



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

แผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอชของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายคลอไรด์และซัลเฟต
โดยวิธีโพลาไรเซชัน

นายสมฤกษ์ จันทรอำพร

กรกฎาคม 2551

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

แผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอชของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายคลอไรด์และซัลเฟต
โดยวิธีโพลาริเซชัน

นายสมฤกษ์ จันทอัมพร
ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุเทคโนโลยีการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนสำหรับการวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ แห่งภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความเมตตาเป็นนักวิจัยพี่เลี้ยง (mentor) และให้คำแนะนำในช่วงเวลาที่ทำงานวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณนายวิศรุต วชิรศิริ นักศึกษาปริญญาโท ณ บัณฑิตวิทยาลัย วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสิรินธรไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) นางสาวปิยนุช ม่วงทอง นายตติยะ ทรัพย์สภาพ นายอภิรัฐ โกสิตานนท์ นักศึกษาปริญญาตรี ณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเทคโนโลยีการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มจพ. ที่เป็นผู้ช่วยวิจัยงานนี้ด้วยความขยันขันแข็ง

ผู้วิจัยขอขอบคุณฝ่ายเทคโนโลยีการกัดกร่อน สถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยีไทย-ฝรั่งเศส และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเทคโนโลยีการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มจพ. ที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือวิจัยเป็นอย่างดี

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5080222

ชื่อโครงการ: แผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอชของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลาย คลอไรด์และซัลเฟตโดยวิธีโพลาไรเซชัน

Project Title : Experimental E-pH Diagrams of AISI 316L Stainless Steel in Aqueous Solutions Containing Chloride and Sulfate by Polarisation Method

ชื่อนักวิจัย: นายสมฤกษ์ จันทรอัมพร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-mail Address : sca@kmutnb.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 ปี (2 กรกฎาคม 2549 – 1 กรกฎาคม 2550)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอช ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่สัมผัสกับสารละลายที่มีไอออนคลอไรด์และซัลเฟตในสัดส่วนต่าง ๆ กัน ผลจากการสร้างแผนภาพดังกล่าว จะทำให้เข้าใจในอิทธิพลของพีเอช ไอออนคลอไรด์และไอออนซัลเฟตในสารละลาย ต่อเด่นเด่นในแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอช การทดลองกระทำโดยใช้วิธีโพเทนชิโอไดนามิกแบบววกกลับ ผลการทดลองพบว่า การเติมซัลเฟตลงในสารละลายคลอไรด์ มีแนวโน้มเลื่อนเส้นศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟไปในทิศทางที่เป็นบวก และมีแนวโน้มเลื่อนเส้นศักย์ไฟฟ้าป้องกันไปในทิศทางที่เป็นลบ ผลที่ตามมาคือทำให้บริเวณการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มในแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอช ลดลง แต่ทำให้บริเวณการเกิดฟิล์มแพสซีฟที่ไม่สมบูรณ์กว้างขึ้น ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตได้แก่ การศึกษาถึงกลไกของซัลเฟตในการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟโดยอาจพิจารณารูปร่างของรูเข็ม (pit) และสารประกอบที่อยู่ในหรือบริเวณรูเข็มที่เกิดขึ้นเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟ การศึกษาดังกล่าวอาจทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

คำหลัก : แผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอช คลอไรด์ ซัลเฟต และเส้นโพลาไรเซชัน

Abstract

The objective of this work is to construct the potential-pH diagrams of AISI 316L stainless steel in aqueous solutions containing different contents of chloride and sulphate. From these diagrams, the effects of solution pH, chloride and sulfate ions on the predominant regimes in the E-pH diagrams were investigated. The cyclic potentiodynamic method was applied in this work. It was found that the addition of sulphate in solution containing chloride tended to positively shift the transpassive-potential line in the E-pH diagram. However, it tended to negatively shift the protection-potential line. These resulted in the widening of the imperfect passivation regime. The future work may be the investigation of shape of pits and the precipitation of compounds inside pits or in the vicinity of pits. This may be done by using electron microscope.

Keywords: Potential-pH diagram, chloride, sulphate, and polarisation curve.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการทดลอง	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	6
3.1 วัสดุที่ใช้	6
3.2 การทดลองเพื่อหาเส้นโพลาไรเซชัน (polarisation curve)	6
3.3 การทดสอบหาไอออนในสารละลาย	8
บทที่ 4 ผลการทดลอง	9
4.1 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในน้ำที่กำลังจัดไอออน	9
4.2 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 3550 ppm และเติมซัลเฟตในปริมาณต่างๆ กัน	11
4.3 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 7100 ppm และเติมซัลเฟตในปริมาณต่างๆ กัน	16
4.4 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 10650 ppm และเติมซัลเฟตในปริมาณต่างๆ กัน	21
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	26
5.1 อิทธิพลของซัลเฟตต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนและแผนภาพ E-pH	26
5.2 อิทธิพลของคลอไรด์ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนและแผนภาพ E-pH	27
5.3 อิทธิพลของคลอไรด์ผสมกับซัลเฟตต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนและแผนภาพ E-pH	28
5.4 อิทธิพลของออกซิเจนในสารละลายพฤติกรรมการกัดกร่อนและแผนภาพ E-pH	33
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	36
6.1 สรุปผลการทดลอง	36
6.2 ข้อเสนอแนะ	37

รายการอ้างอิง	38
ผลลัพธ์จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.	39
ภาคผนวก	40
ภาคผนวก ก: บทความวิจัยที่จะส่งเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ	40
ภาคผนวก ข: บทความวิจัยที่ได้นำเสนอแล้วในที่ประชุมวิชาการ <i>The First International on Corrosion and Material Protection</i> , Prague, Czech Republic, October 1-4, 2007.	51
ภาคผนวก ข: บทความวิจัยที่ได้รับการตอบรับให้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ <i>The Third International Conference on Processing Materials for Properties (PMP-III)</i> , Bangkok, Thailand, December, 7-10, 2008.	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

เหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเนื่องจากมีฟิล์มแพสซีฟ (passive film) ซึ่งป้องกันการกัดกร่อนของโลหะจากสิ่งแวดล้อม เสถียรภาพของฟิล์มแพสซีฟขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิ ชนิดของไอออนและก๊าซที่ละลายอยู่ในสารละลายที่สัมผัสกับเหล็กกล้าไร้สนิมนั้น ค่าพีเอช และอุณหภูมิของสารละลาย วิธีแบบฉบับวิธีหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะในสารละลายคือการสร้างแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอช (E-pH) หรือที่เรียกว่าแผนภาพปูก์เบซ์ (Pourbaix diagram) โดยอาศัยข้อมูลพื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์ [1] แผนภาพดังกล่าวแสดงถึงแดนเด่น (predominant zone) หรือช่วงศักย์ไฟฟ้า-พีเอช ต่างๆ ที่โลหะจะไม่เกิดการกัดกร่อน (immunity) เกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (uniform corrosion) หรือเกิดการสร้างฟิล์มแพสซีฟ (passivation) ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้เพื่อออกแบบป้องกันการกัดกร่อน อาทิ โดยการบังคับค่าแรงดันไฟฟ้าและ/หรือปรับค่าพีเอช ให้อยู่ในช่วงที่เหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการสร้างฟิล์มแพสซีฟ

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลพื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์เพื่อใช้สร้างสร้างแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอชมีอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อโลหะที่สนใจเป็นระบบหลายองค์ประกอบ (multicomponent system) และสารละลายที่สนใจประกอบด้วยไอออนหลายชนิดละลายอยู่ นอกจากนี้ การสร้างแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอชโดยใช้ข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าระบบโลหะ-สารละลายที่สนใจนั้นอยู่ในสภาวะสมดุล ในขณะที่ในความเป็นจริง ระบบดังกล่าวไม่อยู่ในสภาวะสมดุล [2,3] ด้วยเหตุผลข้างต้น จึงได้มีการเสนอวิธีสร้างแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอชโดยวิธีโพลาริเซชัน [4,5] วิธีดังกล่าวสามารถนำมาใช้เพื่อสร้างแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอชของระบบหลายองค์ประกอบ เช่นกรณีเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งสัมผัสกับสารละลายที่มีไอออนหลายชนิดละลายอยู่ได้ง่ายโดยการทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอชของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่สัมผัสกับสารละลายที่มีไอออนคลอไรด์และซัลเฟตในสัดส่วนต่าง ๆ กัน โดยมุ่งศึกษาอิทธิพลของพีเอช ไอออนคลอไรด์และซัลเฟตที่ละลายร่วมกันในสารละลาย ต่อแดนเด่นของแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอช

1.3 ขอบเขตการทดลอง

การทดลองในที่นี้จะแปรค่าความเข้มข้นของไอออนซัลเฟตในปริมาณ 0, 1000, 2000 และ 3000 ppm ในสารละลายที่มีไอออนคลอไรด์ละลายอยู่ 0, 3550, 7100 และ 10650 ppm

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ผลจากการศึกษาดังกล่าวจะทำให้เกิดความเข้าใจที่ลึกซึ้งขึ้นของกลไกการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่สัมผัสกับสารละลายที่มีไอออนคลอไรด์และไอออนซัลเฟตผสมอยู่ร่วมกัน

1.4.2 ผลการศึกษาดังกล่าวได้รับการคาดหวังให้ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ อย่างน้อยหนึ่งฉบับ อาทิใน Corrosion Science หรือ Anti-corrosion Methods and Materials

บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอชได้รับการเสนอขึ้นมารั้งแรก โดย M. Pourbaix ในปี 1938 [1] โดยเป็นการลงจุด (plot) ระหว่างศักย์ไฟฟ้าแบบผันกลับได้ (reversible potential) ของปฏิกิริยาที่อิเล็กโทรด (Electrode potential) และค่า pH ของสารละลายบนพื้นฐานของสมการของเนนส์ (Nernst's equation) [6] ในปี 1977 E.D. Verink [4] ได้เสนอวิธีสร้างแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอชโดยวิธีโพลาไรเซชันแบบวกกลับ (cyclic polarization) วิธีดังกล่าวได้นำมาใช้สร้างแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอชของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L (18 wt.% Cr, 8 Ni) ในปี 1983 [5] และเกรด 316L (18 wt.% Cr, 8 Ni, 2.0 Mo) ในปี 2001 [2,3] แผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอชโดยวิธีโพลาไรเซชันแบบวกกลับจะแสดงแดนเด่นของช่วงศักย์ไฟฟ้า ณ ค่าพีเอช ต่างๆ ที่โลหะไม่เกิดการกัดกร่อน (immunity) เกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (uniform corrosion) เกิดการสร้างฟิล์มแพสซีฟที่สมบูรณ์ (perfect passivation) เกิดการสร้างฟิล์มแพสซีฟที่ไม่สมบูรณ์ (imperfect passivation) และเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) [4]

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของฟิล์มแพสซีฟ และต่อแดนเด่นในแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอช คือ ชนิดของไอออนที่ละลายอยู่ในสารละลาย ไอออนชนิดแรกที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างรุนแรงคือไอออนคลอไรด์ [6] ไอออนดังกล่าวสามารถพบได้ในน้ำบาดาลในเขตกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียงในระดับ 5 ถึง 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร [7] ในการสร้างแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอชของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L กอบบุญ หล่อทองคำและคณะ [2,3] ได้ศึกษาอิทธิพลของไอออนคลอไรด์ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยก๊าซออกซิเจนจากอากาศ ผลการทดลองพบว่าไอออนคลอไรด์ส่งผลลดแดนเด่นของการสร้างฟิล์มแพสซีฟที่สมบูรณ์ โดยเฉพาะในกรณีที่สารละลายมีความเป็นกรดสูง ในขณะที่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อช่วงแดนเด่นของการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกันได้รับการรายงานโดย E.A. Abd El Meguid และคณะ [8] งานดังกล่าวศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในซอก (crevice corrosion) ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 254 SMO (19.7 wt% Cr, 17.9 Ni, 6.0 Mo, 0.7 Cu, 0.195 N) ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 0-4 โมลต่อลิตร ผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนในซอก (crevice corrosion potential) มีค่าต่ำลงเมื่อความเข้มข้นคลอไรด์สูงขึ้นและเมื่อสารละลายมีสภาวะความเป็นกรดมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงกลไกการกัดกร่อน K. Varka และคณะ [9] ได้รายงานว่าสัดส่วนการเกาะตัว (adsorb) ไอออนคลอไรด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายที่มีไอออนคลอไรด์ค่าต่ำ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่การเริ่มเกิด (initiation) กัดกร่อนแบบเฉพาะที่ (localised corrosion) เช่นการกัดกร่อนแบบรูเข็มสามารถเกิดได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีของไอออนอื่นที่มีสัดส่วนการเกาะตัวบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่สูงกว่า เมื่อเริ่มเกิดการกัดกร่อนแล้ว รูเข็มจะลามตัว (propagate) ไปด้วยกลไกที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่าเป็นกลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยตนเอง (autocatalytic mechanism) [10] กล่าวคือโลหะจะละลายตัวออกมาเป็นไอออนบวกในรูเข็ม ผลที่ตามมาคือไอออนคลอไรด์จะถูกดึงดูดลงมาในรูเข็มเพื่อดุลประจุไฟฟ้า โลหะคลอไรด์ในรูเข็มจะทำปฏิกิริยาแยกน้ำ (hydrolysis) ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออนในรูเข็มซึ่งจะเพิ่มค่าพีเอช

ในรูเข็มนั้น เมื่อสารละลายในรูเข็มมีความเป็นกรดสูงก็จะยิ่งเร่งการละลายโลหะและดึงคลอไรด์ลงมาในรูเข็มมากยิ่งขึ้น ผลดังกล่าวจึงทำให้เกิดการลามตัวของรูเข็มด้วยกลไกการเร่งการกัดกร่อนภายในรูเข็มนั้น

อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังที่กล่าวมาเป็นการศึกษาขั้นต้นที่พิจารณาเฉพาะผลของไอออนคลอไรด์เพียงชนิดเดียว มีรายงานว่า น้ำผิวดินหรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ยังไม่ผ่านการบำบัดมีไอออนละลายอยู่หลายชนิด เช่น ไอออนคาร์บอเนต ไอออนไบคาร์บอเนต หรือไอออนซัลเฟต [7, 11] การศึกษาพฤติกรรม การกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมภายใต้สารละลายที่มีไอออนชนิดอื่นมากกว่าคลอไรด์ชนิดเดียว จะทำให้สามารถทราบพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใกล้เคียงสภาวะการใช้งานจริงยิ่งขึ้น ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้เพื่อออกแบบป้องกันการกัดกร่อน อาทิ โดยการบังคับค่าแรงดันไฟฟ้าและ/หรือปรับค่าพีเอช ให้อยู่ในช่วงที่เหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการสร้างฟิล์มแพสซีฟได้อย่างถูกต้องมากขึ้น ข้อเสนอโครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อมุ่งขยายขอบเขตการศึกษาการสร้างแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอชของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ไปยังสารละลายที่มีไอออนคลอไรด์และไอออนซัลเฟตละลายอยู่ร่วมกัน

เป็นที่กล่าวกันโดยทั่วไปว่าไอออนซัลเฟตมีแนวโน้มเป็นสารชะลอการกัดกร่อน (corrosion inhibitor) [6] น้ำบาดาลในเขตกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียงมีไอออนซัลเฟตละลายอยู่ในช่วง 1 ถึง 300 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่บางพื้นที่ในโลกมีไอออนซัลเฟตละลายอยู่ในน้ำบาดาลสูงถึง 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร [11] นอกจากนี้ปริมาณซัลเฟตอาจสูงขึ้นในกรณีที่เป็นน้ำเสียจากโรงงาน เช่นจากโรงงานฟอกหนัง หรือโรงงานกระดาษ [11] ในปี 2005 ผู้เสนอโครงการและคณะ [12] ได้เสนอผลการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของไอออนซัลเฟตในสารละลายที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่สัมผัสกับสารละลายที่อิ่มตัวด้วยออกซิเจนจากอากาศ ผลการทดลองพบว่าไอออนซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 30 ppm ในสารละลายส่งผลเพิ่มเติมเด่นของการสร้างฟิล์มแพสซีฟที่สมบูรณ์ โดยทำให้เกิดการเลื่อนขึ้นของเส้นการกัดกร่อนแบบรูเข็มไปในทิศทางที่เป็นบวก อย่างไรก็ตามผลการวิจัยดังกล่าวเป็นผลการทดลองเชิงประจักษ์ (empirical results) ที่ต้องการการศึกษาเพิ่มเติม งานวิจัยที่ใกล้เคียงซึ่งอภิปรายถึงอิทธิพลของซัลเฟตต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายคลอไรด์และซัลเฟต ปรากฏอาทิในการศึกษาของ M.H. Moayed และ R.C. Newman [13] รายงานดังกล่าวได้ศึกษาเสถียรภาพเชิงอุณหภูมิของรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 904L (20.1 wt.% Cr, 25.0 Ni, 4.32 Mo, 1.41 Mn) ที่สัมผัสกับสารละลายคลอไรด์และซัลเฟต โดยพิจารณาจากค่าอุณหภูมิวิกฤติของการเกิดรูเข็ม (critical pitting temperature; CPT) ค่า ดังกล่าวแสดงถึงอุณหภูมิแรกที่ทำให้เกิดรูเข็มที่เสถียร (stable pit) ณ ศักย์ไฟฟ้าระดับกลาง (intermediate potential) กล่าวคือประมาณ 600 mV (Ag/AgCl) ผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติของการเกิดกัดกร่อนแบบรูเข็ม ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไอออนซัลเฟตในสารละลายสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการตกตะกอนของเกลือโลหะปกคลุมรูเข็ม นอกจากนี้ T. Laitinen [14] ได้ศึกษาการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด UNS 30403 (18.18 wt.%Cr, 8.23 Ni, 1.70 Mn, 0.40 Mo, 0.34 Cu, 0.13 Co) ในสารละลายที่มีคลอไรด์และซัลเฟตร่วมกันที่ค่าพีเอช 5 โดยวิธีโพลาริเซชัน ผลการทดลองดังกล่าวพบว่า เมื่อเติมไอออนซัลเฟตในสารละลายถึงค่า 1800 ppm ในสารละลายที่มีไอออนคลอไรด์ 300 ppm ศักย์ไฟฟ้าการ

กัฏกร่อนแบบรูเข็มจะมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 1000 mV_{SCE} นอกจากนี้ยังพบว่าการตกตะกอนของโครเมียมและทองแดงในรูเข็ม การตกตะกอนของธาตุดังกล่าวในรูเข็มอาจเป็นปัจจัยเพิ่มความต้านทานการกัฏกร่อนแบบรูเข็ม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวมิได้ให้คำอธิบายพฤติกรรมการกัฏกร่อนที่ค่าพีเอชต่าง ๆ กัน การศึกษาตามข้อเสนอโครงการนี้สามารถเพิ่มความเข้าใจในเสถียรภาพของฟิล์มแพสซีฟในช่วงพีเอชต่าง ๆ กันในแผนภาพศักย์ไฟฟ้า-พีเอช

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้

วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ส่วนผสมทางเคมีแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L (wt%)

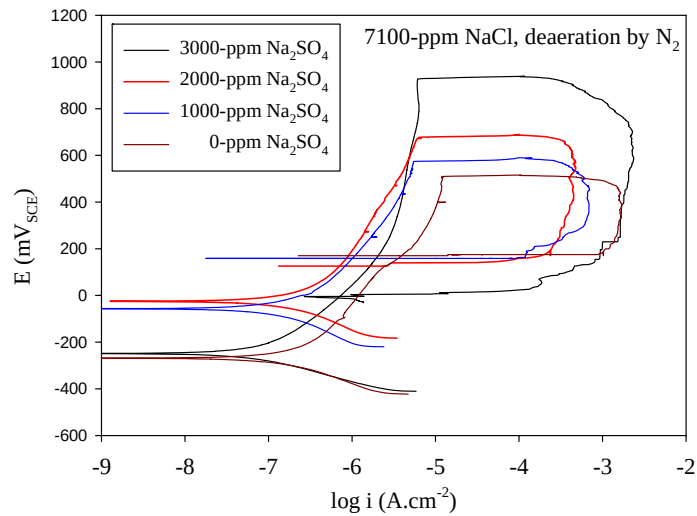
C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mo	N
0.03%	0.002%	1.62%	0.023%	11.05%	17.44%	2.09%	0.032%

ในการเตรียมชิ้นงาน ทำการตัดชิ้นงานเพื่อให้พื้นที่ผิวสัมผัสกับสารละลาย 78 mm^2 ชิ้นงานที่ตัดมาถูกนำไปขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงความละเอียดที่ 1200 กริต (grid) จากนั้น นำชิ้นงานไปทำความสะอาดในสารละลายที่ถูกสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก จากนั้น ล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วปล่อยให้แห้งในอากาศ จากนั้นนำชิ้นงานดังกล่าวไปเก็บในโถดูดความชื้น (desiccator) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการสร้างฟิล์มพาสซีฟ (passive film) ที่เสถียร

3.2 การทดลองเพื่อหาเส้นโพลาริเซชัน (polarisation curve)

