

620.17
ฟ๗๑๑
๕561

๒๕๖

การศึกษาผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิดจาก
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ด้วยชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่าน

๖2 ๕.๑. 25๕2



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
กรกฎาคม 2561
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

A 43๖3๗

การศึกษาผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิดจาก
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ด้วยชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่าน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
กรกฎาคม 2561

ศุภมาส มากจันทร์. (2561). การศึกษาผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลส-
สตีลที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ด้วยชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่าน. ปริญญา
นิพนธ์ วท.ม. (เคมี). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. อาจารย์ที่
ปรึกษาปริญญาานิพนธ์: ดร.พรทิพย์ บุญศรี, ดร.กษพรณ กาญจนะ.

การกัดกร่อนของท่อสแตนเลสสตีลในระบบน้ำหล่อเย็นเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ เนื่องจากสถานะเดินเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ต้องทำให้อุณหภูมิสูง-
ความดันสูง ทำให้น้ำที่อยู่ในระบบมีอุณหภูมิสูงและมีการสัมผัสกับรังสี ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำเกิดการ
แตกตัว (Water Radiolysis) เป็นโมเลกุลใหม่ ซึ่งมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) รวมอยู่ด้วย โดย
โมเลกุล H_2O_2 มีบทบาทอย่างมากต่อปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนของเนื้อวัสดุที่สัมผัส ใน
ปัจจุบันจึงมีวิธีป้องกันและยับยั้งการกัดกร่อนที่นิยมใช้คือ การเติมไอออนสังกะสี ($Zn(II)$) ลงในระบบน้ำ
หล่อเย็น ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับลดการกัดกร่อนในอุตสาหกรรม
นิวเคลียร์ แต่อย่างไรก็ตามบทบาทของไอออน $Zn(II)$ ในกระบวนการนี้ยังไม่ชัดเจน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมี
วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของไอออน $Zn(II)$ ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล (SS 304) ที่เกิด
จาก H_2O_2 โดยใช้ชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่าน โดยตัวเซลล์จะมีฉนวนห่อหุ้มเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่
จากนั้นนำชุดทดลองที่ได้มาจำลองสภาวะการกัดกร่อนของ SS 304 ที่เกิดจาก H_2O_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ
พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ H_2O_2 จะทำให้เกิดการกัดกร่อนของ SS 304 แบบ Pitting corrosion
เพิ่มมากขึ้น

จากนั้นทำการศึกษาผลไอออน $Zn(II)$ สามารถยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้ โดยไอออน $Zn(II)$
เข้าไปแทนที่ไอออนของ $Fe(II)$ และ $Ni(II)$ แล้วเกิดเป็นสารประกอบ $ZnFe_2O_4$ ในชั้นออกไซด์ของโลหะทำ
ให้ชั้นออกไซด์มีความเสถียรขึ้นจึงป้องกันการหลุดออกของเนื้อโลหะได้ทำให้ปริมาณธาตุ Fe และ Ni
เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ไม่ได้เติมไอออน $Zn(II)$ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออน $Zn(II)$
ทำให้การกัดกร่อนลดลง นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อน
เพิ่มขึ้น โดยพบว่า ที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีปริมาณธาตุ Fe เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก $Zn(II)$ เข้าไป
แทนที่ $Fe(II)$ ทำให้เกิดเป็นสารประกอบ $ZnCr_2O_4$ ซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ที่มีความเสถียรที่สุด จึง
สามารถยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ สรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นสภาวะที่
เหมาะสมในการศึกษาประสิทธิภาพของไอออน $Zn(II)$ ในการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิด
จากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสีด้วยชุดทดลองที่
จำลองระบบน้ำหล่อเย็นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ออกแบบนี้ ดังนั้นผลการทดลองที่ได้มีประโยชน์ใน
การทำความเข้าใจบทบาทของการเติมสังกะสีและเป็นแนวทางในการออกแบบเคมีของน้ำหล่อเย็นสำหรับ
โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เพื่อดำเนินงานการกัดกร่อนได้ดียิ่งขึ้น

STUDY OF THE INHIBITION EFFECT OF ZINC(II) ION ON THE CORROSION IN STAINLESS
STEEL INDUCED BY H_2O_2 USING IN-HOUSE FLOW SYSTEM



Presented in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Master of Science Degree in Chemistry
at Srinakharinwirot University
July 2018

Suppamat Makjan. (2018). *Study of the Inhibition Effect of Zinc(II) ion on Corrosion in Stainless Steel induced by H₂O₂ using In-house Flow System*. Master's thesis, M.Sc. (Chemistry). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University.
Advisor Committee: Dr.Pornthip Boonsri, Dr.Kotchaphan Kanjana.

Corrosion of stainless steel in the cooling systems of nuclear power reactors has caused a significant problem for the nuclear industry. Under the operational conditions of a nuclear reactor, the cooling water in the system becomes exposed to high temperatures and radiation levels, simultaneously. When Water Radiolysis takes place in generating new molecules, including hydrogen peroxide (H₂O₂), resulting in the corrosion of the materials in the system. In order to deal with this problem, in terms of the zinc injection was introduced. This protocol has been proven to be effective corrosion mitigation in the nuclear industry. However, the role of zinc ions in this process have yet to be fully understood. In the present work, the aim was to study the inhibition effect of Zn(II) ion on corrosion in stainless steel (SS 304) induced by H₂O₂ and using an in-house flow system. After the flow system was successfully tested, it was then used to study of the corrosion in SS 304 induced by H₂O₂. It was found that as the H₂O₂ concentration increased, pitting corrosion increased on of the surface.

In the study of the inhibition effect of Zn(II) ion in this chemical system, it was found that Zn(II) ion could inhibit pitting corrosion by substituting Fe(II) and Ni(II) with the oxide layer becoming more stable with ZnFe₂O₄. This oxide helped to protect the metal surface, resulting in the increase of Fe and Ni composition. It was also found that corrosion decreased with the concentration of added zinc. Moreover, the experimental results revealed that somehow temperature tends to facilitate the corrosion inhibition potential of Zn(II) ion. At 50 °C, the amount of Fe was found to increase significantly due to substitution of Zn(II) ion onto Fe(II) ion forming ZnCr₂O₄, which was the most stable oxide in this system. Therefore, 50 °C would be the most suitable temperature for the study of corrosion in stainless steel induced by H₂O₂ using an in-house flow system. The results from the present study showed that under appropriate experimental conditions, the information obtained could be useful in understanding the role of zinc injection in the cooling systems of nuclear power plants.

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การศึกษามลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกักกรองของแอสแตนเลสสตีลที่เกิดจาก
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ด้วยชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่าน
ของ
ศุภมาศ มากจันทร์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เรื่อง ๑.

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)
วันที่ ๒๐ เดือน กรกฎาคม พ.ศ. ๒๕๖๑

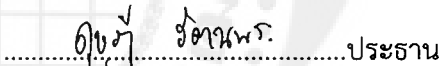
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

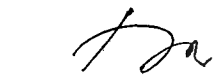


.....ที่ปรึกษาหลัก

(อาจารย์ ดร.พรทิพย์ บุญศรี)

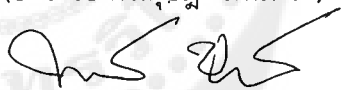
.....ประธาน

(อาจารย์ ดร.ดุษฎี รัตนพระ)



.....ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.กชพรรณ กาญจนะ)



.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.พรทิพย์ บุญศรี)



.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.กชพรรณ กาญจนะ)



.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพิมล ประยงค์พันธ์)

ประกาศคุณูปการ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ดร.พรทิพย์ บุญศรี อาจารย์ที่ปรึกษาหลักที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และทฤษฎีต่างๆ ตลอดจนเป็นที่ปรึกษาในการวางแผน วางแนวทาง การแก้ปัญหา และตรวจสอบข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง รวมถึงขอขอบพระคุณ ดร.กชพรรณ กาญจนะ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา และให้ข้อเสนอแนะต่างๆ อีกทั้งให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการ เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีในการทำวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ นายเจตจันทร์ จันทรนัย ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการจัดสร้างชุดทดลองจนส่งผลให้ปริญญานิพนธ์สมบูรณ์ยิ่งขึ้นและประสบผลสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.ดุขฎิ รัตนพระ จากกลุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ที่ให้ความกรุณามาเป็นประธานกรรมการในการสอบปริญญานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพิมล ประยงค์พันธ์ กรรมการควบคุมการสอบปริญญานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะข้อบกพร่อง เพื่อให้ปริญญานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์และถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร.ศศิกันต์ นุชแดง และนายธีระพงษ์ อาจภักดี เจ้าหน้าที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) ที่ช่วยเหลือในการแนะนำและการใช้เครื่องมือวิเคราะห์จนส่งผลให้ปริญญานิพนธ์สมบูรณ์ยิ่งขึ้นและประสบผลสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณผู้ที่มีความรู้ทั้งหลายที่ได้เผยแพร่ข้อมูล ผ่านวารสารและบทความบนเว็บไซต์ ช่วยให้การงานลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และเจ้าหน้าที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ที่ช่วยเหลือในการประสานงาน และดำเนินงานด้านเอกสารต่างๆ ให้เป็นไปอย่างสะดวกลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนทุนการศึกษาจากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (งบประมาณแผ่นดินประจำปี 2560-2561) ในการศึกษาระดับปริญญาโท และให้ความกรุณา อนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการ เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีแก่ผู้วิจัยตลอดการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในการสนับสนุนทุนพัฒนาศักยภาพทางวิชาการ นิสิตระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2558-2559 และได้รับทุนค่าตอบแทนผู้ช่วยวิจัยจากทุนเงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2559 รวมทั้งทุนเงินรายได้มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปีงบประมาณ 2560 และขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในการสนับสนุนทุนการศึกษาเข้าร่วมประชุมและเสนอผลงานที่ประเทศญี่ปุ่นทำให้ผู้วิจัยต้ององค์ความรู้ใหม่ เพื่อนำมาต่อยอด และพัฒนาผลงานวิจัยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งได้พัฒนาศักยภาพของตนเองโดยเฉพาะอย่างยิ่งทักษะทางด้านภาษาในการนำเสนอผลงานวิจัย

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ใน การศึกษาระดับปริญญาโท และให้ความกรุณา อนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการในการศึกษาและจัดทำ ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ให้อำลั้งใจและให้การสนับสนุนใน ทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแต่ผู้มี พระคุณทุกๆ ท่าน ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจบ้างไม่มากก็น้อย

ศุภมาส มากจันทร์



สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
ความสำคัญของการวิจัย.....	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
โรงไฟฟ้านิวเคลียร์.....	6
การกักตร้อนในสแตนเลสสตีล.....	8
ผลของอุณหภูมิต่อการกักตร้อนที่เกิดจากการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำ.....	17
ผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกักตร้อนในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์.....	22
หลักการของเครื่องมือ XRD, XRF และ SEM-EDS.....	30
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	34
อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	34
สารเคมี.....	35
ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	35
ออกแบบและจัดสร้างชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่านสำหรับการศึกษาการกัก ตร้อน.....	35
การทดลองเพื่อศึกษาบทบาทของไอออนสังกะสี (II).....	37
วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	38
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	39
การออกแบบและจัดสร้างชุดการทดลองที่เป็นระบบไหลผ่านสำหรับการศึกษาการกัก ตร้อน.....	39
การจัดสร้างชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่าน.....	39
การจำลองสภาวะการกักตร้อนที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสี.....	42

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ต่อ	
ผลของไฮออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล 304 ที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2).....	49
ผลของไฮออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล 304 ที่เกิดจาก H_2O_2 ความเข้มข้น 200, 500 และ 1000 ppb ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง.....	49
ผลของไฮออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล 304 ที่เกิดจาก H_2O_2 ความเข้มข้น 0. 5, และ 10% ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง.....	57
การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำด้วยเทคนิค ICP-OES.....	68
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	71
สรุปผลการทดลอง.....	71
ข้อเสนอแนะ.....	72
งานวิจัยในอนาคต.....	72
บรรณานุกรม.....	73
ภาคผนวก.....	80
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	92

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงกรณีศึกษาที่สภาวะแตกต่างกัน.....	5
2 เปรียบเทียบส่วนประกอบของธาตุในชั้นออกไซด์ของสแตนเลสสตีล.....	23
3 แสดงค่าพลังงานอิสระของการเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์และการกระจายตัวของ ไอออนบวกในวัสดุประเภทสปีเนล.....	24
4 แสดงกรณีศึกษาของสแตนเลสสตีล 316L ในสารละลาย 1500 ppm H_3BO_3 และ 2.3 ppm $LiOH \cdot H_2O$ ที่ไม่เติมและเติม 10 ppb ZnO ที่ 300 °C.....	27
5 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในสแตนเลสสตีล 304 (wt%).....	41
6 แสดงสภาวะการทดลองของสแตนเลสสตีล 304 ที่มีการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะไม่เติมและเติม 20 ppb Zn(II) ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง.....	42
7 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตน- เลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะ ไม่เติมและเติม 20 ppb Zn(II) ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง โดยการ ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS.....	46
8 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความ เข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะไม่เติมและเติม 20 ppb Zn(II) ที่อุณหภูมิ 25 °C ใน ระยะเวลา 7 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS.....	47
9 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหลุม Pitting corrosion บนแผ่น ตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะไม่เติมและเติม 20 ppb Zn(II) ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS.....	48
10 แสดงสภาวะการทดลองของสแตนเลสสตีล 304 ที่มีการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะไม่เติมและเติม 20 ppb Zn(II) ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง.....	50

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
11 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะไม่เติมและเติม 20 ppb Zn(II) ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS.....	54
12 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะไม่เติมและเติม 20 ppb Zn(II) ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมงโดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS.....	55
13 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะไม่เติมและเติม 20 ppb Zn(II) ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS.....	56
14 แสดงสภาวะการทดลองของสแตนเลสสตีล 304 ที่มีการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 0-10% ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง.....	58
15 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 0-10% ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS.....	60
16 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 0-10% ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS.....	61
17 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 0-10% ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS.....	62

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
18	แสดงสภาวะการทดลองของสแตนเลสสตีล 304 ที่มีการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 10% และสารละลาย $Zn(II)$ ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลาทดลอง 100 ชั่วโมง.....	63
19	แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของบริเวณผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 0-10% และ $Zn(II)$ ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS.....	65
20	แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 0-10% และ $Zn(II)$ ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS.....	66
21	แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 0-10% และ $Zn(II)$ ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS.....	67
22	แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 10% สภาวะไม่เติมและเติม 0.01 M $Zn(II)$ ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS.....	68
23	แสดงความเข้มข้นของธาตุ Fe, Cr, และ Ni ในสารละลายตัวอย่างหลังการทดลองที่สภาวะต่างๆ โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค ICP-OES.....	70

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงส่วนประกอบหลักของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำความดันสูง (Pressurized Water Reactor หรือ PWR).....	7
2 (ก) แสดงการกัดกร่อนทั่วไป (General Corrosion) และ (ข) การกัดกร่อนเนื่องจากแอมโมเนีย (Ammonia Corrosion).....	10
3 แสดงการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้า (Galvanic Corrosion).....	10
4 แสดงการกัดกร่อนเนื่องจากการไหล (Flow-Assisted Corrosion, FAC).....	11
5 แสดงการกัดกร่อนในพื้นที่ยึดหรือถูกปกปิด (Crevice Corrosion).....	12
6 แสดงการกัดกร่อนแบบสนิมขุม (Pitting Corrosion).....	12
7 แสดงการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion).....	13
8 แสดงการแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนภายใต้แรงเค้น (Stress Corrosion Cracking, SCC).....	14
9 แสดงการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีจุลชีพ (Microbiologically Induced Corrosion, MIC).....	14
10 แสดงภาพจำลองรูปแบบของการกัดกร่อนประเภทต่างๆ.....	15
11 แสดงการกัดกร่อนประเภทต่างๆ ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ PWRs และ BWRs ในประเทศเยอรมัน.....	16
12 แสดงโครงสร้างของอัลลอยด์ IN738LC ผ่านกระบวนการทางความร้อนมาตรฐาน.....	18
13 แสดงการเสื่อมสภาพของเฟสแกมมาไพรม์ (γ') และ Metallic Carbide (MC) เมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงเป็นเวลานาน.....	18
14 แสดงการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของสแตนเลส-สตีล 316L/solution หลังการฉายด้วยรังสี $1.40 \times 10^{20} \text{ H}^+ \text{ m}^{-2}$ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ $300^\circ\text{C}/90 \text{ bar}$	21
15 แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีก่อน/หลังการเติมสังกะสี.....	26
16 แสดง (a) ชั้นออกไซด์ก่อนการเติมไอออน Zn(II) และ (b) ชั้นออกไซด์หลังการเติมไอออน Zn(II).....	27

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
17 แสดงรูปของการเกิดฟิล์มออกไซด์ที่ได้จาก SEM ของ SS 316L ในสารละลาย 1500 ppm H_3BO_3 และ 2.3 ppm $LiOH \cdot H_2O$ ที่ไม่เติมและเติม 10 ppb ZnO ที่ 300 °C เป็นเวลา 4000 ชั่วโมง : (a) ไม่เติม ZnO; case 1, (b) เติม ZnO 2000 ชม. หลัง; case 2, (c) เติม ZnO 2000 ชม. แรก; case 3 และ (d) เติม ZnO ตลอดการทดลอง; case 4.....	28
18 แสดงรูปแบบสัญญาณพีก XRD ของสารประกอบออกไซด์ฟิล์มที่เกิดขึ้นบน SS 316L ในสารละลาย 1500 ppm H_3BO_3 และ 2.3 ppm $LiOH \cdot H_2O$ ที่ไม่เติมและเติม 10 ppb Zn ที่ 573.15 K. Bulk (JCPDS 47-1417), $FeCr_2O_4$ (JCPDS 34-0140), Fe_3O_4 (JCPDS 19-0629), $ZnCr_2O_4$ (JCPDS 22-1107) และ $ZnFe_2O_4$ (JCPDS 22-1012).....	29
19 แสดงหลักการทำงานของเทคนิค XRD.....	30
20 แสดงหลักการทำงานของเทคนิค XRF.....	31
21 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง SEM.....	32
22 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง ICP.....	33
23 แผนภาพชุดทดลองระบบไหลผ่านที่ออกแบบ.....	35
24 แสดงลักษณะของเครื่องแก้วใส่สารตัวอย่าง (Sample Reservoir).....	36
25 แสดงลักษณะของเซลล์ใส่สารตัวอย่าง (Sample Cell).....	37
26 แสดงชุดทดลองระบบไหลผ่านสำหรับการศึกษาบทบาทของไอออน $Zn(II)$ ต่อผลการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำที่มีต่อการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล.....	40
27 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้เสถียรที่ 50 และ 80 °C.....	41
28 แสดง XRD pattern ของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่มีการสัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 ที่ความเข้มข้น 1000 ppb ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง (สีดำ) เปรียบเทียบกับพิกมาตรฐานแสดงโครงสร้างผลึกแบบ Fe_3Ni_2 (สีแดง).....	43

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
29 แสดงภาพ SEM ของพื้นผิวแผ่นตัวอย่าง SS 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่มีความเข้มข้นต่างกันเพื่อจำลองสภาวะการกัดกร่อน; (a) 0 H_2O_2 , (b) 200 ppb H_2O_2 , (c) 200 ppb H_2O_2 , (d) 1000 ppb H_2O_2 , และการศึกษาผลของการเติมไอออน Zn(II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น; (e) 200 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II), (f) 500 ppb.....	43
30 แสดงสัดส่วนปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 200, 500 และ 1000 ppb ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS.....	49
31 แสดงพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่สัมผัสกับน้ำ DI ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง (กรณีศึกษาที่ 8) ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบ stereo (31a) และ confocal (31b).....	51
32 แสดงพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่สัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 1000 ppb ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง (กรณีศึกษาที่ 11) ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบ stereo (32a) และ confocal (32b).....	51
33 แสดงพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่สัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 1000 ppb และ Zn(II) ความเข้มข้น 20 ppb ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง (กรณีศึกษาที่ 14) ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบ stereo (33a) และ confocal (33b).....	51
34 แสดงภาพ SEM ของผิวหน้าของตัวอย่าง SS 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่มีความเข้มข้นต่างกันเพื่อจำลองสภาวะการกัดกร่อน; (a) 0 H_2O_2 , (b) 200 ppb H_2O_2 , (c) 200 ppb H_2O_2 , (d) 1000 ppb H_2O_2 , และการศึกษาผลของการเติมไอออน Zn(II); (e) 200 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II), (f) 500 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II), (g) 1000 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II) ที่ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง.....	52
35 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ด้วยเทคนิค EDS ในสภาวะความเข้มข้นของ H_2O_2 ในช่วง 0-10% ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง.....	63

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
36 ภาพ SEM แสดงผิวหน้าของตัวอย่าง SS 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่มีความเข้มข้น 10% และสารละลาย Zn(II) ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน; (a) 10% H_2O_2 + 0.001 M Zn(II) ที่ 25 °C, (b) 10% H_2O_2 + 0.005 M Zn(II) ที่ 25 °C, (c) 10% H_2O_2 + 0.01 M Zn(II) ที่ 25 °C, (d) 10% H_2O_2 + 0.01 M Zn(II) ที่ 50 °C, และ (e) 10% H_2O_2 + 0.01 M Zn(II) ที่ 80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง.....	64
37 แสดงกราฟมาตรฐาน (calibration curve) ของธาตุเหล็ก (Fe), โครเมียม (Cr), และนิกเกิล (Ni) ในช่วงความเข้มข้น 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2.5, และ 5 ppm.....	69
38 ภาพ SEM แสดงผิวหน้าของตัวอย่าง SS 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่มีความเข้มข้น 10% และสารละลาย Zn(II) ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน; (a) 10% H_2O_2 + 0.001 M Zn(II) ที่ 25 °C, (b) 10% H_2O_2 + 0.005 M Zn(II) ที่ 25 °C, (c) 10% H_2O_2 + 0.01 M Zn(II) ที่ 25 °C, (d) 10% H_2O_2 + 0.01 M Zn(II) ที่ 50 °C, และ (e) 10% H_2O_2 + 0.01 M Zn(II) ที่ 80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง.....	64
39 แสดงกราฟมาตรฐาน (calibration curve) ของธาตุเหล็ก (Fe), โครเมียม (Cr), และนิกเกิล (Ni) ในช่วงความเข้มข้น 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2.5, และ 5 ppm.....	69

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

พลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจอย่างมากในการผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด และให้กำลังผลิตสูงเมื่อเทียบกับการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งอื่น นอกจากนี้เทคโนโลยีนิวเคลียร์ยังถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายๆ ด้าน เช่น การแพทย์ การเกษตร และอุตสาหกรรม ในปัจจุบันโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่กำลังเดินเครื่องมี 449 แห่ง และกำลังอยู่ในขั้นตอนการก่อสร้าง 60 แห่ง และจากการสำรวจในปี ค.ศ. 2014 พบว่า มีการใช้พลังงานนิวเคลียร์ถึง 11% ในการผลิตไฟฟ้าทั่วโลก (Nuclear Energy Around the World, 2017: Online)

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน ซึ่งความร้อนที่ได้มาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกย้ายออกจากแกนเครื่องปฏิกรณ์โดยระบบระบายความร้อนซึ่งจะทำความร้อนในการสร้างไอน้ำ และไอน้ำจะไปขับเคลื่อนกังหันที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป ซึ่งการเดินเครื่องปฏิกรณ์ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จำเป็นต้องทำให้อุณหภูมิสูง-ความดันสูง ทำให้เกิดปัญหาความเสื่อมของวัสดุ (Material aging) ซึ่งกลไกการเกิดความเสื่อม (Aging mechanism) ที่มีความสำคัญและสร้างความเสียหายเป็นอย่างมากต่อวัสดุในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ คือ การกัดกร่อน (Corrosion) นอกจากนี้ วัสดุที่ใช้ยังสัมผัสกับรังสีที่ผลิตจากแกนเครื่องโดยตรง ปัจจัยเหล่านี้ล้วนเป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อนอย่างมากต่อวัสดุ (Kritzer, 2004: 1-29.) ซึ่งการกัดกร่อนนี้เคยเป็นสาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงทางนิวเคลียร์ โดยในปี ค.ศ. 1977 การกัดกร่อนของแท่งเชื้อเพลิงเป็นสาเหตุของการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ของประเทศเชโกสโลวาเกีย (สาธารณรัฐเช็กและประเทศสโลวาเกียในปัจจุบัน) อุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ในครั้งนั้นถูกจัดให้อยู่ในระดับ 4 จากความรุนแรง 7 ระดับ โดยระดับ 1-3 เป็น Incidents และระดับ 4-7 เป็น Accidents (International Nuclear and Radiological Event Scale (INES)-4) (Walker; Miller; & Feiner, 1977: 12) นอกจากนี้พบว่า ประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีการผลิตพลังงานนิวเคลียร์มากที่สุดด้วยพลังงานนิวเคลียร์สูงถึง 19% ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ต้องใช้งบประมาณในการจัดการกับปัญหาการกัดกร่อนในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์สูงถึง 4.2 พันล้านเหรียญสหรัฐ (ประมาณ 150 พันล้านบาท) ต่อปี (Koch; et al. 2002: unpagged)

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบความดันสูง (Pressurized Water Reactor, PWR) และโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบน้ำเดือด (Boiling Water Reactor, BWR) โดยพบว่าในโรงไฟฟ้าทั้ง 2 แบบ การกัดกร่อนส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับวัสดุท่อหุ้มแท่งเชื้อเพลิง และวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของท่อน้ำหล่อเย็น เช่น สแตนเลสสตีล (Stainless Steel, SS) และ เซอร์โคเนียม (Zr) ซึ่งสแตนเลสสตีลที่ใช้อยู่ในกลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic) หรือตระกูล 300 มีธาตุที่เป็นส่วนประกอบหลัก

คือ นิกเกิล (Ni) มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง และโครเมียม (Cr) ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาการรวมตัวกับออกซิเจน (Oxidation) เป็นโครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide film : CrO_2 หรือเรียกว่า Passive film) ซึ่งเป็นฟิล์มบางๆ ติดอยู่บนผิวของสแตนเลสสตีล ถ้าฟิล์มนี้ถูกทำลายจากแรงกล สารเคมี หรือออกซิเจน จะถูกสร้างทดแทนขึ้นใหม่ด้วยตัวเอง แต่การเกิดออกไซด์บนผิวเหล็ก (สนิมเหล็ก) จะมีลักษณะเป็นรูพรุน (Porous) ทำให้ออกซิเจน (O_2) ในอากาศสามารถผ่านชั้นออกไซด์ฟิล์มที่คลุมผิวหน้าอยู่และเข้าทำปฏิกิริยากับเนื้อเหล็กที่อยู่ภายใต้ฟิล์มนี้ เกิดเป็นออกไซด์ในชั้นต่อไปจนถึงภายในโครงสร้างของเหล็ก ทำให้เกิดการกัดกร่อนลึกลงไปถึงเนื้อเหล็กได้ (การกัดกร่อนและการป้องกัน. 2013: ออนไลน์) โดยการกัดกร่อนของโลหะมีหลายประเภท ดังนี้ การกัดกร่อนทั่วไป (General Corrosion, GC) การแตกร้าจากการช่วยของสิ่งแวดล้อม (Environmentally Assisted Cracking, EAC) การแตกร้าเนื่องจากการกัดกร่อนภายใต้แรงเค้น (Stress Corrosion Cracking, SCC) การแตกร้าเนื่องจากการกัดกร่อนด้วยรังสี (Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking, IASCC) การแตกร้าเนื่องจากการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular-Assisted Stress Corrosion Cracking, IGSCC) การกัดกร่อนเนื่องจากการไหล (Flow Assisted Corrosion, FAC) การกัดกร่อนเนื่องจากแอมโมเนีย (Ammonia Corrosion, AC) และ การกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีจุลชีพ (Microbiologically Influenced Corrosion, MIC) (Cattant; et al. 2006) ซึ่งจากงานวิจัยเกี่ยวกับประเภทของการกัดกร่อนในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ PWRs และ BWRs ในเยอรมัน พบว่า การกัดกร่อนส่วนใหญ่เป็นแบบ SCC, IASCC และ IGSCC ร่วมด้วย (Ewelina; & Anna. 2016: 1-9) เนื่องจากในโรงไฟฟ้าทั้ง 2 แบบมีการใช้น้ำเป็นตัวหน่วงนิวตรอนและเป็นสารหล่อเย็น โดยน้ำที่อยู่ในระบบจะมีอุณหภูมิสูงและมีการสัมผัสกับรังสี เมื่อน้ำสัมผัสกับรังสีจะทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการแตกตัว (Water Radiolysis) ส่งผลให้เกิดเป็นโมเลกุลใหม่ (H_2 , O_2 , H_2O_2) และอนุมูลอิสระ ($\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{H}$, e_{aq}^- และ HO_2/O_2^-) (Mirna; Jonathan; & Digby. 2007: 1-13) สารที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำเหล่านี้มีบทบาทอย่างมากต่อปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนของเนื้อวัสดุที่สัมผัส ดังนั้น ปัจจัยหลักที่เร่งให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนต่อวัสดุในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ประเภทนี้ จึงประกอบด้วย ความร้อน ความดัน รังสี และสารเคมีที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสี ซึ่งสารออกซิไดซ์ที่มีผลต่อสภาวะการกัดกร่อนในท่อน้ำหล่อเย็นมากที่สุดคือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสี (Tomonori; et al. 2004: 610-618) ซึ่งงานวิจัยปัจจุบันได้มีการศึกษาเพื่อหามาตรการป้องกันและยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสีในท่อน้ำหล่อเย็น

ปัจจุบันได้มีวิธีป้องกันและยับยั้งการกัดกร่อน โดยการเติมก๊าซไฮโดรเจนเพื่อลดปริมาณสารออกซิไดซ์ ($\cdot\text{OH}$, H_2O_2 และ O_2) ที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสี (Lyon. 2012: 473-547) และ/หรือ การเติมไอออนสังกะสี (Zn(II)) ลงในระบบน้ำหล่อเย็น โดยจากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า การเติมไอออน Zn(II) มีผลต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนและลักษณะของชั้นออกไซด์ของวัสดุ

ด้วยการเข้าไปแทนที่อะตอมนิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) และเหล็ก (Fe) ในระบบน้ำหล่อเย็นวงจรแรก ส่งผลให้จำนวน Co-60 ที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีในระบบลดลง ทำให้ปริมาณรังสีจาก Co-60 ที่ตกค้างลดลงด้วย และพบว่าการแทนที่ Ni(II) ด้วย Zn(II) ทำให้ชั้นออกไซด์ NiO และ NiFe_2O_4 บนผิววัสดุถูกเปลี่ยนไปเป็น ZnO และ ZnFe_2O_4 ตามลำดับ ส่งผลให้ลดปริมาณรังสีจาก Co-58 (ซึ่ง Co-58 เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ของ Ni-58) ได้ (Jin-Soo; et al. 2013: 173-181) นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมไอออน Zn(II) ทำให้ชั้นออกไซด์ของวัสดุบางลง เกิดเป็นสารประกอบ ZnFe_2O_4 และ ZnCr_2O_4 และมีความเสถียรมากขึ้น (Xiahe; Xinqiang; & En-Hou. 2012: 136-144) เนื่องจากพลังงานในการเกิดออกไซด์ของ Zn(II) มีค่าต่ำกว่าของ Ni (NiFe_2O_4 , NiCr_2O_4), Fe (Fe_3O_4 , FeCr_2O_4) และ Co (CoFe_2O_4 , CoCr_2O_4) เป็นผลให้ชั้นออกไซด์มีความเสถียรขึ้น (Chien. 2009: 207-224) จึงสามารถยับยั้งการกัดกร่อนของวัสดุได้ อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถอธิบายได้แน่ชัดว่า ไอออน Zn(II) มีบทบาทและกลไกในการยับยั้งการกัดกร่อนของวัสดุที่เป็นสาเหตุมาจากผลการแตกตัวของน้ำอย่างไร

โครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็นการจำลองการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เป็นผลมาจากการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำในท่อน้ำหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยใช้ H_2O_2 เป็นสารตั้งต้นบรรจุอยู่ในเซลล์ แล้วให้ความร้อนแก่เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่าง ทำให้เกิดการกัดกร่อนบนผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล ซึ่งจะถูกศึกษาด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF), เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) และเทคนิค Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS) ในส่วนของสารผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและจัดสร้างชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่านสำหรับการศึกษาการกัดกร่อน
2. เพื่อจำลองสภาวะการกัดกร่อนที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) บนผิวหน้าของสแตนเลสสตีล
3. เพื่อศึกษาผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)
4. เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลด้วยไอออนสังกะสี (II)

ความสำคัญของการวิจัย

1. ได้ชุดทดลองสำหรับการศึกษาการกัดกร่อนซึ่งเป็นแบบจำลองระบบไหลผ่านในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
2. ได้ทราบถึงรูปแบบการกัดกร่อนที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) บนผิวหน้าของสแตนเลสสตีล
3. ได้ทราบถึงผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)
4. ได้ทราบถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลด้วยไอออนสังกะสี (II)

ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและจัดสร้างชุดการทดลองที่เป็นระบบไหลผ่าน ซึ่งจะประกอบด้วย ภาชนะกักเก็บสารละลายตัวอย่าง ปัมป์ เซลล์ตัวอย่างที่เชื่อมต่อกับระบบควบคุมอุณหภูมิ ตลอดจนระบบเก็บตัวอย่างและทดสอบประสิทธิภาพของชุดทดลองที่ได้
2. ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยมีสภาวะการทดลอง ดังนี้

ตาราง 1 แสดงกรณีศึกษาที่สภาวะแตกต่างกัน

กรณีศึกษา	H ₂ O ₂	Zn(ClO ₃) ₂	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)
1	-	-	25	7
2	200 ppb	-	25	7
3	500 ppb	-	25	7
4	1000 ppb	-	25	7
5	200 ppb	20 ppb	25	7
6	500 ppb	20 ppb	25	7
7	1000 ppb	20 ppb	25	7
8	-	-	25	70
9	200 ppb	-	25	70
10	500 ppb	-	25	70
11	1000 ppb	-	25	70
12	200 ppb	20 ppb	25	70
13	500 ppb	20 ppb	25	70
14	1000 ppb	20 ppb	25	70
15	0%	-	25	100
16	5%	-	25	100
17	10%	-	25	100
18	0%	-	50	100
19	5%	-	50	100
20	10%	-	50	100
21	0%	-	80	100
22	5%	-	80	100
23	10%	-	80	100
24	10%	0.001 M	25	100
25	10%	0.005 M	25	100
26	10%	0.01 M	25	100
27	10%	0.01 M	50	100
28	10%	0.01 M	80	100

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

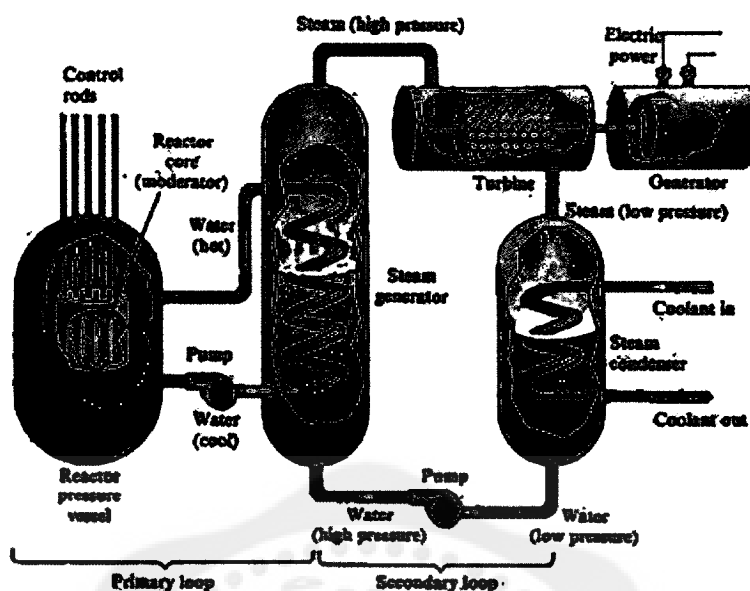
ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์
2. การกักต้อนในสแตนเลสสตีล
3. ผลของอุณหภูมิต่อการกักต้อนที่เกิดจากการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำ
4. ผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกักต้อนในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์
5. หลักการของเครื่องมือ XRF, XRD, SEM-EDS และ ICP-OES

1. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ เป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้พลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาแตกตัวทางนิวเคลียร์หรือนิวเคลียร์ฟิชชัน (Nuclear Fission Reaction) ทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำที่มีแรงดันสูง แล้วส่งไอน้ำไปหมุนกังหันไอน้ำ ซึ่งต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และส่งต่อไปยังผู้บริโภค ซึ่งหัวใจสำคัญของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ คือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear Reactor) เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ก่อให้เกิดและควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบลูกโซ่ (Nuclear Chain Reaction) ทำให้สามารถนำเอาพลังงานความร้อน และรังสีที่เกิดขึ้นไปใช้ให้เป็นประโยชน์ได้

ภาพประกอบ 1 แสดงส่วนประกอบหลักของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ได้แก่ 1) เชื้อเพลิง (Fuel) จะเป็นยูเรเนียมออกไซด์ (UO_2) เรียงไว้ในท่อเป็นแท่งเชื้อเพลิงอยู่ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ 2) Moderator ทำหน้าที่ลดความเร็วของนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันเพิ่มมากขึ้น ส่วนใหญ่จะใช้น้ำ หรือคาร์บอน 3) แท่งควบคุม (Control rods) ทำจากวัสดุที่ดูดกลืนนิวตรอนได้ดี เช่น โบรอน (B) แคดเมียม (Cd) หรือฮาฟเนียม (Hf) สามารถใช้ควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่อเนื่องได้ 4) สารหล่อเย็น (Coolant) เป็นระบบหมุนเวียนน้ำหล่อเย็นที่พาความร้อนออกจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ 5) ถังความดัน (Pressure vessel) เป็นถังเหล็กกล้า (Steel) ใช้สำหรับบรรจุแกนเครื่องปฏิกรณ์ และ Moderator กับสารหล่อเย็น 6) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam generator) เป็นส่วนหนึ่งของระบบหล่อเย็น โดยจะรับความร้อนจากแกนเครื่องปฏิกรณ์มาผลิตไอน้ำ เพื่อใช้ในการหมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ 7) เครื่องกำบัง (Containment) เป็นโครงสร้างที่ครอบเครื่องปฏิกรณ์ สามารถป้องกันการบุกรุกจากภายนอก และป้องกันไม่ให้รังสีแพร่กระจายออกไปในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุขึ้นภายใน โดยทั่วไป Containment จะมีโครงสร้างเป็นคอนกรีตและเหล็กหนา (บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. 2017: ออนไลน์)



ภาพประกอบ 1 แสดงส่วนประกอบหลักของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำความดันสูง (Pressurized Water Reactor หรือ PWR)

ที่มา: รูปที่ 11 ภาพประกอบแสดงเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์. (24 เมษายน 2560). (ออนไลน์)

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 2 แบบ คือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำเดือด (Boiling Water Reactor หรือ BWR) และ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำความดันสูง (Pressurized Water Reactor หรือ PWR)) ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ PWR มีการใช้งานมากที่สุด เนื่องจากจุดเด่นของเครื่องปฏิกรณ์นี้คือ มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำความดันสูง ไหลผ่านแกนเครื่องปฏิกรณ์เป็นวงจรแรก และมีระบบระบายความร้อนวงจรที่สองทำหน้าที่ผลิตไอน้ำเพื่อใช้หมุนกังหันที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วน BWR มีการออกแบบที่คล้ายกับ PWR แตต่างกันที่ระบบหล่อเย็นมีระบบเดียว ซึ่งใช้น้ำที่มีความดันต่ำกว่า ทำให้มีสภาพเป็นน้ำเดือด โดยมีอุณหภูมิประมาณ 285°C เมื่อน้ำเคลื่อนที่ผ่านแกนเครื่องปฏิกรณ์ ขณะที่เดินเครื่องอยู่ เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้จะมีน้ำที่อยู่ในสถานะของไอน้ำ อยู่เหนือแกนเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากความสามารถในการหน่วงนิวตรอนของน้ำในสถานะไอน้ำน้อยกว่าน้ำในสถานะของเหลว จึงทำให้ BWR มีประสิทธิภาพน้อยกว่า PWR (Lister. 2005: 2)

วัสดุโครงสร้าง (Structural materials) ในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์ที่นิยมใช้ ได้แก่ เซอร์โคเนียมอัลลอยด์ (Zr alloy) สแตนเลสสตีล (Stainless steel, SS) คาร์บอนสตีล (Carbon steel) และอะลูมิเนียมอัลลอยด์ (Aluminum alloy) โดยส่วนใหญ่วัสดุหลักที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ แบบน้ำเดือด (BWR) และแบบใช้น้ำความดันสูง (PWR) คือ นิกเกิลอัลลอยด์ (Ni alloy) ที่ประกอบด้วย 15%

Cr (Alloys 600 และ 182), 20% Cr (Alloy 82) หรือ 30% Cr (Alloys 690, 52 หรือ 152) ซึ่งอัลลอยด์นี้ใช้ทำท่อไอน้ำ เนื่องจากต้านทานการกัดกร่อนแบบทั่วไปและจากแรงเค้นได้ดี ตลอดจนมีคุณสมบัติเชิงกลสูง สแตนเลสสตีลที่ใช้ส่วนใหญ่อยู่ในตระกูล 300 (304, 308, 309, 316, 321, 347) ประกอบด้วย 70% เหล็ก (Fe), 10% นิกเกิล (Ni), 20% โครเมียม (Cr) และธาตุอื่นๆ เช่น โมลิบดีนัม (Mo) และไทเทเนียม (Ti) ใช้ทำท่อในระบบหล่อเย็น วัสดุท่อหุ้มเตาปฏิกรณ์แรงดันสูง ปัมป์ วาล์ว วัสดุแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบนิวเคลียร์ต่างๆ Zr alloy ประกอบด้วยธาตุ ไนโอเบียม (Nb), ดีบุก (Sn) หรือ เหล็ก (Fe) ใช้ทำวัสดุท่อหุ้มแท่งเชื้อเพลิง เนื่องจากเซอร์โคเนียม (Zr) มีแนวโน้มในการจับกับนิวตรอนต่ำและต้านทานการกัดกร่อนได้ดี เป็นต้น (Francois; Didier; & Damien. 2008: unpagged) วัสดุเหล่านี้ไม่หลอมละลายที่อุณหภูมิสูง จึงป้องกันการหลอมละลาย (Meltdown) ของเตาปฏิกรณ์ได้ แข็งแรง ทนทาน และเป็นกลาง แต่เมื่อวัสดุเหล่านี้ถูกใช้งานไปในระยะเวลาหนึ่ง พบว่าปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นคือ ความเสื่อมของวัสดุ (Material aging) ซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนของโลหะ เนื่องจากเตาปฏิกรณ์และท่อต่างๆ ทำมาจากสแตนเลสสตีล และการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์นั้นจำเป็นต้องทำให้อุณหภูมิและความดันสูง นอกจากนี้วัสดุยังสัมผัสกับรังสีที่มีพลังงานสูงอีกด้วย ทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างมาก (Kritzer. 2004: 1-29) โดยน้ำที่อยู่ในระบบจะมีอุณหภูมิสูง (320°C) และมีการสัมผัสกับรังสีอยู่ตลอดเวลา เมื่อน้ำสัมผัสกับรังสีจะได้รับการถ่ายเทพลังงาน ทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการแตกตัวด้วยรังสี (Water Radiolysis) ส่งผลให้เกิดการสร้างสารใหม่ขึ้น ได้แก่ $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{H}$, H_2O_2 , H_2 , O_2 , HO_2 , $\cdot\text{O}^{2-}$, H_2O^+ , e^-_{aq} เป็นต้น (Pikeav. 1967: 109-111; Weiss. 1944: 748) ซึ่งสารที่มีความว่องไวเหล่านี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าบนผิวหน้าของวัสดุ และนำไปสู่การกัดกร่อนของวัสดุในที่สุด จึงเป็นที่มาของการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิดจากปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และบทบาทของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น

2. การกัดกร่อนในสแตนเลสสตีล

2.1 สแตนเลสสตีล (Stainless steel)

สแตนเลสสตีล หรือ เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นโลหะผสม (Alloy) ที่มีการเติมธาตุโครเมียม (Cr) ลงในส่วนผสมอย่างน้อย 10.5% โดยมีผลเพื่อปรับปรุงให้เหล็กกล้ามีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้ดี โดยโครเมียมที่เติมลงไปในเรื่องของเหล็กกล้านั้นจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นฟิล์มบาง ซึ่งเป็นชั้นของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) เคลือบผิวโลหะเอาไว้ไม่ให้น้ำและออกซิเจนผ่านเข้าไปทำลายเนื้อโลหะจนเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ ฟิล์มของโครเมียมออกไซด์นี้มีสมบัติเป็นแคโทดิก มีลักษณะคล้ายเกราะป้องกันไม่ให้เนื้อเหล็กทำปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical) แล้วเกิดการกัดกร่อนหรือกลายเป็นสนิมขึ้นได้ สแตนเลสสตีลนิยมใช้เป็นวัสดุสร้างเครื่องจักร เนื่องจากมีความแข็งแรง ทนทาน ทนต่อการกัดกร่อน ทนความร้อน และเป็นกลาง นอกจากนี้อาจมีส่วนผสมอื่นๆ เพื่อเพิ่มสมบัติการยับยั้งการกัดกร่อน เช่น

โมลิบดีนัม (Mo) และไนโตรเจน (N) ซึ่งช่วยจัดการเกิดการกัดกร่อนประเภทสนิมขุมหรือเข็ม ทองแดง (Cu) จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติการยับยั้งการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น

2.2 การกัดกร่อน (Corrosion)

การกัดกร่อน หมายถึง การสูญเสียเนื้อโลหะเนื่องจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีหรือปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของโลหะกับสิ่งแวดล้อม แล้วเกิดเป็นออกไซด์ที่ผิวหน้าของโลหะนั้น ทำให้เกิดการผุกร่อนเสียหายไปเรื่อยๆ จากผิวหน้าสู่เนื้อในของโลหะ ทำให้โลหะมีความแข็งแรงลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุลดลง และหมดสภาพการใช้งานก่อนเวลาอันควร เช่น การเกิดสนิมบนเนื้อเหล็ก หรือโลหะต่างๆ เป็นต้น

สาเหตุการกัดกร่อนแบ่งออกเป็น 3 ประการ คือ

- การกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical)
- การกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electro Chemical Attack)
- การกัดกร่อนที่เกิดจากการเสียดสีของผิว (Abrasive Corrosion)

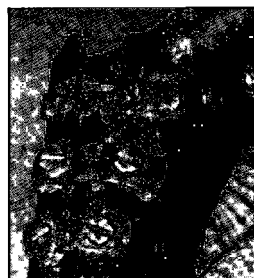
ดังนั้นลักษณะการกัดกร่อนของโลหะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของโลหะผสม ความต่างศักย์ ความเค้น ความขรุขระของผิวหน้า การเกิดปฏิกิริยา Oxidation ค่า pH อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ความเร็วหรืออัตราการไหลของสารละลาย และสารยับยั้งการกัดกร่อน (Wylie; Shelton; & Fleming. 2007: 714-723.)

2.3 ประเภทของการกัดกร่อนในสแตนเลสตีลมีดังนี้ (Francois; Didier; & Damien. 2008; Kritzer. 2004: 1-29)

- การกัดกร่อนทั่วไป (General Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้า (Uniform attack) สามารถตรวจสอบ และคาดคะเนความเสียหายได้ ซึ่งการกัดกร่อนแบบนี้จะพบมากในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ เนื่องจากมีผลกระทบต่อวัสดุทุกประเภท โดยเฉพาะการกัดกร่อนวัสดุต่อไปนี้ (1) การกัดกร่อนของแท่งหล่อหุ้มเชื้อเพลิง โดยได้รับออกซิเจนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้น้ำทำให้ Zr alloy ถูกออกซิไดซ์กลายเป็น Zircon (2) การกัดกร่อนของท่อหล่อเย็นที่ทำจาก Ni alloy โดยท่อน้ำนี้จะปล่อย Ni (ที่สามารถเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ไปเป็นสารกัมมันตรังสีโคบอลต์ Co ได้) และ (3) การกัดกร่อนของท่อส่งน้ำที่ทำจากคาร์บอนสตีล เนื่องจากการปรับคุณภาพทางเคมีของน้ำให้มีความเหมาะสมด้วยการเติมบอร์เรตแอมโมเนียหรือสารประกอบเอมีนในระบบวงจรน้ำ ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากแอมโมเนีย (Ammonia Corrosion) ดังภาพประกอบ 2 ดังนั้นการป้องกันการกัดกร่อนทั่วไปสามารถทำได้โดยใช้วัสดุที่เหมาะสม หรือการเคลือบผิว ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน ใช้การป้องกันแบบแคโทดิก



(ก)

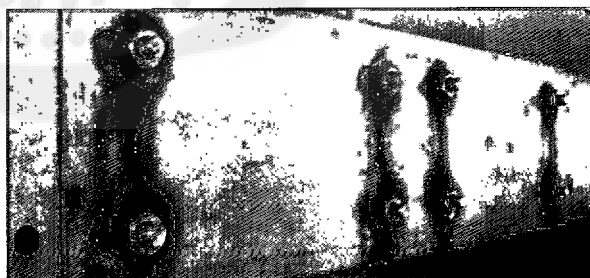
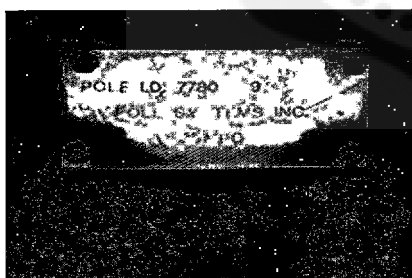


(ข)

ภาพประกอบ 2 (ก) แสดงการกัดกร่อนทั่วไป (General Corrosion) และ (ข) การกัดกร่อนเนื่องจากแอมโมเนีย (Ammonia Corrosion)

ที่มา: ภาพประกอบแสดงการกัดกร่อนทั่วไป (General Corrosion) และ (ข) การกัดกร่อนเนื่องจากแอมโมเนีย (Ammonia Corrosion). (24 เมษายน 2560). (ออนไลน์)

- การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้า (Galvanic Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากโลหะ 2 ชนิดที่มีศักย์ทางไฟฟ้าแตกต่างกันมาอยู่ด้วยกันในสารละลายหนึ่ง โดยโลหะที่ถูกกัดกร่อนจะกลายเป็นแอโนด และโลหะที่เฉื่อยกว่าเป็นแคโทด ซึ่งสแตนเลสสตีลเป็นโลหะที่มีศักย์สูงกว่า ดังนั้นอัตราการกัดกร่อนแบบกัลวานิกจะไม่ค่อยเพิ่มขึ้นในสแตนเลสสตีล ดังภาพประกอบ 3 วิธีการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้าสามารถทำได้โดยหาวัสดุชนวนมากันไม่ให้โลหะ 2 ชนิด สัมผัสกัน

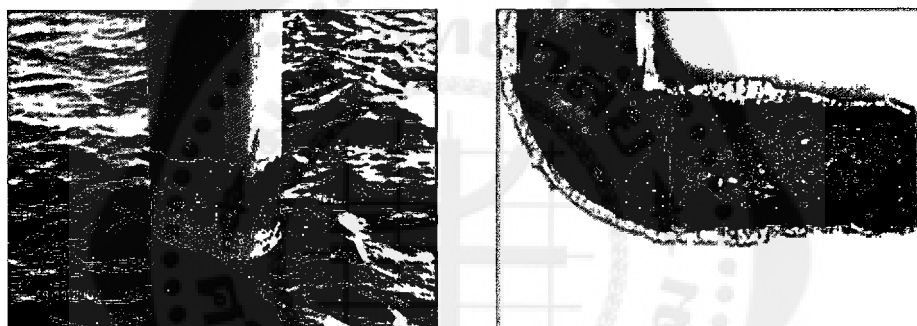


ภาพประกอบ 3 แสดงการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้า (Galvanic Corrosion)

ที่มา: ภาพประกอบแสดงการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้า (Galvanic Corrosion). (24 เมษายน 2560). (ออนไลน์)

- การกัดกร่อนเนื่องจากการไหล (Flow-Assisted Corrosion, FAC) เกิดจากการไหลของสารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง (Erosion Corrosion)/การกัดกร่อนเนื่องจากการขัดถู (Abrasion Corrosion) ความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนจะรุนแรงมากขึ้นถ้าของไหลไหลผ่านผิวโลหะด้วยความเร็วสูง และถ้าการสึกหรอเกิดจากการขัดถูระหว่างอนุภาคของของแข็งที่ปนอยู่ในของเหลวจะทำให้ฟิล์มที่ปกป้องผิวของโลหะถูกทำลายอย่างรวดเร็ว ดังภาพประกอบ 4 แต่สแตนเลสสตีลจะมีความต้านทานการกัดกร่อนแบบสึกกร่อนเนื่องจากการไหล หรือแบบขัดถูสูง เนื่องจากมีฟิล์มถาวรที่ยึดแน่นและสร้างทดแทนขึ้นที่ผิวหน้าสม่ำเสมอ

การป้องกัน วัสดุที่มีความต้านทานการกัดกร่อนแบบ erosion การออกแบบที่มีการเปลี่ยนแลกรูปร่างและทิศทางของไหลของสารละลายเพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบ erosion เช่น ขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเพื่อลดความเร็วลง เป็นต้น

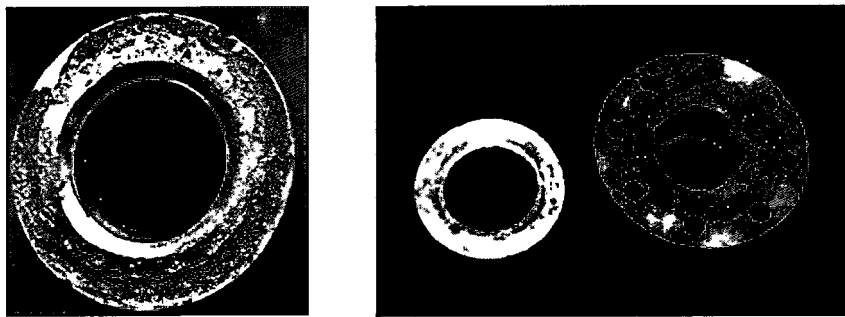


ภาพประกอบ 4 แสดงการกัดกร่อนเนื่องจากการไหล (Flow-Assisted Corrosion, FAC)

ที่มา: ภาพประกอบแสดงการกัดกร่อนเนื่องจากการไหล (Flow-Assisted Corrosion, FAC). (24 เมษายน 2560). (ออนไลน์)

- การกัดกร่อนในพื้นที่อับ (Crevice Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าส่วนที่ถูกปิด หรือกีดกันของสแตนเลสสตีล ส่งผลให้ออกซิเจนไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยา Oxidation เพื่อสร้างฟิล์มออกไซด์ได้ ทำให้ฟิล์มออกไซด์แตกกร้าวหรือถูกทำลายลง ดังภาพประกอบ 5

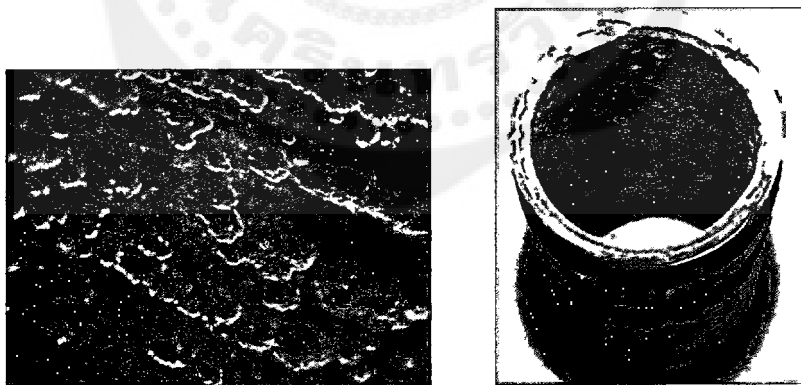
การป้องกัน ปิดพวกมุมอับหรือพื้นที่อับในพวกข้อต่อโดยการเชื่อมปิด การออกแบบภาชนะให้เกิดการระบายน้ำอย่างสมบูรณ์ หลีกเลี่ยงมุมฉากและพื้นที่อับ เพราะจะทำให้ป้องกันการตกตะกอนของพวกของแข็งที่กั้นภาชนะ ใช้การเชื่อมแทนการม้วนให้เป็นท่อ เพื่อหลีกเลี่ยงมุมอับต่างๆ



ภาพประกอบ 5 แสดงการกัดกร่อนในพื้นที่อับหรือถูกปกปิด (Crevice Corrosion)

ที่มา: ภาพประกอบแสดงการกัดกร่อนในพื้นที่อับหรือถูกปกปิด (Crevice Corrosion). (24 เมษายน 2560). (ออนไลน์)

- การกัดกร่อนแบบสนิมขุม (Pitting corrosion) เป็นการกัดกร่อนแบบจุดหรือแบบสนิมขุม ซึ่งเป็นการกัดกร่อนเฉพาะบริเวณที่รุนแรง มีผลทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิวหน้าเป็นรูเล็กๆ หรือเป็นรูทะลุตลอดเนื้อวัสดุ แต่ตรวจวัดการสูญเสียเนื้อวัสดุได้น้อย การกัดกร่อนแบบนี้เริ่มจากบริเวณที่ฟิล์มถูกทำลาย เนื่องจากแรงกระแทก การขาดออกซิเจน หรือสารละลายที่มีสารออกซิไดซ์ และคลอไรด์ไอออน ผสมอยู่ ดังภาพประกอบ 6 การป้องกัน นิยมเติม 2% Mo ใน 304 SS จะเปลี่ยนเป็น 316 SS ทำให้ได้แผ่นฟิล์มเคลือบผิวหน้าที่มีความเสถียรมากขึ้น หรืออาจเติมสารยับยั้งการกัดกร่อนเข้าไปช่วยก็ได้

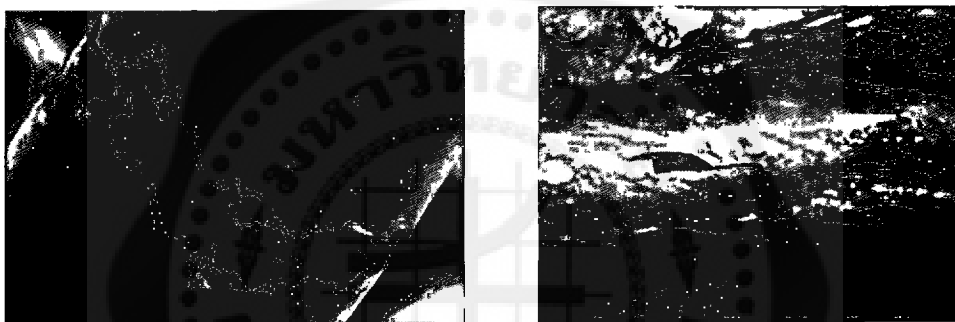


ภาพประกอบ 6 แสดงการกัดกร่อนแบบสนิมขุม (Pitting Corrosion)

ที่มา: ภาพประกอบแสดงการกัดกร่อนแบบสนิมขุม (Pitting Corrosion). (24 เมษายน 2560). (ออนไลน์)

- การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดกระจายอยู่ทั่วไปเป็นแบบ Uniform attack สแตนเลสสตีลที่ใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 950-1450 °F จะเกิด intergranular Corrosion ได้ง่าย เนื่องจากความแตกต่างของปริมาณโครเมียม (Cr) ในบริเวณขอบเกรน เกิดการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรนที่อุณหภูมิสูงทำให้ขอบเกรนมีปริมาณโครเมียมลดลง มีความต้านทานการกัดกร่อนตามแนวขอบเกรนต่ำ ดังภาพประกอบ 7

การป้องกัน ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่มีจำนวนลดลงน้อยกว่า 0.03% หรือทำให้คาร์บอนเหล่านั้นอยู่ในรูปสารประกอบ หรือการเติมธาตุไนโอเบียม (Nb), แทนทาลัม (Ta) เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนให้เพียงพอก็จะไม่ทำให้ปริมาณโครเมียมลดลง หรืออาจจะเผาโลหะให้ร้อนถึง 1000-1100 °C เพื่อให้สารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ละลายหรือหลอมแล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว

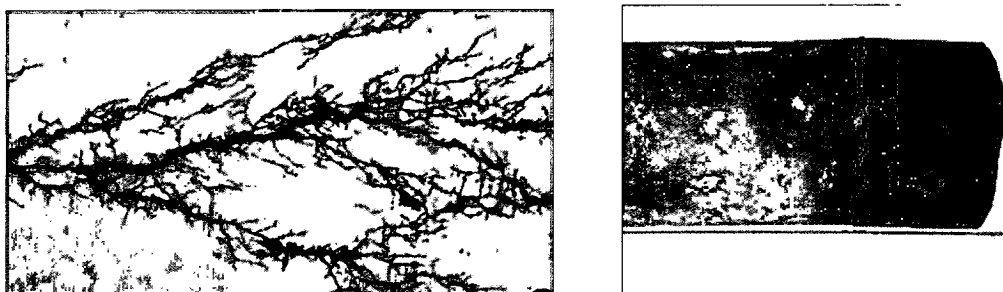


ภาพประกอบ 7 แสดงการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

ที่มา: ภาพประกอบแสดงการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion). (24 เมษายน 2560). (ออนไลน์)

- การแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนภายใต้แรงเค้น (Stress Corrosion Cracking, SCC) เป็นการกัดกร่อนในวัสดุที่พบส่วนใหญ่ในระบบน้ำวงจรแรกของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ PWR โดยมี 3 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนประเภทนี้ คือ วัสดุอ่อนไหวต่อปฏิกิริยา สิ่งแวดล้อมที่สัมผัส และความเค้นสูง ดังภาพประกอบ 8

