

การสร้างแผนภูมิพอร์เบซซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายที่มี
คลอไรด์ผสมด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี

นางสาว อรยา วังศรี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-347-106-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONSTRUCTION OF THE POURBAIX DIAGRAM FOR LOW CARBON STEEL IN
AN AQUEOUS SOLUTION CONTAINING CHLORIDE BY
AN ELECTROCHEMICAL TECHNIQUE



Miss Oraya Wungsri

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering
Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-347-106-5


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างแผนภูมิฟอร์เบซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายที่มีคลอไรด์
ผสมด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี

โดย นางสาว อรยา วังศรี


สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

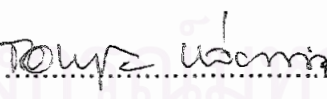
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ บัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)

อรรถา วังศรี : การสร้างแผนภูมิพอร์เบิร์ตของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสำหรับในสารละลายที่มีคลอไรด์ผสมด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี (CONSTRUCTION OF THE POURBAIX DIAGRAM FOR LOW CARBON STEEL IN AN AQUEOUS SOLUTION CONTAINING CHLORIDE BY AN ELECTROCHEMICAL TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ ; 87 หน้า ISBN 974-347-106-5

งานวิจัยเพื่อสร้างแผนภูมิพอร์เบิร์ตของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสองเกรดที่มีส่วนผสมคาร์บอนและแมงกานีสต่างกันโดยใช้เทคนิคทางไฟฟ้าเคมี โดยการวัดเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 0-600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบส 2-12 และอิ่มตัวด้วยออกซิเจนจากอากาศ อัตราการสแกน 0.1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส หลังจากการทดลองนำสารละลายไปวิเคราะห์เคมีเชิงคุณภาพเพื่อหาไอออนของโลหะที่ละลายในสารละลาย จากเส้นโพลาริเซชันจะนำค่าศักย์ไฟฟ้าการผุกร่อน (Ecor) ค่าศักย์ไฟฟ้าการเปลี่ยนแปลงจากการผุกร่อนเป็นการสร้างฟิล์ม (Epp) และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ฟิล์มถูกทำลาย (Ep) ไปเขียนกราฟในแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดเบสและศักย์ไฟฟ้า หรือแผนภูมิพอร์เบิร์ต

แผนภูมิพอร์เบิร์ตของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำทั้งสองเกรดที่ได้จากการทดลองนี้แสดงพื้นที่ของโลหะที่เกิดการผุกร่อนมากกว่า แต่แสดงพื้นที่ของสภาวะที่เกิดฟิล์มพาสซีฟแคบกว่าพื้นที่เดียวกันในแผนภูมิพอร์เบิร์ตที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ ที่ค่าความเป็นกรดเบสเดียวกัน ค่า Ecor , Epp และ Ep ในน้ำที่ไม่มีคลอไรด์มีค่ามากกว่าในน้ำที่มีคลอไรด์ เมื่อความเข้มข้นคลอไรด์ในช่วง 200-600 พีพีเอ็มเพิ่มขึ้น ค่า Ecor และ Epp เปลี่ยนแปลงน้อยมากขณะที่ค่า Ep มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้แมงกานีสอาจมีผลเพิ่มพื้นที่แสดงการผุกร่อนของเหล็กและช่วยสร้างฟิล์มพาสซีฟ (เพิ่มพื้นที่ฟิล์ม Fe(OH)₂) ในแผนภูมิพอร์เบิร์ตของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200-600 พีพีเอ็ม อย่างไรก็ตามเพื่อสรุปผลของแมงกานีสให้ชัดเจนควรมีการทดลองเพิ่มเติม

ภาควิชา...วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา...วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา.....2543.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170630021 : Major METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORDS : POURBAIX DIAGRAM / POLARIZATION / LOW CARBON STEEL / CHLORIDE / pH

ORAYA WUNGSRI : CONSTRUCTION OF THE POURBAIX DIAGRAM FOR LOW CARBON STEEL IN AN AQUEOUS SOLUTION CONTAINING CHLORIDE BY AN ELECTROCHEMICAL TECHNIQUE : THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF. GOBBOON LOTHONGKUM (D.ENG) 87 p.p. ISBN 974-347-106-5

Pourbaix diagrams of two low carbon steels which have different in carbon and manganese contents in aqueous solutions were constructed by an electrochemical technique. The polarization curves with scan rate of 0.1 mV/s of those steels were investigated in the solutions containing chloride range from 0 to 600 ppm pH 2 to 12.5 , with oxygen from air saturation , and temperature of 25 ° C. The qualitative chemical analysis was applied to determine the metal ion dissolved in the test solutions. The Ecor , Epp and Ep were drawn from the polarization curves and plotted in the E-pH or pourbaix diagram.

The pourbaix diagrams from this work shows the metal stable area larger than , but the passive film area smaller than the same areas in the pourbaix diagrams constructed by thermodynamics calculation. At the same pH , these steels in pure water show Ecor , Epp and Ep higher than those in the chloride containing solutions. Increasing chloride contents from 200-600 ppm will decrease the Ep but no significant changes in the Ecor and Epp. Manganese may have the effect on the corroded and the passive film (Fe(OH)₂) areas of the low carbon steels pourbaix diagrams. However the effect of manganese has to be confirmed by the more experiments.

Department ...Metallurgical Engineering.....	Student's signature	<i>Oraya Wungari</i>
Field of study ...Metallurgical Engineering.....	Advisor's signature	<i>Gobboon Lothongkum</i>
Academic year ...2000.....	Co-advisor's signature	



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้เขียนขอขอบพระคุณ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สนับสนุนเงินทุนวิจัย บริษัทสหวิริยาส์ดีลอินเตอร์ จำกัด (มหาชน) ให้ความอนุเคราะห์เหล็กที่ใช้ในการทำวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ให้ความอนุเคราะห์ยืมใช้เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชากร จารุพิสิฐธร คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ นายธีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล และ นายพรชัย ลาภเจริญวงศา ที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด ขอขอบคุณท่านอาจารย์รวมถึงเพื่อน พี่ น้อง ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบิดามารดา ซึ่งสนับสนุนด้านการเงินและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

นางสาว อรยา วังศรี

ผู้จัดทำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์ต่าง ๆ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ปรัชญาวิธีนวัตกรรมการ.....	4
2.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.2.1 เทคนิคโพลาริเซชัน.....	8
2.2.2 การวิเคราะห์เคมีเชิงคุณภาพ.....	10
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	13
3.1 เตรียมการทดลอง.....	13
3.1.1 เตรียมอุปกรณ์.....	13
3.1.2 เตรียมสารละลายคลอไรด์.....	14
3.1.3 เตรียมชิ้นงานทดลอง.....	15
3.1.4 เตรียมสารละลายที่ใช้ทดสอบหาไอออนโลหะ.....	15
3.2 การออกแบบการทดลอง.....	16
3.2.1 การทดลองที่ 1	16
3.2.2 การทดลองที่ 2.....	16
3.2.3 การทดลองที่ 3.....	16
3.2.4 การทดลองที่ 4	17
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	17

3.3.1 การทดลองที่ 1 การหาเวลาที่ใช้ในการทำให้อากาศอิ่มตัวในสารละลาย.....	17
3.3.2 การทดลองที่ 2 การหาอัตราการสแกนที่เหมาะสมในการหาเส้นโพลาริเซชัน.....	17
3.3.3 การทดลองที่ 3 การหาเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเพื่อนำไปสร้างแผนภูมิพอร์เบิร์ต.....	18
3.3.4 การทดลองที่ 4 การตรวจสอบอิมพริออนของโลหะที่ละลายในสารละลาย.....	18
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	25
4.1 การหาเวลาที่ใช้ในการทำให้ออกซิเจนในอากาศอิ่มตัวในสารละลาย	25
4.2 การหาอัตราการสแกนที่เหมาะสมในการหาเส้นโพลาริเซชัน.....	25
4.3 การหาเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเพื่อนำไปสร้างแผนภูมิพอร์เบิร์ต.....	26
4.4 การตรวจสอบอิมพริออนของโลหะที่ละลายในสารละลาย.....	30
บทที่ 5 อภิปรายผลการทดลอง.....	26
5.1 เปรียบเทียบแผนภูมิพอร์เบิร์ตที่ได้จากการทดลองกับแผนภูมิพอร์เบิร์ตจากการคำนวณ.....	31
5.2 อิทธิพลของความเข้มข้นคลอไรด์.....	33
5.3 อิทธิพลของแมงกานีสในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ.....	34
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	36
รายการอ้างอิง.....	37
ภาคผนวก.....	39
ประวัติผู้เขียน.....	87

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวิเคราะห์และปริมาณสารตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ...	11
ตารางที่ 2.2 แสดงสารที่ใช้ในการทดสอบหาไอออนของเหล็กและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น.....	12
ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ใช้ทำท่อส่งน้ำประปา.....	15
ตารางที่ 3.2 แสดงสารละลายที่ใช้ในการวิเคราะห์เคมีเชิงปริมาณ.....	15
ตารางที่ 3.3 แสดงสารละลายที่ใช้ในการทดลองที่ 1.....	17
ตารางที่ 3.4 แสดงจำนวนชิ้นงานและเงื่อนไขการทดลองเพื่อหาเส้นโพลาริเซชันของ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 และ SPHT2.....	19
ตารางที่ 3.5 แสดงเงื่อนไขการตรวจสอบไอออนโลหะที่ละลายในสารละลายของเหล็กกล้า คาร์บอนต่ำ SPHT1.....	19
ตารางที่ 5.1 แสดงสีของตะกอนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบหาไอออนโลหะ.....	21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงแผนภูมิพอร์เบิร์ตซ์ของเหล็กบริสุทธิ์ในสารละลายน้ำ.....	4
รูปที่ 2.2 (ก) เส้นกราฟ Potentiokinetic Polarization มาตรฐานของเหล็กในสารละลาย ที่ไม่มีคลอไรด์ที่ความเป็นกรดเบสต่างๆ และ (ข) แผนภูมิพอร์เบิร์ตซ์ที่สร้างขึ้นจาก ข้อมูลในรูป (ก).....	6
รูปที่ 2.3 (ก) เส้นกราฟ Potentiokinetic Polarization มาตรฐานของเหล็กในสารละลาย ที่มีคลอไรด์ผสม 10^{-2} โมลาร์ที่ความเป็นกรดเบสต่างๆ และ (ข) แผนภูมิพอร์เบิร์ตซ์ ที่สร้างขึ้นจากข้อมูลในรูป (ก).....	6
รูปที่ 2.4 (ก) เครื่องโพเทนชิโอสแตท (ข) เซลล์ไฟฟ้า.....	8
รูปที่ 2.5 แสดงส่วนต่างๆ ที่สำคัญของเส้นโพลาริเซชัน.....	9
รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องโพเทนชิโอสแตทรุ่น PGSTAT 20.....	13
รูปที่ 3.2 แสดงอิเล็กโทรดอ้างอิง (Ag/AgCl).....	14
รูปที่ 3.3 แสดงอิเล็กโทรดวัดกระแส (Pt).....	14
รูปที่ 3.4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ทำการชักสารละลายตัวอย่างเพื่อตรวจสอบอิออนของโลหะ ที่ละลายในสารละลายจากการทดลอง หาเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชนิด SPHT 1 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2.....	20
รูปที่ 3.5 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ทำการชักสารละลายตัวอย่างเพื่อตรวจสอบอิออนของโลหะ ที่ละลายในสารละลายจากการทดลอง หาเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชนิด SPHT 1 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 6.....	20
รูปที่ 3.6 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ทำการชักสารละลายตัวอย่างเพื่อตรวจสอบอิออนของโลหะ ที่ละลายในสารละลายจากการทดลอง หาเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชนิด SPHT 1 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12.....	21
รูปที่ 3.7 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ทำการชักสารละลายตัวอย่างเพื่อตรวจสอบอิออนของโลหะ ที่ละลายในสารละลายจากการทดลอง หาเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชนิด SPHT 1 ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2...	21
รูปที่ 3.8 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ทำการชักสารละลายตัวอย่างเพื่อตรวจสอบอิออนของโลหะ ที่ละลายในสารละลายจากการทดลอง หาเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชนิด SPHT 1 ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 6...	22

รูปที่ 3.9 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ทำการชักสารละลายตัวอย่างเพื่อตรวจสมบัติของโลหะ
ที่ละลายในสารละลายจากการทดลอง หาเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ
ชนิด SPHT 1 ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12..22

รูปที่ 4.1 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายคลอไรด์
300 มิลลิลิตร กับเวลา ที่ค่าความเข้มข้นคลอไรด์และค่าความเป็นกรดเบสต่าง ๆ.....25

รูปที่ 4.2 แสดงแผนภูมิพอร์เบิร์ตของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่
ไม่มีคลอไรด์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....26

รูปที่ 4.3 แสดงแผนภูมิพอร์เบิร์ตของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่
มีคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส..... 27

รูปที่ 4.4 แสดงแผนภูมิพอร์เบิร์ตของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่
มีคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส..... 27

รูปที่ 4.5 แสดงแผนภูมิพอร์เบิร์ตของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่
มีคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส..... 28

รูปที่ 4.6 แสดงแผนภูมิพอร์เบิร์ตของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่
ไม่มีคลอไรด์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส..... 28

รูปที่ 4.7 แสดงแผนภูมิพอร์เบิร์ตของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่
มีคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส..... 29

รูปที่ 4.8 แสดงแผนภูมิพอร์เบิร์ตของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่
มีคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส..... 29

รูปที่ 4.9 แสดงแผนภูมิพอร์เบิร์ตของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่
มีคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส..... 30

คำอธิบายสัญลักษณ์ต่าง ๆ

สัญลักษณ์

I _{cor}	กระแสของการผุกร่อน
I _p	กระแสพาสซีฟ
E _{cor}	ศักย์ไฟฟ้าของการผุกร่อน
E _{pp}	ศักย์ไพรมารีพาสซีเวชัน (primary passivation potentials)
E _p	ศักย์ไฟฟ้าของการผุกร่อนแบบรูเข็ม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

แผนภูมิพอร์เบิร์ตถูกคิดขึ้นโดย Dr. Marcer Pourbaix เมื่อปี 1938 เป็นแผนภูมิแสดงสภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์หรือสมดุลทางไฟฟ้าเคมีด้วยกราฟซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ศักย์ไฟฟ้าของโลหะและความเป็นกรดเบสของสารละลาย โดยแกนตั้งจะเป็นศักย์ไฟฟ้าระหว่างโลหะกับสารละลาย (metal-solution potential) ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก^{1,2,3} ในแผนภูมิจะแสดงพื้นที่ต่างกัน 3 บริเวณ ได้แก่ สภาวะโลหะเสถียร สภาวะที่โลหะเกิดการผุกร่อน และ สภาวะที่โลหะเกิดฟิล์มบนผิวหรือเรียกว่าพาสซีเวชัน³

แผนภูมิพอร์เบิร์ตสร้างขึ้นโดยการคำนวณจากข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยใช้พื้นฐานการคำนวณจากสมการของเนอส์ (Nernst's equation)⁴ ดังสมการที่ 1.1 และข้อมูลความสามารถในการละลายของสารประกอบชนิดต่าง ๆ ของโลหะ

$$E = E^\circ + 2.3RT/nF [\log a_{ox}/a_{re}] \quad (1.1)$$

E = ศักย์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิใด ๆ

E° = ศักย์ไฟฟ้าที่ 25 องศาเซลเซียส

$2.3RT/F$ = 0.059 ที่ 25 องศาเซลเซียส

n = จำนวนโมลอิเล็กตรอน

a_{ox} = ค่าแอกติวิตี้ของสารตั้งต้น

a_{re} = ค่าแอกติวิตี้ของสารผลิตภัณฑ์

แผนภูมิพอร์เบิร์ตสามารถนำไปใช้งานโดยหลัก ๆ ได้ดังต่อไปนี้⁵

- 1) ทำนายทิศทางของปฏิกิริยา
- 2) ประมาณส่วนผสมของผลิตภัณฑ์จากการผุกร่อน (corrosion product)
- 3) ทำนายการเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อมเพื่อที่จะป้องกันหรือลดการผุกร่อน
- 4) การประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการเคลือบผิวโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม แผนภูมิพอร์เบซยังมีข้อจำกัดที่สำคัญ ได้แก่ ¹

1) แผนภูมิส่วนใหญ่วาดจากผลการคำนวณที่สถานะสมดุล แต่ปัญหาจริงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มักไม่อยู่ในสถานะสมดุลคือ มักมีสถานะเคลื่อนไหวและไม่คำนึงถึงกลไกของปฏิกิริยา จึงไม่สามารถอัตรากการผู้กร่อนได้

2) แผนภูมิที่ตีพิมพ์เผยแพร่ส่วนใหญ่เป็นการสร้างจากโลหะบริสุทธิ์ในสารละลายอย่างง่าย ไม่ซับซ้อนต่างจากสภาพใช้งานจริงซึ่งมักเป็นระบบโลหะผสมและสารละลายที่ซับซ้อน

3) ในพื้นที่ของพาสซีเวชัน โลหะอาจได้รับการป้องกันอย่างดีหรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ (degree of perfection) ของชั้นปกคลุมของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการผู้กร่อน ซึ่งทำให้ไม่สามารถทำนายประสิทธิภาพของฟิล์มพาสซีฟ (passive film) ที่เกิดขึ้นบนผิวอิเล็กโทรด (โลหะ)

5) ความเป็นกรดเบสของสารละลายที่ปรากฏบนแผนภูมิไม่ใช่ค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายเฉลี่ยรวม (bulk solution) แต่เป็นค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายที่สัมผัสกับผิวโลหะในหลุมหรือบริเวณที่เกิดการผู้กร่อน

การสร้างแผนภูมิพอร์เบซของโลหะผสมด้วยการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ มีข้อยุ่งยากเนื่องจากโลหะผสมประกอบด้วยธาตุหลายชนิดเป็นผลให้เกิดสมการของเนอรัสหลายสมการ ทำให้เกิดการแย่งกันของธาตุในโลหะผสมที่จะละลายออกมาสู่สารละลาย สำหรับโลหะผสมการใช้เทคนิคโพลาไรเซชัน (polarization) ช่วยในการสร้างแผนภูมิพอร์เบซจะง่ายกว่าการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ และควรใช้การตรวจสอบทางเคมีประกอบเพื่อหาชนิดไอออนในสารละลายจากนั้นนำมาประกอบสมมติฐานในการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่ออธิบายหรือยืนยันผลจากเทคนิคโพลาไรเซชัน

เนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเป็นวัสดุที่มีราคาถูก และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับทำท่อประปาในโรงงานอุตสาหกรรม ในกระบวนการผลิตน้ำประปาจะทำการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อ เป็นผลให้น้ำประปามีการปนเปื้อนของคลอไรด์ประมาณ 250 – 500 ppm ⁶ ด้วยเหตุนี้ท่อเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจึงมักเกิดการผู้กร่อนในลักษณะใดลักษณะหนึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนและค่าความเป็นกรดเบสของน้ำประปา ดังนั้นการศึกษาอิทธิพลของคลอไรด์ที่มีต่อการผู้กร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเพื่อนำไปสร้างแผนภูมิพอร์เบซจึงมีความสำคัญ เนื่องจากทำให้ทราบขอบเขตการใช้งานในสถานะที่มีคลอไรด์ปนเปื้อนซึ่งยังไม่เกิดการผู้กร่อน ทำให้สามารถประเมินอายุการใช้งานและเวลาในการบำรุงรักษา นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกวัสดุที่ใช้ทำท่อได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างแผนภูมิพอร์เบซซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสำหรับทำท่อในสภาวะสารละลายที่มีคลอไรด์ผสมที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ สอดคล้องกับคุณภาพของน้ำประปาโดยใช้เทคนิคทางไฟฟ้าเคมี

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1) หาพื้นที่สภาวะโลหะเสถียร สภาวะโลหะเกิดการผุกร่อน และสภาวะโลหะเกิดพาสซีเวชันภายใต้สภาวะของสารละลายที่มีคลอไรด์ผสมที่มีความเข้มข้นต่างกันด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท
- 2) วิเคราะห์สารละลายที่ผ่านการวัดด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท เพื่อหาชนิดไอออนที่ละลายออกจากผิวของโลหะ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) แผนภูมิพอร์เบซซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำซึ่งสัมพันธ์กับสารละลายที่มีคลอไรด์ผสมที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ
- 2) สามารถใช้แผนภูมิพอร์เบซซ์เพื่อทำนายการเกิดการผุกร่อน และใช้เป็นแนวทางป้องกันการเกิดการผุกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำได้ในสารละลายที่มีสภาวะความเป็นกรดเบสต่าง ๆ ความต่างศักย์ระหว่างโลหะและสารละลายต่าง ๆ และความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายต่าง ๆ ได้
- 3) ความรู้ที่ได้รับจากการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทาง ในการศึกษาแผนภูมิพอร์เบซซ์และการผุกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนส่วนผสมอื่น ๆ ได้

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

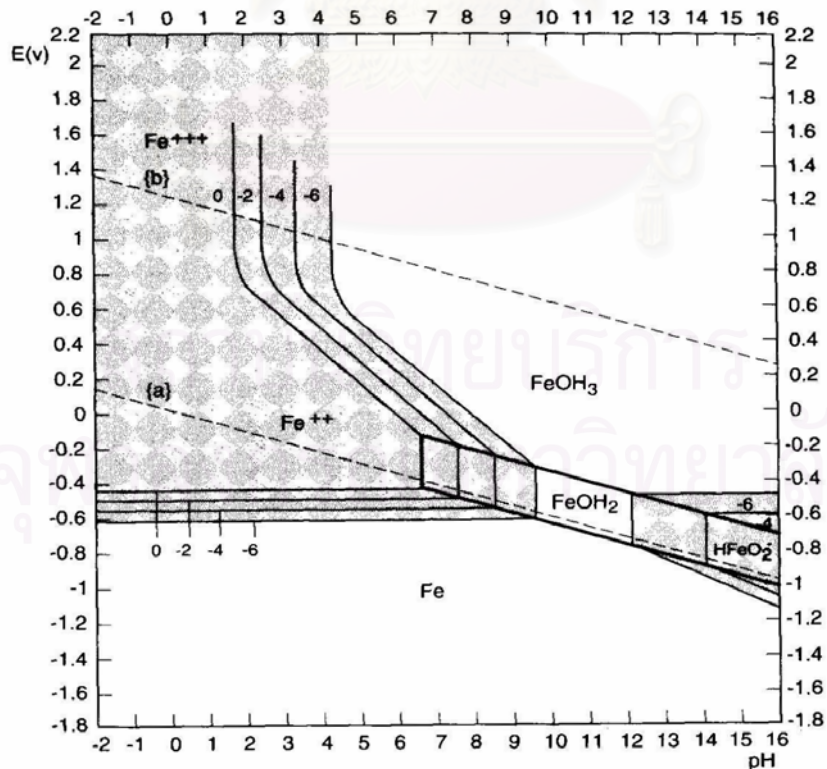
บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

แผนภูมิพอร์เบซ์เป็นแผนภูมิสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่แสดงเสถียรภาพของไอออนโลหะและสารประกอบของโลหะ เช่น โลหะออกไซด์ ในสารละลาย⁷ ภายในแผนภูมิจะมีเส้นแบ่งขอบเขตสถานะที่สารดังกล่าวเสถียร เส้นแบ่งนี้อาจจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ ความเป็นกรดเบสของสารละลาย หรืออาจขึ้นอยู่กับทั้งความต่างศักย์และความเป็นกรดเบสของสารละลายก็ได้ ประโยชน์ของแผนภูมิพอร์เบซ์คือการประยุกต์ใช้งานด้านการเคลือบผิวโลหะที่ไม่ใช้กระแสไฟฟ้า การป้องกันการผุกร่อนของโลหะ

หลังจาก M.Pourbaix เสนอวิธีสร้างแผนภูมิพอร์เบซ์ขึ้นเป็นครั้งแรกได้มีการปรับปรุงวิธีสร้างแผนภูมิและมีการเปลี่ยนแปลงแผนภูมินี้อยู่เสมอ ตัวอย่างแผนภูมิพอร์เบซ์ของเหล็กบริสุทธิ์ในสารละลายน้ำซึ่ง M.Pourbaix เป็นผู้คิดค้นแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแผนภูมิพอร์เบซ์ของเหล็กบริสุทธิ์ในสารละลายน้ำ ที่ 25 องศาเซลเซียส⁸

จากรูปพบว่าแผนภูมิพอร์เบซ์ของเหล็กบริสุทธิ์ในสารละลายน้ำจะมีพื้นที่หลัก ๆ 3 ส่วนคือ

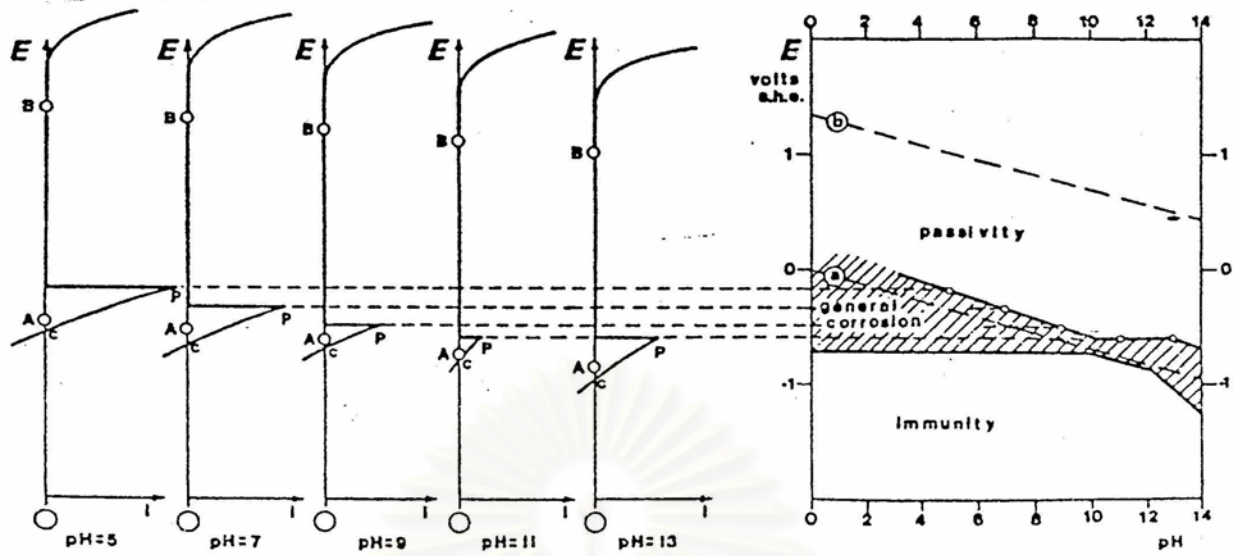
- 1) พื้นที่แสดงสถานะโลหะเสถียร (Fe)
- 2) พื้นที่แสดงสถานะที่โลหะเกิดการผุกร่อน มี 2 ส่วนย่อยคือ
 - Fe^{2+} และ Fe^{3+}
 - HFeO_2^-
- 3) พื้นที่แสดงสถานะที่โลหะเกิดพาสซีเวชัน มี 2 ส่วนย่อยคือ
 - $\text{Fe}(\text{OH})_2$
 - $\text{Fe}(\text{OH})_3$

ซึ่งพื้นที่ส่วนต่างๆ ของแผนภูมิพอร์เบซ์ของเหล็กบริสุทธิ์ในสารละลายน้ำจะนำไปใช้อ้างอิงในบทที่ 3 , 4 และ 5 ต่อไป

E.D. Verink, Jr.⁹ เสนอวิธีการสร้างแผนภูมิพอร์เบซ์โดยใช้สมการเนอริสโดยตรงแทนวิธีการที่ซับซ้อนที่ M.Pourbaix ใช้

T.Kodama¹⁰ เสนอการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถสร้างแผนภูมิพอร์เบซ์ในระบบ M-X-H₂O ได้ โดยที่ M = โลหะ , X = เมทัลลอยด์ หรือ สารอินทรีย์ / สารอนินทรีย์ ในการคำนวณจะป้อนข้อมูลเพียงสารหรือสารประกอบที่อาจเกิดขึ้นในระบบเท่านั้น โดยไม่สนใจปฏิกิริยาเคมีร่วมกับบัลเล็ทตรอน โปรตอน และน้ำ จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดไปเข้ารูปสมการแมตริกซ์จนได้เส้นตรงต่าง ๆ ของแผนภูมิออกมา ลำดับต่อไปจะทำการกำจัดปฏิกิริยาที่ไม่เสถียรออกไปจะได้แผนภูมิขึ้นมาสองระบบ ได้แก่ M-H₂O และ X-H₂O นำแผนภูมิของระบบทั้งสองมารวมกันในแผนภูมิเดียว พิจารณาเฉพาะสารประกอบที่เสถียรแล้ววาดในแผนภูมิใหม่ นอกจากนี้ยังสามารถใช้โปรแกรมเทอร์โมแคลในการคำนวณแผนภูมิพอร์เบซ์ได้อีกด้วย

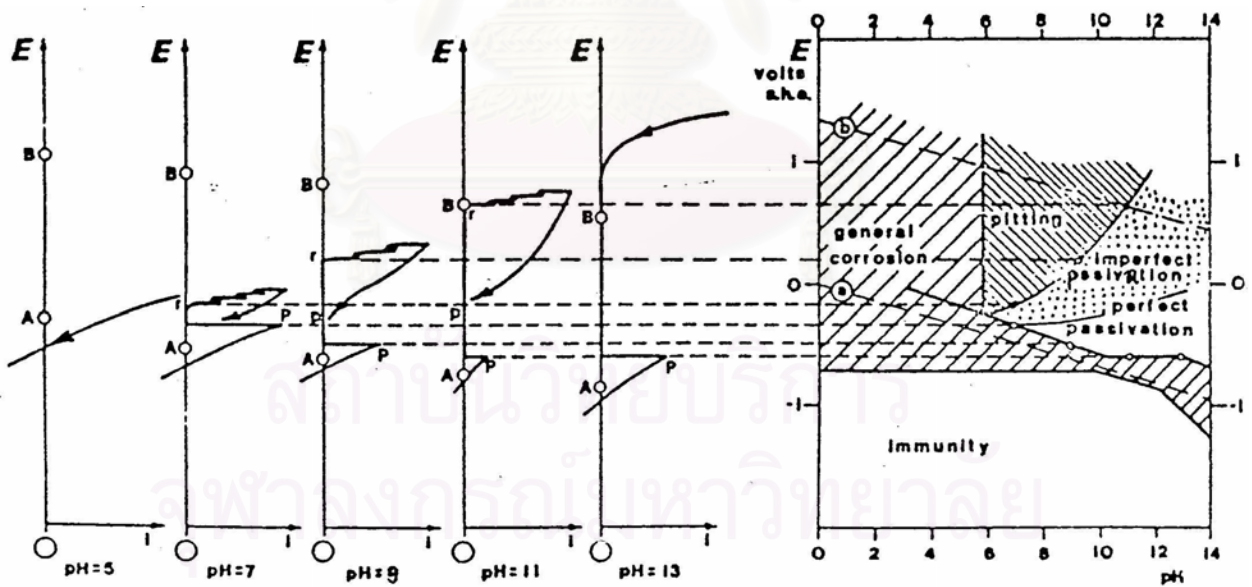
E.D. Verink, Jr.¹¹ ได้ใช้วิธีทดลองการวัดทางไฟฟ้าเคมีเพื่อให้สามารถสร้างแผนภูมิพอร์เบซ์ได้ง่ายขึ้น โดยสามารถสร้างแผนภูมิของโลหะผสมในสารละลายสถานะต่าง ๆ ได้ ตัวอย่างการใช้วิธีการวัดทางไฟฟ้าเคมีของเหล็กที่ความเป็นกรดเบสของสารละลายต่างกันในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์แสดงดังรูปที่ 2.2 (ก) และในสารละลายที่มีคลอไรด์แสดงดังรูปที่ 2.3 (ก) ซึ่งสามารถนำข้อมูลไปสร้างเป็นแผนภูมิดังรูปที่ 2.2 (ข) และ 2.3 (ข) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแผนภูมิที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) สามารถแสดงรายละเอียดพื้นที่การผุกร่อนที่ต่างกันได้ เช่น การผุกร่อนแบบทั่วไป การผุกร่อนแบบรูเข็ม หรือ การเกิดพาสซีเวชันที่ไม่สมบูรณ์



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.2 (ก) เส้นกราฟโพลาริเซชันมาตรฐานของเหล็กในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ที่ความเป็นกรดเบสต่าง ๆ และ (ข) แผนภูมิพอร์เบซึที่สร้างขึ้นจากข้อมูลในรูป 2.2(ก)¹²



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.3 (ก)เส้นกราฟโพลาริเซชันมาตรฐานของเหล็กในสารละลายที่มีคลอไรด์ผสม 10^{-2} โมลาร์ ที่ความเป็นกรดเบสต่าง ๆ และ (ข) แผนภูมิพอร์เบซึที่สร้างขึ้นจากข้อมูลในรูป 2.3(ก)¹²

นอกจากนั้น E.D. Verink, Jr. ยังได้ศึกษาการละลายของโลหะผสมออกจากโลหะพื้น ที่สภาวะต่าง ๆ ของสารละลายด้วยการนำสารละลายที่ผ่านการทดลองวัดทางไฟฟ้าเคมีไปตรวจเช็คด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ซึ่งทำให้สามารถบอกความไม่เสถียรของโลหะผสมในสภาวะใด ๆ ของสารละลายได้

D.D. Macdonald, B.C. Syrett และ S.S. Wing¹³ รายงานค่าความต่างศักย์ของการผูกก่อนและไซคลิกโวลต์แอมโมแกรม (cyclic voltammograms) ของโลหะผสมเอไอเอสไอ 1010 (AISI 1010) เหล็กสแตนเลสชนิดอีไบรท์ 26-1 (E-Brite 26-1 stainless steel) โลหะผสมเฮเนส 20 มอด (Haynes alloy 20 Mod) คาร์เพนเทอร์ 20 ซีบี-3 (Carpenter Cb-3) โลหะผสมอินโคเนล 625 (Inconel alloys 625) โลหะผสมแฮสเทลลอยจี (Hastelloy alloy G) โลหะผสมแฮสเทลลอยซี 276 (Hastelloy alloy C-276) ไทเทเนียม 50 เอ (Titanium 50A) และไทโคด 12 (Ticode 12) ในน้ำพุร้อนที่มีปริมาณน้ำเกลือสูงที่อุณหภูมิ 250°C และได้สร้างแผนภูมิพอร์เบซสำหรับโลหะบริสุทธิ์ (Fe, Ni, Cr, Ti) ในน้ำเกลือที่ 25°C และ 250°C

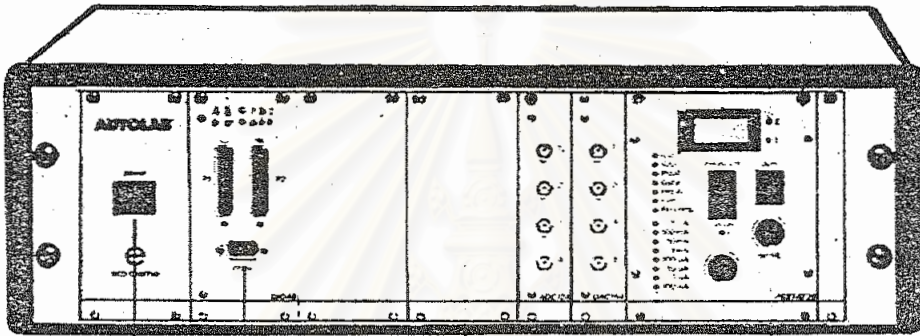
S. Nivitchanyong และ S. Daopiset⁶ ทำการทดลองศึกษาพฤติกรรมความต้านทานการผูกก่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316 ในน้ำประปาที่เติมคลอรีนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป คลอรีนจะแตกตัวเป็นคลอไรด์ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในน้ำมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปพบว่าปริมาณคลอไรด์อาจสูงถึง 600 ppm และค่าความเป็นกรดเบสของน้ำจะลดลงจนมีค่าเท่ากับ 2

เนื่องจากในประเทศไทยมีการนำเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำไปใช้ทำท่อในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง¹⁴ ประกอบกับจากการค้นคว้าไม่พบว่ามีผู้ใดทำการทดลองศึกษาและสร้างแผนภูมิพอร์เบซของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสำหรับทำท่อประปา ดังนั้นการสร้างแผนภูมิพอร์เบซของเหล็กกล้าชนิดนี้ในสารละลายที่มีคลอไรด์เป็นส่วนผสมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ นับว่ามีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำนายการผูกก่อน การเลือกวัสดุเพื่อใช้ในการทำท่อ และการเลือกใช้ท่อที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสภาวะที่เกิดการผูกก่อนน้อยหรือไม่เกิดการผูกก่อนเลย

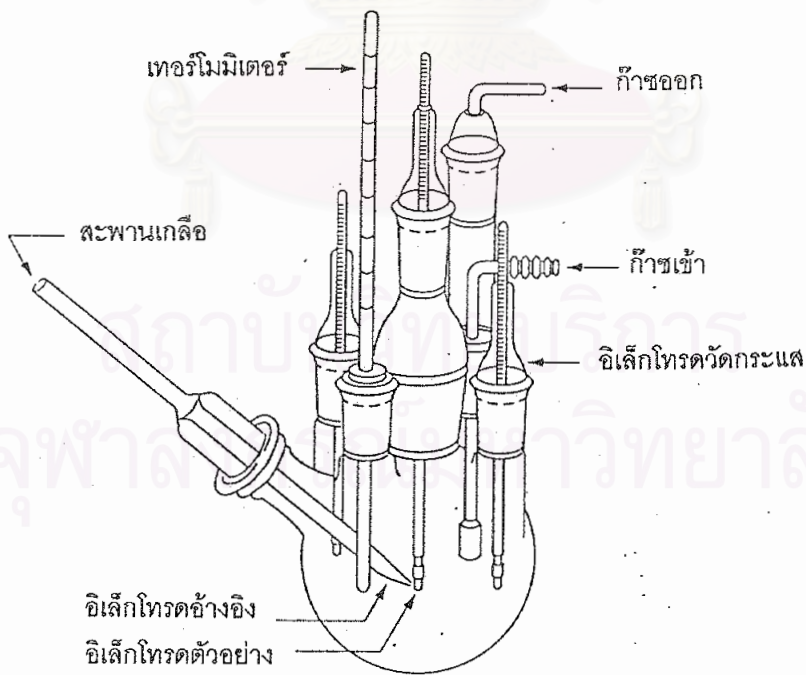
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 เทคนิคโพลาริเซชัน