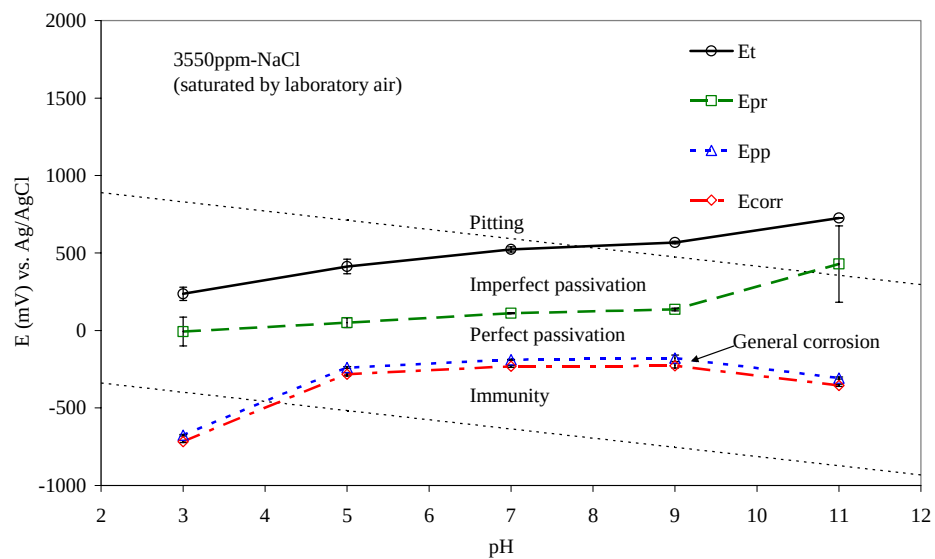
สารละลายที่ต้องการศึกษา ได้แก่ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) (0, 3550, 7100, 10650 ppm) ซึ่งผสมกับโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) (0, 1000, 2000, 3000 ppm) สารละลายดังกล่าวถูกทำให้อิ่มตัวด้วยอากาศ (aerated) หรือปราศจากอากาศ (de-aerated) ละลายอยู่ ในการทำให้สารละลายอิ่มตัวด้วยอากาศ จะพ่นอากาศลงไปในสารละลายเป็นเวลา 30 นาที ในการทำให้สารละลายปราศจากอากาศ จะทำการพ่นก๊าซไนโตรเจนลงไปในสารละลายเพื่อไล่อากาศเป็นเวลา 30 นาที ในการทดลองได้ทำการแปรค่า pH เป็น 3, 5, 7, 9 และ 11 การปรับค่า pH กระทำโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

การทดลองหาเส้นโพลาริเซชันกระทำโดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท (potentiostat) ในการต่อเซลล์ไฟฟ้าเคมี จะให้เหล็กกล้าไร้สนิมที่ต้องการศึกษาเป็นขั้วชิ้นงาน (working electrode) ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น saturated calomel electrode (SCE) และใช้ขั้วไฟฟ้าวัดกระแสเป็นลวดแพลทินัม ในการทดลองจะทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้าด้วยอัตราการสแกนค่าศักย์ไฟฟ้า 0.1 mV/s เครื่องโพเทนชิโอสแตทจะวัดผลตอบสนอง (response) เป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density) ตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 7100 ppm และมีโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่ 0, 1000, 2000, 3000 ppm ที่ค่า pH ของสารละลายเป็น 7 แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เส้นโพลาริเซชันแบบไซคลิกของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ ผสมอยู่ 7100 ppm และมีโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่ 0, 1000, 2000 และ 3000 ppm ที่ pH 7 และที่ 27 °C.

จากเส้นโพลาริเซชัน เราจะได้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential; E_{corr}) ศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มทำให้เกิดฟิล์มแพสซีฟ (primary passivation potential; E_{pp}) ศักย์ไฟฟ้าป้องกัน (protection potential; E_{pr}) และ ศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟ (transpassive potential; E_t) เมื่อนำศักย์ไฟฟ้างวดมาพล็อตในฟังก์ชันของ pH และทำการลากเส้นเชื่อมศักย์ไฟฟ้าชนิดเดียวกัน ที่ pH ต่างๆ กัน จะได้แผนภาพ E-pH ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างแผนภาพ E-pH

แผนภาพ E-pH แบ่งเด่นเด่น (predominant regime) ในแผนภาพดังต่อไปนี้

- พื้นที่ใต้เส้นศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน คือบริเวณที่โลหะไม่เกิดการกัดกร่อน (immunity area)
- พื้นที่ระหว่างเส้นศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและเส้นศักย์ไฟฟ้าของการเริ่มเกิดฟิล์มแพสซีฟ คือบริเวณที่โลหะเกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (uniform corrosion area)
 - พื้นที่ระหว่างเส้นศักย์ไฟฟ้าของการเริ่มเกิดฟิล์มแพสซีฟและเส้นศักย์ไฟฟ้าป้องกันการกัดกร่อน คือบริเวณที่โลหะเกิดการการสร้างฟิล์มแพสซีฟที่สมบูรณ์ (perfect passivation area)
 - พื้นที่ระหว่างเส้นศักย์ไฟฟ้าป้องกันการกัดกร่อนและเส้นศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม คือบริเวณที่โลหะเกิดการการสร้างฟิล์มแพสซีฟที่ไม่สมบูรณ์ (imperfect passivation area)
 - พื้นที่เหนือเส้นศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม คือบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting area)

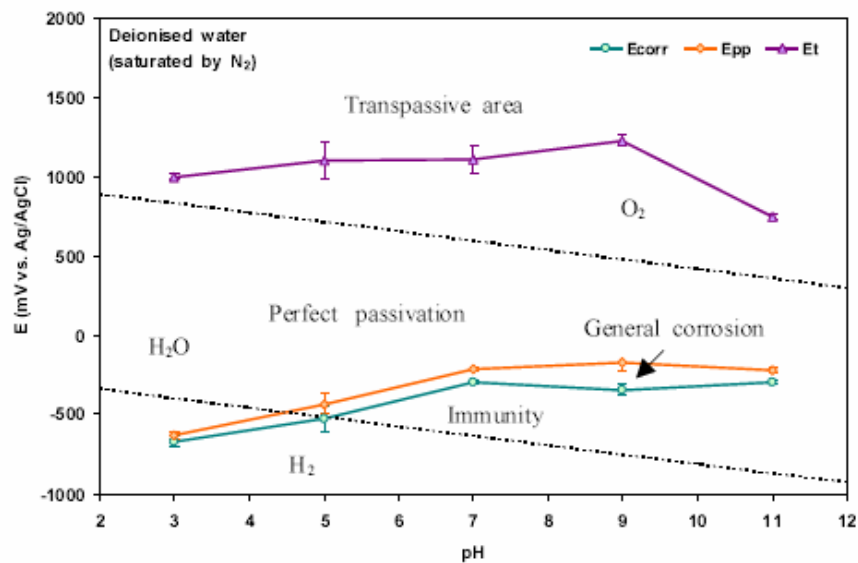
3.3. การทดสอบหาไอออนในสารละลาย

ในการทดลอง ได้ใช้วิธีโพเทนชิโอสแตติก (potentiostatic method) ในการทดลองดังกล่าว ได้จ่ายศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟ 200 mV เพื่อให้เกิดการกัดกร่อนของโลหะ (dissolution of metal) มาสู่สารละลาย จากนั้น นำสารละลายไปทดสอบหาไอออนที่ละลายอยู่โดยใช้วิธีทางเคมีที่สังเกตการเปลี่ยนสีของสารละลาย

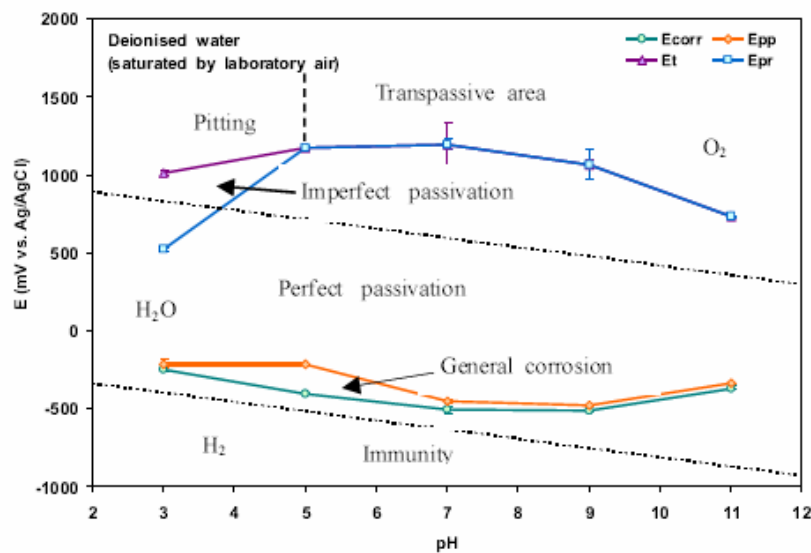
บทที่ 4

ผลการทดลอง

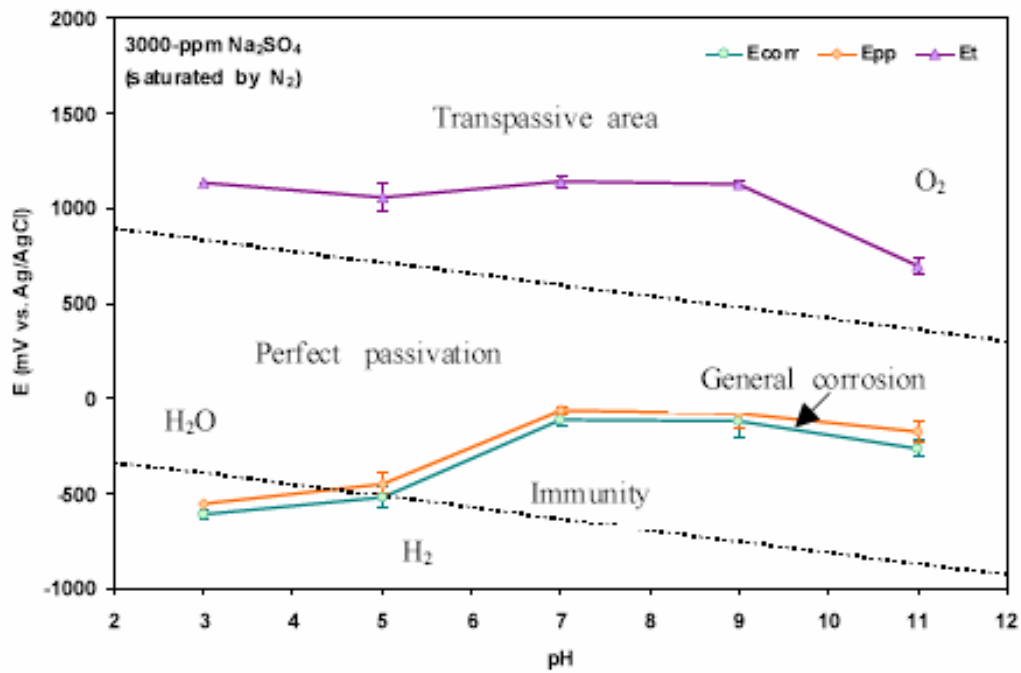
4.1 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในน้ำที่กำจัดไอออน



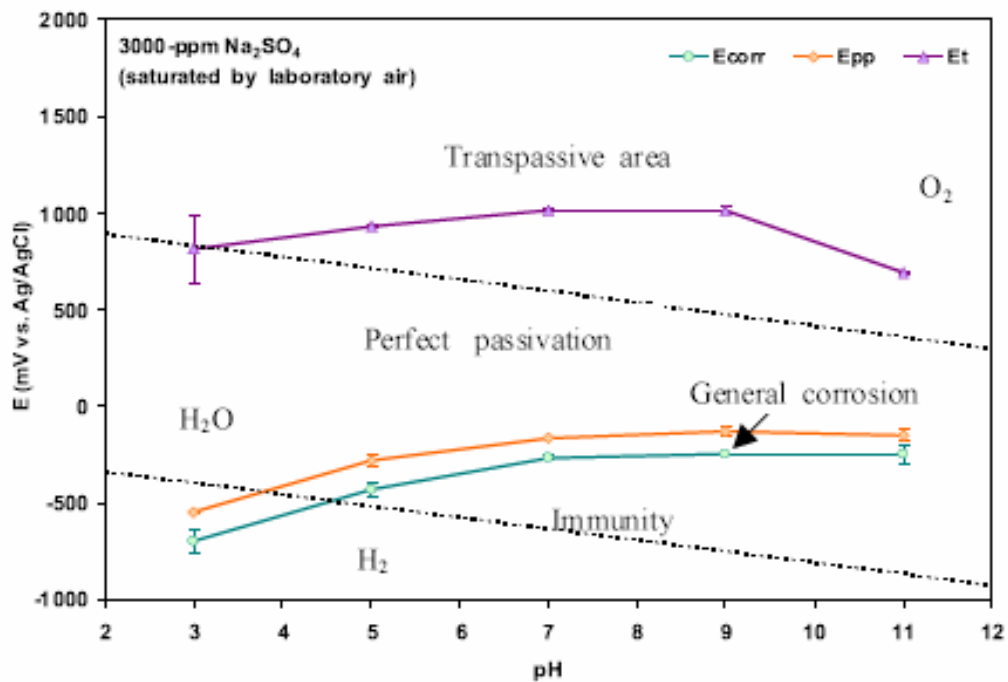
รูปที่ 4.1 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในน้ำที่กำจัดไอออนและปราศจากอากาศ



รูปที่ 4.2 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในน้ำที่กำจัดไอออนและอิมิตัวด้วยอากาศ

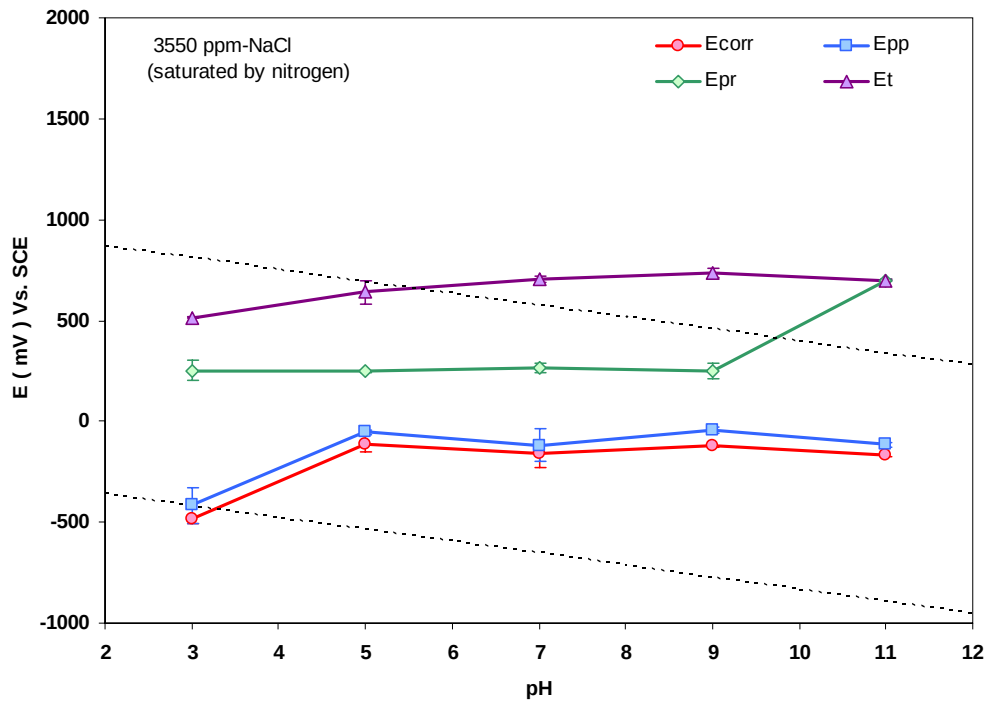


รูปที่ 4.3 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายเติมโซเดียมซัลเฟต 3000 ppm และปราศจากอากาศ

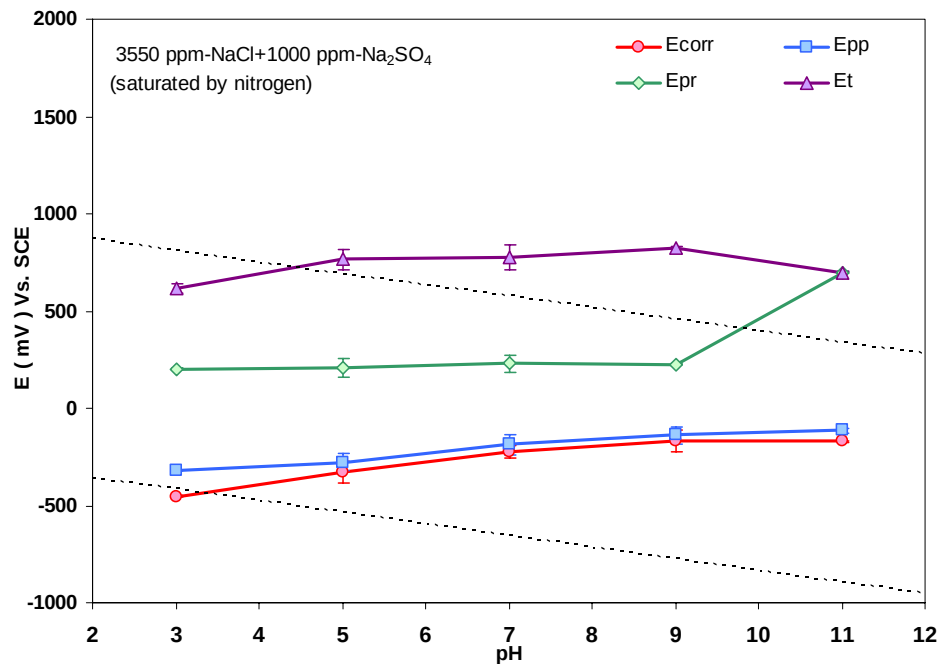


รูปที่ 4.4 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายเติมโซเดียมซัลเฟต 3000 ppm และอิ่มตัวด้วยอากาศ

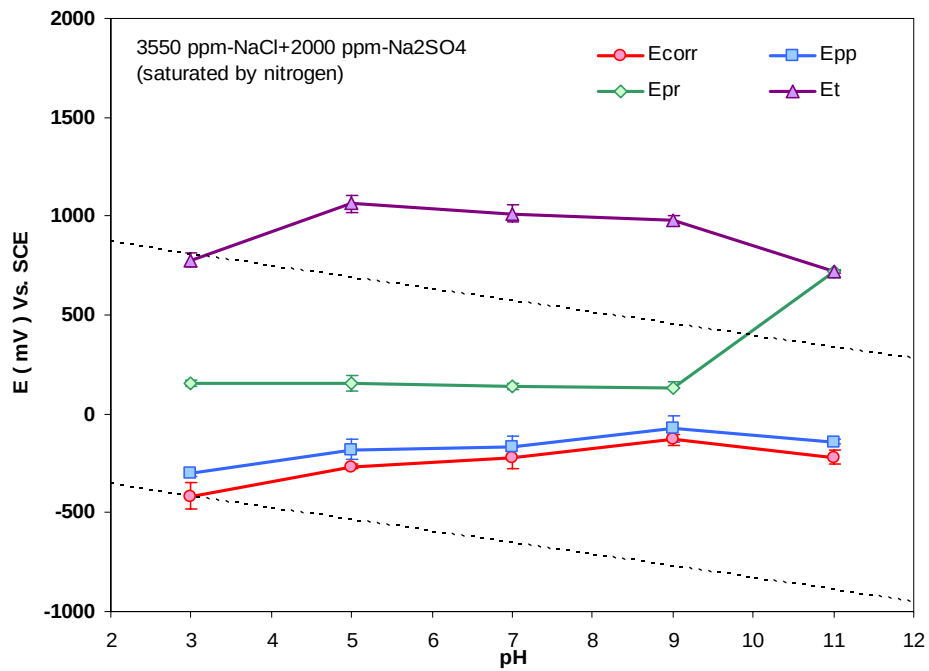
4.2 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 3550 ppm และเติมซัลเฟตในปริมาณต่าง ๆ กัน



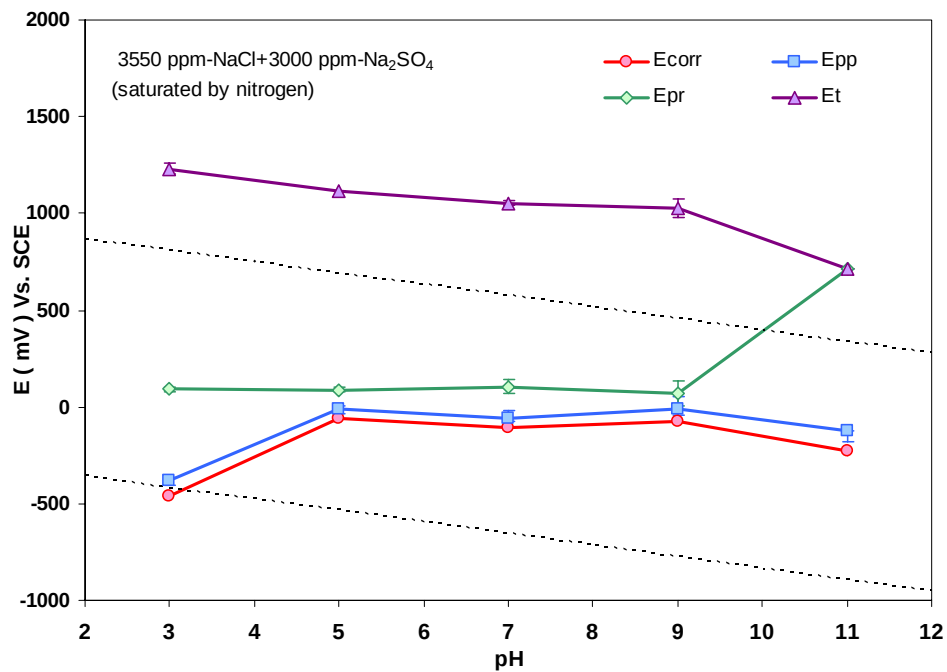
รูปที่ 4.5 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 3550 ppm