การป้องกัน การลดค่าความเค้นที่มีอยู่ โดยการอบให้ความร้อน สำหรับสแตนเลสสตีล (Austenitic) ที่อุณหภูมิ 1500-1700 °C การกำจัดธาตุที่เป็นอันตรายที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยการกลั่นหรือแยกแบบต่างๆ การเปลี่ยนโลหะผสม เช่น ใช้พวกโลหะผสมที่มีนิกเกิล (Ni) สูง แทนสแตนเลสสตีล (SS 304) หรือใช้เหล็กกล้าคาร์บอนแทนสแตนเลสสตีล

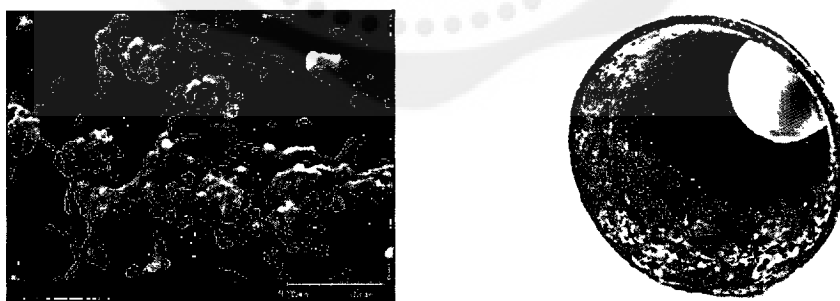


ภาพประกอบ 8 แสดงการแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนภายใต้แรงเค้น (Stress Corrosion Cracking, SCC)

ที่มา: ภาพประกอบแสดงการแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนภายใต้แรงเค้น (Stress Corrosion Cracking, SCC). (24 เมษายน 2560). (ออนไลน์)

- การกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีจุลชีพ (Microbiologically Induced Corrosion, MIC) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากแบคทีเรียที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมเกาะติดที่ผิวหน้าของสแตนเลสสตีลทำให้บริเวณนั้นไม่มีออกซิเจนส่งผลให้แอนาโรบิกแบคทีเรีย (Anaerobic Bacteria) ซึ่งเป็นกลุ่มของแบคทีเรียที่เจริญได้ในภาวะที่ไม่มีอากาศ หรือไม่มีออกซิเจน เจริญเติบโตได้ ดังนั้นกลไกการกัดกร่อนจึงคล้ายกับแบบ crevice แบคทีเรียจึงทำให้สถานการณ์การกัดกร่อนเลวร้ายลง ดังภาพประกอบ 9

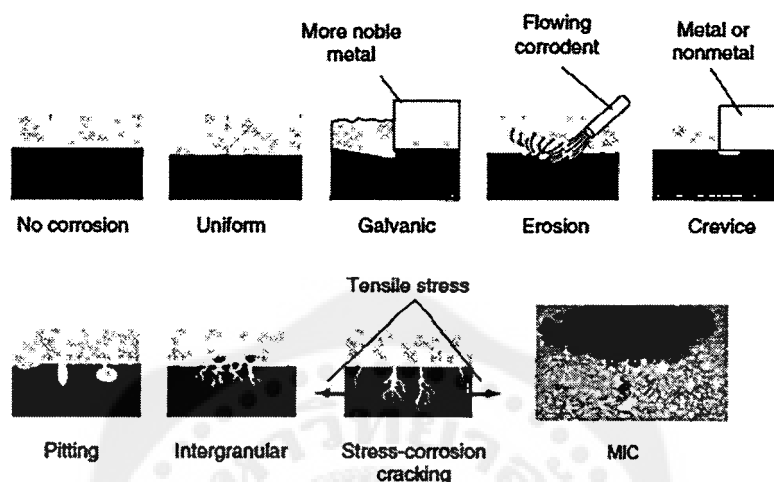
การป้องกัน ตรวจตราเครื่องมือ อุปกรณ์ และหมั่นทำความสะอาดเพื่อกำจัดพวกสารตกค้าง หรือกำจัดพวกของแข็งที่ปะปนเข้ามา กับสารละลายออกก่อนเข้าขบวนการ



ภาพประกอบ 9 แสดงการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีจุลชีพ (Microbiologically Induced Corrosion, MIC)

ที่มา: ภาพประกอบแสดงการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีจุลชีพ (Microbiologically Induced Corrosion, MIC). (24 เมษายน 2560). (ออนไลน์)

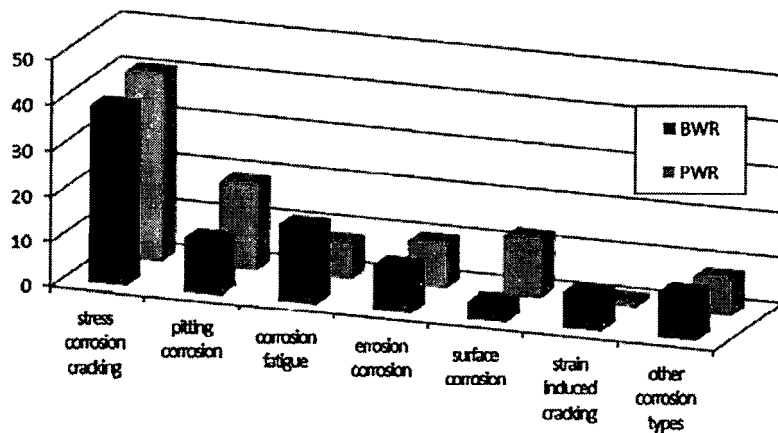
ดังนั้น การกัดกร่อนจึงสามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไป กล่าวได้ว่า โลหะเกือบทุกชนิดเกิดการกัดกร่อนได้ ต่างกันที่ความยากง่ายของการเกิดการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนเร็ว-ช้า สาเหตุของการเกิดการกัดกร่อนจึงมาจากทั้งโลหะและสิ่งแวดล้อมซึ่งมากมายหลายรูปแบบดังแสดงในภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 แสดงภาพจำลองรูปแบบของการกัดกร่อนประเภทต่างๆ

ที่มา: Davis, J. R. (2000). The Effects and Economic Impact of Corrosion. In *Corrosion: Understanding the Basics*. 1-20. Ohio: ASM International.

จากงานวิจัยในปี ค.ศ. 2016 Ewelina และ Anna (Ewelina; & Anna. 2016: 1-9) ได้ศึกษาประเภทของการกัดกร่อนในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ PWRs และ BWRs ในประเทศเยอรมัน พบว่า มีการกระจายตัวของประเภทการกัดกร่อนต่างๆ แสดงดังภาพประกอบ 11 จะเห็นว่า การกัดกร่อนแบบ SCC พบได้มากที่สุดโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทั้ง 2 แบบ



ภาพประกอบ 11 แสดงการกัดกร่อนประเภทต่างๆ ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ PWRs และ BWRs ในประเทศเยอรมัน

ที่มา: Ewelina, C.; & Anna B. (2016). Corrosion mitigation in coolant systems in nuclear power plants. *Prog. Nucl. Energy*. 88: 1-9.

โดยการกัดกร่อนแบบ SCC มีหลายประเภท ได้แก่ ภายในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ BWRs จะเป็นการแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular-Assisted Stress Corrosion Cracking, IGSCC) และ การแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนด้วยรังสี (Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking, IASCC) ในขณะที่ส่วนประกอบของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ PWRs จะเป็นแบบ IASCC และ การแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนของน้ำวงจรแรก (Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC) นอกจากนี้จากประสบการณ์และการทำงานด้านการทดลองพบว่า สแตนเลสสตีลตระกูลออสเทนนิค (Austenitic stainless steels) ได้แก่ 304, 316L, 316CW และ 347 ว่องไวต่อกัดกร่อนแบบ IASCC

นอกจากนี้สแตนเลสสตีลยังนิยมใช้เป็นวัสดุโครงสร้างในแกนของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบา (Light Water Reactors, LWR) ซึ่งได้แก่ อัลลอยด์ 304 และ 316 และเนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ส่วนใหญ่มีอายุการใช้งาน 40-60 ปี จึงมีการศึกษาการเสื่อมอายุของอัลลอยด์ใน LWR ที่อุณหภูมิสูง ภายใต้ความดัน และปริมาณรังสีที่มีความเข้มข้นสูง (Alpha, Beta, Gamma, Neutron และ Proton) สนามรังสีเหล่านี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อวัสดุโครงสร้าง และน้ำหล่อเย็น นำไปสู่การกัดกร่อนแบบ IASCC มีงานวิจัยจำนวนมากที่สนใจศึกษาการกัดกร่อนในสแตนเลสสตีลอันเนื่องมาจากกัมมันตภาพรังสี โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ (Walter. 1958: 483-485; Marsh; et al. 1986: 971-982; Leoni; et al. 2007: 495-510) เช่น ที่เก็บกาก กัมมันตรังสี (Glass; et al. 1986: 577-590) เช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ

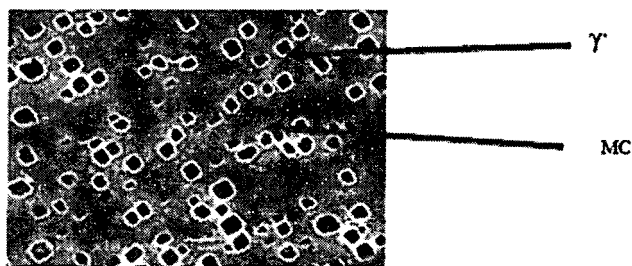
สูงสำหรับ ITER reactor (Vankeerberghen; Bosch; & Van Nieuwenhoven. 2003: 191-198) Boiling Water Reactors (BWR) (Saito; et al. 1990: 531-536; Indig; & Nelson. 1991: 202-209; Saito; et al. 1997: 537-545) หรือ Pressurized Water Reactors (PWR) (Takiguchi; Ullberg; & Uchida. 2004: 601-609; Bosch; Weber; & Vankeerberghen. 2007: 304-314; Bosch; & Vankeerberghen. 2007: 7538-7544) ดังนั้นเพื่อศึกษาการกัดกร่อนแบบ IASCC ใน LWR จึงมุ่งเน้นการแสดงลักษณะรูปแบบของชั้นออกไซด์บนสแตนเลสสตีลหลังการทดลองที่อุณหภูมิสูงในสารละลายที่มีน้ำ (Lister. 1984; Jin-Soo. 2005; Walter. 1958: 483-485) ซึ่งสารวิเคราะห์บางชนิดของชั้นออกไซด์เกิดจากสารตัวอย่างที่ถูกฉายรังสี (Marsh; et al. 1986: 971-982) ดังนั้นงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลด้วยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำโดยการจำลองระบบน้ำหล่อเย็นวงจรแรกของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

3. ผลของอุณหภูมิต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำ

โดยทั่วไปการแตกกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนด้วยรังสี (IASCC) มักเกิดขึ้นกับวัสดุท่อหุ้มแท่งเชื้อเพลิง หรือท่อน้ำหล่อเย็น เนื่องจากการฉายรังสีทำให้น้ำแตกตัวเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลให้สแตนเลสสตีลที่ใช้เป็นวัสดุท่อหุ้มถูกออกซิไดซ์และนำไปสู่การแตกกร้าวแบบ SCC ในที่สุด (Ewelina; & Anna. 2016: 1-9)

3.1 ผลของอุณหภูมิต่อการกัดกร่อน

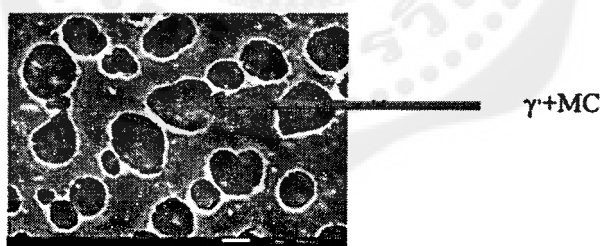
โดยปกติ อัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น จากงานวิจัยของ Yoo และคณะ (Keun-Bong; et al. 2011: 2490-2495) ได้ศึกษาความเสียหายในวัสดุโลหะพิเศษ (Ni-based superalloy) หลังการเผาไหม้จากแก๊สร้อนที่อุณหภูมิสูงในบรรยากาศ เนื่องจากโลหะผสมพิเศษมีการนำไปใช้งานทางวิศวกรรมเพื่อใช้เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นการใช้งานโลหะผสมพิเศษจะต้องเจอกับอุณหภูมิและการรับแรงกระทำจากภายนอกอยู่ตลอดเวลา จึงมีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายสูงขึ้น เช่น การคืบ (Creep) หรือการล้า (Fatigue) ของโลหะผสมได้ ความเสียหายเหล่านี้เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากความร้อน และแรงกระทำจากภายนอก ทำให้สมบัติเชิงกลลดต่ำลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่เป็นผลให้เกิดความเสียหายในวัสดุโลหะผสมนั้น จะต้องพิจารณาตามชนิดของโลหะผสม เช่น Co-based super alloy และ Ni-based super alloy จะมีลักษณะการเสริมแรงที่แตกต่างกัน ซึ่งในการเตรียมโลหะ Ni-based super alloy ใช้หลักการการตกตะกอน (Precipitated) ในรูปของเฟสแกมมาไพรม์ (γ') และจากการศึกษาพบว่า เฟสที่มีความแข็งแรงคือ เฟสที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมดงภาพประกอบ 12 และมีเฟสที่เพิ่มความแข็งแรงอีกชนิดหนึ่งคือเฟสที่เป็น Metallic Carbide (MC) ซึ่งจะมีสมบัติป้องกันการสไลด์ของเกรน (Grain sliding)



ภาพประกอบ 12 แสดงโครงสร้างของอัลลอยด์ IN738LC ผ่านกระบวนการทางความร้อนมาตรฐาน

ที่มา: Keun-Bong, Y.; et al. (2011). Correlation of the microstructural degradation and mechanical strength of Ni-based superalloy after thermal exposure. *Procedia. Engineer.* 10: 2490–2495.

อย่างไรก็ตามเมื่อใช้งานโลหะผสมนี้ที่อุณหภูมิสูงมากๆ เป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของรูปร่างของเฟส γ' และ MC เนื่องจากเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงทำให้พลังงานพื้นที่ผิวของตัวเฟส γ' และ MC มีค่าสูงขึ้นจนเกิดความไม่เสถียร ดังนั้นโลหะจึงทำการลดพลังงานพื้นที่ผิวลงโดยการลดพื้นที่ผิวลง และเกิดการขยายตัวกินเฟสที่เล็กกว่า ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นทั้งเฟส γ' และ MC ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเฟสต่างๆ ดังภาพประกอบ 13 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังกล่าวส่งผลต่อไปยังสมบัติต่างๆ ทำให้เกิดความเสียหายในวัสดุเป็นเหตุให้อายุการใช้งานสั้นลง

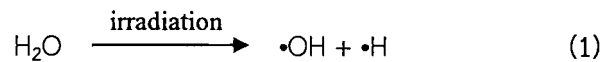


ภาพประกอบ 13 แสดงการเสื่อมสภาพของเฟสแกมมาไพรม์ (γ') และ Metallic Carbide (MC) เมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงเป็นเวลานาน

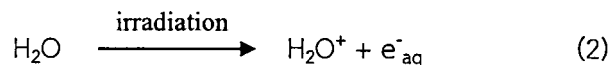
ที่มา: Keun-Bong, Y.; et al. (2011). Correlation of the microstructural degradation and mechanical strength of Ni-based superalloy after thermal exposure. *Procedia. Engineer.* 10: 2490–2495.

3.2 การแตกตัวด้วยรังสีของน้ำ (Water Radiolysis) (Weiss, J. 1944)

น้ำ (H_2O) เมื่อได้รับรังสีจะเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ ($\bullet\text{OH}$ และ $\bullet\text{H}$) ดังสมการที่ (1)



ถ้าหากน้ำได้รับรังสีที่มีพลังงานสูงจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (H_2O^+ และ e^-_{aq}) ดังสมการที่ (2)



ซึ่ง e^-_{aq} สามารถสูญเสียพลังงานของมันและรวมตัวกับ H_2O^+ เกิดเป็นโมเลกุลน้ำที่มีพลังงานสูง (H_2O^*) จึงต้องแยกตัวออกเป็นอนุมูลอิสระ ดังสมการที่ (3)-(4)



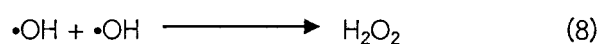
เมื่อ e^-_{aq} สูญเสียพลังงาน จึงถูกไฮเดรตได้ง่ายกลายเป็น hydrogen radical ($\bullet\text{H}$) และ hydroxyl ion (OH^-) ดังสมการที่ (5)



นอกจากนี้ H_2O^+ ยังสามารถแยกตัวเป็น hydroxyl radical ($\bullet\text{OH}$) และ hydrogen ion (H^+) ได้ ดังสมการที่ (6)



ซึ่งจากการแตกตัวของน้ำที่กลายเป็นอนุมูลอิสระ ($\bullet\text{OH}$, $\bullet\text{H}$) อาจเกิดการรวมตัวของอนุมูลอิสระเป็น H_2 และ H_2O_2 เนื่องจากมีความเข้มข้นของ H_2O^+ มาก ดังสมการที่ (7)-(8)



โดยปริมาณสารสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์และการเกิดอนุมูลอิสระขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอนุมูลอิสระในแนวรังสี ซึ่งภายใต้การฉายรังสีอนุภาคนักทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน HO_2 หรืออนุมูลอิสระ และสารโมเลกุลใหม่ได้ ดังสมการ (9)



ดังนั้นผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่ได้จากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสี คือ e^-_{aq} , $\bullet\text{H}$, H_2 , $\bullet\text{OH}$, H_2O_2 และ HO_2 นอกจากนี้ยังเกิดการผลิต O_2 โดยอ้อมจากการเกิด Interaction ระหว่างอนุมูลอิสระกับ H_2O_2 ดังสมการ (10)-(12)



สรุปได้ว่า ปฏิกิริยาที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสีทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ดังนี้ e^-_{aq} , $\bullet\text{H}$, H_2 , $\bullet\text{OH}$, H_2O_2 , OH_2^- , O_2 , O_2^- , H^+ และ OH^-

สารที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำเหล่านี้มีบทบาทอย่างมากต่อปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนของเนื้อวัสดุ ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำ และการกัดกร่อนในสแตนเลสสตีล

โดยสรุปปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนในระบบท่อน้ำ ได้แก่

- แร่ธาตุในน้ำ และการแตกตัวของน้ำ : สารละลาย Fe , Cl , e^-_{aq} , $\bullet\text{H}$, H_2 , $\bullet\text{OH}$, H_2O_2 , OH_2^- , O_2 , O_2^- , H^+ และ OH^-
- อุณหภูมิ : อุณหภูมิสูง การกัดกร่อนสูง
- ก๊าซ CO_2 , O_2
- pH : ค่า pH ต่ำ มีแนวโน้มการกัดกร่อนสูง

จากงานวิจัยของ Benoist และคณะ (Benoist; et al. 2011: 241-247) ได้ศึกษาบทบาทของการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำต่อการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ PWR ที่อุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}\text{C}/155\text{ bar}$ โดยใช้รังสีโปรตอนที่มีพลังงานสูงเพื่อควบคุมผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากรังสีบนผิวหน้าระหว่างสแตนเลสสตีลกับน้ำในเซลล์เคมีไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิ และความดันสูง ซึ่งอยู่ในช่วง $25\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ bar} - 300\text{ }^{\circ}\text{C}/90\text{ bar}$ ซึ่งเซลล์ที่ออกแบบทำจากสแตนเลสสตีลเกรด 316L ทำการศึกษาลักษณะการกัดกร่อนโดยบันทึกศักย์การกัดกร่อน (Free corrosion potential) ทั้งก่อน ระหว่าง และหลังการฉายรังสีโปรตอน

พบว่า สารละลายที่ได้จากการทดลองประกอบด้วย โบรอน (B), ลิเทียม (Li) และไฮโดรเจน (H) ที่ละลายอยู่ในน้ำหล่อเย็นวงจรแรกของ PWR นอกจากนี้ผิวหน้าของสแตนเลสสตีลที่สัมผัสกับน้ำที่ถูกฉายรังสีโปรตอน (22 MeV) ให้ค่าศักย์การกัดกร่อนสูงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และ/หรือ ความดัน ซึ่งพบว่า เมื่ออุณหภูมิ และ/หรือ ความดันลดลง ศักย์ไฟฟ้าก็จะลดลง และเมื่ออุณหภูมิ และ/หรือ ความดันสูงขึ้น ศักย์ไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และที่ 300 °C/90 bar พบการกัดกร่อนมากที่สุด (พิจารณาได้จากค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูง) จึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิมีผลต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำเป็นอย่างมาก นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผิวหน้าของสแตนเลสสตีลด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS) ดังภาพประกอบ 14 พบว่า ผิวหน้าที่ถูกออกซิไดซ์ประกอบด้วย Iron chromite spinel phase ($\text{Fe}_{1+x}\text{Cr}_{2-x}\text{O}_4$) ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ และ Nickel ferrite spinel phase ($\text{Ni}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$) ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก



ภาพประกอบ 14 แสดงการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของสแตนเลสสตีล 316L/solution หลังการฉายด้วยรังสี $1.40 \times 10^{20} \text{ H}^+ \text{ m}^{-2}$ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 300 °C/90 bar

ที่มา: Benoist, M.; et al. (2011). Electrochemical behaviour of stainless steel in PWR Primary Coolant Conditions: Effects of Radiolysis. *J. Nucl. Mater.* 419: 241-247.

นอกจากนี้ มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ BWR ซึ่งใช้น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงเป็น Neutron Moderator และน้ำหล่อเย็นวงจรแรกในการผลิตไอน้ำ มีผลิตภัณฑ์ของการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำในท่อน้ำหล่อเย็นภายใต้สภาวะการเดินเครื่องที่ใช้น้ำธรรมดา (Normal water chemistry, NWC) ประกอบด้วยสารออกซิไดซ์ (Oxidant) ที่เป็น O_2 และ H_2O_2 ความเข้มข้นโดยรวมเฉลี่ยเท่ากับ 200 ppb ในระบบน้ำหมุนเวียน (Chien; Smith; & Cowan. 1996: 31-36) ซึ่งสารออกซิไดซ์นี้เพียงพอที่จะเป็นสาเหตุของการกัดกร่อนในวัสดุโลหะ โดยเฉพาะการกัดกร่อนแบบ IGSCC

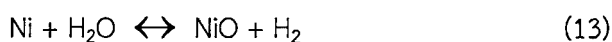
ในสแตนเลสสตีล ซึ่งสารออกซิไดซ์ที่มีผลต่อสภาวะการกัดกร่อนในท่อน้ำหล่อเย็นมากที่สุดคือ H_2O_2 ที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสี (Tomonori; et al. 2004: 610-618) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ H_2O_2 เป็นสารตั้งต้นเพื่อจำลองการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เป็นผลมาจากการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำในท่อน้ำหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

4. ผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์

การกัดกร่อนในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับวัสดุท่อหุ้มแท่งเชื้อเพลิง และวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของท่อน้ำหล่อเย็น เช่น สแตนเลสสตีล และ เซอร์โคเนียม ปัจจุบันจึงมีวิธีป้องกันและยับยั้งการกัดกร่อนหลายวิธี เช่น การเปลี่ยนวัสดุ การแยกโลหะออกจากสภาวะแวดล้อม การปรับความเค้น การปรับสภาวะแวดล้อม การซ่อมเครื่องมือ การเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน เป็นต้น (IAEA Report NP-T-3.13. 2011: unpagged) ซึ่งวิธีที่นิยมใช้คือ การเติมสารยับยั้งลงในระบบน้ำหล่อเย็นเพื่อควบคุมการกัดกร่อน โดยการเติมก๊าซไฮโดรเจนเพื่อช่วยลดปริมาณสารออกซิไดซ์ ($\cdot OH$, H_2O_2 และ O_2) ที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสี หรือ การเติมไอออน $Zn(II)$ ลงในระบบน้ำหล่อเย็น โดยไอออน $Zn(II)$ จะเข้าไปแทนที่อะตอม $Co(II)$ ที่เกาะอยู่บนชั้นออกไซด์ของวัสดุ เนื่องจาก $Zn(II)$ มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า $Co(II)$ ทำให้ชั้นออกไซด์มีความเสถียรขึ้นจึงสามารถช่วยยับยั้งการกัดกร่อนได้ และยังลดปริมาณรังสีจาก $Co-60$ ที่ตกค้างได้ด้วย (Kim. 1995: 849-860)

4.1 การเติมก๊าซไฮโดรเจน (H_2)

จากงานวิจัยของ Takiguchi และคณะ (Takiguchi; et al. 2004: 601-609) ได้ศึกษาเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไฮโดรเจนสำหรับควบคุมการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำหล่อเย็นวงจรแรกในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ PWR โดยการเติมก๊าซ H_2 เพื่อลดปฏิกิริยาเคมีของน้ำในระบบหล่อเย็นแรกของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ PWR ซึ่ง H_2 มีความสามารถในการยับยั้งการสร้างตัวออกซิไดซ์ที่เกิดจากการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำหล่อเย็น โดยระดับไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (Dissolved Hydrogen, DH) ของ PWR วงจรแรกเท่ากับ $25-35 \text{ cm}^3$ (STP) ปริมาตรไฮโดรเจนต่อกิโลกรัมของน้ำ (Da Cunha Bello; et al. 1998: 447-463) ซึ่งระดับ DH ที่ต้องการสำหรับปรับเคมีของน้ำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (Buckley; & Schenker. 1994: 211-218) เมื่อพิจารณาที่ระดับ DH ต่ำๆ เชื่อว่าเพียงพอที่จะยับยั้งสารออกซิไดซ์ในน้ำวงจรแรกของ PWR ได้ โดยไฮโดรเจนมีผลต่อความเสถียรของ Ni ในน้ำวงจรแรกของ PWR ผ่านปฏิกิริยา ดังนี้ (13)



ดังนั้นการเติม H_2 ทำให้โลหะที่มีส่วนประกอบเป็น Ni ในรูปของ NiO และออกไซด์อื่นๆ ที่มี Ni เป็นส่วนประกอบมีความเสถียรมากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนในท่อน้ำลดลง นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Chien และคณะ (Chien; Smith; & Cowan. 1996: 31-36) เมื่อพิจารณาลักษณะของชั้นออกไซด์ของสแตนเลสสตีลที่อยู่ในน้ำธรรมดา (Normal Water Chemistry, NWC) และในน้ำที่มีการเติม H_2 (Hydrogen Water Chemistry, HWC) พบว่า ชั้นออกไซด์ของสแตนเลสสตีลในน้ำที่มีการเติม H_2 มีความบางกว่าชั้นออกไซด์ของสแตนเลสสตีลที่อยู่ในน้ำธรรมดา และมีส่วนประกอบของธาตุต่างๆ แสดงดังตาราง 2

ตาราง 2 เปรียบเทียบส่วนประกอบของธาตุในชั้นออกไซด์ของสแตนเลสสตีล

Chemistry condition	Oxide thickness	Major element composition (wt%)		
	(Å)	Cr	Fe	Ni
Base metal	-	18	70	10
Oxide from NWC	4000	20	68	10
Oxide from HWC	500	40	45	12

ที่มา: Chien C.L.; Smith, F.R.; & Cowan, R.L. (1996). Effects of hydrogen water chemistry on radiation field buildup in BWRs. *Nucl. Eng. Des.* 166: 31-36.

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การเติม H_2 ทำให้ความหนาของชั้นออกไซด์บางลงส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนช้าลงซึ่งวัดได้จากอัตราการเกิดเป็นฟิล์มออกไซด์ และมีธาตุ Cr สะสมในฟิล์มทำให้สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ แต่อาจส่งผลให้เกิดการดูดซับ และ/หรือ เกิดปฏิกิริยาการสะสมของ Co-60 บนผิวหน้าของสแตนเลสสตีลกลายเป็น $CoCr_2O_4$ ทำให้ชั้นออกไซด์ไม่เสถียรและมีการแผ่รังสีของ Co-60

ดังนั้น Baston และคณะ (Baston; Garbauskas; & Bozeman. 1996:337) จึงศึกษาหาวิธีการทำให้ชั้นออกไซด์มีความเสถียรมากยิ่งขึ้น โดยการเติมโลหะชนิดต่างๆ ลงในวัสดุประเภทสปินเนล (Spinel structure) ที่มีธาตุเหล็ก (Fe) และโครเมียม (Cr) เป็นส่วนประกอบ ทำให้เกิดเป็นออกไซด์รูปแบบ $MeFe_2O_4$ และ $MeCr_2O_4$ (Me = Mn, Co, Ni, Zn และ Mg) แสดงผลดังตาราง 3 พบว่า ค่าพลังงานอิสระของการเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของสังกะสี ($ZnFe_2O_4$ และ $ZnCr_2O_4$) มีค่าต่ำสุดแสดงว่า การเกิดเป็นชั้นออกไซด์มีความเสถียรมากที่สุด จึงเป็นที่มาของการศึกษาบทบาทของไอออน Zn(II) ในการป้องกันและยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะ

ตาราง 3 แสดงค่าพลังงานอิสระของการเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์และการกระจายตัวของไอออนบวกในวัสดุประเภทสปีเนล

Oxide formula	Free energy of formation (kcal/mol) (at 560 K)
Fe_3O_4	-290
NiFe_2O_4	-280
CoFe_2O_4	-283
ZnFe_2O_4	-303
NiCr_2O_4	-348
FeCr_2O_4	-360
CoCr_2O_4	-361
ZnCr_2O_4	-380

ที่มา: Baston, V.F.; Garbaskas, M.F.; & Bozeman, J. (1996). Decontamination flange film characterization for a boiling water reactor under hydrogen water chemistry. *Nucl. Technol.* 114: 337.