เป็นเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโลหะตัวอย่างในรูปกราฟ^{15,16} แล้วทำการศึกษาสภาวะของโลหะจากลักษณะกราฟที่ได้ เครื่องโพเทนชิโอสแตทจะป้อนพลังงานแก่เซลล์ (รูปที่ 2.4) เพื่อเร่งการผุกร่อนของโลหะตัวอย่างในสารละลายที่ใช้ทดสอบ โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ค่าต่ำกว่าศักย์การผุกร่อนของโลหะ (Ecor) ในสารละลายนั้นและเพิ่มค่าขึ้นด้วยอัตราเร็วคงที่ ได้รูปกราฟมีลักษณะดังรูปที่ 2.5

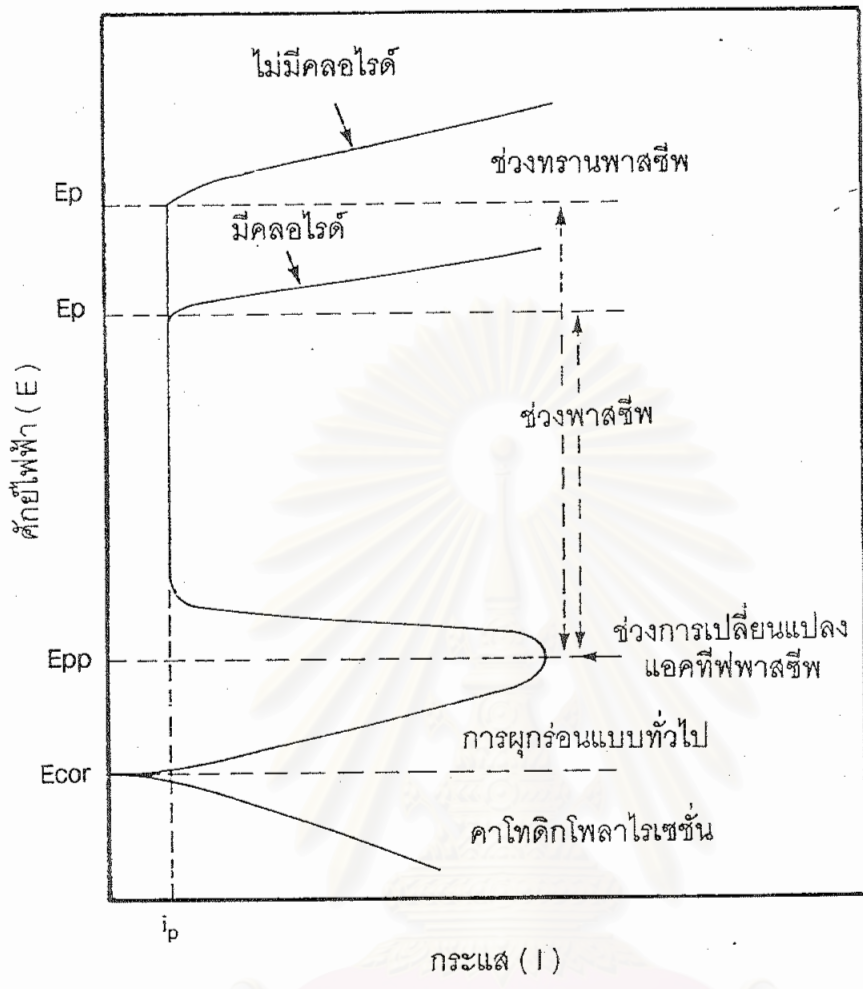


(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 (ก) เครื่องโพเทนชิโอสแตท (ข) เซลล์ไฟฟ้า⁸



รูปที่ 2.5 แสดงส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญของเส้นโพลาริเซชัน⁸

ส่วนของเส้นโค้งก่อนการผุกร่อนคือ คาโทดิกโพลาไรเซชัน (cathodic polarization) และเปลี่ยนเป็นอะโนดิกโพลาไรเซชัน (anodic polarization) เมื่อเกิดการผุกร่อน (พิจารณาจากรูปที่ 2.5 อะโนดิกโพลาไรเซชันคือเส้นกราฟส่วนที่อยู่เหนือคาโทดิกโพลาไรเซชัน) ค่าศักย์ไฟฟ้าของการผุกร่อนหรือ Ecor คือจุดตัดของเส้นคาโทดิกและเส้นอะโนดิก เมื่อป้อนศักย์เกินค่า Ecor กระแสจะเพิ่มขึ้นตามกฎของโอห์ม ($E=IR$) เรียกเส้นกราฟช่วงนี้ว่าการผุกร่อนแบบทั่วไป เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อถึงจุดหนึ่งกระแสจะหยุดและกลับลดลงเนื่องจากเกิดฟิล์มพาสซีฟ เรียกกราฟช่วงนี้ว่า ช่วงการเปลี่ยนแปลงแอคทีฟพาสซีฟ (active-passive transition) และค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เรียกว่า ศักย์โพรมาร์พาสซีเวชัน (primary passivation potentials) ใช้สัญลักษณ์ Epp จากนั้นทำการป้อนศักย์ต่อ กระแสจะเริ่มลดลงจนคงที่ที่ค่าหนึ่ง เรียกกระแสที่จุดนี้ว่ากระแสพาสซีฟ ใช้

สัญลักษณ์ Ip และช่วงกราฟที่กระแสดังนี้เรียกว่าช่วงพาสซีฟ (passive zone) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวที่แสดงถึงความทนทานของฟิล์ม เมื่อเพิ่มศักย์ต่อ ฟิล์มพาสซีฟจะแตก กระแสจะเพิ่มอย่างรวดเร็วเรียกช่วงนี้ว่าช่วงทรานพาสซีฟ (tranpassive zone) ศักย์ที่จุดนี้แสดงการผุกร่อนเฉพาะที่โดยเฉพาะการผุกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) เรียกจุดนี้ว่า E_p °

จากรูปที่ 2.5 เปรียบเทียบเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองหาเส้นโพลาริเซชันของโลหะตัวอย่างในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ และสารละลายที่มีคลอไรด์ พบว่า เส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองในสารละลายที่มีคลอไรด์จะให้ค่า E_p ต่ำกว่า และมีความกว้างช่วงพาสซีฟแคบกว่าเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์

ในสถานะที่โลหะตัวอย่างเป็นโลหะผสม และสารละลายที่ใช้ทดสอบมีไอออนหลายชนิดละลายอยู่ในสารละลาย ตัวอย่างเช่น คลอไรด์ไอออน (Cl^-) ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) โครเมตไอออน ($Cr_2O_3^{2-}$) ไบคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) และฟอสเฟตไอออน (PO_4^{2-}) เป็นการยากที่จะพิจารณาได้ว่าไอออนเหล่านี้มีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการผุกร่อนของโลหะผสมหรือไม่ อีกทั้งธาตุผสมต่าง ๆ ในโลหะผสมซึ่งอาจอยู่ในรูปสารละลายของแข็งหรือสารประกอบนั้น อาจแสดงหรือไม่ได้แสดงพฤติกรรมในระบกกัลวานิกคู่ (galvanic couple)

ดังนั้นเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดสอบโลหะผสมในสารละลายสถานะการใช้งาน จึงเป็นเส้นโค้งแสดงผลต่างของผลรวมกระแสจากปฏิกิริยาอโนดิก (total anodic current) กับผลรวมกระแสจากปฏิกิริยาคาโทดิก (total cathodic current) ในสถานะที่ใช้งาน ทำให้แผนภูมิพอร์เบตซึ่งได้จากเส้นโพลาริเซชันจากการทดลองมีความถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริง มากกว่าแผนภูมิพอร์เบตที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์

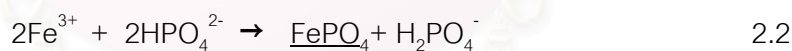
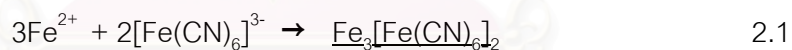
2.2.2 การวิเคราะห์เคมีเชิงคุณภาพ

การวิเคราะห์เคมีเชิงคุณภาพเป็นสาขาหนึ่งทางเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับการหาส่วนประกอบทางเคมีของสารที่ไม่ทราบ (unknow substances) โดยไม่สนใจว่าสารที่ไม่ทราบนั้นจะมีผลอยู่ในปริมาณเท่าไร วิธีและเทคนิคการวิเคราะห์จะแบ่งโดยใช้ขนาดของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์แบบต่าง ๆ^{17,18} แสดงดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวิเคราะห์และปริมาณสารตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

วิธีการวิเคราะห์	ปริมาณของสารตัวอย่าง
การวิเคราะห์ระดับมหภาค (Macro analysis)	0.1-10.0 กรัม
การวิเคราะห์ระดับกึ่งจุลภาค (Semimicro analysis)	10-100 มิลลิกรัม
การวิเคราะห์ระดับจุลภาค (Micro analysis)	1-10 มิลลิกรัม
การวิเคราะห์ระดับจุลภาคยิ่งยวด (Ultramicro analysis)	น้อยกว่า 1 มิลลิกรัม

เนื่องจากระหว่างทำการทดลองหาเส้นโพลาริเซชัน เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะเกิดการฟูก่อน ทำให้มีไอออนของเหล็กและไอออนของธาตุซึ่งมีอยู่ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำละลายอยู่ในสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ ดังนั้นจึงสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์เคมีเชิงคุณภาพเพื่อหาไอออนของธาตุที่ละลายในสารละลายที่ใช้ทำการทดสอบได้ เนื่องจากเหล็กตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและมีแมงกานีสผสม มีความเป็นไปได้ที่ปฏิกิริยาอะโนดิกจะมีผลจากธาตุแมงกานีสร่วมกับธาตุเหล็ก ในที่นี้จึงทำการตรวจสอบไอออนโลหะ เฉพาะโลหะเหล็กและแมงกานีสเมื่อเหล็กที่ทดสอบอยู่ในสภาวะที่เกิดการฟูก่อนเพื่อเป็นแนวทางหาเหตุผลทางไฟฟ้าเคมีอธิบายความเป็นไปได้ของกลไกที่เกิดขึ้น สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบหาไอออนของเหล็กและแมงกานีสแสดงดังตารางที่ 2.2 และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 2.1 - 2.4 ¹⁹⁻²⁰



จากสมการที่ 2.1 ถ้าในสารละลายที่ต้องการตรวจสอบมีเหล็กประจุสองบวกอยู่ เมื่อทำการหยดโพแทสเซียมเฟอโรไซยาไนด์ ($\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) ลงในสารละลาย พบว่าเหล็กประจุสองบวกจะทำปฏิกิริยากับเฟอโรไซยาไนด์ ($[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$) ซึ่งแตกตัวจากโพแทสเซียมเฟอโรไซยาไนด์ ทำให้ได้ตะกอนสีฟ้าเข้มของ $\text{Fe}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]_2$ (สารประกอบที่ถูกขีดเส้นใต้ในสมการ)

ตาราง 2.2 แสดงสารที่ใช้ในการทดสอบอ็อนของเหล็กและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

สารประกอบ	สารเคมีที่ใช้ทดสอบ	สภาวะการทดสอบ	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น	สมการ
Fe^{2+} (เขียว)	$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	สารละลายน้ำ	เกิดตะกอนสีฟ้าเข้มของ $\text{Fe}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]_2$	2.1
Fe^{3+} (เหลือง-ส้ม)	Na_2HPO_4	มี Fe^{3+} มาก เกินพอ	เกิดตะกอนสีเหลืองอ่อนของ FePO_4	2.2
Mn^{2+} (ชมพู)	KClO_3	HNO_3 เข้มข้น	ได้ตะกอนสีดำของ MnO_2	2.3
MnO_4^-	H_2O_2	กรด	รีดิวส์เป็น Mn^{2+}	2.4

จากสมการที่ 2.2 ถ้าในสารละลายที่ต้องการตรวจสอบมีเหล็กประจุสามบวกอยู่ เมื่อทำการหยด Na_2HPO_4 ลงในสารละลาย พบว่า HPO_4^{2-} ซึ่งแตกตัวจาก Na_2HPO_4 จะแตกตัวให้ H_2PO_4^- และเหล็กประจุสามบวกจะจับตัวกับ PO_4^{3-} กลายเป็น FePO_4 (สารประกอบที่ถูกขีดเส้นใต้ในสมการ) ซึ่งมีตะกอนสีเหลืองอ่อน

จากสมการที่ 2.3 ถ้าในสารละลายที่ต้องการตรวจสอบมีแมงกานีสประจุสองบวกอยู่ เมื่อทำการหยด KClO_3 ลงในสารละลาย พบว่า ClO_3^- ซึ่งแตกตัวจาก KClO_3 จะแตกตัวได้ ClO_2 และแมงกานีสประจุสองบวกจะจับตัวกับออกซิเจนกลายเป็น MnO_2 (สารประกอบที่ถูกขีดเส้นใต้ในสมการ) ซึ่งมีตะกอนสีดำ

จากสมการที่ 2.4 ถ้าในสารละลายที่ต้องการตรวจสอบมี MnO_4^- อยู่ เมื่อทำการหยดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในสารละลายในสภาวะการทดสอบซึ่งเป็นกรด พบว่า MnO_4^- จะแตกตัวเป็นแมงกานีสสองบวกละลายอยู่ในสารละลาย (แมงกานีสสองบวกไม่ตกตะกอน) ซึ่งจะต้องนำไปทดสอบหาแมงกานีสสองบวกอีกครั้งตามสมการที่ (3) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น หากได้ตะกอนสีดำของ MnO_2 สามารถสรุปได้ว่าในสารละลายที่ต้องการตรวจสอบมี MnO_4^- อยู่ (สำหรับในการวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหา MnO_4^- นั้น จะต้องทำการกำจัดอ็อนของแมงกานีสสองบวกออกจากสารละลายที่ต้องการตรวจสอบเสียก่อน มิฉะนั้นจะไม่สามารถสรุปได้ว่าในสารละลายที่ต้องการตรวจสอบมี Mn^{2+} หรือ MnO_4^- ละลายอยู่)

บทที่ 3

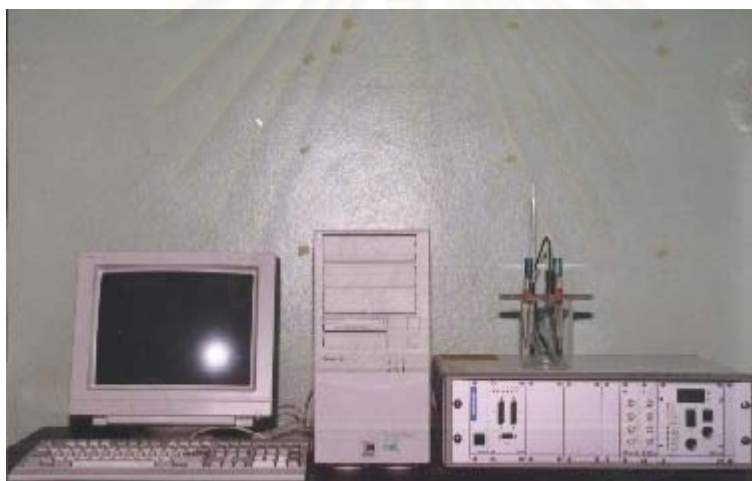
ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

3.1 เตรียมการทดลอง

3.1.1 เตรียมอุปกรณ์

1) เครื่องโพเทนชิโอสแตต (potentiostat)

เครื่องโพเทนชิโอสแตตที่ใช้เป็นระบบใช้งานได้หลากหลาย (General Purpose Electrochemical System , GPES) รุ่น PGSTAT 20 ลิขสิทธิ์ของบริษัท ออโต้แล็บ จำกัด (รูปที่ 3.1)



รูป 3.1 แสดงเครื่องโพเทนชิโอสแตต รุ่น PGSTAT 20

2) อิเล็กโทรดที่ใช้

- อิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) ที่ใช้คือ Ag/AgCl (รูปที่ 3.2)
- อิเล็กโทรดวัดกระแส (counter electrode) ที่ใช้คือแพลทตินัม (รูปที่ 3.3)
- อิเล็กโทรดตัวอย่าง (working electrode) คือ ชิ้นงานทดสอบ

3) เครื่องกวน

เครื่องกวนที่ใช้คือ VARIOMAG โดยใช้ควบคุมอัตราการกวนสารละลายให้คงที่

4) เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ

เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่ใช้คือ YSI Model Oxygen Meter

- 5) เครื่องล้างชิ้นงานโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิก (ultrasonic cleaning)
 เครื่องล้างชิ้นงานโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิก ที่ใช้คือ Metason 60



รูป 3.2 แสดงอิเล็กโทรดอ้างอิง (Ag/AgCl)



รูป 3.3 แสดงอิเล็กโทรดวัดกระแส (Pt)

3.1.2 เตรียมสารละลายคลอไรด์

- สารละลายที่ใช้จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ 0 , 200 , 400 และ 600 พีพีเอ็มโดยปริมาตร โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นตัวปรับความเข้มข้น

- ปรับค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 10 โมลต่อลิตร และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลต่อลิตร

3.1.3 เตรียมชิ้นงานทดลอง

1) ตัดแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (ส่วนผสมเคมีดังตารางที่ 3.1) ความหนา 1.2 มิลลิเมตร ให้มีมิติขนาด 10x50 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ใช้ทำท่อน้ำประปา

ชนิดเหล็ก	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Al
SPHT1	0.043	0.238	0.008	0.011	0.012	0.067
SPHT2	0.051	0.250	0.007	0.027	0.017	0.065

2) ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีจากชิ้นตัวอย่างด้วยเครื่อง Emission spectrometer

3) ขัดผิวและขัดแต่งขอบชิ้นงาน ด้วยกระดาษทราย เบอร์ 80 180 240 400 600 800 1000 และ 1200

4) ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตน เพื่อล้างสิ่งสกปรกและคราบไขมัน ด้วยเครื่องล้างชิ้นงานโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิก

5) เก็บชิ้นงานไว้ในภาชนะแก้วป้องกันความชื้น (desiccator) 1 วัน เพื่อให้ฟิล์มออกไซด์เสถียร

3.1.4 เตรียมสารละลายที่ใช้ทดสอบหาไอออนที่ละลายออกจากผิวโลหะ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงสารละลายที่ใช้ในการวิเคราะห์เคมีเชิงปริมาณ

ไอออนที่ทดสอบ	สารละลายที่ใช้ในการทดสอบ
Fe^{2+}	$K_3[Fe(CN)_6]$ 0.2 โมล/ลิตร
Fe^{3+}	Na_2HPO_4 1 โมล/ลิตร
Mn^{2+}	$KClO_3$ 1 โมล/ลิตร, HNO_3 6 โมล/ลิตร
MnO_4^-	H_2O_2 3% โดยปริมาตร

3.2 การออกแบบการทดลอง

เนื่องจากขอบเขตของการทดลองเป็นการสร้างแผนภูมิพอร์เบซจากเส้นโพลาริเซชัน จำเป็นต้องทำให้สภาวะในการทดลองคงที่ ดังนั้นจึงต้องทำการหาตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลอง ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการทำให้ออกซิเจนจากอากาศอิ่มตัว และอัตราการสแกนของเครื่องโพเทนชิโอสแตทที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังต้องทำการหาประจุอินของโลหะที่ละลายในสารละลายอีกด้วยดังนั้นในการทดลองเพื่อหาแผนภูมิพอร์เบซของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ สามารถออกแบบการทดลองได้เป็น 4 การทดลองย่อยคือ

3.2.1 การทดลองที่ 1 เนื่องจากออกซิเจนสามารถเกิดปฏิกิริยาคาโทดิกซึ่งมีผลต่อรูปร่างของเส้นโพลาริเซชัน ในการทดลองจึงต้องควบคุมปริมาณออกซิเจนในคงที่ โดยกำจัดออกซิเจนออกจากสารละลายหรือทำให้สารละลายอิ่มตัวด้วยออกซิเจน ในสภาวะการใช้งานจริงย่อมมีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลายในระดับหนึ่ง เพื่อความเหมาะสมกับการทดลองในที่นี้จึงทำให้ออกซิเจนอิ่มตัวด้วยอากาศเพื่อความสะดวกและให้ปริมาณออกซิเจนคงที่ การทดลองที่ 1 จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเวลาที่ทำให้ออกซิเจนในสารละลายอิ่มตัวด้วยอากาศ ค่าเวลาที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.2.2 การทดลองที่ 2 ในการหาเส้นโพลาริเซชันด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท ค่าอัตราการสแกน (ค่าอัตราการเพิ่ม/ลดค่าความต่างศักย์) จะมีผลต่อรูปร่างของเส้นโพลาริเซชัน เนื่องจากต้องการให้สภาวะการทดลองใกล้เคียงกับสมดุลมากที่สุด การใช้อัตราการสแกนที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ได้ข้อมูลที่ผิดพลาด การทดลองที่ 2 จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราการสแกนที่เหมาะสมโดยค่าที่เหมาะสมคือ อัตราการเพิ่มค่าความต่างศักย์ที่เร็วที่สุดที่ให้ค่า E_{cor} , I_{cor} , I_p และค่า E_p คงที่ (ค่า E_{cor} , I_{cor} , I_p และ E_p แสดงในรูปที่ 2.4) แม้จะเปลี่ยนอัตราการสแกนให้ช้ากว่านี้ ค่า E_{cor} , I_{cor} , I_p และค่า E_p จะไม่เปลี่ยนแปลง และจากผลที่ได้จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.2.3 การทดลองที่ 3 มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนภูมิพอร์เบซของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ในสารละลายที่มีคลอไรด์ผสม มีปริมาณออกซิเจนจากอากาศอิ่มตัว อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยอาศัยข้อมูลต่าง ๆ จากการทดลองที่ 1 (เวลาที่ใช้ในการพ่นอากาศ) และการทดลองที่ 2 (อัตราการสแกนที่เหมาะสม) วัดเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายคลอไรด์ที่มีค่าความเป็นกรดเบสตั้งแต่ 2 - 12 แล้วสร้างแผนภูมิพอร์เบซจากเส้นโพลาริเซชัน

3.2.4 การทดลองที่ 4 มีวัตถุประสงค์เพื่อหาไอออนของโลหะ (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , MnO_4^-) ที่ละลายในสารละลาย เพื่อนำไอออนโลหะที่ตรวจพบมาใส่ในขอบเขตของแผนภูมิพอร์เบิร์ต

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การทดลองที่ 1 การหาเวลาที่ใช้ในการทำให้อากาศอิมตัวในสารละลาย

1) เตรียมสารละลาย 1-4 ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ และความเป็นกรดเบสของสารละลายดังตารางที่ 3.3 ตัวอย่างละ 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร (เท่ากับปริมาณสารละลายที่ใช้ในการทดลอง)

ตารางที่ 3.3 แสดงสารละลายที่ใช้ในการทดลองที่ 1

ค่าความเป็นกรดเบสของสารละลาย	ความเข้มข้นคลอไรด์ (พีพีเอ็ม)	
	0	600
2	สารละลาย 1	สารละลาย 2
12	สารละลาย 3	สารละลาย 4

- 2) วัดค่าปริมาณออกซิเจนเริ่มต้นในสารละลาย 1
- 3) ใช้เครื่องพ่นอากาศพ่นลงในสารละลาย 1 จับเวลาและวัดปริมาณออกซิเจนทุก ๆ 1 นาทีจนปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายคงที่ (อิมตัว) บันทึกผล
- 4) ทำการทดลองซ้ำขั้นตอน 2) และ 3) โดยเปลี่ยนจากสารละลาย 1 เป็นสารละลาย 2 3 และ 4 ตามลำดับ
- 5) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนและเวลา แล้วหาเวลาที่ใช้พ่นอากาศที่เหมาะสมกับสารละลายต่าง ๆ นำผลการทดลองที่ได้ไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.3.2 การทดลองที่ 2 การหาอัตราการสแกนที่เหมาะสมในการหาเส้นโพลาริเซชัน

- 1) เตรียมสารละลาย 1-4 ดังตารางที่ 3.3 ตัวอย่างละ 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีปริมาณออกซิเจนอิมตัว (สภาวะเหมือนการทดลองจริง)
- 2) ทำการทดลองหาเส้นโพลาริเซชันของสารละลาย 1 โดยเลือกใช้อัตราการสแกนที่ 1 0.5 , 0.1 และ 0.05 มิลลิโวลต์ต่อวินาที เพื่อหาค่าอัตราการสแกนที่เหมาะสม โดยค่าที่เหมาะสม

คือ อัตราการสแกนที่เร็วที่สุดที่ให้ค่า E_{cor} , I_{cor} , I_p และค่า E_p คงที่ แม้จะเปลี่ยนอัตราการสแกนให้ช้ากว่านี้ ค่า E_{cor} , I_{cor} , I_p และค่า E_p จะไม่เปลี่ยนแปลง

3) เมื่อได้อัตราการสแกนที่เหมาะสมแล้ว ให้ทำการทดลองที่อัตราการสแกนนั้นซ้ำอีก 5 ครั้ง เพื่อยืนยันความถูกต้อง

4) ทำการทดลองทั้งหมดซ้ำกับสารละลายที่ 2-4 นำผลการทดลองที่ได้ไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.3.3 การทดลองที่ 3 การหาเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเพื่อนำไปสร้างแผนภูมิพอร์เบตซ์

1) นำชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 และ SPHT2 ที่เตรียมไว้ในหัวข้อ 3.1.3 ไปทดลองหาเส้นโพลาริเซชันด้วยวิธีวัดเส้นโพลาริเซชันโดยใช้สภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.4

- สารละลายอิมิตัวด้วยออกซิเจนจากอากาศ โดยใช้เวลาในการฟ้นอากาศตามผลการทดลองที่ 3.3.1
- อุณหภูมิ 25°C
- อัตราการสแกนมีค่า 0.1 mV/s (ผลการทดลองที่ 3.3.2)
- ทำซ้ำเงื่อนไขละ 5 ตัวอย่าง

2) สร้างแผนภูมิพอร์เบตซ์

3.3.4 การทดลองที่ 4 การตรวจสอบไอออนของโลหะ ($\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mn}^{2+}, \text{MnO}_4^-$) ที่ละลายในสารละลาย

1) นำชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 ไปทดลองหาเส้นโพลาริเซชันโดยใช้สภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.5

- สารละลายอิมิตัวด้วยออกซิเจนจากอากาศ
- อุณหภูมิ 25°C
- อัตราการสแกนมีค่า 0.1 mV/s

โดยทำการเก็บสารละลายตัวอย่างซึ่งมีความเข้มข้นคลอไรด์และค่าความเป็นกรดเบส ดังตารางที่ 3.5 ตัวอย่างละ 3 ครั้ง ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 3.4-3.9 และเนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT 2 มีส่วนผสมคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT 1 จึงอนุมานว่าผลการตรวจสอบไอออนของโลหะที่ละลายในสารละลายมีความคล้ายคลึงกันจึงไม่ได้ทำการทดลอง

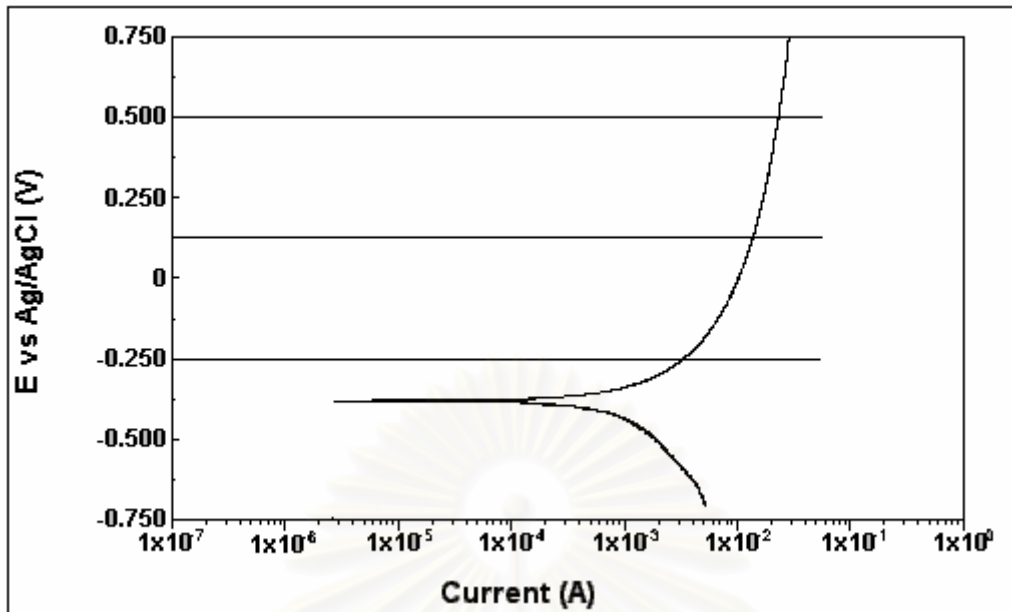
ตารางที่ 3.4 แสดงจำนวนชิ้นงานและเงื่อนไขการทดลองเพื่อหาเส้นโพลาริเซชันของ
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 และ SPHT2

ค่าความ เป็นกรด เบส	เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT 1				เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT 2			
	ความเข้มข้นคลอไรด์ (พีพีเอ็ม)				ความเข้มข้นคลอไรด์ (พีพีเอ็ม)			
	0	200	400	600	0	200	400	600
2	√	√	√	√	√	√	√	√
4	√	√	√	√	√	√	√	√
6	√	√	√	√	√	√	√	√
8	√	√	√	√	√	√	√	√
9	√	-	-	-	√	-	-	-
10	√	√	√	√	√	√	√	√
11	-	√	√	√	-	-	-	-
11.5	-	√	√	√	-	√	√	√
12	√	√	√	√	√	√	√	√
12.5	-	√	√	√	-	√	√	√

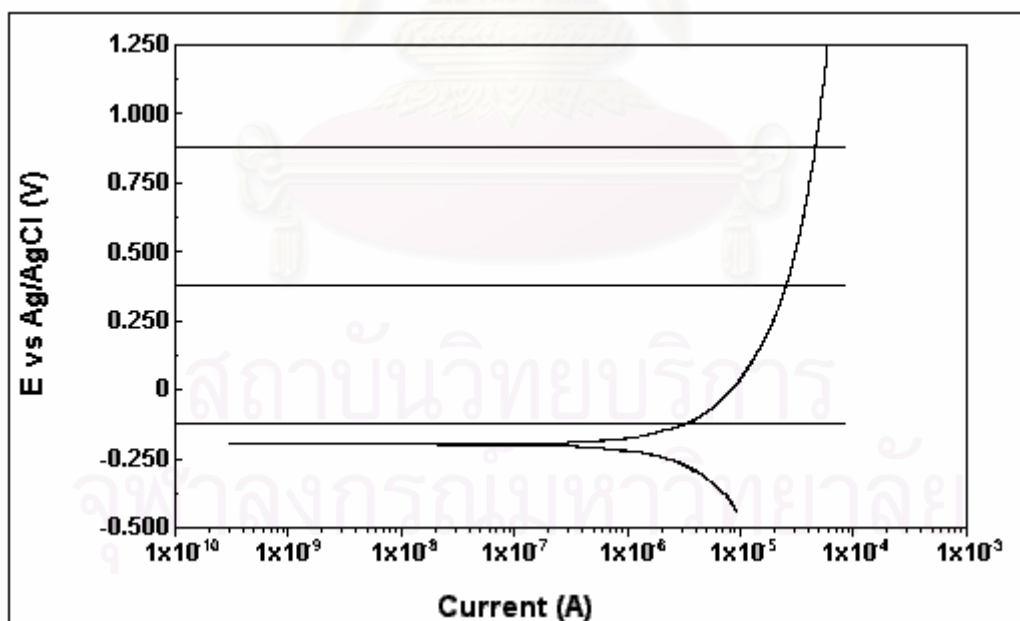
หมายเหตุ - คือ ไม่ได้ทำการทดลอง

ตารางที่ 3.5 แสดงเงื่อนไขการตรวจสอบอิออนโลหะที่ละลายในสารละลายของเหล็ก SPHT 1

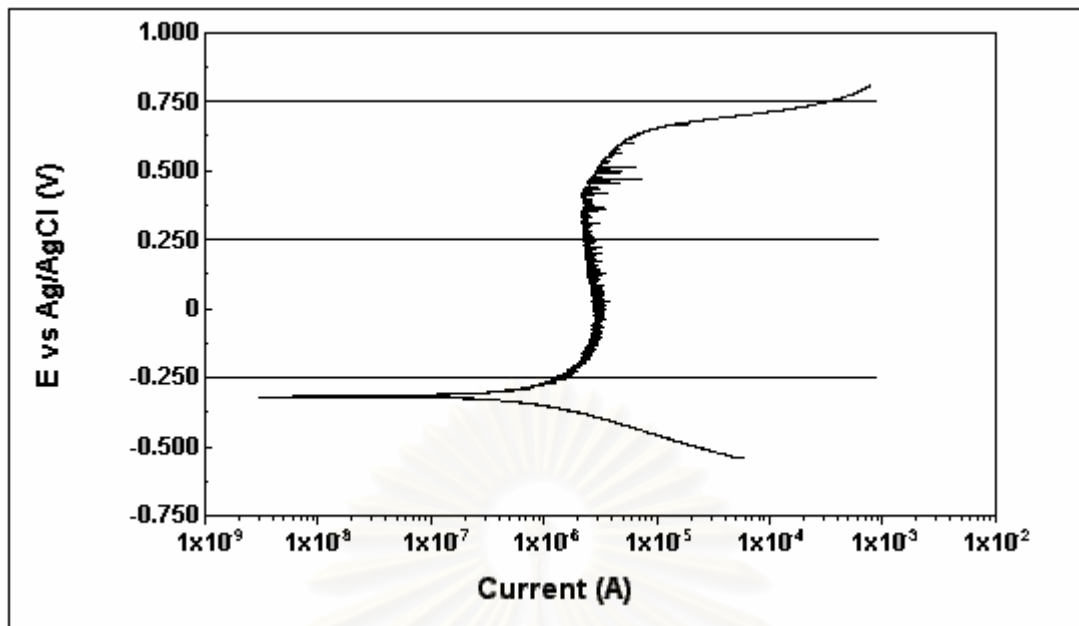
ค่าความเป็นกรดเบสของ สารละลาย	ความเข้มข้นคลอไรด์ (พีพีเอ็ม)	
	0	600
2	√	√
6	√	√
12	√	√



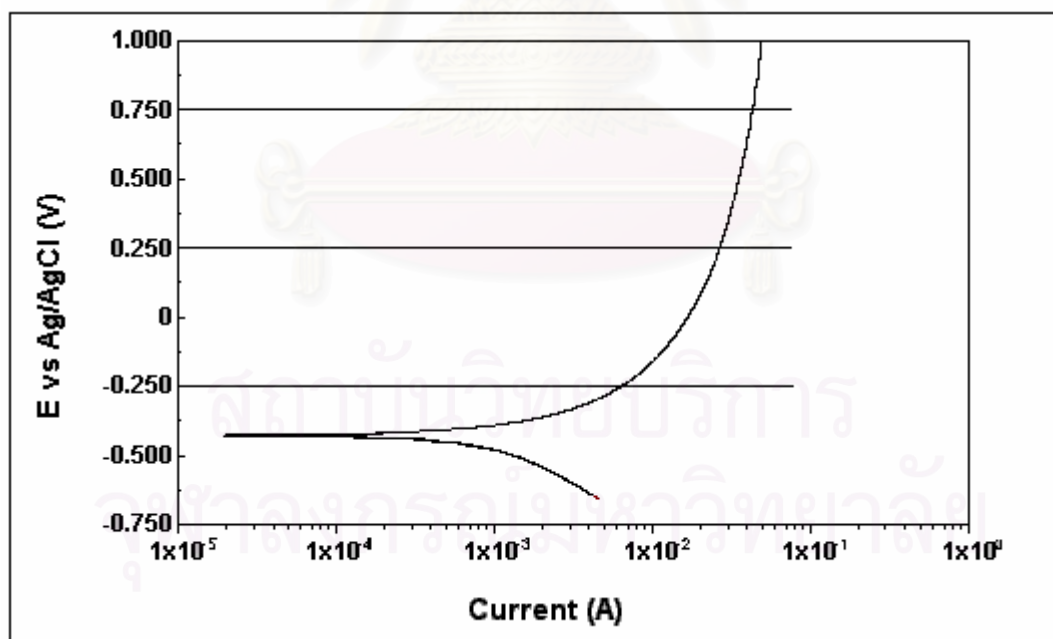
รูปที่ 3.4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ทำการชักสารละลายตัวอย่างเพื่อตรวจสอบอิออนของโลหะที่ละลายในสารละลายจากการทดลองหาเส้นโพลาร์ไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2