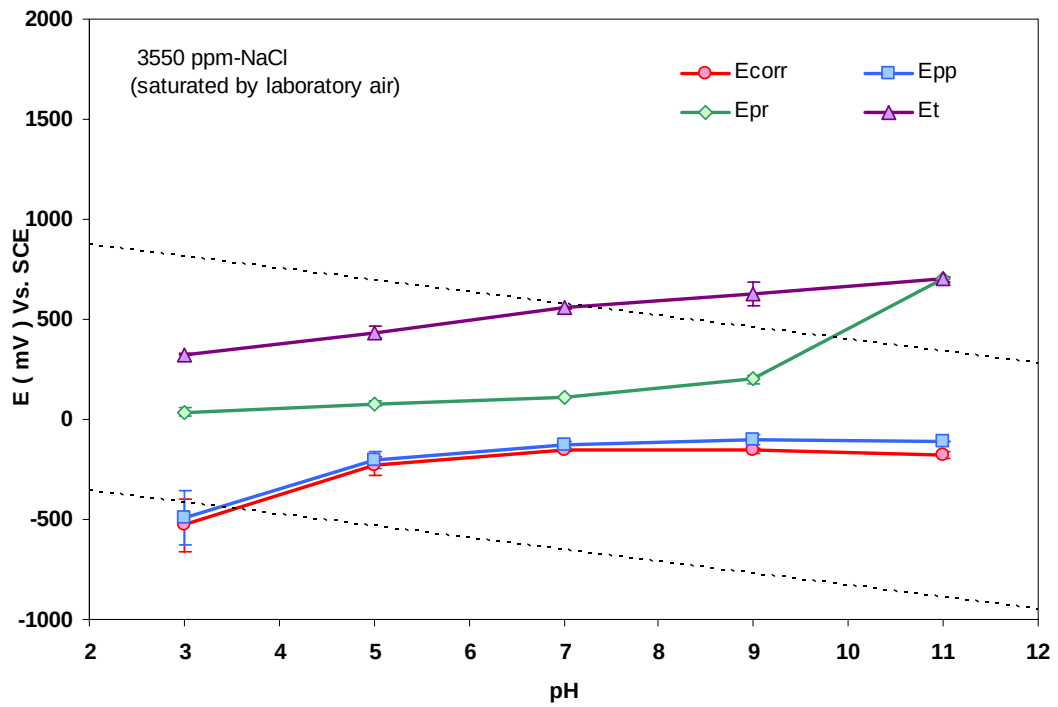
รูปที่ 4.6 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 3550 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 1000 ppm



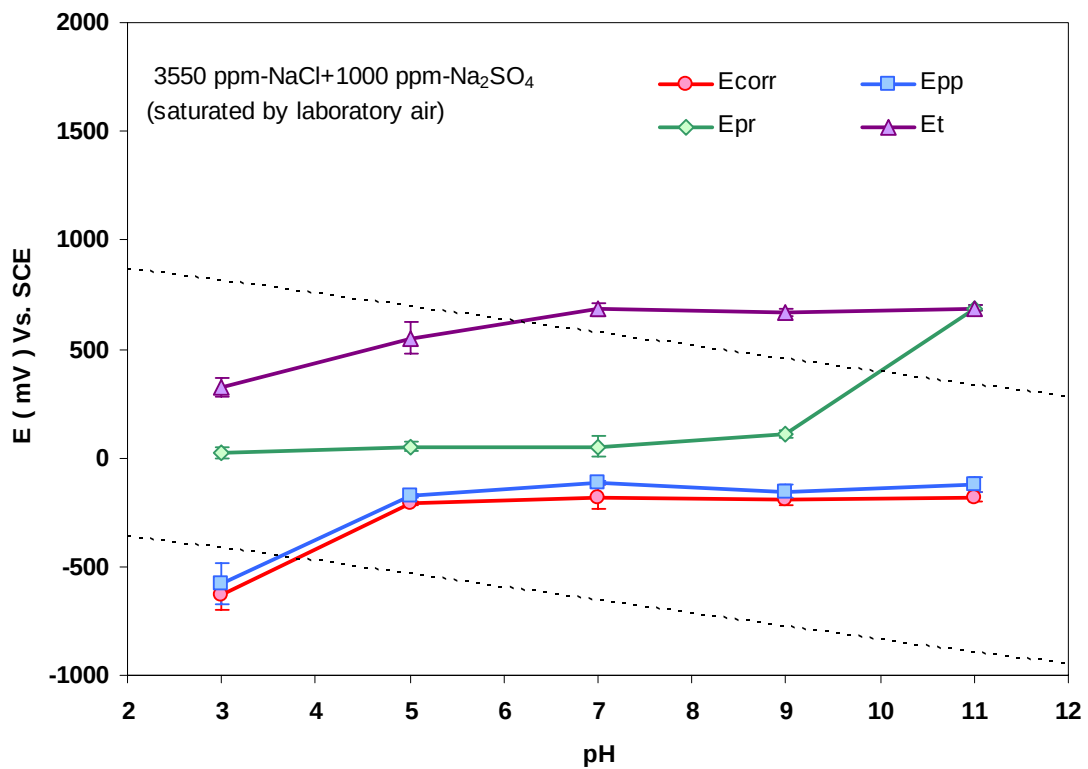
รูปที่ 4.7 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 3550 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 2000 ppm



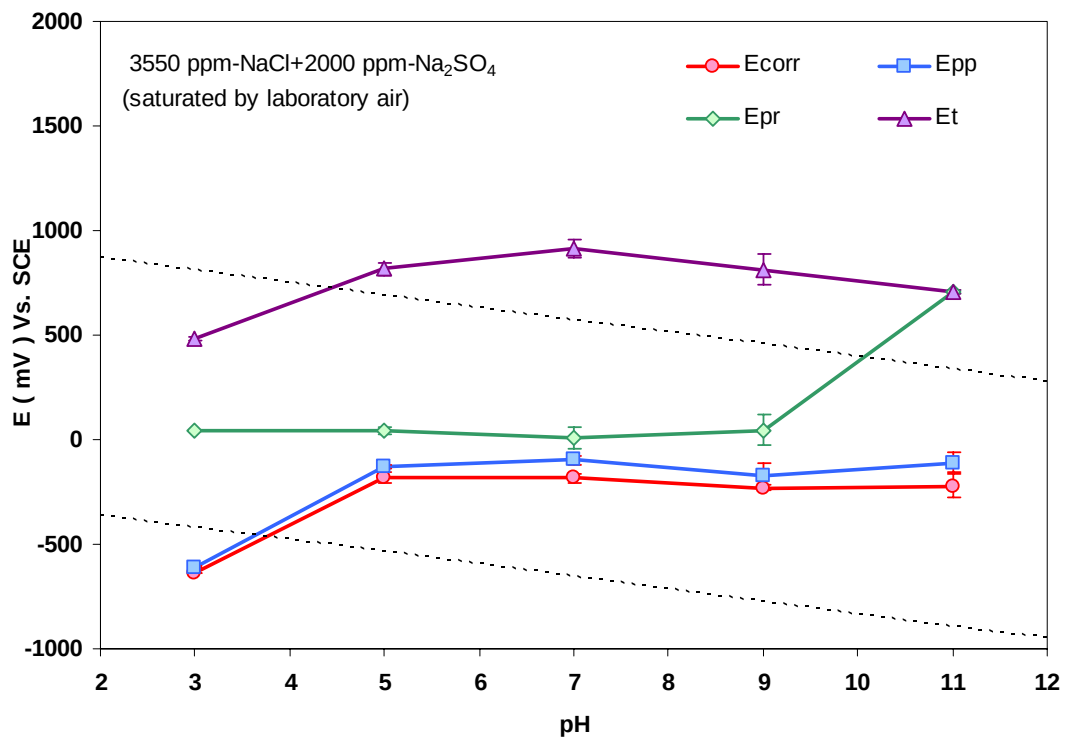
รูปที่ 4.8 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 3550 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 3000 ppm



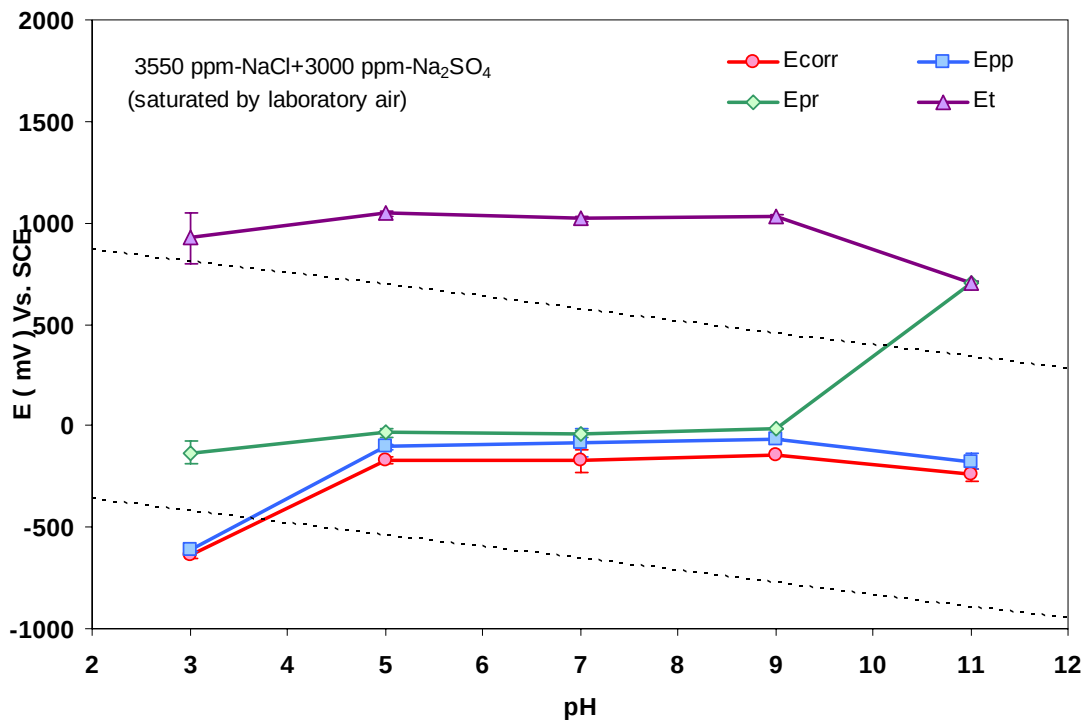
รูปที่ 4.9 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 3550 ppm



รูปที่ 4.10 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 3550 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 1000 ppm



รูปที่ 4.11 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 3550 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 2000 ppm

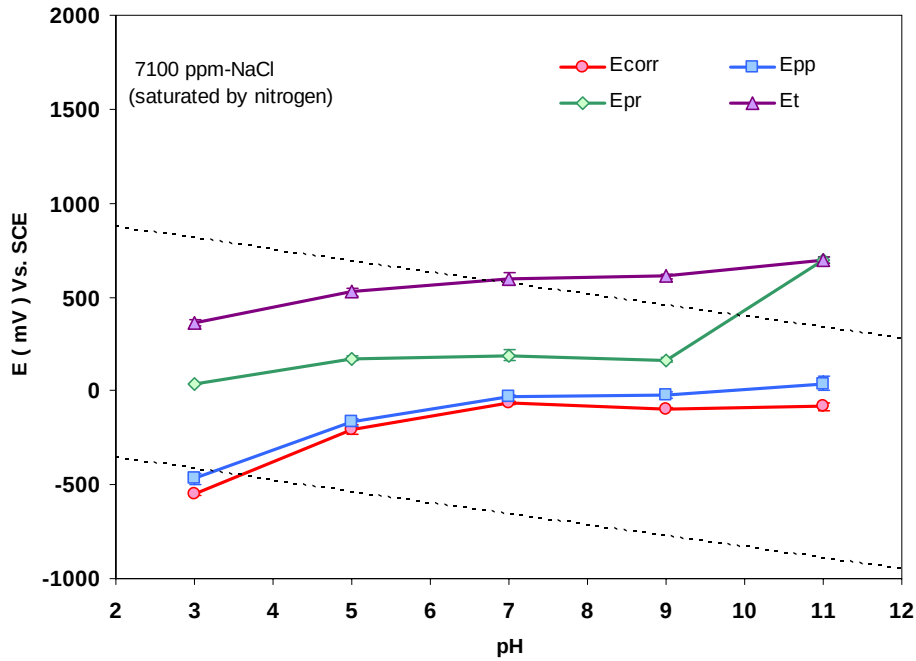


รูปที่ 4.12 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 3550 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 3000 ppm

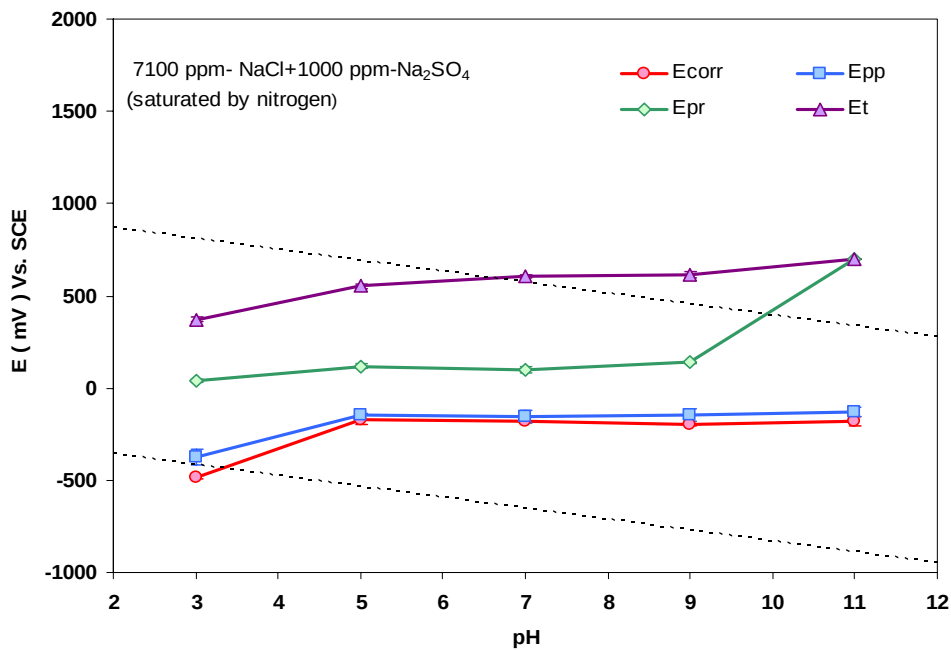
ตารางที่ 4.1 ไอออนที่ตรวจพบหลังจากจ่ายศักย์ไฟฟ้า +200 mV เทียบกับศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟในสารละลายที่มีคลอไรด์ 3550 ppm และมีซัลเฟตในปริมาณ 0 และ 3000 ppm

สารละลายผสมด้วย		สารละลายอ้อมตัวด้วย	pH	ไอออนที่ตรวจพบ
NaCl (ppm)	Na ₂ SO ₄ (ppm)			
3550	0	laboratory air	3	Fe ²⁺ Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			5	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			7	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			9	Fe ³⁺
			11	Fe ³⁺
		nitrogen	3	Fe ²⁺ Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			5	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			7	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			9	Fe ³⁺
			11	Fe ³⁺
	3000	laboratory air	3	Fe ²⁺ Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			5	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			7	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			9	Fe ³⁺
			11	Fe ³⁺
		nitrogen	3	Fe ²⁺ Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			5	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			7	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			9	Fe ³⁺
			11	Fe ³⁺

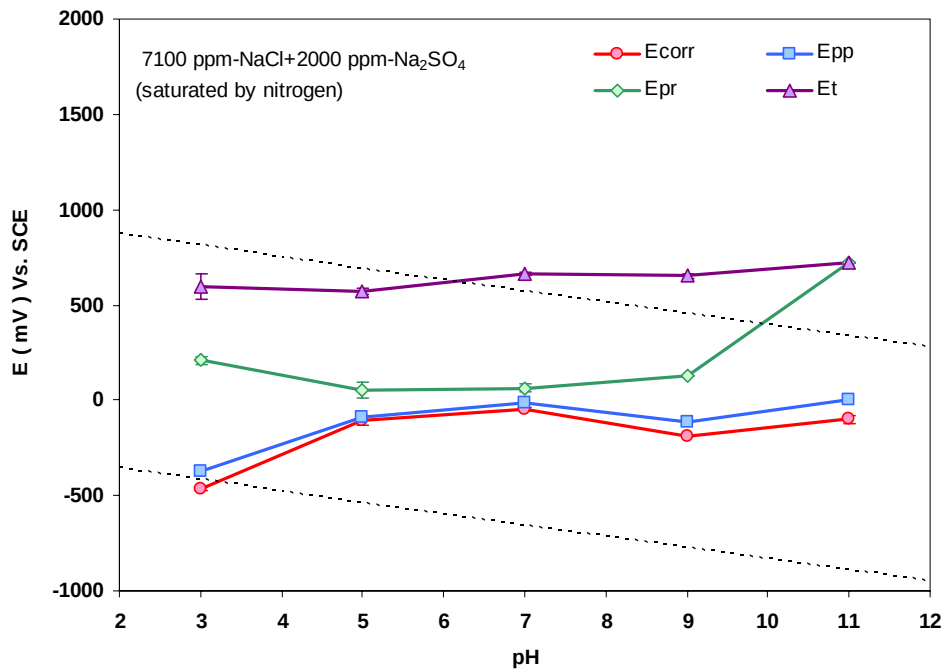
4.3 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 7100 ppm และเติมซัลเฟตในปริมาณต่าง ๆ กัน



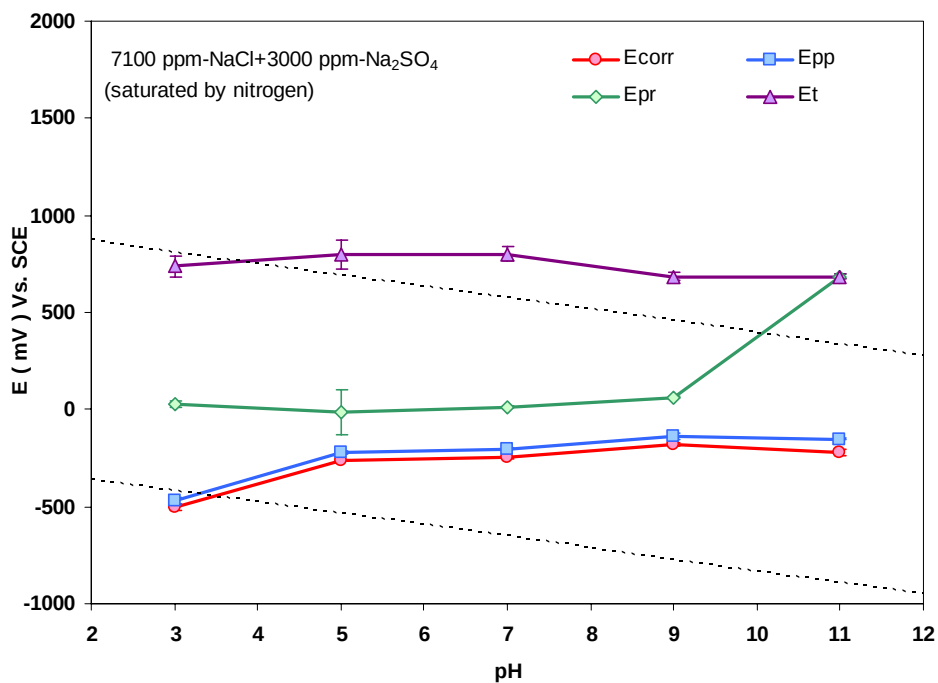
รูปที่ 4.13 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 7100 ppm และเติมซัลเฟตในปริมาณต่าง ๆ กัน



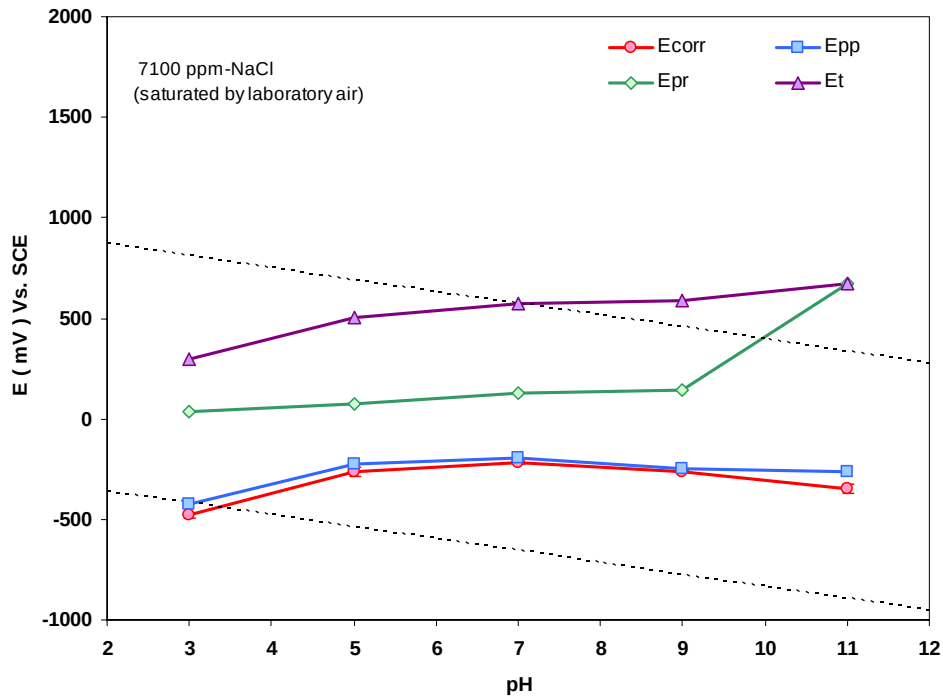
รูปที่ 4.14 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 7100 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 1000 ppm



