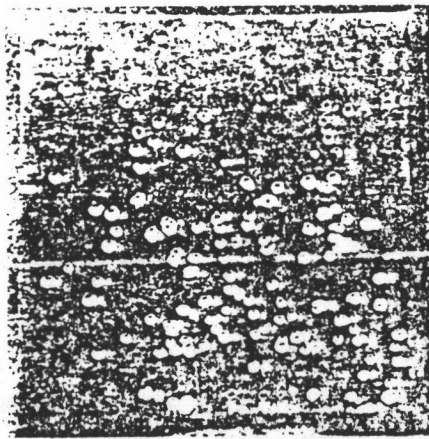
จ) การเกิดการกัดกร่อนแบบหลายชนิดรวมตัวกัน และการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะทางกล เช่น Erosion corrosion, Impingement attack, Cavitation damage หรือ Stress corrosion cracking

National Association of Corrosion Engineers (NACE), (1978) ได้แบ่งรูปแบบของการกัดกร่อนออกเป็น 9 รูปแบบ พอสรุปได้ดังนี้

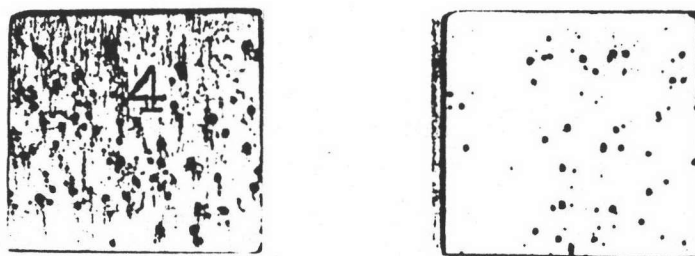
1) Uniform corrosion เป็นอาการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอดผิวหน้าของโลหะ และทำให้โลหะมีความหนาบางลงตลอดทั่วพื้นผิวที่เกี่ยวข้อง สาเหตุที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนประเภทนี้ได้แก่ Mild acid corrosion หรือ Mild caustic corrosion ในบางครั้งอาจเกิดขึ้นเนื่องจาก Galvanic corrosion ได้ ถ้าโลหะที่เป็นขั้วให้ (Anode) อยู่ห่างจากโลหะที่เป็นขั้วรับ (Cathode) และ Galvanic Current สม่ำเสมอ ที่อุณหภูมิต่ำ เราสามารถป้องกันการกัดกร่อนนี้ได้โดยการ Coating เช่น ทาสีธรรมดา หรือสี Epoxy ซึ่งทนต่อสารเคมี หรือทำการเคลือบ (Passivity) แต่ที่อุณหภูมิสูงเราไม่สามารถทำการ Coating ได้ เราจำต้องยอมให้มีการกัดกร่อนเกิดขึ้น แต่ต้องระมัดระวังวัดความหนาของโลหะเป็นระยะๆ เพื่อคำนวณล่วงหน้าว่าจะต้องเปลี่ยนโลหะที่ใช้ดังกล่าวเมื่อใด ในอาการออกแบบเรามักจะคำนวณความหนาขาดเซกการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นไว้ล่วงหน้า

2) Pitting corrosion เป็นอาการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเป็นจุดๆ หรือเป็นแห่งๆ อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก Galvanic corrosion, Concentration cell corrosion, Anaerobic หรือ Aerobic bacteria corrosion WYATT (1976) ให้ความเห็นว่า Pitting corrosion เกิดจากการกัดกร่อนเป็นบางแห่ง หรือเป็นจุดซึ่งเกิดขึ้นเมื่อผิวป้องกัน (Protective film) ถูกทำลายไป การสูญเสียผิวป้องกันดังกล่าว จะทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของ O_2 หรือ pH เป็นต้น ส่วนที่มีความเข้มข้นต่ำจะ

กลายเป็นผู้ให้ (Anode) ที่ถูกร่อน ในขณะที่ส่วนอื่นๆ จะยังคงมีสภาพที่ดีอยู่ การกัดกร่อนประเภทนี้ก่อให้เกิดการสูญเสียและเสียหายมากที่สุด เพราะบ่อยครั้งเราไม่สามารถทำนายได้ว่า โลหะจะเกิด Pitting เมื่อไร และที่ไหน หรือในบางครั้งการตรวจดูลักษณะอาการไม่สามารถกระทำได้อาจเนื่องจากขนาดของ Pitting ที่เกิดมีขนาดเล็กมาก