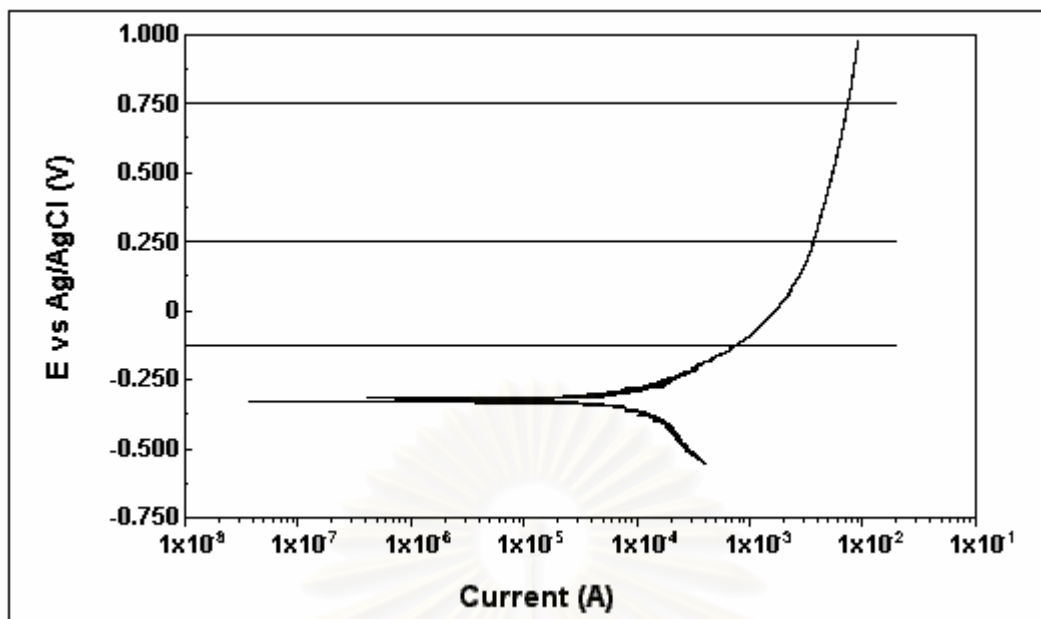
รูปที่ 3.5 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ทำการชักสารละลายตัวอย่างเพื่อตรวจสอบอิออนของโลหะที่ละลายในสารละลายจากการทดลองหาเส้นโพลาร์ไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 6



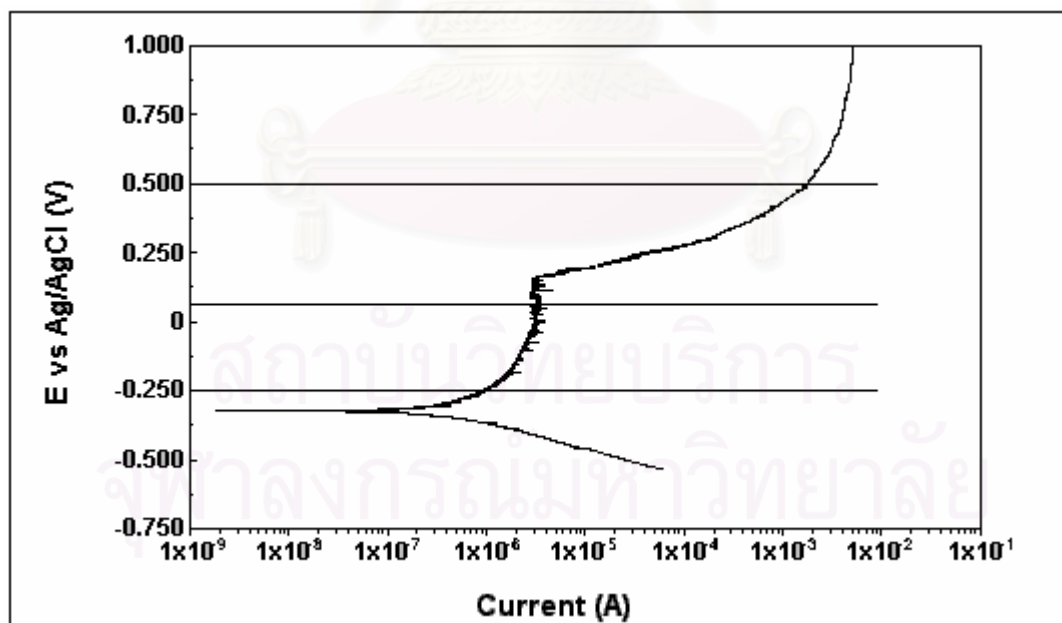
รูปที่ 3.6 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ทำการชักสารละลายตัวอย่างเพื่อตรวจสอบอิออนของโลหะที่ละลายในสารละลายจากการทดลองหาเส้นโพลาร์ไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12



รูปที่ 3.7 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ทำการชักสารละลายตัวอย่างเพื่อตรวจสอบอิออนของโลหะที่ละลายในสารละลายจากการทดลองหาเส้นโพลาร์ไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2



รูปที่ 3.8 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ทำการชักสารละลายตัวอย่างเพื่อตรวจสอบไอออนของโลหะที่ละลายในสารละลายจากการทดลองหาเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 6



รูปที่ 3.9 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ทำการชักสารละลายตัวอย่างเพื่อตรวจสอบไอออนของโลหะที่ละลายในสารละลายจากการทดลองหาเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12

สำหรับในสารละลายซึ่งไม่มีคลอไรด์ และมีค่าความเป็นกรดเบส 2 (รูปที่ 3.4) จะทำการ
ชั้กตัวอย่างสารละลาย 3 ครั้ง ดังนี้

ครั้งที่ 1 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.25 V

ครั้งที่ 2 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.125 V

ครั้งที่ 3 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.5 V

สำหรับในสารละลายซึ่งไม่มีคลอไรด์ และมีค่าความเป็นกรดเบส 6 (รูปที่ 3.5) จะทำการ
ชั้กตัวอย่างสารละลาย 3 ครั้ง ดังนี้

ครั้งที่ 1 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.125 V

ครั้งที่ 2 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.375 V

ครั้งที่ 3 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.875 V

สำหรับในสารละลายซึ่งไม่มีคลอไรด์ และมีค่าความเป็นกรดเบส 12 (รูปที่ 3.6) จะทำ
การชั้กตัวอย่างสารละลาย 3 ครั้ง ดังนี้

ครั้งที่ 1 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.25 V

ครั้งที่ 2 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.25 V

ครั้งที่ 3 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.75 V

สำหรับในสารละลายซึ่งมีคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม และมีค่าความเป็นกรดเบส 2 (รูปที่ 3.7)
จะทำการชั้กตัวอย่างสารละลาย 3 ครั้ง ดังนี้

ครั้งที่ 1 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.25 V

ครั้งที่ 2 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.25 V

ครั้งที่ 3 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.75 V

สำหรับในสารละลายซึ่งมีคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม และมีค่าความเป็นกรดเบส 6 (รูปที่ 3.8)
จะทำการชั้กตัวอย่างสารละลาย 3 ครั้ง ดังนี้

ครั้งที่ 1 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.125 V

ครั้งที่ 2 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.25 V

ครั้งที่ 3 จะทำการชั้กตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.75 V

สำหรับในสารละลายซึ่งมีคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม และมีค่าความเป็นกรดเบส 12 (รูปที่ 3.9) จะทำการชักตัวอย่างสารละลาย 3 ครั้ง ดังนี้

ครั้งที่ 1 จะทำการชักตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.25 V

ครั้งที่ 2 จะทำการชักตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.06 V

ครั้งที่ 3 จะทำการชักตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.5 V

2) นำสารละลายคลอไรด์ที่ได้จากการทดลองมาทดสอบหาไอออนของเหล็กและแมงกานีส โดยใช้ $K_3[Fe(CN)_6]$, Na_2HPO_4 , $KClO_3$, HNO_3 และ H_2O_2 ในการทดสอบตามที่ได้อธิบายไว้ในตารางที่ 2.2

3) นำผลการวิเคราะห์หาไอออนของเหล็กและแมงกานีส เติมลงในแผนภูมิพอร์เบซที่ได้จากการทดลองที่ 3 แล้วเปรียบเทียบแผนภูมิพอร์เบซที่ได้กับแผนภูมิพอร์เบซของเหล็กบริสุทธิ์ในสารละลายน้ำ (รูปที่ 2.1)

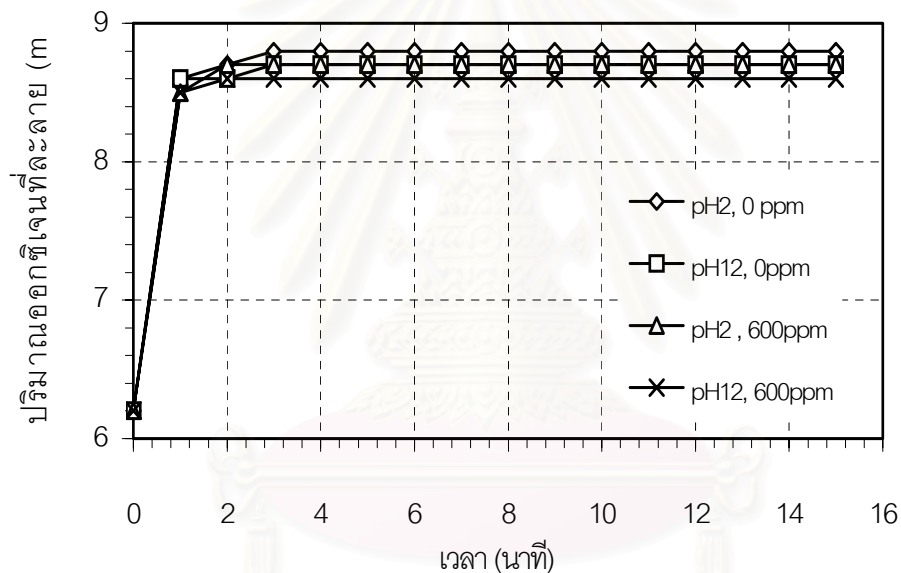
เนื่องจากในการทดลองนี้ไม่สามารถทำการหาสารประกอบของฟิล์มพาสซีฟได้ ดังนั้นในแผนภูมิพอร์เบซที่จะสร้างในบทต่อไป จะอ้างอิงชนิดของสารประกอบของชั้นฟิล์มพาสซีฟจากแผนภูมิพอร์เบซของเหล็กบริสุทธิ์ในสารละลายน้ำ (รูปที่ 2.1)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การหาเวลาผ่านอากาศเข้าไปในสารละลาย

จากการเก็บข้อมูลปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายที่เวลาต่าง ๆ ซึ่งข้อมูลแสดงในภาคผนวก ก นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาผ่านอากาศและปริมาณออกซิเจนดังแสดงในรูปที่ 5.1 พบว่าเมื่อให้สารละลายคลอไรด์ความเข้มข้น 600 พีพีเอ็ม ที่มีค่าความเป็นกรดเบส 2 และ 12 และน้ำบริสุทธิ์ที่มีความเป็นกรดเบส 2 และ 12 อิมิตด้วยออกซิเจนจากอากาศจะต้องใช้เวลา 4 นาที เพื่อพ่นอากาศเข้าไปในสารละลาย



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายคลอไรด์ 300 มิลลิตร กับเวลา ที่ค่าความเข้มข้นคลอไรด์และค่าความเป็นกรดเบสต่าง ๆ

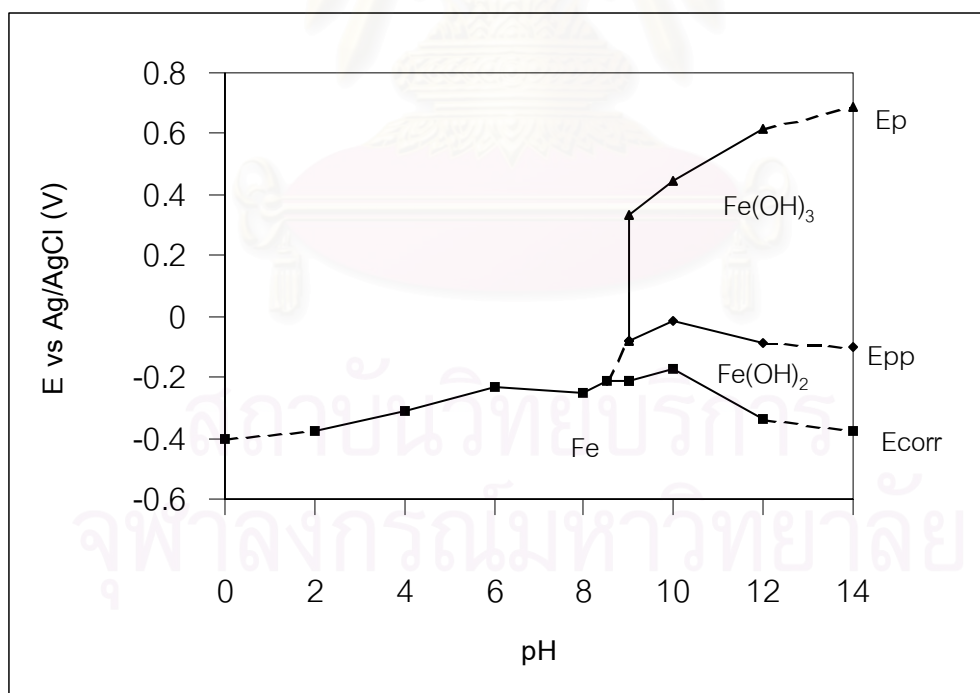
4.2 การหาอัตราการสแกนที่เหมาะสมในการวัดเส้นโพลาริเซชัน

ผลการวัดเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 ในสารละลายคลอไรด์ 0 และ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบส 2 และ 12 แสดงในภาคผนวก ข พบว่าอัตราการสแกนที่เหมาะสมคือ 0.1 mV/s อัตราการสแกนที่น้อยกว่านี้จะให้ลักษณะเส้นโพลาริเซชันที่มีค่า E_{cor} , E_{pp} และ E_p เกือบจะเป็นจุดเดียวกัน การเพิ่มอัตราการสแกนมากกว่านี้จะทำให้เส้นโพลาริ

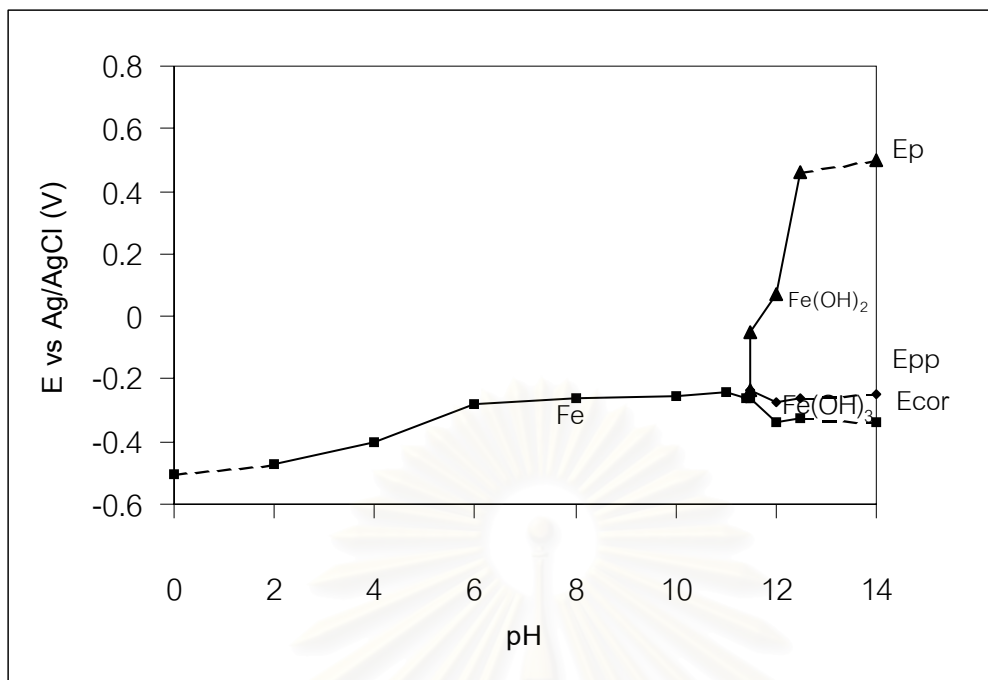
เซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 เปลี่ยนแปลง ในการทดลองต่อไปจะใช้ค่าอัตราการสแกน เพื่อวัดเส้นโพลาริเซชันของตัวอย่างคือ 0.1 mV/s

4.3 การวัดเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเพื่อนำไปสร้างแผนภูมิพอร์เบซ์

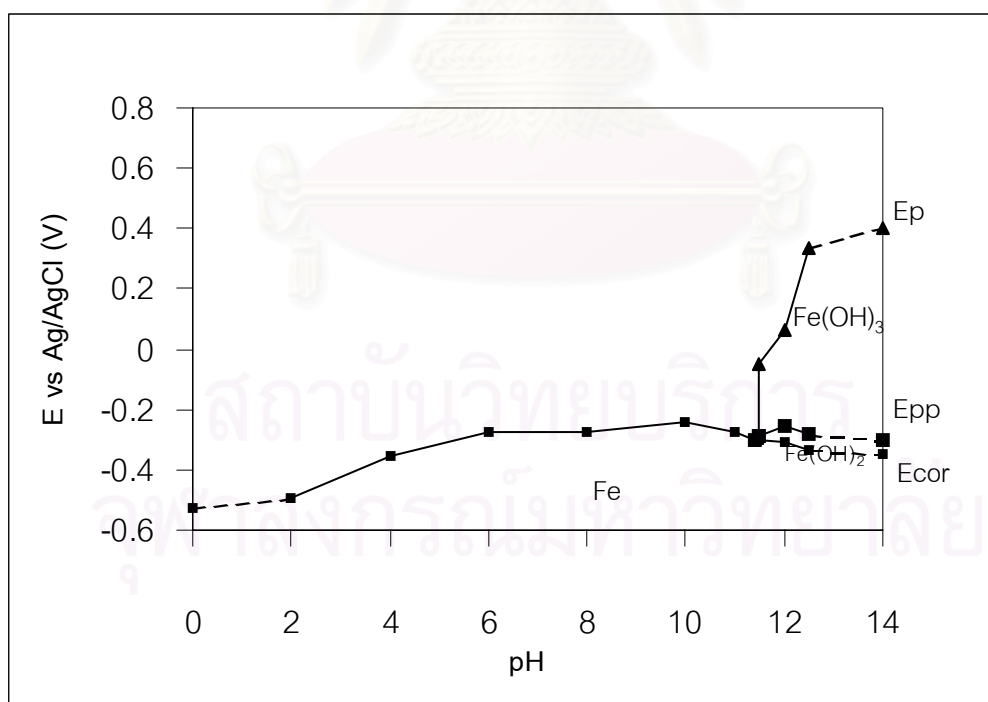
ผลการวัดเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 และ SPHT2 ในสารละลาย คลอไรด์ 0–600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสระหว่าง 0-12 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงใน ภาคผนวก ค จากเส้นโพลาริเซชันแต่ละเส้นนำมาหาค่า E_{cor} , E_{pp} และ E_p ตัวอย่างการหาค่า และผลการหาค่า E_{cor} , E_{pp} และ E_p แสดงในภาคผนวก ง และ จ ตามลำดับ จากค่า E_{cor} , E_{pp} และ E_p กับค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายนำมาสร้างแผนภูมิพอร์เบซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.2-4.9 ซึ่งจะเห็นว่า ในแผนภูมิพอร์เบซ์จะมีบริเวณที่แสดงว่าโลหะเสถียรไม่ผุกร่อน โลหะผุกร่อน และโลหะเกิดสภาวะพาสซีเวชันซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นการกัดกร่อน เส้นประในรูปแสดงการ คาดการณ์ซึ่งไม่สามารถทำการทดลองได้ บริเวณที่เป็น $Fe(OH)_2$ และ $Fe(OH)_3$ อ้างอิงจากรูปที่ 2.1 และบริเวณที่แสดงออกอนโลหะได้จากผลการทดลองที่ 4.4



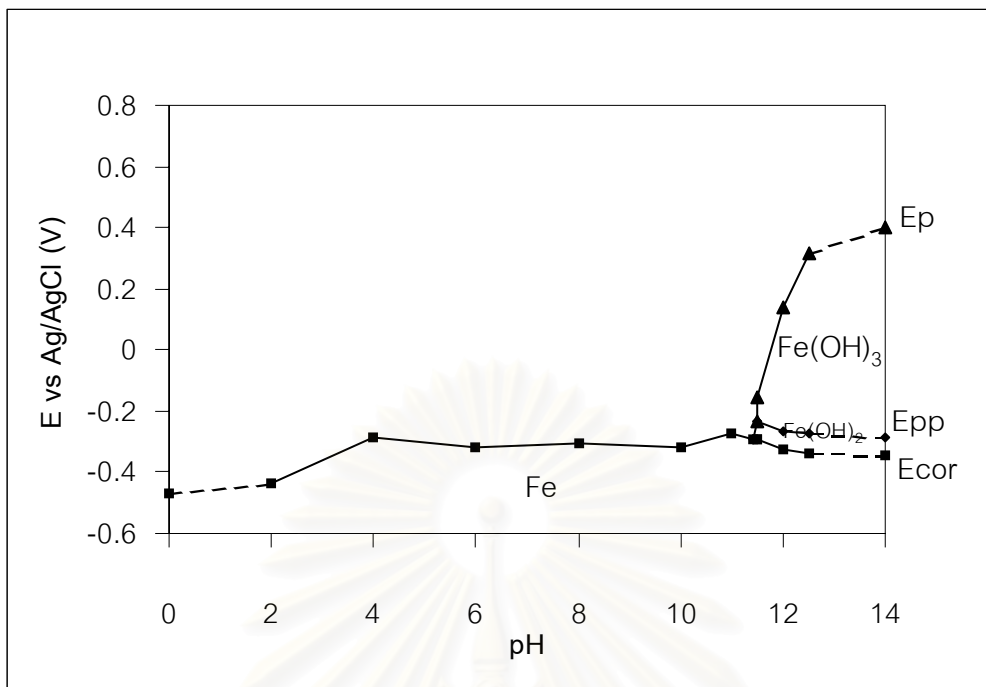
รูปที่ 4.2 แสดงแผนภูมิพอร์เบซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่ไม่มี คลอไรด์ อุณหภูมิ 25 °C (อ้างอิง $Fe(OH)_2$ และ $Fe(OH)_3$ จากรูปที่ 2.1)



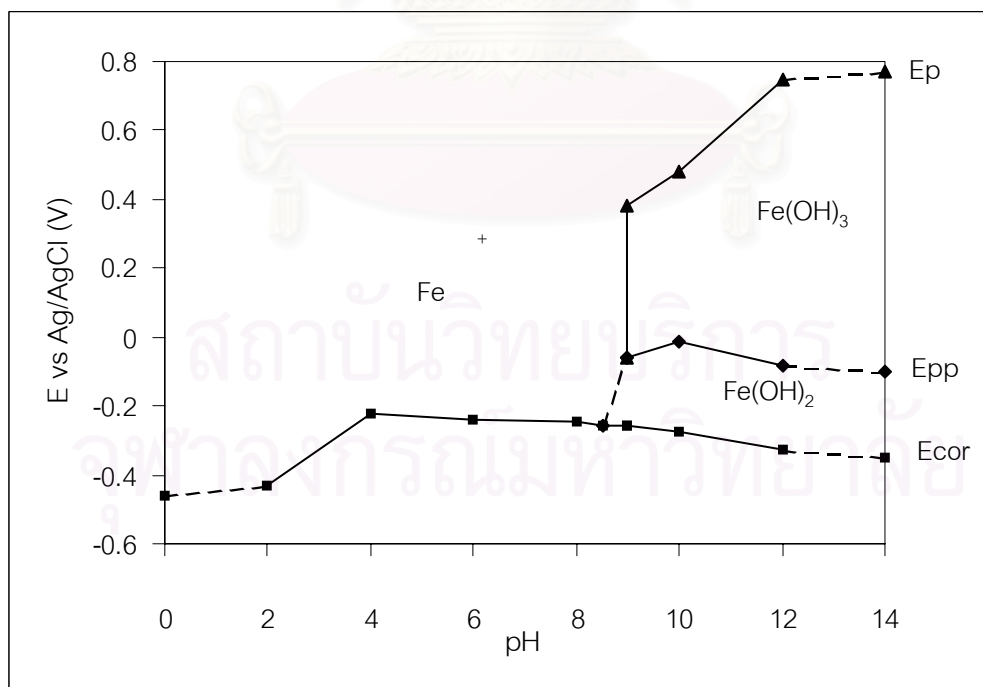
รูปที่ 4.3 แสดงแผนภูมิพอธิเบรซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 °C (อ้างอิง Fe(OH)₂ และ Fe(OH)₃ จากรูปที่ 2.1)



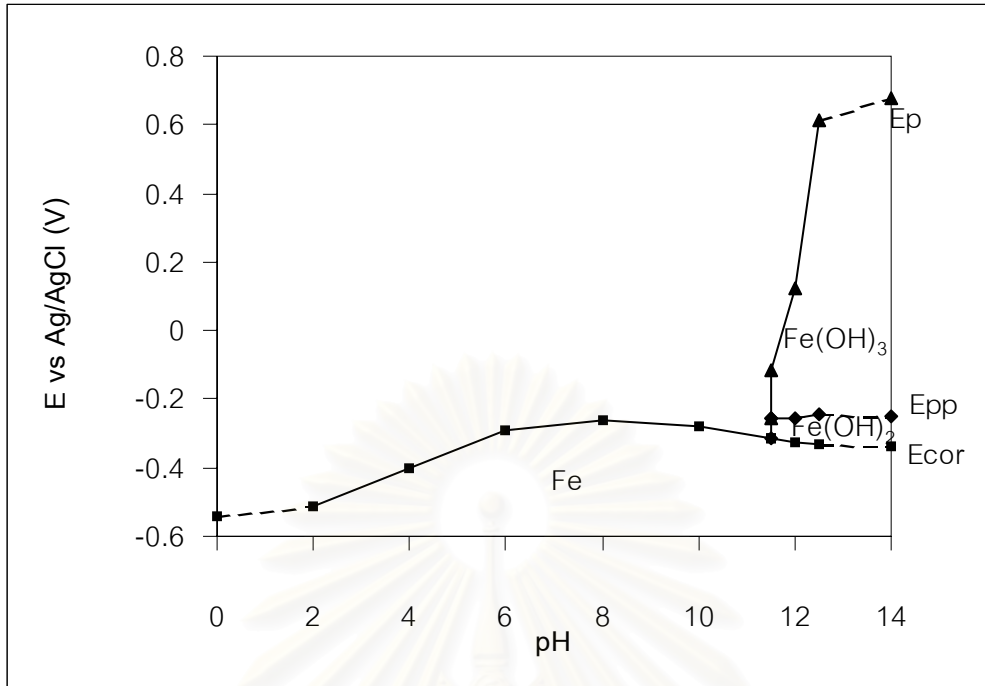
รูปที่ 4.4 แสดงแผนภูมิพอธิเบรซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 °C (อ้างอิง Fe(OH)₂ และ Fe(OH)₃ จากรูปที่ 2.1)



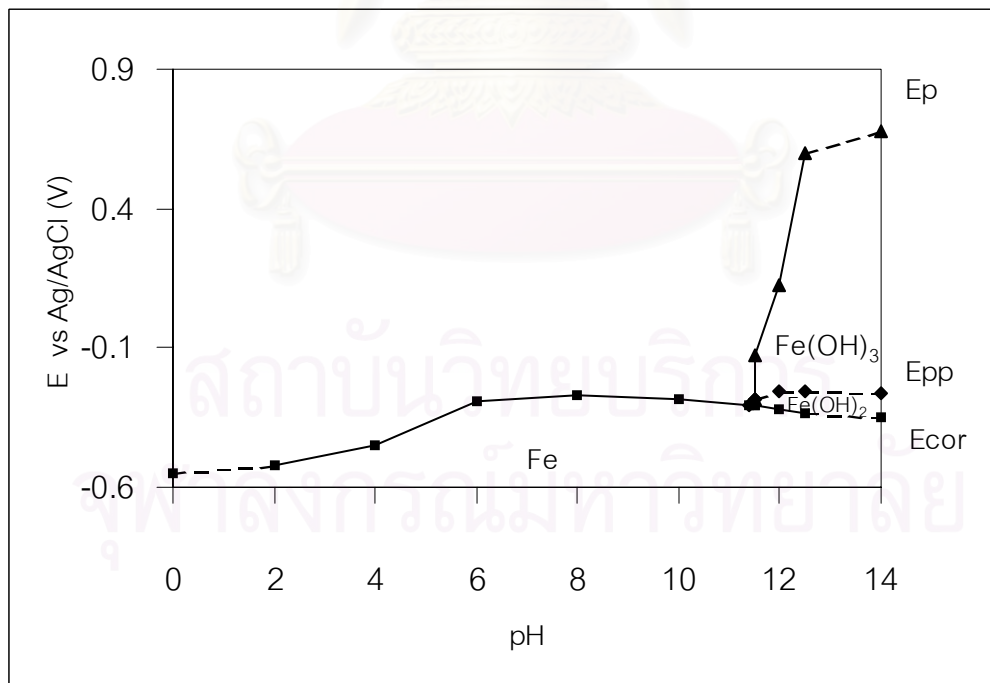
รูปที่ 4.5 แสดงแผนภูมิพอริเบรซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 ° C (อ้างอิง Fe(OH)₂ และ Fe(OH)₃ จากรูปที่ 2.1)



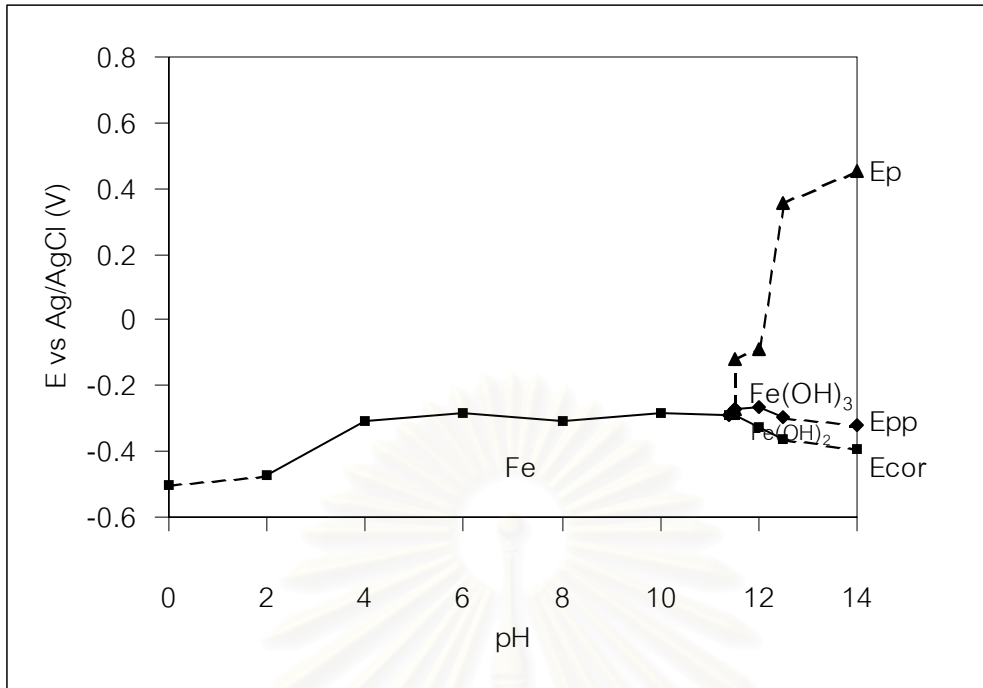
รูปที่ 4.6 แสดงแผนภูมิพอริเบรซ์เบื้องต้นของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ อุณหภูมิ 25 ° C (อ้างอิง Fe(OH)₂ และ Fe(OH)₃ จากรูปที่ 2.1)



รูปที่ 4.7 แสดงแผนภูมิพอธิเบรซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 °C (อ้างอิง Fe(OH)₂ และ Fe(OH)₃ จากรูปที่ 2.1)



รูปที่ 4.8 แสดงแผนภูมิพอธิเบรซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 °C (อ้างอิง Fe(OH)₂ และ Fe(OH)₃ จากรูปที่ 2.1)



รูปที่ 4.9 แสดงแผนภูมิพอร์เบิร์ตของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 °C (อ้างอิง Fe(OH)₂ และ Fe(OH)₃ จากรูปที่ 2.1)

4.4 การตรวจสอบไอออนของโลหะ (Fe²⁺, Fe³⁺, Mn²⁺, MnO₄⁻) ในสารละลาย

ในกระบวนการการผุกร่อน โลหะจะเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นคือ โลหะกลายเป็นไอออน หรือ สารประกอบที่ละลายอยู่ในสารละลาย เนื่องจากตัวเหล็กที่ใช้ทดสอบในที่นี้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และมีแมงกานีสผสม มีความเป็นไปได้ที่ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะมีผลจากธาตุแมงกานีสร่วมกับธาตุเหล็ก ในที่นี้จึงทำการตรวจสอบไอออนโลหะ เฉพาะโลหะเหล็กและแมงกานีสเมื่อเหล็กที่ทดสอบอยู่ในสภาวะที่เกิดการผุกร่อนเพื่อเป็นแนวทางหาเหตุผลทางไฟฟ้าเคมีอธิบายความเป็นไปได้ของกลไกที่เกิดขึ้น การทดสอบในที่นี้จะเลือกสภาวะการทดลองดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.3.4 ผลการตรวจหาไอออนโลหะในสารละลายที่สภาวะต่างๆ แสดงในภาคผนวก จ จากผลการทดลองในภาคผนวก จ นำไอออนที่ตรวจพบใส่เข้าไปในแผนภูมิพอร์เบิร์ตที่แสดงในรูปที่ 4.2-4.9 เพื่อให้แผนภูมิพอร์เบิร์ตสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

บทที่ 5

อภิปรายผลการทดลอง

5.1 เปรียบเทียบแผนภูมิพอร์เบซซ์ที่ได้จากการทดลองกับแผนภูมิพอร์เบซซ์จากการคำนวณ

พิจารณาพื้นที่ส่วนต่างๆ ของแผนภูมิพอร์เบซซ์ที่ได้จากการทดลองของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 ในน้ำ (รูปที่ 4.2) เปรียบเทียบกับแผนภูมิพอร์เบซซ์ที่ได้จากการคำนวณของเหล็กบริสุทธิ์ในน้ำ (รูปที่ 2.1) พบว่าแผนภูมิทั้ง 2 มีพื้นที่ส่วนหลัก ๆ คือ Fe , Fe^{2+} , Fe^{3+} , $Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$ เหมือนกัน (พื้นที่ของ $HFeO_2^-$ จะไม่ทำการพิจารณาเนื่องจากค่าความเป็นกรดเบสของการทดลองอยู่ในช่วง 2-12.5 แต่ค่าความเป็นกรดเบสในช่วงที่เกิด $HFeO_2^-$ อยู่ในช่วงประมาณ 13-16 เท่านั้น) แต่บริเวณ Fe^{2+} , Fe^{3+} ของแผนภูมิพอร์เบซซ์ที่ได้จากการทดลองจะมี Mn^{2+} เพิ่มมาด้วย เนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 มีแมงกานีสเป็นส่วนประกอบ และพื้นที่ของ Fe^{2+} , Fe^{3+} และ Mn^{2+} ของแผนภูมิซึ่งได้จากการทดลองยังมีขนาดกว้างกว่าพื้นที่ของแผนภูมิที่ได้จากการคำนวณอีกด้วย นั่นหมายความว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในน้ำจะมีช่วงของการถูกกัดกร่อนกว้างกว่าเหล็กบริสุทธิ์ในน้ำ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบเส้นขอบเขตของบริเวณ Fe และบริเวณ Fe^{2+} , Mn^{2+} ของแผนภูมิพอร์เบซซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ได้จากการทดลอง กับแผนภูมิพอร์เบซซ์ของเหล็กบริสุทธิ์ในน้ำที่ได้จากการคำนวณ พบว่ามีแนวโน้มเป็นเส้นตรงซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่เหมือนกันด้วย

พิจารณาช่วงการเกิดฟิล์มพาสซีฟของแผนภูมิทั้งสอง พบว่าพื้นที่ $Fe(OH)_3$ ของแผนภูมิที่ได้จากการทดลอง (เกิดฟิล์มในช่วงความเป็นกรดเบสประมาณ 9-12.5) มีขนาดแคบกว่าพื้นที่ $Fe(OH)_3$ ของแผนภูมิที่ได้จากการคำนวณ (เกิดฟิล์มในช่วงความเป็นกรดเบสประมาณ 2-16) นั่นคือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในน้ำจะมีช่วงของการเกิดฟิล์มพาสซีฟแคบกว่าเหล็กบริสุทธิ์ในน้ำ

พิจารณาพื้นที่ส่วนต่างๆ ของแผนภูมิพอร์เบซซ์ที่ได้จากการทดลองของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT2 ในน้ำ (รูปที่ 4.6) เปรียบเทียบกับแผนภูมิพอร์เบซซ์ที่ได้จากการคำนวณของเหล็กบริสุทธิ์ในน้ำ (รูปที่ 2.1) พบว่ามีลักษณะเหมือนกับการเปรียบเทียบพื้นที่ส่วนต่างๆ ของแผนภูมิพอร์เบซซ์ที่ได้

จากการทดลองของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 ในน้ำ (รูปที่ 5.2) กับแผนภูมิพอร์เบชท์ที่ได้จากการคำนวณของเหล็กบริสุทธิ์ในน้ำ (รูปที่ 2.1)

จากการทดลองหาเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีพบว่า เส้นกราฟที่ได้จะแสดงเฉพาะปฏิกิริยาอะโนดิกรวมและปฏิกิริยาคาทอดิกรวมที่เกิดขึ้นจริงเท่านั้น แต่จะไม่แสดงปฏิกิริยาอะโนดิกย่อยและแคโทดิกย่อย ซึ่งแตกต่างจากวิธีการสร้างแผนภูมิพอร์เบชท์โดยใช้วิธีการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งจะต้องทำการเขียนสมการของปฏิกิริยาย่อยซึ่งอาจเป็นไปได้ทั้งหมด จากนั้นนำสมการแต่ละสมการมาคำนวณโดยใช้สมการของเนอริสแล้วจึงนำไปสร้างแผนภูมิพอร์เบชท์ จากที่กล่าวมาแล้วพบว่าแผนภูมิพอร์เบชท์ที่ได้จากการการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีน่าจะมีความถูกต้องมากกว่าแผนภูมิพอร์เบชท์ที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ เนื่องจากในความเป็นจริงการคำนวณโดยใช้สมการของปฏิกิริยาที่เราคาดว่าจะเกิดขึ้นนั้น ปฏิกิริยาดังกล่าวอาจจะเกิดหรือไม่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองก็ได้ นอกจากนี้หากพิจารณาเส้นขอบเขตของบริเวณโลหะที่ไม่เกิดการผุกร่อน บริเวณโลหะที่เกิดการผุกร่อน และบริเวณโลหะส่วนที่เกิดฟิล์มพาสซีฟของแผนภูมิพอร์เบชท์ที่ได้จากการทดลองและแผนภูมิพอร์เบชท์ที่ได้จากการคำนวณ พบว่าเส้นขอบเขตของแต่ละบริเวณของแผนภูมิพอร์เบชท์ที่ได้จากการทดลองจะมีเพียงเส้นเดียว เนื่องจากเส้นขอบเขตเหล่านี้หามาจากเส้นโพลาริเซชันในการทดลองซึ่งมีเพียง 1 เส้นในแต่ละค่าความเป็นกรดเบส แต่สำหรับแผนภูมิพอร์เบชท์ที่ได้จากการคำนวณจะมีเส้นขอบเขตหลายเส้น (รูปที่ 2.1) เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นในสมการของเนอริส นั่นเอง (เส้นขอบเขต 1 เส้นจะแทนความเข้มข้นของสารตั้งต้น 1 ค่า)

หากเราจะพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างแผนภูมิพอร์เบชท์ที่ได้จากการทดลองกับแผนภูมิพอร์เบชท์ที่ได้จากการคำนวณ พบว่าถ้าแผนภูมิพอร์เบชท์ทั้ง 2 เหมือนกันสามารถสรุปได้เพียงว่าสมการของปฏิกิริยาย่อยทั้งหมดที่เราคาดว่าจะเกิดนั้นเกิดขึ้นจริง เป็นผลให้ผลรวมของปฏิกิริยาอะโนดิกและผลรวมของปฏิกิริยาคาทอดิกที่ได้จากการคำนวณ มีค่าเท่ากับผลรวมของปฏิกิริยาอะโนดิกและผลรวมของปฏิกิริยาคาทอดิกที่ได้จากการทดลองเท่านั้น ในอนาคตหากมีเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์หาสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ณ เวลาใด ๆ ในระหว่างทำการทดลองได้

อาจทำให้สามารถวิเคราะห์หาปฏิกิริยาอะโนดิกและปฏิกิริยาแคโทดิกที่เกิดขึ้น ณ เวลาใด ๆ ได้ ซึ่งจะส่งผลให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแผนภูมิพอร์เบซซ์ที่ได้จากการทดลองและแผนภูมิพอร์เบซซ์ที่ได้จากการคำนวณได้ต่อไป

5.2 อิทธิพลของความเข้มข้นคลอไรด์

เปรียบเทียบแผนภูมิพอร์เบซซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่า Ecor ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ (รูปที่ 4.2) มีแนวโน้มสูงกว่า (เป็นลบน้อยกว่า) ค่า Ecor ของสารละลายที่มีคลอไรด์ (รูปที่ 4.3-4.5) นั้นหมายความว่าในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์จะมีพื้นที่ของแผนภูมิพอร์เบซซ์ในส่วนที่ไม่เกิดการกัดกร่อน (Fe) กว้างกว่าในสารละลายที่มีคลอไรด์ และเมื่อความเข้มข้นคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 200-600 พีพีเอ็ม พบว่าค่า Ecor มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากที่ค่าความเป็นกรดเบสเดียวกันจะเห็นได้ว่าพื้นที่ของ Fe ในรูป 4.3-4.5 มีขนาดใกล้เคียงกัน

สำหรับค่า Epp ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 พบว่าในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ จะเริ่มเกิด Epp ที่ค่าความเป็นกรดเบส 8-9 แต่ในสารละลายที่มีคลอไรด์จะเริ่มเกิด Epp ที่ค่าความเป็นกรดเบส 11-11.5 และมีค่าต่ำกว่าค่า Epp ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงค่าความเป็นกรดเบสตั้งแต่ 9 ของสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่า Epp และ Ecor มีความแตกต่างกันมากกว่าความแตกต่างระหว่างค่า Epp และ Ecor ของสารละลายที่มีคลอไรด์ ในช่วงค่าความเป็นกรดเบสตั้งแต่ 11.5 ขึ้นไป ดังนั้นพื้นที่ในส่วนที่เกิดฟิล์ม $Fe(OH)_2$ ของสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์จึงกว้างกว่าพื้นที่ของสารละลายที่มีคลอไรด์ และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นในช่วง 200-600 พีพีเอ็ม พบว่าเริ่มเกิด Epp ที่ค่าความเป็นกรดเบส 8-9 ในทุก ๆ ความเข้มข้นของการทดลอง และค่า Epp ที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันเป็นผลให้พื้นที่ของ $Fe(OH)_2$ ในแต่ละความเข้มข้นมีขนาดใกล้เคียงกันด้วย

สำหรับค่า Ep ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 พบว่าในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์จะเริ่มเกิด Ep ที่ค่าความเป็นกรดเบส 8-9 แต่ในสารละลายที่มีคลอไรด์จะเริ่มเกิด Ep ที่ค่าความเป็นกรดเบส 11-11.5 และมีค่าต่ำกว่าค่า Ep ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงค่าความเป็นกรดเบสตั้งแต่ 9 ของสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่า Ep และ Epp มีความแตกต่างกันมากกว่าความแตกต่างระหว่างค่า Ep และ Epp ของสารละลายที่มีคลอไรด์ในช่วงค่า

ความเป็นกรดเบสตั้งแต่ 11.5 ขึ้นไป ดังนั้นพื้นที่ในส่วนที่เกิดฟิล์ม $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ของสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์จึงกว้างกว่าพื้นที่ของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ในสารละลายที่มีคลอไรด์ และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นในช่วง 200-600 พีพีเอ็ม พบว่าเริ่มเกิด E_p ที่ค่าความเป็นกรดเบส 11-11.5 ในทุกความเข้มข้นของการทดลอง และค่า E_p ที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นคลอไรด์เพิ่มขึ้น เป็นผลให้พื้นที่ของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ที่ความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม กว้างกว่า 400 และ 600 พีพีเอ็มตามลำดับ

สำหรับการเปรียบเทียบแผนภูมิพอร์เบซซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่า E_{cor} , E_{pp} และ E_p มีแนวโน้มทำนองเดียวกันกับแผนภูมิพอร์เบซซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2

5.3 อิทธิพลของแมงกานีสในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

ส่วนผสมที่แตกต่างกันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT2 คือ คาร์บอนและแมงกานีส ดังนั้นปริมาณแมงกานีสที่เพิ่มขึ้น (SPHT1 > SPHT2) น่าจะส่งผลดังนี้

เปรียบเทียบแผนภูมิพอร์เบซซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 และ SPHT2 พบว่า ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่า E_{cor} ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 มีค่าใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT2 สำหรับในสารละลายที่มีคลอไรด์ ค่า E_{cor} ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 มีแนวโน้มสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT2 เล็กน้อย นั่นคือพื้นที่ส่วนที่ไม่เกิดการกัดกร่อน (Fe) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 มีขนาดกว้างกว่าพื้นที่ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT2 เล็กน้อย

ในส่วนของค่า Epp พบว่าทั้งในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์และมีคลอไรด์ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำทั้ง 2 ชนิดเริ่มเกิด Epp ที่ค่าความเป็นกรดเบสเดียวกัน และมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละความเข้มข้นของคลอไรด์ ในขณะที่ความแตกต่างระหว่างค่า Epp และ Ecor มีค่าใกล้เคียงกัน เป็นผลให้พื้นที่ของ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ในแผนภูมิพอร์เบซมีขนาดใกล้เคียงกันด้วย

ในส่วนของค่า Ep พบว่า ทั้งในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์และมีคลอไรด์ เหล็กทั้ง 2 ชนิดเริ่มเกิด Ep ที่ค่าความเป็นกรดเบสเดียวกันในแต่ละความเข้มข้นของคลอไรด์ แต่ค่า Ep ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 มีแนวโน้มต่ำกว่าค่า Ep ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT2 ในขณะที่ความแตกต่างระหว่างระหว่างค่า Ep และ Epp ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 มีแนวโน้มน้อยกว่าความแตกต่างของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT2 เป็นผลให้พื้นที่ของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ในแผนภูมิพอร์เบซของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 มีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT2



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

การสร้างแผนภูมิพอร์เบซซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสำหรับทำท่อโดยวิธีโพล่าไรเซชัน ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 0-600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบส 2-12 โดยใช้อัตราการสแกน 0.1 mV/s ในสารละลายอิ่มตัวด้วยออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) แผนภูมิพอร์เบซซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในน้ำที่ได้จากการทดลอง มีพื้นที่ของโลหะที่เกิดการผุกร่อนกว้างกว่า และมีพื้นที่ของการเกิดฟิล์มพาสซีฟแคบกว่าแผนภูมิพอร์เบซซ์ของเหล็กบริสุทธิ์ในน้ำที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์

2) การเปรียบเทียบแผนภูมิพอร์เบซซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ และสารละลายคลอไรด์พบว่า ที่ค่าความเป็นกรดเบสเดียวกัน ค่า E_{cor} , E_{pp} และ E_p ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์มีแนวโน้มสูงกว่าในสารละลายที่มีคลอไรด์

3) เมื่อความเข้มข้นคลอไรด์เพิ่มขึ้นในช่วง 200-600 พีพีเอ็มพบว่า ค่า E_{cor} , E_{pp} มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในขณะที่ค่า E_p มีแนวโน้มลดลง

4) แมงกานีสอาจจะมีอิทธิพลในการเพิ่มพื้นที่ของเหล็กที่เกิดการผุกร่อน (ลดพื้นที่Fe) และช่วยฟอร์มชั้นฟิล์มพาสซีฟ (เพิ่มพื้นที่ $Fe(OH)_3$) ในแผนภูมิพอร์เบซซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในช่วงความเข้มข้นของคลอไรด์ 200-600 พีพีเอ็ม

รายการอ้างอิง

1. S.A. Bradford. Corrosion Control. 1st ed. New York : Van Norstrand Reinhold , 1993 : pp. 7 – 45.
2. K.R. Tretheway and J Chamberlain. Corrosion for Science and Engineering. 2nd ed. London : Longman , 1995 : pp. 71 – 124.
3. M. Pourbaix. Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. 1st ed. London : Pergamon press , 1966 : pp. 47 – 289.
4. H.H.Uhlig. Corrosion and Corrosion Control. 1st ed. New York : John Wiley & Sons, 1971 : pp. 17 – 91.
5. M.G. Fontana. Corrosion Engineering. 1st ed. New York : McGraw – Hill ,1986 : pp. 454 – 457.
6. S. Niritchanyong and S. Daopiset. Effect of Water Chlorination Addition to Stainless Steel Corrosion Resistance Proceeding. The First Stainless Steel Congress in Thailand. Bangkok : Dec. 15th - 17th,1997 : pp. 137 – 144.
7. ASM Volume 13. Corrosion. 9th ed. Materials Park , Ohio : ASM International , 1996 : pp. 10 – 17.
8. D.A. Jones. Principles and Prevention of Corrosion. 1st ed. New York : Macmillan Publishing Co. , 1992 : pp. 57 – 218.
9. E.D. Verink , Jr. Simplified Procedure for Constructing Pourbaix Diagrams. Corrosion. Houston , Tex. : NACE , 1967: pp. 371 – 373.
10. T.Kodama. Automatic Construction of Chemical Potential Diagrams and Application to Metallic Corrosion. The 8th Asian – Pacific Corrosion Control Conference Proceeding. Bangkok , 1993 : pp. 141 – 148.
11. R. Baboian. Electrochemical techniques for Corrosion Engineering. Houston, Tex. : NACE ,1985 : pp. 98 – 104.
12. E.D.Verink , Jr. Application of Electrochemical Techniques in the Develop of Alloy for Corrosion Service. Electrochemical Techniques for Corrosion. Houston, Tex. : NACE , 1978 : pp. 43 – 51.
13. D.D. Mcdonald , B.C. Syrett and S.S. Wing. The Use of Potential – pH Diagrams for Interpretation of Corrosion. Corrosion . Vol. 35, No.1, 1979 : pp. 1 – 12.

14. พิภพ สุนทรสมัย. วิศวกรรมการเดินท่อและตั้งเครื่องสูบน้ำอัตโนมัติ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย - ญี่ปุ่น) , 2533 : หน้า 11 - 18.
15. L.S. Van Delinder. Corrosion Basics. An Introduction. 1st ed. Houston, Tex. : NACE, 1984 : pp. 303 - 309.
16. A. John Sedriks. Corrosion of Stainless Steels. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons , 1996 : pp. 79 - 100.
17. F.J. Welcher & R.B. Hahn. Semimicro Qualitative Analysis. 1st ed. New York : American Beck Company , 1969 : pp. 272 - 292.
18. G.R. Hered. Basic Laboratory Studies in College Chemistry with Semimicro Qualitative Analysis . 8th ed. Lexington , Mass. : D.C.Health and Company , 1988 : pp. 393 - 398.
19. E.J.Mar Golis. Qualitative Anion - Cation Analysis. 1st ed. New York : John Wiley and Sons , 1962 : pp. 79 - 100.
20. E.J.Slowinski & W.L.Masterton. Qualitative Analysis and the Properties of Ions in Aqueous Solution . 2nd ed. Fort Worth : Sauders College Publishing , 1990 : pp. 65 - 82.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 แสดงปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายที่สภาวะความเข้มข้นคลอไรด์ 0 ppm ค่าความเป็นกรดเบส 2 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เวลาการพ่นออกซิเจน (นาที)	ปริมาณออกซิเจนที่ละลาย (mg/l)	เวลาการพ่นออกซิเจน (นาที)	ปริมาณออกซิเจนที่ละลาย (mg/l)
0	6.2	8	8.8
1	8.6	9	8.8
2	8.7	10	8.8
3	8.8	11	8.8
4	8.8	12	8.8
5	8.8	13	8.8
6	8.8	14	8.8
7	8.8	15	8.8

ตารางที่ ก.2 แสดงปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายที่สภาวะความเข้มข้นคลอไรด์ 0 ppm ค่าความเป็นกรดเบส 12 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เวลาการพ่นออกซิเจน (นาที)	ปริมาณออกซิเจนที่ละลาย (mg/l)	เวลาการพ่นออกซิเจน (นาที)	ปริมาณออกซิเจนที่ละลาย (mg/l)
0	6.2	8	8.7
1	8.5	9	8.7
2	8.6	10	8.7
3	8.7	11	8.7
4	8.7	12	8.7
5	8.7	13	8.7
6	8.7	14	8.7
7	8.7	15	8.7

ตารางที่ ก.3 แสดงปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายที่สภาวะความเข้มข้นคลอไรด์ 600 ppm ค่าความเป็นกรดเบส 2 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

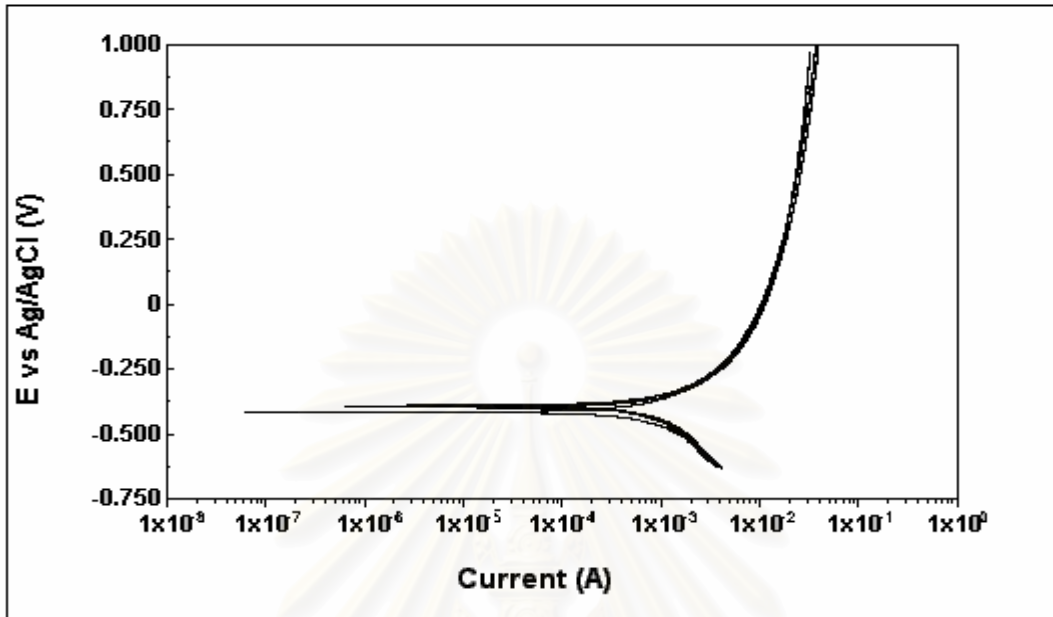
เวลาการพ่นออกซิเจน (นาที)	ปริมาณออกซิเจนที่ ละลาย (mg/l)	เวลาการพ่นออกซิเจน (นาที)	ปริมาณออกซิเจนที่ ละลาย (mg/l)
0	6.2	8	8.7
1	8.5	9	8.7
2	8.7	10	8.7
3	8.7	11	8.7
4	8.7	12	8.7
5	8.7	13	8.7
6	8.7	14	8.7
7	8.7	15	8.7

ตารางที่ ก.4 แสดงปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายที่สภาวะความเข้มข้นคลอไรด์ 600 ppm ค่าความเป็นกรดเบส 12 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

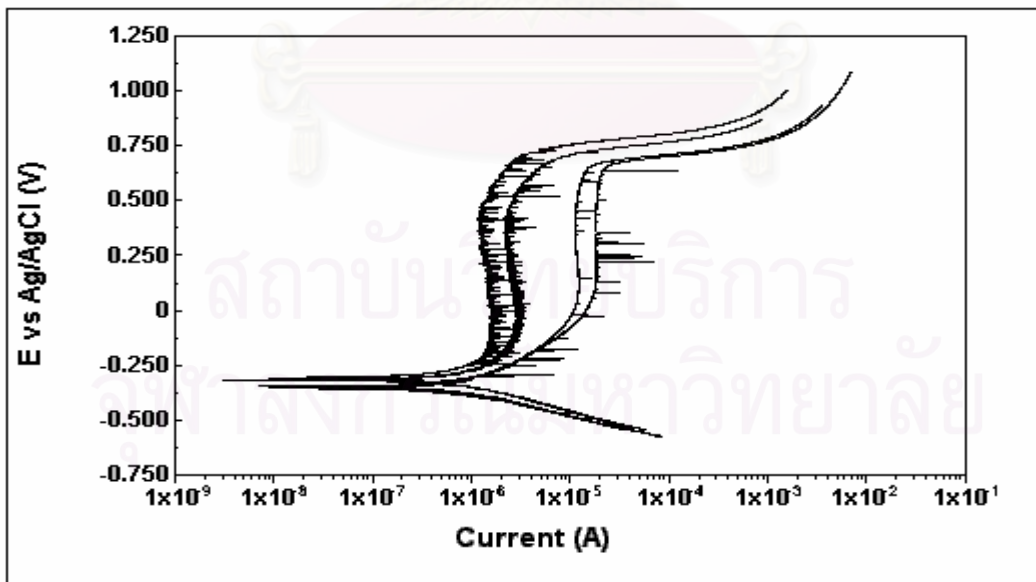
เวลาการพ่นออกซิเจน (นาที)	ปริมาณออกซิเจนที่ ละลาย (mg/l)	เวลาการพ่นออกซิเจน (นาที)	ปริมาณออกซิเจนที่ ละลาย (mg/l)
0	6.2	8	8.6
1	8.5	9	8.6
2	8.6	10	8.6
3	8.6	11	8.6
4	8.6	12	8.6
5	8.6	13	8.6
6	8.6	14	8.6
7	8.6	15	8.6

ภาคผนวก ข

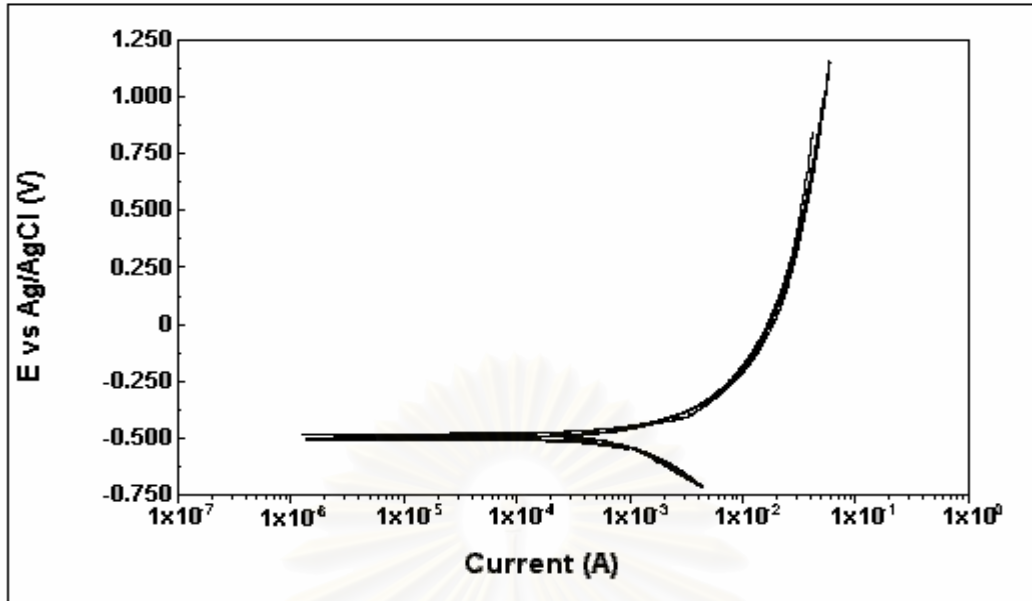
เส้นโพลาริเซชันที่อัตราการสแกน 1, 0.5, 0.1, 0.05 mV/s



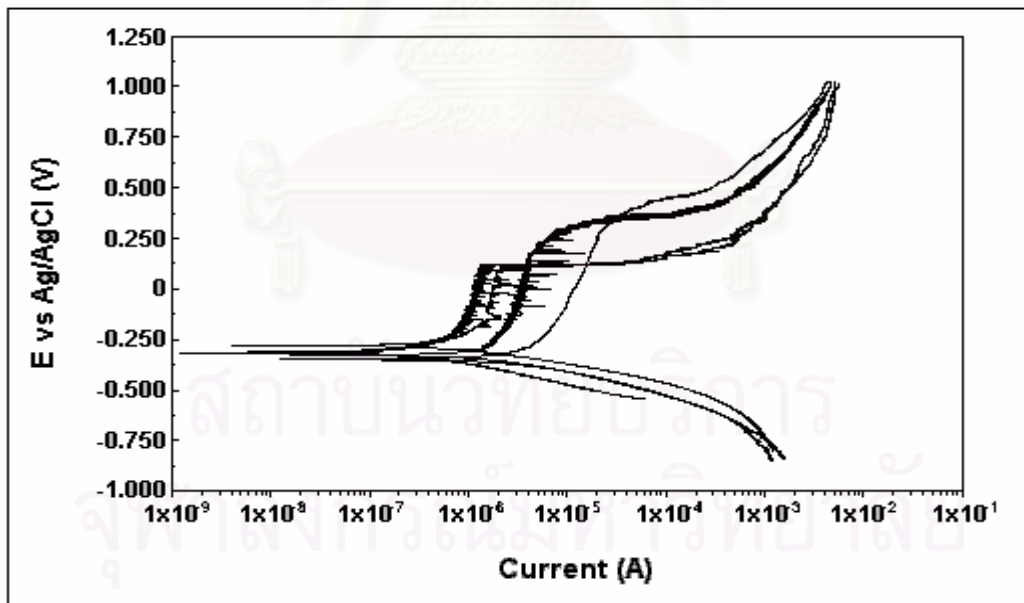
รูปที่ ข.1 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ที่สภาวะสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2 โดยใช้อัตราการสแกนต่าง ๆ



รูปที่ ข.2 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ที่สภาวะสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12 โดยใช้อัตราการสแกนต่าง ๆ



รูปที่ ๓.3 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ที่สภาวะสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2 โดยใช้อัตราการสแกนต่าง ๆ



รูปที่ ๓.4 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ที่สภาวะสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12 โดยใช้อัตราการสแกนต่าง ๆ

กราฟแต่ละรูปให้ค่า E_{cor} , E_{pp} , E_p ดังตาราง

ตารางที่ ข.1 แสดงค่า E_{cor} และค่า E_{pp} ที่สภาวะสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์
ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2

อัตราการสแกน (mV/s)	E_{cor} (V) vs Ag/AgCl	E_{pp} (V) vs Ag/AgCl
1	-0.398	-0.267
0.5	-0.382	-0.259
0.1	-0.375	-0.256
0.05	-0.371	-0.252

ตารางที่ ข.2 แสดงค่า E_{cor} และค่า E_{pp} ที่สภาวะสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์
ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12

อัตราการสแกน (mV/s)	E_{cor} (V) vs Ag/AgCl	E_{pp} (V) vs Ag/AgCl	E_p (V) vs Ag/AgCl
1	-0.385	-0.138	0.676
0.5	-0.373	-0.115	0.653
0.1	-0.336	-0.087	0.614
0.05	-0.331	-0.082	0.610

ตารางที่ ข.3 แสดงค่า E_{cor} และค่า E_{pp} ที่สภาวะสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์
600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2

อัตราการสแกน (mV/s)	E_{cor} (V) vs Ag/AgCl	E_{pp} (V) vs Ag/AgCl
1	-0.458	-0.332
0.5	-0.442	-0.325
0.1	-0.434	-0.320
0.05	-0.431	-0.318

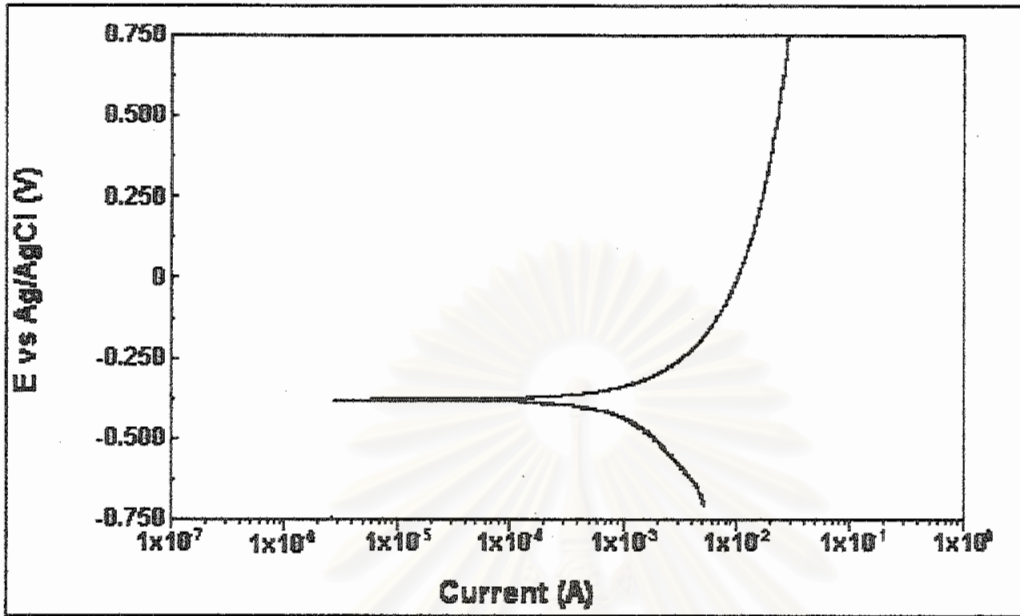
ตารางที่ ข.4 แสดงค่า E_{cor} , E_{pp} และค่า E_p ที่สภาวะสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12

อัตราการสแกน (mV/s)	E_{cor} (V) vs Ag/AgCl	E_{pp} (V) vs Ag/AgCl	E_p (V) vs Ag/AgCl
1	-0.368	-0.206	0.386
0.5	-0.342	-0.184	0.261
0.1	-0.324	-0.167	0.141
0.05	-0.319	-0.162	0.138

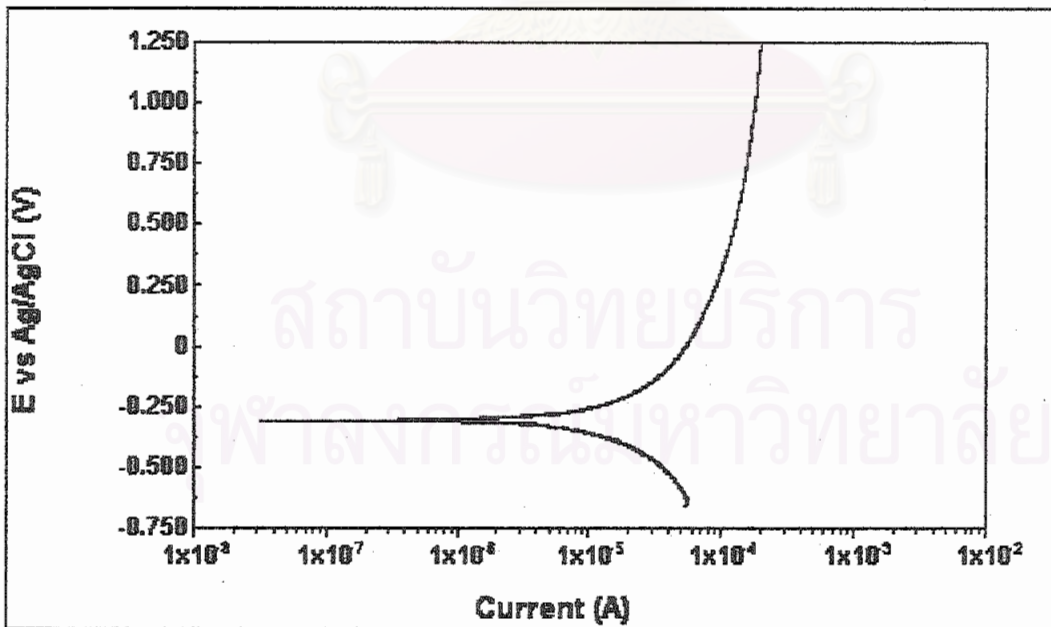
จากตารางที่ ข.1-ข.4 จะเห็นว่าเมื่ออัตราการสแกนต่ำลง ค่า E_{cor} , E_{pp} และ E_p จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าหนึ่ง จากนั้นจะมีค่าคงที่ ในที่นี้อัตราการสแกนที่ทำให้ค่า E_{cor} , E_{pp} และ E_p เกือบคงที่คือ 0.1 mV/s

ภาคผนวก ค

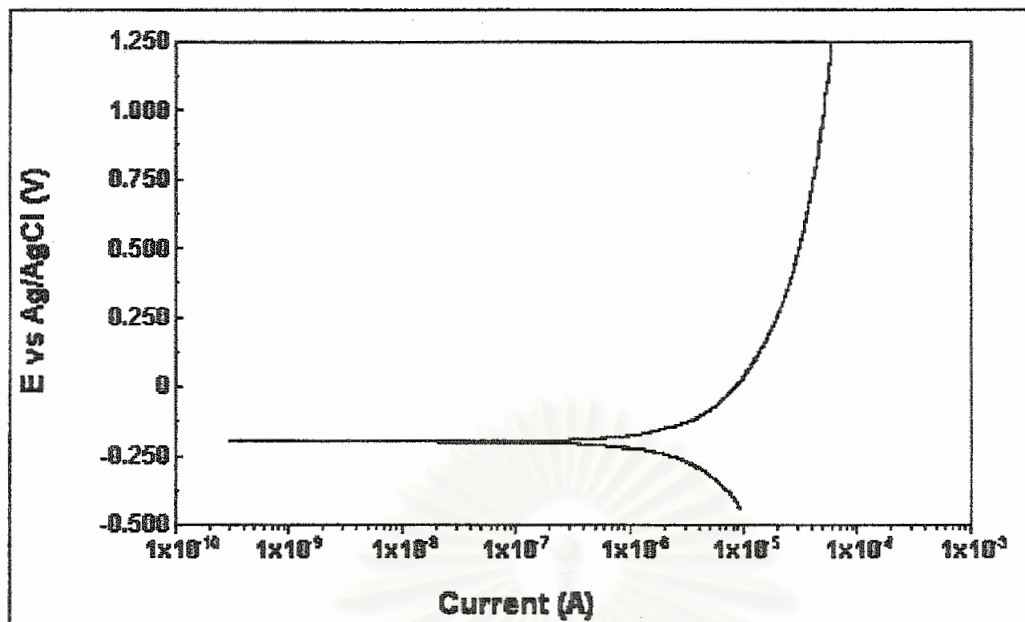
เส้นโพลาริเซชันของเหล็ก SPHT1 และ SPHT2 ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 25 °C



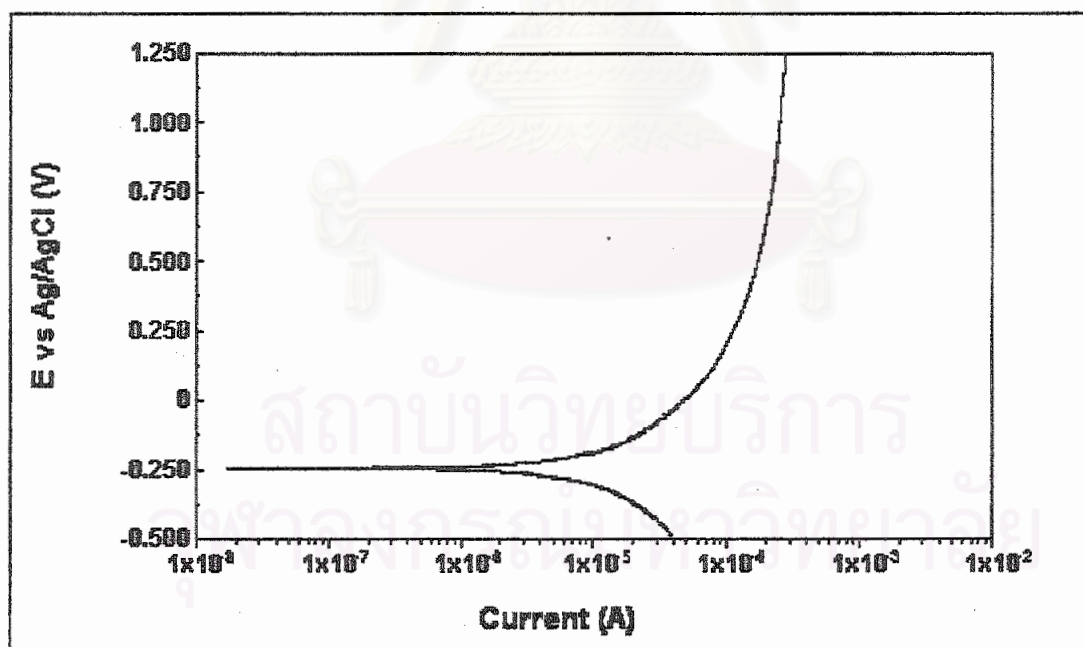
รูปที่ ค.1 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2



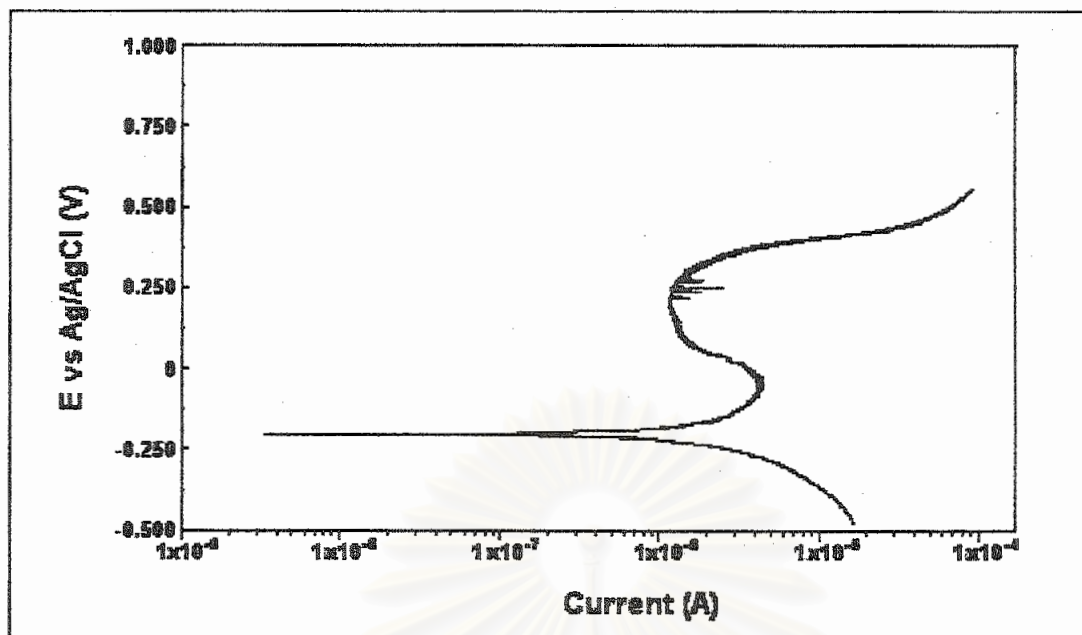
รูปที่ ค.2 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 4