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการเติม H_2 ในน้ำหล่อเย็นวงจรแรกจะช่วยลดผลิตภัณฑ์อนุมูลอิสระ (เช่น O_2 , H_2O_2) และค่าศักย์การกัดกร่อนในระบบน้ำหล่อเย็นวงจรแรกได้ (Lin. 1996a; Lin. 1996b; Lin. 2000c: 59–70) แต่เทคนิคนี้ส่งผลข้างเคียงทำให้ผลผลิตสารระเหยของ N-16 มากขึ้น และเพิ่มสนามรังสีในน้ำหล่อเย็นวงจรแรกอีกด้วย (Lin. 1989: 129; Ruiz; Lin; & Wong. 1989: unpagged)

4.2 การเติมไอออนสังกะสี (Zinc injection)

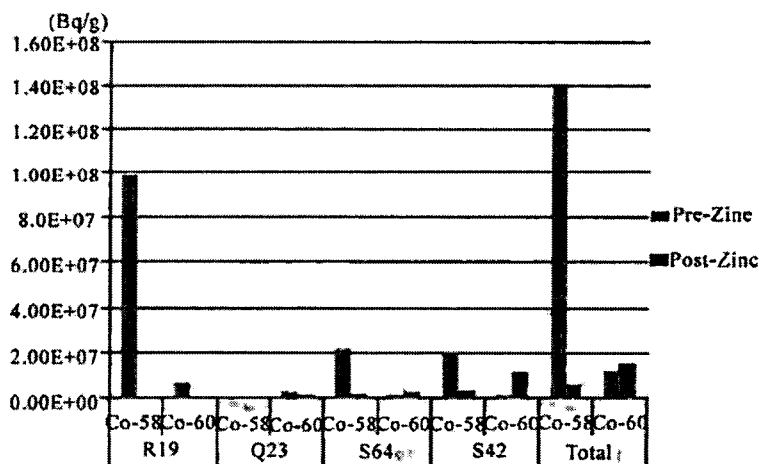
เทคโนโลยีการเติมไอออน Zn(II) นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำความดันสูง (PWR) ซึ่งการเติมไอออน Zn(II) ในวงจรแรกของ PWR มีอิทธิพลต่อวัสดุที่ใช้ในระบบหลายประการ ได้แก่ ลดการเกิดการกัดกร่อน แบบ PWSCC มีผลต่อการสร้างชั้นออกไซด์บนวัสดุโครงสร้าง (สแตนเลสสตีล และนิกเกิลอัลลอยด์) ลดการรวมตัวและลดจำนวนแหล่งที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาลดการกัดกร่อนในวัสดุท่อหุ้มเชื้อเพลิง มีผลต่อการสร้างและการขนส่งของครูดเชื้อเพลิง (Yeh; Macdonald; & Motta. 1995: 468-482)

จากงานวิจัยของ Jin-Soo และคณะ (Jin-Soo; et al. 2013: 173-181) ซึ่งเป็นการศึกษาผลกระทบของการเติมไอออน Zn(II) ลงในระบบน้ำหล่อเย็นวงจรแรกที่มีการกัดกร่อนซึ่งสัมผัสกับมัดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ พบว่า Zn(II) จะไปทำหน้าที่เปลี่ยนส่วนประกอบของชั้นออกไซด์ที่เกิดการกัดกร่อน

โดยการเข้าไปแทนที่อะตอมนิกเกิล (Ni), เหล็ก (Fe) และโคบอลต์ (Co) ที่เกาะอยู่บนชั้นออกไซด์ของวัสดุ เนื่องจากพลังงานในการเกิดออกไซด์ของสังกะสีมีค่าต่ำกว่าพลังงานการเกิดออกไซด์ของ Fe, Ni และ Co เป็นผลทำให้ชั้นออกไซด์มีความเสถียรขึ้น (Urquidi-Macdonald; Pitt; & Macdonald. 2007: 1-13; Takahashi; & Iijima. 1989: 874-880; Elliot. 2010: unpagged) จากคุณสมบัติดังกล่าว เมื่อเติมสังกะสีที่มีความเข้มข้นต่ำจะปลดการปล่อยสารกัมมันตรังสีได้ และที่ความเข้มข้นสูงๆ ยังสามารถลดการกัดกร่อนได้อีกด้วย (Iva; et al. 2011; Ray. 2005)

งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการนำตัวอย่าง Crud ของมัดเชื้อเพลิง ในระบบน้ำหล่อเย็นมาศึกษาผลของการเติมสังกะสี (Zinc acetate หรือ $C_4H_{10}O_6Zn$) (Zhou; et al. 2013: 215-222) ซึ่งตัวอย่างที่ใช้มี 4 ตัวอย่างจากมัดเชื้อเพลิง Q23, R19, S42 และ S64 โดย Crud จะถูกเก็บอยู่กับ Filter cartridges และถูกนำมาละลาย แล้ววิเคราะห์ส่วนที่ละลายออกมาในสารละลายด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES) เพื่อตรวจวัดส่วนประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง ผลของการวิเคราะห์พบว่า ธาตุที่เป็นส่วนประกอบหลักของชั้นออกไซด์ คือ Fe, Ni และ Zr ซึ่ง Fe และ Ni เป็นธาตุหลักที่เกิดการกัดกร่อน รองลงมาคือ Zr และ B จากผลการวิเคราะห์อัตราส่วนการแทนที่ของธาตุก่อนและหลังการเติม Zn พบว่า ธาตุ Zn ในท่อน้ำหล่อเย็นเพิ่มขึ้น 0.7% โดยเฉพาะอัตราส่วนของ Ni/Fe ลดลงจาก 1.12 เป็น 0.69 และ B ในชั้นออกไซด์ลดลงจาก 30.8% เป็น 7.8%

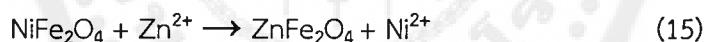
นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์การปล่อยกัมมันตภาพรังสี โดยใช้ Gamma spectrometer เพื่อวัดปริมาณรังสีก่อนและหลังการเติมไอออน $Zn(II)$ แสดงผลดังภาพประกอบ 15 พบว่า Co-58 ที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีในท่อน้ำหล่อเย็น และเป็นสารกัมมันตรังสีของ Ni (มาจาก Ni alloy ที่ใช้ทำท่อน้ำหล่อเย็น และเป็นแหล่งกำเนิดรังสีในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์) เมื่อเติมไอออน $Zn(II)$ ทำให้ปลดการเกิด Co-58 เนื่องจากไอออน $Ni(II)$ ถูกแทนที่ด้วยไอออน $Zn(II)$ จึงส่งผลให้การสร้าง Co-58 ลดลงด้วย ดังนั้นเทคโนโลยีการเติมไอออน $Zn(II)$ จึงเป็นเทคโนโลยีชนิดหนึ่งที่สามารถลดปริมาณของสารกัมมันตภาพรังสีชนิด Co-58 ลงได้ (Davis; & Associates. 2000; Hisamune; Sekiguchi; & Takiguchi. 1998; Kashiwazaki. 1998; Pathania; & McIlree. 1988; Jacko. 1991)



ภาพประกอบ 15 แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีก่อน/หลังการเติมสังกะสี

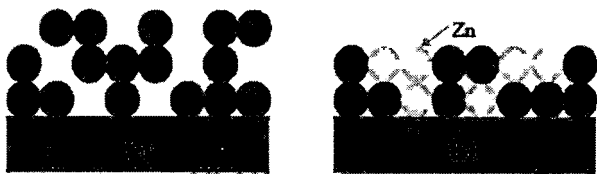
ที่มา: Jin-Soo, C.; et al. (2013). Effect of zinc injection on the corrosion products in nuclear fuel assembly. *Natural. Sci.* 5: 173-181.

สมการการแทนที่ด้วย Zn(II) บนชั้นออกไซด์ของปลอกหุ้มแท่งเชื้อเพลิง (Fuel claddings)



จากสมการ (14)-(15) ไอออน Zn(II) เข้าไปแทนที่ Ni ทำให้ Ni ลดลง ส่งผลให้ Co ลดลงด้วย เป็นผลให้ปริมาณรังสีและการกักก่อก่อนลดลง นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกักก่อก่อนโดยทั่วไปจะสะสมอย่างมากที่ส่วนบนของ Fuel rod เนื่องจากมีอุณหภูมิสูงและได้รับพลังงานความร้อนมาก ชั้นออกไซด์บริเวณนี้มีลักษณะเป็นรูพรุน เมื่อได้รับความร้อนทำให้โบรอน (B) ละลายลงในท่อน้ำหล่อเย็น ซึ่งโบรอน (B) เป็นสารเคมีที่ใช้เพื่อควบคุมการเกิดปฏิกิริยาโดยการดูดซับนิวตรอน ถ้าโบรอน (B) สะสมบริเวณส่วนบนของ Fuel rods มาก จะลดพลังงานที่ได้ ส่งผลให้เกิดการขัดขวางการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติมไอออน Zn(II) ทำให้ชั้นออกไซด์เกิดการเปลี่ยนรูปและลดช่องว่างลง ดังนั้นจึงเป็นผลให้ลดการสะสมของโบรอน (B) บริเวณส่วนบนของ Fuel rods ได้ด้วย และผลจากการทดลองนี้สามารถนำไปสู่การออกแบบจำลองชั้นออกไซด์ก่อนและหลังการเติมไอออน Zn(II) ดังภาพประกอบ 16 แสดงให้เห็นว่า ชั้นออกไซด์ก่อนการเติมไอออน Zn(II) มีช่องว่างจำนวนมากและไม่เป็น

ระเปียบ แต่หลังการเติมไอออน Zn(II) ทำให้ชั้นออกไซด์บางลงและเสถียรขึ้นเนื่องจากไอออน Zn(II) เข้าไปเปลี่ยนรูปแบบการเกิดชั้นออกไซด์ของวัสดุ



ภาพประกอบ 16 แสดง (a) ชั้นออกไซด์ก่อนการเติมไอออน Zn(II) และ (b) ชั้นออกไซด์หลังการเติมไอออน Zn(II)

ที่มา : Jin-Soo, C.; et al. (2013). Effect of zinc injection on the corrosion products in nuclear fuel assembly. *Natural. Sci.* 5: 173-181.

ดังนั้นจากการศึกษาผลของการแทนที่ในชั้นออกไซด์ของแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ด้วยการเติมไอออน Zn(II) สรุปได้ว่า ปริมาณรังสีของ Co-58 ลดลงเมื่อมีการเติม Zn(II) เนื่องจาก Zn(II) ลดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ของ Ni(II) ไปเป็น Co-58 โดยการเข้าไปแทนที่ Ni(II) บนชั้นออกไซด์ ทำให้เกิด ZnO และ ZnFe₂O₄ แทนการเกิด NiO และ NiFe₂O₄ เพราะการเกิดซิงค์ออกไซด์มีความเสถียรมากกว่า ทำให้ลดปริมาณรังสีและการกัดกร่อนของโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

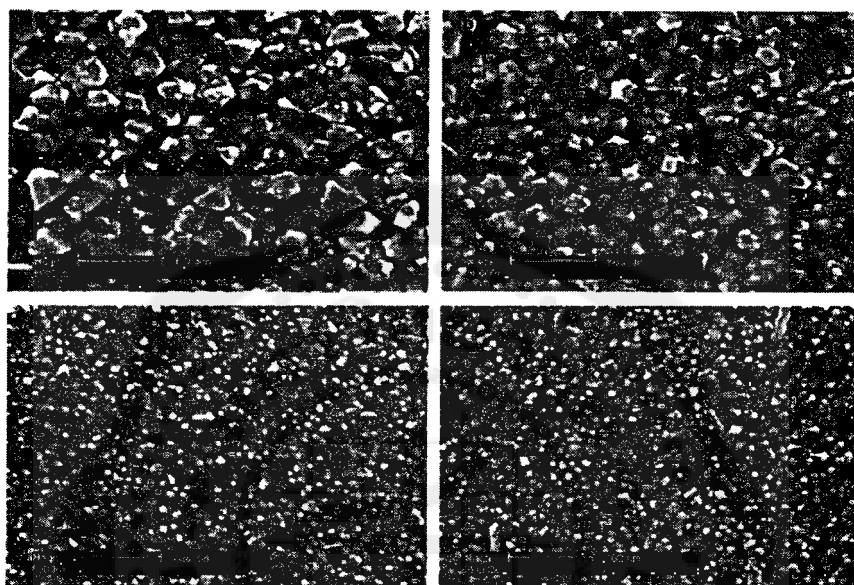
นอกจากนี้งานวิจัยของ Liu และคณะ (Xiahe; Xinqiang; & En-Hou. 2012: 136-144) ได้ศึกษาผลของการเติมไอออน Zn(II) ต่อฟิล์มออกไซด์ของสแตนเลสสตีลเกรด 316L ในน้ำอุณหภูมิสูงที่มีสารละลายโบเรต (H₃BO₃) และลิเทียม (LiOH·H₂O) ผสมอยู่ โดยมีกรณีศึกษา 4 กรณี ดังตาราง 4

ตาราง 4 แสดงกรณีศึกษาของสแตนเลสสตีล 316L ในสารละลาย 1500 ppm H₃BO₃ และ 2.3 ppm LiOH·H₂O ที่ไม่เติมและเติม 10 ppb ZnO ที่ 300 °C

Exposure methods	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Water chemistry	4000 h	2000 h without	2000 h with Zn	4000 h with
	without Zn	Zn + 2000 h	+ 2000 h	Zn
		with Zn	without Zn	

ที่มา: Xiahe L.; Xinqiang W.; & En-Hou H. (2012). Effect of Zn injection on established surface oxide films on 316L stainless steel in borated and lithiated high temperature water. *Corros. Sci.* 65: 136-144.

ผลจากการทดลอง พบว่า เมื่อนำสแตนเลสสตีลเกรด 316L ที่ทำการทดลองแล้วไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDX เพื่อดูรูปแบบการเกิดฟิล์มออกไซด์ได้ผลดังภาพประกอบ 17 สรุปได้ว่า เมื่อเติมไอออน Zn(II) ทำให้อนุภาคของออกไซด์เล็กลง และการเติมไอออน Zn(II) หลังและก่อนการสร้างฟิล์มออกไซด์ในกรณีศึกษาที่ 2 กับ 3 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การเติมไอออน Zn(II) เป็นตัวบ่งชี้ผลของรูปแบบฟิล์มออกไซด์

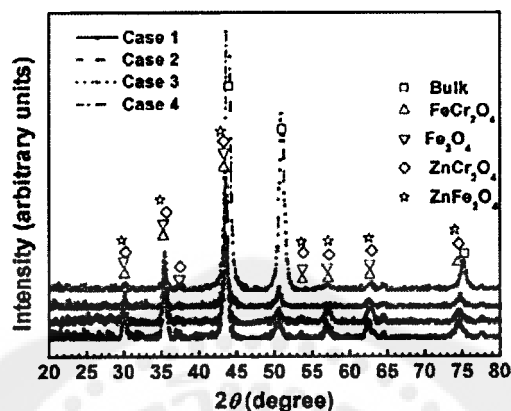


ภาพประกอบ 17 แสดงรูปของการเกิดฟิล์มออกไซด์ที่ได้จาก SEM ของ SS 316L ในสารละลาย 1500 ppm H_3BO_3 และ 2.3 ppm $LiOH \cdot H_2O$ ที่ไม่เติมและเติม 10 ppb ZnO ที่ 300 °C เป็นเวลา 4000 ชั่วโมง : (a) ไม่เติม ZnO; case 1, (b) เติม ZnO 2000 ชม. หลัง; case 2, (c) เติม ZnO 2000 ชม. แรก; case 3 และ (d) เติม ZnO ตลอดการทดลอง; case 4

ที่มา: Xiahe L.; Xinqiang W.; & En-Hou H. (2012). Effect of Zn injection on established surface oxide films on 316 L stainless steel in borated and lithiated high temperature water. *Corros. Sci.* 65: 136–144.

นอกจากนี้ ผลการตรวจวัดด้วยเทคนิค XRD (ภาพประกอบ 18) พบว่า สัญญาณพิกที่ตรวจวัดได้มาจากชั้นออกไซด์ของโลหะ (Fe_3O_4 , $FeCr_2O_4$, $ZnFe_2O_4$ และ/หรือ $ZnCr_2O_4$) ซึ่ง Fe_3O_4 และ $FeCr_2O_4$ เป็นผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นหลังแผ่นตัวอย่างสัมผัสกับน้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิสูง (Kim. 1995: 849–860; 1999: 81–88) เมื่อเติมไอออน Zn(II) จะทำให้เกิด $ZnFe_2O_4$ และ $ZnCr_2O_4$ ใน

ชั้นออกไซด์ของโลหะ (Ziemniak; & Hanson. 2006: 2525-2546; Liu; Wu; & Han. 2011: 3337-3345; Inagaki; et al. 2003: 143-152) แต่อย่างไรก็ตาม ยากที่จะแยกความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงของออกไซด์กับการเติมไอออน Zn(II) เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความแม่นยำต่ำ



ภาพประกอบ 18 แสดงรูปแบบสัญญาณพิก XRD ของสารประกอบออกไซด์ฟิล์มที่เกิดขึ้นบน SS 316L ในสารละลาย 1500 ppm H_3BO_3 และ 2.3 ppm $LiOH \cdot H_2O$ ที่ไม่เติมและเติม 10 ppb Zn ที่ 573.15 K. Bulk (JCPDS 47-1417), $FeCr_2O_4$ (JCPDS 34-0140), Fe_3O_4 (JCPDS 19-0629), $ZnCr_2O_4$ (JCPDS 22-1107) และ $ZnFe_2O_4$ (JCPDS 22-1012).

ที่มา: Xiahe L.; Xinqiang W.; & En-Hou H. (2012). Effect of Zn injection on established surface oxide films on 316 L stainless steel in borated and lithiated high temperature water. *Corros. Sci.* 65: 136–144.

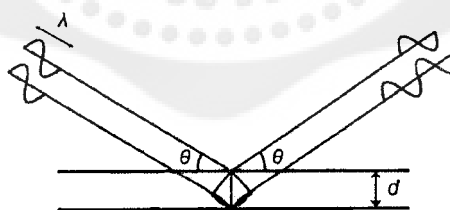
แม้ว่ามาตรการยับยั้งการกัดกร่อนในท่อน้ำหล่อเย็นด้วยไอออน Zn(II) จะมีประสิทธิภาพเป็นที่น่าสนใจ อย่างไรก็ตามบทบาทของไอออน Zn(II) ต่อการกัดกร่อนของวัสดุในระบบที่มีทั้งรังสีและสารผลิตภัณฑ์จาก Water Radiolysis ยังไม่ชัดเจน ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในปัจจุบันยังไม่เพียงพอที่จะอธิบายกลไกทั้งหมดที่เกิดขึ้น ดังนั้นจำเป็นต้องรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับปฏิกิริยาทั้งหมดที่เป็นไปได้ เพื่อจัดสร้างเป็นแบบจำลองการกัดกร่อน (Corrosion simulation) ซึ่งจะประกอบไปด้วยปฏิกิริยาทั้งหมดที่เป็นไปได้ และค่า yield ของสารเคมีที่เกี่ยวข้อง ในช่วงอุณหภูมิที่ครอบคลุมสภาวะการเดินเครื่องแบบจำลองนี้มีความสำคัญอย่างมากในการใช้เพื่อรับมือกับเหตุไม่คาดคิดที่อาจเกิดกับระบบน้ำหล่อเย็น เช่น การรั่วไหลของสารเคมีเข้าสู่ระบบ หรือการใช้เพื่อออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อรับมือกับปัญหาการกัดกร่อนได้ดีขึ้น (Jin-Soo; et al. 2013: 173-181; Moon; et al. 2005: 375-384) จนถึง

ปัจจุบันมีรายงานการศึกษาปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับไอออน Zn(II) เพียงบางส่วน ได้แก่ ปฏิกิริยากับ e_{aq}^- , $\text{OH}^\bullet$ และ H_2O_2 (Walker; Miller; & Feiner, F. 1977; Sed. 2003) ทั้งนี้ ยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับบทบาทของไอออน Zn(II) ในระบบที่มีทั้งผลิตภัณฑ์จาก radiolysis เหล่านี้ และพื้นผิวของวัสดุ ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาผลของไอออน Zn(II) ต่อการกักตรอนของวัสดุ (สแตนเลสสตีล) ที่เป็นผลจากการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำ โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นสารตั้งต้นเพื่อจำลองการกักตรอนของสแตนเลสสตีลที่เป็นผลมาจากการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำในท่อน้ำหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยใช้เทคนิค XRD, XRF และ SEM-EDS เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของออกไซด์ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการกักตรอนบนผิวหน้าของแผ่นตัวอย่าง และใช้เทคนิค ICP-OES วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของสารผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำได้

5. หลักการของเครื่องมือ XRD, XRF, SEM-EDS และ ICP-OES

5.1 เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction Technique)

เทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกและวิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง เทคนิค XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X) (ภาพประกอบ 19) เมื่อยังรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบวัสดุทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ โดยมีหัวจับสัญญาณเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนและความเข้มของรังสี X จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก และความหนาของฟิล์มได้อีกด้วย (Saito. 1979: 32-74)

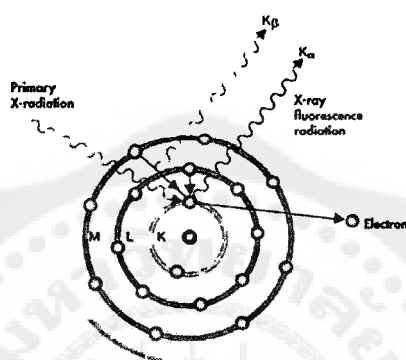


ภาพประกอบ 19 แสดงหลักการทำงานของเทคนิค XRD

ที่มา: ภาพประกอบแสดงหลักการทำงานของเทคนิค XRD. (24 เมษายน 2560). (ออนไลน์)

5.2 เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Technique)

เทคนิค XRF เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลว เทคนิค XRF อาศัยหลักของการคายพลังงาน (ภาพประกอบ 20) เมื่อรังสี X ที่มีพลังงานสูงไปกระทบวัสดุทำให้เกิดการปล่อยโฟตอนออกมา (Fluoresced) ซึ่งโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจะมีพลังงาน (ความยาวคลื่น) เฉพาะสำหรับธาตุนั้นๆ และปริมาณโฟตอนที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง (Boyce. 1982: 81-85)

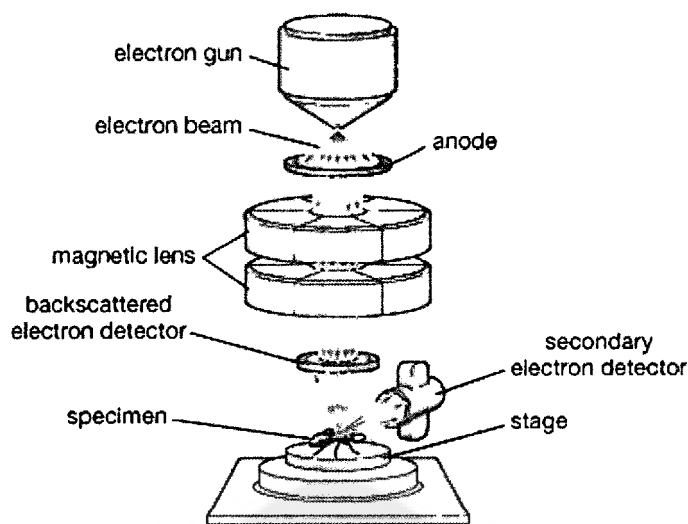


ภาพประกอบ 20 แสดงหลักการทำงานของเทคนิค XRF

ที่มา: ภาพประกอบแสดงหลักการทำงานของเทคนิค XRF. (24 เมษายน 2560). (ออนไลน์)

5.3 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์ (Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive X-ray Techniques, SEM and EDS)

SEM เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับส่องดูลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวของวัสดุ หรือตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน โดยใช้การกวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัสดุแล้วนำสัญญาณที่ได้ไปสร้างเป็นสัญญาณภาพ (ภาพประกอบ 21) นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) เพื่อศึกษาชนิด และปริมาณขององค์ประกอบธาตุในวัสดุ (Morita. 2018: 241)

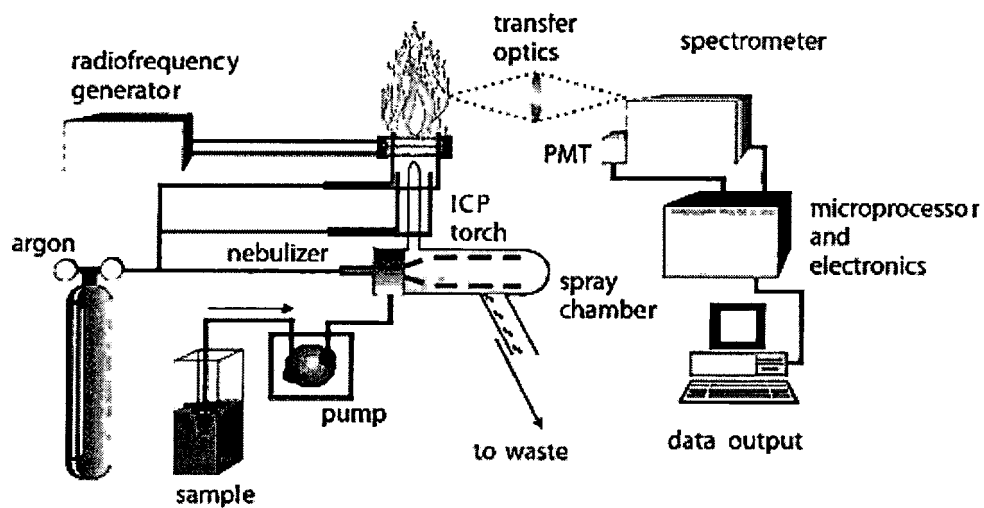


ภาพประกอบ 21 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง SEM

ที่มา: ภาพประกอบแสดงส่วนประกอบของเครื่อง SEM. (24 เมษายน 2560). (ออนไลน์)

5.4 เทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)

ICP-OES เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่างๆ พร้อมกันหลายชนิดในคราวเดียว เช่น แคลเซียม (Ca), แคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), ทองแดง (Cu), แมกนีเซียม (Mg), แมงกานีส (Mn), โซเดียม (Na), นิกเกิล (Ni), เหล็ก (Fe), ตะกั่ว (Pb) และ สังกะสี (Zn) เป็นต้น หลักการทำงานของเครื่อง ICP อาศัยพลังงานจากพลาสมาที่มีอุณหภูมิสูงทำให้อะตอมของธาตุต่างๆ เปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (Ground state) มาอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) หรือเป็นไอออน เมื่ออะตอมของธาตุมีการลดระดับพลังงานจากสถานะกระตุ้นกลับมายังสถานะพื้นจะปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งในแต่ละธาตุมีความยาวคลื่น (λ) ของพลังงานที่ปล่อยออกมาเฉพาะตัว และมีความเข้ม (Intensity) ที่เป็นสัดส่วนแปรผันตรงกับความเข้มข้นของธาตุนั้นในสารละลายของสารตัวอย่าง (ภาพประกอบ 22) ส่วน (มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์. 2561: Online)



ภาพประกอบ 22 แสดงหลักการทำงานของเทคนิค ICP

ที่มา: ภาพประกอบแสดงหลักการทำงานของเทคนิค ICP. (24 เมษายน 2560). (ออนไลน์)

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. ออกแบบและจัดสร้างชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่านสำหรับการศึกษาการกัดกร่อน
2. การทดลองเพื่อศึกษาบทบาทของไอออนสังกะสี (II)
 - 2.1 การเตรียมแผ่นตัวอย่าง
 - 2.2 การทดลองโดยใช้ระบบไหลผ่าน
3. วิเคราะห์ผลการทดลอง
 - 3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกัดกร่อนบนพื้นผิวของแผ่นตัวอย่าง โดยใช้เทคนิค XRF, XRD และ SEM-EDS
 - 3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำด้วยเทคนิค ICP-OES

อุปกรณ์และเครื่องมือ

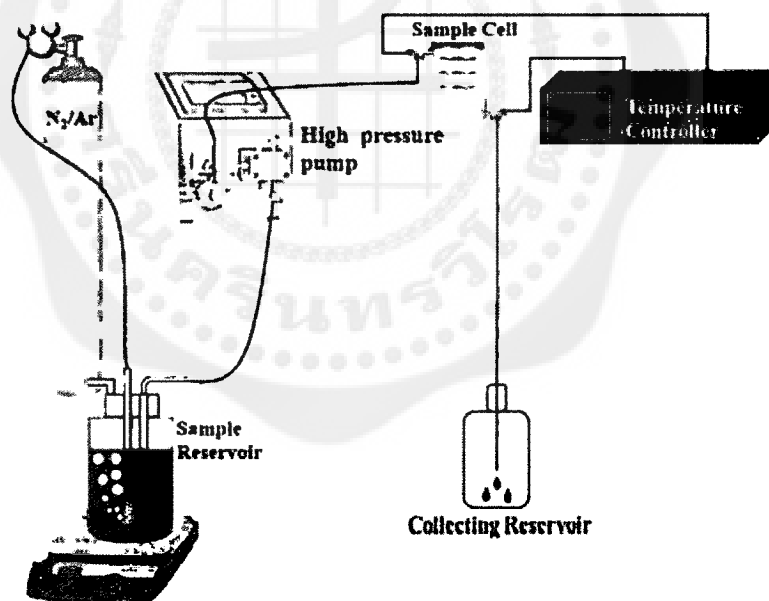
1. แท่งสแตนเลสสตีล 304 (จากบริษัท Walsin Lihwa Corp.)
2. เครื่องกักใส่สารตัวอย่าง (Sample Reservoir)
3. เซลล์ใส่สารตัวอย่าง (Sample Cell)
4. ปั๊มความดันสูง (High Performance Liquid Chromatography (HPLC) Pump)
5. หน่วยควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control Unit)
6. เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) รุ่น Bruker S8 TIGER ECO WDXRF Spectrometer
7. เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) รุ่น Bruker D8 Advance X-ray Diffractometer
8. เครื่อง Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS) รุ่น VEGA3 TESCAN
9. เครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) รุ่น Perkin Elmer Optima 5300 DV
10. เครื่องขัดผิวโลหะกระดาดทราย รุ่น Metaserv 250 grinder-Polisher, Buehler
11. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic Bath)
12. โถดูดความชื้น (Desiccator)

สารเคมี

1. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) (30% synthesis grade, Merck)
2. ซิงค์เปอร์คลอเรต ($\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2$) (CAS: 10025-64-6, USA)
3. ก๊าซไนโตรเจน (N_2) (Ultra High Purity Grade, Purity 99.995%, Labgaz (Thailand) Co., Ltd.)
4. อะซิโตน ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) (EC: 200-662-2, England)
5. เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$) (CAS: 64-17-5, Thailand)
6. เมทานอล (CH_3OH) (CAS: 67-56-1, USA)
7. กรดไนตริก (HNO_3) (CAS: 7697-37-2, Thailand)

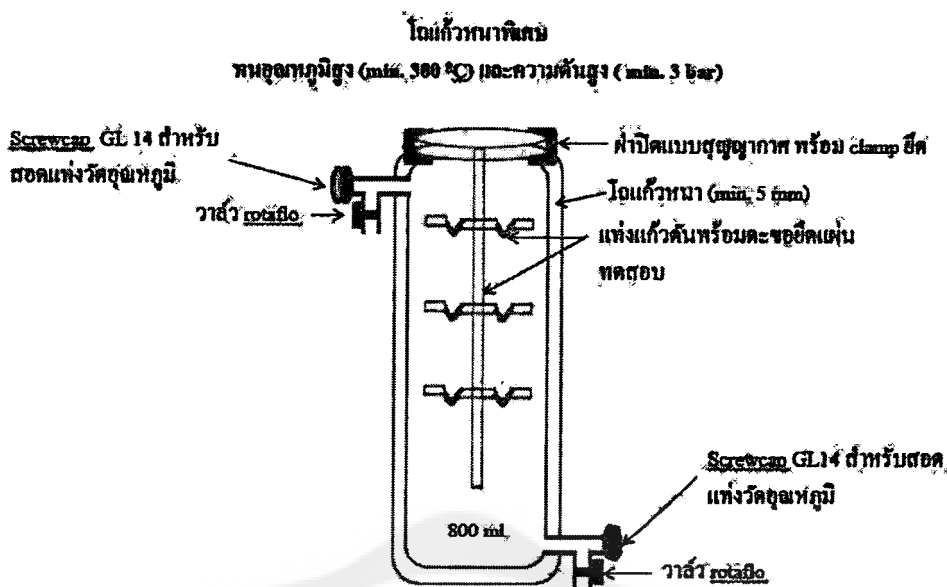
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ออกแบบและจัดสร้างชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่านสำหรับการศึกษาการกักกร่อน (ภาพประกอบ 23) ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้



ภาพประกอบ 23 แผนภาพชุดทดลองระบบไหลผ่านที่ออกแบบ

- 1.1 เครื่องแก้วใส่สารตัวอย่าง (Sample Reservoir) ทำจากแก้วที่มีคุณภาพสูง มีสเกลระบุปริมาตร และฝาปิด (ภาพประกอบ 24) ซึ่งฝาปิดจะมีท่อ 3 ท่อ โดยท่อที่ 1 สำหรับเชื่อมต่อกับท่อส่งก๊าซ



ภาพประกอบ 25 แสดงลักษณะของเซลล์ใส่สารตัวอย่าง (Sample Cell)

1.3 หน่วยควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control Unit) การให้ศักย์ไฟฟ้าไปยังฮีตเตอร์ เพื่อทำให้เกิดความร้อนแก่เซลล์ใส่สารตัวอย่างจะถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (Proportional-Integral-Derivative) ที่รับผลสะท้อนกลับจาก K-type thermocouples ที่ต่ออยู่กับ เซลล์ใส่สารตัวอย่าง ซึ่งระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ประกอบด้วยฟังก์ชัน 3 ส่วน คือ Proportional, Integral และ Derivative โดยส่วน Proportional เป็นฟังก์ชันที่ควบคุมให้ความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่าง Setpoint และอุณหภูมิของระบบในขณะนั้นมีค่าน้อยที่สุด ใน 2 ส่วนที่เหลือเป็นส่วนที่เพิ่มเข้ามา เพื่อให้การปรับอุณหภูมิมีค่าถูกต้องมากยิ่งขึ้น

1.4 ส่วนเก็บสารผลิตภัณฑ์ (Collecting Reservoir) ซึ่งทำจากแก้ว จะเชื่อมต่อกับท่อ สแตนเลสสตีลที่มาจากทางออกของเซลล์เพื่อใช้เก็บผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

1.5 ทดสอบประสิทธิภาพของชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่านที่ได้ โดยการวัดอัตราการไหล และเวลาที่ใช้ในการปรับอุณหภูมิให้เสถียร (50 และ 80 °C)

2. การทดลองเพื่อศึกษาบทบาทของไอออนสังกะสี (II)

2.1 การเตรียมแผ่นตัวอย่าง

นำแท่งสแตนเลสสตีล 304 (SS 304) มาทำการตัดเป็นแผ่นเล็กๆ ขนาด 2 ซม.×2 ซม.×0.2 ซม. โดยเจาะรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 ซม. เพื่อใช้แขวนเข้ากับตะขอเกี่ยวในเซลล์ใส่สาร ตัวอย่าง จากนั้นนำแผ่น SS 304 ที่ได้มาขัดให้ผิวหน้าเรียบด้วยเครื่องขัดผิวโลหะกระดาดทราย โดยใช้

กระดาษทรายเบอร์ P320 P600 P800 P1200 P2500 และ P4000 ตามลำดับ หลังจากนั้นทำความสะอาดแผ่น SS 304 ที่ได้ โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก ล้างด้วยอะซิโตน เอทานอล และเมทานอล ตามลำดับ แล้ววางทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นจึงเก็บไว้ในโถดูดความชื้น และนำมาตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF ซึ่งแผ่น SS 304 นี้จะถูกใช้เป็นวัสดุตัวอย่างในการศึกษาผลของการกัดกร่อน

2.2 การทดลองโดยใช้ระบบไหลผ่าน

2.2.1 แขนงแผ่น SS 304 ในเซลล์ใส่สารตัวอย่าง (Sample Cell) และเติมน้ำบริสุทธิ์ (Deionized Water) ลงในเครื่องแก้วใส่สารตัวอย่าง (Sample Reservoir) ที่เชื่อมต่อกับท่อส่งก๊าซ N_2 สำหรับไล่อากาศ (O_2)

2.2.2 เปิดปั๊มเพื่อดันน้ำบริสุทธิ์จากเครื่องแก้วใส่สารตัวอย่างให้ไหลเข้าสู่เซลล์ใส่สารตัวอย่างที่มีแผ่น SS 304 แขนงอยู่ ด้วยอัตราการไหลคงที่ และเก็บสารละลายหลังเกิดปฏิกิริยา โดยระบบจะมีการไหลตลอดเวลาจนกว่าสารตัวอย่างเต็มเซลล์ใส่สารตัวอย่างใช้เวลา 7 ชม.