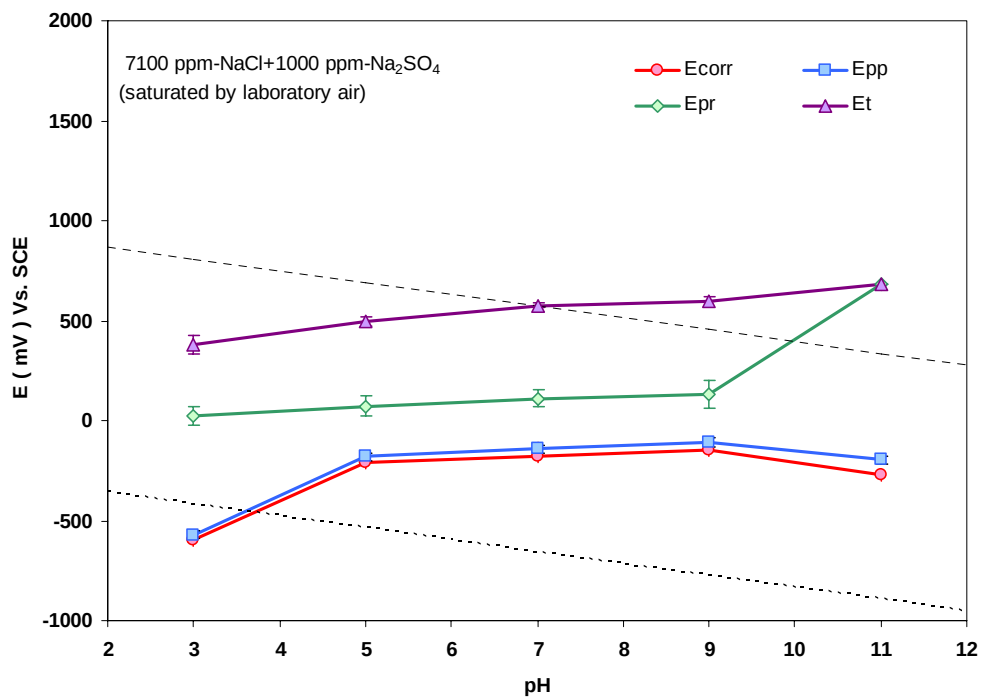
รูปที่ 4.15 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 7100 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 2000 ppm



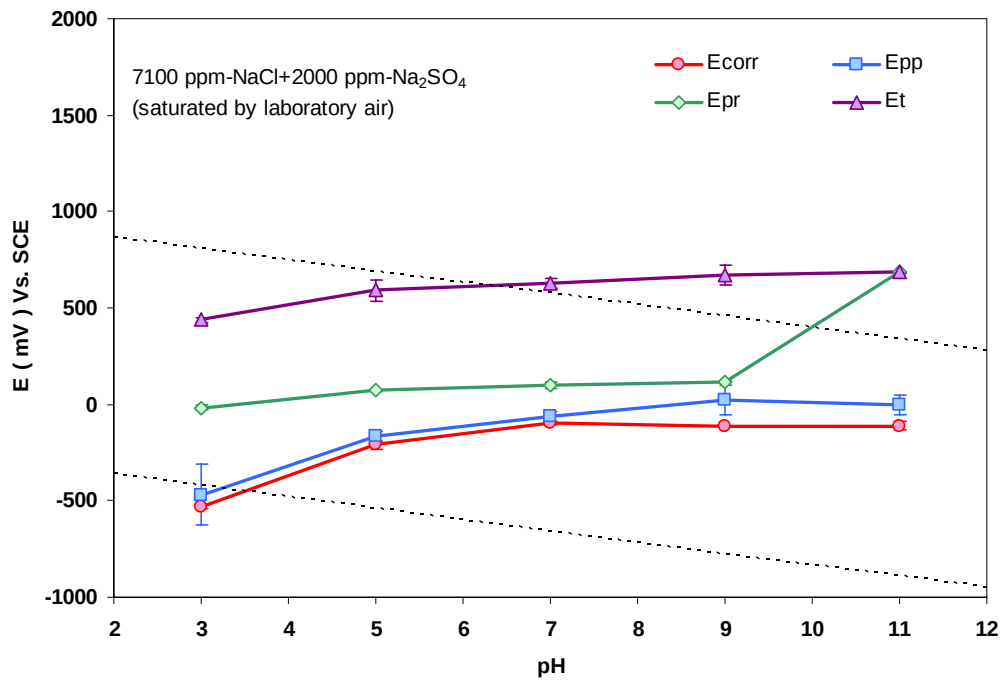
รูปที่ 4.16 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 7100 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 3000 ppm



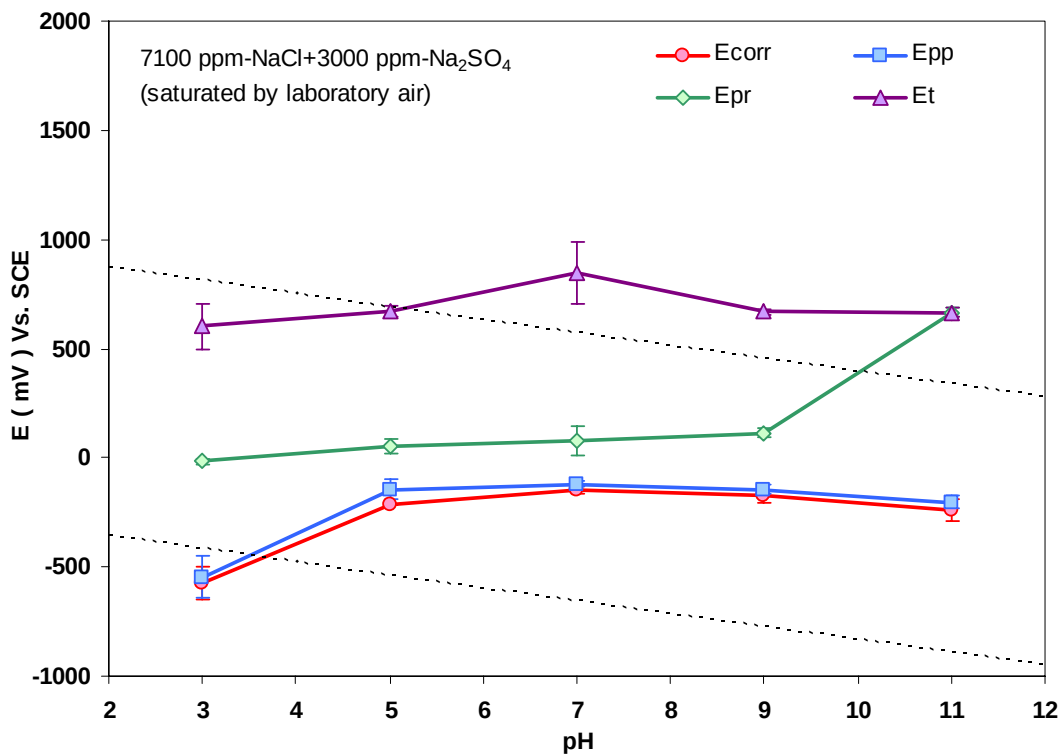
รูปที่ 4.17 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 7100 ppm



รูปที่ 4.18 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 7100 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 1000 ppm



รูปที่ 4.19 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 7100 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 2000 ppm

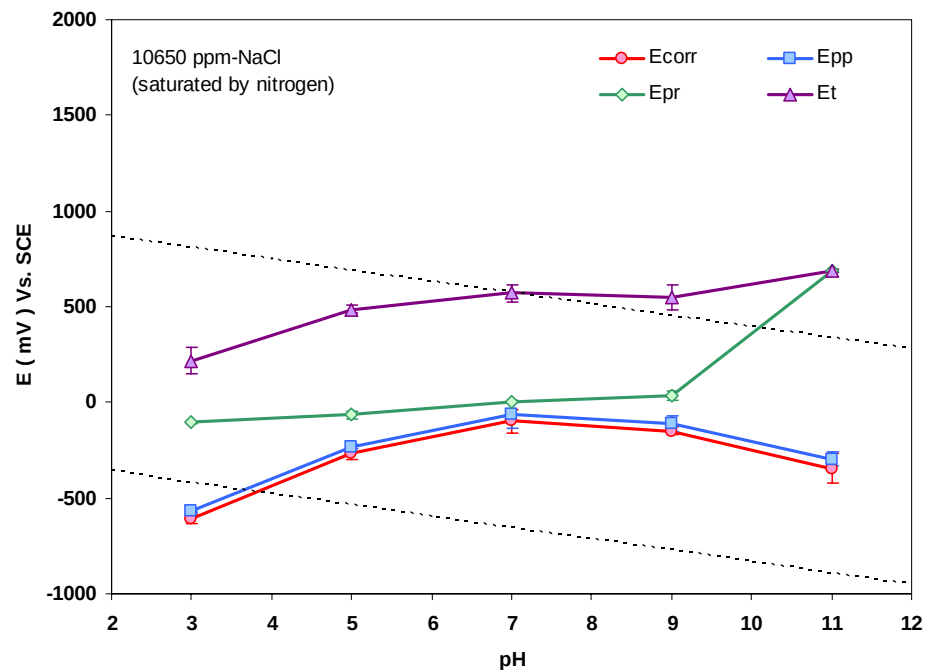


รูปที่ 4.20 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 7100 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 3000 ppm

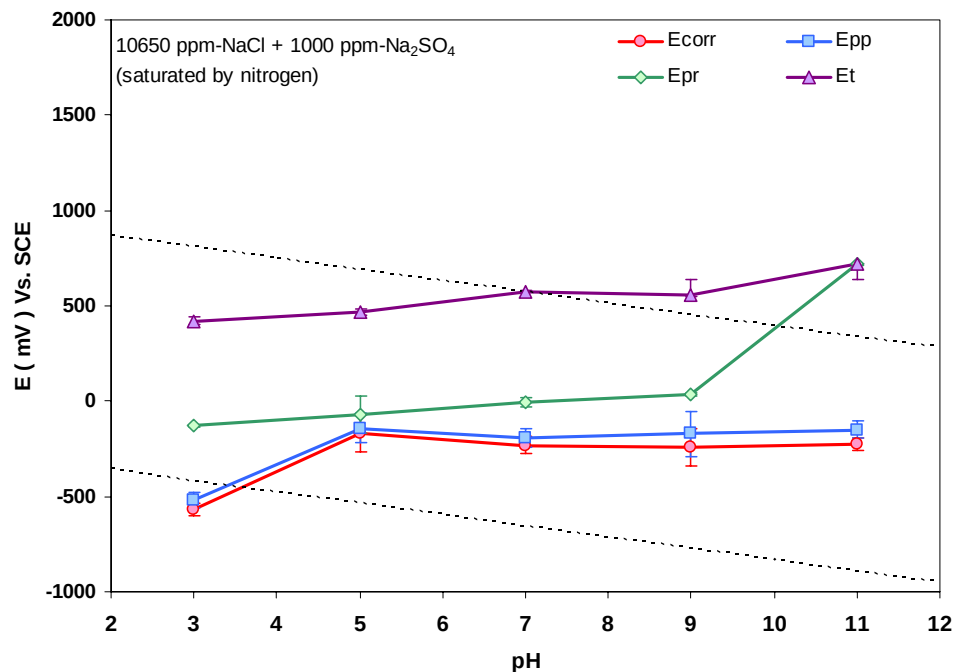
ตารางที่ 4.2 ไอออนที่ตรวจพบหลังจากจ่ายศักย์ไฟฟ้า +200 mV เทียบกับศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพลตฟใน
สารละลายที่มีคลอไรด์ 7100 ppm และมีซัลเฟตในปริมาณ 0 และ 3000 ppm

สารละลายผสมด้วย		สารละลายอ้อมตัวด้วย	pH	ไอออนที่ตรวจพบ
NaCl (ppm)	Na ₂ SO ₄ (ppm)			
7100	0	laboratory air	3	Fe ²⁺ Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			5	Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			7	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			9	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			11	Fe ³⁺
		nitrogen	3	Fe ²⁺ Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			5	Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			7	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			9	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			11	Fe ³⁺
	3000	laboratory air	3	Fe ²⁺ Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			5	Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			7	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			9	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			11	Fe ³⁺
		nitrogen	3	Fe ²⁺ Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			5	Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			7	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			9	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			11	Fe ³⁺

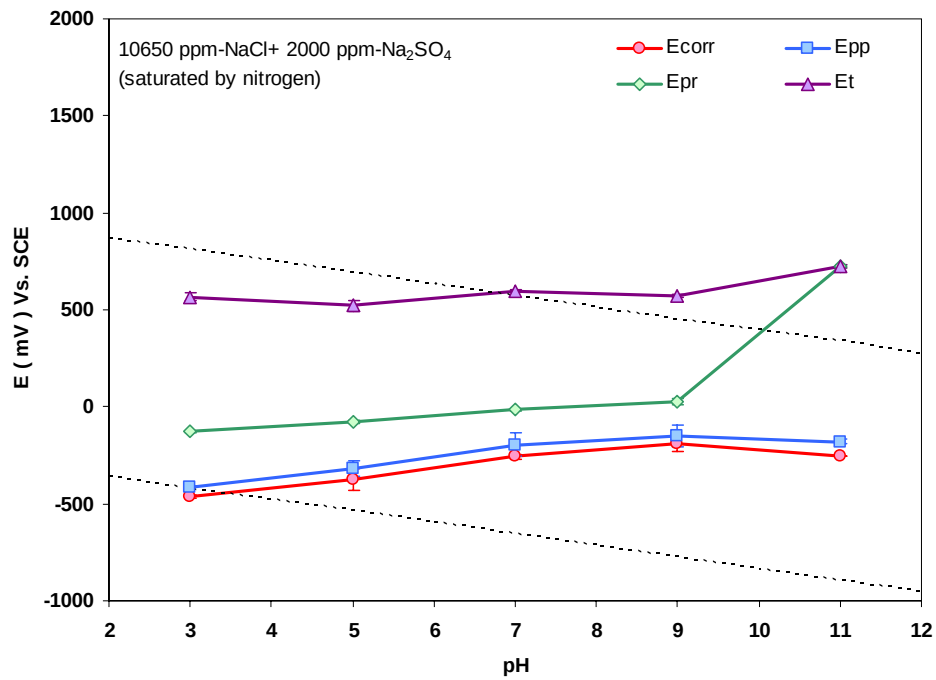
4.4 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 10650 ppm และเติมซัลเฟตในปริมาณต่าง ๆ กัน



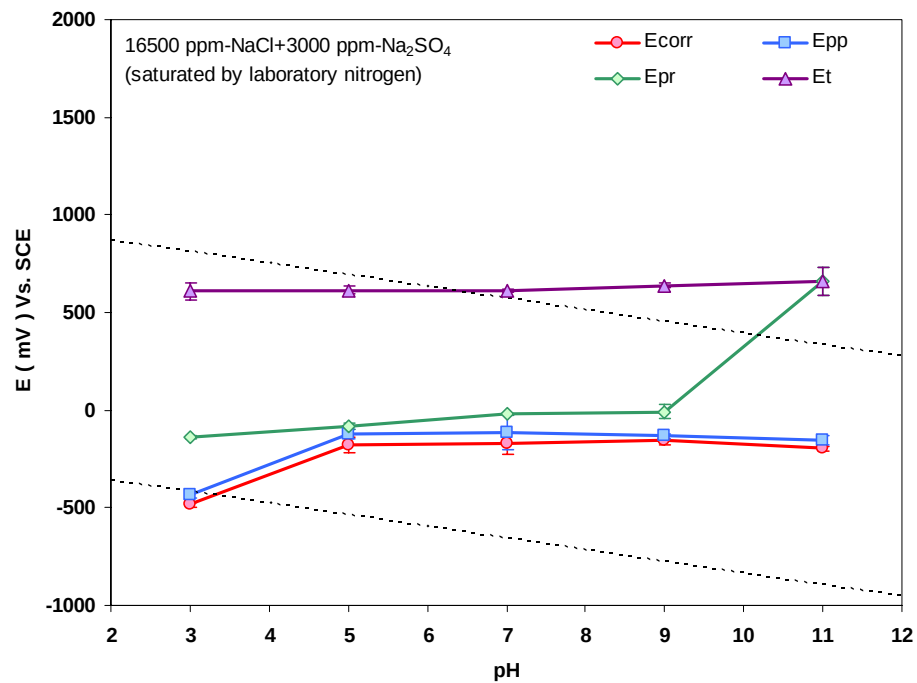
รูปที่ 4.21 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 10650 ppm



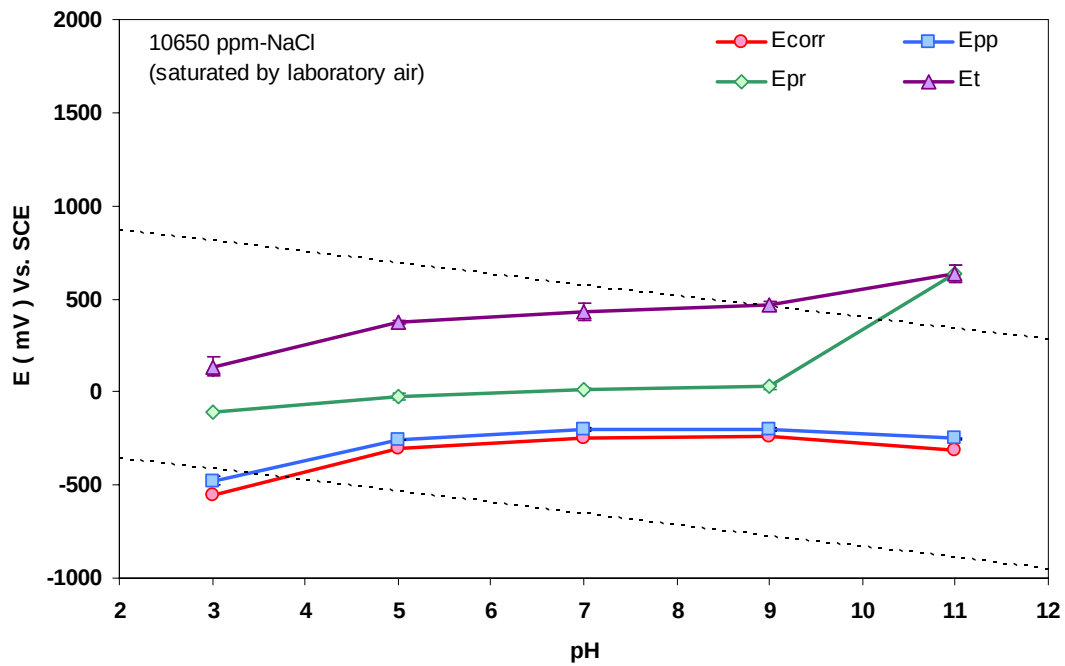
รูปที่ 4.22 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 10650 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 1000 ppm



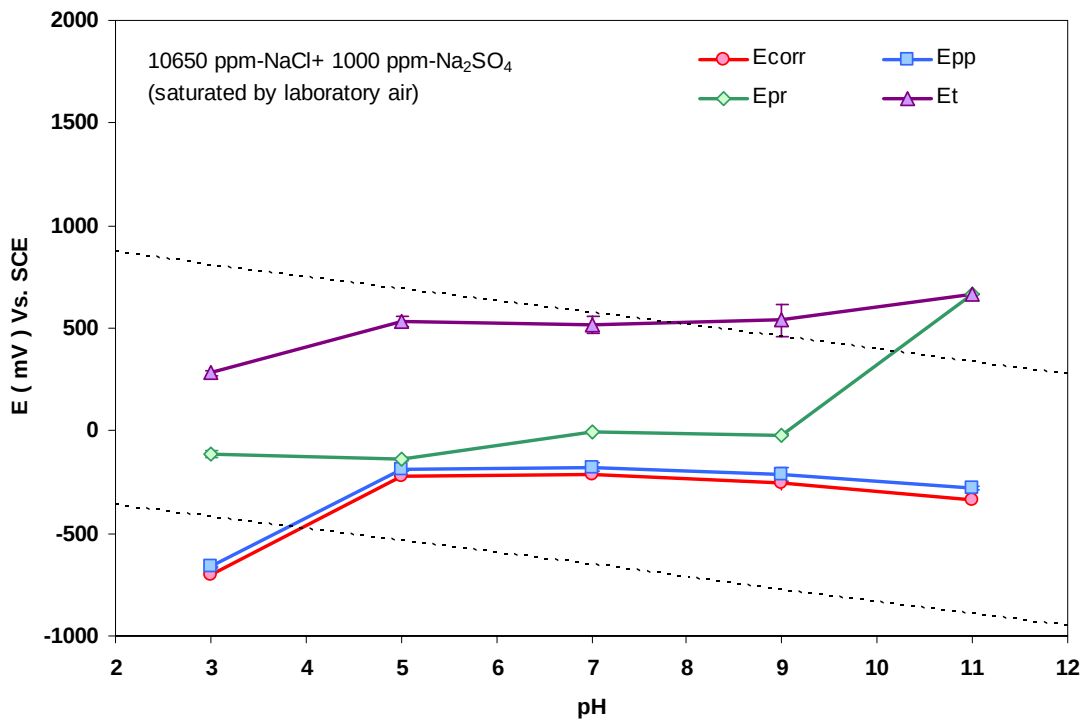
รูปที่ 4.23 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 10650 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 2000 ppm