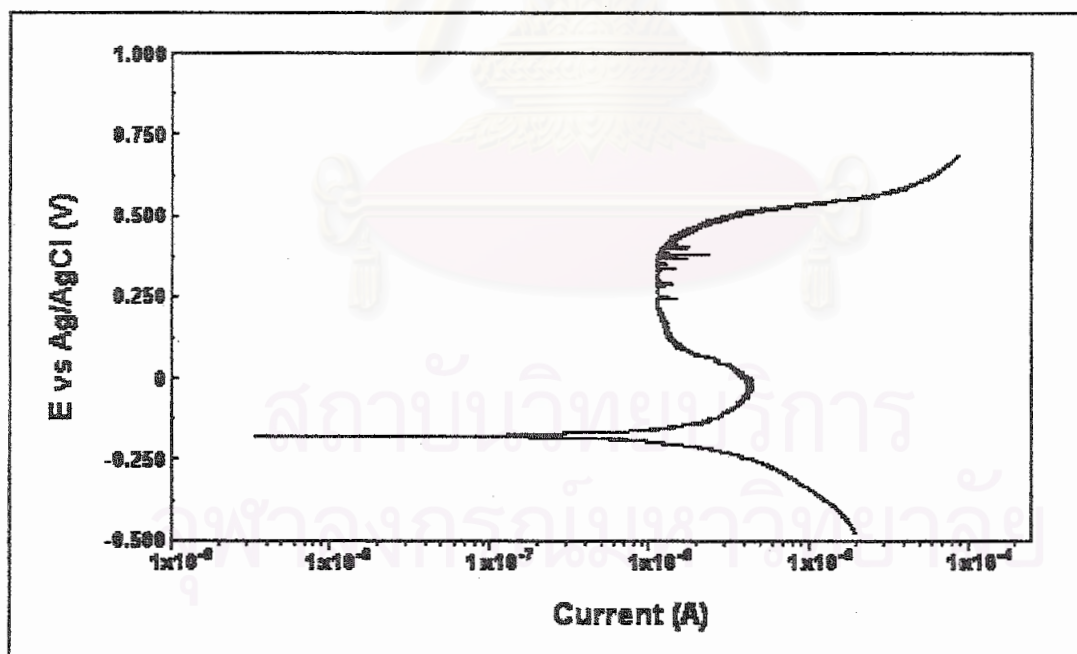
รูปที่ ค.3 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 6



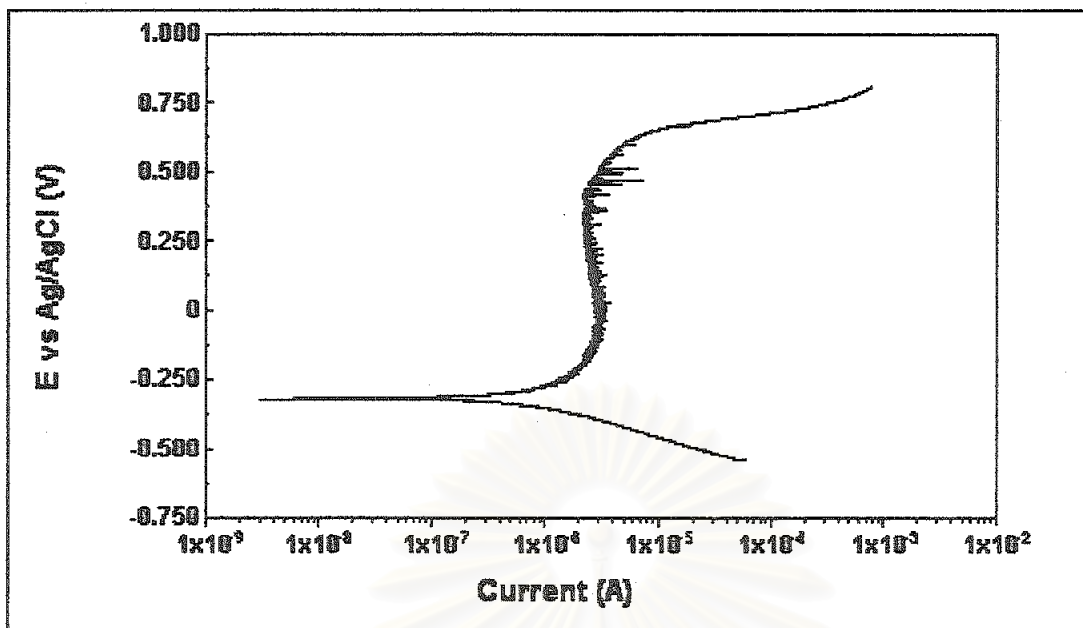
รูปที่ ค.4 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 8



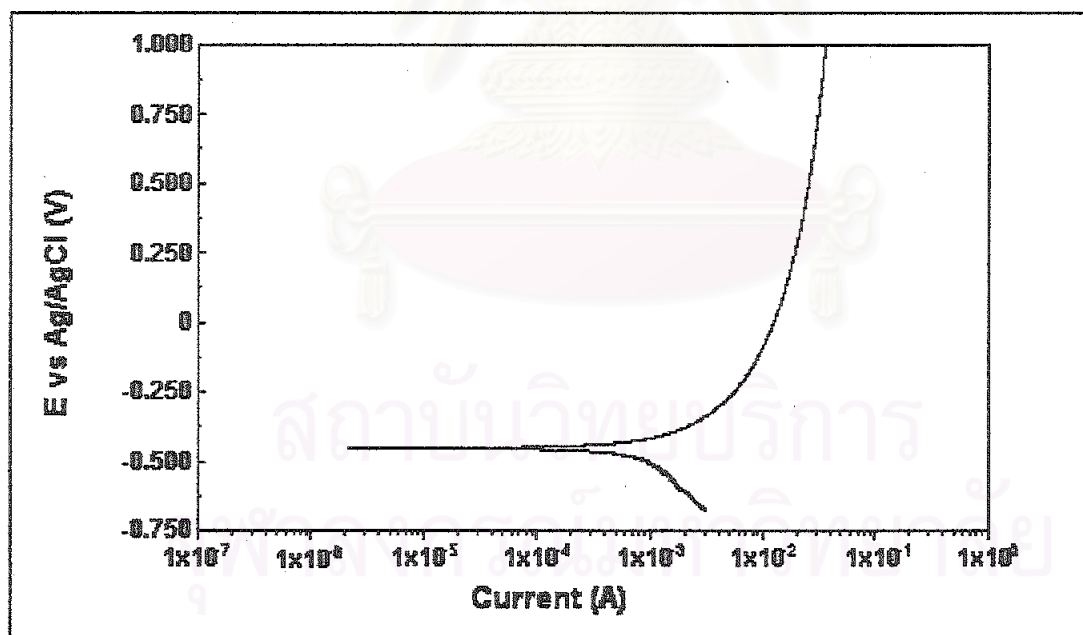
รูปที่ ค.5 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 9



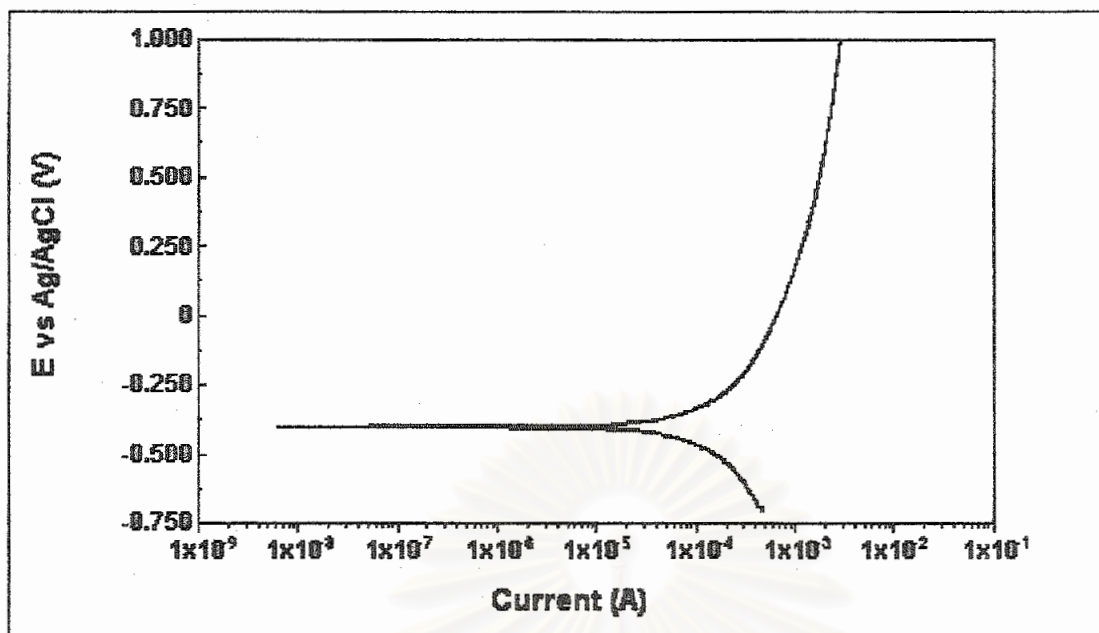
รูปที่ ค.6 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 10



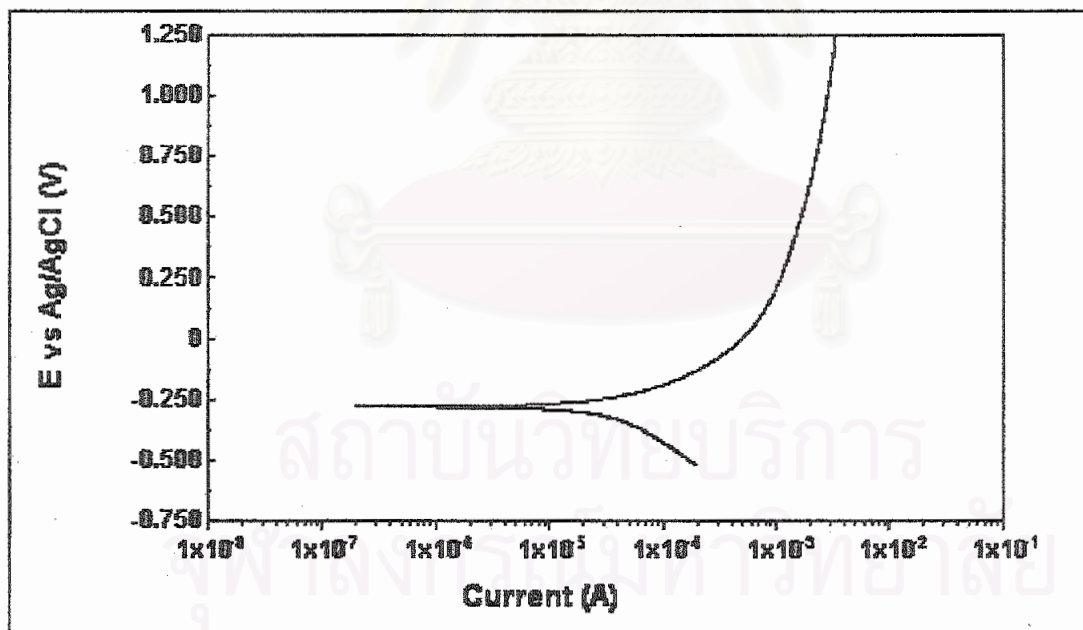
รูปที่ ค.7 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12



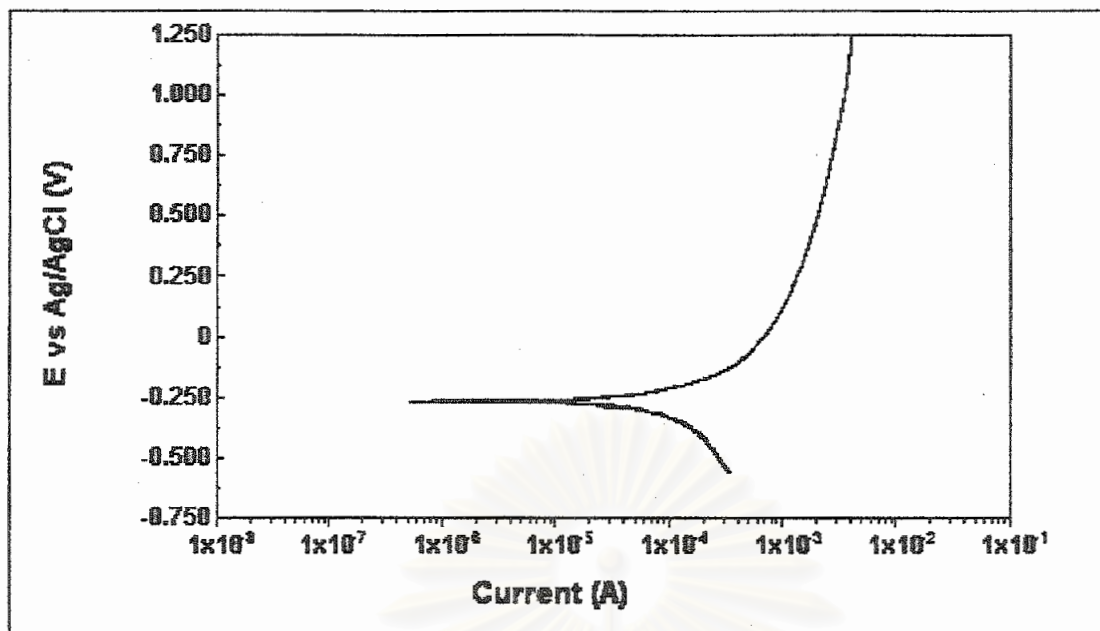
รูปที่ ค.8 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2



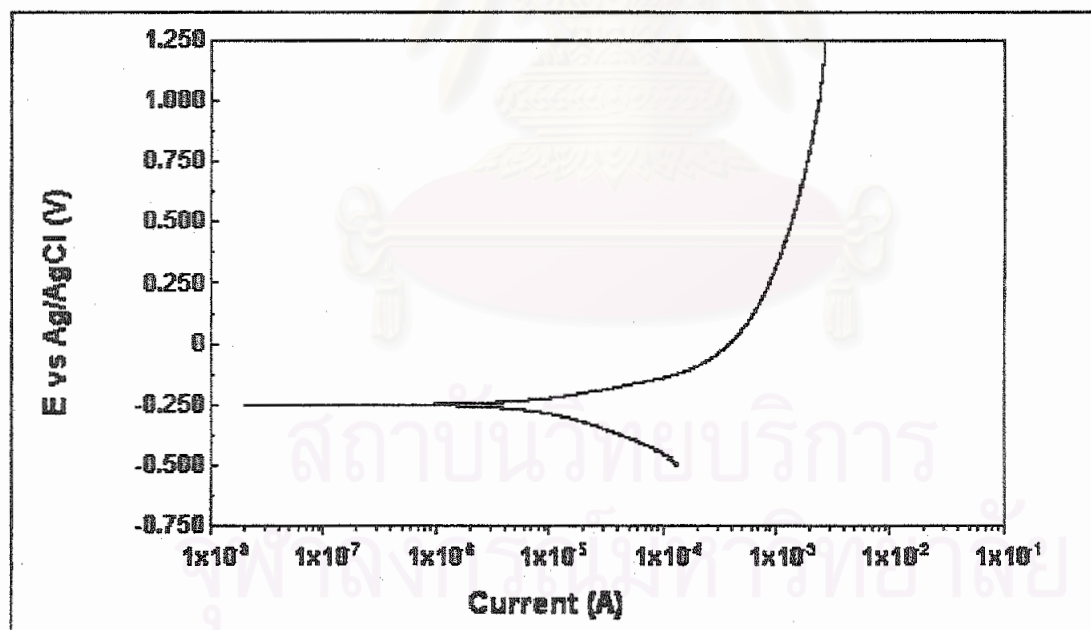
รูปที่ ค.9 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 4



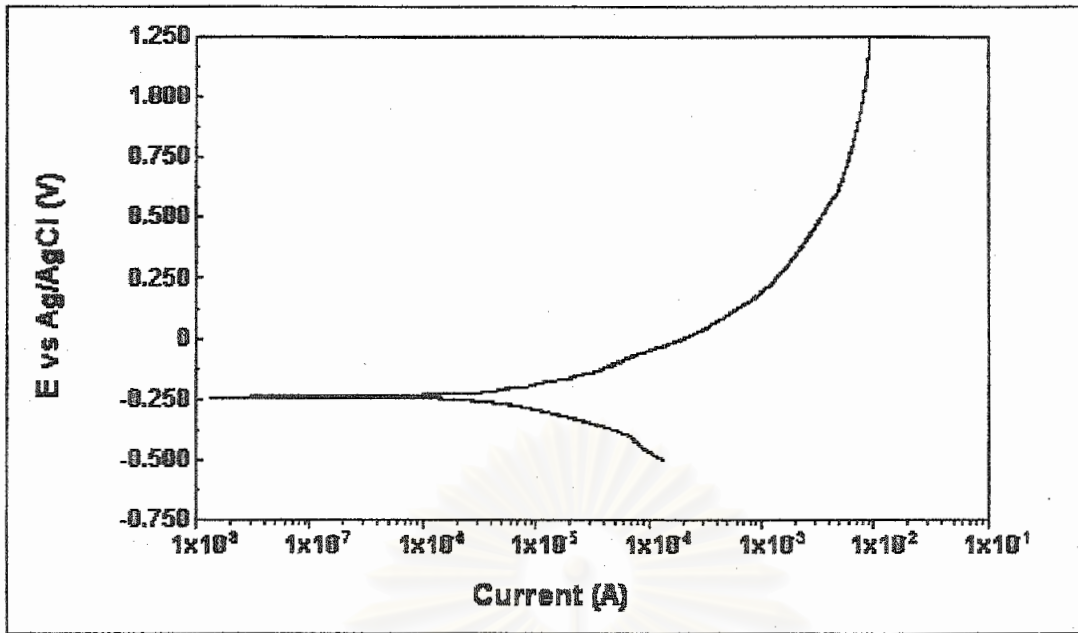
รูปที่ ค.10 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 6



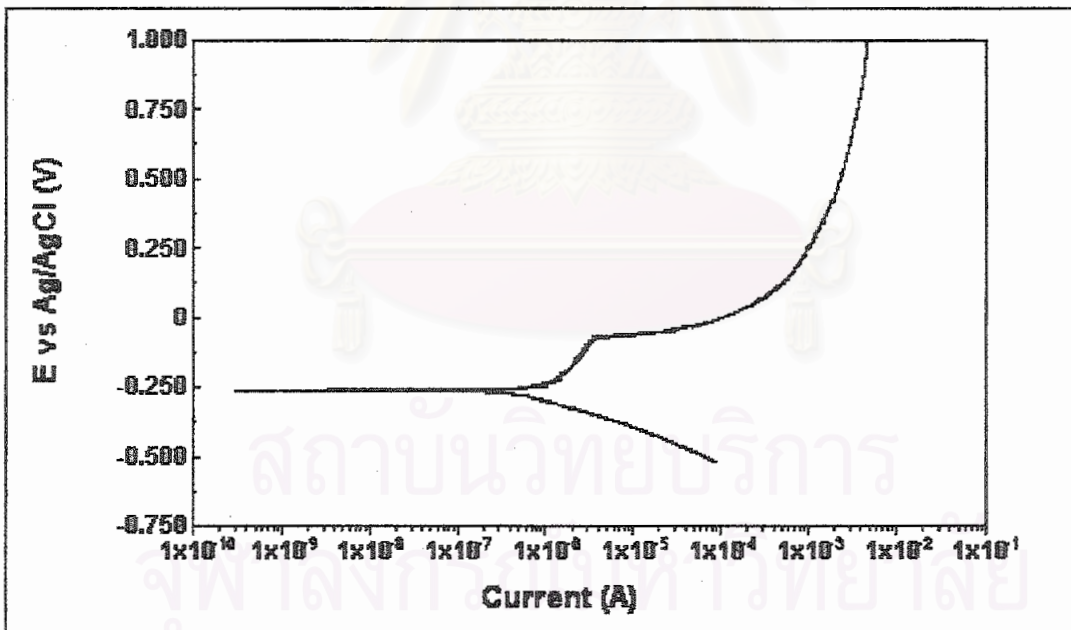
รูปที่ ค.11 แสดงเส้นโพลาริเซชันของอิเล็กโทรดคาร์บอนดำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 8



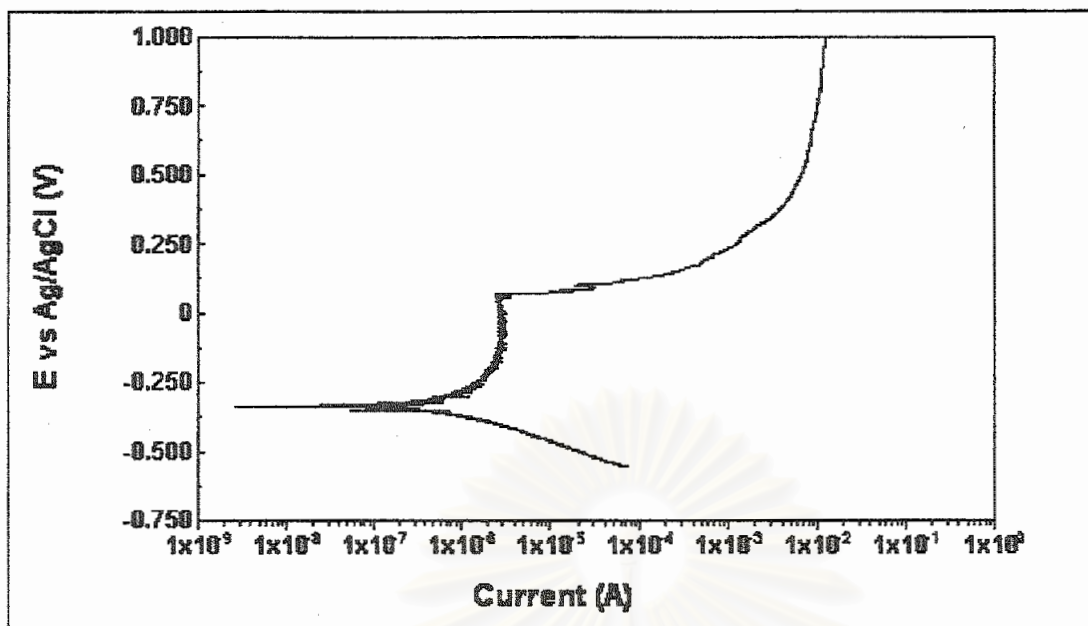
รูปที่ ค.12 แสดงเส้นโพลาริเซชันของอิเล็กโทรดคาร์บอนดำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 10 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 10



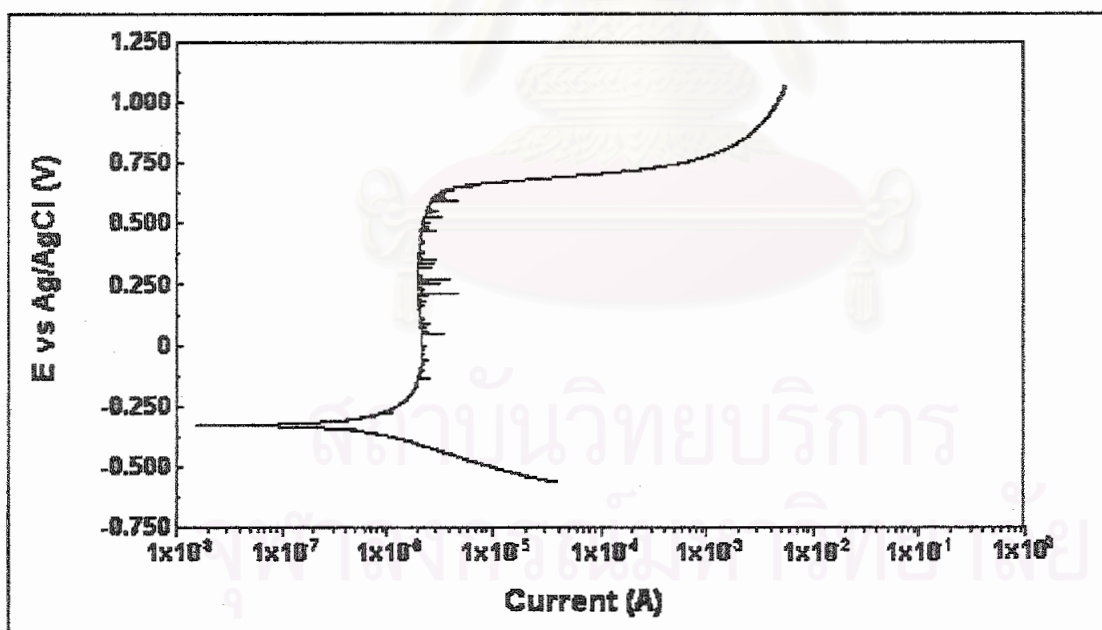
รูปที่ ค.13 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 11



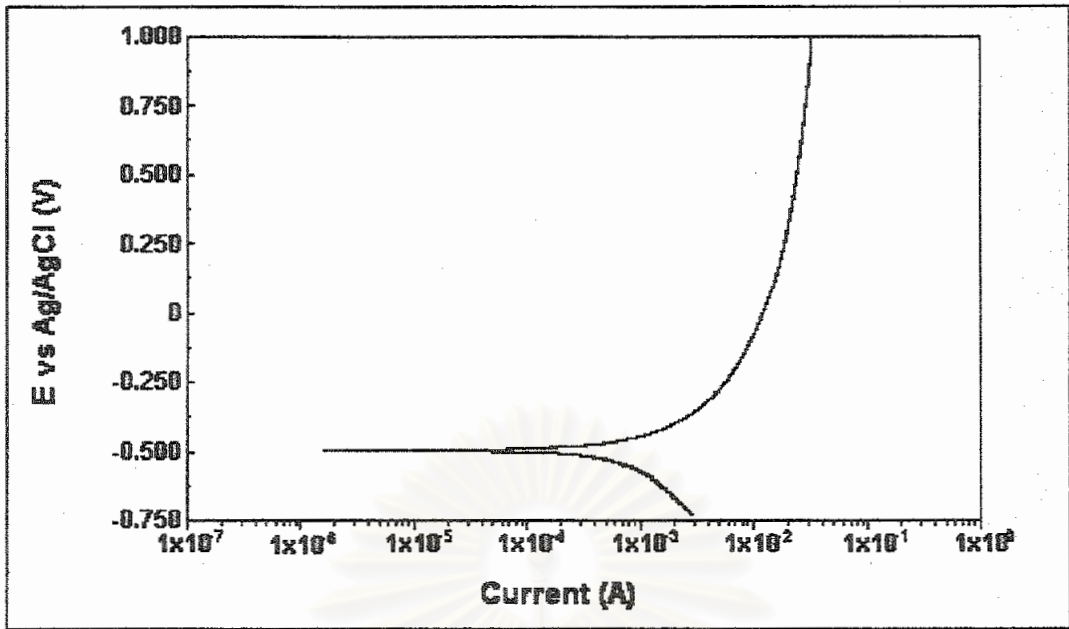
รูปที่ ค.14 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 11.5



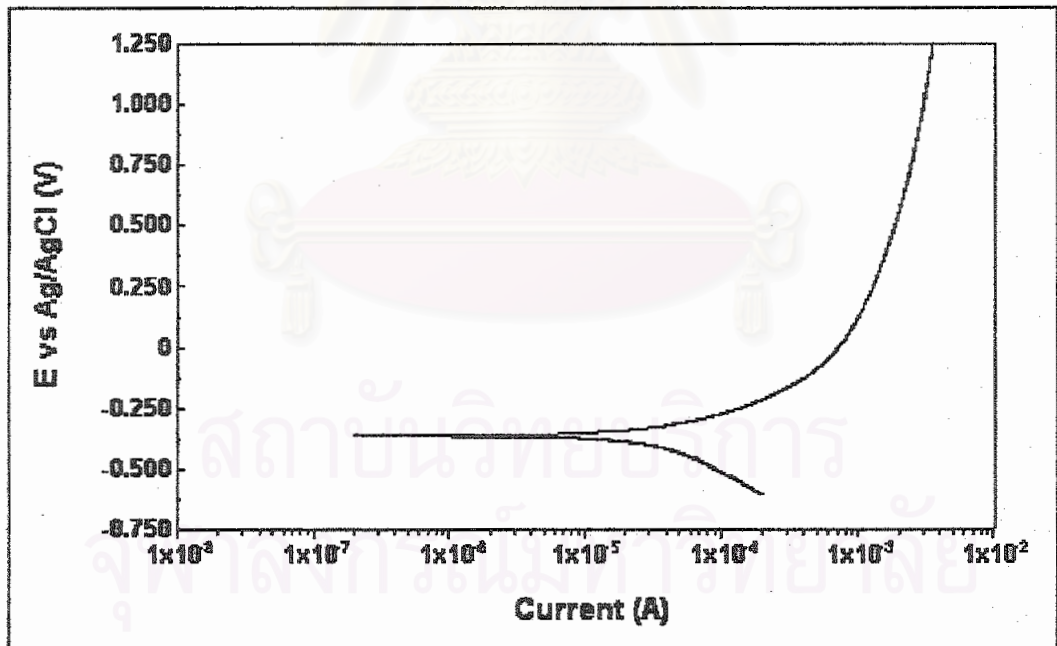
รูปที่ ค.15 แสดงเส้นโพลาริเซชันของอิเล็กโทรดคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอรีน 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12



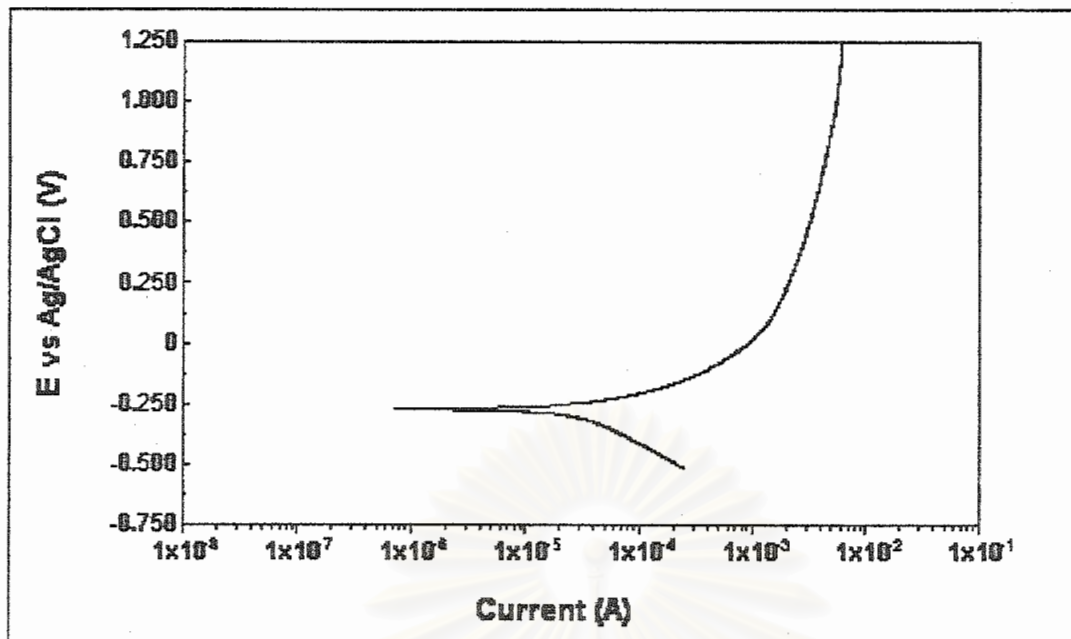
รูปที่ ค.16 แสดงเส้นโพลาริเซชันของอิเล็กโทรดคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอรีน 12.5 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12.5



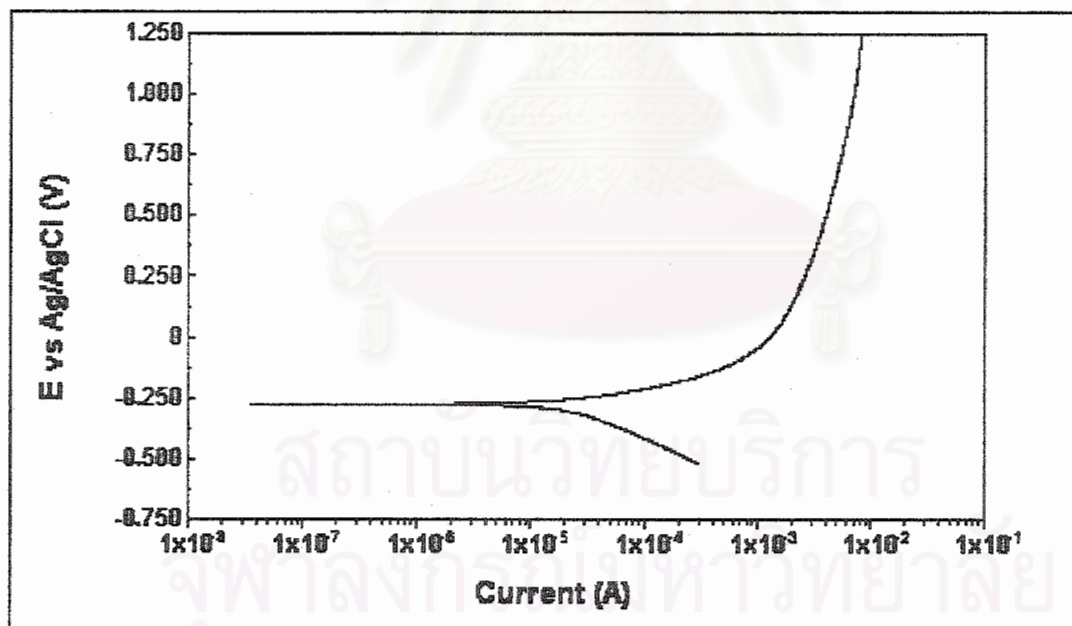
รูปที่ ค.17 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2



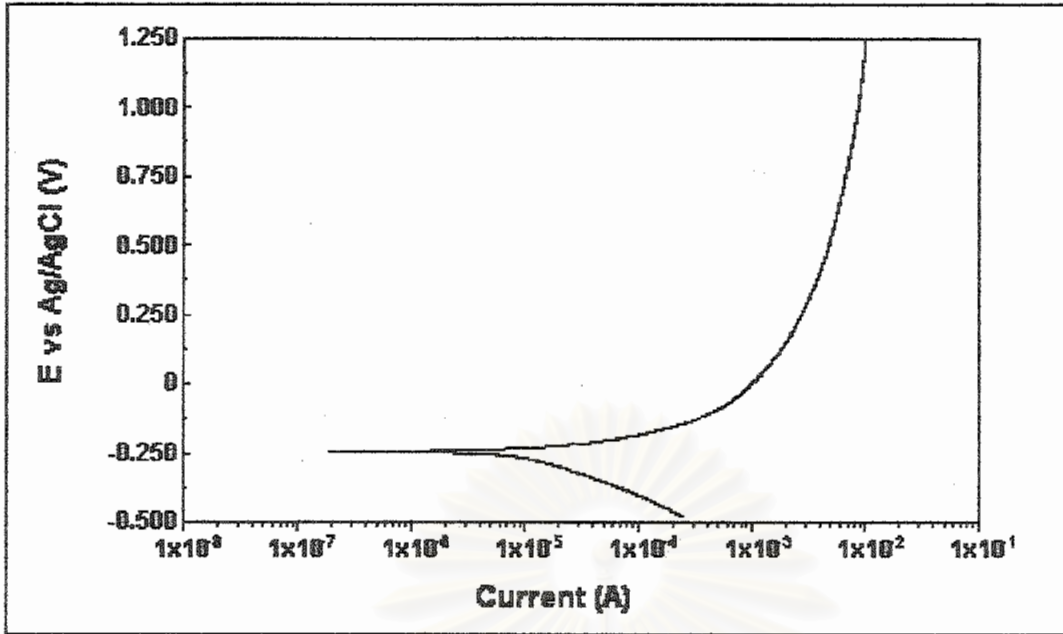
รูปที่ ค.18 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 4



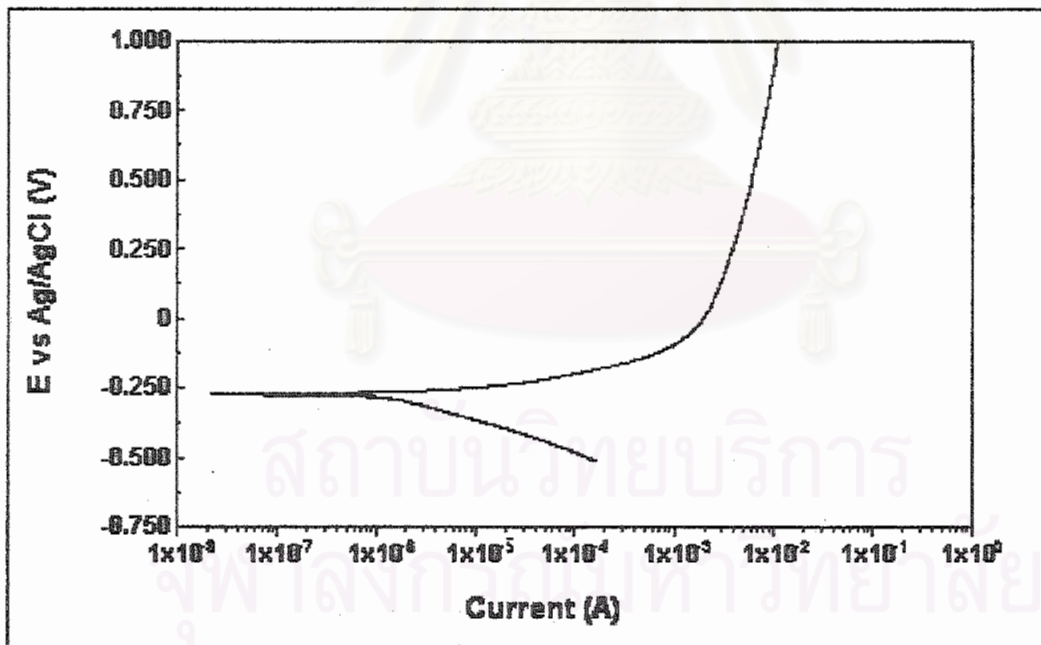
รูปที่ ค.19 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 6