2.2.3 หลังจากนั้นนำแผ่น SS 304 ที่ผ่านการทดลอง และผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำที่ได้จากการทดลองไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS และ ICP-OES ตามลำดับ

2.2.4 ทำการทดลองอีกครั้งตามข้อ 2.2.1-2.2.3 แต่เปลี่ยนจากน้ำบริสุทธิ์เป็นสารละลาย H_2O_2 และสารละลายไอออน $Zn(II)$ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังตาราง 1

2.2.5 ทำการทดลองอีกครั้งตามข้อ 2.2.1-2.2.3 แต่เปลี่ยนจากน้ำบริสุทธิ์เป็นสารละลาย H_2O_2 และสารละลายไอออน $Zn(II)$ ที่มีความเข้มข้นต่างๆดังตาราง 1 แล้วปรับอุณหภูมิในช่วง $25-80\text{ }^{\circ}C$ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล

2.2.6 ทำการทดลองอีกครั้งตามข้อ 2.2.1-2.2.3 แต่เปลี่ยนจากน้ำบริสุทธิ์เป็นสารละลาย H_2O_2 และสารละลายไอออน $Zn(II)$ ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ดังตาราง 1 แล้วเพิ่มระยะเวลาในการไหลจาก 7 เป็น 70 และ 100 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของเวลาต่อการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล

3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกัดกร่อนบนพื้นผิวของแผ่นตัวอย่าง โดยใช้เทคนิค XRF, XRD และ SEM-EDS

3.2. วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำด้วยเทคนิค ICP-OES

3.2.1 เตรียมสารมาตรฐานความเข้มข้น 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2.5 และ 5 ppm ใน 1% HNO_3

3.2.2 เตรียมสารตัวอย่างในกรดไนตริกความเข้มข้น 1%

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. การออกแบบและจัดสร้างชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่านสำหรับการศึกษาการกัดกร่อน
 - 1.1 การจัดสร้างชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่าน
 - 1.2 การจำลองสภาวะการกัดกร่อนที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสี
2. ผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล 304 ที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)
 - 2.1 ผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล 304 ที่เกิดจาก H_2O_2 ความเข้มข้น 200, 500 และ 1000 ppb ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง
 - 2.2 ผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล 304 ที่เกิดจาก H_2O_2 ความเข้มข้น 0, 5 และ 10% ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง
3. การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำด้วยเทคนิค ICP-OES

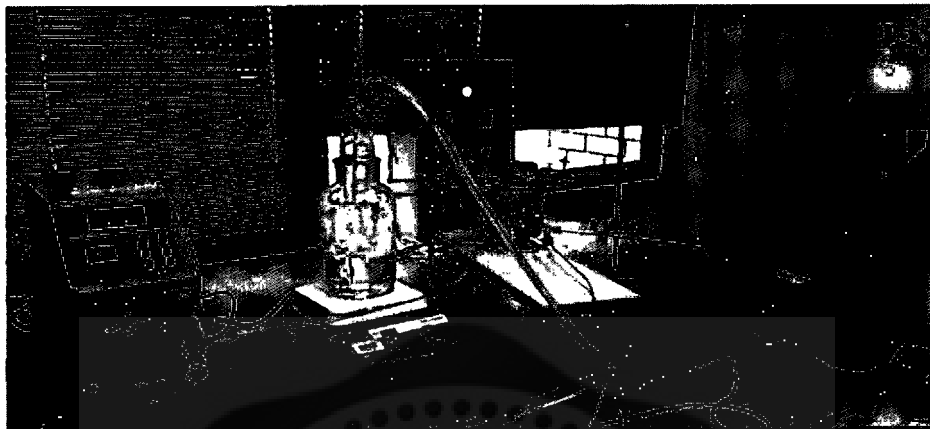
1. การออกแบบและจัดสร้างชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่านสำหรับการศึกษาการกัดกร่อน

1.1 การจัดสร้างชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่าน

จากปัญหาการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในท่อน้ำหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยระบบน้ำหล่อเย็นนั้นมีการไหลเวียนของน้ำตลอดเวลาจึงเป็นที่มาของการสร้างชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่านเพื่อศึกษาการกัดกร่อนในสภาวะเสมือนจริง ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาที่เป็นระบบไหลผ่าน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นครั้งแรกที่มีการออกแบบชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่านเพื่อจำลองสภาวะการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เป็นผลมาจากการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำในท่อน้ำหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

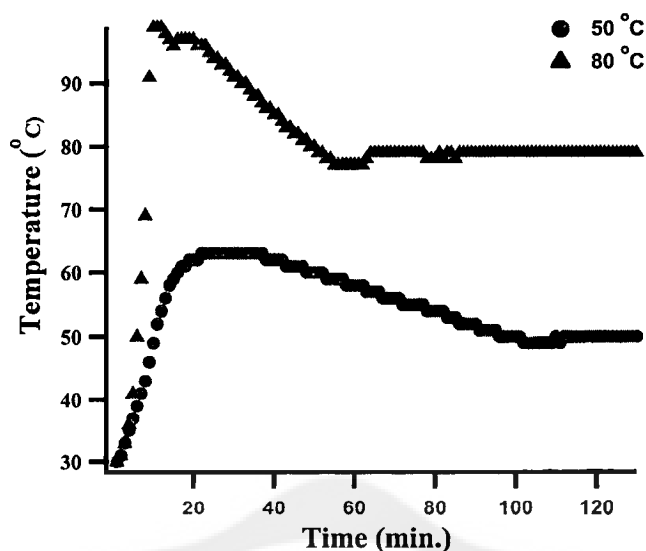
งานวิจัยนี้ สามารถจัดสร้างชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่านสำหรับการศึกษาบทบาทของไอออน $Zn(II)$ ต่อผลการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำที่มีต่อการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลได้สำเร็จ ดังภาพประกอบ 26 โดยชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่านประกอบด้วย เครื่องแก้วใสสารตัวอย่าง บั๊มความดันสูง เซลล์ใสสารตัวอย่าง หน่วยควบคุมอุณหภูมิ และส่วนเก็บสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งเซลล์ใสสารตัวอย่างเป็นโถแก้วที่ทำจากแก้วหนาพิเศษ หนาอุณหภูมิสูง และความดันสูง ภายในเซลล์ใสสารตัวอย่างมีแท่งแก้วตันพร้อมตะขอสําหรับแขวนแผ่นสแตนเลสสตีล ส่วนตัวเซลล์จะเชื่อมต่อกับแท่งวัดอุณหภูมิ เพื่อใช้วัดและควบคุมอุณหภูมิ ก่อนที่สารตัวอย่างจะไหลเข้าสู่เซลล์ใสสารตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนด้วยตัวทำความร้อนแบบ

แท่ง เมื่อสารตัวอย่างไหลเข้าสู่เซลล์แล้วจะถูกให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องด้วยตัวทำความร้อนแบบรัดท่อ และตัวเซลล์จะมีฉนวนห่อหุ้มเพื่อรักษาอุณหภูมิของสารละลายให้คงที่ตลอดการทดลอง



ภาพประกอบ 26 แสดงชุดทดลองระบบไหลผ่านสำหรับการศึกษสมบัติของไอออน Zn(II) ต่อผลการแตกตัวของรังสีของน้ำที่มีต่อการกักความร้อนของสแตนเลสสตีล

จากนั้น ทำการทดสอบประสิทธิภาพของชุดทดลองระบบไหลผ่านที่ได้โดยการใช้ก๊าซไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศ และการสูบน้ำเข้าสู่ระบบไหลผ่านเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของปั๊ม และตรวจสอบการรั่วไหลของน้ำออกจากชุดทดลองที่ออกแบบ พบว่า ไม่มีการรั่วไหลของน้ำออกจากเซลล์ใส่สารตัวอย่าง นอกจากนี้ชุดทดลองที่ออกแบบนี้เป็นระบบไหลผ่านที่สามารถให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ $25-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยตัวทำความร้อนแบบแท่ง (Cartridge Heater) และเมื่อสารตัวอย่างไหลเข้าสู่เซลล์ใส่ตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องด้วยตัวทำความร้อนแบบรัดท่อ (Band Heater) โดยตัวเซลล์ใส่สารตัวอย่างมีฉนวนห่อหุ้มทำให้สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ นอกจากนี้ยังได้ออกแบบเซลล์ใส่สารตัวอย่างให้มีตะขอเพื่อแขวนวัสดุได้ถึง 6 ชิ้น สำหรับใช้ในการศึกษาลักษณะการกักความร้อนที่เกิดบนผิวหน้า จากการทดสอบด้วยการไหลของน้ำจะได้อัตราการไหลที่เหมาะสม คือ 2 มิลลิลิตร/นาที่ ในช่วงอุณหภูมิ $25-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้เสถียรที่ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลา 100 และ 60 นาที ตามลำดับ เนื่องจากหลักการทำงานของ Band Heater นั้นเกิดการ overheating จึงทำให้เวลาที่ใช้ในการปรับอุณหภูมิต่ำ ($50\text{ }^{\circ}\text{C}$) ให้เสถียรนานกว่าที่อุณหภูมิสูง ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$) (ภาพประกอบ 27)



ภาพประกอบ 27 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้เสถียรที่ 50 °C และ 80 °C

ดังนั้นชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่านที่ออกแบบนี้มีประสิทธิภาพในการนำไปศึกษาบทบาทของไอออน Zn(II) ต่อผลการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำที่มีต่อการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล ซึ่งก่อนการทดลองได้ทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุในแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (Blank) ด้วยเทคนิค XRF พบว่า ในแผ่นตัวอย่างมีองค์ประกอบของธาตุโดยเฉลี่ยสอดคล้องกับค่ามาตรฐาน ดังตาราง 5

ตาราง 5 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในสแตนเลสสตีล 304 (wt%)

SS 304	ธาตุ								
	Fe	Cr	Ni	Mn	Cu	Si	Mo	Co	C
ทั่วไป ^a	68.0-70.0	18.0-20.0	8.0-10.5	2.0	-	-	-	-	0.08
Certificate ^b	70.29	18.54	8.09	1.85	0.58	0.46	0.13	-	0.06
XRF	70.15	18.75	7.76	1.8	0.57	0.44	0.13	0.11	0.04

^a สารความรู้ทั่วไป/สแตนเลส, (31 กรกฎาคม 2557). (ออนไลน์)

^b Inspection Certificate ของสแตนเลสสตีล 304 จากบริษัท Walsin Lihwa Corp.

หลังจากนั้นนำแผ่นตัวอย่างมาทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมดังตาราง 1 และวิเคราะห์ผลการทดลองในสภาวะต่างๆ ดังนี้ วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของออกไซด์ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนบนผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 โดยใช้เทคนิค XRD และ SEM-EDS และในส่วนของการผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP-OES

1.2 การจำลองสภาวะการกัดกร่อนที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสี

ในขั้นแรกผู้วิจัยได้ทำการจำลองสภาวะการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสี ในระบบไหลผ่านด้วยชุดทดลองที่จัดสร้างไว้ โดยเลือกความเข้มข้นของสารทั้งสองชนิดจากการอ้างอิงสภาวะจริงในระบบหล่อเย็นของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ จึงเป็นที่มาของสภาวะการทดลองดังตาราง 6 โดยทำการทดลองในระยะเวลา 7 ชั่วโมง ใช้ความเข้มข้นของ H_2O_2 ในช่วง 200-1000 ppb จากนั้นศึกษาผลของไอออน $Zn(II)$ ที่ความเข้มข้น 20 ppb ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น หลังการทดลองแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อศึกษาลักษณะชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้น และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS เพื่อศึกษาลักษณะผิวหน้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

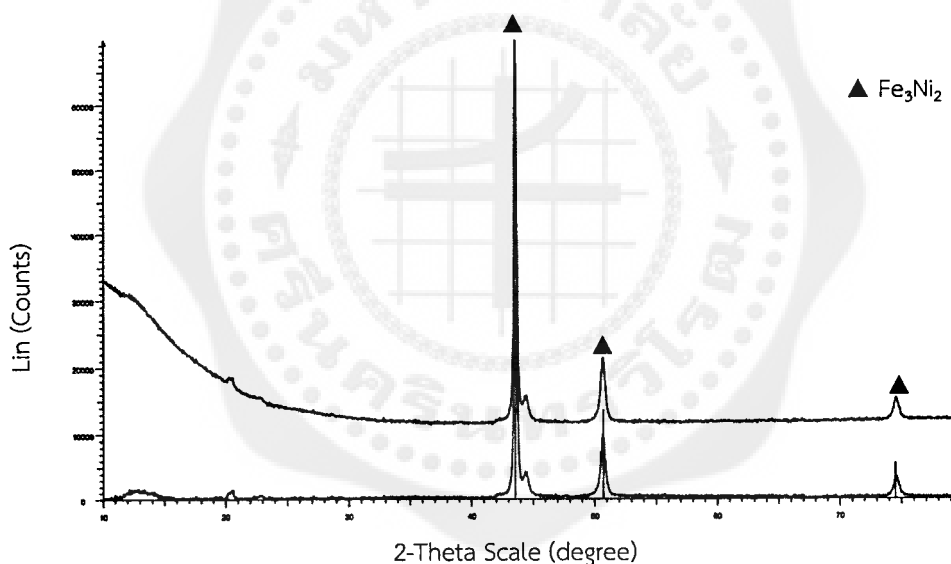
ตาราง 6 แสดงสภาวะการทดลองของสแตนเลสสตีล 304 ที่มีการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะไม่เติมและเติม 20 ppb $Zn(II)$ ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง

กรณีศึกษา	H_2O_2	$Zn(ClO_3)_2$
1	-	-
2	200 ppb	-
3	500 ppb	-
4	1000 ppb	-
5	200 ppb	20 ppb
6	500 ppb	20 ppb
7	1000 ppb	20 ppb

1.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกและชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ด้วยเทคนิค XRD

โดยทั่วไปสัญญาณฟลักที่ตรวจวัดได้บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 เกิดจากสารประกอบออกไซด์ของโลหะประเภท Fe_3O_4 , $NiFe_2O_4$ และ $FeCr_2O_4$ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์

จากการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นหลังจากแผ่นตัวอย่างมีการสัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 ในระบบที่มีอุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Kim. 1995: 849–860; 1999: 81–88; Lin; & Smith, 1988; Lin, 1994; Murayama, et al. 2002: 1199–1206) และเมื่อมีการเติมไอออน $Zn(II)$ เกิดเป็นสารประกอบ $ZnFe_2O_4$ และ $ZnCr_2O_4$ มาแทนที่ในชั้นออกไซด์ของโลหะ (Ziemniak; & Hanson. 2006: 2525–2546; Liu; Wu; & Han. 2011: 3337–3345; Inagaki; et al. 2003: 143–152) ซึ่งผลจากการทดลองตามตารางที่ 6 พบว่า พิกของ XRD pattern ที่ตรวจวัดได้มีลักษณะเหมือนกันในทุกกรณีศึกษาแสดงดังภาพประกอบ 28 โดยพิกที่ปรากฏคือ Fe_3Ni_2 (43, 51, 75 degree) เป็นโครงสร้างผลึกของสแตนเลสสตีล 304 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ยังไม่พบการเปลี่ยนแปลงในสภาวะที่กำหนด เนื่องจากฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นอาจมีชั้นที่บางมากเกินไปจนจำกัดของเครื่องมือที่สามารถตรวจวัดได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำแผ่นตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304



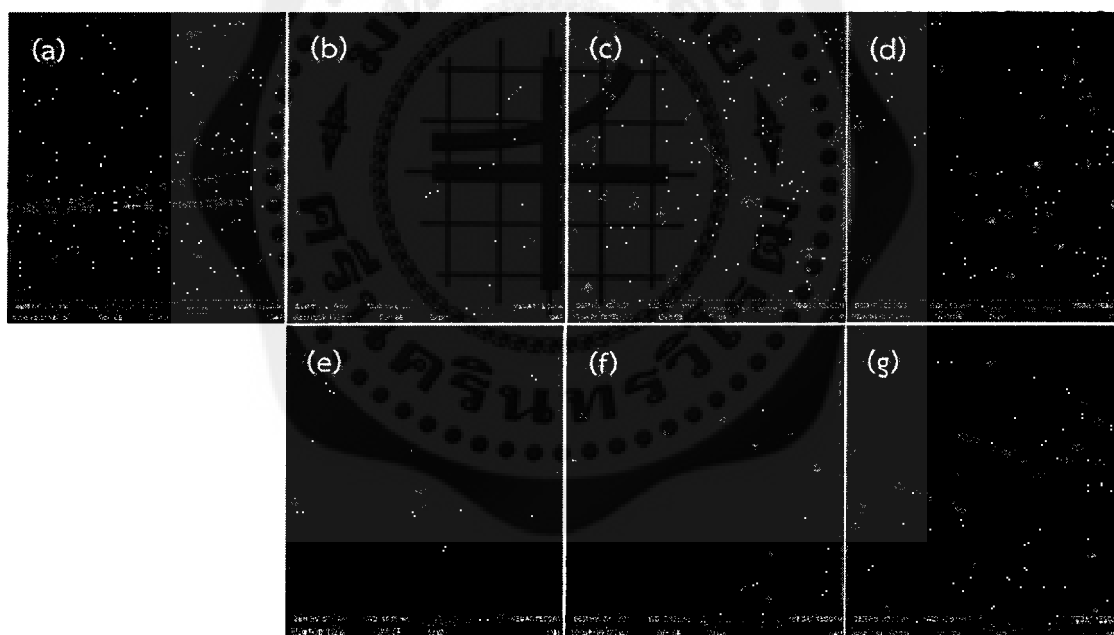
ภาพประกอบ 28 แสดง XRD pattern ของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่มีการสัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 ที่ความเข้มข้น 1000 ppb ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง (สีดำ) เปรียบเทียบกับพีคมาตรฐานแสดงโครงสร้างผลึกแบบ Fe_3Ni_2 (สีแดง)

1.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้าของสแตนเลสสตีล 304 ด้วยเทคนิค SEM

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหรือโลหะวิทยาด้วยเทคนิค SEM จะให้ข้อมูลที่เป็นสาเหตุและกลไกการเกิดการกัดกร่อนได้ ซึ่งจากการวิเคราะห์ผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่มีการไหลผ่านของ H_2O_2 ความเข้มข้น 0, 200, 500, และ 1000 ppb ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใน

ระยะเวลา 7 ชั่วโมง แสดงดังภาพประกอบ 29 พบว่า หลังการไหลผ่านด้วยน้ำ DI และสารละลาย H_2O_2 เกิดการกัดกร่อนเป็นหลุมเล็กๆ กระจายทั่วแผ่นตัวอย่างเพียงเล็กน้อย (ภาพประกอบ 29a-29d) เรียกว่า Pitting corrosion และแผ่นตัวอย่างที่สัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 1000 ppb พบผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) กระจายอยู่ทั่วแผ่นตัวอย่างจำนวนมากที่สุด (ภาพประกอบ 29d) ดังนั้น สภาวะกรณีศึกษาที่ 4 สามารถใช้เป็นแบบจำลองสภาวะการกัดกร่อนที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) บนผิวหน้าของสแตนเลสสตีลในระบบการไหลได้

จากนั้นทำการการเติมสารละลาย $Zn(ClO_3)_2$ ความเข้มข้น 20 ppb เพื่อศึกษาผลของ ไอออน $Zn(II)$ ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น พบว่า ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนลดลงทั้ง 3 สภาวะ (ภาพประกอบ 29e-29g) และยังคงเกิดหลุมบนผิวหน้าของแผ่นตัวอย่าง แต่อย่างไรก็ตามเทคนิค SEM ไม่สามารถอธิบายองค์ประกอบของลักษณะพื้นผิวที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์ผิวหน้า ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน และหลุม Pitting corrosion ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างด้วยเทคนิค EDS



ภาพประกอบ 29 แสดงภาพ SEM ของพื้นผิวแผ่นตัวอย่าง SS 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่มีความเข้มข้นต่างกันเพื่อจำลองสภาวะการกัดกร่อน; (a) DI, (b) 200 ppb H_2O_2 , (c) 500 ppb H_2O_2 , (d) 1000 ppb H_2O_2 , และการศึกษาผลของการเติมไอออน $Zn(II)$ ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น; (e) 200 ppb H_2O_2 และ 20 ppb $Zn(II)$, (f) 500 ppb H_2O_2 และ 20 ppb $Zn(II)$, และ (g) 1000 ppb H_2O_2 และ 20 ppb $Zn(II)$ ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง

1.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุบนพื้นผิวของสแตนเลสสตีล 304 ด้วยเทคนิค EDS

การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค EDS สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์เชิงคุณภาพแสดงธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผิวหน้าแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 พบว่า ธาตุส่วนใหญ่ที่เป็นองค์ประกอบของสแตนเลสสตีล 304 คือ เหล็ก (Fe), โครเมียม (Cr), และนิกเกิล (Ni) ซึ่งธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุโครงสร้างในระบบน้ำหล่อเย็นของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ นอกจากนี้ธาตุ Fe, Cr, และ Ni ยังเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน เนื่องจากมีปฏิกิริยา Oxidation เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของสแตนเลสสตีล 304 และเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ขึ้น ดังนั้นในการทดลองนี้จึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของธาตุเหล่านี้บนพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านด้วยสารละลาย H_2O_2 ที่ความเข้มข้นในช่วง 200-1000 ppb และผลของการเติมสารละลาย Zn(II) ความเข้มข้นของ 20 ppb โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง และแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 บริเวณ คือ 1) ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของผิวหน้า 2) ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน และ 3) หลุม Pitting corrosion แสดงดังตาราง 7-9

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบของผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304

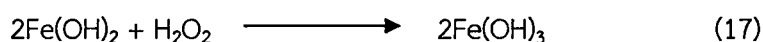
ตาราง 7 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของผิวหน้าแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 200, 500 และ 1000 ppb ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง พบว่า สัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ที่ผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีลลดลงเมื่อมีการสัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 เทียบกับค่ามาตรฐาน แต่สัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr เพิ่มขึ้น เนื่องจาก สแตนเลสสตีลสัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 แล้วเกิดปฏิกิริยา Oxidation ขึ้นบนผิวหน้าทำให้เกิดชั้นฟิล์มออกไซด์บนผิวหน้าของสแตนเลสสตีลขึ้น 2 ชั้น คือ ชั้นนอกเกิดเป็นฟิล์มออกไซด์ของ Fe_3O_4 และ $NiFe_2O_4$ ส่วนชั้นในเป็น $FeCr_2O_4$ (Kim, 1999: 81-88) ซึ่งสารประกอบ Fe_3O_4 และ $NiFe_2O_4$ มีความเสถียรต่ำและอยู่ด้านนอกจึงสามารถหลุดได้ง่ายส่งผลให้สัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ลดลง ในขณะที่สารประกอบ $FeCr_2O_4$ ซึ่งอยู่ด้านในมีความเสถียรมากกว่าทำให้สัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย H_2O_2 เพิ่มขึ้น พบว่า สัดส่วนปริมาณของธาตุไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเติมสารละลาย Zn(II) พบว่า สัดส่วนปริมาณของธาตุก่อนและหลังการเติมไอออน Zn(II) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า H_2O_2 ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนในสแตนเลสสตีล แต่อย่างไรก็ตามการเติมไอออน Zn(II) ยังไม่สามารถอธิบายได้ว่าสามารถยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้ในบริเวณนี้ เนื่องจากจุดที่เลือกมาวิเคราะห์เป็นบริเวณที่ผิวหน้าเรียบ และมีการเปลี่ยนแปลงของธาตุน้อยมากเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน

ตาราง 7 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะไม่เติมและเติม 20 ppb Zn(II) ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS

กรณีศึกษา	ธาตุ (%)			
	Fe	Cr	Ni	O
1) DI	61.72	27.09	4.52	-
2) 200 ppb H_2O_2	64.48	29.51	4.46	-
3) 500 ppb H_2O_2	59.84	27.99	4.29	-
4) 1000 ppb H_2O_2	63.80	30.16	3.68	-
5) 200 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II)	62.11	28.59	5.17	-
6) 500 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II)	63.75	28.09	4.63	-
7) 1000 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II)	61.50	27.51	4.33	-
Blank	70.15	18.75	7.76	-

2) การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304

ตาราง 8 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 200, 500 และ 1000 ppb ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง พบว่า ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 มีสัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ลดลง แต่สัดส่วนปริมาณของธาตุออกซิเจน (O) เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Oxidation ขึ้นบนผิวหน้าทำให้เกิดชั้นสารประกอบ Fe_3O_4 และ $NiFe_2O_4$ ซึ่งธาตุ Fe สัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนทำให้เกิดสารประกอบของเหล็กออกไซด์ขึ้นที่ผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ดังสมการ



ซึ่งสารประกอบ $Fe(OH)_3$ และ Fe_2O_3 ส่งผลให้เกิด Pitting corrosion เป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่รุนแรงทำให้เกิดความเสียหายแก่วัสดุ โดยในช่วงแรกมีเนื้อโลหะหายไปน้อยและยากที่จะ

ตรวจสอบหรือพบเห็นได้ยาก แต่เมื่อเติมสารละลาย $Zn(II)$ ทำให้สัดส่วนปริมาณของธาตุ O ลดลง เนื่องจากไอออน $Zn(II)$ เข้าไปแทนที่ธาตุ Fe และ Ni ทำให้เกิดเป็นสารประกอบสังกะสีออกไซด์ที่มีความเสถียรมากกว่าส่งผลให้สารประกอบออกไซด์ของโลหะดังกล่าวลดลงจึงมีสัดส่วนปริมาณของธาตุ O ลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถตรวจวัดปริมาณของ Zn ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ได้ เนื่องจากมีปริมาณน้อยมาก

ตาราง 8 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะไม่เติมและเติม 20 ppb $Zn(II)$ ที่อุณหภูมิ $25\text{ }^{\circ}C$ ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS

กรณีศึกษา	ธาตุ (%)			
	Fe	Cr	Ni	O
1) DI	52.12	25.90	4.34	5.58
2) 200 ppb H_2O_2	57.74	27.12	5.48	6.15
3) 500 ppb H_2O_2	59.79	28.38	4.24	-
4) 1000 ppb H_2O_2	49.93	23.48	3.66	10.05
5) 200 ppb H_2O_2 และ 20 ppb $Zn(II)$	55.94	26.42	4.61	5.17
6) 500 ppb H_2O_2 และ 20 ppb $Zn(II)$	62.20	27.59	4.26	-
7) 1000 ppb H_2O_2 และ 20 ppb $Zn(II)$	58.36	26.90	3.79	5.04
Blank	70.15	18.75	7.76	-

3) การวิเคราะห์องค์ประกอบของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่าง สแตนเลสสตีล 304

ตาราง 9 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 200, 500 และ 1000 ppb ที่อุณหภูมิ $25\text{ }^{\circ}C$ ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง พบว่า หลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่สัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 มีสัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ลดลงอย่างชัดเจน และมีสัดส่วนปริมาณธาตุ Cr และ O เพิ่มขึ้น เทียบกับค่ามาตรฐาน เนื่องจากสแตนเลสสตีลสัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 แล้วเกิดการกัดกร่อนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของชั้นฟิล์มออกไซด์บนผิวหน้าของสแตนเลสสตีลเกิดเป็นฟิล์มออกไซด์ของ Fe_3O_4 , $NiFe_2O_4$ และ $FeCr_2O_4$ (Kim. 1999: 81-88) ซึ่งมีความ