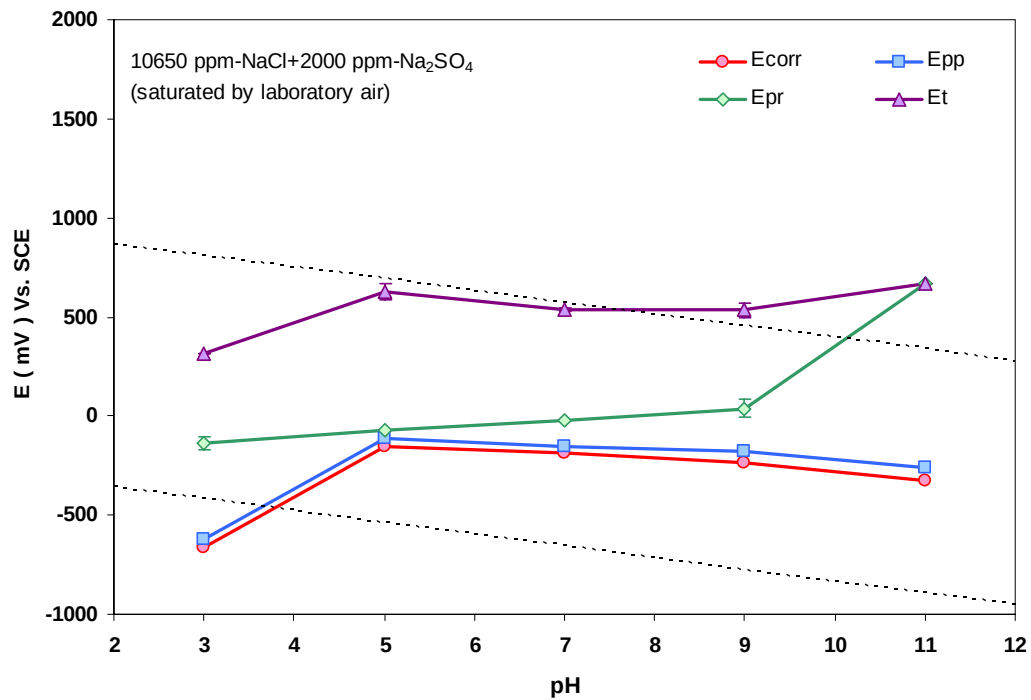
รูปที่ 4.24 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 10650 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 3000 ppm



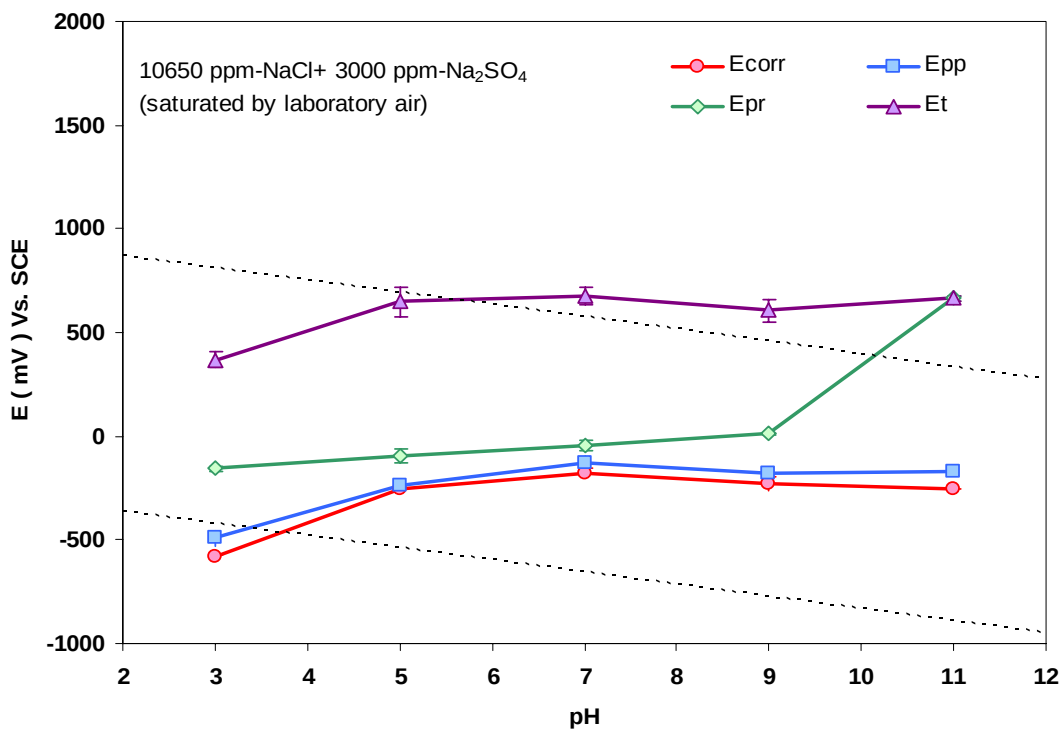
รูปที่ 4.25 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 10650 ppm



รูปที่ 4.26 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 10650 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 1000 ppm



รูปที่ 4.27 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 10650 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 2000 ppm



รูปที่ 4.28 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่เติม โซเดียมคลอไรด์ 10650 ppm และเติมโซเดียมซัลเฟต 3000 ppm

ตารางที่ 4.3 ไอออนที่ตรวจพบหลังจากจ่ายศักย์ไฟฟ้า +200 mV เทียบกับศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพลสส์ใน
สารละลายที่มีคลอไรด์ 10650 ppm และมีซัลเฟตในปริมาณ 0 และ 3000 ppm

สารละลายผสมด้วย		สารละลายอ้อมตัวด้วย	pH	ไอออนที่ตรวจพบ
NaCl (ppm)	Na ₂ SO ₄ (ppm)			
10650	0	laboratory air	3	Fe ²⁺ Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			5	Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			7	Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			9	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			11	Fe ³⁺ Ni ²⁺
		nitrogen	3	Fe ²⁺ Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			5	Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			7	Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			9	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			11	Fe ³⁺ Ni ²⁺
	3000	laboratory air	3	Fe ²⁺ Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			5	Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			7	Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			9	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			11	Fe ³⁺ Ni ²⁺
		nitrogen	3	Fe ²⁺ Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			5	Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			7	Fe ³⁺ Cr ³⁺ Ni ²⁺
			9	Fe ³⁺ Ni ²⁺
			11	Fe ³⁺ Ni ²⁺

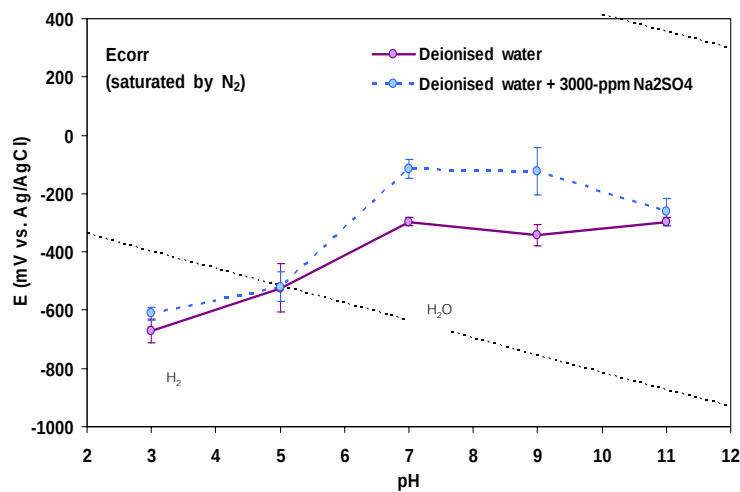
บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 อิทธิพลของซัลเฟตต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนและแผนภาพ E-pH

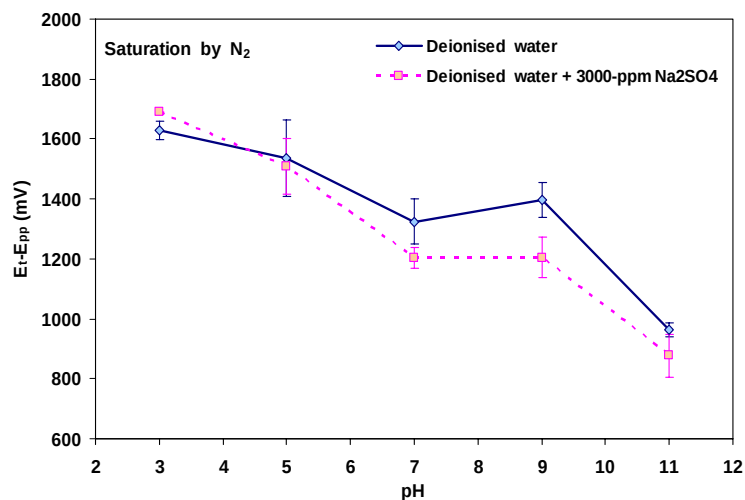
รูปที่ 4.1 - 4.4 แสดงแผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในน้ำที่กำจัดไอออนและปราศจากออกซิเจน (de-aerated deionised water) ในน้ำที่กำจัดไอออนและอิ่มตัวด้วยออกซิเจน (aerated deionised water) ในน้ำที่กำจัดไอออนและปราศจากออกซิเจนที่มีโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่ 3000 ppm และในน้ำที่กำจัดไอออนและอิ่มตัวด้วยอากาศที่มีโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่ 3000 ppm ตามลำดับ จากกราฟดังกล่าวสังเกตได้ว่า ในทุกสภาวะการทดลองไม่มีพื้นที่ของการเกิดฟิล์มพาสซีฟที่ไม่สมบูรณ์ (imperfect passivation area) ยกเว้นในแผนภาพ E-pH ของชิ้นงานที่จุ่มในน้ำที่กำจัดไอออนและอิ่มตัวด้วยออกซิเจนที่ค่า pH 3 จากรูปที่ 4.1 และ 4.4 สามารถสังเกตได้ว่า ซัลเฟตประพจน์เป็นตัวเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน ในน้ำบริสุทธิ์ที่มีออกซิเจนละลายอยู่ที่สภาวะความเป็นกรด (pH 3) โดยการเคลื่อนเส้นศักย์ไฟฟ้าป้องกันไปทับกับเส้นศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟ ผลที่เกิดขึ้นคือ พื้นที่การเกิดฟิล์มพาสซีฟที่ไม่สมบูรณ์หายไปค่า pH นี้

เพื่อที่จะสังเกตอิทธิพลของซัลเฟตโดยเฉพาะเจาะจง ในการทดลองได้กำจัดอิทธิพลของออกซิเจนออกไปโดยการทำให้อากาศละลายอิ่มตัวด้วยไนโตรเจน รูปที่ 5.1 แสดงเส้นศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่จุ่มอยู่ในน้ำที่กำจัดไอออนและปราศจากออกซิเจน น้ำที่กำจัดไอออนและปราศจากออกซิเจนที่มีโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่ 3000 ppm จากรูปดังกล่าวพบว่า ซัลเฟตประพจน์เป็นตัวเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนโดยการเคลื่อนเส้นศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนไปยังทิศทางที่เป็นบวก พฤติกรรมดังกล่าวเห็นได้ชัดเจนที่ pH 7 และ 9 ผลดังกล่าวทำให้พื้นที่ที่ไม่เกิดการกัดกร่อนกว้างขึ้น



รูปที่ 5.1 เส้นศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในน้ำที่กำจัดไอออนและปราศจากออกซิเจนที่ไม่ผสมซัลเฟตและผสมซัลเฟตในปริมาณ 3000 ppm

อิทธิพลของซัลเฟตต่อศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟและศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มทำให้เกิดฟิล์มแพสซีฟ ไม่สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดได้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟและศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มทำให้เกิดฟิล์มแพสซีฟ พบว่า การเติมซัลเฟตลงไปในสารละลายทำให้ค่าความแตกต่างดังกล่าวลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่า pH 7, 9 และ 11 ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ค่าความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้างกล่าวคือช่วงศักย์ไฟฟ้าของการเกิดฟิล์มแพสซีฟที่สมบูรณ์ นั้นหมายความว่า การเติมซัลเฟตลงไปจะทำให้ช่วงการเกิดฟิล์มแพสซีฟที่สมบูรณ์ลดลง โดยเฉพาะในสภาวะสารละลายที่เป็นกลางและเป็นเบส



รูปที่ 5.2 ค่าความแตกต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟและศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มทำให้เกิดฟิล์มแพสซีฟ ($E_t - E_{pp}$) ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในน้ำที่กำจัดไอออนและปราศจากออกซิเจนที่ไม่ผสมซัลเฟต และผสมซัลเฟตในปริมาณ 3000 ppm

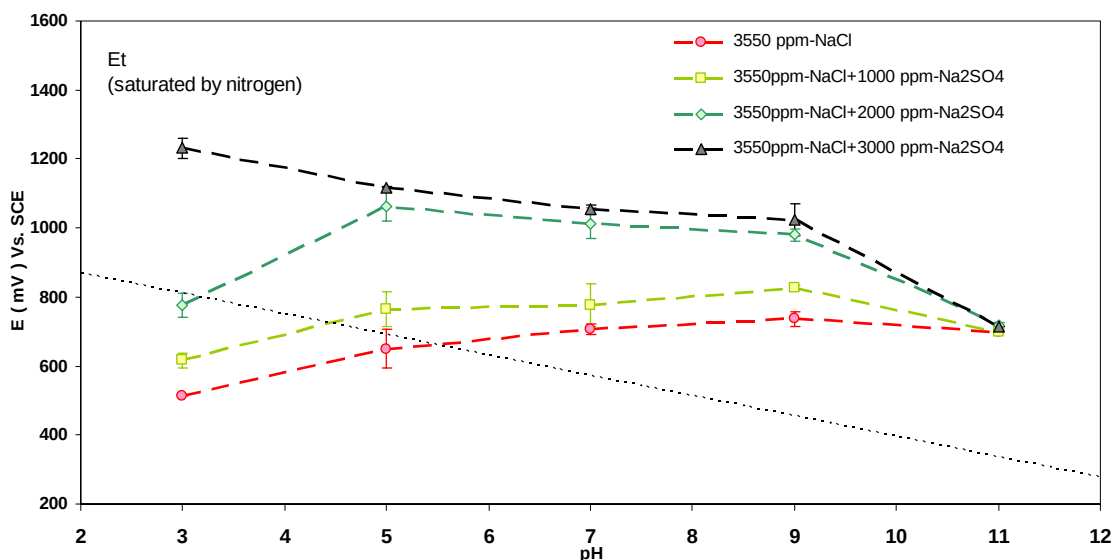
5.2 อิทธิพลของคลอไรด์ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนและแผนภาพ E-pH

รูปที่ 4.9 แสดงแผนภาพ E-pH ของชิ้นงานที่จุ่มในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศและมีไฮเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm ศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่มีไฮเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm มีค่าต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในน้ำที่กำจัดไอออนและอิ่มตัวด้วยออกซิเจน จากวรรณกรรมปริทัศน์ [3] พบว่า การเติมคลอไรด์ลงไปในปริมาณ 50 ppm ไม่ส่งผลให้เกิดพื้นที่ที่เกิดฟิล์มแพสซีฟที่ไม่สมบูรณ์ พื้นที่ดังกล่าวจะสังเกตพบที่ค่าสภาวะเป็นกรดของสารละลายเมื่อเติมไฮเดียมคลอไรด์ลงไป 500 ppm เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในที่นี้พบว่า การเติมคลอไรด์ลงไป 3550 ppm จะทำให้เกิดพื้นที่ที่ทำให้เกิดฟิล์มแพสซีฟที่ไม่สมบูรณ์ในทุกค่า pH และยังทำให้ศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟลดลงเมื่อสารละลายเป็นกรดมากขึ้น

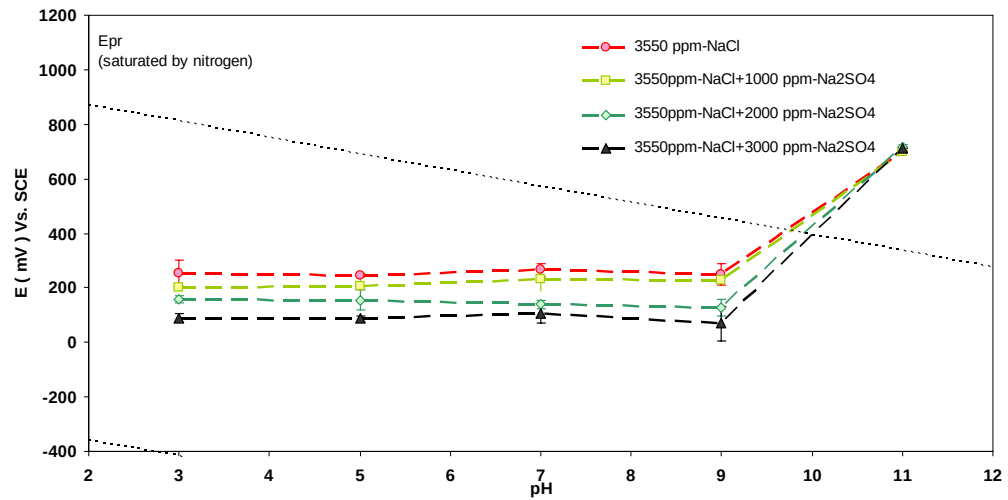
5.3 อิทธิพลของคลอไรด์ผสมกับซัลเฟตต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนและแผนภาพ E-pH

เมื่อเติมโซเดียมซัลเฟตลงไป 3000 ppm ในสารละลายที่ปราศจากอากาศและมีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm ดังแสดงในรูปที่ 5.3 จากผลการทดลองพบว่า การเติมซัลเฟตลงไป 3000 ppm ส่งผลทำให้เส้นศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟเลื่อนขึ้นในทิศทางที่เป็นบวก การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเส้นศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มเกิดฟิล์มแพสซีฟไม่สามารถสังเกตเห็นได้ การเติมโซเดียมซัลเฟต 3000 ppm ลงในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm จึงส่งผลทำให้พื้นที่ที่เกิดฟิล์มแพสซีฟทั้งหมดกว้างขึ้น อย่างไรก็ตาม การเติมโซเดียมซัลเฟตในปริมาณ 3000 ppm เลื่อนเส้นศักย์ไฟฟ้าป้องกันไปยังทิศทางที่เป็นลบที่ค่า pH ของสารละลายตั้งแต่ 3 – 9 ดังแสดงในรูปที่ 5.4 นั้นหมายความว่า การเติมซัลเฟตลงไปปริมาณดังกล่าวทำให้พื้นที่ที่เกิดฟิล์มแพสซีฟที่ไม่สมบูรณ์กว้างขึ้น

นอกจากนี้ จากรูปที่ 5.3 พบว่า การเติมโซเดียมซัลเฟต 300 ppm ลงในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm ส่งผลเลื่อนเส้นศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟไปในทิศทางที่เป็นบวกเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเติมซัลเฟตลงไปปริมาณ 2000 ppm เส้นศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟเลื่อนไปในทิศทางที่เป็นบวกอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะที่ pH 5,7 และ จากรูปที่ 5.4 ยังพบอีกว่า การเติมโซเดียมซัลเฟตลงไปปริมาณ 1000, 2000 และ 3000 ppm ในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm และอิมิตัวด้วยอากาศส่งผลเลื่อนเส้นศักย์ไฟฟ้าป้องกันไปในทิศทางที่เป็นลบที่ค่า pH จาก 3 – 9

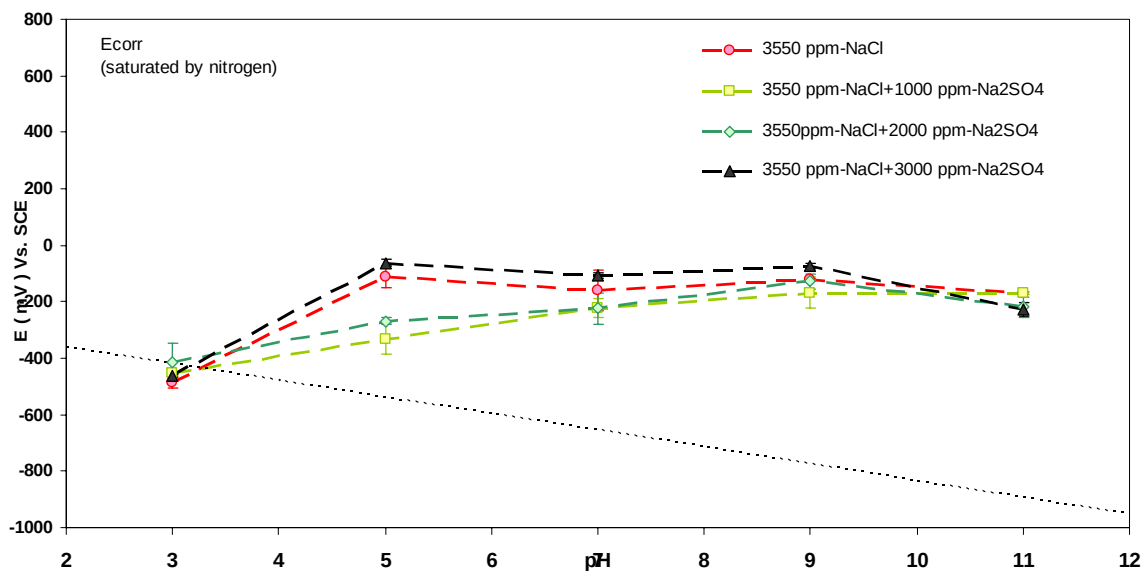


รูปที่ 5.3 เส้นศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm และมีซัลเฟตผสมอยู่ในปริมาณต่าง ๆ กัน