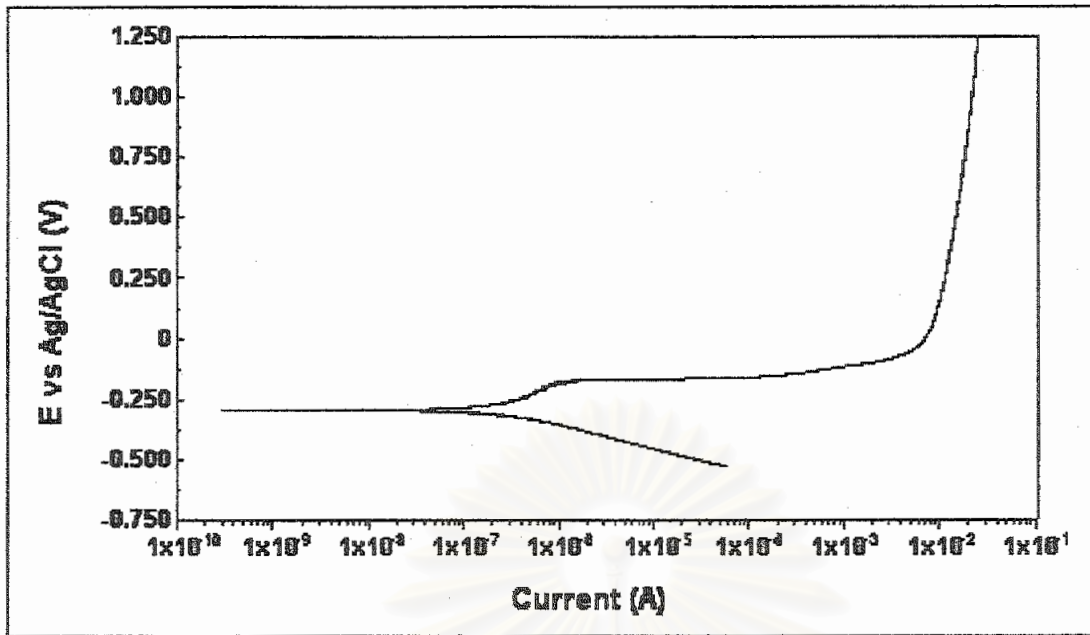
รูปที่ ค.20 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 8



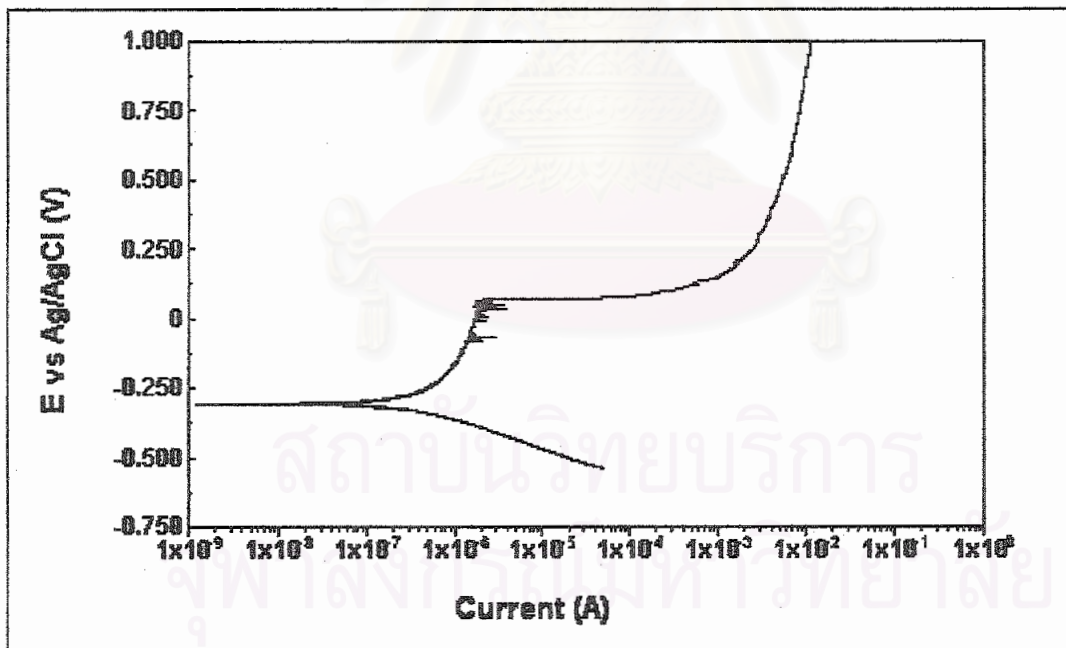
รูปที่ ค.21 แสดงเส้นโพลาริเซชันของอิเล็กโทรดคาร์บอนดำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 10



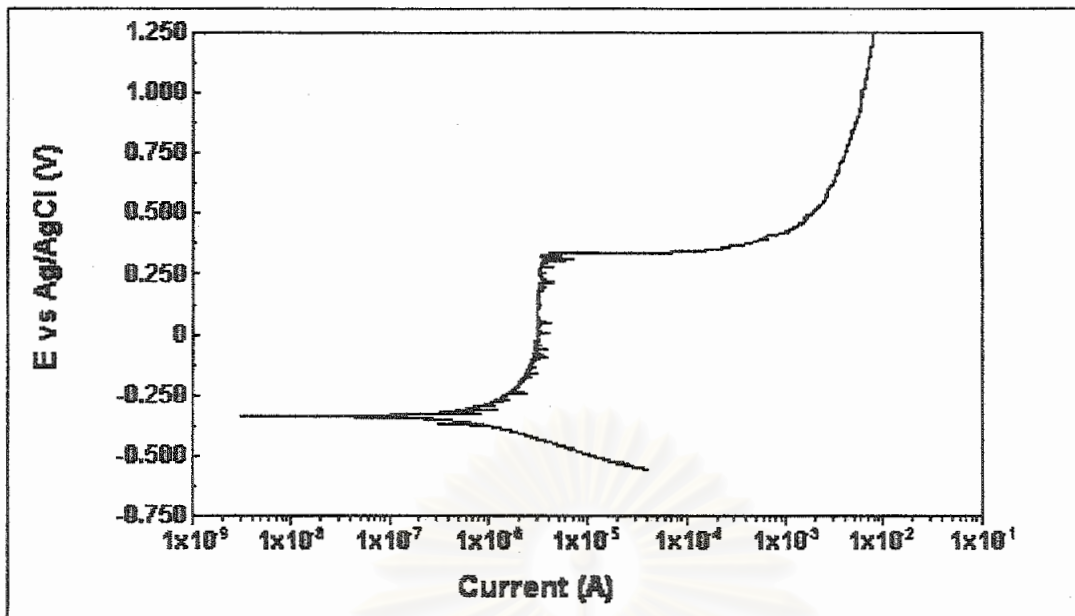
รูปที่ ค.22 แสดงเส้นโพลาริเซชันของอิเล็กโทรดคาร์บอนดำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 11



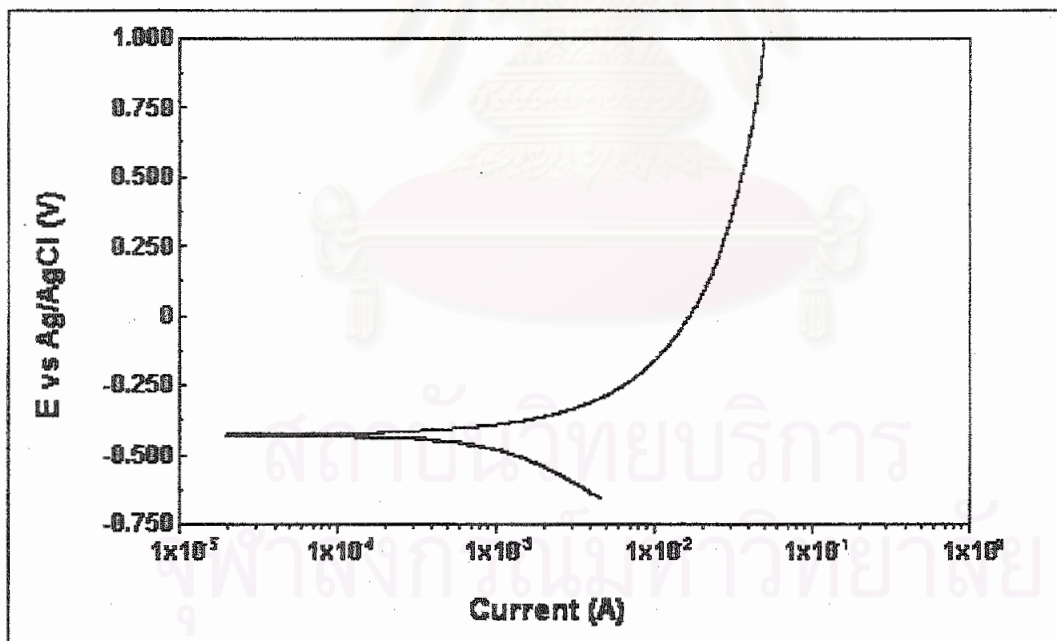
รูปที่ ค.23 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 11.5



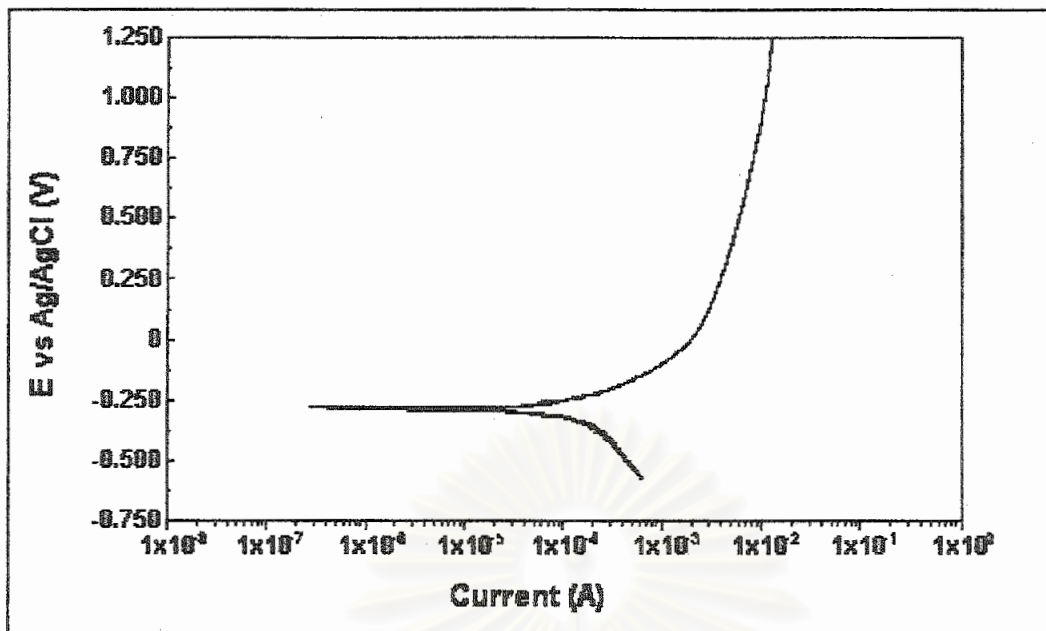
รูปที่ ค.24 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12



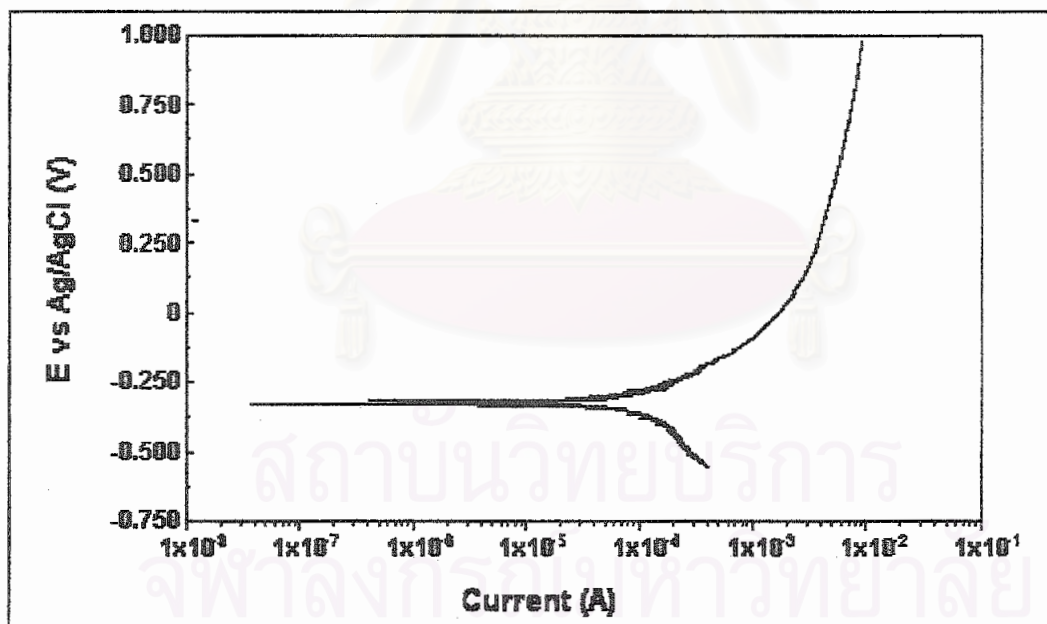
รูปที่ ค.25 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12.5



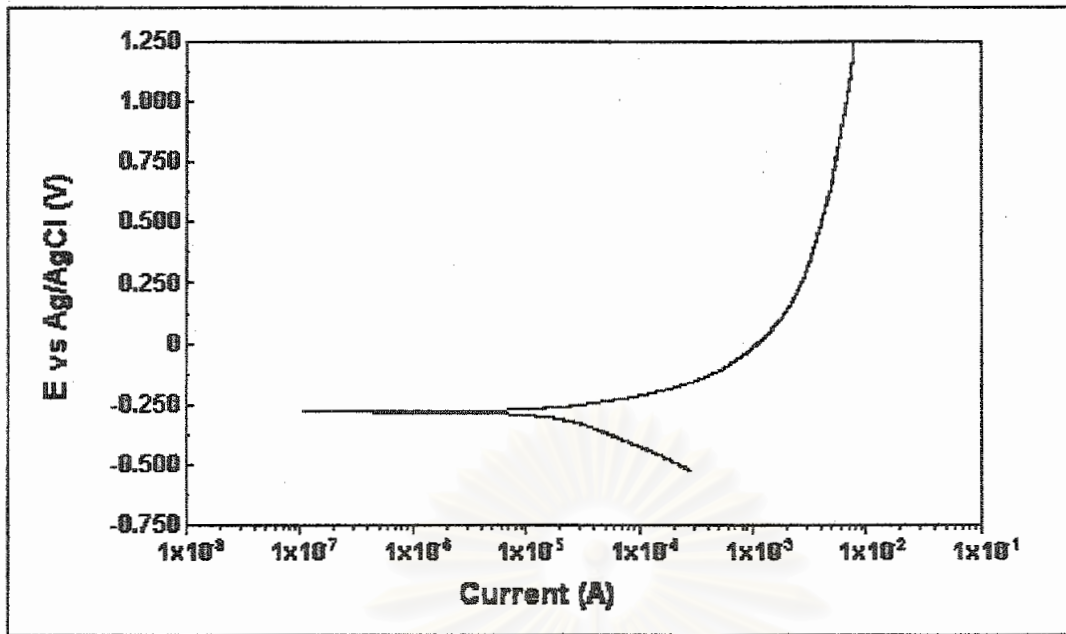
รูปที่ ค.26 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2



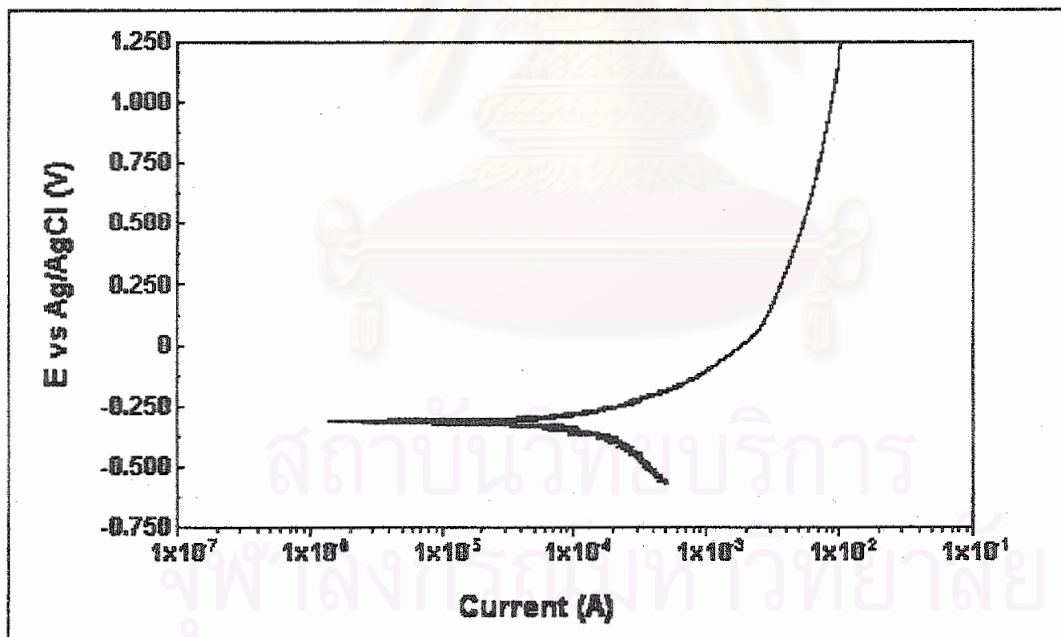
รูปที่ ค.27 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 4



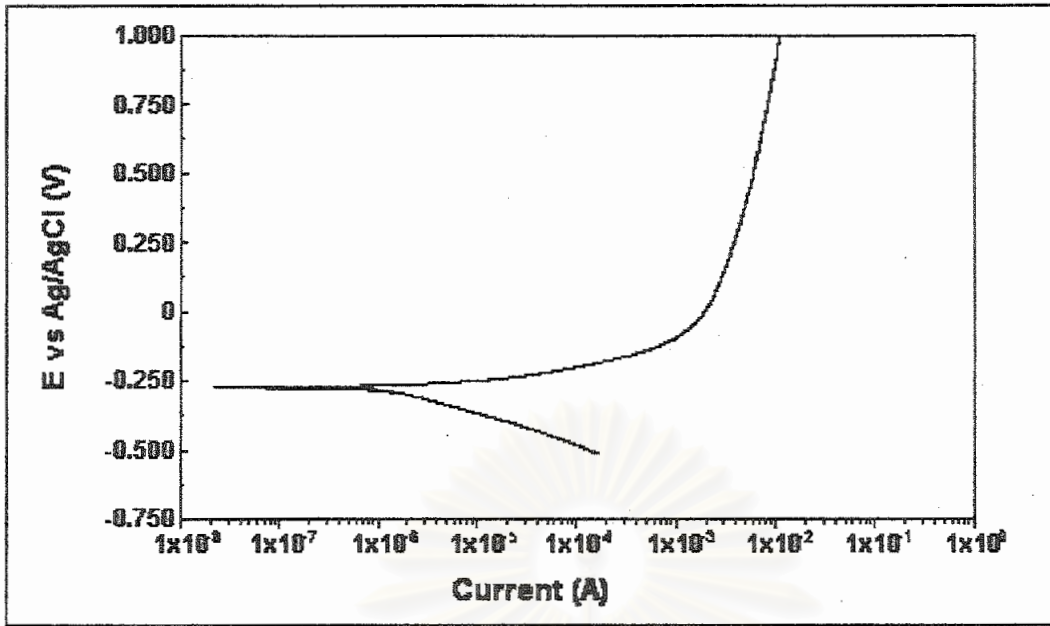
รูปที่ ค.28 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 6



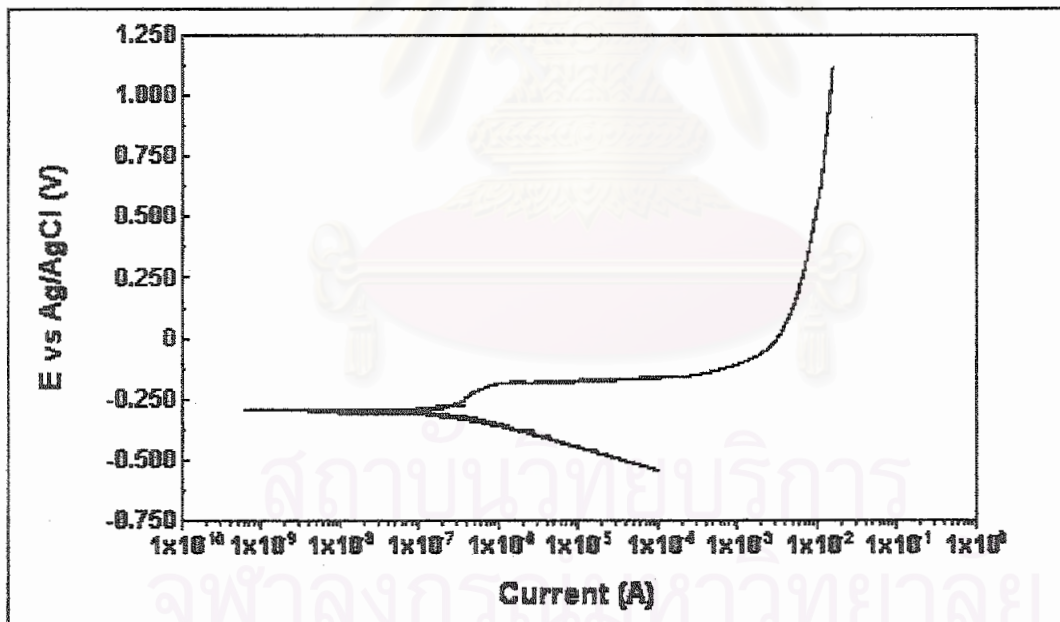
รูปที่ ค.29 แสดงเส้นโพลาริเซชันของอิเล็กโทรดคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 8



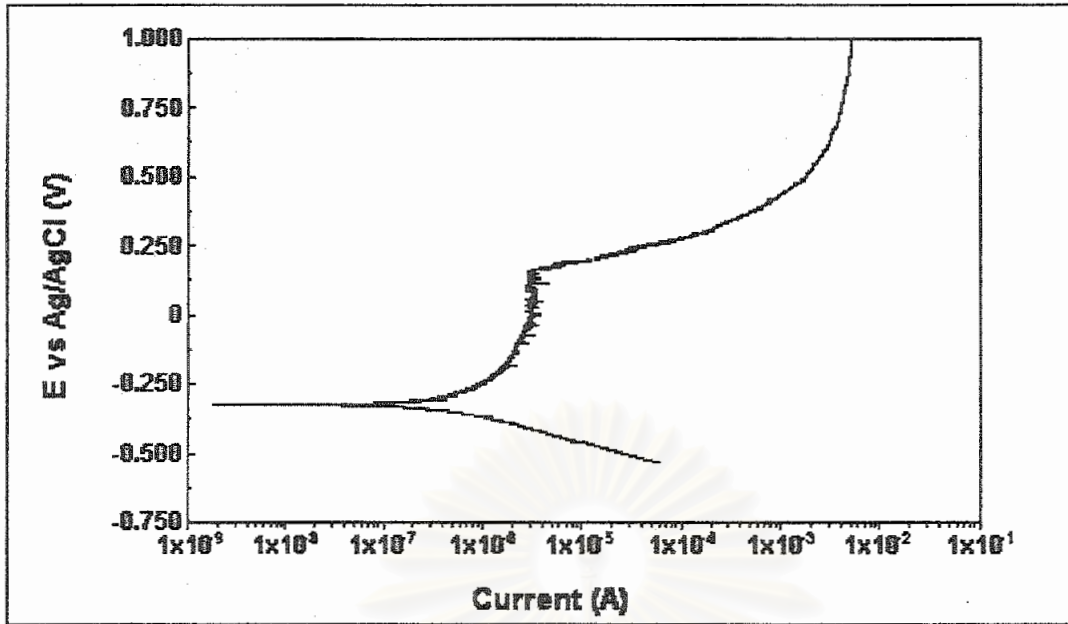
รูปที่ ค.30 แสดงเส้นโพลาริเซชันของอิเล็กโทรดคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 10



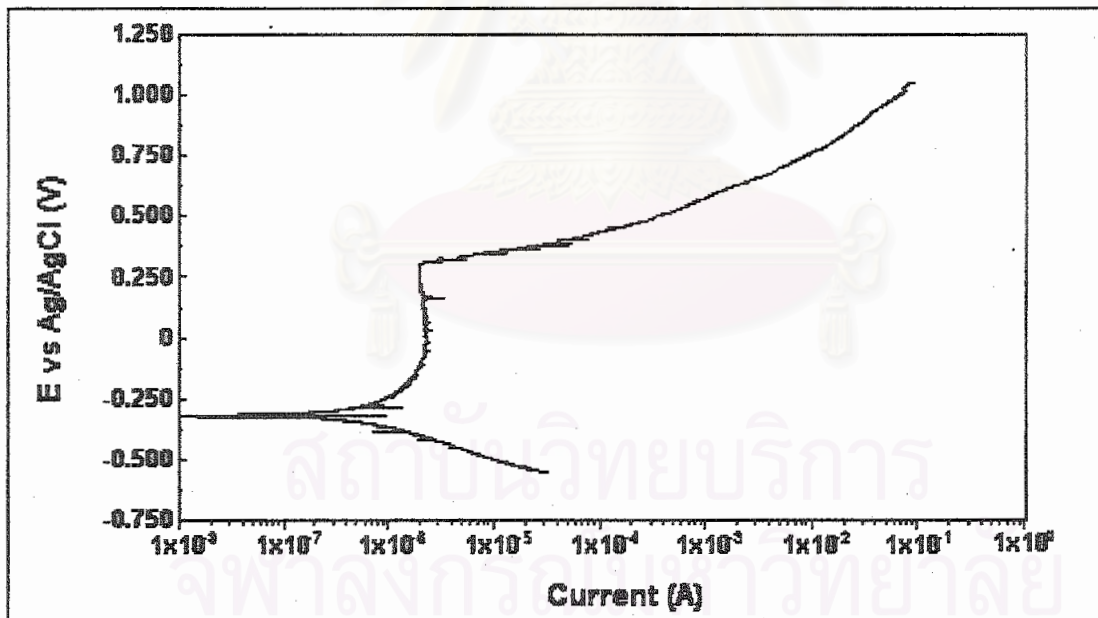
รูปที่ ค.31 แสดงเส้นโพลาริเซชันของอิเล็กโทรดคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 11



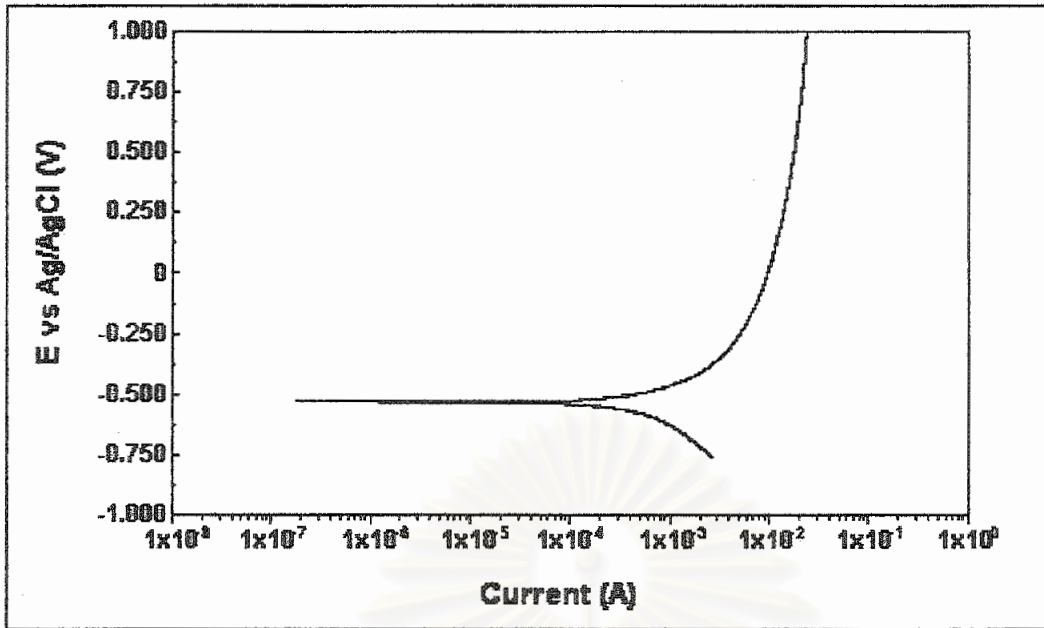
รูปที่ ค.32 แสดงเส้นโพลาริเซชันของอิเล็กโทรดคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 11.5



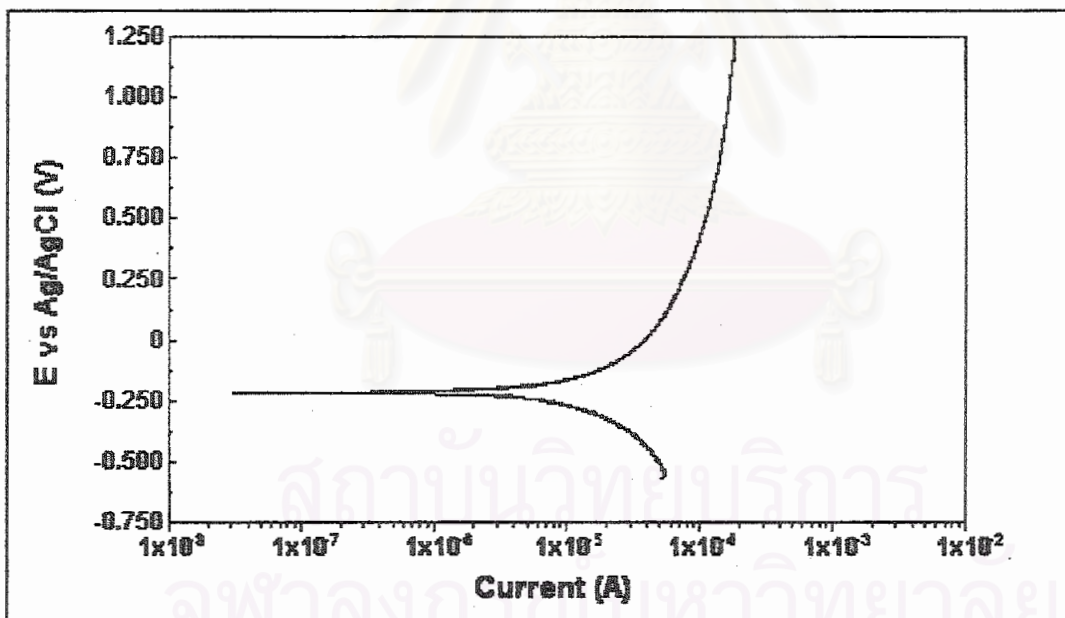
รูปที่ ค.33 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12



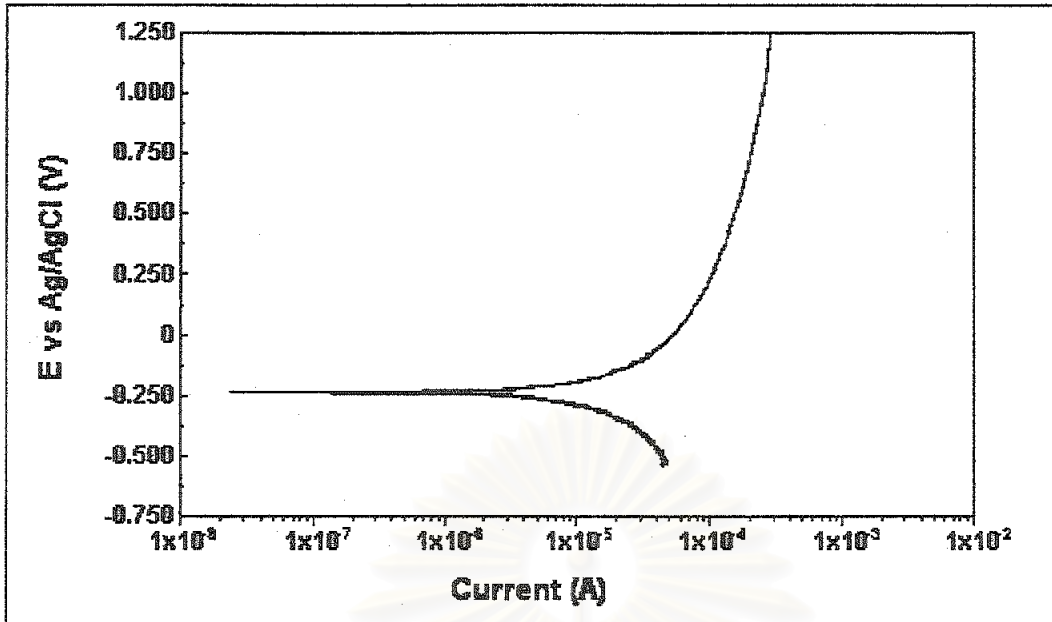
รูปที่ ค.34 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12.5



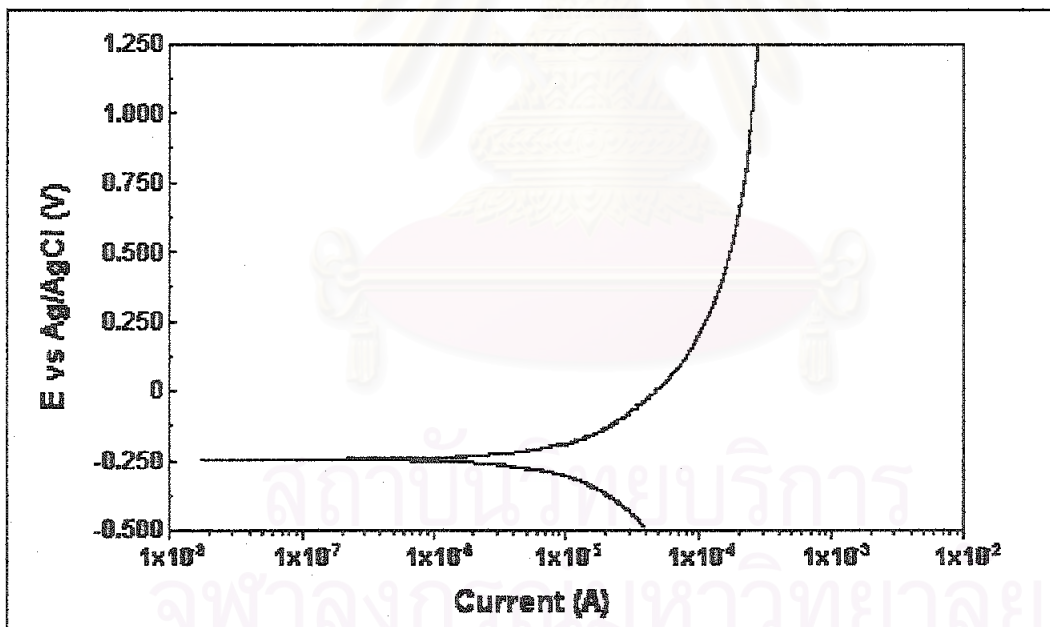
รูปที่ ค.35 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2



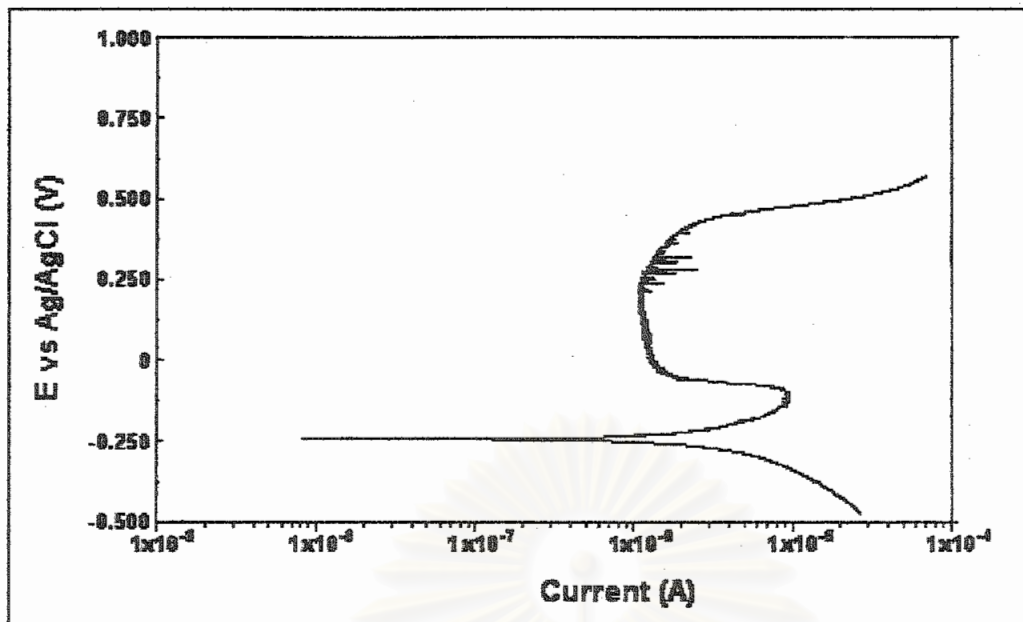
รูปที่ ค.36 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 4