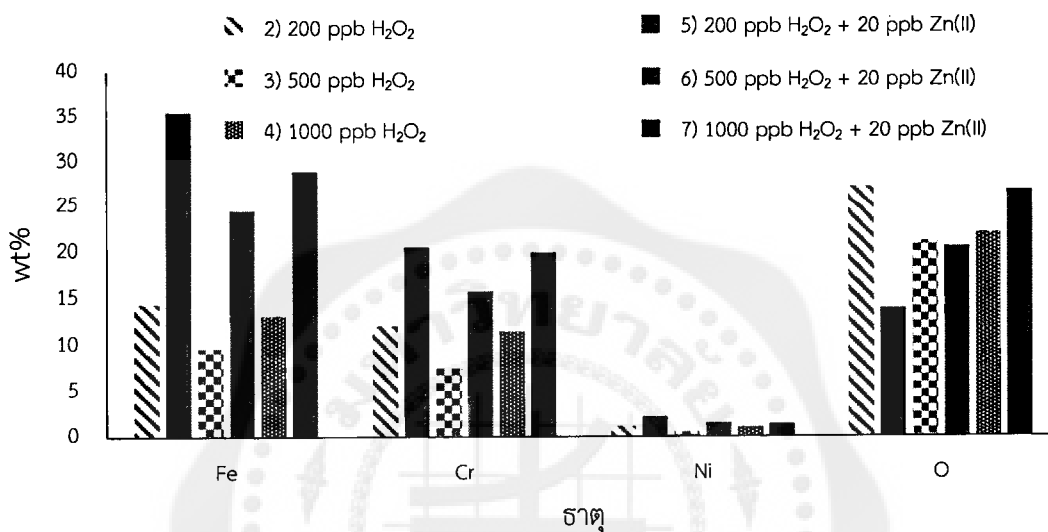
เสถียรต่ำจึงหลุดออกได้ง่ายส่งผลให้เกิดหลุม Pitting corrosion จำนวนมากและขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM แต่เมื่อเปรียบเทียบการกัดกร่อนเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย H_2O_2 พบว่า สัดส่วนปริมาณของธาตุไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเติมสารละลาย $Zn(II)$ ทำให้สัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe เพิ่มขึ้นในทุกความเข้มข้น เนื่องจากไอออน $Zn(II)$ เข้าไปแทนที่ไอออนของ $Fe(II)$ แล้วเกิดเป็นสารประกอบ $ZnFe_2O_4$ ในชั้นออกไซด์ของโลหะทำให้ชั้นออกไซด์มีความเสถียรขึ้นจึงป้องกันการหลุดออกของเนื้อโลหะได้ นอกจากนี้สัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr กับ Ni ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

ตาราง 9 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะไม่เติมและเติม 20 ppb $Zn(II)$ ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS

กรณีศึกษา	ธาตุ (%)			
	Fe	Cr	Ni	O
1) DI	10.94	8.17	0.89	16.57
2) 200 ppb H_2O_2	14.44	12.09	1.09	27.20
3) 500 ppb H_2O_2	9.65	7.50	0.48	21.06
4) 1000 ppb H_2O_2	13.16	11.50	0.99	22.05
5) 200 ppb H_2O_2 และ 20 ppb $Zn(II)$	35.57	20.52	2.22	13.96
6) 500 ppb H_2O_2 และ 20 ppb $Zn(II)$	24.49	15.76	1.47	20.55
7) 1000 ppb H_2O_2 และ 20 ppb $Zn(II)$	28.99	19.98	1.38	26.79
Blank	70.15	18.75	7.76	-

สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS ของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 200, 500 และ 1000 ppb ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 30 จะได้ว่า สารละลาย H_2O_2 มีอิทธิพลต่อการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลโดยทำให้สัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ลดลงส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนบนผิวหน้าของสแตนเลสสตีล ในขณะที่มีสัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr และ O เพิ่มขึ้น เนื่องจากผิวหน้าของสแตนเลสสตีลถูกออกซิไดซ์ทำให้เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ที่จะนำไปสู่การกัดกร่อน ดังนั้นเมื่อมีการเติมไอออน $Zn(II)$ ทำให้สัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni เพิ่มขึ้น และสัดส่วนปริมาณของธาตุ O ลดลง จึง

นำไปสู่สมมติฐานได้ว่า ไอออน $Zn(II)$ สามารถยับยั้งการกัดกร่อนได้ โดยการเกิดเป็นสารประกอบสังกะสีออกไซด์บนผิวแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ซึ่งจะต้องทำการยืนยันโดยการตรวจวัดปริมาณของธาตุ Zn ที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณของสารประกอบสังกะสีออกไซด์ที่เกิดขึ้นอาจมีปริมาณน้อยเกินไปที่จะตรวจวัดด้วยเครื่องมือที่ใช้ เนื่องจากเวลาในการทดลองน้อยเกินไป ผู้วิจัยจึงทำการเพิ่มระยะเวลาในการทดลองเป็น 70 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 30 แสดงสัดส่วนปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 200, 500 และ 1000 ppb ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS

2. ผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล 304 ที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

2.1 ผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล 304 ที่เกิดจาก H_2O_2 ความเข้มข้น 200, 500 และ 1000 ppb ในระยะเวลาทดลอง 70 ชั่วโมง

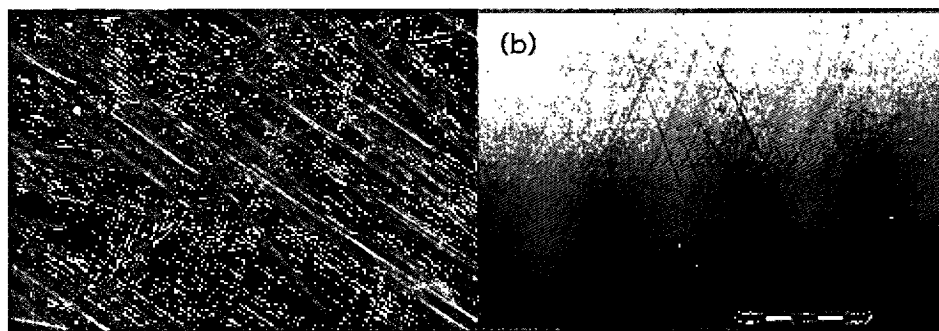
ผู้วิจัยทำการเพิ่มระยะเวลาในการทดลองเป็น 70 ชั่วโมง โดยมีการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม ดังแสดงในตาราง 10 ซึ่งใช้ความเข้มข้นของ H_2O_2 ในช่วง 200-1000 ppb และ ความเข้มข้นของ $Zn(II)$ ที่ 20 ppb หลังการทดลองนำแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 บางส่วนไปวิเคราะห์เบื้องต้นด้วยเครื่องจุลทรรศน์แบบ stereo และ confocal เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงบนผิวหน้าของแผ่นตัวอย่าง

ตาราง 10 แสดงสภาวะการทดลองของสแตนเลสสตีล 304 ที่มีการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะไม่เติมและเติม 20 ppb Zn(II) ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง

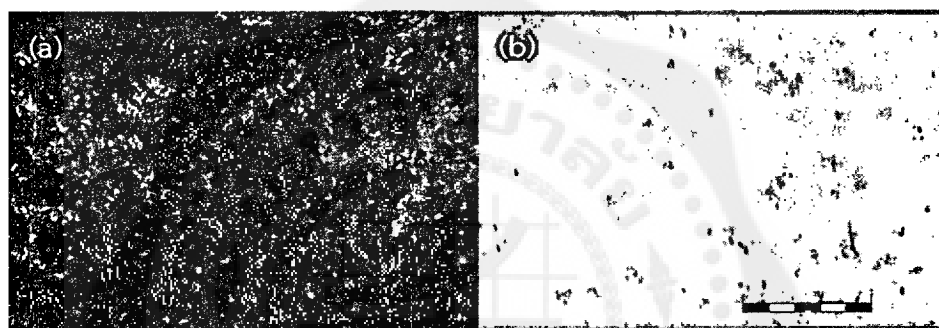
กรณีศึกษา	H_2O_2	$Zn(ClO_3)_2$
8	-	-
9	200 ppb	-
10	500 ppb	-
11	1000 ppb	-
12	200 ppb	20 ppb
13	500 ppb	20 ppb
14	1000 ppb	20 ppb

2.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของสแตนเลสสตีล 304 ด้วยเครื่องจุลทรรศน์แบบ stereo และ confocal

ตัวอย่างผลที่ได้แสดงดังภาพประกอบ 31-33 พบว่า หลังการสัมผัสกับน้ำ DI พื้นผิวของสแตนเลสสตีล 304 มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (ภาพประกอบ 31) เมื่อเทียบกับแผ่นสแตนเลสสตีลที่สัมผัสกับ H_2O_2 ที่ความเข้มข้น 1000 ppb (ภาพประกอบ 32) ซึ่งในกรณีหลังมีการสะสมของผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนมากขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีลักษณะเป็นกระจุกและกระจายตัวไปทั่วแผ่นตัวอย่าง อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติม Zn(II) ที่ความเข้มข้น 20 ppb พบว่า ยังคงมีการสะสมของผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนบนพื้นผิว (ภาพประกอบ 33) แต่มีความหนาแน่นน้อยกว่าในกรณีไม่มีการเติม Zn(II) ดังนั้นผลการทดลองที่ได้บ่งชี้ว่า การเติม Zn(II) มีแนวโน้มในการช่วยยับยั้งการกัดกร่อนในสแตนเลสสตีลโดย H_2O_2 ได้ เพื่อยืนยันสมมติฐาน ผู้วิจัยจึงนำแผ่นตัวอย่างหลังการทดลองนี้ไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวสแตนเลสสตีล 304 ด้วยเทคนิค SEM-EDS



ภาพประกอบ 31 แสดงพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่สัมผัสกับน้ำ DI ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง (กรณีศึกษาที่ 8) ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบ stereo (31a) และ confocal (31b)



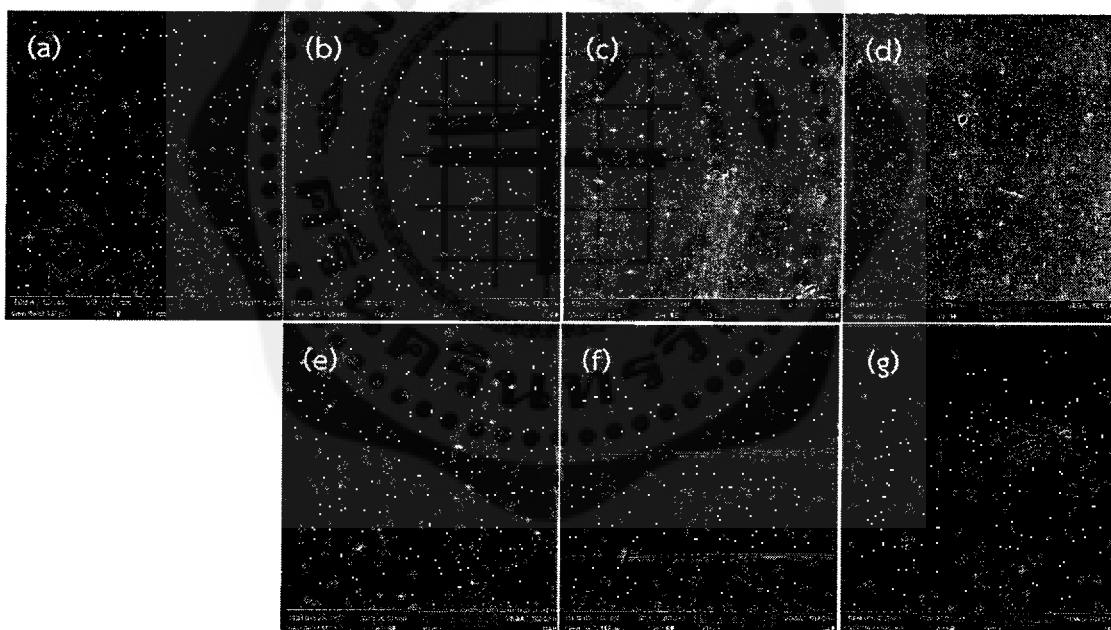
ภาพประกอบ 32 แสดงพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่สัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 1000 ppb ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง (กรณีศึกษาที่ 11) ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบ stereo (32a) และ confocal (32b)



ภาพประกอบ 33 แสดงพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่สัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 1000 ppb และ $Zn(II)$ ความเข้มข้น 20 ppb ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง (กรณีศึกษาที่ 14) ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบ stereo (33a) และ confocal (33b)

2.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของสแตนเลสสตีล 304 ด้วยเทคนิค SEM

ภาพประกอบ 34 จากการวิเคราะห์ผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่มีการไหลผ่านของ H_2O_2 ความเข้มข้น 0, 200, 500, และ 1000 ppb ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM พบว่า เกิดการกัดกร่อนแบบหลุมและมีผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนเกิดขึ้นบนผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังจากมีการไหลผ่านของ H_2O_2 ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง จำนวนมาก ซึ่งหลุมที่เกิดจากการกัดกร่อนกระจายอยู่ทั่วผิวหน้าอย่างไม่สม่ำเสมอ โดยการกัดกร่อนของแผ่นสแตนเลสสตีลเกิดขึ้นมากที่สุดเมื่อสัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 ที่ความเข้มข้น 1000 ppb ในขณะที่ผิวหน้าของ สแตนเลสสตีลที่สัมผัสกับน้ำ DI มีการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ระยะเวลา 7 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติมและไม่เติม Zn(II) ยังไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เนื่องจากข้อจำกัดของเทคนิค SEM ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้า ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน และหลุม Pitting corrosion ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างด้วยเทคนิค EDS



ภาพประกอบ 34 แสดงภาพ SEM ของผิวหน้าของตัวอย่าง SS 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่มีความเข้มข้นต่างกันเพื่อจำลองสภาวะการกัดกร่อน; (a) DI , (b) 200 ppb H_2O_2 , (c) 500 ppb H_2O_2 , (d) 1000 ppb H_2O_2 , และการศึกษาผลของการเติมไอออน Zn(II) ; (e) 200 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II) , (f) 500 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II) , และ (g) 1000 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II) ที่ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง

2.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุบนพื้นผิวของสแตนเลสสตีล 304 ด้วยเทคนิค EDS

การตรวจสอบพื้นผิวตัวอย่างด้วยเทคนิค EDS สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบบนผิวสแตนเลสสตีลได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผิวหน้าผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน และหลุม Pitting corrosion ที่เกิดขึ้นของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุ Fe, Cr และ Ni บนพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่ความเข้มข้นช่วง 200-1000 ppb และสารละลาย Zn(II) ความเข้มข้น 20 ppb ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง แสดงดังตาราง 11-13

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบของผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304

ตาราง 11 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย EDS ของผิวหน้าแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่ความเข้มข้น 200, 500, และ 1000 ppb และความเข้มข้นของ Zn(II) 20 ppb ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง พบว่า สัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ที่ผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีลลดลงเมื่อมีการสัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 แต่สัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr เพิ่มขึ้นเทียบกับค่ามาตรฐาน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ 7 ชั่วโมง และเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย H_2O_2 เพิ่มขึ้น พบว่า สัดส่วนปริมาณของธาตุไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อมีการเติมสารละลาย Zn(II) พบว่า สัดส่วนปริมาณของธาตุก่อนและหลังการเติมไอออน Zn(II) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้บ่งชี้ว่า H_2O_2 ก่อเกิดการกัดกร่อนใน สแตนเลสสตีล แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเติมไอออน Zn(II) ยังไม่สามารถอธิบายได้ว่าสามารถยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ได้ เนื่องจากจุดที่เลือกมาวิเคราะห์เป็นบริเวณที่ผิวหน้าเรียบซึ่งเกิดการกัดกร่อนน้อยอยู่แล้วทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของธาตุน้อยมากเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน

ตาราง 11 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลส-สตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะไม่เติมและเติม 20 ppb Zn(II) ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS

กรณีศึกษา	ธาตุ (%)			
	Fe	Cr	Ni	O
8) DI	63.14	28.26	4.88	-
9) 200 ppb H_2O_2	60.77	28.09	4.44	-
10) 500 ppb H_2O_2	63.23	29.24	3.97	-
11) 1000 ppb H_2O_2	61.66	26.85	4.22	-
12) 200 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II)	61.17	26.96	4.06	-
13) 500 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II)	61.58	28.27	4.63	-
14) 1000 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II)	61.96	26.89	4.40	-
Blank	70.15	18.75	7.76	-

2) การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304

ตาราง 12 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่ความเข้มข้น 200, 500, และ 1000 ppb และ Zn(II) ความเข้มข้น 20 ppb ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง พบว่า เมื่อสแตนเลสสตีลสัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนแผ่นตัวอย่างในทุกความเข้มข้น ซึ่งมีสัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ลดลง และมีสัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr และ O เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดสารประกอบออกไซด์ของโลหะบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย H_2O_2 ที่มีต่อสภาวะการกัดกร่อนของแผ่นตัวอย่าง พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเติมสารละลาย Zn(II) พบว่า สัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe เพิ่มขึ้น และสัดส่วนปริมาณธาตุ Cr, Ni, และ O ลดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนลดลงซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ แต่ในกรณีศึกษาที่ 14 (1000 ppb H_2O_2 และ 20ppb Zn(II)) พบว่า การเติมไอออน Zn(II) ทำให้สัดส่วนปริมาณของธาตุ O เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการเกิดสารประกอบโครเมียมออกไซด์ปกคลุมอยู่จำนวนมาก

ตาราง 12 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาวะไม่เติมและเติม 20 ppb Zn(II) ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS

กรณีศึกษา	ธาตุ (%)			
	Fe	Cr	Ni	O
8) DI	57.39	26.96	4.67	3.61
9) 200 ppb H_2O_2	54.69	26.58	4.33	4.35
10) 500 ppb H_2O_2	42.46	22.63	3.23	16.55
11) 1000 ppb H_2O_2	56.04	27.10	4.15	3.73
12) 200 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II)	57.20	25.98	4.36	4.22
13) 500 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II)	53.59	24.54	3.97	7.99
14) 1000 ppb H_2O_2 และ 20ppb Zn(II)	30.19	17.73	1.58	33.22
Blank	70.15	18.75	7.76	-

3) การวิเคราะห์องค์ประกอบของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304

ตาราง 13 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่ความเข้มข้น 200, 500, และ 1000 ppb และความเข้มข้นของ Zn(II) 20 ppb ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง พบว่า หลุม Pitting corrosion ที่เกิดขึ้นบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่สัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 มีการเปลี่ยนแปลงของธาตุต่างๆ อย่างชัดเจน โดยสัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ลดลง และสัดส่วนปริมาณ Cr และ O เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย H_2O_2 ส่งผลให้เกิดสภาวะการกัดกร่อนบนแผ่นตัวอย่างมากขึ้น โดยพิจารณาได้จากสัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ลดลง และสัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดเป็นสารประกอบ Fe_3O_4 และ $NiFe_2O_4$ ที่มีความเสถียรต่ำทำให้หลุดออกง่าย แต่เมื่อเติมสารละลาย Zn(II) ทำให้สัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni เพิ่มขึ้น และสัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr และ O ลดลง บ่งชี้ว่า ไอออน Zn(II) สามารถสภาวะการกัดกร่อนบนแผ่นตัวอย่างได้ เนื่องจากเมื่อเกิดเป็นสารประกอบสังกะสีออกไซด์ทำให้พื้นผิวของสแตนเลสสตีลเสถียรมากขึ้น ส่งผลให้ลดการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในระยะเวลา 7 ชั่วโมง แต่ในกรณีศึกษาที่ 14 (1000 ppb H_2O_2 และ 20ppb Zn(II)) พบว่า การเติมไอออน Zn(II) ทำให้สัดส่วน

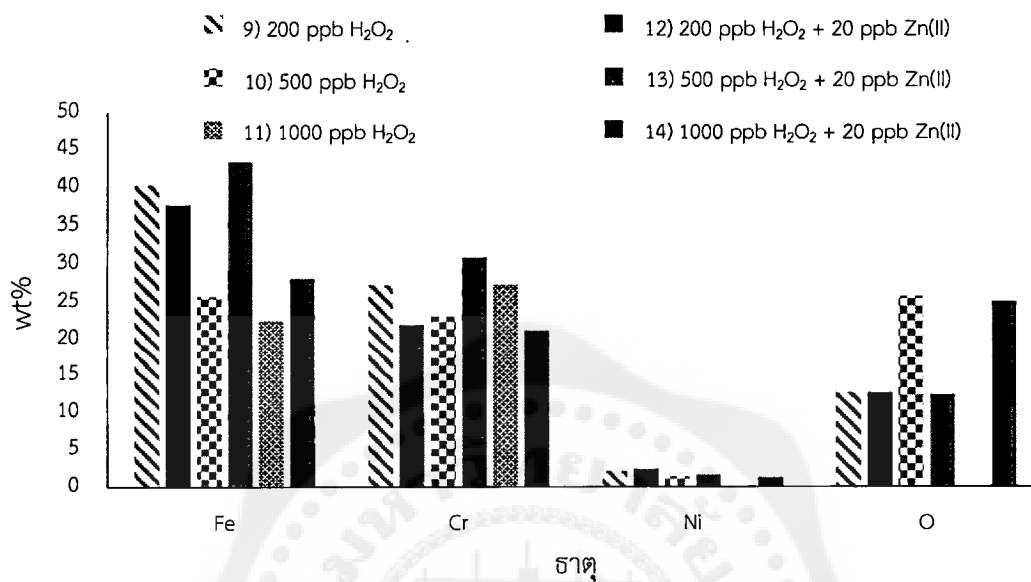
ปริมาณของธาตุ O เพิ่มขึ้น ในขณะที่สัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr ลดลง อาจเนื่องจากการเกิดสารประกอบโครเมียมออกไซด์ปกคลุมอยู่

ตาราง 13 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 200-1000 ppb สภาพแวดล้อมและเติม 20 ppb Zn(II) ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS

กรณีศึกษา	ธาตุ (%)			
	Fe	Cr	Ni	O
8) DI	33.01	16.46	2.38	14.59
9) 200 ppb H_2O_2	40.30	27.26	2.13	12.60
10) 500 ppb H_2O_2	25.75	23.05	1.38	25.69
11) 1000 ppb H_2O_2	22.53	27.28	-	-
12) 200 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II)	42.69	26.50	2.34	6.84
13) 500 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II)	35.35	28.21	1.78	15.86
14) 1000 ppb H_2O_2 และ 20 ppb Zn(II)	28.12	21.17	1.25	25.02
Blank	70.15	18.75	7.76	-

สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS ของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่มีความเข้มข้นต่างกัน ที่ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 35 จะได้ว่า ความเข้มข้นของสารละลาย H_2O_2 มีอิทธิพลต่อการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลอย่างมีนัยสำคัญ พิจารณาได้จากสัดส่วนปริมาณธาตุ Fe และ Ni ลดลง และมีสัดส่วนปริมาณธาตุ O เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากผิวหน้าของของสแตนเลสสตีลถูกออกซิไดซ์ทำให้เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะ และการเติมไอออน Zn(II) จะช่วยลดการสูญเสียปริมาณธาตุ Fe ส่งผลให้สามารถยับยั้งการกัดกร่อนได้ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองข้างต้น และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทดลองส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนบนพื้นผิวของสแตนเลสสตีลมากขึ้น สังเกตได้จากผลิตภัณฑ์ (White product) และหลุม Pitting corrosion มากขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของธาตุอย่างเห็นได้ชัด แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดลองยังไม่สามารถตรวจหาปริมาณของธาตุ Zn ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมที่สถานะต่างๆ เพื่อศึกษากลไกของไอออน Zn(II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิดจาก H_2O_2

และผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลด้วยไฮออน Zn(II) โดยการศึกษาความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทดลอง เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงชัดเจนยิ่งขึ้น



ภาพประกอบ 35 แสดงสัดส่วนปริมาณธาตุองค์ประกอบของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H₂O₂ ความเข้มข้น 200, 500 และ 1000 ppb ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 70 ชั่วโมง ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS

2.2 ผลของไฮออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล 304 ที่เกิดจาก H₂O₂ ความเข้มข้น 0%, 5% และ 10% ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง

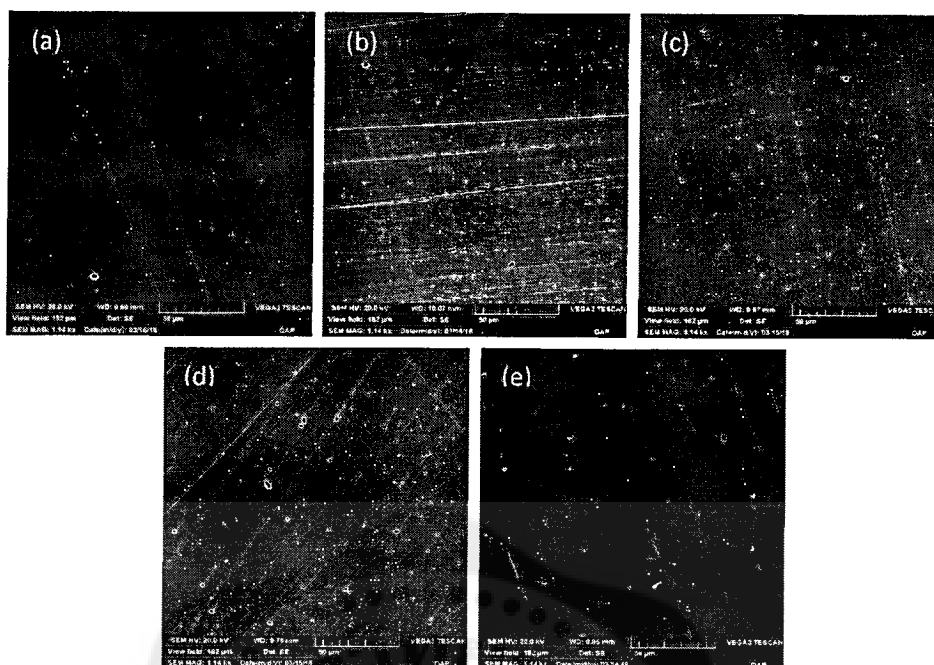
ทำการเพิ่มระยะเวลาในการทดลองเป็น 100 ชั่วโมง เพื่อนำไปสู่การจำลองสภาวะการกัดกร่อนที่เหมาะสมดังแสดงในตาราง 14 โดยใช้ความเข้มข้นของ H₂O₂ ในช่วง 0-10% ที่อุณหภูมิ 25-80 °C หลังการทดลองนำแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ไปวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค SEM-EDS

ตาราง 14 แสดงสภาวะการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล 304 ที่มีการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 0-10% ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง

กรณีศึกษา	H_2O_2	$Zn(ClO_3)_2$	อุณหภูมิ (°C)
15	0%	-	25
16	5%	-	25
17	10%	-	25
18	0%	-	50
19	5%	-	50
20	10%	-	50
21	0%	-	80
22	5%	-	80
23	10%	-	80

2.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ด้วยเทคนิค SEM

ภาพประกอบ 36 แสดงลักษณะพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่ความเข้มข้น 0%, 5% และ 10% ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยใช้เทคนิค SEM พบว่า เกิดหลุมขนาดเล็กบนผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ลักษณะเป็นจุดๆ มีการสูญเสียเนื้อโลหะเล็กน้อย เรียกว่า Pitting corrosion และผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนอยู่บนผิวหน้าและขอบหลุมของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ซึ่งจำนวนและขนาดของหลุม Pitting corrosion กระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมออยู่ทั่วผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 โดยแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ในสารละลาย 0% H_2O_2 (น้ำ DI) มีการเปลี่ยนแปลงบนผิวหน้าเล็กน้อยดังภาพประกอบ 36(a) ส่วนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่สัมผัสกับสารละลาย 5% และ 10% H_2O_2 เกิดหลุม Pitting corrosion บนผิวหน้ามากขึ้นดังภาพประกอบ 36(b) และภาพประกอบ 36(c) ตามลำดับ นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลทำให้ขนาดของหลุม Pitting corrosion บนผิวหน้าแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่สัมผัสกับสารละลาย 10% H_2O_2 ที่อุณหภูมิ 50 และ 80 °C ดังภาพประกอบ 36(d) และ ภาพประกอบ 36(e) ตามลำดับ มีขนาดใหญ่กว่าในสารละลาย 10% H_2O_2 ที่อุณหภูมิ 25 °C แต่อย่างไรก็ตามการใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาคอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะบอกสาเหตุและกลไกการกัดกร่อนได้อย่างสมบูรณ์ จึงต้องใช้เครื่องมือวัดคุณสมบัติทางเคมี และรายละเอียดในการเกิดหลุมมาช่วยอธิบายองค์ประกอบของพื้นผิวที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค EDS



ภาพประกอบ 36 ภาพ SEM แสดงผิวหน้าของตัวอย่าง SS 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่มีความเข้มข้นและอุณหภูมิแตกต่างกันเพื่อจำลองสภาวะการกัดกร่อน; (a) 0% H_2O_2 ที่ 25 °C, (b) 5% H_2O_2 ที่ 25 °C, (c) 10% H_2O_2 ที่ 25 °C, (d) 10% H_2O_2 ที่ 50 °C, และ (e) 10% H_2O_2 ที่อุณหภูมิ 80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง

2.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุบนพื้นผิวของสแตนเลสสตีล 304 ด้วยเทคนิค EDS

การตรวจสอบด้วยเทคนิค EDS สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของผิวหน้าสแตนเลสสตีล ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของพื้นผิว ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน และหลุม Pitting corrosion ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 พบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุ Fe, Cr และ Ni บนผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่ความเข้มข้นช่วง 0-10% ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง แสดงดังตาราง 15-17

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบของผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304

ตาราง 15 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของผิวหน้าแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่มีความเข้มข้นต่างกัน ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง พบว่า ผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่สัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 มีสัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ลดลง เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Oxidation บนผิวหน้าของสแตนเลสสตีล เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย H_2O_2 พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่าง

มีนัยสำคัญ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากบริเวณที่พิจารณาเป็นพื้นผิวเรียบจึงไม่เกิดการกัดกร่อน

ตาราง 15 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลส-สตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 0-10% ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS

กรณีศึกษา	ธาตุ (%)			
	Fe	Cr	Ni	O
15) DI, 25°C	60.81	27.74	4.43	-
16) 5% H_2O_2 , 25°C	61.30	27.68	4.23	-
17) 10% H_2O_2 , 25°C	60.45	27.25	5.03	-
18) DI, 50°C	61.49	28.19	4.71	-
19) 5% H_2O_2 , 50°C	62.88	28.83	4.91	-
20) 10% H_2O_2 , 50°C	61.05	27.98	4.06	-
21) DI, 80°C	61.40	29.40	4.69	-
22) 5% H_2O_2 , 80°C	61.19	27.79	4.83	-
23) 10% H_2O_2 , 80°C	61.06	27.37	4.61	-
Blank	70.15	18.75	7.76	-

2) การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304

ตาราง 16 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่มีความเข้มข้นต่างกัน ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง พบว่า ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่สัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 มีสัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ลดลง ในขณะที่สัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr และ O เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Oxidation บนผิวหน้าของสแตนเลสสตีลเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย H_2O_2 พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ พบว่า สัดส่วนปริมาณของธาตุ O เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิจะไปเร่งให้เกิดปฏิกิริยา Oxidation ทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของโลหะบนพื้นผิวของแผ่น

สแตนเลสสตีลมากขึ้น จึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล

ตาราง 16 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) บนแผ่นตัวอย่าง สแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 0-10% ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS

กรณีศึกษา	ธาตุ (%)			
	Fe	Cr	Ni	O
15) DI, 25°C	60.70	28.57	3.84	0.00
16) 5% H_2O_2 , 25°C	60.21	28.14	4.70	0.00
17) 10% H_2O_2 , 25°C	57.04	26.12	3.74	3.65
18) DI, 50°C,	58.21	26.74	4.64	4.09
19) 5% H_2O_2 , 50°C	58.49	26.27	4.44	3.61
20) 10% H_2O_2 , 50°C	58.66	26.86	4.51	2.41
21) DI, 80°C	57.63	26.46	3.96	4.57
22) 5% H_2O_2 , 80°C	57.02	26.85	4.36	4.93
23) 10% H_2O_2 , 80°C	57.01	25.58	4.41	5.26
Blank	70.15	18.75	7.76	-

3) การวิเคราะห์องค์ประกอบของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่าง สแตนเลสสตีล 304

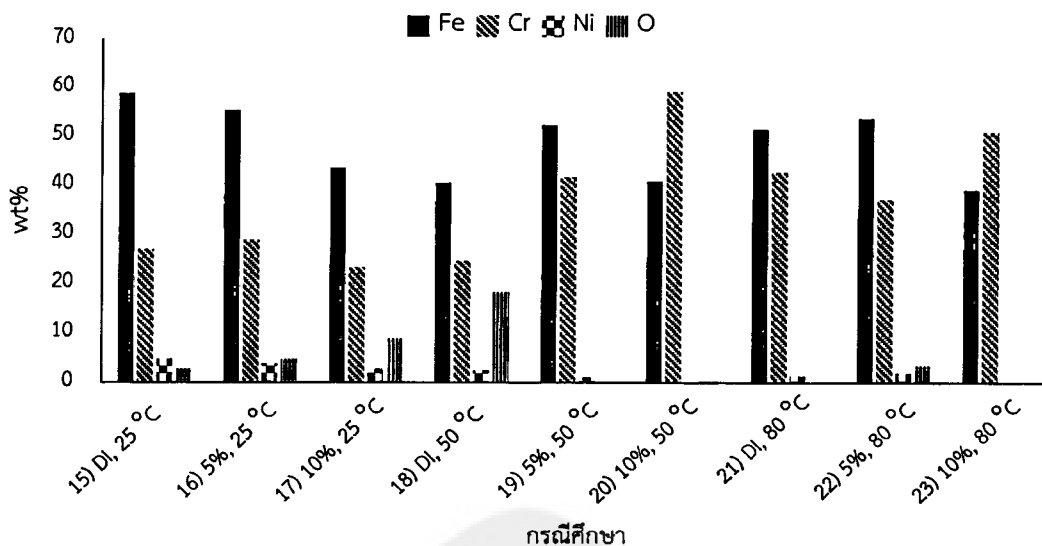
ตาราง 17 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่มีความเข้มข้นต่างกัน ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง พบว่า หลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ที่สัมผัสกับสารละลาย H_2O_2 มีสัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ลดลง ในขณะที่สัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr และ O เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนบนพื้นผิวของสแตนเลสสตีล เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย H_2O_2 ทำให้สัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ลดลงในทุกสภาวะ เนื่องจากสารละลาย H_2O_2 ทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีลมากขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ พบว่า สัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni มีค่าน้อยลง

เนื่องจากอุณหภูมิเป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อนเร็วยิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดหลุม Pitting corrosion จำนวนมากและขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

ตาราง 17 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 0-10% ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS

กรณีศึกษา	ธาตุ (%)			
	Fe	Cr	Ni	O
15) DI, 25°C	58.71	26.99	4.73	2.71
16) 5% H_2O_2 , 25°C	55.30	28.86	3.83	4.77
17) 10% H_2O_2 , 25°C	43.50	23.29	2.72	8.84
18) DI, 50°C	51.35	43.40	0.86	-
19) 5% H_2O_2 , 50°C	52.26	41.74	1.08	-
20) 10% H_2O_2 , 50°C	40.89	59.11	-	-
21) DI, 80°C	51.35	42.69	1.30	-
22) 5% H_2O_2 , 80°C	53.63	37.06	1.94	3.38
23) 10% H_2O_2 , 80°C	39.02	50.87	-	-
Blank	70.15	18.75	7.76	-

สรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ด้วยเทคนิค EDS เมื่อศึกษาสภาวะการกัดกร่อนที่เกิดจากสารละลาย H_2O_2 ในช่วง 0-10% ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง แสดงดังภาพประกอบ 37 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย H_2O_2 ทำให้สัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ลดลง ในขณะที่สัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr และ O เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลาย H_2O_2 ทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของโลหะบนพื้นผิวของแผ่นสแตนเลสสตีลมากขึ้น และเมื่อพิจารณาปัจจัยของอุณหภูมิ พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้สัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิไปเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนเกิดเร็วขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ความเข้มข้นของสารละลาย H_2O_2 และอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในสแตนเลสสตีล



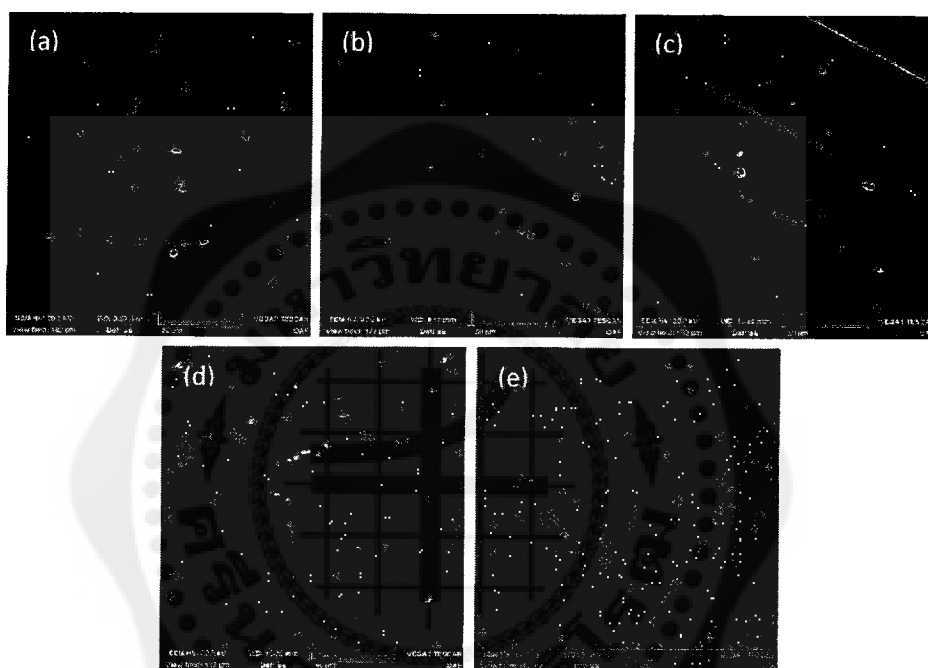
ภาพประกอบ 37 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ด้วยเทคนิค EDS ในสภาวะความเข้มข้นของ H_2O_2 ในช่วง 0-10% ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง

จากนั้นทำการศึกษากลไกของไอออน $Zn(II)$ ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล 304 ที่เกิดจาก H_2O_2 โดยมีสภาวะที่เป็นกรณีศึกษาแสดงดังตาราง 18 โดยใช้สารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 10% เนื่องจากมีสภาวะการกัดกร่อนที่พบได้ชัดเจน โดยการเกิดหลุม Pitting corrosion บนผิวหน้าของ สแตนเลสสตีลจำนวนมากและมีการเปลี่ยนแปลงของธาตุมาก

ตาราง 18 แสดงสภาวะการทดลองของสแตนเลสสตีล 304 ที่มีการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 10% และสารละลาย $Zn(II)$ ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลาทดลอง 100 ชั่วโมง

กรณีศึกษา	$Zn(ClO_3)_2$	อุณหภูมิ (°C)
24	0.001 M	25
25	0.005 M	25
26	0.01 M	25
27	0.01 M	50
28	0.01 M	80

หลังการทดลองนำแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 ไปวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค SEM-EDS พบว่า ในช่วงความเข้มข้นของสารละลาย Zn(II) ที่ 0.001-0.01 M ยังคงมีหลุมที่เกิดจากการกัดกร่อน และผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนกระจายทั่วแผ่นตัวอย่าง แสดงดังภาพประกอบ 38 แต่เมื่อเติมสารละลาย Zn(II) ความเข้มข้น 0.01 M ที่อุณหภูมิ 80 °C จะเห็นว่า หลุม Pitting corrosion และผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนลดลงอย่างชัดเจน หลังจากนั้นนำแผ่นตัวอย่างไปวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นผิวของสแตนเลสสตีลที่เปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค EDS แสดงผลดังตาราง 19-21



ภาพประกอบ 38 ภาพ SEM แสดงผิวหน้าของตัวอย่าง SS 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่มีความเข้มข้น 10% และสารละลาย Zn(II) ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน; (a) 10% H_2O_2 และ 0.001 M Zn(II) ที่ 25 °C, (b) 10% H_2O_2 และ 0.005 M Zn(II) ที่ 25 °C, (c) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II) ที่ 25 °C, (d) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II) ที่ 50 °C, และ (e) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II) ที่ 80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบของผิวหน้าบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304

ตาราง 19 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของผิวหน้าแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 10% และสารละลาย Zn(II) ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง พบว่า สภาพการทดลองที่อุณหภูมิ 25 °C การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Zn(II) มีผลต่อการยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้ดี

สังเกตได้จากสัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni มากที่สุดที่ความเข้มข้นของสารละลาย Zn(II) 0.01 M เนื่องจากไอออน Zn(II) เข้าไปแทนที่ไอออนของธาตุดังกล่าวทำให้สามารถยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้สัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe เพิ่มขึ้น ในขณะที่ Ni ลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ไอออน Zn(II) เข้าไปแทนที่ Fe(II) ได้มากขึ้นส่งผลให้ยับยั้งการกัดกร่อนได้ดียิ่งขึ้น

ตาราง 19 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของบริเวณผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 0-10% และ Zn(II) ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS

กรณีศึกษา	ธาตุ (%)			
	Fe	Cr	Ni	O
24) 10% H_2O_2 และ 0.001 M Zn(II), 25°C	59.78	27.82	4.40	-
25) 10% H_2O_2 และ 0.005 M Zn(II), 25°C	60.64	28.58	3.71	-
26) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II), 25°C	60.67	27.69	4.48	-
27) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II), 50°C	61.19	27.79	4.83	-
28) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II), 80°C	62.83	28.93	3.96	-
Blank	70.15	18.75	7.76	-

2) การวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) ของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304

ตาราง 20 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 10% และสารละลาย Zn(II) ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง พบว่าผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีลที่สัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 10% และสารละลาย Zn(II) ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 °C มีสัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni ลดลง แต่สัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr และ O เพิ่มขึ้นเทียบกับค่ามาตรฐาน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Zn(II) พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ พบว่า สัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe เพิ่มขึ้น ในขณะที่ O ลดลง เนื่องจากไอออน Zn(II) เข้าไปแทนที่ไอออนของธาตุ Fe(II) ในชั้นออกไซด์ ทำให้สามารถยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้

ตาราง 20 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) บนแผ่นตัวอย่าง สแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 0-10% และ Zn(II) ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS

กรณีศึกษา	ธาตุ (%)			
	Fe	Cr	Ni	O
24) 10% H_2O_2 และ 0.001 M Zn(II) , 25°C	57.58	30.65	3.58	2.35
25) 10% H_2O_2 และ 0.005 M Zn(II) , 25°C	47.12	21.86	2.94	10.39
26) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II) , 25°C	52.58	26.51	4.20	6.06
27) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II) , 50°C	55.63	25.36	4.02	4.85
28) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II) , 80°C	55.79	25.51	4.20	4.26
Blank	70.15	18.75	7.76	-

3) การวิเคราะห์องค์ประกอบของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304

ตาราง 21 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 10% และสารละลาย Zn(II) ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิ 25 °C การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Zn(II) มีผลต่อการยับยั้งการกัดกร่อนพิจารณาจากสัดส่วนปริมาณของธาตุ Ni เพิ่มขึ้น และสัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr ลดลง เนื่องจากไอออน Zn(II) แทนที่ Ni(II) ทำให้ชั้นออกไซด์เสถียรขึ้น แต่จะเห็นว่าสัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe ลดลง เนื่องจากจุดที่ตรวจวัดมีกัดกร่อนเกิดเป็นหลุมขนาดใหญ่จึงทำให้เนื้อโลหะหลุดออกไปมากส่งผลให้ปริมาณของธาตุ Fe ลดลง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ พบว่า ที่อุณหภูมิ 50 °C มีสัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni เพิ่มขึ้น ในขณะที่ Cr ลดลง เนื่องจากไอออน Zn(II) เข้าไปแทนที่ไอออนของธาตุ Fe และ Ni ทำให้สามารถยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 °C พบว่า มีสัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Cr ลดลง และมีสัดส่วนปริมาณของธาตุ O เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิไปเร่งให้เกิดปฏิกิริยา Oxidation เพิ่มขึ้นจึงเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมมากขึ้น ซึ่งการเติมไอออน Zn(II) ทำให้เกิดเป็นสารประกอบ ZnFe_2O_4 และ ZnCr_2O_4 ซึ่งมีความเสถียรมากที่สุด (Boston, 1996: 337) ทำให้สามารถยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลได้ดียิ่งขึ้น

ตาราง 21 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 0-10% และ Zn(II) ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS

กรณีศึกษา	ธาตุ (%)			
	Fe	Cr	Ni	O
24) 10% H_2O_2 และ 0.001 M Zn(II), 25°C	45.24	44.63	0.84	-
25) 10% H_2O_2 และ 0.005 M Zn(II), 25°C	55.12	28.56	3.50	4.84
26) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II), 25°C	43.39	44.92	0.95	-
27) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II), 50°C	56.06	39.33	1.35	-
28) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II), 80°C	46.42	29.52	2.57	12.95
Blank	70.15	18.75	7.76	-

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS ของพื้นผิวแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 10% และสารละลาย Zn(II) ความเข้มข้นช่วง 0.001-0.01 M ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ในระยะเวลา 100 ชั่วโมง สรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Zn(II) ส่งผลให้สามารถยับยั้งการกัดกร่อนได้ดียิ่งขึ้น โดยเมื่อเติมสารละลาย Zn(II) ความเข้มข้น 0.01 M ที่อุณหภูมิ 25 °C พบว่า สัดส่วนปริมาณของธาตุ Cr เพิ่มขึ้น ในขณะที่สัดส่วนปริมาณของธาตุ Ni ลดลง เนื่องจากเกิดสารประกอบออกไซด์ของโครเมียม ($ZnCr_2O_4$) ซึ่งมีความเสถียรมากส่งผลให้ยับยั้งการกัดกร่อนได้ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมีแนวโน้มทำให้ยับยั้งการกัดกร่อนได้ดีขึ้น โดยพบว่า ที่อุณหภูมิ 50 °C สามารถยับยั้งการกัดกร่อนได้ดีที่สุด สังเกตได้จากสัดส่วนปริมาณของธาตุ Fe และ Ni เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 °C ทำให้ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนลดลง เนื่องจากอัตราการกัดกร่อนเกิดเร็วขึ้น นอกจากนี้เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการกัดกร่อนเทียบกับแผ่นตัวอย่างที่ไม่มีการเติมไอออน Zn(II) แสดงดังตาราง 22 พบว่า ที่อุณหภูมิ 25 °C การเติมไอออน Zn(II) สามารถยับยั้งการกัดกร่อนของ Fe, Cr และ Ni ได้เท่ากับ 0.25, 48.15 และ 65.07% ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 50 °C การเติมไอออน Zn(II) สามารถยับยั้งการกัดกร่อนของ Fe, Cr และ Ni ได้เท่ากับ 27.11, 50.29 และ 100% ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 80 °C การเติมไอออน Zn(II) สามารถยับยั้งการกัดกร่อนของ Fe, Cr และ Ni ได้เท่ากับ 15.15, 41.99 และ 100% ตามลำดับ

ตาราง 22 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 (wt%) ที่มีการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้น 10% สภาพไม่เติมและเติม 0.01 M Zn(II) ที่อุณหภูมิ 25-80 °C ระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS

กรณีศึกษา	ธาตุ (%)			
	Fe	Cr	Ni	O
17) 10% H_2O_2 , 25°C	43.50	23.29	2.72	8.84
26) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II), 25°C	43.39	44.92	0.95	-
20) 10% H_2O_2 , 50°C	40.89	59.11	-	-
27) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II), 50°C	56.06	39.33	1.35	-
23) 10% H_2O_2 , 80°C	39.02	50.87	-	-
28) 10% H_2O_2 และ 0.01 M Zn(II), 80°C	46.42	29.52	2.57	12.95

สรุปผลการทดลองปัจจัยที่มีผลต่อบทบาทของ Zn(II) ในการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) คือ ความเข้มข้นของสารละลาย H_2O_2 , ความเข้มข้นของสารละลาย Zn(II) และอุณหภูมิ ซึ่งที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 10% เกิดการกัดกร่อนมากที่สุด และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น และการศึกษาบทบาทของการเติมไอออน Zn(II) พบว่า สามารถยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้ โดยที่ความเข้มข้นของสารละลาย Zn(II) 0.01 M สามารถยับยั้งการกัดกร่อนได้ดีที่สุด และเมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของไอออน Zn(II) สรุปได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะการกัดกร่อนบนแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304

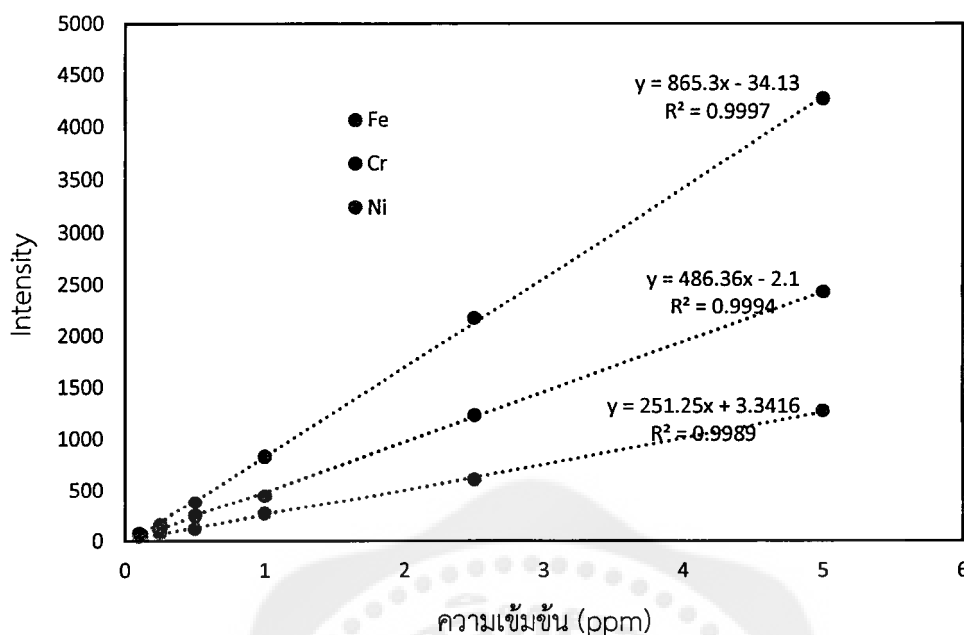
3. การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำด้วยเทคนิค ICP-OES

จากการศึกษาผลของไอออน Zn(II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิดจาก H_2O_2 ทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่างๆ ในสารตัวอย่างหลังการทดลองด้วยเทคนิค ICP-OES สามารถสร้างกราฟมาตรฐาน (calibration curve) ในช่วงความเข้มข้น 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2.5, และ 5 ppm แสดงดังภาพประกอบ 39 พบว่า สมการเส้นตรงของธาตุต่างๆ ที่สนใจมีดังนี้

$$\text{เหล็ก (Fe): } y = 865.3x - 34.13, R^2 = 0.9997$$

$$\text{โครเมียม (Cr): } y = 486.36x - 2.1, R^2 = 0.9994$$

$$\text{นิกเกิล (Ni): } y = 251.25x + 3.3416, R^2 = 0.9989$$



ภาพประกอบ 39 แสดงกราฟมาตรฐาน (calibration curve) ของธาตุเหล็ก (Fe), โครเมียม (Cr), และ นิกเกิล (Ni) ในช่วงความเข้มข้น 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2.5, และ 5 ppm

ผลการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของธาตุในสารละลายตัวอย่างหลังการทดลองในสภาวะต่างๆ แสดงดังตาราง 23 โดยเมื่อพิจารณา การจำลองสภาวะการกัดกร่อนที่เกิดจากการเติมสารละลาย H_2O_2 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ H_2O_2 มีการกัดกร่อนของธาตุต่างๆ เพิ่มขึ้น โดยเห็นได้ชัดจากปริมาณของ ธาตุที่อยู่ในสารละลายตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณธาตุที่พบมากที่สุดคือ Fe รองลงมาคือ Cr และ Ni ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดเป็นหลุม Pitting corrosion เนื่องจากพื้นผิวของสแตนเลสสตีล เกิดปฏิกิริยา Oxidation กับสารละลาย H_2O_2 ทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของโลหะ (Fe_3O_4 , $NiFe_2O_4$ และ $FeCr_2O_4$ (Kim, 1999: 81-88)) ซึ่งมีความเสถียรต่ำจึงหลุดออกจากแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีลลงไป อยู่ในสารละลายผลิตภัณฑ์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย H_2O_2 ทำให้เกิดการกัดกร่อนมากขึ้นจึงทำให้พบปริมาณของธาตุต่างๆ เพิ่มขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิยังส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติมสารละลายไอออน Zn(II) พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับน้ำ DI เนื่องจากขีดจำกัดของเครื่องมือที่วัดได้ต่ำสุดอยู่ในหน่วย ppm

ตาราง 23 แสดงความเข้มข้นของธาตุ Fe, Cr, และ Ni ในสารละลายตัวอย่างหลังการทดลองที่สภาวะต่างๆ โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิค ICP-OES

กรณีศึกษา	ความเข้มข้น (mg/L)		
	Fe	Cr	Ni
1) DI, 25 °C, 7 h	0.072	0.058	0.000
2) 200 ppb H ₂ O ₂ , 25 °C, 7 h	0.046	0.098	0.000
3) 500 ppb H ₂ O ₂ , 25 °C, 7 h	0.033	0.000	0.000
4) 1000 ppb H ₂ O ₂ , 25 °C, 7 h	0.036	0.000	0.020
5) 200 ppb H ₂ O ₂ และ 20 ppb Zn(II) , 25 °C, 7 h	0.026	0.000	0.000
6) 500 ppb H ₂ O ₂ และ 20 ppb Zn(II) , 25 °C, 7 h	0.072	0.003	0.012
7) 1000 ppb H ₂ O ₂ และ 20 ppb Zn(II) , 25 °C, 7 h	0.073	0.000	0.000
8) DI, 25 °C, 70 h	0.113	0.014	0.000
9) 200 ppb H ₂ O ₂ , 25 °C, 70 h	0.085	0.040	0.000
10) 500 ppb H ₂ O ₂ , 25 °C, 70 h	0.036	0.000	0.000
11) 1000 ppb H ₂ O ₂ , 25 °C, 70 h	0.026	0.093	0.000
12) 200 ppb H ₂ O ₂ และ 20 ppb Zn(II), 25 °C, 70 h	0.072	0.000	0.000
13) 500 ppb H ₂ O ₂ และ 20 ppb Zn(II), 25 °C, 70 h	0.067	0.000	0.000
14) 1000 ppb H ₂ O ₂ และ 20 ppb Zn(II), 25 °C, 70 h	0.063	0.000	0.000
15) DI, 25°C, 100 h	0.077	0.038	0.005
16) 5% H ₂ O ₂ , 25°C, 100 h	0.079	0.000	0.047
17) 10% H ₂ O ₂ , 25°C, 100 h	0.114	0.064	0.051
18) DI, 50°C, 100 h	0.012	0.036	0.000
19) 5% H ₂ O ₂ , 50°C, 100 h	0.146	0.000	0.057
20) 10% H ₂ O ₂ , 50°C, 100 h	0.109	0.060	0.007
21) DI, 80°C, 100 h	0.116	0.035	0.000
22) 5% H ₂ O ₂ , 80°C, 100 h	0.114	0.000	0.041
23) 10% H ₂ O ₂ , 80°C, 100 h	0.220	0.129	0.000
24) 10% H ₂ O ₂ และ 0.001 M Zn(II), 25°C, 100 h	0.147	0.000	0.000
25) 10% H ₂ O ₂ และ 0.005 M Zn(II), 25°C, 100 h	0.056	0.105	0.009
26) 10% H ₂ O ₂ และ 0.01 M Zn(II), 25°C, 100 h	0.073	0.000	0.041
27) 10% H ₂ O ₂ และ 0.01 M Zn(II), 50°C, 100 h	0.125	0.040	0.079
28) 10% H ₂ O ₂ และ 0.01 M Zn(II), 80°C, 100 h	0.091	0.167	0.111

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ สามารถจัดสร้างชุดทดลองที่เป็นระบบไหลผ่าน เพื่อใช้ในการศึกษาบทบาทของไอออน $Zn(II)$ ต่อผลการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำในรูปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่มีต่อการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลได้สำเร็จเป็นครั้งแรก โดยสามารถใช้เป็นแบบจำลองของระบบน้ำหล่อเย็นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียสได้ โดยเซลล์ใสสารตัวอย่างมีการออกแบบเพื่อแขวนแผ่นวัสดุตัวอย่างและสามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่สำหรับศึกษาบทบาทของไอออนสังกะสี (II) ในการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิดจาก H_2O_2 ซึ่งเป็นการจำลองการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เป็นผลมาจากการแตกตัวด้วยรังสีของน้ำในท่อน้ำหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยใช้ H_2O_2 เป็นสารตั้งต้นบรรจุอยู่ในเซลล์ แล้วให้ความร้อนแก่เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่าง ทำให้เกิดการกัดกร่อนบนผิวหน้าของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล ซึ่งถูกศึกษาด้วยเทคนิค XRD, XRF และ SEM-EDS พบว่า การกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล SS 304 เกิดแบบ Pitting corrosion บริเวณที่ฟิล์มออกไซด์ถูกทำลาย ทำให้ปริมาณธาตุ Fe และ Ni ลดลง สังเกตได้จากปริมาณของหลุมที่มากขึ้นและขนาดของหลุมที่ใหญ่ขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนบนผิวหน้าวัสดุมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลลดลงทำให้อายุการใช้งานของวัสดุสั้นลง โดยพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ H_2O_2 จะทำให้เกิดการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล SS 304 แบบ Pitting corrosion เพิ่มขึ้น โดยพบว่าที่ความเข้มข้น 10% H_2O_2 มีการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณพื้นผิวชัดเจนที่สุด ที่ระยะเวลาการทดลอง 100 ชั่วโมง เนื่องจากสแตนเลสสตีลถูกออกซิไดซ์ทำให้เกิดสารประกอบ Fe_3O_4 และ $NiFe_2O_4$ มากบนผิวหน้าของแผ่นตัวอย่าง โดยสารประกอบเหล่านี้มีความเสถียรต่ำจึงทำให้หลุดออกได้ง่ายส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนมาก ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะเป็นแบบจำลองสภาวะการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสีได้ดีที่สุด จากนั้นทำการศึกษาผลของการเติมไอออน $Zn(II)$ ไปในสารละลาย จากผลที่ได้พบว่า ไอออน $Zn(II)$ สามารถยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้ โดยไอออน $Zn(II)$ เข้าไปแทนที่ไอออนของ $Fe(II)$ แล้วเกิดเป็นสารประกอบ $ZnFe_2O_4$ ในชั้นออกไซด์ของโลหะทำให้ชั้นออกไซด์มีความเสถียรขึ้นจึงป้องกันการหลุดออกของเนื้อโลหะได้ ทำให้ปริมาณธาตุ Fe และ Ni เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ไม่ได้เติมไอออน $Zn(II)$ และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของไอออน $Zn(II)$ ต่อประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนบนแผ่นสแตนเลสสตีล พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออน $Zn(II)$ ทำให้การกัดกร่อนลดลง เนื่องจากปริมาณของธาตุ Ni เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น โดยพบว่า จากการศึกษาผลของการเติมไอออน $Zn(II)$ สามารถทำนายสารประกอบสังกะสีออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ ที่อุณหภูมิ 25 °C เกิดเป็นสารประกอบ

ZnCr_2O_4 ทำให้ปริมาณของธาตุ Cr เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ เกิดเป็นสารประกอบ ZnFe_2O_4 และ ZnCr_2O_4 ทำให้ปริมาณของธาตุ Fe เพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ เกิดเป็นสารประกอบ ZnFe_2O_4 จึงทำให้ปริมาณของธาตุ Fe เพิ่มขึ้น ซึ่งที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีปริมาณธาตุ Fe เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จึงสามารถยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์สารละลายน้ำพบว่า มีธาตุ Fe, Cr, และ Ni อยู่ปริมาณเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณหลุม Pitting corrosion ที่เกิดขึ้น จึงสรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาประสิทธิภาพของไอออน Zn(II) ในการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำด้วยรังสี ด้วยชุดทดลองระบบไหลผ่านที่ออกแบบจำลองระบบน้ำหล่อเย็นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ดังนั้นผลการทดลองที่ได้สามารถเป็นแนวทางในการออกแบบเคมีของน้ำหล่อเย็นสำหรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เพื่อต้านทานการกัดกร่อนได้ดียิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. การจำลองสภาวะจริงในห้องทดลองนั้นทำได้ยาก เพราะสภาวะจริงมีอุณหภูมิสูง ($285\text{ }^{\circ}\text{C}$) และความดันสูง ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีขีดจำกัดของอุณหภูมิไม่เกิน $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถ้าต้องการทำการทดลองที่อุณหภูมิสูงจะต้องเพิ่มการติดตั้งเครื่องปรับความดันเพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์เสียหายกลายเป็นไอ
2. การกัดกร่อนของสแตนเลสสตีลที่เกิดขึ้นในสภาวะจริงของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ใช้เวลานาน ในขณะที่การทดสอบในห้องทดลองมีเวลาจำกัด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการทดสอบแบบเร่งรัด โดยการปรับเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้วัดทำให้ไม่สามารถจำลองสภาวะการกัดกร่อนอย่างแท้จริงได้

งานวิจัยในอนาคต

จากงานวิจัยข้างต้น จะเห็นว่าชุดทดลองระบบไหลผ่านที่ได้สามารถใช้ในการศึกษาผลของไอออนสังกะสี (II) ต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของสแตนเลสสตีล (SS 304) ที่เกิดจาก H_2O_2 ได้ในช่วงอุณหภูมิ $25\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นงานในอนาคต ผู้วิจัยจะพัฒนาชุดทดลองให้สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นโดยการเพิ่มเครื่องปรับความดันเพื่อสร้างสภาวะจำลองให้ใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากขึ้น นอกจากนี้ชุดทดลองนี้ยังเป็นประโยชน์ในการศึกษาการกัดกร่อนในโลหะต่างๆ ได้อีกมากมาย



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- บทความสมมติฐานนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. (2017). เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบกำลัง. สืบค้นเมื่อ 24 เมษายน 2560, จาก <http://www.nst.or.th/article/article493/article493014.html>
- มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์. คณะวิศวกรรมศาสตร์. (2561). Inductively coupled plasma, ICP. สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2561, จาก <http://www.env.eng.chula.ac.th/?q=content/inductively-coupled-plasma-icp>
- อร่าม เจริญดี. (2013). การกัดกร่อนและการป้องกัน. สืบค้นเมื่อ 24 เมษายน 2560, จาก <http://www.auto2drive.com/การกัดกร่อนและการป้องกัน/>
- Baston, V.F.; Garbaskas, M.F.; & Bozeman, J. (1996). Decontamination flange film characterization for a boiling water reactor under hydrogen water chemistry. *Nucl. Technol.* 114: 337.
- Benoist, M.; et al. (2011). Electrochemical behaviour of stainless steel in PWR Primary Coolant Conditions: Effects of Radiolysis. *Nucl. Mater.* 419: 241–247.
- Bosch, R.W.; & Vankeerberghen, M. (2007). In-pile electrochemical tests of stainless steel under PWR conditions: interpretation of electrochemical impedance spectroscopy data. *Electrochim. Acta.* 52: 7538–7544.
- Bosch, R.W.; Weber, M.; & Vankeerberghen, M. (2007). In-pile electrochemical measurements on AISI 304 and AISI 306 in PWR conditions – experimental results. *Nucl. Mater.* 360: 304–314.
- Boyce, W.C. (1982). X-Ray Fluorescence spectroscopy. *Inorg. Org. Phys. & Anal. Chem.* 14: 81-85.
- Buckley, D.; & Schenker, E. (1994). Chemistry in water reactors: operating experience and new developments. In *Proc. of the Int. Conf. on Chemistry in Water Reactors.* 1: 211–218.
- Cattant,; et al. (2006). Nuclear Technology Review 2006. Austria: International atomic energy agency.
- Chien C.L.; Smith, F.R.; & Cowan, R.L. (1996). Effects of hydrogen water chemistry on radiation field buildup in BWRs. *Nucl. Eng. Des.* 166: 31-36.
- Chien, C.L. (2009). A review of corrosion product transport and radiation field buildup in boiling water reactors. *Prog. Nucl. Energy.* 51: 207–224.