ก) ลักษณะการเกิด Pitting



ข) Pitting ของ 18-8 Stainless Steel ในสารละลาย HCl

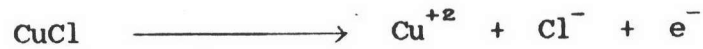


ค) Pitting ของท่อน้ำดื่มที่ทำจากโลหะทองแดง

รูปที่ 3.7 แสดงการเกิด Pitting ในลักษณะต่างๆ

[จาก Material science and Engineering Series, Fontana and Greene
(1967) p. 49]

Boffardi (1985) ได้อธิบายการเกิด Pitting ในท่อความแน่นของโลหะ อะลูมิเนียมบราสว่าเกิดขึ้นเนื่องมาจากการที่ผิวป้องกันการกัดกร่อน Cu_2O ได้รับความเสียหาย ทำให้เกิด CuCl ซึ่งมีลักษณะพรุน ที่ผิวของโลหะภายใต้ของผิว CuCl จะถูก oxidize ตามสมการ

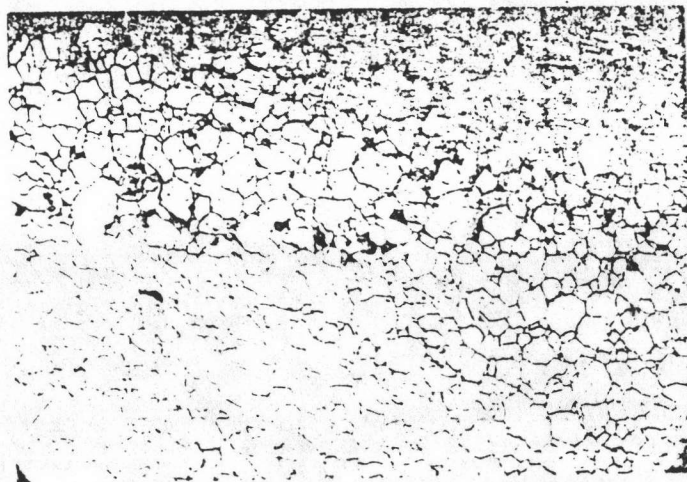


Cu^{+2} ที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับเนื้อของโลหะ ทำให้ได้ Cu^{+1} และจะเล็ดลอดผ่านผิว CuCl ออกมา



เพื่อทำปฏิกิริยากับ Dissolved oxygen ในน้ำหล่อเย็น ทำให้เกิดเกลือของ Cupric salt อยู่บริเวณรอบๆ หลุมของการเกิด Pitting

3) Inter-granular attack เป็นการผุกร่อนบริเวณขอบของ Grain ของโลหะ ซึ่งปกติจะเป็นจุดที่อ่อนแออยู่แล้ว เนื่องจากมีความเค้น (Stress) อยู่ภายในตัวสูง โดยที่บริเวณขอบของ Grain จะเป็นขั้วให้อิเล็กตรอน (Anode) และเนื้อของโลหะภายใน Grain จะเป็นขั้วรับอิเล็กตรอน (Cathode) เช่น การเกิด Stress corrosion cracking ของทองเหลือง หรือการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับท่ออะลูมิเนียมบราสที่สัมผัสกับ Ammonia



ก) ลักษณะ Intergranular attack ขนาดกำลังขยาย 100 เท่า



ข) ลักษณะ Intergranular corrosion ของ Greek bronze
ขนาดกำลังขยาย 200 เท่า



ค) Intergranular attack ที่เป็นสาเหตุของการเกิด Stress corrosion
cracking ขนาดกำลังขยาย 100 เท่า



- ง) ลักษณะ Stress corrosion cracking ของ 304 Stainless steel
ขนาดกำลังขยาย 500 เท่า