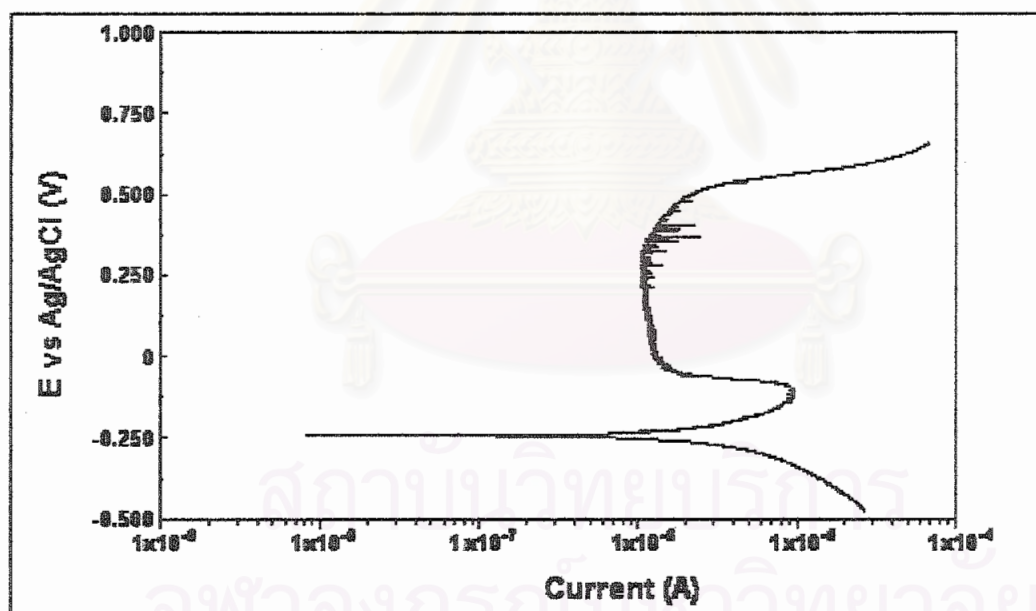
รูปที่ ค.37 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 6



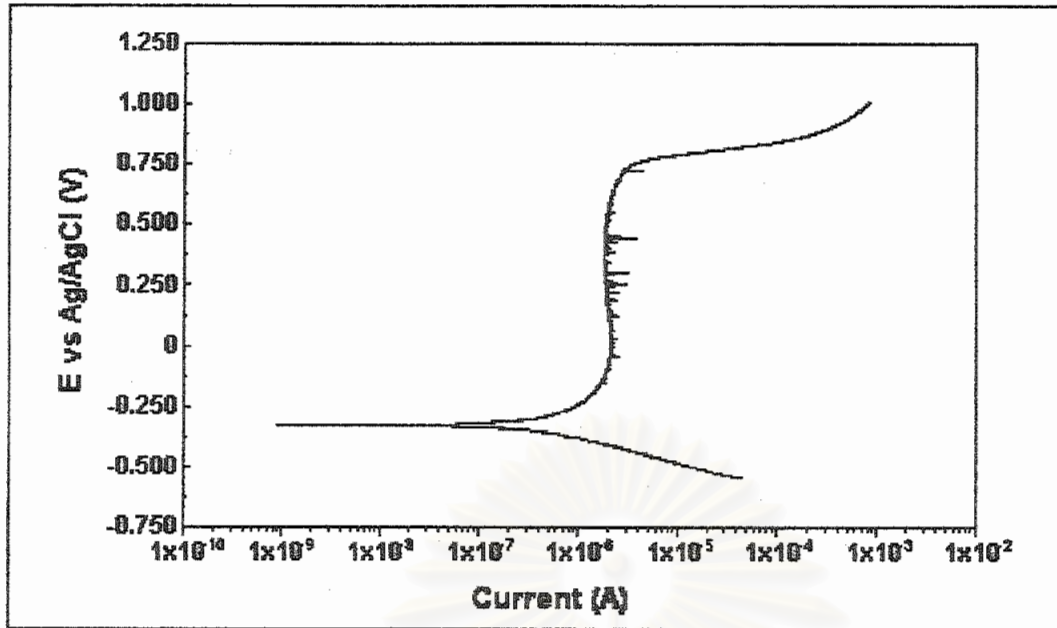
รูปที่ ค.38 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 8



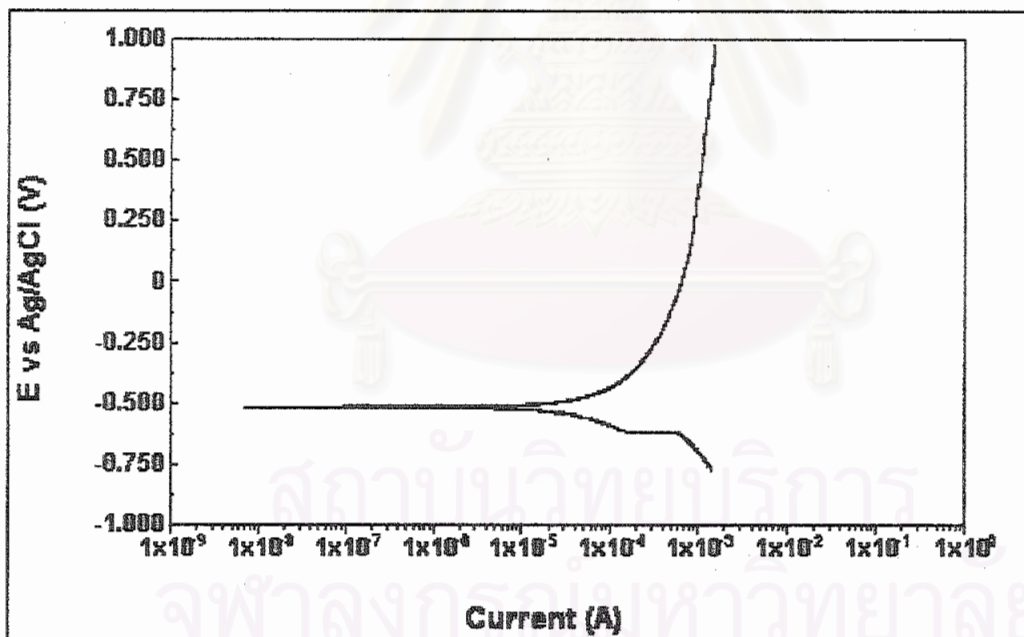
รูปที่ ค.39 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 9



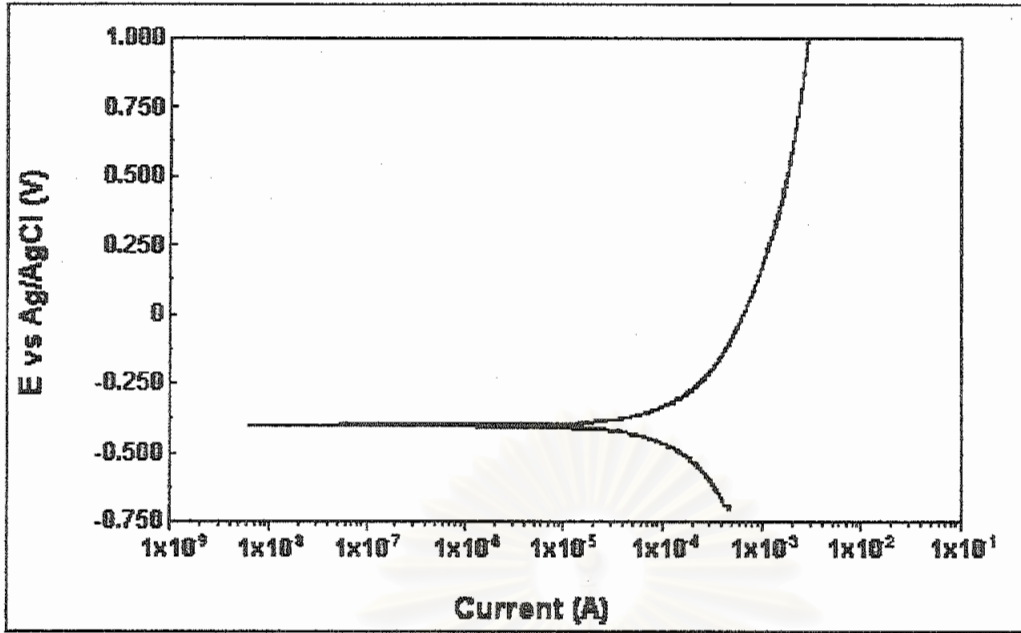
รูปที่ ค.40 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 10



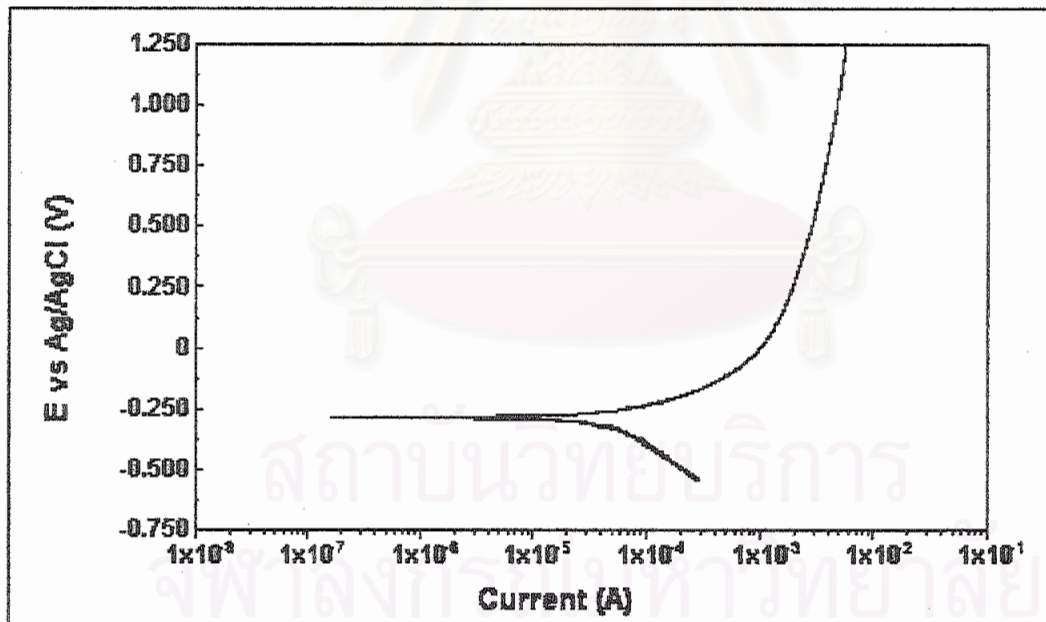
รูปที่ ค.41 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12



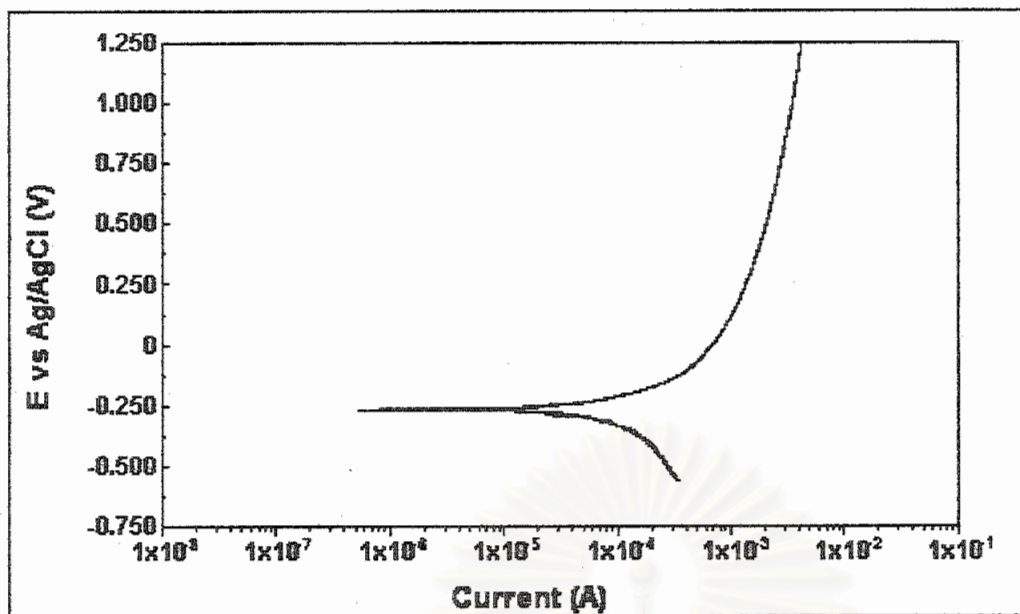
รูปที่ ค.42 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2



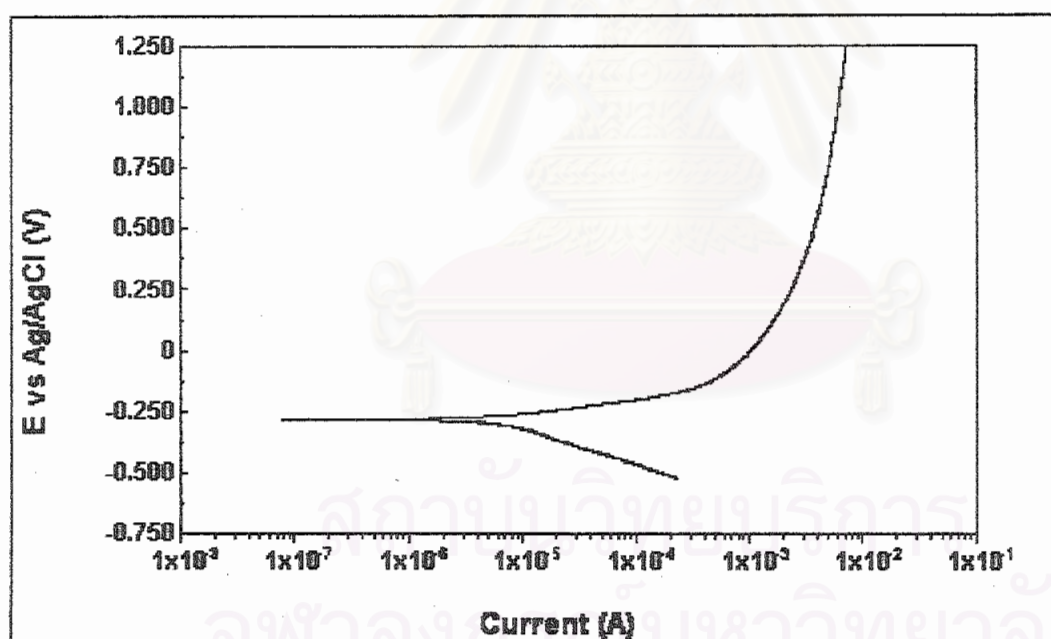
รูปที่ ค.43 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 4



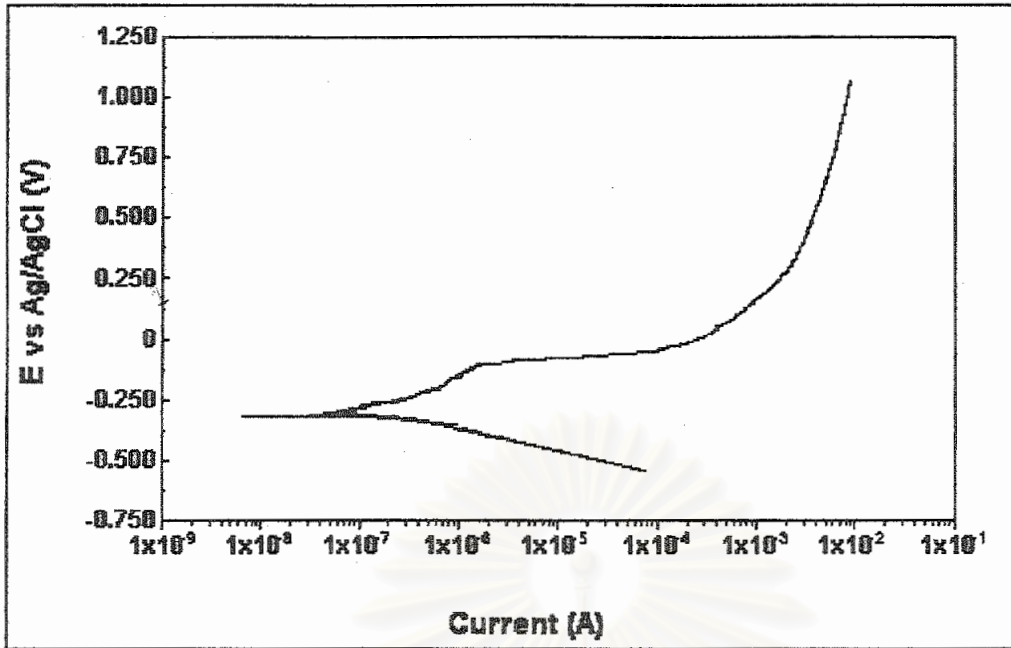
รูปที่ ค.44 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 6



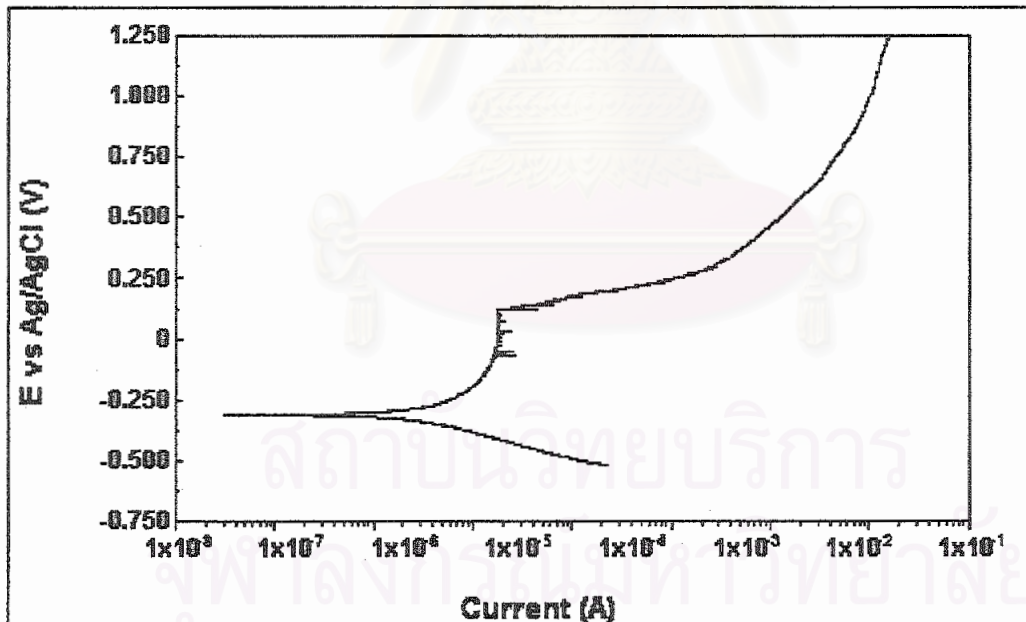
รูปที่ ค.45 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 8



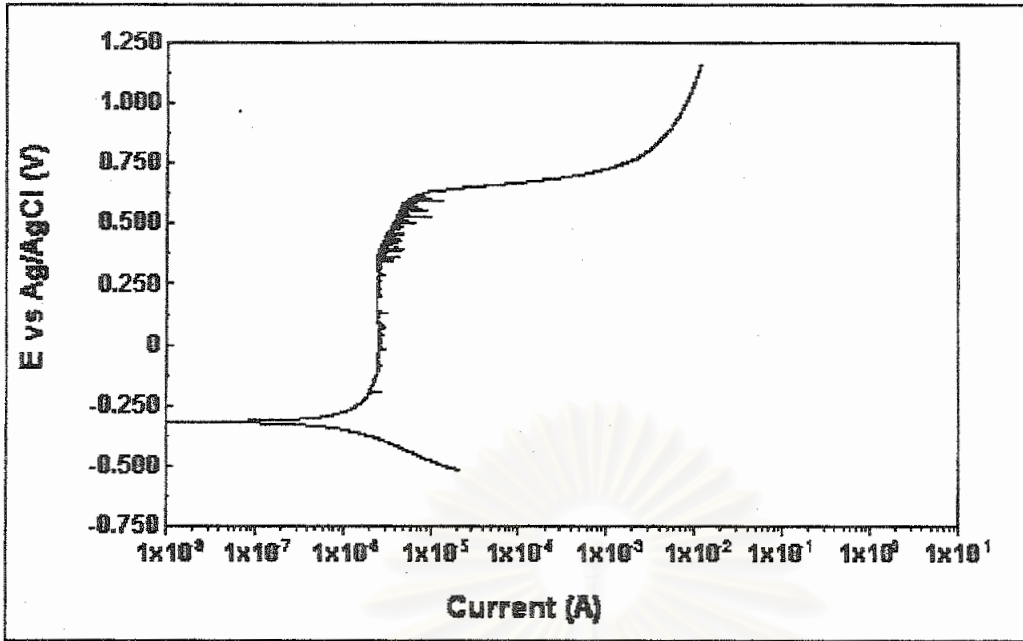
รูปที่ ค.46 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 10



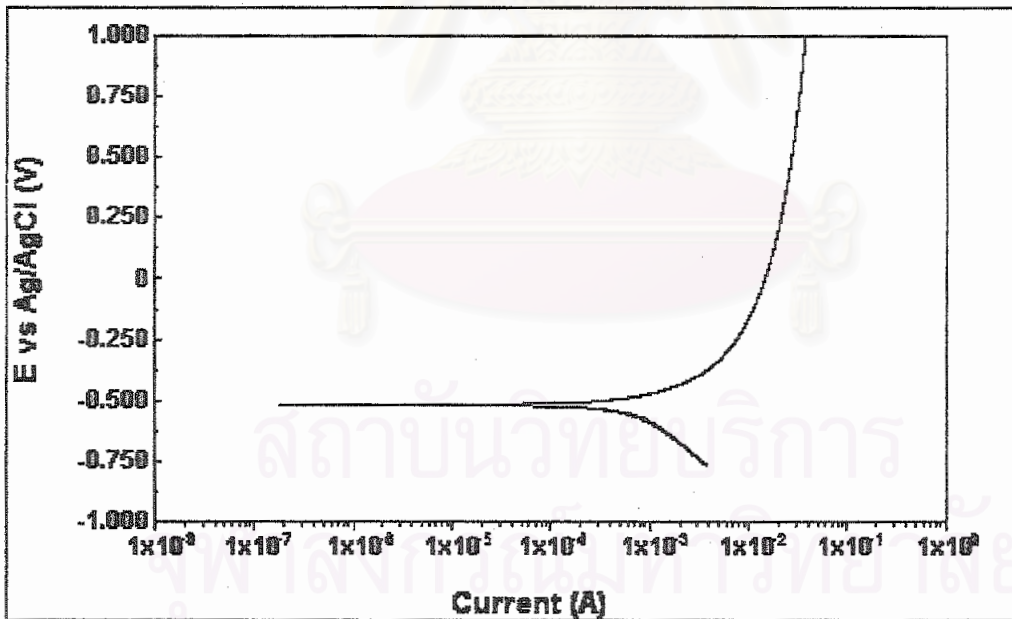
รูปที่ ค.47 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 11.5



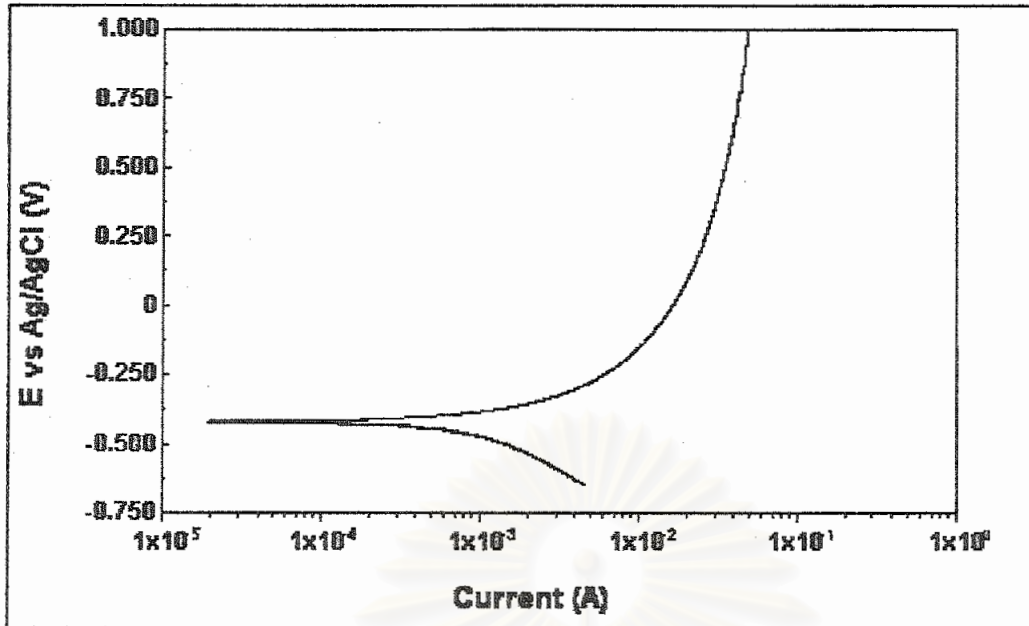
รูปที่ ค.48 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12



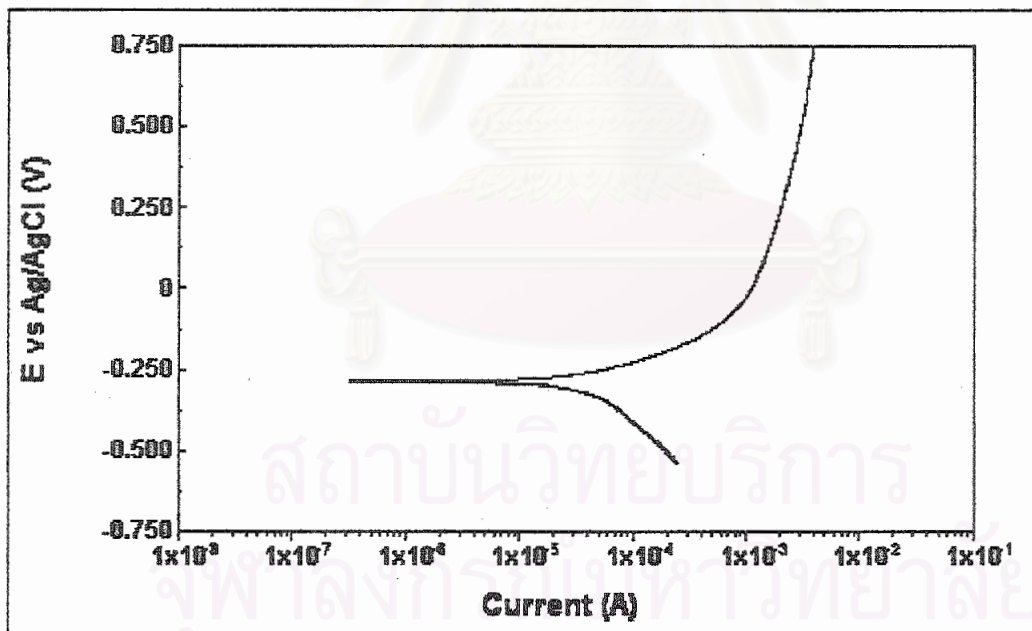
รูปที่ ค.49 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12.5



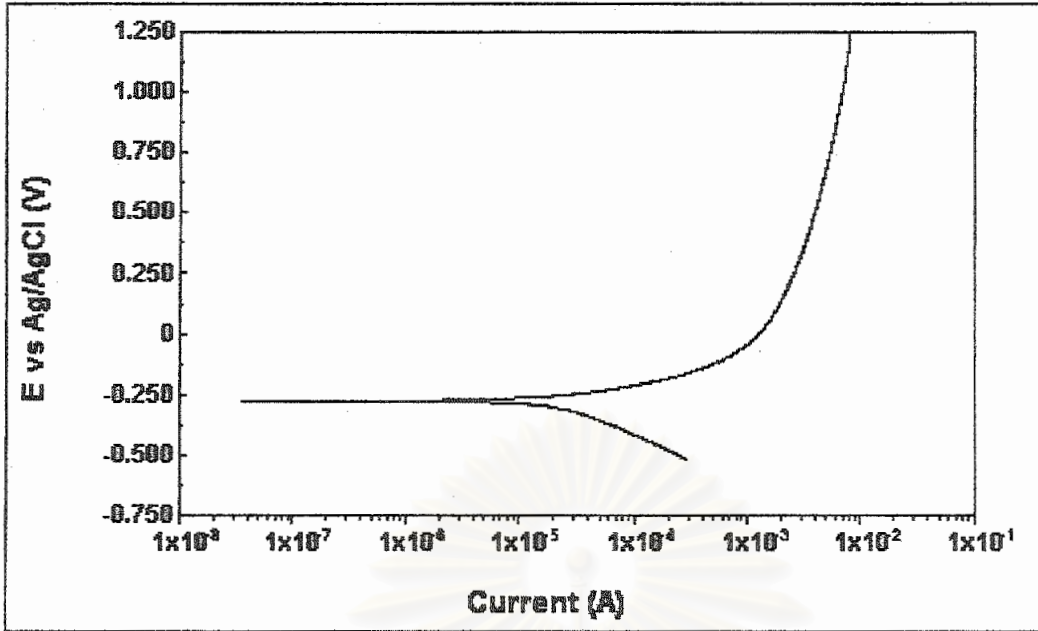
รูปที่ ค.50 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2



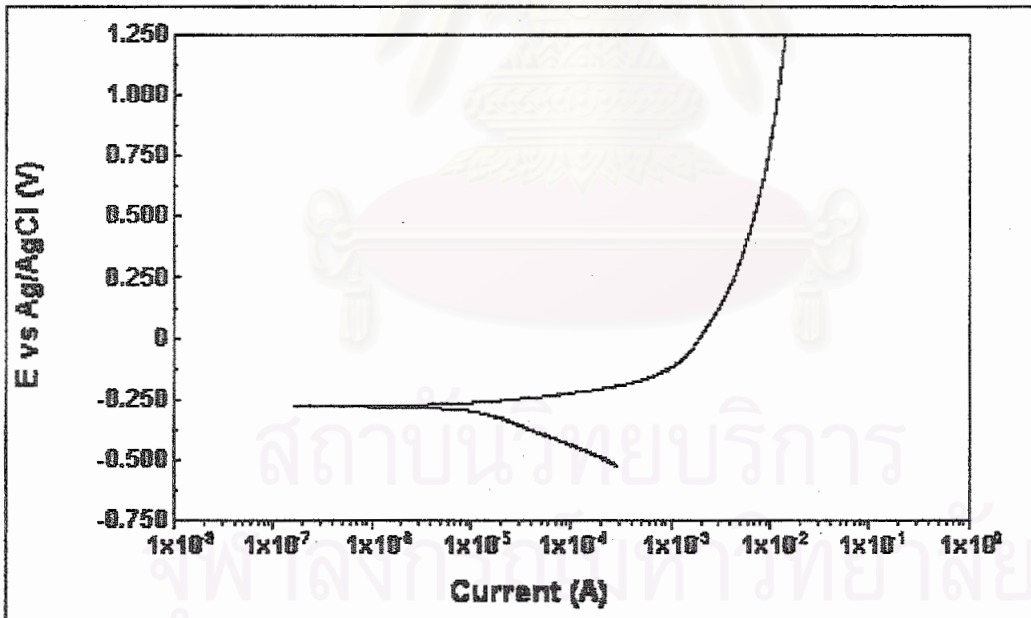
รูปที่ ค.51 แสดงเส้นโพลาริเซชันของอิเล็กโทรดคาร์บอนดำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 4



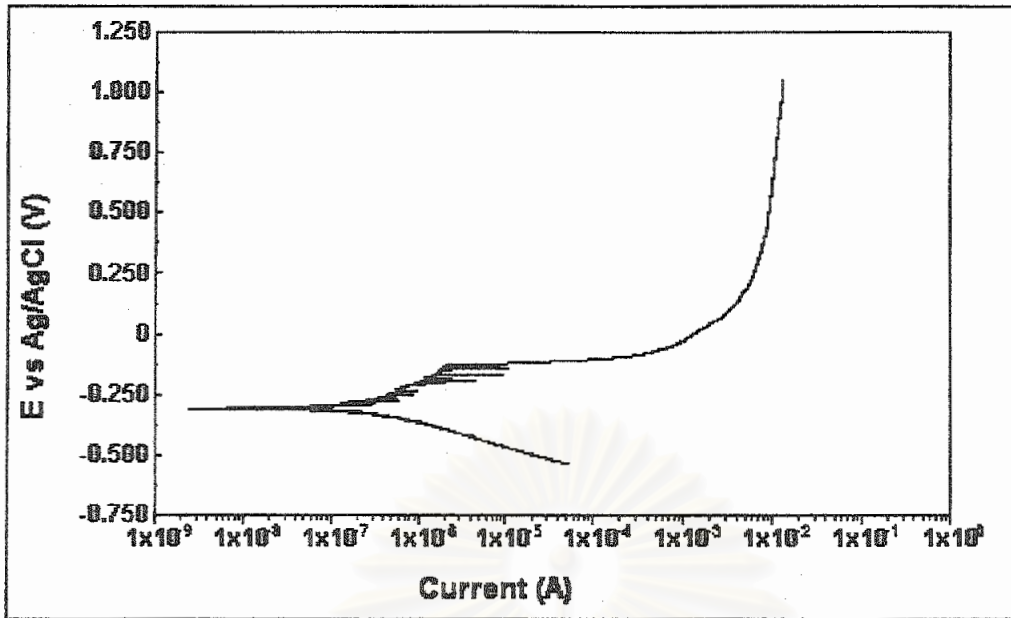
รูปที่ ค.52 แสดงเส้นโพลาริเซชันของอิเล็กโทรดคาร์บอนดำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 6



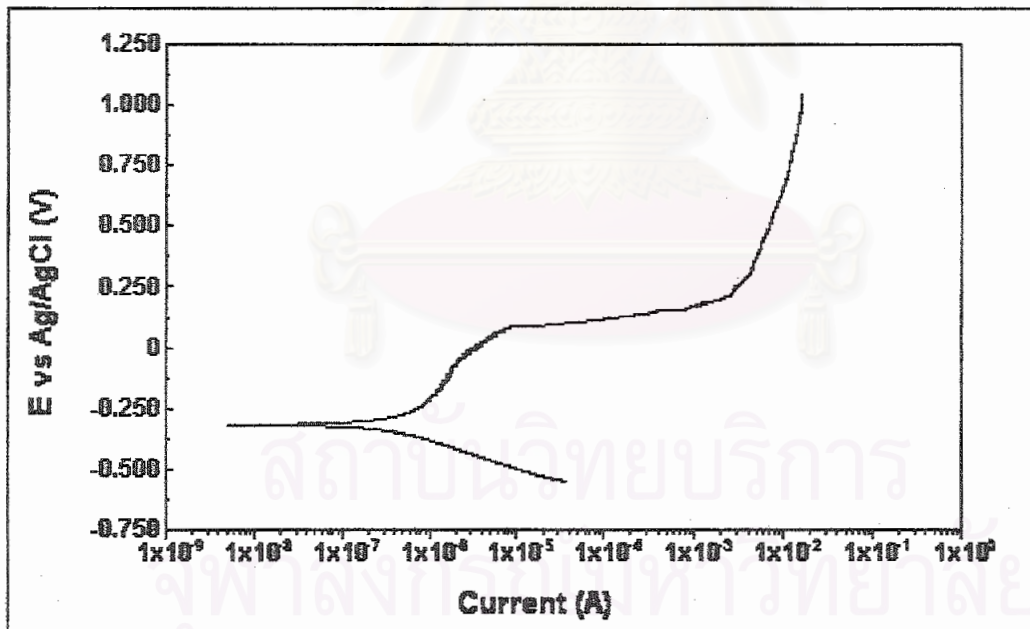
รูปที่ ค.53 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 8



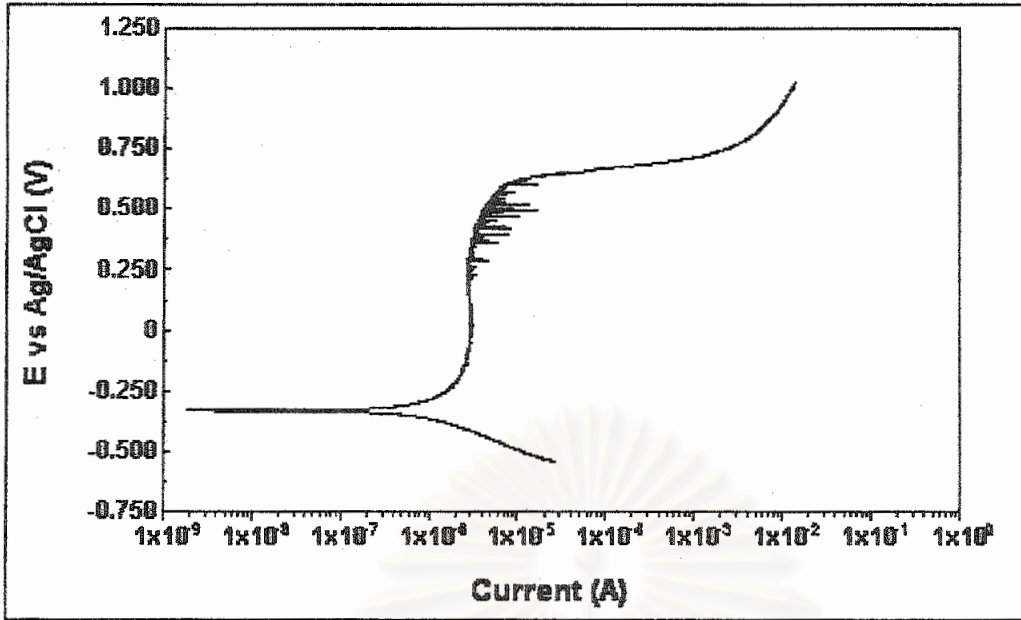
รูปที่ ค.54 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 10