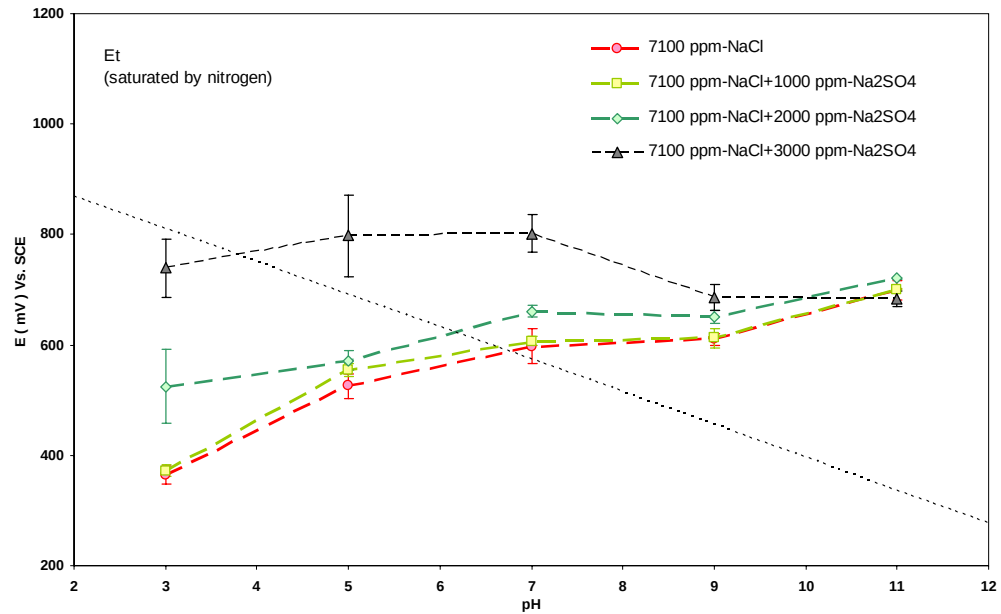
รูปที่ 5.4 เส้นศักย์ไฟฟ้าป้องกันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm และมีซัลเฟตผสมอยู่ในปริมาณต่าง ๆ กัน

รูปที่ 5.5 แสดงเส้นศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่จุ่มอยู่ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่มีโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่ จากรูปดังกล่าวพบว่า การเติมซัลเฟตลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm ไม่ส่งผลอย่างเห็นได้ชัดต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

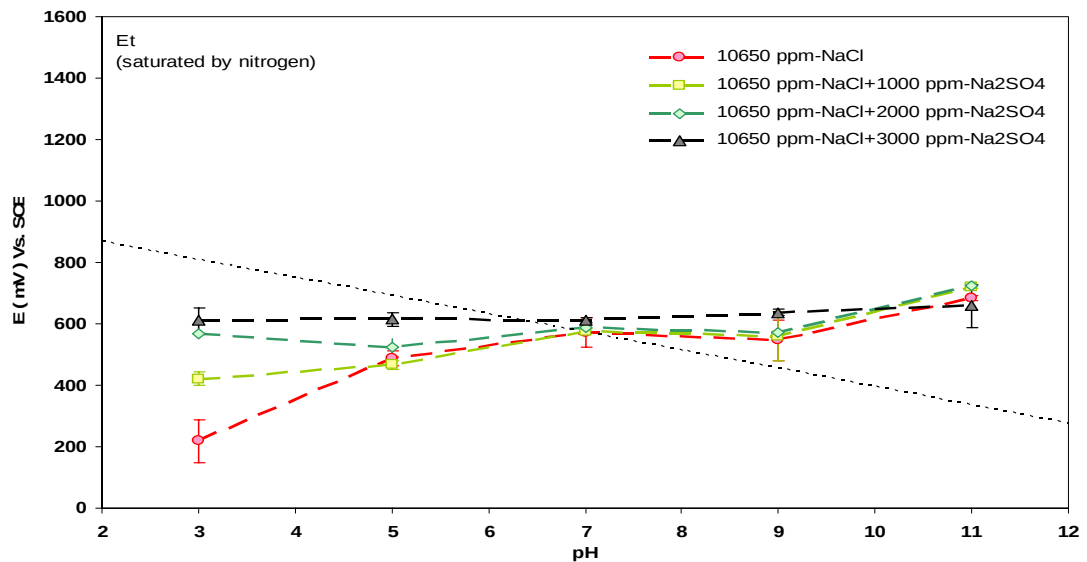


รูปที่ 5.5 เส้นศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่มีโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่และอิมิตัวด้วยอากาศ

เมื่อเพิ่มปริมาณคลอไรด์ลงไปในการละลายเป็น 7100 และ 10650 ppm ผลการทดลองยังคงพบว่า การมีซัลเฟตในการละลายส่งผลเพิ่มศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟ ดังแสดงในรูป 5.6 และ 5.7 อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าเมื่อสารละลายมีคลอไรด์มากขึ้น อิทธิพลของซัลเฟตในการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟจะลดลง

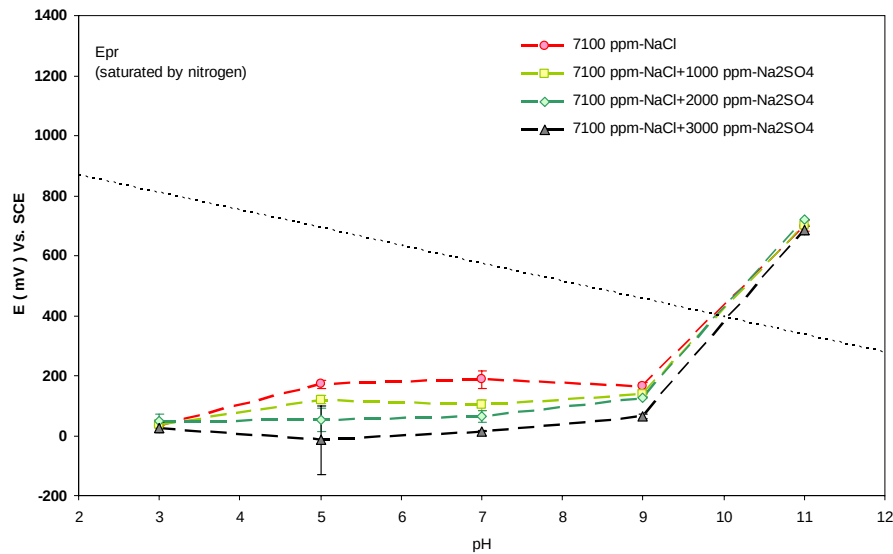


รูปที่ 5.6 เส้นศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศ ที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 7100 ppm และมีซัลเฟตผสมอยู่ในปริมาณต่าง ๆ กัน

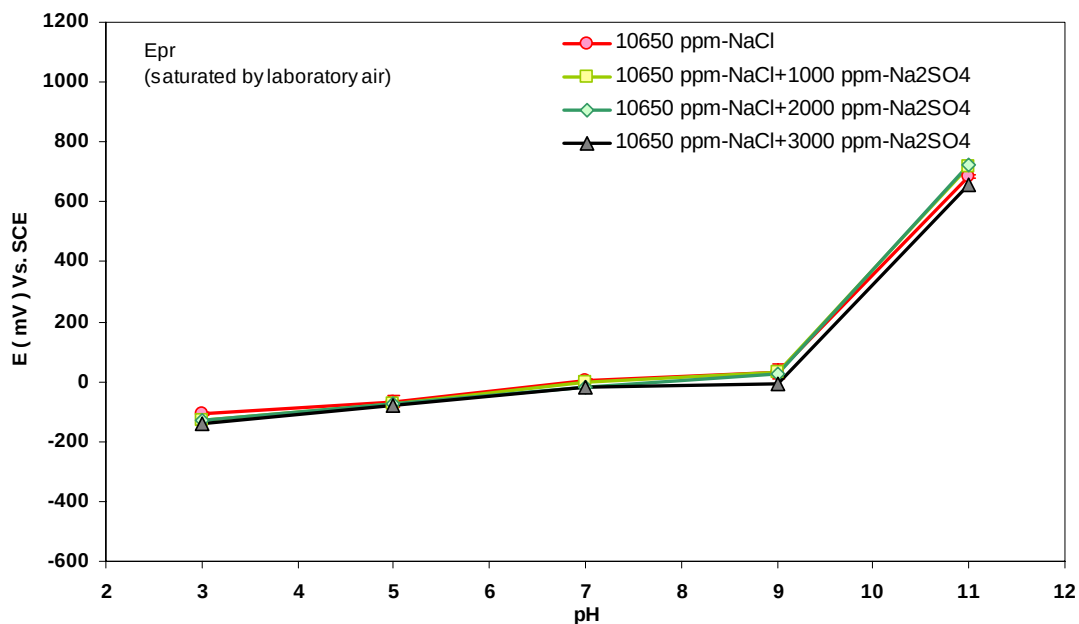


รูปที่ 5.7 เส้นศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศ ที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 10650 ppm และมีซัลเฟตผสมอยู่ในปริมาณต่าง ๆ กัน

นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มปริมาณคลอไรด์ลงไปในการละลายเป็น 7100 ppm ผลการทดลองยังคงพบว่า การมีซัลเฟตในการละลายส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าป้องกัน ดังแสดงในรูป 5.8 อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณคลอไรด์ลงไปในการละลายเป็น 10650 ppm การเติมซัลเฟตจะไม่ส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าป้องกัน ดังแสดงในรูป 5.9

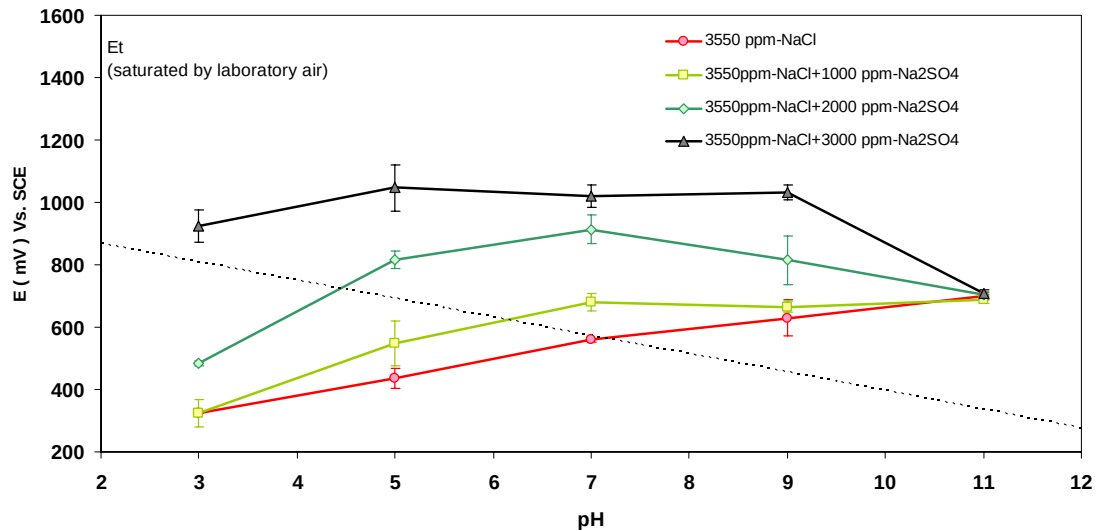


รูปที่ 5.8 เส้นศักย์ไฟฟ้าป้องกันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 7100 ppm และมีซัลเฟตผสมอยู่ในปริมาณต่าง ๆ กัน

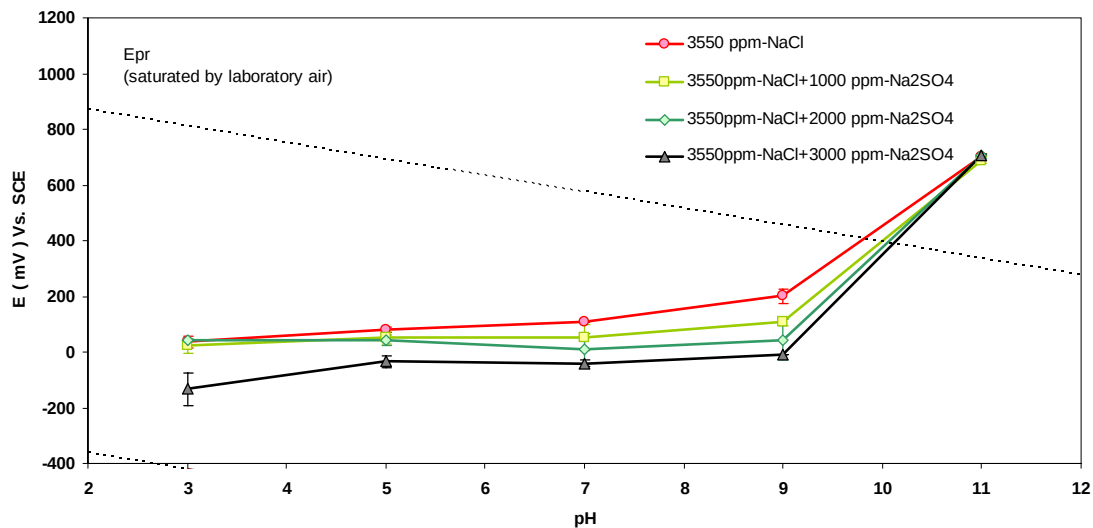


รูปที่ 5.9 เส้นศักย์ไฟฟ้าป้องกันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่ปราศจากอากาศที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 10650 ppm และมีซัลเฟตผสมอยู่ในปริมาณต่าง ๆ กัน

พฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการกัดกร่อนในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และ 5.11 กล่าวคือ เมื่อเติมโซเดียมซัลเฟตมากขึ้น ศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟมีค่าเพิ่มขึ้น และศักย์ไฟฟ้าป้องกันลดลง



รูปที่ 5.10 เส้นศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm และซัลเฟตผสมอยู่ในปริมาณต่าง ๆ กัน

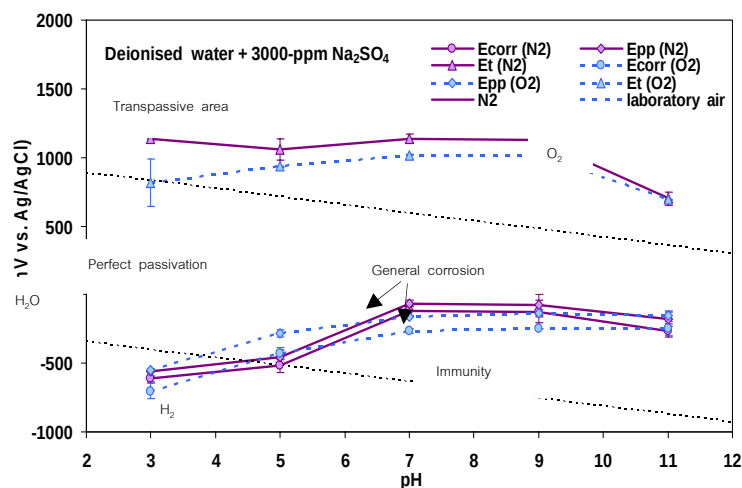


รูปที่ 5.11 เส้นศักย์ไฟฟ้าป้องกันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm และซัลเฟตผสมอยู่ในปริมาณต่าง ๆ กัน

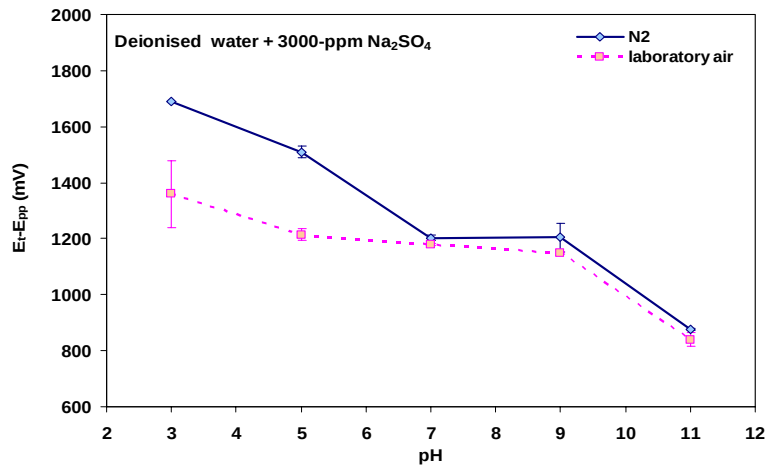
จากการวิเคราะห์ไอออนในสารละลายที่เกิดจากการจ่ายศักย์ไฟฟ้ามากกว่าศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟ 200 mV พบว่า สำหรับสารละลายที่ปราศจากออกซิเจนที่มีโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่ 7100 ppm โครเมียมละลายออกจากโลหะสู่สารละลายในรูป Cr^{3+} เฉพาะในสภาวะที่สารละลายเป็นกรด (pH 3 และ 5) นิกเกิลละลายจากโลหะสู่สารละลายในรูป Ni^{2+} ในทุกค่า pH ยกเว้นที่ pH 11 เหล็กละลายจากโลหะสู่สารละลายในรูป Fe^{3+} ที่ทุกค่า pH นอกจากนี้ ที่ pH 3 เหล็กยังสามารถละลายจากโลหะสู่สารละลายในรูป Fe^{2+} ด้วย จากการทดสอบทางเคมีดังกล่าวพบว่า ชนิดของไอออนที่ละลายในสารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 7100 ppm ซึ่งมีโซเดียมซัลเฟตละลายอยู่ 3000 ppm และไม่มีโซเดียมซัลเฟตละลายอยู่เป็นชนิดเดียวกัน

5.4 อิทธิพลของออกซิเจนในสารละลายพฤติกรรมการกัดกร่อนและแผนภาพ E-pH

รูปที่ 5.12 แสดงแผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่มีโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่ 3000 ppm ในสภาวะที่ปราศจากสารละลายปราศจากอากาศและอิ่มตัวด้วยอากาศ จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่า ในกรณีที่สารละลายมีออกซิเจนละลายอยู่ ศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟจะมีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับกรณีที่สารละลายปราศจากอากาศ การมีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลายยังส่งผลเพิ่มพื้นที่การกัดกร่อนแบบทั่วไป ทุกค่า pH ที่ศึกษา รูปที่ 5.13 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟและศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มเกิดฟิล์มแพสซีฟ ($E_t - E_{pp}$) ค่าความแตกต่างดังกล่าวคือช่วงศักย์ไฟฟ้าของการเกิดฟิล์มแพสซีฟ จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่า เมื่อมีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลาย ค่าความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าดังกล่าวจะลดลงโดยเฉพาะที่ pH 3 และ 5 นั้นหมายความว่า ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำส่งผลให้พื้นที่การเกิดฟิล์มแพสซีฟลดลง โดยเฉพาะในสภาวะที่สารละลายเป็นกรด

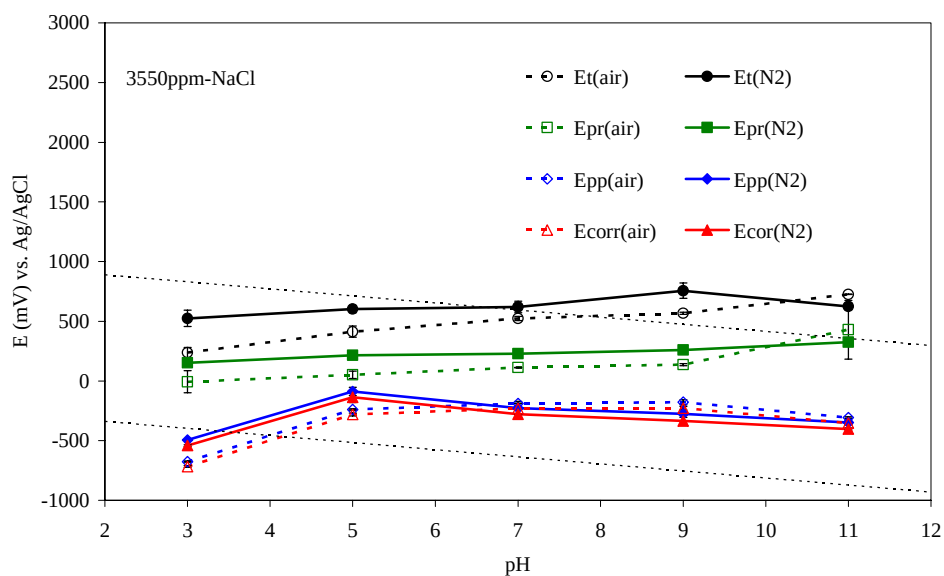


รูปที่ 5.12 ศักย์ไฟฟ้า E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่มีโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่ 3000 ppm ในสภาวะที่ปราศจากสารละลายปราศจากอากาศและอิ่มตัวด้วยอากาศ