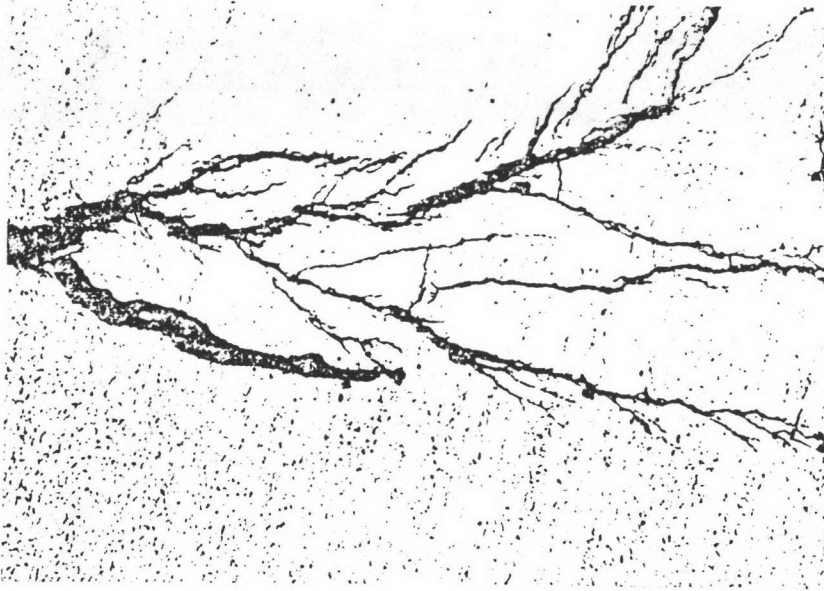


จ) ลักษณะ Pitting ที่เกิดขึ้นภายหลังจาก Intergranular corrosion

รูปที่ 3.8 ลักษณะ Intergranular attack และการกัดกร่อนที่เกิดต่อเนื่อง [จาก NACE basic corrosion course (1978) p. 2-19 ถึง p.2-23 และ Material Science and Engineering Series, Fontana Greene (1967) p. 67]

4) Transcrystalline attack เป็นการกัดกร่อนที่ฉีกข้าม Grain ของโลหะ โดยปกติแล้วการเกิด Transcrystalline attack นี้จะต้องมีความเค้นภายในโลหะ (In-built stress) สูง หรือในบางครั้งโลหะที่เกิดการหดและขยายตัวบ่อยครั้งจนทำให้ผิวป้องกันเกิดการแตก ซึ่งเราเรียก Fatigue corrosion ก็สามารถเกิดการกัดกร่อนแบบ Transcrystalline attack นี้ได้

5) Selective corrosion เป็นการกัดกร่อนที่เกิดเป็นแห่งๆ เช่นการกัดกร่อนบริเวณแนวเชื่อม สาเหตุของการกัดกร่อนเกิดขึ้นเนื่องจากการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วภายหลังจากการละลายของเนื้อโลหะขณะทำการเชื่อม ทำให้มีความเค้นภายในเนื้อโลหะสูง ซึ่งหากโลหะดังกล่าวสัมผัสกับสารเคมีบางชนิดก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ เช่น รอยเชื่อมของเหล็กในบรรยากาศที่มีกรดกำมะถัน นอกจากการเปลี่ยนแปลงของความเค้นภายในเนื้อโลหะเนื่องจากการเชื่อมดังกล่าวแล้ว ลักษณะทางโครงสร้างของเนื้อโลหะ ภายหลังจากการละลายและแข็งตัว

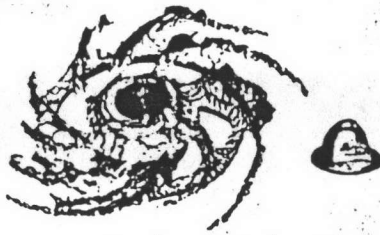


รูปที่ 3.9 การเกิด Transcrystalline stress corrosion cracking ของ Stainless steel ขนาดกำลังขยาย 100 เท่า

[จาก NACE basic corrosion course, Laque, (1969) p. 2-23]

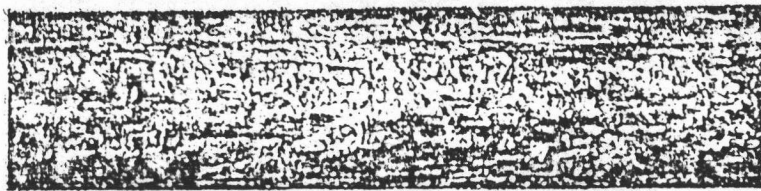
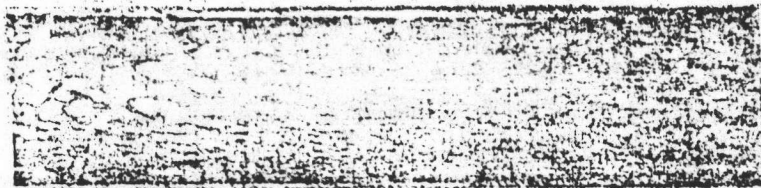
ใหม่ก็จะเปลี่ยนไปด้วย และอาจทำให้ธาตุองค์ประกอบของโลหะบางอย่างหายไปหรือมีเพิ่มขึ้น เช่น การเพิ่มขึ้นของคาร์บอน และไฮโดรเจน ในเนื้อของเหล็กขณะเชื่อม ซึ่งจะทำให้ลักษณะและส่วนประกอบของเนื้อเหล็กเปลี่ยนไป ทำให้แนวเชื่อมมีลักษณะเปราะและพูน

6) Erosion corrosion เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหล โดยเฉพาะ เมื่อมีสิ่งแปลกปลอมปะปนอยู่ในของไหลดังกล่าว เช่น ความเสียหาย เนื่องจากการมีละอองไอน้ำปะปนอยู่กับไอน้ำ เพราะน้ำเพียงหนึ่งหยด ถ้าวิ่งด้วยความเร็ว 100 ฟุตต่อวินาที จะมีแรงกระแทกสูงถึง 7000 ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว อีกตัวอย่างที่พบบ่อยได้แก่ การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกลายสภาพเป็นของเหลวโดยทันทีของก๊าซภายใต้ความดัน ซึ่งจะเกิดแรงกระแทกจากก๊าซที่สูงมากจนทำให้เนื้อโลหะสามารถหลุดออกเป็นแท่งๆ คล้ายกับถูกกรวดกัด เรา มักเรียกว่า การกัดกร่อนแบบ Cavitation ตามรูปที่ 3.10 ถึงรูปที่ 3.12

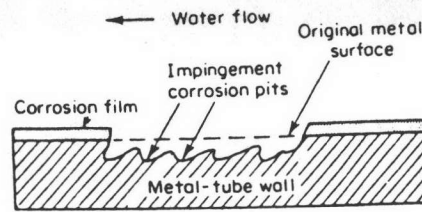


รูปที่ 3.10 การกัดกร่อนแบบ Erosion corrosion ของใบพัดเครื่องสูบน้ำ
ที่ทำจากโลหะผสมของ stainless

[จาก Material Science and Engineering Series, Fontana and
Greene (1967) p. 72]



รูปที่ 3.11 การกัดกร่อนแบบ Erosion corrosion ของท่อทองแดง
[จาก NACE basic corrosion course, Berry (1969) p. 7-5]



รูปที่ 3.12 ภาพตัดของลักษณะการเกิด erosion corrosion ของท่อความดัน
[จาก Material Science and Engineering Series, Fontana and Greene
(1967) p. 72]

7) การแปลงสภาพเนื้อโลหะ เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของเนื้อโลหะ เช่น การที่คาร์บอน เข้าไปในส่วนประกอบของเนื้อเหล็ก (Carburization) ซึ่งจะทำให้เหล็กมีคุณสมบัติเปราะและแตกง่าย ซึ่งหากเรามองแต่ภายนอก จะไม่รู้ว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเหล็กนั้นแล้ว หรือการสูญเสียคาร์บอนจากส่วนประกอบของเนื้อเหล็ก (De-carburization) ซึ่งจะทำให้เหล็กสูญเสียความแข็งแรงไป หรือ การที่ทองเหลืองมีสีแดงเป็นหย่อมๆ และเนื้อโลหะมีลักษณะพรุน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียส่วนประกอบที่เป็นสังกะสี (Dezincification) ไปจากเนื้อทองเหลือง

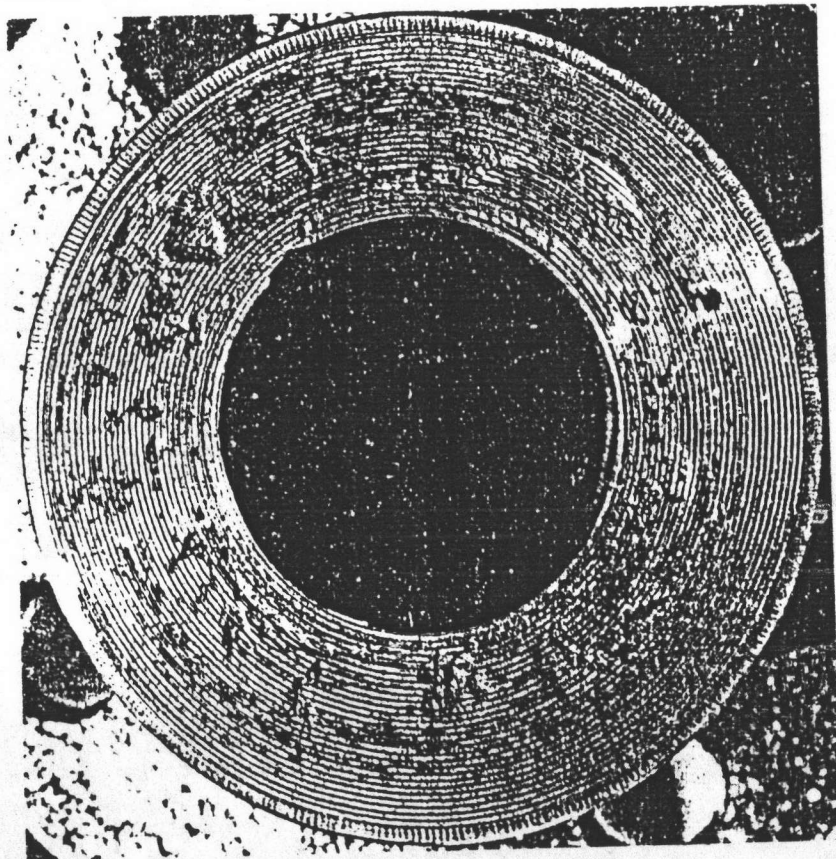


รูปที่ 3.13 การเกิด Carburization และ Oxidation ที่อุณหภูมิสูง
ขนาดกำลังขยาย 250 เท่า

[จาก NACE basic corrosion course, Laque, (1989), p. 2-24]

8) Fatigue และ Fretting การกัดกร่อนประเภทนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนไหว และการเสียดสีจนทำให้ผิวป้องกันการกัดกร่อนขาด หรือปรแตก ลักษณะที่เห็นจะเป็นหลุมหรือรอยแหวนตรงบริเวณผิวโลหะที่เสียหาย เช่น ท่อความดัน ที่อยู่ในรูหลวมๆ ของ Tube sheet หรือ Baffle plate (รูปที่ 2.1) ซึ่งจะเกิดการสั่นสะเทือนมากจนเกิดการผุกร่อนดังกล่าว

9) Crevice corrosion เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในช่องแคบๆ หรือในบริเวณที่มีสิ่งปกปิด เกิดขึ้นเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสภาวะแวดล้อมในบริเวณนั้นกับบริเวณอื่นๆ ทำให้เกิดเป็นเซลล์ไฟฟ้าขึ้น และมีการไหลของอิเล็กตรอนเกิดขึ้น โดยที่บริเวณที่ถูกปกปิดจะเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน (Anode) ที่เกิดการกร่อน ส่วนบริเวณอื่นๆ จะเป็นผู้รับอิเล็กตรอน (Cathode)

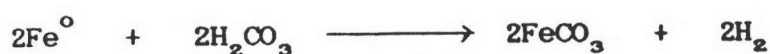


รูปที่ 3.14 การเกิด Crevice corrosion ของหน้างานที่ทำด้วย Stainless Steel
[จาก Material Science and Engineering Series, Fontana and Greene
(1967) p. 40]

3.4 ทฤษฎีการเกิดการกัดกร่อน (Theory of Corrosion)

Sheppard & Powell (1977) ได้สรุปทฤษฎีของการเกิดการกัดกร่อนไว้ 4 ทฤษฎี พอสรุปได้ดังนี้

1) Acid theory คือการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการกัดกร่อน ซึ่งมีองค์ประกอบคือ น้ำ, ออกซิเจน และกรด ปฏิกิริยาการกัดกร่อนเกิดขึ้นเมื่อ กรดเข้าทำปฏิกิริยากับโลหะ ทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนตามสมการ

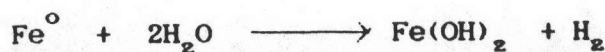


FeCO_3 ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับน้ำ และออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ ทำให้ได้ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ซึ่งจะตกตะกอนและกรด H_2CO_3 กลับมาอีกครั้งหนึ่งตามสมการ

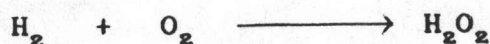


กรด H_2CO_3 ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาการกัดกร่อนอย่างต่อเนื่องต่อไป ดังนั้นจะเห็นได้ว่าถึงแม้ว่าจะมีกรดเพียงเล็กน้อยในน้ำก็สามารถเกิดปฏิกิริยาของการกัดกร่อนขึ้นได้

2) Peroxide theory คือการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของโลหะกับน้ำ ซึ่งได้ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ และก๊าซไฮโดรเจนตามสมการ



ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ O_2 ที่ละลายอยู่ในน้ำได้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตามสมการ



H_2O_2 ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับ $Fe(OH)_2$ ได้ $Fe(OH)_3$ ซึ่งตกตะกอนตาม
สมการ



การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีดังกล่าวนี้จะถูกปิดบังโดยสนิมของโลหะที่เกิดขึ้น
เนื่องจากปฏิกิริยาการกัดกร่อน

3) Colloidal theory เป็นทฤษฎีที่ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย Friend (1923 - 1924) โดยอธิบายว่า พฤติกรรมของ Colloidal สามารถเร่งปฏิกิริยาการเกิด การกัดกร่อนได้โดยเป็นตัวนำพา อ็อกซิเจน หรือตัว Catalyst ซึ่งเป็นสารเพิ่มสภาพการนำ ไฟฟ้า (Electrolyte) ของน้ำ และการสะสมตัวของ Colloidal จะทำให้เกิดการ กัดกร่อนเนื่องมาจากจุลินทรีย์ (Biological) ภายใต้การสะสมตัวอย่างต่อเนื่อง ทฤษฎี Colloidal เป็นทฤษฎีที่สัมพันธ์กับทฤษฎี Electrochemical

4) Electrochemical theory ทฤษฎีการกัดกร่อนนี้ได้ริเริ่มขึ้นโดย Whitney (1903) และได้รับการพัฒนาเรื่อยมาจนเป็นทฤษฎีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน รายละเอียดของทฤษฎีได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2

3.5 องค์ประกอบที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนในระบบท่อ

KING (1967) แบ่งองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนในระบบท่อออกเป็นสอง องค์ประกอบใหญ่ๆ คือ

ก) องค์ประกอบแรก เป็นองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับแนวโน้มของการเกิดการกัด กร่อนของโลหะ ซึ่งมีรายละเอียดพอสรุปดังนี้

1) ความแตกต่างของค่า Standard Electrode Potentials (ตาราง ที่ 3.1) ของโลหะแต่ละชนิดที่เกี่ยวข้องกัน โลหะที่มีค่า Standard Electrode Potentials ต่ำกว่าจะเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน (Anode) ซึ่งจะเป็นขั้วบวกที่ถูกกัดกร่อน ในขณะที่

โลหะที่มีค่า Standard Electrode Potentials สูงกว่าจะเป็นผู้รับอิเล็กตรอน (Cathode) ซึ่งจะเป็นขั้วลบที่ไม่กัดกร่อน

2) ความสม่ำเสมอของผิวโลหะทั้งด้านกายภาพ และทางด้านเคมี ถ้าหากผิวโลหะมีความสม่ำเสมอ การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะเกิดตลอดทั่วผิวหน้า แต่หากว่าผิวโลหะไม่สม่ำเสมอ การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นเฉพาะจุด และจะมีความรุนแรงมาก เช่นการกัดกร่อนแบบ Pitting

3) ความแน่น และความสม่ำเสมอของผิวป้องกันกรกัดกร่อน ซึ่งจะเป็นส่วนที่สำคัญในการปกป้องเนื้อของโลหะภายในจากการกัดกร่อน

ข) องค์ประกอบที่สอง เป็นองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับอัตราการกัดกร่อน ซึ่งได้แก่สภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง มีรายละเอียดพอสรุปได้ดังนี้

1) ความเข้มข้นของไฮโดรเจน ไอออน (pH) ซึ่งเป็นดัชนีที่สำคัญที่แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการกัดกร่อน เราสามารถแสดงค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจน ไอออน ได้ในรูปของสมการเคมีคือ

$$-\text{Log}[\text{H}^+] = \text{pH}$$

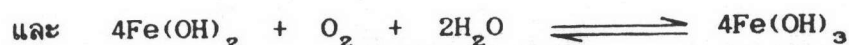
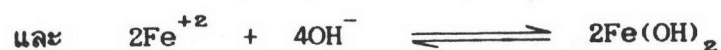
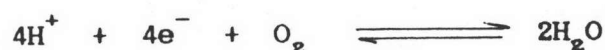
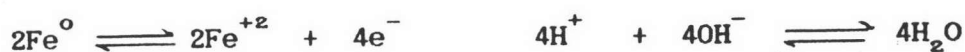
$$\text{หรือ} \quad \text{H}^+ = 10^{-\text{pH}}$$

โดยที่ $[\text{H}^+]$ หมายถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจน ไอออน ที่วัดในหน่วยของ mole/litre

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว เราจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของ pH เพียงหนึ่งหน่วย จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของไฮโดรเจน ไอออน ถึง 10 เท่า ดังนั้น น้ำที่มี pH เท่ากับ 4.0 จึงมีความเป็นกรดมากกว่าน้ำที่มี pH 6.0 ถึง 100 เท่า

2) ความเข้มข้นของออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน

1 บรรยากาศออกซิเจน สามารถละลายน้ำ (Dissolved oxygen, DO) ได้ประมาณ 8.4 มิลลิกรัม/ลิตร ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการเกิดปฏิกิริยาของการกัดกร่อนของโลหะ โดยที่ออกซิเจนดังกล่าวจะช่วยรับอิเล็กตรอนที่เกิดจากการกัดกร่อนของโลหะ (Cathodic Depolarizer) ทำให้ปฏิกิริยาการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ เราสามารถแสดงปฏิกิริยาการกัดกร่อนดังกล่าวได้ด้วยสมการทางเคมีดังนี้คือ



นอกจากนี้ออกซิเจนยังเป็นตัวสนับสนุนการเกิด Differential aeration cell ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการกัดกร่อนชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระจายของออกซิเจนที่ละลายน้ำไม่สม่ำเสมอ โดยบริเวณของโลหะที่มีออกซิเจนละลายน้ำน้อยจะเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน (Anode) ที่กัดกร่อน ในขณะที่บริเวณของโลหะที่มีออกซิเจนละลายน้ำมากจะเป็นผู้รับอิเล็กตรอน (Cathode) ที่ไม่กัดกร่อน

3) อัตราการไหลของน้ำ การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลจะเป็นการเพิ่มอัตราการส่งผ่านของออกซิเจน และทำให้อัตราการกัดกร่อนสูงเพิ่มมากขึ้น และยังช่วยนำเอาผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อนออกมาภายนอกได้รวดเร็วขึ้น

4) การนำโลหะต่างชนิดมาใช้ร่วมกัน จะต้องพิจารณาด้วยความระมัดระวังในเรื่องของค่า Standard Electrode Potential โลหะที่มีค่าดังกล่าวต่ำจะเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน (Anode) ที่กัดกร่อน ส่วนโลหะที่มีค่าดังกล่าวสูงจะเป็นผู้รับอิเล็กตรอน (Cathode) ที่ไม่กัดกร่อน ฉะนั้นในการเลือกใช้โลหะแต่ละชนิดนั้น เรามักจะเลือกใช้โลหะที่มีค่า Standard Electrode Potential เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

5) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จะทำให้อัตราความเร็วในการทำปฏิกิริยาทางเคมีเพิ่มสูงมากขึ้น ซึ่งจะทำให้การกัดกร่อนเกิดได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

6) สภาพแวดล้อมของโลหะ จะมีส่วนช่วยที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อน เช่นในน้ำทะเลซึ่งมีค่าคลอไรด์สูง คลอไรด์ในน้ำทะเลจะเป็นสื่อนำไฟฟ้าที่ดีทำให้เกิดเป็นสื่อนำไฟฟ้าที่ดี ทำให้การแตกตัวของโลหะเกิดขึ้นได้มากและรวดเร็ว นั่นหมายถึงการกัดกร่อนที่รวดเร็วของโลหะดังกล่าว