- Da Cunha Bello, M.; et al. (1998). Composition, structure and properties of the oxide films formed on the stainless steel 316L in a primary type PWR environment. *Corros. Sci.* 40: 447–463.
- Davis, J.R.; & Associates. (2000). Nickel, cobalt, and their alloys. J. R. Davis and Associates (Eds.). USA: ASM Specialty Handbook.
- Davis, J. R. (2000). The Effects and Economic Impact of Corrosion. In *Corrosion: Understanding the Basics*. 1-20. Ohio: ASM International.
- Elliot, J. (2010). Modelling ‘Steady-State’ Water Radiolysis in nuclear reactors: status of the reaction set, rate constants and g-values for 20–350 °C. In *Pro. of 8th Int’l Radiolysis, Electrochemistry & Materials Performance Workshop*. Canada: Quebec City.
- Ewelina, C.; & Anna B. (2016). Corrosion mitigation in coolant systems in nuclear power plants. *Prog. Nucl. Energy*. 88: 1-9.
- Francois, C.; Didier, C.; & Damien, F. (2008). Corrosion issues in nuclear industry today. In *Materialstoday*. 11.
- Glass, R.S.; et al. (1986). Electrochemical behaviour of gold and stainless steel under proton irradiation and active redox couples. *Corros. Sci.* 26: 577–590.
- Hisamune, K.; Sekiguchi, M.; & Takiguchi, H. (1998). New aspect of DH control in PWR primary water chemistry. In *Proc. JAIF Int. Conf. on Water Chemistry in Nuclear Power Plants*.
- Indig, M.E.; & Nelson, J.L. (1991). Electrochemical measurements and modeling predictions in boiling water reactors under various operating conditions. *Corros.* 47: 202–209.
- Inagaki, H.; et al. (2003). Synergy Effect of Simultaneous Zinc and Nickel Addition on Cobalt Deposition onto Stainless Steel in Oxygenated High Temperature Water. *J. Nucl. Sci. Technol.* 40(3): 143– 152.
- Iva, B.; et al. (2011). Zinc injection in pressurized water reactors – laboratory tests, field experience and modeling. In *Research Report*. VTT. Finland.
- Jacko, R.J. (1991). The influence of DH on PWSCC of alloy 600 at PWR SG operating temperature. In *Proc. Fifth Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems — Water Reactors*, ANS, La Grange Park, IL. 613.

- Jin-Soo, C.; et al. (2013). Effect of zinc injection on the corrosion products in nuclear fuel assembly. *Natural. Sci.* 5: 173-181.
- Jin-Soo, C. (2005). The evaluation for zinc injection into primary water in Korea. In Tech. Report. Taejon: KAERI.
- Kashiwazaki, H. (1998). New aspect of DH control in PWR primary water chemistry. In *Proc. JAIF Int. Conf. on Water Chemistry in Nuclear Power Plants*. Japan. 972.
- Keun-Bong, Y.; et al. (2011). Correlation of the microstructural degradation and mechanical strength of Ni-based superalloy after thermal exposure. *Procedia. Engineer.* 10: 2490-2495.
- Kim, Y.J. (1995). Characterization of the oxide film formed on type 316 stainless steel in 288 °C water in cyclic normal and hydrogen water chemistries. *Corros.* 51: 849-860.
- Kim, Y.J. (1999). Analysis of Oxide Film Formed on Type 304 Stainless Steel in 288°C Water Containing Oxygen, Hydrogen, and Hydrogen Peroxide. *Corros.* 55(1): 81-88.
- Kritzer, P. (2004). Corrosion in high-temperature and supercritical water and aqueous solutions: a review. In *J. Supercrit. Fluids.* 29: 1-29.
- Koch, G.H.; et al. (2002). Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States. Texas: NACE International.
- Leoni, E.; et al. (2007). Electrochemical behavior of gold and stainless steel under proton irradiation and active redox couples. *Electrochim. Acta.* 53: 495-510.
- Lin, C.C. (1989). Chemical behavior and steam transport of nitrogen-13 in BWR primary system. *Radiochem. Nucl. Chem.* 130: 129.
- Lin, C.C. (1996). Radiochemistry in Nuclear Power Reactors. NAS-NS-3119, *Nuclear Science Series*. Washington, DC.: National Academy Press.
- Lin, C.C. (1996). EPRI BWR Water Chemistry Guidelines Revision Committee Meeting, NC.: Charlotte.
- Lin, C.C. (2000). Hydrogen water chemistry technology in boiling water reactors. *Nucl. Technol.* 130: 59-70.
- Lister, D.H. (1984). Corrosion product release in light water reactors. In *Tech. Report*. United States: Atomic Energy of Canada Ltd., Chalk River, Ontario. Chalk River Nuclear Labs.

- Lister, D.H. (2005). Nuclear reactor materials and chemistry. *Thermal. Power. Plants.* 2.
- Liu, X.; Wu, X.; & Han, E.-H. (2011). Influence of Zn injection on characteristics of oxide film on 304 stainless steel in borated and lithiated high temperature water. *Corros. Sci.* 53: 3337-3345.
- Lyon, S. (2012). Nuclear corrosion science and engineering - A volume in Woodhead Publishing Series in Energy 2012. 473–547.
- Marsh, G.P.; et al. (1986). The influence of radiation on the corrosion of stainless steel. *Corros. Sci.* 26: 971–982.
- Mirna, U.; Jonathan P.; & Digby D. M. (2007). The impact of radiolytic yield on the calculated ECP in PWR primary coolant circuits. *Nucl. Mater.* 362: 1–13.
- Moon, J.H.; et al. (2005). Dependency of single-phase FAC of carbon and low-alloy steels for NPP system piping on pH, orifice distance and material. *Nucl. Sci. Technol.* 37: 375-384.
- Morita M. (2018). *Scanning Electron Microscope Energy Dispersive X-Ray Spectrometry*. In: *The Surface Science Society of Japan (eds) Compendium of Surface and Interface Analysis*. Springer, Singapore. 241.
- Nuclear Energy Around the World. (2017). Retrieved April 29, 2017, from <https://www.nei.org/Knowledge-Center/Nuclear-Statistics/World-Statistics>
- Pathania, R.S.; & McIlree, R. (1988). A review of the effect of hydrogen on stress corrosion cracking of alloy 600 in 360 °C water. In *Proc. Third Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems — Water Reactors*, Metallurgical Society, Warrendale, PA. 551.
- Pikeav, A.K. (1967). Pulse radiolysis of water and aqueous solutions. *Phys. Chem.* 40: 109-111.
- Ray A.K. (2005). Structure property correlation study of a service exposed first stage turbine blade in a power plant. *Mater. Sci. and Eng. A.* 419: 225-232.
- Ruiz, C.P.; Lin, C.C.; & Wong, T.L. (1989). Control of Nitrogen-16 in BWR Main Steam Lines under Hydrogen Water Chemistry Conditions. Electric Power Research Institute Report EPRI NP-6424-SD.
- Saito, N.; et al. (1990). Electrochemical behaviour of stainless steel in PWR primary coolant conditions: effects of radiolysis. *Corros.* 48: 531–536.

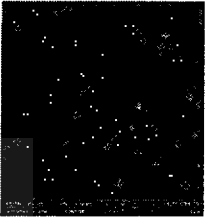
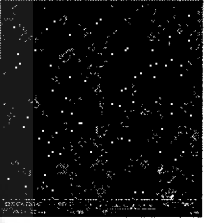
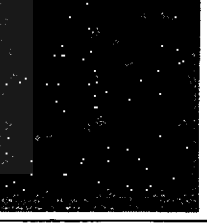
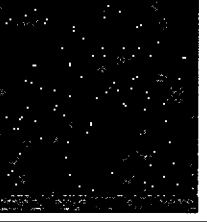
- Saito, N.; et al. (1997). Susceptibility of sensitized type 304 stainless steel to intergranular stress corrosion cracking in simulated boiling-water reactor environments. *Corros.* 53: 537–545.
- Sed, N. (2003). PWR operating experience with zinc addition and the impact on plant radiation fields. *Rad. Prot. LWR*. CA: EPRI, Palo Alto. 1009568.
- Saito Y. (1979). X-Ray Diffraction. In: Inorganic Molecular Dissymmetry. *Inorg. Chem. Concept.* 4: 32-74. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Takahashi, M.; & Iijima, S. (1989). Activation of structural materials due to recoil protons in light water reactor. *Nucl. Sci. Technol.* 26: 874–880.
- Tagiguchi, H.; Ullberg, M.; & Uchida, S. (2004). Optimization of dissolved hydrogen concentration for control of primary coolant radiolysis in pressurized water reactors. *Nucl. Sci. Technol.* 41: 601–609.
- Tomonori S.; et al. (2004). Effects of hydrogen peroxide on corrosion of stainless Steel, (I). *Nucl. Sci. Technol.* 41: 610–618.
- Urquidi-Macdonald, M.; Pitt, J.; & Macdonald, D.D. (2007). The impact of radiolytic yield on the calculated ECP in PWR primary coolant circuits. *Nucl. Mater.* 362: 1–13.
- Vankeerberghen, M.; Bosch, R.W.; & Van Nieuwenhoven, R. (2003). In-pile electrochemical measurements on AISI 316L(N) IG and EUROFER 97. I: Experimental results. *Nucl. Mater.* 312: 191–198.
- Walter, E.C. (1958). The effect of gamma irradiation on the potential behavior of platinum and stainless steel electrodes. *Electrochem. Soc.* 105: 483–485.
- Walker, F.W.; Miller, D.G.; & Feiner, F. (1977). General electric chart of the nuclides. *G.E. Co.* N.Y.: Schenectady. 12.
- Weiss, J. (1944). The theory of radiolysis of water. *Nature.* 153: 748.
- Wylie, C.M.; Shelton, R.M.; & Fleming, G.J. (2007). Corrosion of nickel-based dental casting alloys. *Dent. Mater.* 23: 714–723.
- Xiahe L.; Xinqiang W.; & En-Hou H. (2012). Effect of Zn injection on established surface oxide films on 316 L stainless steel in borated and lithiated high temperature water. *Corros. Sci.* 65: 136–144.

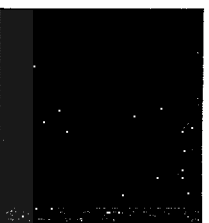
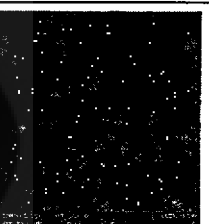
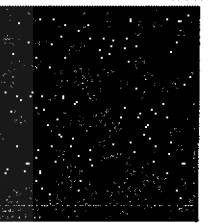
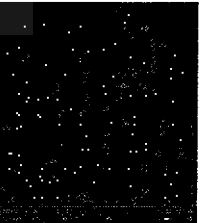
- Yeh, T.K.; Macdonald, D.D.; & Motta, A.T. (1995). Modeling water chemistry, ECP and crack rate in the BWR heat transport circuits. Part I: The damage-PREDICTOR algorithm. *Nucl. Sci. Eng.* 121: 468–482.
- Zhou, Yu; et al. (2013). Effects of HIP temperature on the microstructural evolution and property restoration of a Ni-based superalloy. *Mater. Eng. and Perfor.* 22: 215-222.
- Ziemniak, S.E.; & Hanson, M. (2006). Zinc treatment effects on corrosion behavior of 304 stainless steel in high temperature, hydrogenated water. *Corros. Sci.* 48: 2525-2546.

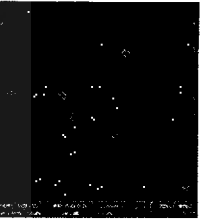
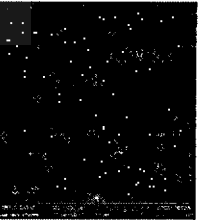
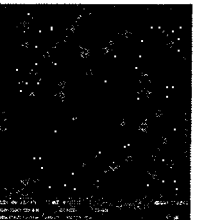


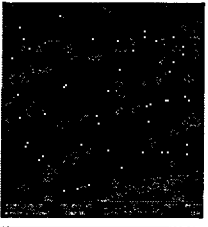
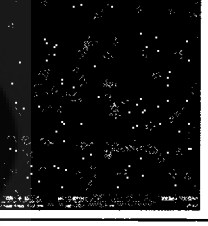
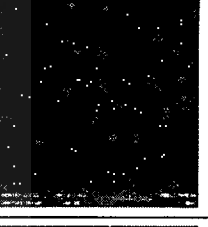
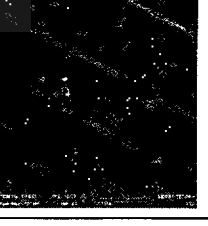
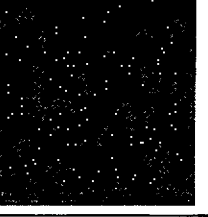


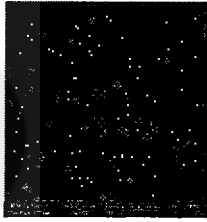
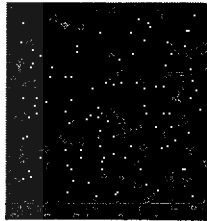
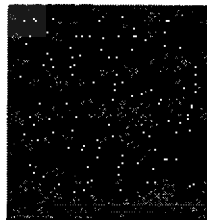
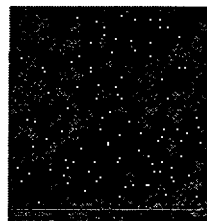
ภาพ SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างสแตนเลสสตีล 304 หลังการทดลองที่สภาวะต่างๆ

Case	H ₂ O ₂	Zn(ClO ₃) ₂	Temperature (°C)	Time (h)	SEM image
1	-	-	25	7	
2	200 ppb	-	25	7	
3	500 ppb	-	25	7	
4	1000 ppb	-	25	7	
5	200 ppb	20 ppb	25	7	
6	500 ppb	20 ppb	25	7	

7	1000 ppb	20 ppb	25	7	
8	-	-	25	70	
9	200 ppb	-	25	70	
10	500 ppb	-	25	70	
11	1000 ppb	-	25	70	
12	200 ppb	20 ppb	25	70	
13	500 ppb	20 ppb	25	70	

14	1000 ppb	20 ppb	25	70	
15	0%	-	25	100	
16	5%	-	25	100	
17	10%	-	25	100	
18	0%	-	50	100	
19	5%	-	50	100	
20	10%	-	50	100	

21	0%	-	80	100	
22	5%	-	80	100	
23	10%	-	80	100	
24	10%	0.001 M	25	100	
25	10%	0.005 M	25	100	
26	10%	0.01 M	25	100	
27	10%	0.01 M	50	100	

28	10%	0.01 M	80	100	
29	0%	-	25	500	
30	10%	-	25	500	
31	10%	0.01 M	25	500	
32	0%	-	25	1000	
33	10%	-	25	1000	
34	10%	0.01 M	25	1000	

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDS (peak area)

ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ด้วย EDS ของพื้นผิวแผ่นตัวอย่าง SS 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่สภาวะต่างๆ

กรณีศึกษา	Fe	Cr	Ni	Mn	O	Si	C	Zn	อื่นๆ
1) DI-25°C-7h	17758.3	7263.1	1368.3	499.1	-	213.4	212.5	-	
2) 200ppb H_2O_2 , 25°C, 7h	12562.4	5200	1062.7	411.9	-	-	158.7	-	
3) 500ppb H_2O_2 , 25°C, 7h	17706.1	7718.2	1333.9	598.3	-	323.7	232.3	-	
4) 1000ppb H_2O_2 , 25°C, 7h	3738.0	1646.7	226.9	135.6	-	-	-	-	
5) 200ppb H_2O_2 +20ppb Zn^{2+} , 25°C, 7h	16633.1	7134.5	1456.7	556.7	-	251.9	-	43.4	
6) 500ppb H_2O_2 +20ppb Zn^{2+} , 25°C, 7h	16520	6782.2	1263.1	487.3	-	209.6	-	2.2	
7) 1000ppb H_2O_2 +20ppb Zn^{2+} , 25°C, 7h	13288.6	5538.7	984.4	375.1	-	153.2	161.7	-	
8) DI, 25°C, 70h	28205.2	11763.6	2294.2	839.3	-	404	-	-	
9) 200ppb H_2O_2 , 25°C, 70h	18263.9	7868.3	1404.7	565	-	235.4	208.7	-	
10) 500ppb H_2O_2 , 25°C, 70h	16442.5	7085.9	1085.4	513.3	-	203.4	-	-	
11) 1000ppb H_2O_2 , 25°C, 70h	15387.3	6243.9	1107.6	517.4	-	188.5	196.3	-	
12) 200ppb H_2O_2 +20ppb Zn^{2+} , 25°C, 70h	18559.1	7623.4	1296.6	670.3	-	303.1	233	-	
13) 500ppb H_2O_2 +20ppb Zn^{2+} , 25°C, 70h	17623.2	7539.7	1394	515.6	-	-	227.2	-	
14) 1000ppb H_2O_2 +20ppb Zn^{2+} , 25°C, 70h	17790.4	7196.1	1328.6	647.6	-	174.1	200.4	-	
15) DI, 25°C, 100h	184126.2	78265.3	14115.3	6310.1	-	2262.6	2222.6	-	977.1
16) 5% H_2O_2 , 25°C, 100h	195571.7	82306.1	14207.7	6102.8	-	2125.8	2410.8	-	675.2

ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ด้วย EDS ของพื้นผิวแผ่นตัวอย่าง SS 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

กรรมวิธีการ	Fe	Cr	Ni	Mn	O	Si	C	Zn	อื่นๆ
17) 10% H_2O_2 , 25°C, 100h	166621.9	70003.2	14589.9	5921.8	-	2017	2152.6	-	883.6
18) DI, 50°C, 100h	17070.5	7292.1	1376.8	526.5	-	-	219.7	-	-
19) 5% H_2O_2 , 50°C, 100h	16363.1	6992.7	1345.2	491.7	-	190	-	-	-
20) 10% H_2O_2 , 50°C, 100h	16486.8	7040.6	1153.6	420.5	-	249.2	203	-	-
21) DI, 80°C, 100h	17454.5	7789.3	1402.5	645.4	-	313.9	-	-	-
22) 5% H_2O_2 , 80°C, 100h	15610	6601.9	1171.7	558.5	-	-	289	-	-
23) 10% H_2O_2 , 80°C, 100h	35687.8	14908.6	2832	1298.3	-	303.6	461.4	-	-
24) 10% H_2O_2 +0.001M Zn^{2+} , 25°C, 100h	89781.2	38936.6	6956.3	3070.3	-	1072.1	1228.3	-	351.7
25) 10% H_2O_2 +0.005M Zn^{2+} , 25°C, 100h	86322.5	37911.4	5550.5	2409.2	-	1054.2	1189.7	-	-
26) 10% H_2O_2 +0.01M Zn^{2+} , 25°C, 100h	109505.7	46572.2	8502.1	3540.9	-	1426.8	1398	-	-
27) 10% H_2O_2 +0.01M Zn^{2+} , 50°C, 100h	17690.7	7487.9	1470.1	646.6	-	177.0	165.4	9.5	196.4
28) 10% H_2O_2 +0.01M Zn^{2+} , 80°C, 100h	18427.2	7905.6	1221.6	461.4	-	-	169.4	-	-

ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ด้วย EDS ของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) บนแผ่นตัวอย่าง SS 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่สภาวะต่างๆ

การวิเคราะห์	Fe	Cr	Ni	Mn	O	Si	C	Zn	อื่นๆ
1) DI-25°C-7h	16730	7748.8	1466.5	996.7	513.2	297.4	303	492.6	-
2) 200ppb H_2O_2 , 25°C, 7h	12187.5	5335.8	1215.9	419	372.5	158.5	-	-	-
3) 500ppb H_2O_2 , 25°C, 7h	11175.9	5870.2	921.8	5323.2	1436.9	263	372.6	2403	-
4) 1000ppb H_2O_2 , 25°C, 7h	3491.9	1497.1	227.9	169.6	-	-	-	-	-
5) 200ppb H_2O_2 +20ppb Zn^{2+} , 25°C, 7h	13574	6783.9	931.9	1562.4	1392.7	261.9	518.6	618.4	1.8
6) 500ppb H_2O_2 +20ppb Zn^{2+} , 25°C, 7h	12374.6	5114.1	892.1	381.7	-	-	171.1	-	-
7) 1000ppb H_2O_2 +20ppb Zn^{2+} , 25°C, 7h	13024.4	5371.6	1000.7	482.8	-	203.4	-	-	-
8) DI, 25°C, 70h	27788.4	12163.1	2376.9	1036.7	501.7	394.5	372.8	-	-
9) 200ppb H_2O_2 , 25°C, 70h	15795.6	7152.5	1316.2	1100.5	360.2	253.5	275.5	-	-
10) 500ppb H_2O_2 , 25°C, 70h	14583.5	6769.5	1220.3	1145.3	973.3	252.4	391.4	-	-
11) 1000ppb H_2O_2 , 25°C, 70h	14220.3	6407.9	1106.6	441.9	271.4	204.2	306	-	-
12) 200ppb H_2O_2 +20ppb Zn^{2+} , 25°C, 70h	18105.2	7663.7	1451.5	688.5	382.9	282.9	289.5	-	-
13) 500ppb H_2O_2 +20ppb Zn^{2+} , 25°C, 70h	16492.5	7037.7	1284.1	729.8	705.2	336.7	352.2	-	148.9
14) 1000ppb H_2O_2 +20ppb Zn^{2+} , 25°C, 70h	10525.4	5760.8	580.3	1296	3321	448.1	692.8	-	456.6
15) DI, 25°C, 100h	188369.9	82632.4	12538.2	6421.4	-	1962.4	2127.2	-	1308.4
16) 5% H_2O_2 , 25°C, 100h	196301.5	85507.7	16135.2	6898.9	-	2737.7	2188.8	-	955.0

ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ด้วย EDS ของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (White product) บนแผ่นตัวอย่าง SS 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

กรณีศึกษา	Fe	Cr	Ni	Mn	O	Si	C	Zn	อื่นๆ
17) 10% H_2O_2 , 25°C, 100h	165651.7	70697.5	11419.3	5726.4	3041.9	3272.1	2919.8	-	2304.3
18) DI, 50°C, 100h	16454.6	7044.4	1378.3	440.3	331.2	-	288.2	-	-
19) 5% H_2O_2 , 50°C, 100h	16206.3	6782.3	1294.1	645.5	286.8	-	287.5	-	-
20) 10% H_2O_2 , 50°C, 100h	163336.8	69697.1	13197.1	5579.2	1922.4	1937.2	2482.2	-	866.6
21) DI, 80°C, 100h	17749.6	7593.7	1283.4	516	403.7	245	271.3	-	-
22) 5% H_2O_2 , 80°C, 100h	14227.1	6242.4	1144.9	532.4	352.9	-	250.9	-	-
23) 10% H_2O_2 , 80°C, 100h	33056	13820.1	2689.4	1057.6	874.8	414.8	557	-	-
24) 10% H_2O_2 +0.001M Zn^{2+} , 25°C, 100h	66155.2	32815.9	4330.9	2902.6	772.7	502	597	-	-
25) 10% H_2O_2 +0.005M Zn^{2+} , 25°C, 100h	76707.3	33158.8	5028.4	3873.7	4848.8	5896.4	1242.4	-	4879.5
26) 10% H_2O_2 +0.01M Zn^{2+} , 25°C, 100h	100953.3	47438.4	8485.8	4807	3334.3	1638.5	2167.7	-	2031.2
27) 10% H_2O_2 +0.01M Zn^{2+} , 50°C, 100h	18293.2	7770.3	1391.3	548	457.2	650.6	319.1	-	-
28) 10% H_2O_2 +0.01M Zn^{2+} , 80°C, 100h	18008.0	7673.9	1424.9	732.5	394.3	439.3	363.2	-	-

ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ด้วย EDS ของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่าง SS 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H_2O_2 ที่สภาวะต่างๆ

กรณีศึกษา	Fe	Cr	Ni	Mn	O	Si	C	Zn	อื่นๆ
1) DI-25°C-7h	4710.3	3280.9	403.4	11400	2046	-	459.5	-	7810.4
2) 200ppb H ₂ O ₂ , 25°C, 7h	4176	3259.1	332.6	6737.9	2255.3	-	217.5	-	3055.2
3) 500ppb H ₂ O ₂ , 25°C, 7h	4249.3	3077	224.4	12087.6	2657.6	-	368.4	-	7457.8
4) 1000ppb H ₂ O ₂ , 25°C, 7h	915.8	746.3	72.3	2016.9	440.1	-	-	-	914.5
5) 200ppb H ₂ O ₂ +20ppb Zn ²⁺ , 25°C, 7h	9711.5	5221.9	638	4023.7	1092.7	124.1	255.8	-32.5	1258.2
6) 500ppbH ₂ O ₂ +20ppb Zn ²⁺ , 25°C, 7h	7218.8	4330.5	454.9	5792.1	1736.6	116.9	326.7	56.4	2053.2
7) 1000ppbH ₂ O ₂ +20ppb Zn ²⁺ , 25°C, 7h	7630.9	4902.3	382.6	4010.5	2022.6	-	358.9	-16.9	168.1
8) DI, 25°C, 70h	19915.8	9257.5	1510	2758.5	2524.1	322	3400.8	-	536.8
9) 200ppb H ₂ O ₂ , 25°C, 70h	9150.2	5767.9	508.3	2094.1	820.6	185.7	328.5	-	-
10) 500ppb H ₂ O ₂ , 25°C, 70h	6367.7	5311.7	358.3	4008.7	1821.8	118.6	358	-	-
11) 1000ppb H ₂ O ₂ , 25°C, 70h	1425	1608	-	3129	-	-	-	-	-
12) 200ppb H ₂ O ₂ +20ppb Zn ²⁺ , 25°C, 70h	9944.7	5384.5	670.4	4530.1	952.8	347.9	170.4	-	407.8
13) 500ppbH ₂ O ₂ +20ppb Zn ²⁺ , 25°C, 70h	8681.3	5752.2	340.1	1356.8	708	-	172.1	29	105.3
14) 1000ppbH ₂ O ₂ +20ppb Zn ²⁺ , 25°C, 70h	5840.7	4098.4	272.5	2632.5	1490	216.9	373.1	-	137.8
15) DI, 25°C, 100h	183485.8	78604.1	15559	6329.6	2430	2435	2189.4	-	-
16) 5% H ₂ O ₂ , 25°C, 100h	176918.4	86051.1	12905.5	6717.6	4372.3	2045.2	1432.8	-	3180.3
17) 10% H ₂ O ₂ , 25°C, 100h	125322.9	62513.6	8237.2	11330.7	7298.5	10335.7	1673.8	-	15884.6

ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ด้วย EDS ของหลุม Pitting corrosion บนแผ่นตัวอย่าง SS 304 หลังการไหลผ่านของสารละลาย H₂O₂ ที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

กรณีศึกษา	Fe	Cr	Ni	Mn	O	Si	C	Zn	อื่นๆ
18) DI, 50°C, 100h	11835.1	6674.2	759.1	1604.7	1529.6	140.8	96.7	-	-
19) 5% H ₂ O ₂ , 50°C, 100h	4018	2990.3	87	373	-	-	-	-	-
20) 10% H ₂ O ₂ , 50°C, 100h	952.3	1282.7	-	-	-	-	-	-	-
21) DI, 80°C, 100h	6242.8	4836.5	166.3	557.5	-	-	-	-	-
22) 5% H ₂ O ₂ , 80°C, 100h	4582.5	2951.4	174.2	335.7	82.9	-	-	-	-
23) 10% H ₂ O ₂ , 80°C, 100h	1695.5	2059.6	-	432.8	-	-	-	-	-
24) 10% H ₂ O ₂ +0.001M Zn ²⁺ , 25°C, 100h	20140.2	18513.8	393.8	4078.5	-	-	-	-	--
25) 10% H ₂ O ₂ +0.005M Zn ²⁺ , 25°C, 100h	62275.3	30069.2	4161.9	3070.4	1569.2	724.3	778.6	-	737.9
26) 10% H ₂ O ₂ +0.01M Zn ²⁺ , 25°C, 100h	18657	17999.8	431.5	4089.2	-	-	-	-	399.2
27) 10% H ₂ O ₂ +0.01M Zn ²⁺ , 50°C, 100h	15716.5	7217.7	1211.3	715.5	241.4	151.8	204.6	-	-
28) 10% H ₂ O ₂ +0.01M Zn ²⁺ , 80°C, 100h	9950.8	5897.2	579.9	817.5	795.8	-	130.8	-	336.6



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาวศุภมาส มากจันทร์
วันเดือนปีเกิด	28 พฤษภาคม 2536
สถานที่เกิด	อำเภอหัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	40 หมู่ที่ 6 ตำบลบ้านราม อำเภอหัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช 80170
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2553	ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ
พ.ศ. 2557	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.ม.) เคมี จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2561	ปริญญาโท วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาเคมี จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