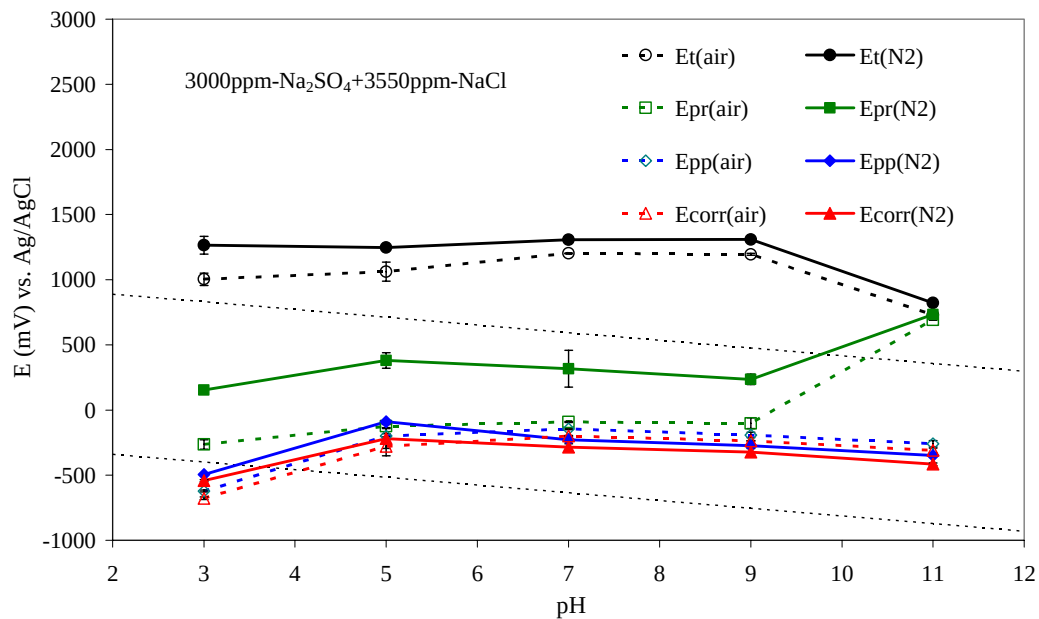


รูปที่ 5.13 ค่าความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟและศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มเกิดฟิล์มแพสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่มีโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่ 3000 ppm ในสภาวะที่ปราศจากสารละลายปราศจากอากาศและอิมิตัวด้วยอากาศ

รูปที่ 5.14 แสดงแผนภาพศักย์ไฟฟ้า E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm โดยสารละลายปราศจากอากาศและอิมิตัวด้วยอากาศ ส่วนรูปที่ 5.15 แสดงแผนภาพศักย์ไฟฟ้า E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm และมีโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่ 3000 ppm โดยสารละลายปราศจากอากาศและอิมิตัวด้วยอากาศ จากสองรูปข้างต้นพบว่า ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในอากาศส่งผลลดค่าศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟและศักย์ไฟฟ้าป้องกัน โดยสังเกตพบอย่างเด่นชัดที่ค่า pH 3 – 9 อิทธิพลของออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มเกิดฟิล์มแพสซีฟไม่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างเด่นชัด



รูปที่ 5.14 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm ที่อิมิตัวด้วยอากาศและที่ปราศจากอากาศในสารละลาย



รูปที่ 5.15 แผนภาพ E-pH ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm และมีโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่ 3000 ppm ที่อิ่มตัวด้วยอากาศและที่ปราศจากอากาศในสารละลาย

อนึ่ง ค่าศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมและไม่เติมซัลเฟต อาจเป็นผลมาจากซัลเฟตที่เติมลงไปหรือจากออกซิเจนที่ละลายอยู่ ในกรณีที่มีการทดลองได้กำจัดออกซิเจนออกจากสารละลาย ผลการทดลองพบว่า ศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟของชิ้นงานที่จุ่มอยู่ในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm และมีโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่ 3000 ppm มีค่ามากกว่าศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟของชิ้นงานที่จุ่มในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm ผลการทดลองดังกล่าวยืนยันถึงอิทธิพลของซัลเฟตที่มีต่อการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟ อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ได้กำจัดออกซิเจนออกจากสารละลาย ผลการทดลองพบว่า การเติมซัลเฟตลงไป ในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3550 ppm ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าป้องกันอย่างมีนัยสำคัญ เราอาจสรุปได้ว่า การที่ศักย์ไฟฟ้าป้องกันลดลงเนื่องจากการเติมซัลเฟตลงในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ 3550 ppm และอิ่มตัวด้วยอากาศ มิได้เกิดจากอิทธิพลของซัลเฟตเพียงอย่างเดียว ศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงอาจมาจากความสามารถในการละลายของออกซิเจนที่ลดลงในสารละลายแต่ละชนิดหรือโดยอิทธิพลร่วมกัน (synergistic effect) ของซัลเฟตและโซเดียมที่ละลายอยู่ร่วมกันในสารละลาย

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 ชลเฟตประพติตัวเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน เมื่อเติมลงในน้ำที่กำลังจัดไอออนใน 2 ลักษณะ ดังนี้

6.1.1.1 การเติมโซเดียมซัลเฟต 3000 ppm ลงในน้ำที่กำลังจัดไอออนและอิมิตด้วยอากาศที่ pH 3 เพิ่มศักย์ไฟฟ้าป้องกันให้มีค่าเดียวกันกับศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟ ผลที่เกิดขึ้นคือ ทำให้ไม่มีพื้นที่ที่เกิดฟิล์มแพสซีฟที่ไม่สมบูรณ์ในแผนภาพ E-pH ในสภาวะดังกล่าว

6.1.1.2 การเติมโซเดียมซัลเฟต 3000 ppm ลงในน้ำที่กำลังจัดไอออนและปราศจากอากาศ เลื่อนเส้นศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนไปในทิศทางที่เป็นบวกเล็กน้อย โดยเห็นได้ชัดที่ค่า pH 7 และ 9 ผลที่ตามมาคือ ทำให้พื้นที่ที่ไม่เกิดการกัดกร่อนในแผนภาพ E-pH กว้างขึ้นในสภาวะดังกล่าว

6.1.2 การเติมโซเดียมซัลเฟต 3000 ppm ในน้ำที่กำลังจัดไอออนและปราศจากอากาศ มีแนวโน้มจะทำให้พื้นที่การเกิดฟิล์มแพสซีฟแคบลง โดยเห็นได้ชัดที่ค่า pH 5 และ 11

6.1.3 การเติมซัลเฟตลงไปจนถึงปริมาณ 3000 ppm ในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ 3550 ppm ทั้งในสภาวะที่อิมิตด้วยอากาศและปราศจากอากาศ ส่งผลเพิ่มศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟอย่างมีนัยสำคัญที่ทุกค่า pH ที่ศึกษา ผลที่เกิดขึ้นคือ พื้นที่ที่เกิดฟิล์มแพสซีฟกว้างขึ้น

6.1.4 ศักย์ไฟฟ้าป้องกันลดลงเล็กน้อยเมื่อเติมโซเดียมซัลเฟตลงไปจนถึงปริมาณ 3000 ppm อย่างไรก็ตามการเติมซัลเฟตดังกล่าว ไม่ส่งผลเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าป้องกันเมื่อสารละลายปราศจากอากาศที่ค่า pH 3 – 9 ในสภาวะที่สารละลายอิมิตด้วยอากาศและปราศจากอากาศ พื้นที่ที่เกิดฟิล์มแพสซีฟที่ไม่สมบูรณ์จะกว้างขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติมโซเดียมซัลเฟต

6.1.5 การเติมโซเดียมซัลเฟต 3000 ppm ลงในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ 3550 ppm ที่อิมิตด้วยอากาศและปราศจากอากาศ ไม่ส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ทุกค่า pH นั้นหมายความว่า อัตราการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอไม่ขึ้นกับปริมาณซัลเฟตในสารละลาย

6.1.6 ในน้ำที่กำลังจัดไอออนและมีโซเดียมซัลเฟตละลายอยู่ 3000 ppm การมีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลายจะส่งผลเพิ่มการกัดกร่อนใน 3 ลักษณะดังนี้

6.1.6.1 ออกซิเจนที่ละลายมีแนวโน้มเลื่อนศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟไปในทิศทางที่เป็นลบเล็กน้อย

6.1.6.2 ออกซิเจนที่ละลายมีแนวโน้มทำให้พื้นที่ที่เกิดฟิล์มแพสซีฟแคบลง

6.1.6.3 ออกซิเจนที่ละลายมีแนวโน้มทำให้พื้นที่ที่เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วไปกว้างขึ้น

6.1.7 ในสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์ 3550 ppm และมีโซเดียมซัลเฟตผสมอยู่ 3000 ppm การมีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลายจะส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟและศักย์ไฟฟ้าป้องกัน แต่ไม่ส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

6.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยในอนาคตได้แก่การศึกษาถึงกลไกของซัลเฟตในการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟโดยอาจพิจารณารูปร่างของรูเข็ม (pit) และสารประกอบที่อยู่ในหรือบริเวณรูเข็มที่เกิดขึ้นเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าทรานส์แพสซีฟ การศึกษาดังกล่าวอาจทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

รายการอ้างอิง

- [1] M. Pourbaix, *Atlas d'equilibres electrochimiques*, Gauthier-Villars, Paris, France, 1963.
- [2] P. Vongbandit, *M.Eng. Thesis*, Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand, 2001. (in Thai)
- [3] G. Lothongkum, P. Vongbandit, and P. Nongluck, "Experimental Investigation of the E-pH Diagrams for 316L Stainless Steel by Potentiodynamic Method, *Anti-corrosion Methods and Materials*, 53, 3, 2006, pp. 169-174.
- [4] E. D. Verink, Jr., "Application of Electrochemical Techniques in the Development of Alloys for Corrosive Service", R. Baboian ed., *Electrochemical Techniques for Corrosion*, NACE, Houston, USA., 1977.
- [5] M. Hubble, R. Heiderbach and T. Rockett, *The International Corrosion Forum*, California, USA., 1983.
- [6] D. Landolt, *Corrosion et Chimie de Surfaces des Metaux*, Presses Polytechniques et Universités Romandes, Oxford, UK, 1997.
- [7] ณรงค์ วุฒเสถียร, *การปรับสภาพน้ำสำหรับอุตสาหกรรม*, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ 2540.
- [8] E.A. Abd El Meguid and A.A. Abd Latif, "Electrochemical and SEM study on Type 254 SMO stainless steel in chloride solutions", *Corrosion Science*, 46, 2004, pp.2431-2444.
- [9] K. Varga, P. Baradlai, W. O. Barnard, G. Myburg, P. Halmos and J. H. Potgieter, "Comparative study of surface properties of austenitic stainless steels in sulfuric and hydrochloric acid solutions", *Electrochimica Acta*, 42, 1, 1997, pp.25-35.
- [10] M.G. Fontana, *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill, Singapore, 1986.
- [11] มั่นสิน ตันกุลเวศม์, *วิศวกรรมการประปา เล่ม 1*, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2538.
- [12] J. Luijan, D. Testaisong, T. Tonkunya, S. Chandra-ambhorn, and T. Methanawin, "The Potential - pH Diagrams of AISI 316L Stainless Steel Immersed in the Simulated Underground Waters in Thailand Constructed by the Cyclic Polarization Method", *the Sixteenth International Corrosion Congress*, Beijing, China, September 19-24, 2005.
- [13] M.H. Moayed and R.C. Newman, "Deterioration in Critical Pitting Temperature of 904L Stainless Steel by Addition of Sulfate Ions", *Corrosion Science*, 48, 2006, pp. 3513-3530.
- [14] T. Laitinen, "Localized corrosion of stainless steels steel in chloride, sulfate and thiosulfate containing environments", *Corrosion Science*, 42, 2000, pp.421-441.

ผลลัพธ์จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติอยู่ในระหว่างการจัดทำดั่งแสดงในภาคผนวกที่ 1
2. ผลงานนำเสนอในที่ประชุมวิชาการ มีดังนี้
 - 2.1 P. Muangtong, T. Sapsapap, A. Gositanon, W. Wachirasiri, and S.Chandra-ambhorn, "Experimental Potential-pH Diagrams of AISI 316L Stainless Steel in Sulfate-containing Aqueous Solutions Constructed by Cyclic Polarisation Method: Effect of Sulfate Ion and Dissolved Oxygen", *The First International on Corrosion and Material Protection*, Prague, Czech Republic, October 1-4, 2007. (บทความนี้แสดงไว้ในภาคผนวกที่ 2)
 - 2.2 S. Chandra-ambhorn and W. Wachirasiri, "Experimental E-pH Diagrams of AISI 304 Stainless Steel in 7100-ppm NaCl Aqueous Solution Containing Sulfate by Cyclic Polarisation Method", *the Third International Conference on Processing Materials for Properties (PMP-III)*, Bangkok, Thailand, December, 7-10, 2008. (accepted). (บทความนี้แสดงไว้ในภาคผนวกที่ 3)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก:

บทความวิจัยที่จะส่งเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

Application of the Polarised Potential-pH Diagrams to Investigate the Role of Sulfate and Dissolved Oxygen in the 3550-ppm NaCl Solution on the Corrosion Behaviour of AISI 316L Stainless Steel

S.Chandra-ambhorn ^{1*}, W. Wachirasiri ², and G. Lothongkum ³

¹ Department of Materials and Production Technology Engineering, Faculty of Engineering,

² Materials and Metallurgical Engineering Program,

The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering (TGGS),

King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok (KMITNB),

Pibulsongkram Road, Bangsue, Bangkok, 10800, Thailand

³ Department of Metallurgical engineering, Faculty of Engineering,

Chulalongkorn University, Pyathai Road, Patumwan, Bangkok, 10440, Thailand

* Corresponding author, Tel: (662) 9132500, Fax: (662) 5874335, E-mail : sca@kmitnb.ac.th

Abstract. The cyclic polarisation technique was applied to determine the corrosion, primary-passivation, transpassive, and protection potential of AISI 316L stainless steels immersed in 3550-ppm NaCl solution containing sulfate in the content up to 3000 ppm. The solutions were kept constant at 27 °C and saturated by laboratory air. The solution pH was varied from 3 to 11. Each type of potentials was plotted in function of pH and linked as lines to determine the different zones in the constructed potential-pH diagram. The predominant regimes of the immunity, general corrosion, perfect passivation, imperfect passivation, and pitting corrosion were determined based on those lines of potentials. Comparing to the potential-pH diagram of specimens immersed in the aerated and deaerated 3550-ppm NaCl solutions, the addition of 3000-ppm Na₂SO₄ to these solutions increased the overall, perfect and imperfect, passivation regime by shifting the transpassive-potential line to the noble direction. However, it also widened the imperfect passivation area. The addition of Na₂SO₄ did not significantly affect the corrosion potential. It was found that the dissolved oxygen tends to negatively shift the transpassive-potential and protection-potential lines at all studied pH. The considerable effect of dissolved oxygen on corrosion and primary-passivation potentials could not be observed.

Keywords: Potential-pH diagram, AISI 316L stainless steel, and sodium sulfate

1. INTRODUCTION

The potential–pH diagram was first constructed by M. Pourbaix by using thermodynamic data based on the equilibrium of electrochemical system [1]. In the aqueous corrosion aspect, it can be applied to determine the regime of immunity, passivation and corrosion of metals at different solution pH and reversible potentials [2]. However, there are some limitations of the construction of this thermodynamic potential–pH diagram, especially when the metal is alloy and the solution is dissolved by various ions. The construction of the potential–pH diagram by potentiokinetic polarisation method has then alternatively been proposed [3]. The potential–pH diagram of AISI 304 stainless steel was constructed. [4] This technique has recently been applied to establish the potential-pH diagram of AISI 316L stainless steel in the simulated underground water by considering only the effect of chloride ion in solution. [5,6] However, the presence of various ions, such as the sulfate one, in natural water or water from factories were also reported. According to the field report [7], sulfate ions are dissolved in the underground water in Bangkok and peripheral provinces with the content of 1 up to 300 milligrams per litre. In some areas in the world, the sulfate content can be up to 3000 milligram per litre. [7] The content of sulfate can be higher in the case of waste water from the factories. Not only the effect of dissolved ions, the dissolved gases in solution especially oxygen from air also play the role on the corrosion behaviour of the alloy contacted with solution. The objectives of this work are then to investigate the role of dissolved ions, particularly the sulfate one in chloride-containing aqueous solution, and dissolved oxygen on the corrosion behaviour of stainless steels. The cyclic polarisation method is primarily performed in order to obtain data to construct the potential – pH diagram. The effect of dissolved ions and gases on the corrosion behaviour will further be discussed based on the established potential-pH diagrams.

2. EXPERIMENTAL

A material used in this experiment was an AISI 316L stainless steel. The chemical composition is given in Table 1. Specimens were cut as disk with the area contacted to solution of 78 mm². They were polished by SiC paper from 180 to 1200 grid. Then, they were ultrasonically cleaned with distilled water and kept in air for 24 hours before the potentiodynamic measurement.

Table 1: Chemical composition of type 316L specimens (wt. %)

C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mo	N
0.03%	0.002%	1.62%	0.023%	11.05%	17.44%	2.09%	0.032%

The solutions were prepared by the addition of 3550-ppm sodium chloride (NaCl), 3000-ppm sodium sulfate (Na_2SO_4), 3550-ppm NaCl mixed with 300-ppm Na_2SO_4 , 3550-ppm NaCl mixed with 3000-ppm Na_2SO_4 , to de-ionised water. Each solution was saturated by laboratory air and nitrogen to investigate the role of dissolved oxygen. The solution pH was varied as 3, 5, 7, 9, and 11, which was adjusted by hydrochloric acid and sodium hydroxide.

The cyclic potentiodynamic experiment was carried out using potentioestat model 352/252. The scan rate was 0.1 mV/sec. Reference and counter electrodes were Ag/AgCl and platinum respectively. The cyclic polarisation curves illustrating the polarized potential as a function of current density were obtained. The corrosion potential (E_{corr}), primary passivation potential (E_{pp}), protection potential (E_{pr}), and transpassive potential (E_t) were further determined by methods previously described elsewhere. [5,6] Each type of potentials was plotted in function of pH and linked as lines to determine the different zones in the constructed potential–pH diagram. The predominant regimes of immunity corresponds to the area under the corrosion-potential line. The regime of general corrosion is bounded by the corrosion-potential and primary-passivation-potential lines. The perfect passivation regime is bounded by the primary-passivation-potential and protection-potential lines. The imperfect passivation regime is bounded by the protection-potential and transpassive-potential lines. The transpassive regime, or pitting one in the case that chloride ion is contained in solution, corresponds to the area upper the transpassive-potential line.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Effect of chloride and sulfate

Figure 1 presents the potential-pH diagram of specimen immersed in 3550-ppm NaCl solution. The transpassive-potential line of AISI 316L stainless steels immersed in aerated 3550-ppm NaCl solution obtained in the present work is lower than that of specimens immersed in aerated de-ionised water reported in literature [6]. Furthermore, it was reported [6] that the imperfect passivation area did not exist in the potential–pH diagram of specimens contacted to aerated de-ionised water. This area still did not exist when the slight content, 50 ppm, of NaCl was added to aerated de-ionised water. The imperfect passivation area was observed only at low solution pH when 500 ppm of NaCl was added to aerated de-ionised water. In the present work, NaCl was added to aerated de-ionised water up to 3550 ppm. It was found that the imperfect passivation area existed at all studied – low, neutral and high – solution pH. The decrease of transpassive potential with the decreased solution pH was also observed.

When the 3000-ppm Na_2SO_4 was added to aerated 3550-ppm NaCl solution, the predominant areas in the potential-pH diagram were transformed as shown in Figure 2. It was primarily observed that the addition of 3000-ppm Na_2SO_4 to aerated 3550-ppm NaCl solution significantly leveled the transpassive-potential line up to the noble direction. The shift of primary-passivation-potential line could not be considerably observed. The addition of 3000-ppm Na_2SO_4 to 3550-ppm NaCl solution then gave rise to the widening of the overall, perfect and imperfect, passivation regime due to the noble shift of the transpassive-potential line. However, the addition of 3000-ppm Na_2SO_4 slightly shifted the protection-potential line to the negative direction at the solution pH of 3 to 9. Then the significantly positive shift of the transpassive-potential line and the slightly negative shift of the protection-potential line due to the addition of 3000-ppm Na_2SO_4 to aerated 3550-ppm NaCl solution widened the imperfect passivation regime.

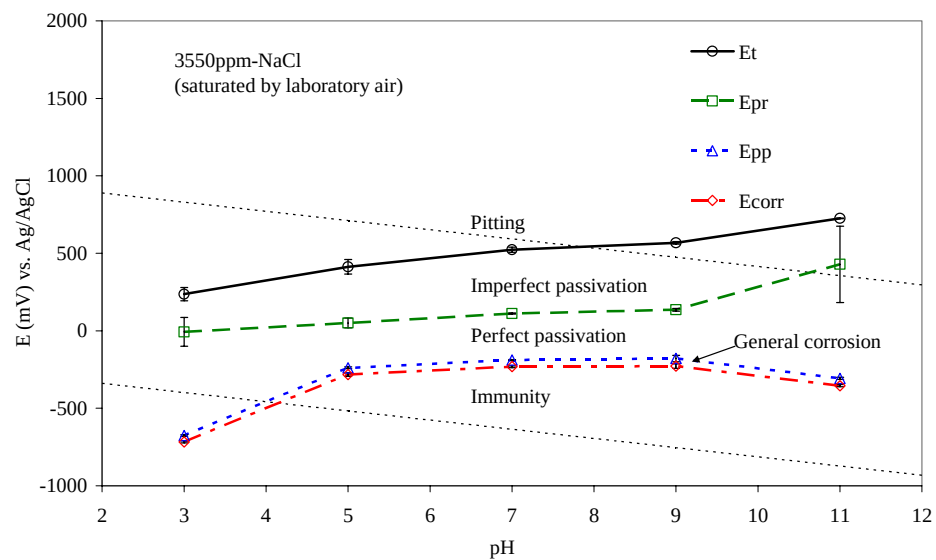


Figure 1: Potential-pH diagram of AISI 316L stainless steel in 3550-ppm NaCl solution saturated by laboratory air

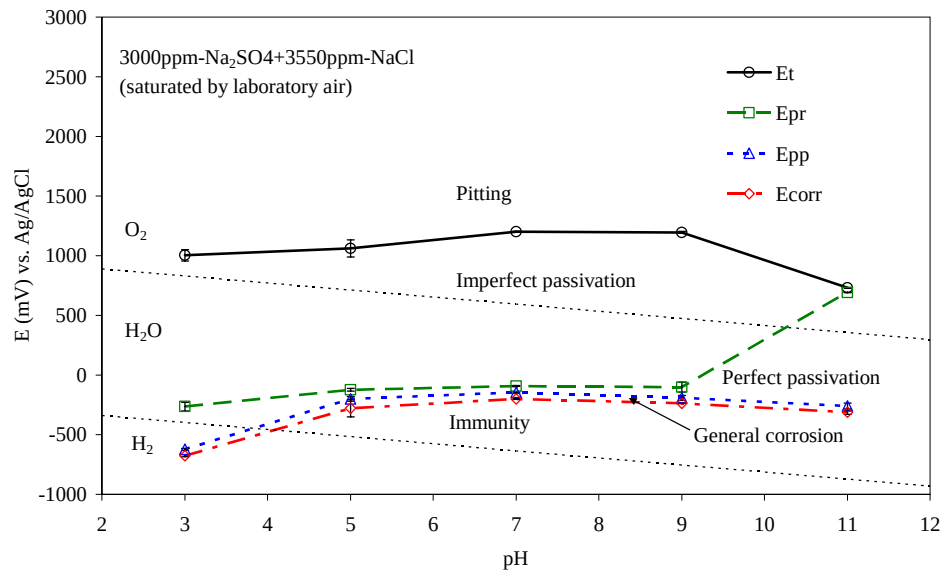


Figure 2: Potential-pH diagram of AISI 316L stainless steel in 3550ppm NaCl solution mixed with 3000ppm Na₂SO₄ saturated by laboratory air

To investigate the role of sulfate in more detail, the polarisation curves of specimens immersed in 3550ppm NaCl, 3550ppm NaCl mixed with 300ppm Na₂SO₄, 3550ppm NaCl mixed with 3000ppm Na₂SO₄, and 3000ppm Na₂SO₄ solutions saturated by laboratory air were investigated at all studied pH. The transpassive potentials extracted from these curves are shown in Figure 3.

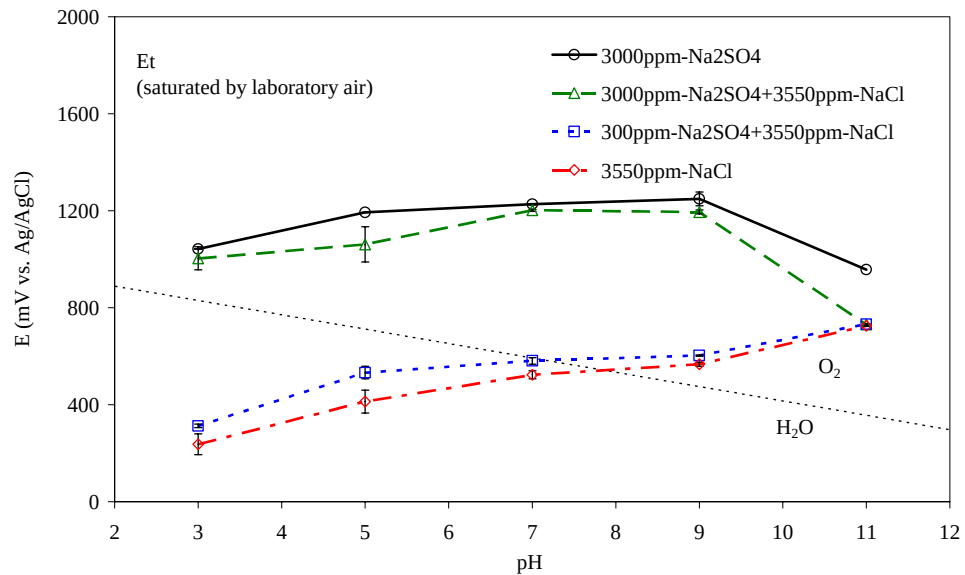


Figure 3: Transpassive-potential line of AISI 316L stainless steel in chloride and sulfate solutions saturated by laboratory air.

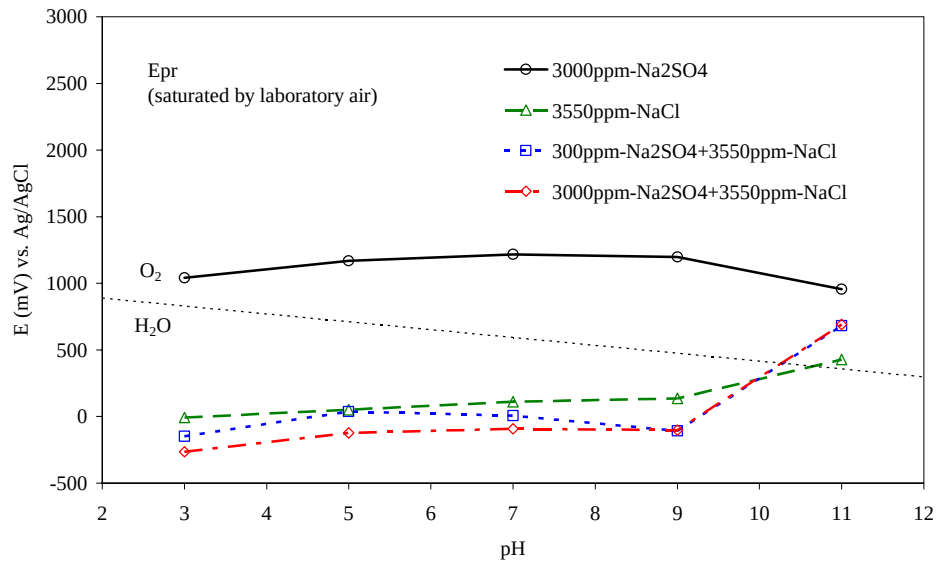


Figure 4: Protection-potential line of AISI 316L stainless steel in chloride and sulfate solutions saturated by laboratory air.

It was found that the addition of 300-ppm Na_2SO_4 to aerated 3550-ppm NaCl solution slightly increased the transpassive potential. However, when Na_2SO_4 was added up to 3000 ppm, the transpassive-potential line significantly shifted to the positive direction as also observed in Figures 1 and 2. Comparing the transpassive-potential line of specimens immersed in aerated 3000-ppm Na_2SO_4 solution and that of specimens immersed in such solution with the containing of 3550-ppm NaCl , it was found that the addition of 3550-ppm NaCl in aerated 3000-ppm Na_2SO_4 solution only slightly shifted the transpassive-potential line to the less noble direction. Figure 4 presents the protection-potential line of specimens immersed in chloride and sulfate solutions. The addition of 300 and 3000 ppm Na_2SO_4 to aerated 3550-ppm NaCl solution slightly decrease the protection potential at solution pH of 3 to 9. Comparing to aerated 3000-ppm Na_2SO_4 solution, the addition of 3550-ppm NaCl to such solution significantly decreased the protection potentials at all studied pH, contradictorily to the case of the transpassive potential in Figure 3. It is then concluded that sulfate in aerated solution plays the strong role to withstand the effect of chloride ions by maintaining the pitting potential, but it cannot withstand the role chloride ions to promote the imperfect passivation regime caused by the lowering of the protection potential.

The corrosion-potential lines of specimens immersed in chloride and sulfate solutions are further drawn in Figure 5. It was found that the addition of Na_2SO_4 to aerated 3550-ppm NaCl solution did not significantly affect the corrosion-potential line. This indicates the similar rate of general corrosion of specimen immersed in these solutions.

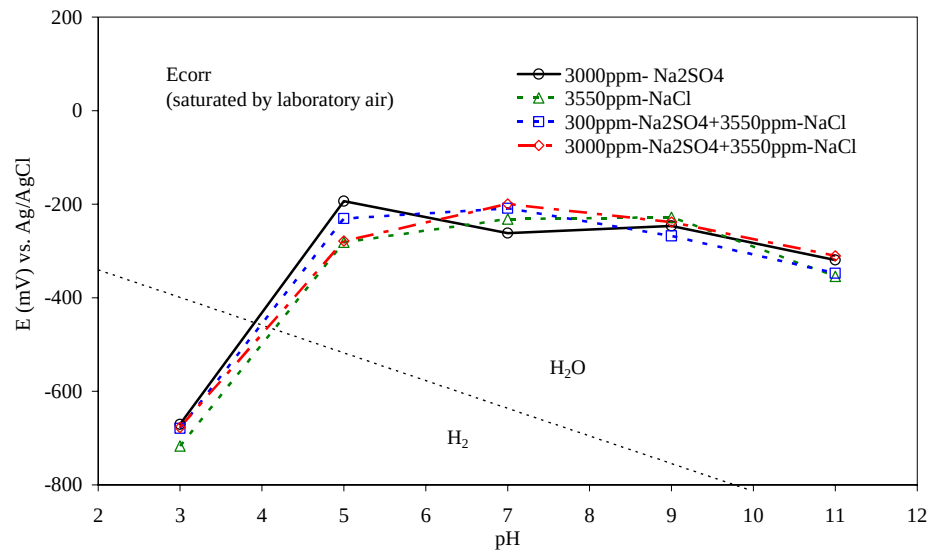


Figure 5: Corrosion-potential line of AISI 316L stainless steel in chloride and sulfate solutions saturated by laboratory air.

3.2 Effect of dissolved oxygen

To investigate the role of dissolved oxygen, nitrogen gas was bubbled into solution instead of laboratory air. The potential-pH diagrams of specimens in 3550-ppm NaCl solutions without and with 3000-ppm Na₂SO₄ saturated by nitrogen were superposed on those saturated by laboratory air as in Figures 6 and 7. It was observed that the dissolved oxygen decreased the transpassive and protection potentials of specimens immersed in 3550-ppm NaCl solutions without and with 3000-ppm Na₂SO₄, obviously at the solution pH of 3 to 9. The effect of dissolved oxygen on corrosion and primary passivation potentials could not be considerably observed.

As a matter of discussion, the shift of potential lines in different solutions can be from the role of sulfate and also the dissolved oxygen. In the case that the role of dissolved oxygen was eliminated by the saturation of nitrogen in solution, it was still found that the transpassive potentials of specimens immersed in 3550-ppm NaCl solution containing 3000-ppm Na₂SO₄ is higher than that immersed in 3550-ppm NaCl solution. This insists the role of sulfate to promote the positive shift of the transpassive potentials. However, when the role of dissolved oxygen was eliminated, it was found that the presence of sulfate in 3550-ppm NaCl solution did not considerably affect the protection potential at the solution pH of 3 to 9 as declared in Figure 8. It can then be discussed that the decrease of protection potential due to the addition of Na₂SO₄ in aerated 3550-ppm NaCl solutions (Figure 4) is

not purely due to the effect of sulfate. This potential decrease may be due to the different solubilities of oxygen in each solution or by the synergistic effect of sulfate and dissolved oxygen in solution.

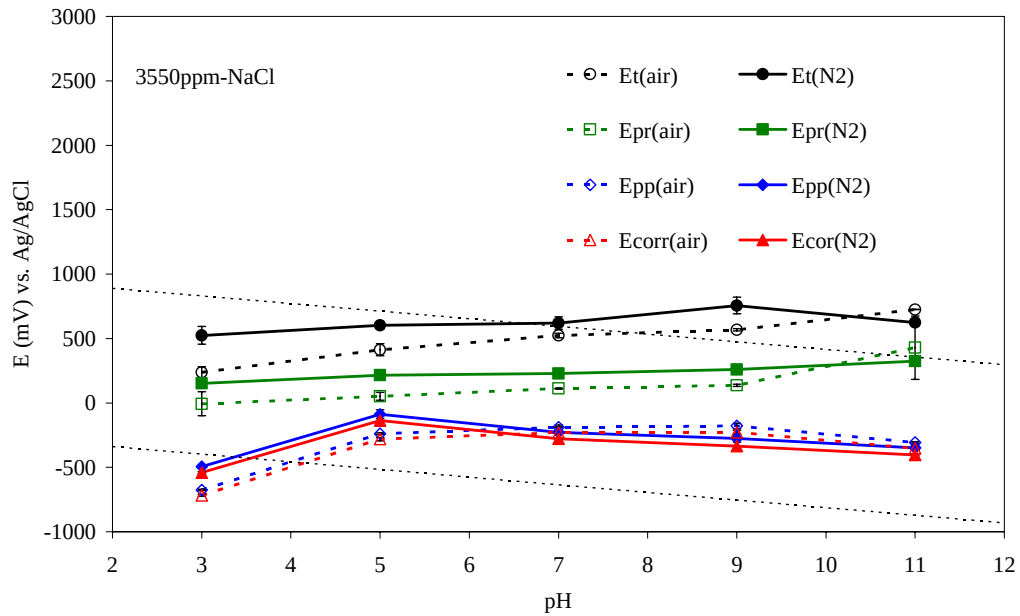


Figure 6: Potential-pH diagram of AISI 316L stainless steel in 3550ppm NaCl solution saturated by laboratory air and nitrogen.

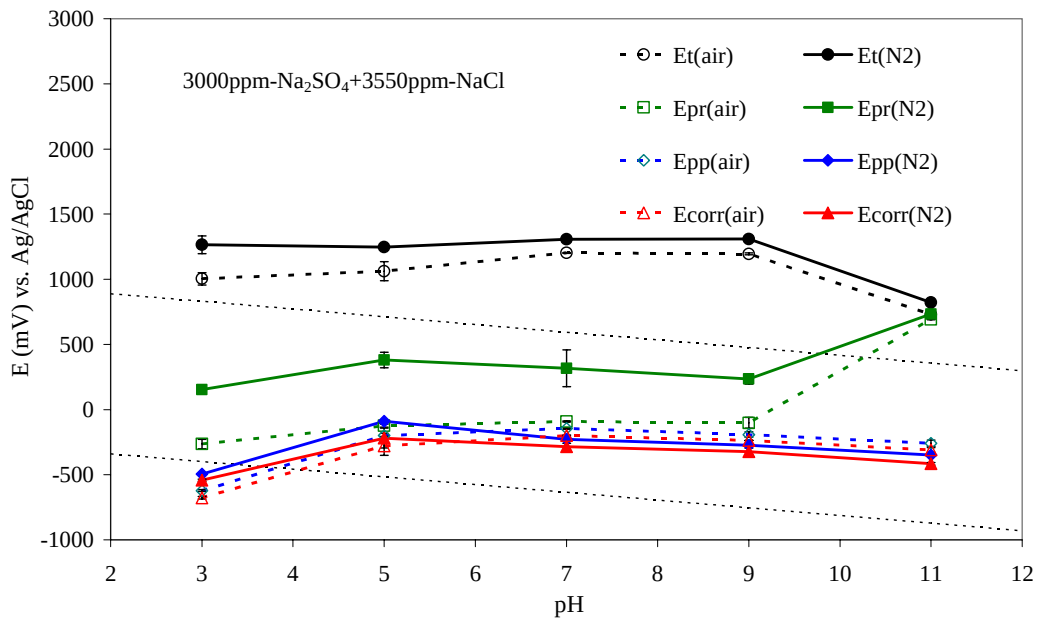


Figure 7: Potential-pH diagram of AISI 316L stainless steel in 3550ppm NaCl solution mixed with 3000ppm Na_2SO_4 saturated by laboratory air and nitrogen.

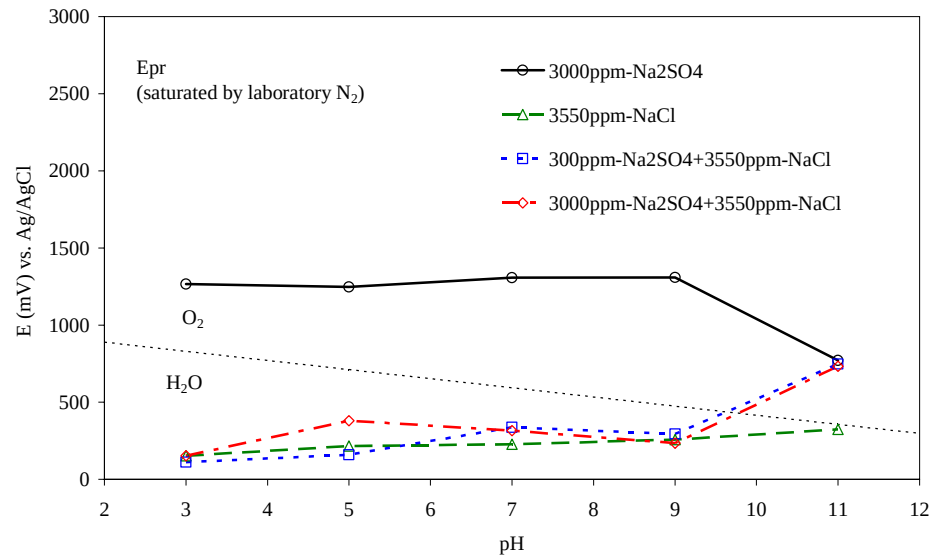


Figure 8: Protection-potential line of AISI 316L stainless steel in chloride and sulfate solutions saturated by nitrogen.

4. CONCLUSIONS

The cyclic polarisation technique was applied to determine the corrosion, primary-passivation, transpassive, and protection potential of AISI 316L stainless steels immersed in 3550-ppm NaCl solution containing sulfate in the content up to 3000 ppm. The solution pH was varied from 3 to 11 and saturated by laboratory air and nitrogen. Each type of potentials was plotted in function of pH and linked as lines to determine the different predominant zones in the constructed potential-pH diagram. The following conclusions can be drawn.

1. The addition of sulfate up to 3000 ppm to aerated and deaerated 3550-ppm NaCl solutions significantly increased the transpassive potential at all studied solution pH of 3-11. This gave rise to the widening of the overall passivation regime in the potential-pH diagram.

2. The protection potential slightly decreased with the addition of Na₂SO₄ up to 3000 ppm to aerated 3550-ppm NaCl solution. However, this addition did not shift the protection potential when solution was deaerated at solution pH of 3 to 9. In both aerated and deaerated conditions, the imperfect passivation regime was widened significantly by the positive shift of the transpassive-potential line previously summarised.

3. The addition of 3000 ppm of sulfate to aerated and deaerated 3550-ppm NaCl solution did not affect the corrosion potential at all studied pH. This indicates the similar rate of uniform corrosion independent from the content of sulfate in solution.

4. The dissolved oxygen decreased the transpassive and protection potentials, whereas it does not affect the corrosion and primary passivation potentials.

5. In aerated and deaerated 3550-ppm NaCl solution, sulfate behaves as the inhibitor by shifting the transpassive potential to the noble direction. However, it also helps increase the imperfect passivation regime, and does not change the rate of uniform corrosion.

ACKNOWLEDGMENTS

The acknowledgement is given to the Thailand Research Fund, and Dr.Ing. Gobboon Lothongkum as a mentor of S.C. for this project. The scholarship from SSI granted to W.W. for his M.Sc. study at TGGS, KMITNB is appreciated.

REFERENCES

- [1] M. Pourbaix, *Atlas d'equilibres electrochimiques*, Gauthier-Villars, Paris, France, 1963.
- [2] D. Landolt, *Corrosion et Chimie de Surfaces des Metaux*, Presses Polytechniques et Universités Romandes, Oxford, UK, 1997.
- [3] E. D. Verink, Jr., "Application of Electrochemical Techniques in the Development of Alloys for Corrosive Service", R. Baboian ed., *Electrochemical Techniques for Corrosion*, NACE, Houston, USA., 1977.
- [4] M. Hubble, R. Heiderbach and T. Rockett, *The International Corrosion Forum*, California, USA., 1983.
- [5] Prateep Vongbandit, M.Eng. *Thesis*, Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand, 2001. (in Thai)
- [6] G. Lothongkum, P. Vongbandit, and P. Nongluck, "Experimental Investigation of the E-pH Diagrams for 316L Stainless Steel by Potentiodynamic Method, *Anti-corrosion Methods and Materials*, 53, 3, 2006, pp. 169-174.
- [7] M. Tunthulawed, *Water Supply Engineering: Volume 1*, Chulalongkorn University Press, Bangkok, Thailand, 1995. (in Thai)