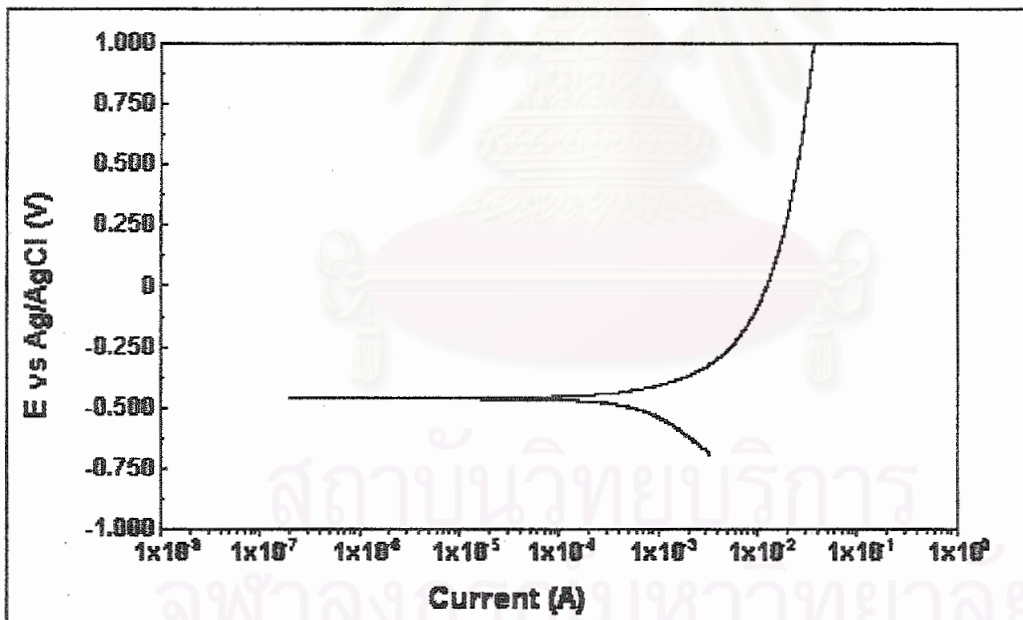
รูปที่ ค.55 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 11.5



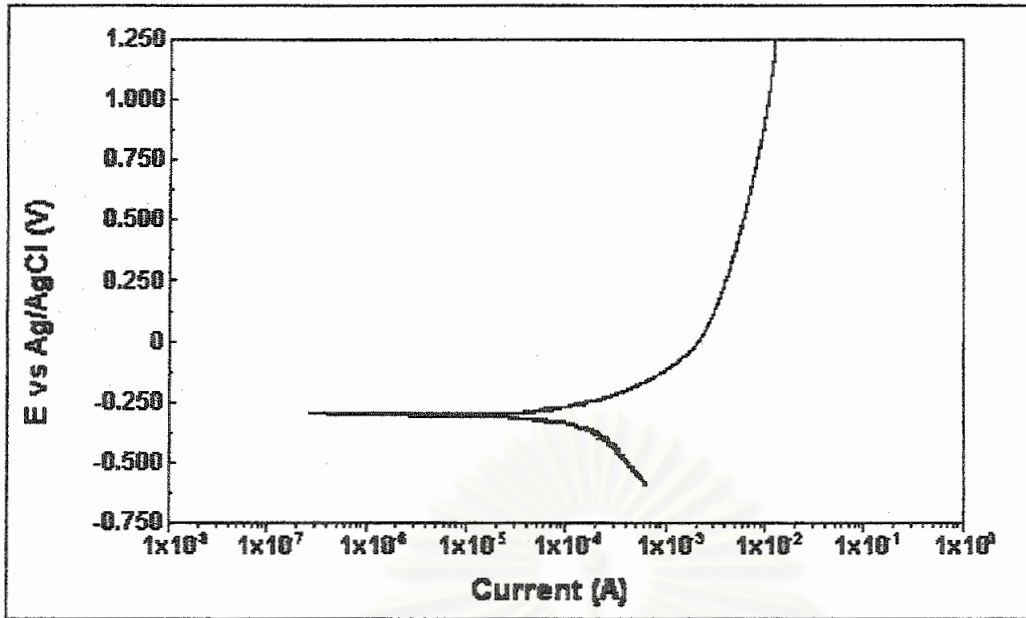
รูปที่ ค.56 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12



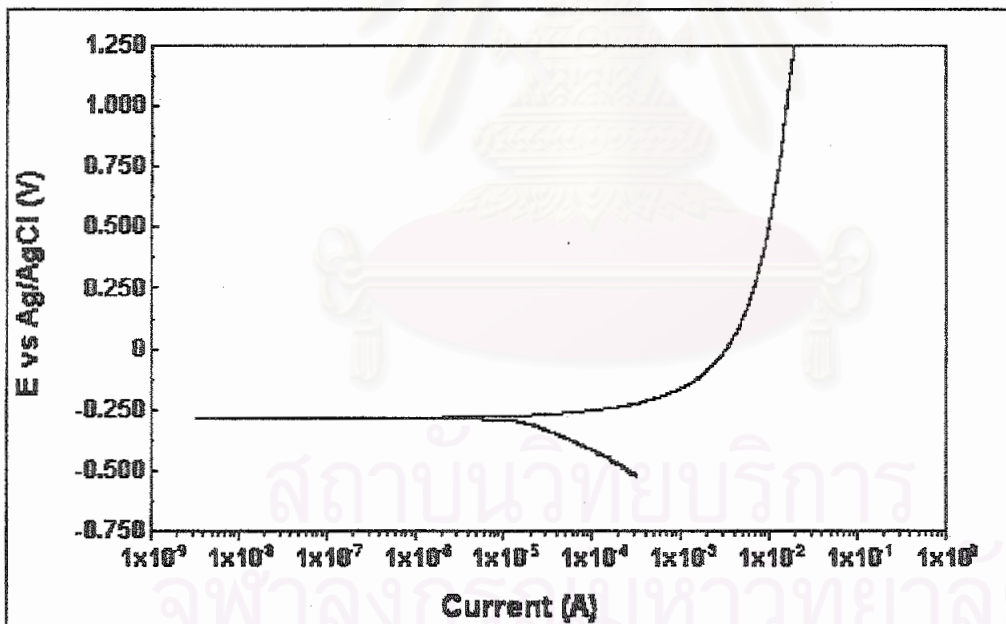
รูปที่ ค.57 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12.5



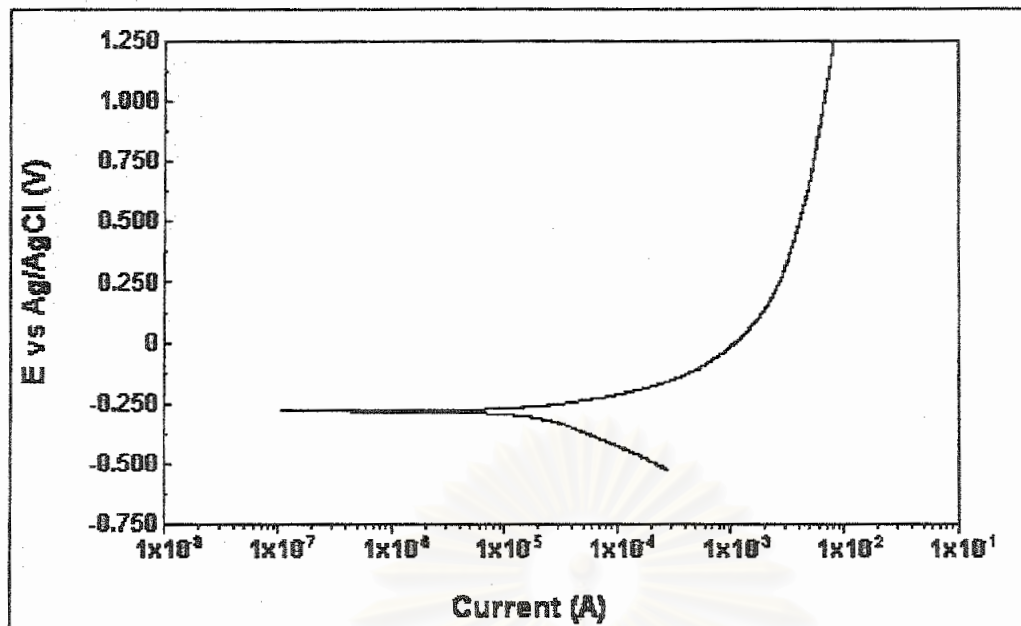
รูปที่ ค.58 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2



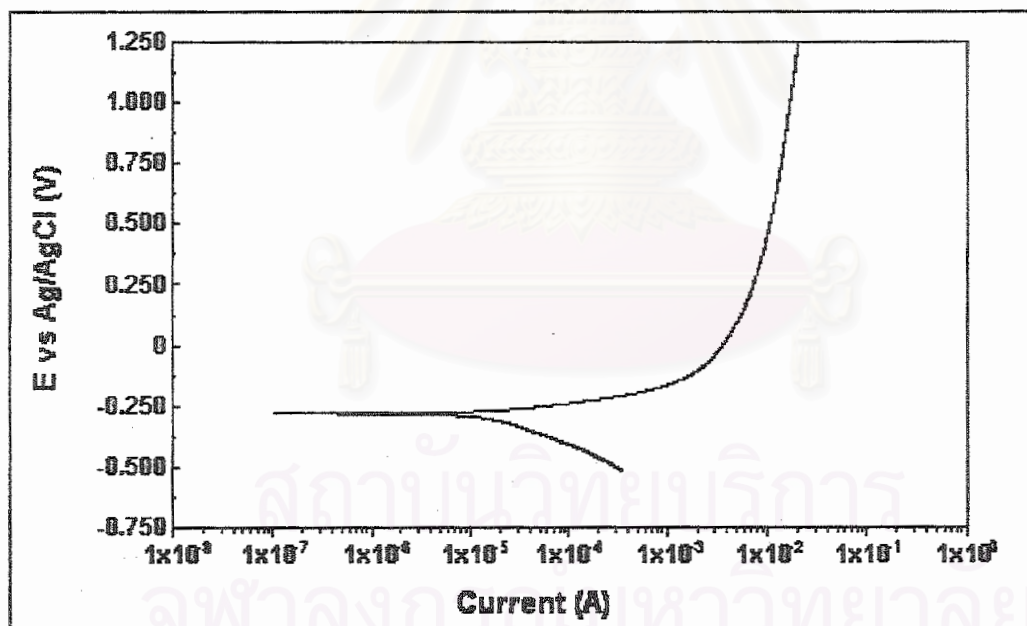
รูปที่ ค.59 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 4



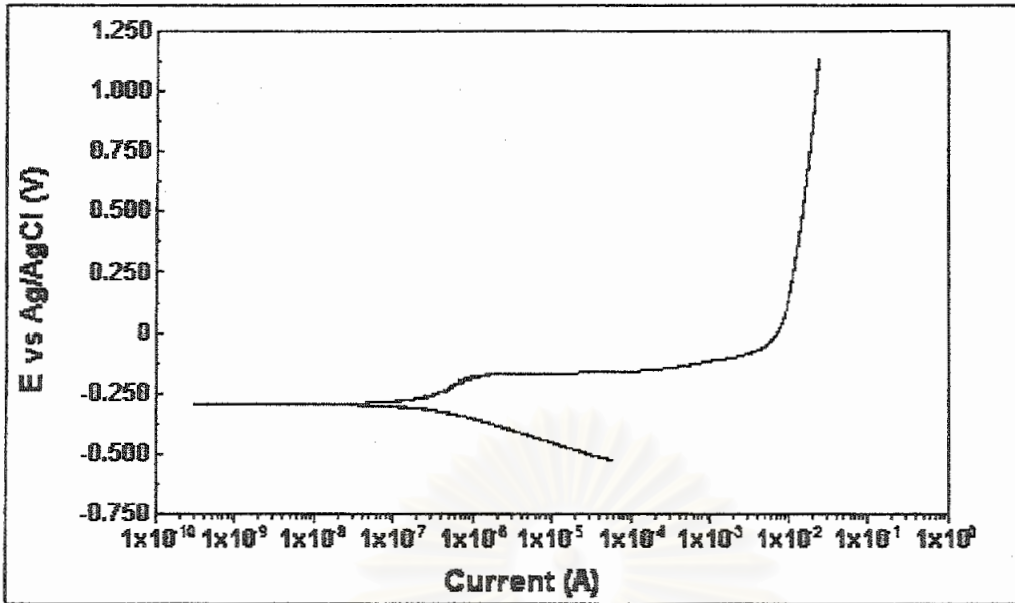
รูปที่ ค.60 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 6



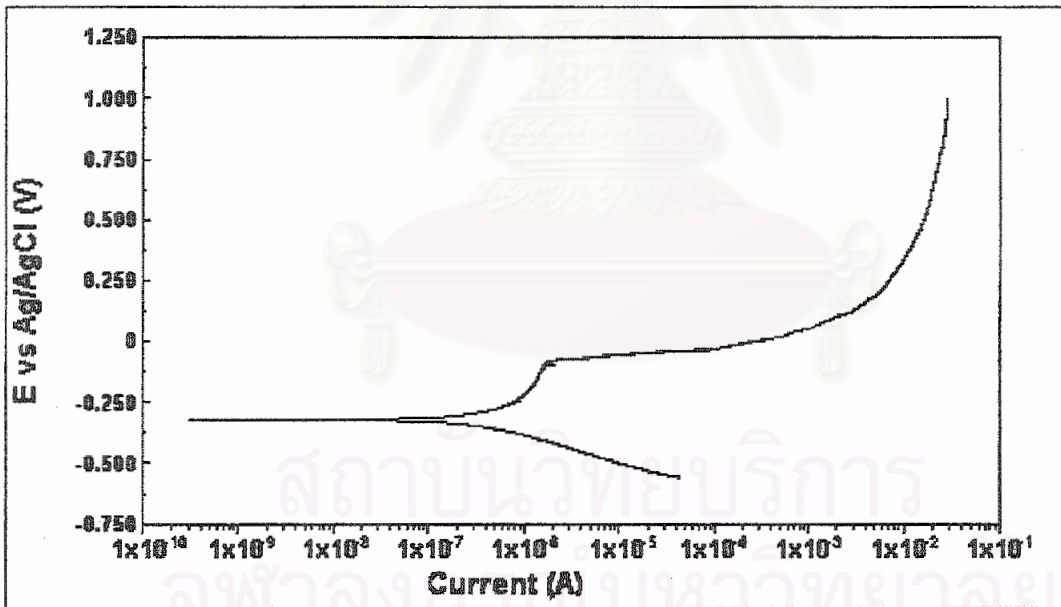
รูปที่ ค.61 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 8



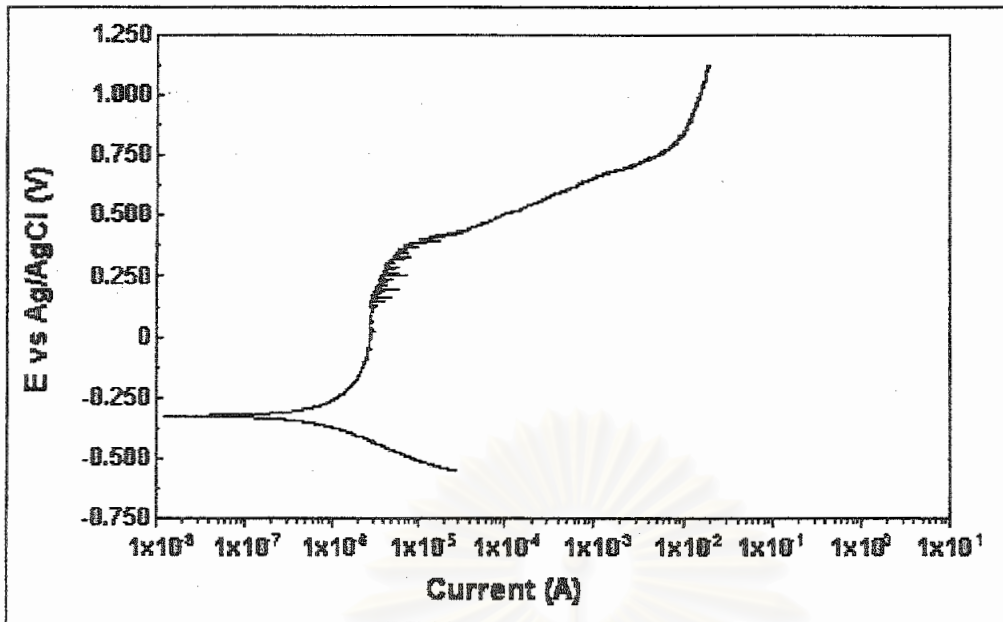
รูปที่ ค.62 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 10



รูปที่ ค.63 แสดงเส้นโพลาริเซชันของอิเล็กโทรดคาร์บอนดำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 11.5



รูปที่ ค.64 แสดงเส้นโพลาริเซชันของอิเล็กโทรดคาร์บอนดำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12



รูปที่ ค.65 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT2 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12.5

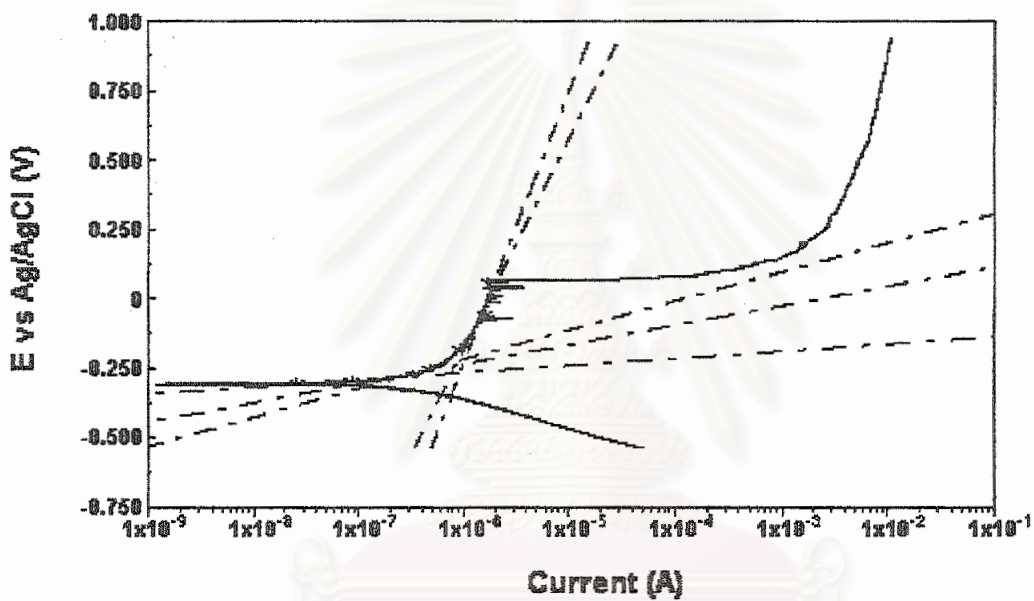
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการหาค่า Epp Ep และตารางแสดงค่า Epp และ Ep ของ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 และ SPHT2

ง.1 ตัวอย่างการหาค่า Epp

พิจารณารูปกราฟโพลาร์ไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่
ความเข้มข้นคลอไรด์ 400 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบส 12



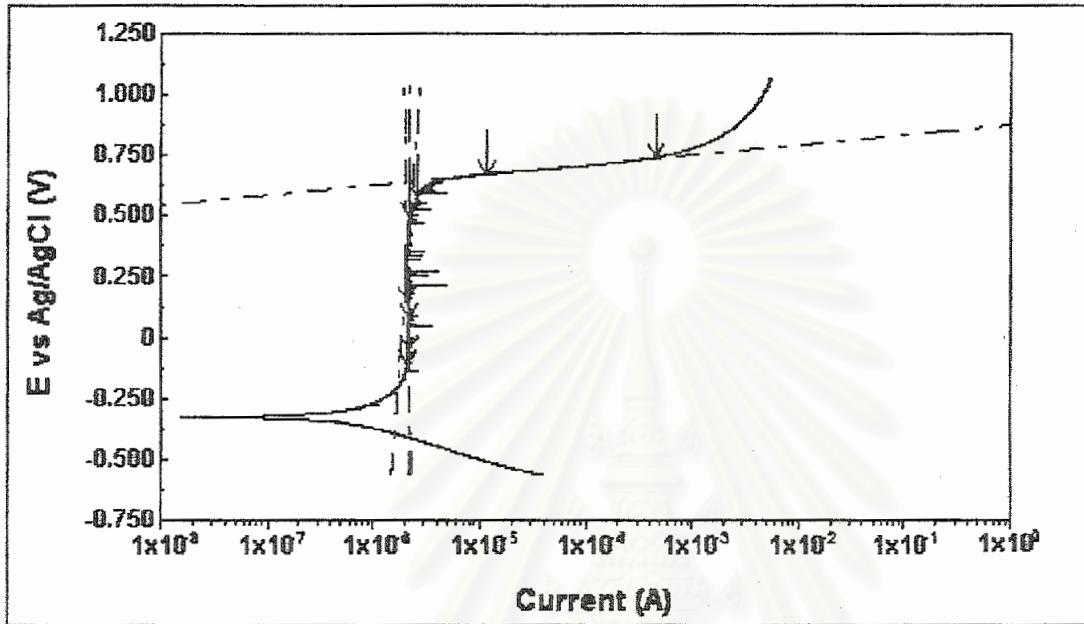
ค่า Epp คือค่าจุดตัดที่แสดงในกราฟทั้ง 6 จุด ค่าที่ได้แสดงในตาราง

Epp1 (V)	Epp2 (V)	Epp3 (V)	Epp4 (V)	Epp5 (V)	Epp6 (V)
-0.238	-0.238	-0.256	-0.253	-0.268	-0.271

นำค่า Epp ที่ได้ทั้ง 6 ค่ามาหาค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยที่ได้คือ -0.254

ง.2 ตัวอย่างการหาค่า E_p

พิจารณารูปกราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด SPHT1 ในสารละลายที่มี
ความเข้มข้นคลอไรด์ 200 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบส 12.5



ค่า E_p คือค่าจุดตัดที่แสดงในกราฟทั้ง 3 จุด ค่าที่ได้แสดงในตาราง

E_{p1} (V)	E_{p2} (V)	E_{p3} (V)
0.640	0.644	0.649

นำค่า E_p ที่ได้ทั้ง 3 ค่ามาหาค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยที่ได้คือ 0.6443

ตารางที่ ง.1 แสดงค่า Epp (V) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT1 ซึ่งคำนวณจากกราฟที่ความ
เข้มชั้นต่าง ๆ ของคลอไรด์

ความเข้มชั้นคลอไรด์	ค่าความเป็นกรดเบส	Epp1 (V)	Epp2 (V)	Epp3 (V)	Epp4 (V)	Epp5 (V)	Epp (V)
0 ppm	2	-0.252	-0.248	-0.257	-0.263	-0.26	-0.256
	4	-0.108	-0.103	-0.096	-0.086	-0.082	-0.095
	6	-0.115	-0.122	-0.131	-0.109	-0.128	-0.121
	8	-0.128	-0.127	-0.135	-0.138	-0.137	-0.133
	9	-0.078	-0.081	-0.088	-0.092	-0.076	-0.083
	10	-0.022	-0.016	-0.011	-0.004	-0.007	-0.012
	12	-0.096	-0.094	-0.088	-0.081	-0.077	-0.0872
200 ppm	2	-0.344	-0.349	-0.352	-0.358	-0.365	-0.3536
	4	-0.288	-0.292	-0.297	-0.304	-0.306	-0.2974
	6	-0.147	-0.148	-0.153	-0.155	-0.157	-0.152
	8	-0.113	-0.121	-0.124	-0.126	-0.132	-0.1232
	10	-0.124	-0.129	-0.134	-0.143	-0.143	-0.1346
	11	-0.066	-0.058	-0.062	-0.071	-0.072	-0.0658
	11.5	-0.221	-0.226	-0.232	-0.237	-0.248	-0.2328
	12	-0.263	-0.263	-0.271	-0.274	-0.282	-0.2706
12.5	-0.253	-0.258	-0.259	-0.264	-0.265	-0.2598	
400 ppm	2	-0.363	-0.368	-0.378	-0.379	-0.389	-0.3754
	4	-0.234	-0.242	-0.246	-0.256	-0.258	-0.2472
	6	-0.164	-0.169	-0.169	-0.172	-0.178	-0.1704
	8	-0.173	-0.179	-0.188	-0.192	-0.204	-0.1872
	10	-0.124	-0.129	-0.132	-0.138	-0.141	-0.1328
	11	-0.149	-0.157	-0.163	-0.166	-0.172	-0.1614
	11.5	-0.276	-0.281	-0.282	-0.288	-0.296	-0.2846
	12	-0.243	-0.248	-0.255	-0.259	-0.265	-0.254
	12.5	-0.271	-0.276	-0.281	-0.286	-0.288	-0.2804
600 ppm	2	-0.334	-0.33	-0.325	-0.312	-0.317	-0.3236
	4	-0.163	-0.167	-0.174	-0.177	-0.183	-0.1728
	6	-0.206	-0.213	-0.217	-0.222	-0.231	-0.2178
	8	-0.144	-0.149	-0.158	-0.162	-0.172	-0.157
	10	-0.188	-0.189	-0.194	-0.199	-0.206	-0.1952
	11	-0.098	-0.103	-0.108	-0.114	-0.115	-0.1076
	11.5	-0.224	-0.228	-0.234	-0.239	-0.246	-0.2342
	12	-0.155	-0.162	-0.167	-0.171	-0.177	-0.1664
	12.5	-0.166	-0.171	-0.178	-0.178	-0.185	-0.1756

ตารางที่ ง.2 แสดงค่า Epp (V) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT 2 ซึ่งคำนวณจากกราฟที่ความ
เข้มชั้นต่าง ๆ ของคลอไรด์

ความเข้มชั้นคลอไรด์	ค่าความเป็นกรดเบส	Epp1 (V)	Epp2 (V)	Epp3 (V)	Epp4 (V)	Epp5 (V)	Epp (V)
0 ppm	2	-0.396	-0.399	-0.406	-0.408	-0.411	-0.404
	4	-0.089	-0.095	-0.098	-0.106	-0.111	-0.0998
	6	-0.086	-0.088	-0.076	-0.071	-0.064	-0.077
	8	-0.121	-0.124	-0.132	-0.138	-0.148	-0.1326
	9	-0.057	-0.055	-0.068	-0.062	-0.062	-0.0608
	10	-0.008	-0.011	-0.017	-0.023	-0.012	-0.0142
	12	-0.073	-0.076	-0.088	-0.091	-0.099	-0.0854
200 ppm	2	-0.342	-0.344	-0.349	-0.355	-0.363	-0.3506
	4	-0.291	-0.293	-0.298	-0.304	-0.306	-0.2984
	6	-0.113	-0.118	-0.124	-0.126	-0.131	-0.1224
	8	-0.116	-0.117	-0.122	-0.128	-0.131	-0.1228
	10	-0.101	-0.109	-0.111	-0.124	-0.114	-0.1118
	11.5	-0.243	-0.253	-0.257	-0.259	-0.287	-0.2558
	12	-0.244	-0.251	-0.256	-0.257	-0.266	-0.2548
12.5	-0.234	-0.235	-0.238	-0.246	-0.256	-0.2418	
400 ppm	2	-0.381	-0.392	-0.398	-0.398	-0.409	-0.3956
	4	-0.333	-0.346	-0.348	-0.348	-0.361	-0.3472
	6	-0.155	-0.157	-0.166	-0.167	-0.169	-0.1628
	8	-0.178	-0.186	-0.188	-0.194	-0.196	-0.1884
	10	-0.121	-0.134	-0.138	-0.142	-0.149	-0.1368
	11.5	-0.271	-0.276	-0.282	-0.286	-0.293	-0.2816
	12	-0.243	-0.247	-0.255	-0.261	-0.268	-0.2548
12.5	-0.243	-0.247	-0.255	-0.256	-0.262	-0.2526	
600 ppm	2	-0.365	-0.371	-0.382	-0.377	-0.388	-0.3766
	4	-0.184	-0.191	-0.193	-0.199	-0.201	-0.1936
	6	-0.155	-0.146	-0.158	-0.163	-0.167	-0.1578
	8	-0.143	-0.152	-0.159	-0.161	-0.169	-0.1568
	10	-0.124	-0.129	-0.138	-0.147	-0.148	-0.1372
	11.5	-0.262	-0.276	-0.285	-0.264	-0.278	-0.273
	12	-0.255	-0.261	-0.267	-0.274	-0.284	-0.2682
12.5	-0.288	-0.289	-0.297	-0.298	-0.301	-0.2946	

ตารางที่ ง.3 แสดงค่า E_p (V) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT 1 ซึ่งคำนวณจากกราฟที่ความเข้มชั้นต่าง ๆ ของคลอไรด์

ความเข้มชั้นคลอไรด์	ค่าความเป็นกรดเบส	Ep1 (V)	Ep2 (V)	Ep3 (V)	Ep4 (V)	Ep5 (V)	Ep (V)
0 ppm	9	0.324	0.331	0.336	0.343	0.331	0.333
	10	0.44	0.445	0.448	0.436	0.451	0.444
	12	0.618	0.615	0.609	0.621	0.608	0.6142
200 ppm	11.5	-0.052	-0.044	-0.054	-0.052	-0.058	-0.052
	12	0.069	0.062	0.074	0.08	0.077	0.0724
	12.5	0.636	0.644	0.644	0.648	0.632	0.6408
400 ppm	11.5	-0.054	-0.041	-0.048	-0.057	-0.06	-0.052
	12	0.064	0.055	0.059	0.066	0.075	0.0638
	12.5	0.337	0.325	0.3331	0.339	0.349	0.33662
600 ppm	11.5	-0.156	-0.159	-0.156	-0.168	-0.144	-0.1566
	12	0.141	0.132	0.139	0.146	0.148	0.1412
	12.5	0.315	0.328	0.307	0.318	0.309	0.3154

ตารางที่ ง.4 แสดงค่า E_p (V) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPHT 2 ซึ่งคำนวณจากกราฟที่ความเข้มชั้นต่าง ๆ ของคลอไรด์

ความเข้มชั้นคลอไรด์	ค่าความเป็นกรดเบส	Ep1 (V)	Ep2 (V)	Ep3 (V)	Ep4 (V)	Ep5 (V)	Ep (V)
0 ppm	9	0.373	0.379	0.385	0.377	0.382	0.3792
	10	0.481	0.478	0.475	0.486	0.471	0.4782
	12	0.75	0.746	0.743	0.752	0.738	0.7458
200 ppm	11.5	-0.118	-0.114	-0.126	-0.109	-0.125	-0.1184
	12	0.125	0.134	0.129	0.117	0.121	0.1252
	12.5	0.603	0.611	0.625	0.615	0.609	0.6126
400 ppm	11.5	-0.126	-0.113	-0.126	-0.128	-0.135	-0.1256
	12	0.112	0.121	0.126	0.136	0.132	0.1254
	12.5	0.603	0.612	0.586	0.594	0.607	0.6004
600 ppm	11.5	-0.123	-0.134	-0.109	-0.116	-0.125	-0.1214
	12	-0.086	-0.074	-0.082	-0.097	-0.089	-0.0856
	12.5	0.375	0.338	0.356	0.341	0.365	0.355

ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ.1 สีของตะกอนที่เกิดขึ้นจากการหยด $K_3[Fe(CN)_6]$ ลงในสารละลายตัวอย่าง เพื่อทดสอบหา Fe^{2+} (ก) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 2
(ข) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 6
(ค) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 12

ค่าความเป็นกรดเบส	ความเข้มข้นคลอไรด์ 0 พีพีเอ็ม			ความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม		
	E = -0.25 (V)	E = 0.125 (V)	E = 0.5 (V)	E = -0.25 (V)	E = 0.25 (V)	E = 0.75 (V)
2	น้ำเงิน	น้ำเงิน	น้ำเงิน	น้ำเงิน	น้ำเงิน	-

(ก)

ค่าความเป็นกรดเบส	ความเข้มข้นคลอไรด์ 0 พีพีเอ็ม			ความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม		
	E = -0.125 (V)	E = 0.375 (V)	E = 0.875 (V)	E = -0.125 (V)	E = 0.25 (V)	E = 0.75 (V)
6	น้ำเงิน	น้ำเงิน	-	น้ำเงิน	น้ำเงิน	-

(ข)

ค่าความเป็นกรดเบส	ความเข้มข้นคลอไรด์ 0 พีพีเอ็ม			ความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม		
	E = -0.25 (V)	E = 0.25 (V)	E = 0.75 (V)	E = -0.25 (V)	E = 0.06 (V)	E = 0.5 (V)
12	-	-	-	-	-	-

(ค)

หมายเหตุ - คือไม่เกิดตะกอน

ตารางที่ ๑.2 สีของตะกอนที่เกิดขึ้นจากการหยด Na_2HPO_4 ลงในสารละลายตัวอย่าง เพื่อทดสอบหา Fe^{3+} (ก) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 2
(ข) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 6
(ค) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 12

ค่าความเป็นกรดเบส	ความเข้มข้นคลอไรด์ 0 พีพีเอ็ม			ความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม		
	E = -0.25 (V)	E = 0.125 (V)	E = 0.5 (V)	E = -0.25 (V)	E = 0.25 (V)	E = 0.75 (V)
2	-	-	-	-	-	เหลืองอ่อน

(ก)

ค่าความเป็นกรดเบส	ความเข้มข้นคลอไรด์ 0 พีพีเอ็ม			ความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม		
	E = -0.125 (V)	E = 0.375 (V)	E = 0.875 (V)	E = -0.125 (V)	E = 0.25 (V)	E = 0.75 (V)
6	-	-	เหลืองอ่อน	-	-	เหลืองอ่อน

(ข)

ค่าความเป็นกรดเบส	ความเข้มข้นคลอไรด์ 0 พีพีเอ็ม			ความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม		
	E = -0.25 (V)	E = 0.25 (V)	E = 0.75 (V)	E = -0.25 (V)	E = 0.06 (V)	E = 0.5 (V)
12	-	-	-	-	-	-

(ค)

หมายเหตุ - คือไม่เกิดตะกอน

สังเกตผลจากตารางที่ ๑.1 และ ๑.2 พบว่าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำ ๆ สารละลายตัวอย่างจะมี Fe^{2+} ละลายอยู่ (ได้ตะกอนสีน้ำเงิน) แต่เมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง พบว่าสารละลายตัวอย่างจะมี Fe^{3+} ละลายอยู่ (ได้ตะกอนสีเหลืองอ่อน) ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 2.1 สังเกตได้จากสีของสารละลายตัวอย่างซึ่งไม่มีคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดเบส 6 และสีของสารละลายตัวอย่างซึ่งมีความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรดเบส 2 และ 6 จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนเมื่อหยด

Na_2HPO_4 ลงในสารละลายตัวอย่าง (ค่า Ecor ของสารละลายที่3 เงื่อนไขการทดลองนี้มีค่าศักย์ไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 0.75 V)

ตารางที่ ๑.3 สีของตะกอนที่เกิดขึ้นจากการหยด KClO_3 ลงในสารละลายตัวอย่าง เพื่อทดสอบหา Mn^{2+} (ก) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 2

(ข) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 6

(ค) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 12

ค่าความเป็นกรดเบส	ความเข้มข้นคลอไรด์ 0 พีพีเอ็ม			ความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม		
	E = -0.25 (V)	E = 0.125 (V)	E = 0.5 (V)	E = -0.25 (V)	E = 0.25 (V)	E = 0.75 (V)
2	ดำ	ดำ	ดำ	ดำ	ดำ	ดำ

(ก)

ค่าความเป็นกรดเบส	ความเข้มข้นคลอไรด์ 0 พีพีเอ็ม			ความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม		
	E = -0.125 (V)	E = 0.375 (V)	E = 0.875 (V)	E = -0.125 (V)	E = 0.25 (V)	E = 0.75 (V)
6	ดำ	ดำ	ดำ	ดำ	ดำ	ดำ

(ข)

ค่าความเป็นกรดเบส	ความเข้มข้นคลอไรด์ 0 พีพีเอ็ม			ความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม		
	E = -0.25 (V)	E = 0.25 (V)	E = 0.75 (V)	E = -0.25 (V)	E = 0.06 (V)	E = 0.5 (V)
12	-	-	-	-	-	-

(ค)

หมายเหตุ - คือไม่เกิดตะกอน

ตารางที่ ๑.4 สีของตะกอนที่เกิดขึ้นจากการหยด H_2O_2 ลงในสารละลายตัวอย่าง เพื่อทดสอบหา MnO_4^- (ก) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 2
(ข) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 6
(ค) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 12

ค่าความเป็นกรดเบส	ความเข้มข้นคลอไรด์ 0 พีพีเอ็ม			ความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม		
	E = -0.25 (V)	E = 0.125 (V)	E = 0.5 (V)	E = -0.25 (V)	E = 0.25 (V)	E = 0.75 (V)
2	-	-	-	-	-	-

(ก)

ค่าความเป็นกรดเบส	ความเข้มข้นคลอไรด์ 0 พีพีเอ็ม			ความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม		
	E = -0.125 (V)	E = 0.375 (V)	E = 0.875 (V)	E = -0.125 (V)	E = 0.25 (V)	E = 0.75 (V)
6	-	-	-	-	-	-

(ข)

ค่าความเป็นกรดเบส	ความเข้มข้นคลอไรด์ 0 พีพีเอ็ม			ความเข้มข้นคลอไรด์ 600 พีพีเอ็ม		
	E = -0.25 (V)	E = 0.25 (V)	E = 0.75 (V)	E = -0.25 (V)	E = 0.06 (V)	E = 0.5 (V)
12	-	-	-	-	-	-

(ค)

หมายเหตุ - คือไม่เกิดตะกอน

สังเกตผลจากตารางที่ ๑.3 และ ๑.4 พบว่าในสารละลายตัวอย่างมีไอออนของ Mn^{2+} ละลายอยู่ (ได้ตะกอนสีดำเมื่อหยด KClO_3) ในช่วงค่าความเป็นกรดเบส 2 และ 6 แต่ไม่พบ Mn^{2+} ที่ค่าความเป็นกรดเบส 12 และพบว่าในสารละลายตัวอย่างไม่มีไอออนของ MnO_4^- เนื่องจากเมื่อหยด H_2O_2 ลงในสารละลายตัวอย่างแล้วไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวอรุษา วั่งศรี เกิดวันที่ 11 สิงหาคม พ.ศ.2520

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสตรีวิทยา ในปีการศึกษา 2536

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540

ปัจจุบันเข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย