



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

.....
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เคมี)

ปริญญา

เคมี

เคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การเตรียมสารประกอบอินเทอร์คาเลชันแคดเมียมซัลไฟด์ในเบนทอไนต์
เพื่อวัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำโดยวิธีโพเทนชิโอเมทรี

Preparation of Cadmium Sulfide Intercalation Compound in Bentonite
to Measure Sulfide Ion in Aqueous Solution by Potentiometric Method

นามผู้วิจัย นางสาวเขมาวดี อุดมพันธ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ลัดดา มีสุข, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์อัจฉนา วงศ์ชัยสุวัฒน์, M.S.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มารีสา อรัญชัยยะ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์สุภา ทารหนองบัว, Dr.rer.nat.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเตรียมสารประกอบอินเทอร์คาเลชันแคดเมียมซัลไฟด์ในเบนทอไนต์เพื่อวัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำโดยวิธีโพเทนชิโอเมตรี

Preparation of Cadmium Sulfide Intercalation Compound in Bentonite to Measure Sulfide Ion in Aqueous Solution by Potentiometric Method

โดย

นางสาวเขมวดี อุดมพันธ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมี)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เขมาวดี อุดมพันธ์ 2554: การเตรียมสารประกอบอินเทอร์คาล์ซันแคดเมียมซัลไฟด์ใน
เบนทอไนต์เพื่อวัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำโดยวิธีโพเทนชิโอเมทรี
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมี) สาขาเคมี ภาควิชาเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ลัดดา มีสุข, Ph.D. 157 หน้า

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมสารประกอบอินเทอร์คาล์ซันแคดเมียมซัลไฟด์ในช่องว่างระหว่าง
ชั้นของ Ca(II) -เบนทอไนต์ โดยใช้ปฏิกิริยาของแข็งกับของแข็งระหว่าง Cd(II) -เบนทอไนต์กับ
โซเดียมซัลไฟด์ และนำสารประกอบอินเทอร์คาล์ซัน CdS-เบนทอไนต์ มาประกอบเป็นขั้วไฟฟ้า
แบบโพเทนชิโอเมทรี

การเตรียมขั้วไฟฟ้าใช้สารประกอบอินเทอร์คาล์ซัน CdS-เบนทอไนต์ ผสมกับแกรไฟต์
สังเคราะห์ คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) และพอลิเททระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE) ใน
อัตราส่วน 0.2:0.025:0.4:0.3 กรัม จากผลการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้านี้ตอบสนองต่อซัลไฟด์
ไอออนได้ดีที่สุด กราฟระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอการิทึมของความเข้มข้นซัลไฟด์ไอออนให้ค่า
ความชันใกล้เคียงกับทฤษฎีและให้ช่วงเส้นตรงที่ดี ช่วงความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนที่สามารถ
วัดได้อยู่ในช่วง 10^{-1} - 10^{-4} M เมื่อนำไปวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของแอนไอออน เช่น SO_4^{2-} , F^- ,
 Cl^- และ NO_3^- หรือสารละลายของแคตไอออน เช่น Mn^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Hg^{2+} และ Ag^+ พบว่าไม่เกิด
การรบกวนกับการวัดซัลไฟด์ไอออน ขั้วไฟฟ้านี้ใช้วัดซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ
ได้ ขั้วไฟฟ้านี้มีความคงทนที่ดี โดยพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 5 เดือนพบว่าประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลง
เพียง 4.15 % (ความชันเปลี่ยนจาก 29.62 เป็น 30.85)

งานวิจัยนี้นับว่าเป็นการนำสารประกอบอินเทอร์คาล์ซัน CdS-เบนทอไนต์ ประกอบเป็น
โพเทนชิโอเมทริกเซ็นเซอร์ เพื่อใช้วัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำได้เป็นครั้งแรกโดยไม่พบ
รายงานว่ามีผู้ทำมาก่อน

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Kemawadee Udomphan 2011: Preparation of Cadmium Sulfide Intercalation Compound in Bentonite to Measure Sulfide Ion in Aqueous Solution by Potentiometric Method. Master of Science (Chemistry), Major Field: Chemistry, Department of Chemistry. Thesis Advisor: Associate Professor Ladda Meesuk, Ph.D. 157 pages.

In this work, we prepared CdS in the interlayer space of calcium bentonite by an *in situ* solid-solid reaction between Cd(II)-bentonite and Na₂S. The resulting CdS-intercalated bentonite was used to construct potentiometric electrode.

The electrode was constructed by mixing CdS-intercalated bentonite, artificial graphite, carboxymethyl cellulose (CMC) and polytetrafluoroethylene (PTFE) in a ratio 0.2:0.025:0.4:0.3 gram. It was found that the electrode was selective to sulfide ion, good straight line was related to log[S²⁻] give positive slope closed to theoretical value. The concentration of linear response range was around 10⁻¹ and 10⁻⁴ M of S²⁻. Anions such as SO₄²⁻, F⁻, Cl⁻, NO₃⁻ or cations such as Mn²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, Hg²⁺ and Ag⁺ were not interfere the S²⁻ measurement. The electrode can be used to measure sulfide ion in natural water samples. The electrode stability was good, it was found that after about 5 months the sensitivity loss only 4.15% (slope changed from 29.62 to 30.85).

This is the first time that CdS-intercalated bentonite is used to construct potentiometric sensor to measure sulfide ion in solution.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบพระคุณ รศ.ดร. ถัดดา มีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รศ.อัจฉนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ และ ผศ.ดร. มาริสา อริญชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้คำปรึกษา แนะนำข้อคิดเห็น ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ รวมทั้งสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบริษัทคลองยางที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างเบนทอไนด์ในการวิจัยและขอบคุณศูนย์นาโนเทคโนโลยี (Center of Nanotechnology) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่และบุคลากรทุกท่านของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้คำช่วยเหลือและให้คำแนะนำในด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนและคอยให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งเป็นกำลังใจในการศึกษามาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

เขมวดี อุดมพันธ์

เมษายน 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(11)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วิธีการ	32
ผลและวิจารณ์	38
ผล	38
วิจารณ์	51
สรุปและข้อเสนอแนะ	55
สรุป	55
ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	57
ภาคผนวก	61
ภาคผนวก ก การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์ปริมาณไอออนโลหะในเบนทอโนด์	62
ภาคผนวก ข กราฟและผลการทดลองเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์	70
ภาคผนวก ค กราฟและผลการทดลอง เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	79
ภาคผนวก ง กราฟและผลการทดลอง เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าทดสอบการทำซ้ำ	84

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก จ กราฟและผลการทดลองของการทดสอบความแม่นยำของขั้วไฟฟ้า	95
ภาคผนวก ฉ กราฟและผลการทดลองของการหาเปอร์เซ็นต์การกลับคืน (recovery)	101
ภาคผนวก ช กราฟและผลการทดลองของการศึกษาการตอบสนองต่อไอออนอื่นๆ	108
ภาคผนวก ซ กราฟและผลการทดลอง เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดปริมาณซัลไฟด์ไอออน ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติด้วยวิธีวัดโดยตรงจากกราฟมาตรฐานและ วิธีเติมสารมาตรฐาน	138
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	157

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แร่กลุ่มสมกไทต์และสูตรทางเคมี	4
2	องค์ประกอบทางเคมีของเบนทอไนต์ หาโดยเทคนิคเอกซ์-เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรสโกปี	8
3	ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้ 0.1 M CdCl ₂ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน	39
4	ค่าความชันและ R ² เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลาย แคดเมียมคลอไรด์	40
5	ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน	41
6	ค่าความชันและ R ² เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลาย แคดเมียมคลอไรด์	42
7	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	43
8	ค่าความชันและ R ² เมื่อวัดซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	44
9	ค่าความชันและ R ² ของขั้วไฟฟ้า 10 ขั้วเมื่อวัดซัลไฟด์ไอออนในสารละลาย โซเดียมซัลไฟด์	46
10	ค่าความชันและ R ² เมื่อวัดซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ซ้ำ 4 ครั้ง	47
11	เปอร์เซ็นต์การกลับคืน (recovery) ที่คำนวณได้ที่ความเข้มข้นต่างๆ	48
12	ค่าความชันและ R ² เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนชนิดต่างๆ	49
13	ปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่วัดได้ในน้ำธรรมชาติด้วยวิธีวัดโดยตรงจากกราฟ มาตรฐาน	50
14	ปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่วัดได้ในน้ำธรรมชาติด้วยวิธีเติมสารมาตรฐาน	51

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	สภาวะที่ใช้ในการย่อยตัวอย่างเบนทอไนต์	65
ข1	ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้ 0.1 M CdCl ₂ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 1	71
ข2	ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้ 0.1 M CdCl ₂ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 2	72
ข3	ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้ 0.1 M CdCl ₂ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 3	73
ข4	ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 1	75
ข5	ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 2	76
ข6	ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 3	77
ค1	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายในวัดครั้งที่ 1	80
ค2	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายในวัดครั้งที่ 2	81
ค3	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายในวัดครั้งที่ 3	82
ง1	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 1 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน	85
ง2	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 2 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ง3 คำศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 3 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ ภายใน	87
ง4 คำศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 4 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ ภายใน	88
ง5 คำศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 5 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ ภายใน	89
ง6 คำศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 6 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ ภายใน	90
ง7 คำศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 7 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ ภายใน	91
ง8 คำศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 8 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ ภายใน	92
ง9 คำศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 9 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na ₂ S เป็นอิเล็กโทรไลต์ ภายใน	93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ง10	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 10 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ ภายใน	94
จ1	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 1	96
จ2	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 2	97
จ3	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 3	98
จ4	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 4	99
ฉ1	ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมและค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$	103
ฉ2	ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมและค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ ที่ความเข้มข้น $1 \times 10^{-2} \text{ M}$	104
ฉ3	ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมและค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ ที่ความเข้มข้น $3 \times 10^{-2} \text{ M}$	106
ช1	ค่าศักย์ไฟฟ้าของแมงกานีสไอออนในสารละลายแมงกานีสคลอไรด์	109
ช2	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแมงกานีสไอออนในสารละลาย แมงกานีสคลอไรด์	110
ช3	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซิลเวอร์ไอออนเมื่อวัดในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต	111
ช4	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซิลเวอร์ไอออนในสารละลาย ซิลเวอร์ไนเตรต	112
ช5	ค่าศักย์ไฟฟ้าของคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์	112

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ช6	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์	113
ช7	ค่าศักย์ไฟฟ้าของเมอคิวรีไอออนในสารละลายเมอคิวรีไนเตรต	114
ช8	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเมอคิวรีไอออนในสารละลายเมอคิวรีไนเตรต	115
ช9	ค่าศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลไอออนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์	115
ช10	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลไอออนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์	116
ช11	ค่าศักย์ไฟฟ้าของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมฟลูออไรด์	117
ช12	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมฟลูออไรด์	118
ช13	ค่าศักย์ไฟฟ้าของคลอไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์	118
ช14	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคลอไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์	119
ช15	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลเฟตไอออนในสารละลายซิงค์ซัลเฟต	120
ช16	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลเฟตไอออนในสารละลายซิงค์ซัลเฟต	121
ช17	ค่าศักย์ไฟฟ้าของไนเตรตไอออนในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต	122
ช18	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของไนเตรตไอออนในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต	123
ช19	ค่าศักย์ไฟฟ้าของแมงกานีสไอออนในสารละลายแมงกานีสคลอไรด์	124
ช20	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแมงกานีสไอออนในสารละลายแมงกานีสคลอไรด์	125

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ช21	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อวัดในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต	126
ช22	ค่าศักย์ไฟฟ้าของคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์	127
ช23	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์	128
ช24	ค่าศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลไอออนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์	128
ช25	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลไอออนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์	129
ช26	ค่าศักย์ไฟฟ้าของเมอคิวรีไอออนในสารละลายเมอคิวรีไนเตรต	130
ช27	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเมอคิวรีไอออนในสารละลายเมอคิวรีไนเตรต	131
ช28	ค่าศักย์ไฟฟ้าของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมฟลูออไรด์	131
ช29	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมฟลูออไรด์	132
ช30	ค่าศักย์ไฟฟ้าของคลอไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์	133
ช31	ความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคลอไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์	134
ช32	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ของซัลเฟตไอออนในสารละลายซิงค์ซัลเฟต	134
ช33	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดในสารละลายซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)	135
ช34	ค่าศักย์ไฟฟ้าของไนเตรตไอออนในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต	136
ช35	ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของไนเตรตไอออนในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต	137
ช1	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	139
ช2	ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดตัวอย่างน้ำธรรมชาติเทียบกับกราฟมาตรฐาน	140

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ซ3 ความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐาน	141
ซ4 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	142
ซ5 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดตัวอย่างน้ำธรรมชาติเทียบกับกราฟมาตรฐาน	143
ซ6 ความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐาน	144
ซ7 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	145
ซ8 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดตัวอย่างน้ำธรรมชาติเทียบกับกราฟมาตรฐาน	146
ซ9 ความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐาน	147
ซ10 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	147
ซ11 ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ ของตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน Na_2S เข้มข้น 0.5 M	148
ซ12 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม (M) กับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$	149
ซ13 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	150
ซ14 ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ ของตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน Na_2S เข้มข้น 0.5 M	151
ซ15 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม (M) กับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$	152
ซ16 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	153

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ซ17	ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ ของตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อเติม สารละลายมาตรฐาน Na_2S เข้มข้น 0.5 M	154
ซ18	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมกับ $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$	155

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะของเบนทอไนต์ที่ยังไม่ผ่านการบดและร่อนด้วยตะแกรง (a) และ (b) หลังผ่านการบดและร่อนด้วยตะแกรง	5
2	โครงสร้างของสเมกไทต์	6
3	การเกิดปฏิกิริยาอินเทอร์คาเลชัน	9
4	แผนภาพเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนซิโอเมทรี	12
5	ตัวอย่างลักษณะขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแก้ว	13
6	ตัวอย่างลักษณะขั้วไฟฟ้าเมมเบรนชนิดของแข็ง	14
7	ขั้วไฟฟ้าคาโบลเมล	16
8	ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์	17
9	ขั้วไฟฟ้าปรอท/ปรอทซัลเฟต	18
10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_{cell} กับ \log ความเข้มข้น เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีวัดโดยตรงจากกราฟมาตรฐาน	21
11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{antilog} \frac{E_{cell}}{S}$ กับ V_s เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีเติมสารมาตรฐาน	23
12	ลักษณะของแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนต์	33
13	แสดงการวัดด้วยเทคนิคโพเทนซิโอเมทรี	35
14	แผนภาพขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้	38
15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cd^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์	40
16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cd^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์	42
17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ โดยยังไม่ตัดค่าความเข้มข้นที่คลาดเคลื่อนออกไป (a) และตัดค่าความเข้มข้นที่คลาดเคลื่อนออกไป (b)	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนและค่าการดูดกลืน	66
ก2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนและค่าการดูดกลืน	68
ข1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cd^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคลเซียมไอออนในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์	72
ข2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cd^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคลเซียมไอออนในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์	73
ข3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cd^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคลเซียมไอออนในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์	74
ข4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cd^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคลเซียมไอออนในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์	75
ข5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cd^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคลเซียมไอออนในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์	76
ข6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cd^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคลเซียมไอออนในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์	77
ค1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	81
ค2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	82
ค3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	83
ง1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
จ4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ เซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	100
ฉ1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ เซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	102
ฉ2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมกับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$	103
ฉ3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมกับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$	105
ฉ4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมกับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$	106
ช1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Mn^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้า ของแมงกานีสไอออนในสารละลายแมงกานีสคลอไรด์	110
ช2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Ag^+]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ ซิลเวอร์ไอออนในสารละลายซิลเวอร์ไอออน	111
ช3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cu^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้า ของคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์	113
ช4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Hg^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้า ของเมอคิวรีไอออนในสารละลายเมอคิวรีไนเตรต	114
ช5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Ni^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ นิกเกิลไอออนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์	116
ช6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [F^-]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ ฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมฟลูออไรด์	117
ช7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cl^-]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ คลอไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์	119

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ช8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{SO}_4^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลเฟตไอออนในสารละลายซิงค์ซัลเฟต	120
ช9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{NO}_3^-]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของไนเตรตไอออนในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต	122
ช10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{Mn}^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแมงกานีสไอออนในสารละลายแมงกานีสคลอไรด์	124
ช11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{Ag}^+]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซิลเวอร์ไอออนในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต	126
ช12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{Cu}^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์	127
ช13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{Ni}^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลไอออนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์	129
ช14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{Hg}^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเมอคิวรีไอออนในสารละลายเมอคิวรีไนเตรต	130
ช15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{F}^-]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมฟลูออไรด์	132
ช16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{Cl}^-]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคลอไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์	133
ช17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{SO}_4^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลเฟตไอออนในสารละลายซิงค์ซัลเฟต	135
ช18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{NO}_3^-]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของไนเตรตไอออนในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต	136
ช1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{S}^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	140

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ช2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ เซลล์ไฟต์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	141
ช3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ เซลล์ไฟต์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	142
ช4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ เซลล์ไฟต์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	143
ช5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ เซลล์ไฟต์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	145
ช6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ เซลล์ไฟต์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	146
ช7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ เซลล์ไฟต์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	148
ช8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงใน ตัวอย่างน้ำธรรมชาติกับ $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$	149
ช9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ เซลล์ไฟต์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	151
ช10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงใน ตัวอย่างน้ำธรรมชาติกับ $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$	152
ช11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ เซลล์ไฟต์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์	154
ช12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงใน ตัวอย่างน้ำธรรมชาติกับ $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$	155

การเตรียมสารประกอบอินเทอร์คาเลชันแคดเมียมซัลไฟด์ในเบนทอนิต์เพื่อวัดปริมาณ
ซัลไฟด์ไอออนในน้ำโดยวิธีโพเทนชิโอเมตรี

**Preparation of Cadmium Sulfide Intercalation Compound in Bentonite to
Measure Sulfide Ion in Aqueous Solution by Potentiometric Method**

คำนำ

การพัฒนาวัสดุนาโนคอมโพสิตหรือวัสดุผสมผสานระหว่างสารอนินทรีย์กับสารอินทรีย์กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม เนื่องจากสารประกอบที่เตรียมได้ใหม่จะมีขนาดเล็กและมีสมบัติใหม่ที่แตกต่างไปจากเดิม นับเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้สามารถควบคุมโครงสร้างหรือลักษณะทางเคมีได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาการวิจัยทางด้านนาโนเทคโนโลยีต่อไป

ปฏิกิริยาอินเทอร์คาเลชัน หมายถึง ปฏิกิริยาการแทรกหรือใส่เกสต์ชนิดต่างๆ เช่น ไอออนโมเลกุลหรือพอลิเมอร์ เข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นภายในโครงสร้าง (interlayer spaces) ของวัสดุโฮสต์ที่มีโครงสร้างเป็นชั้นๆ (layer host material) โดยลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของโฮสต์ไม่เปลี่ยนแปลง สารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยานี้เรียกว่า สารประกอบอินเทอร์คาเลชัน (intercalation compound) ซึ่งเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิต (nanocomposite material) ชนิดหนึ่ง ด้วยวิธีการนี้ทำให้ได้สารใหม่ที่มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตรหรือเล็กกว่า จึงส่งผลให้สมบัติทางเคมีและกายภาพ เช่น การดูดซับ การเร่งปฏิกิริยา สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า หรือสมบัติอื่นๆ เปลี่ยนแปลงไปด้วย

วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นเลเยอร์โฮสต์ ได้แก่ แกรไฟต์ โลหะแทรนซิชัน ไดคาโคจีไนด์ (transition metal dichalcogenides) เลเยอร์ พอลิซิลิเกต (layer polysilicate) เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (layer double hydroxide) และเคลย์ (clay mineral) ซึ่งเลเยอร์โฮสต์แต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน จึงทำให้ชนิดของเกสต์ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเลเยอร์โฮสต์ชนิดนั้นๆ แตกต่างกันไปด้วย

เบนทอไนต์เป็นดินซึ่งประกอบด้วยแร่สมกไทต์ ซึ่งประกอบด้วยชั้นของซิลิเกตสามชั้น และมีอัตราส่วนของทรงสี่หน้าต่อทรงแปดหน้าเป็น 2:1 (tetrahedral-octahedral-tetrahedral) โดยจะมีลักษณะเป็นชั้นๆ และมีส่วนที่เป็นช่องว่าง แต่ปกติแล้วจะมีส่วนประกอบที่แตกต่างไปจากทฤษฎี เนื่องจากการแทนที่ของไอออนชนิดต่างๆในโครงสร้าง เช่น Al^{3+} ไปแทนที่ Si^{4+} ใน tetrahedral sheet และ Mg^{2+} หรือ Fe^{2+} เข้าแทนที่ Al^{3+} ใน octahedral sheet การแทนที่ด้วยไอออนที่มีวาเลนซ์ไม่กันทำให้ประจุของโครงสร้างเป็นลบ เกิดความไม่สมดุลขึ้น เพื่อที่จะทำให้ประจุทั้งหมดเป็นกลาง จะมีไอออนบวกจากข้างนอกเข้ามาเกาะ บริเวณขอบรอบนอกและภายในระหว่างหน่วยย่อยแต่ละหน่วย ไอออนบวกเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงแทนที่กันได้ เรียกว่า exchangeable cation โดยปกติที่พบบ่อยคือ Na^+ Mg^{2+} และ Ca^{2+} ซึ่งจะอยู่ในส่วนที่เป็น interlayer sheet ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนและโมเลกุลได้

เบนทอไนต์มีประโยชน์มากมายทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นชั้น พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) สูง มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้มาก (high cation exchange capacity) และมีสมบัติการบวมน้ำ (swelling property)

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมสารประกอบอินเทอร์คาลชัน (แคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนต์) มาประยุกต์ใช้ทางด้านเคมีไฟฟ้าโดยใช้หลักการของโพเทนชิโอเมทรี (potentiometry) สำหรับตรวจวัดซัลไฟด์ไอออน โดยผสมแกรไฟต์และตัวยึดจับ (binder) ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าและทำให้ขั้วไฟฟ้าแข็งแรง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมสารประกอบอินเทอร์คาเลชัน โดยใช้แคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนต์
2. ใช้แคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนต์เตรียมขั้วไฟฟ้า
3. ศึกษาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้า การทำซ้ำ ความเที่ยง เปอร์เซนต์การกลับคืน และ ความจำเพาะเลือกของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้
4. เพื่อใช้ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้วัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนตัวอย่างในน้ำสังเคราะห์และ ตัวอย่างน้ำธรรมชาติ

การตรวจเอกสาร

เบนทอไนต์เป็นแร่ดินเหนียวเนื้อละเอียดมากชนิดหนึ่งมีสีขาวหรือสีเทา เบนทอไนต์ประกอบด้วยแร่กลุ่มสเมกไทต์เป็นหลัก โครงสร้างเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกต (aluminosilicate) สเมกไทต์เป็นแร่กลุ่มไฟโลซิลิเกต (phyllosilicates) ที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นประกอบด้วยแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) ไบเคลไลต์ (beidellite) อะมาร์โกไซต์ (amargosite) นอนโทรไนต์ (nontronite) แซพโพไนต์ (saponite) เฮกโทไรต์ (hexторite) และแร่อื่นๆ ซึ่งแร่แต่ละชนิดจะมีสัดส่วนทางเคมีที่แตกต่างกันไป โดยสัดส่วนที่แตกต่างกันนี้จะเกี่ยวข้องกับการแทนที่ Si^{4+} โดย Al^{3+} ในชั้นเตตระฮีดรอล (tetrahedral) และ Fe^{2+} Mg^{2+} หรือ Li^{+} แทนที่ Al^{3+} ในชั้นออกตะฮีดรอล (octahedral) ดังแสดงในตารางที่ 1 และลักษณะของเบนทอไนต์แสดงในภาพที่ 1

ตารางที่ 1 แร่กลุ่มสเมกไทต์และสูตรทางเคมี

มอนต์มอริลโลไนต์	$(\text{Al, Mg})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})_3(\text{OH})_{10} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
ไบเคลไลต์	$\text{Al}_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})_3(\text{OH})_{12}$
นอนโทรไนต์	$\text{Fe}_4(\text{AlSi}_8)\text{O}_{20}(\text{OH})_4$
แซพโพไนต์	$(\text{Mg, Al})_6(\text{Si, Al})_8\text{O}_{10}(\text{OH})_4$
เฮกโทไรต์	$(\text{Mg, Li})_8\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$

ที่มา: เลิศลักษณ์ (2539)

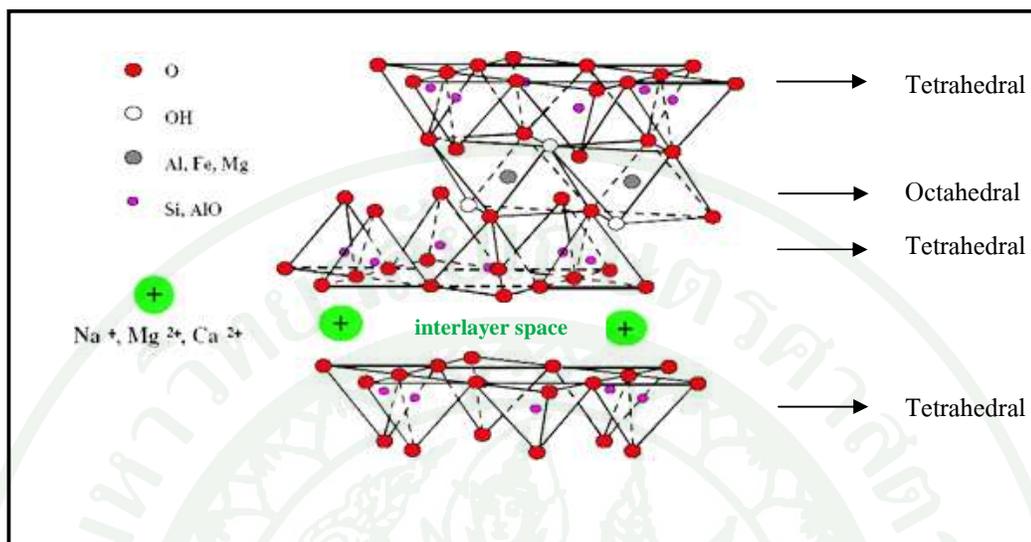


(a)

(b)

ภาพที่ 1 ลักษณะของเบนทอไนต์ที่ล้างแล้วแต่ยังไม่บด (a) และหลังผ่านการบดและร่อนด้วยตะแกรง (b)

โครงสร้างของสเมกไทต์ประกอบด้วยชั้นของซิลิเกตสามชั้นและมีอัตราส่วนของทรงสี่หน้าต่อทรงแปดหน้าเป็น 2:1 (tetrahedral-octahedral-tetrahedral หรือ TOT) โดยมีชั้นทรงแปดหน้าของ Al^{3+} อยู่ระหว่างชั้นทรงสี่หน้าของ Si^{4+} ระหว่างหน่วย TOT มีส่วนที่เป็นช่องว่างระหว่างชั้น (interlayer space) โดยทั่วไปมักจะมีส่วนประกอบที่แตกต่างไปจากทฤษฎี เนื่องจากการแทนที่ของไอออนชนิดต่างๆในโครงสร้าง เช่น Al^{3+} เข้าแทนที่ Si^{4+} ในชั้นเททระฮีดรอล และ Mg^{2+} หรือ Fe^{2+} เข้าแทนที่ Al^{3+} ในชั้นออกทะฮีดรอล การแทนที่ด้วยไอออนที่มีวาเลนซ์ไม่เท่ากันทำให้โครงสร้างมีประจุลบ เกิดความไม่สมดุลขึ้น ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้โครงสร้างทั้งหมดมีประจุเป็นกลาง จะมีไอออนบวกจากข้างนอกเข้ามาเกาะ บริเวณขอบรอบนอกและภายในระหว่างหน่วยย่อยแต่ละหน่วย ไอออนบวกเหล่านี้สามารถแลกเปลี่ยนแทนที่กันได้ เรียกว่า exchangeable cation ที่พบบ่อยมากคือ Na^+ Mg^{2+} และ Ca^{2+} โดยทั่วไปช่องว่างระหว่างชั้นในเบนทอไนต์มีขนาดประมาณ 1 นาโนเมตร ดังนั้นการเตรียมสารประกอบอินเทอร์คัลชันในช่องว่างของ เบนทอไนต์จึงได้สารระดับนาโนเมตร โครงสร้างของสเมกไทต์แสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างของสเมกไทต์

ที่มา: Laribi (2003)

เบนทอไนต์มีสมบัติโดดเด่นเป็นพิเศษหลายอย่าง เช่น การมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปฏิกิริยาทางเคมีมาก (large surface area) ความสามารถในการดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ ตัวอย่างเช่น มอนต์มอริลโลไนต์ที่มีโซเดียมไอออนแทนที่อยู่ในโครงสร้างระหว่างชั้นเป็นปริมาณมาก จะมีสมบัติในการดูดซับน้ำและเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่มีแคลเซียมไอออนหรือแมกนีเซียมไอออน เบนทอไนต์ที่มีการใช้งานมากในอุตสาหกรรม สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ โซเดียมเบนทอไนต์หรือ Wyoming bentonite และแคลเซียมเบนทอไนต์หรือ Fuller's earth โซเดียมเบนทอไนต์เมื่อดูดซับน้ำแล้วสามารถพองตัวได้มาก 15-20 เท่าจากปริมาตรเดิม และจากสมบัติดังกล่าวจึงเป็นที่มาของคุณสมบัติของเบนทอไนต์ต่ออุตสาหกรรมหลายด้านด้วยกัน เช่น

1. ความสามารถในการดูดซับ เบนทอไนต์ที่เป็นสารแขวนลอย ใช้สำหรับการกลั่นและฟอกสีน้ำมันกลีเซอไรด์ ใช้ทำให้น้ำเชื่อม สารละลายน้ำตาลและไวน์บริสุทธิ์ ใช้ในการทำน้ำให้บริสุทธิ์และปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งและไอเสีย ในสภาพแห้งหรือเป็นแป้งเปียก เบนทอไนต์ใช้ในการเตรียมเภสัชภัณฑ์ การเยียวรักษาไข่ และเป็นสารดูดซับน้ำมันที่หกบนพื้นในโรงงานเลี้ยงสัตว์
2. จากการที่เบนทอไนต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะค่อนข้างสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้มากเป็นประโยชน์สำหรับผสมในยาฆ่าแมลงและกำจัดเชื้อรา
3. เกี่ยวกับสมบัติการเป็นของเหลว เบนทอไนต์ช่วยเพิ่มความหนืดและพลังในการแขวนลอยให้กับน้ำโคลนสำหรับงานเจาะ สีน้ำและสีน้ำมัน ปูนน้ำสเปรย์ บิทูเมนอิมัลชัน และสารเคลือบเงาเซรามิกส์ เบนทอไนต์ช่วยเพิ่มความคงตัวของของเหลว ซึ่งเป็นประโยชน์ในการพองผนังหลุมเจาะ ในงานโยธาใช้ในการก่อสร้างผนังและทำให้สีไม่หยด
4. เกี่ยวกับสมบัติด้านการซึมผ่าน การเคลือบผิว เบนทอไนต์ใช้ในการเกรดฐานรากอุดช่องว่างในชั้นหินป้องกันการซึมผ่านของน้ำ และช่วยในการเจาะชั้นหินพูนได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5. เบนทอไนต์มีสมบัติในการเชื่อมประสาน ใช้ในการทำแบบหล่อทราย ทำแร่เหล็กอัดเม็ดเพื่อการถลุง และทำอาหารสัตว์อัดเม็ด
6. สมบัติพลาสติกซีดีซีของเบนทอไนต์ ทำให้เหมาะสำหรับทำปูนขาว สารอุดรอยรั่ว กาว และการขึ้นรูปเซรามิกส์บางชนิด

เบนทอไนต์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแคลเซียมเบนทอไนต์จาก อ.ชัยบาดาล จ.ลพบุรี
มีองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเบนทอไนต์ หาโดยเทคนิคเอกซ์-เรย์ฟลูออเรสเซนซ์
สเปกโทรสโกปี

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละ
SiO ₂	68.65
Al ₂ O ₃	0.14
TiO ₂	13.73
Fe ₂ O ₃	1.18
MnO	0.07
MgO	2.22
CaO	2.79
Na ₂ O	< 0.10
K ₂ O	0.06
P ₂ O ₅	< 0.05
*LOI	7.20
H ₂ O	2.84

* LOI : loss on ignition

ที่มา: นิรมล (2547)

ในการศึกษาสมบัติของสารประกอบอินเทอร์คาล์ชัน ได้มีการศึกษาแร่ในกลุ่มสมกไทต์
กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากโครงสร้างมีช่องว่างระหว่างชั้นที่มีขนาดนาโนเมตร ทำให้สมกไทต์
สามารถเกิดปฏิกิริยาอินเทอร์คาล์ชันกับสารอินทรีย์หรือพอลิเมอร์ได้หลายชนิด และสมกไทต์เป็น
สารชนิดหนึ่งที่มีความเหมาะสมในการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิต (นิธินา, 2549)

ในปัจจุบันการพัฒนาวัสดุนาโนคอมโพสิต ซึ่งเป็นวัสดุผสมผสานระหว่างสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์ กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม เนื่องจาก สารมีสมบัติใหม่ที่แตกต่างไปจากเดิม นับเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้สามารถควบคุมโครงสร้างหรือลักษณะทางเคมีได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาการวิจัยทางด้านนาโนเทคโนโลยีต่อไป

ปฏิกิริยาอินเทอร์คาลชัน หมายถึง ปฏิกิริยาการแทรกหรือใส่ guest ชนิดต่างๆ เช่น ไอออน โมเลกุลหรือพอลิเมอร์ เข้าไปในช่องว่างระหว่างชั้นภายในโครงสร้างของวัสดุโฮสต์ที่มีโครงสร้างเป็นชั้นๆ (layered host material) โดยลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของโฮสต์ไม่เปลี่ยนแปลง สารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยานี้เรียกว่า สารประกอบอินเทอร์คาลชัน (intercalation compound) ซึ่งเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิต (nanocomposite material) ชนิดหนึ่ง ด้วยวิธีการนี้ทำให้ได้สารใหม่ที่มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตรหรือเล็กกว่า และมักทำให้สมบัติทางเคมีและกายภาพ เช่น การดูดซับ การเร่งปฏิกิริยา สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า หรือสมบัติอื่นๆ เปลี่ยนแปลงไปด้วยการเกิดปฏิกิริยาอินเทอร์คาลชันแสดงในภาพที่ 3 (นิธิมา, 2545)



ภาพที่ 3 การเกิดปฏิกิริยาอินเทอร์คาลชัน

แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองและเป็นเกลือที่ละลายน้ำได้น้อย มีค่าคงที่ผลคูณการละลาย (solubility product constant, K_{sp}) เท่ากับ 1×10^{-27} ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในธรรมชาติมีโครงสร้างผลึกสองแบบคือ เฮกซะโกนอล (hexagonal) และลูกบาศก์ (cubic) แคดเมียมซัลไฟด์มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) สามารถนำไปประยุกต์ด้านเซลล์สุริยะ (solar cell) หรือผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

งานวิจัยนี้ได้้นำสารประกอบอินเทอร์คาล์ซัน แคลเดียมซัลไฟด์-มอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งจัดว่าเป็นนาโนคอมโพสิตชนิดหนึ่ง มาประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์ทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical sensor) โดยใช้หลักการโพเทนชิโอเมตรีสำหรับตรวจวัดซัลไฟด์ไอออน การเตรียมเซ็นเซอร์ทำโดยใช้แคลเดียมซัลไฟด์-มอนต์มอริลโลไนต์ ผสมกับแกรไฟต์สังเคราะห์เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า โดยมีตัวยึด (binder) สองชนิดคือ carboxy methyl cellulose (CMC) กับ polytetra fluoroethylene (PTFE) เพื่อช่วยทำให้ขั้วไฟฟ้ามีความแข็งแรง

หลักการของโพเทนชิโอเมตรี (potentiometry)

โพเทนชิโอเมตรี เป็นเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าที่อาศัยหลักวัดค่าความต่างศักย์ของเซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ขั้วไฟฟ้าทำงานที่เลือกวัดเฉพาะไอออนเรียกว่า ไอออนซีเล็กทีฟ (ISE) ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ชนิดนี้จะแปรผันไปตามความเข้มข้นของไอออนที่จะวัด (analyte concentration) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าที่ทราบค่าแน่นอนและมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารใดๆในสารละลายที่ทำการวิเคราะห์

ศักย์ของขั้วไฟฟ้าทำงานสัมพันธ์กับความเข้มข้นของไอออนในสารละลายตามสมการเนินสต์ เมื่อปฏิกิริยาเป็น



จะได้

$$E_{WE} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln[M^{n+}] \quad (1.2)$$

ที่ 25 °C

$$E_{WE} = E^0 + \frac{0.059}{n} \log[M^{n+}] \quad (1.3)$$

จากสมการ (1.3) จะได้ว่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ log ความเข้มข้นของไอออน แต่อย่างไรก็ตาม สมการนี้อาจตอบสนองได้ทั้งแคตไอออนและแอนไอออน ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการเนินสต์ได้ดังสมการ (1.4) และ (1.6)

$$E_{\text{WE}} = E^0 + 2.303 \left(\frac{RT}{nF} \right) \log M^{n+} \quad (1.4)$$

เมื่อปฏิกิริยาเป็น



จะได้

$$E_{\text{WE}} = E^0 - 2.303 \left(\frac{RT}{nF} \right) \log X^{n-} \quad (1.6)$$

ที่อุณหภูมิ 25 °C

$$E_{\text{WE}} = E^0 \pm \left(\frac{0.059}{n} \right) \log a_i \quad (1.7)$$

E_{WE} = ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน

E^0 = ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน

(+) เครื่องหมายบวกเมื่อขั้วตอบสนองต่อแคตไอออน และ (-) เครื่องหมายลบ เมื่อขั้วตอบสนองต่อแอนไอออน

R = ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ $8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

T = อุณหภูมิเคลวิน (Kelvin)

F = ค่าคงที่ฟาราเดย์ $96487 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$

n = จำนวนอิเล็กตรอน

a = แอกทิวิตีของไอออน

ค่าศักย์ที่วัดได้ในการทำโพเทนชิโอเมทรีเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ซึ่งวัดเทียบกับ ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (E_{ref}) คือ

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{WE}} - E_{\text{ref}} \quad (1.8)$$

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{WE}} - E_{\text{ref}} + E_j \quad (1.9)$$

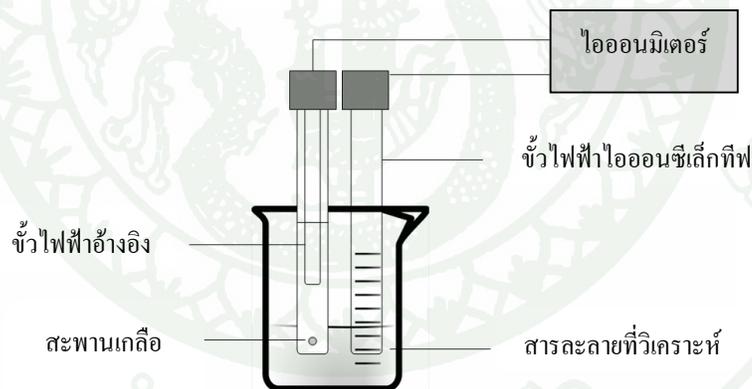
E_{cell} = ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้า

E_{WE} = ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน

E_{ref} = ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

E_j = ค่าศักย์ไฟฟ้าลิกวิดจังก์ชัน (ศักย์ไฟฟ้ารอยต่อของสารละลาย)

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความต่างศักย์ของเซลล์เรียกว่า ไอออนมิเตอร์ ในการวัดศักย์ไฟฟ้าจะมีการต่อขั้วไฟฟ้าทำงานชนิดไอออนซีเล็กทีฟ (ISE) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเข้ากับเครื่องไอออนมิเตอร์ แล้วจุ่มสารละลายที่ต้องการวัด ในการทดลองนี้ใช้ไอออนมิเตอร์ รุ่น model 420A ยี่ห้อ ORION แผนภาพเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมทรี แสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนภาพเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมทรี

ขั้วไฟฟ้าไอออนซีเล็กทีฟ (ion selective electrode, ISE)

ขั้วไฟฟ้าไอออนซีเล็กทีฟ (ion selective electrode, ISE) หรือขั้วไฟฟ้าเฉพาะไอออนเป็นขั้วไฟฟ้าทำงานที่เกิดปฏิกิริยาหรือตอบสนองต่อแอกทีวิตีของไอออนที่เราสนใจ

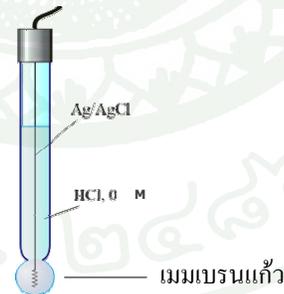
ขั้วไฟฟ้าทำงานที่ใช้วัดไอออนมีหลายชนิด ได้แก่

1. ขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแก้ว

ขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแก้วส่วนใหญ่ใช้ในการวัด pH แต่ก็มีขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแก้วบางชนิดที่ใช้ในการวัดแอกทิวิตีของไอออนต่างๆ เช่น Na^+ และ K^+ เป็นต้น ขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแก้วจะตอบสนองต่อไอออนต่างๆกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแก้ว เช่น ขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแก้วที่ใช้วัด pH จะประกอบด้วย Na_2O 22% CaO 6% และ SiO_2 72% ส่วนขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแก้วที่วัด Na^+ จะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันไป และมักจะมี Al_2O_3 อยู่ด้วย

ขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแก้วจะประกอบด้วยเมมเบรนแก้วบางเป็นกระเปาะที่ส่วนปลายของขั้วไฟฟ้าภายในมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์จุ่มอยู่ในสารละลายอเล็กโทรไลต์ที่เป็นกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ลักษณะขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแก้ว แผนภาพขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแก้ว แสดงในภาพที่ 5

reference electrode / H^+ / เมมเบรน / H^+
(ภายใน) (ภายใน) (แก้ว)



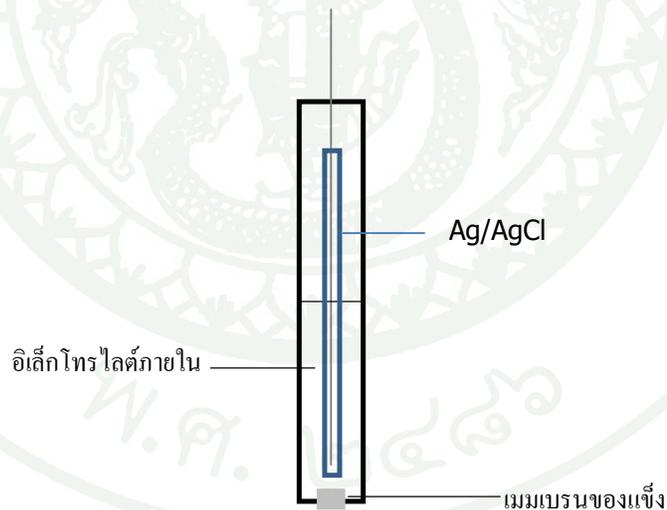
ภาพที่ 5 ตัวอย่างลักษณะขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแก้ว

2. ขั้วไฟฟ้าเมมเบรนชนิดของแข็ง (solid state membrane electrode)

หลักการสร้างขั้วไฟฟ้าชนิดนี้จะมีส่วนประกอบเป็นเมมเบรนของแข็ง ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายใน แต่เมมเบรนจะเป็นสารประกอบไอออนิก ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกผสมอัดเป็นแผ่น

ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าชนิดเมมเบรนของแข็งได้แก่ ขั้วไฟฟ้าวัดฟลูออไรด์ ซึ่งประกอบด้วย LaF_3 และโคปด้วย EuF_2 ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างแอนไอออนเพราะ F^- ใน EuF_2 มีเพียง 2 ไอออน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจึงทำให้เกิดความต่างศักย์ที่เมมเบรน และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้มักเป็น 0.1 M NaF และ 0.1M KCl ศักย์ไฟฟ้าขึ้นกับแอกทิวิตีของ F^- ตามสมการเนินสต์

อีกตัวอย่างหนึ่งของขั้วไฟฟ้าเมมเบรนของแข็ง คือขั้วไฟฟ้าวัดซัลไฟด์ ซึ่งเตรียมจากผลึกผสมของ $\text{Ag}_2\text{S}-\text{AgX}$ (X คือ Cl^- , Br^- , I^- , SCN^-) ซึ่งสามารถตอบสนองได้ทั้ง S^{2-} และ Ag^+ ลักษณะขั้วไฟฟ้าเมมเบรนของแข็ง แสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ตัวอย่างลักษณะขั้วไฟฟ้าเมมเบรนชนิดของแข็ง

3. ขั้วไฟฟ้าเมมเบรนชนิดของเหลว

ขั้วไฟฟ้าเมมเบรนของเหลวทำจากของเหลวมากกว่าหนึ่งชนิด ซึ่งสามารถเกิดพันธะเฉพาะกับไอออนบางชนิด เมมเบรนของเหลวประเภทนี้มีความสำคัญเพราะสามารถวัดศักย์ไฟฟ้า

ได้โดยตรงในการวิเคราะห์หาเอกทิวติชของแคตไอออนประเภทโพลิวาเลนต์หลายชนิด รวมทั้งของแคตไอออนและแอนไอออนประจุเดียวบางชนิด

สารที่ทำหน้าที่สำคัญในเมมเบรนของเหลวมี 3 ชนิด คือ

1. ตัวแลกเปลี่ยนกับแคตไอออน
2. ตัวแลกเปลี่ยนกับแอนไอออน
3. สารประกอบแมคโครไซคลิกที่เป็นกลาง ซึ่งมีความเฉพาะในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแอนไอออนบางชนิด

ขั้วไฟฟ้าเมมเบรนชนิดของเหลวที่สำคัญได้แก่ ขั้วที่ใช้วัดแคลเซียมไอออนในตัวกลางที่เป็นกลาง ขั้วชนิดนี้มีเมมเบรนที่จำเพาะต่อแคลเซียมไอออนเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน สารละลายน้ำภายในที่ติดอยู่กับตัวแลกเปลี่ยนประกอบด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นคงที่ และมีขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงภายใน

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode)

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็นครึ่งเซลล์ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าแน่นอนและมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารละลายที่ทำการวิเคราะห์ สำหรับการวัดแบบโพเทนชิโอเมทรี ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมักจะเขียนไว้ด้านซ้ายในแผนภาพเซลล์ไฟฟ้าเคมี เช่น

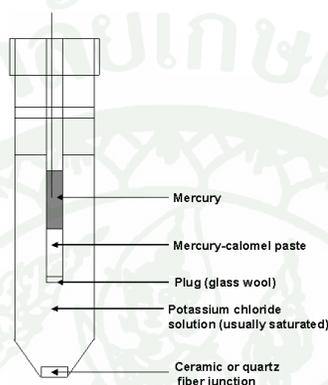
reference electrode/salt bridge/analyte solution/working electrode

สมบัติของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

1. ทราบค่าศักย์ไฟฟ้าที่แน่นอน
2. ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าคงที่ แม้อยู่ในวงจรที่มีกระแสไหลผ่านเล็กน้อย
3. ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับองค์ประกอบของสารละลายที่ทำการวิเคราะห์
4. มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง
5. มีความทนทานและง่ายต่อการใช้งาน

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีหลายชนิด ได้แก่

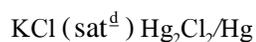
1. ขั้วไฟฟ้าคาโลเมล (calomel electrode)



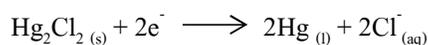
ภาพที่ 7 ขั้วไฟฟ้าคาโลเมล

ที่มา: Silverman (n.d.)

ขั้วคาโลเมลประกอบด้วยหลอดแก้วสองชั้น หลอดแก้วชั้นในบรรจุแท่งโลหะที่จุ่มอยู่ในสารผสมลักษณะแป้งเปียกของโลหะปรอทกับสารละลายอิมตัวแมอคิวรี (II) คลอไรด์ ซึ่งสารผสมนี้จะสัมผัสกับสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ ในหลอดแก้วชั้นนอกผ่านรูเล็กๆ หรือจุกพรุน (porous plug) ที่อยู่ส่วนก้นของหลอดแก้วชั้นใน ส่วนก้นของหลอดแก้วชั้นนอกมีจุกพรุน ซึ่งทำหน้าที่เป็นสะพานเกลือ ป้องกันการผสมของสารละลายในหลอดแก้วกับสารละลายด้านนอก หลอดแก้วในขณะใช้งาน แผนภาพของครึ่งเซลล์ของขั้วคาโลเมลคือ

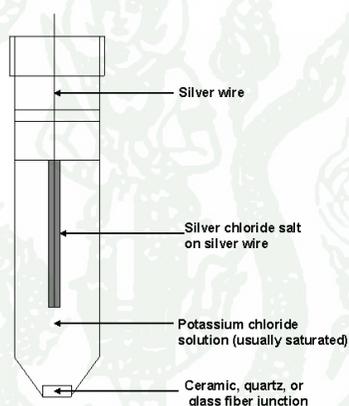


ปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์นี้คือ



ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงคาโลเมล สามารถแบ่งย่อยได้หลายชนิดตามความเข้มข้นของ KCl ที่บรรจุอยู่ในหลอดแก้วชั้นนอก โดยชนิดที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ ชนิดที่บรรจุสารละลายอิ่มตัว KCl (ประมาณ 3 M) เนื่องจากสารละลายที่อิ่มตัวนี้สามารถเตรียมขึ้นได้ง่าย ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้นิยมใช้เป็นขั้วอ้างอิงของการวัดแบบโพเทนชิโอเมทรี แต่มีข้อเสียคือ ปรอทเป็นสารที่มีพิษสูงและอุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อค่าการละลายของ KCl ดังนั้นในขณะที่ใช้จึงจำเป็นต้องระบุอุณหภูมิเสมอ

2. ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (silver-silver chloride electrode) มีลักษณะดังนี้



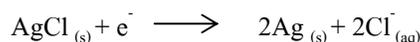
ภาพที่ 8 ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์

ที่มา: Silverman (n.d.)

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดนี้ใช้กันกว้างขวางในปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วยลวดเงินจมอยู่ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่อิ่มตัวด้วยซิลเวอร์คลอไรด์แผนภาพของขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์คือ

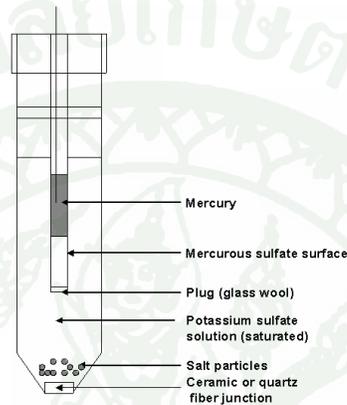


ปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์นี้คือ



ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดนี้เท่ากับ 0.222 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไฮโดรเจน)

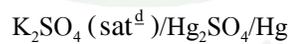
3. ขั้วไฟฟ้าเมอคิวรี/เมอคิวรี (I) ซัลเฟต (mercury/mercurous sulfate electrode)



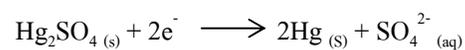
ภาพที่ 9 ขั้วไฟฟ้าปรอท/ปรอทซัลเฟต

ที่มา: Silverman (n.d.)

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดนี้จะคล้ายกับขั้วไฟฟ้าคาโลเมล แผนภาพของขั้วไฟฟ้าเมอคิวรี-เมอคิวรี (I) ซัลเฟต คือ



ปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์นี้คือ



ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าชนิดนี้เท่ากับ 0.412 โวลต์ Hg_2SO_4 จะเกิดไฮโดรไลซิสได้ตะกอนสีเหลืองของเกลือเมอคิวรี (I) ซัลเฟต แต่เกลือนี้ไม่มีผลต่อศักย์ของขั้วไฟฟ้า

ปัจจัยที่มีผลต่อขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

1. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากการละลายของเกลือในขั้วไฟฟ้าอ้างอิงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์จะค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป

2. สิ่งเจือปนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายในขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

สารละลายของไอออนที่ทำการวิเคราะห์ อาจจะมีสารที่สามารถซึมผ่านเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายในขั้วไฟฟ้าอ้างอิงได้สำหรับ ซัลไฟด์ โบรไมด์ จะมีผลต่อขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ การใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่มีรอยต่อ (double junction) จะช่วยลดปัญหานี้ได้

3. สิ่งเจือปนในสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายในขั้วไฟฟ้าอ้างอิงสามารถซึมผ่านออกมาสู่สารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ได้เช่นกัน ซึ่งมีผลทำให้ความต้านทานของสารละลายที่ต้องการจะวิเคราะห์เพิ่มขึ้นและศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะเปลี่ยนไป

วิธีวิเคราะห์ที่นิยมใช้ทั่วไปในการวัดแบบโพเทนชิโอเมตริกมี 2 วิธีคือ วิธีวัดศักย์ไฟฟ้าโดยตรงจากกราฟมาตรฐาน (direct potentiometry) และวิธีโพเทนชิโอเมตริกไทเทรชัน (potentiometric titration)

1. วิธีวัดศักย์ไฟฟ้าโดยตรงจากกราฟมาตรฐาน (direct potentiometry) แบ่งเป็น 2 วิธี ได้แก่

1.1 วิธีวัดโดยสร้างกราฟมาตรฐาน (calibration curve method)

วิธีนี้ทำการวิเคราะห์โดยการเตรียมสารละลายมาตรฐานของไอออนที่ต้องการจะวิเคราะห์ ให้ความเข้มข้นแน่นอน แล้วนำสารละลายไปวัดศักย์ไฟฟ้า จากนั้นนำมาพล็อตกราฟระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับค่า \log ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน เรียกว่า เส้นกราฟมาตรฐาน (calibration curve) เมื่อจะวิเคราะห์สารตัวอย่างก็เตรียมสารให้อยู่ในช่วงความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแล้วนำไปวัดค่าศักย์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถหาค่าความเข้มข้นของสารตัวอย่างได้จากเส้นกราฟมาตรฐาน

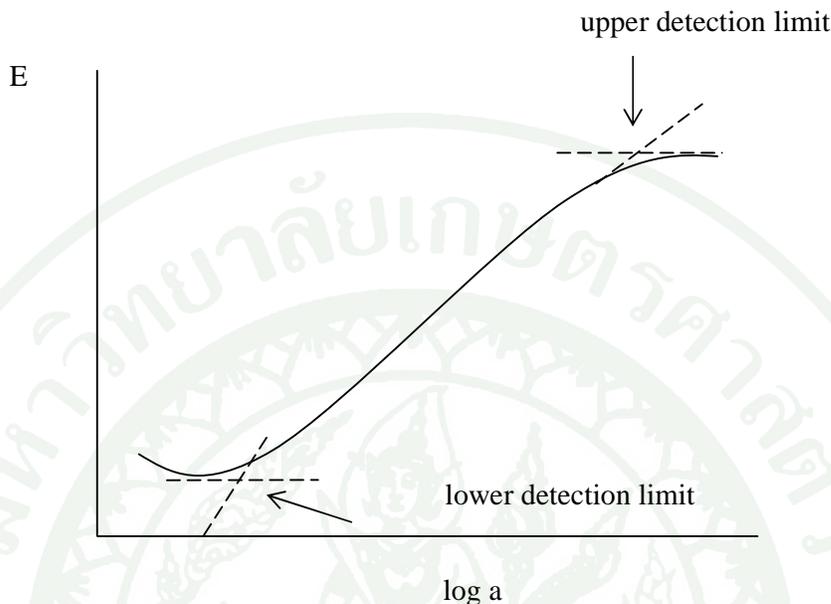
จากความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่วัดได้ (E_{cell}) กับ \log ความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย ถ้า A เป็นแคตไอออนที่มีประจุ $+n$ และ L เป็นค่าคงที่ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (1.8)

$$E_{\text{cell}} = L + \frac{0.059}{n} \log [A^{n+}] \quad (1.10)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง E_{cell} กับ $\log[A^{n+}]$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $+\frac{0.059}{n}$ ดังภาพที่ 10 แต่ถ้า B เป็นแอนไอออน โดยให้มีสัญลักษณ์เป็น B^{n-} ความสัมพันธ์ที่ได้เป็นดังสมการ (1.9)

$$E_{\text{cell}} = L - \frac{0.059}{n} \log [B^{n-}] \quad (1.11)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง E_{cell} กับ $\log[B^{n-}]$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $-\frac{0.059}{n}$ ซึ่งจะมีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับแคตไอออน



ภาพที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_{cell} กับ \log ความเข้มข้น เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีวัดโดยตรงจากกราฟมาตรฐาน

จากกราฟมาตรฐานดังภาพที่ 10 ช่วงกราฟที่เป็นเส้นตรง (linear range) จะใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณไอออนในสารตัวอย่างและจุดที่เบี่ยงเบนจากเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นต่ำและสูงคือจุดที่สามารถตรวจวัดได้ต่ำสุด (lower detection limit) และสูงสุด (upper detection limit) ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าขั้วไฟฟ้าไม่สามารถตอบสนองต่อความเข้มข้นของสารที่ต่ำกว่าจุดต่ำสุดหรือสูงกว่าจุดสูงสุดนี้ (อัจฉนา, 2553)

1.2 วิธีเติมสารมาตรฐาน (standard addition method)

วิธีนี้ทำโดยการเติมสารละลายมาตรฐานที่รู้ความเข้มข้นและปริมาตรที่แน่นอนลงไป ในสารละลายตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์ 1 เท่า หรือ 2 เท่าของความเข้มข้นของไอออนที่คาดว่าจะมีในสารละลายตัวอย่าง การวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายตัวอย่างจะวัดทั้งก่อนและหลังการเติมสารละลายมาตรฐาน การหาปริมาณไอออนในสารละลายตัวอย่างโดยวิธีการเติมสารมาตรฐานสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_1 = E^0 + S \log C_x \quad (1.12)$$

$$E_2 = E^0 + S \log \left[\frac{C_x V_x + C_s V_s}{V_x + V_s} \right] \quad (1.13)$$

(1.13)-(1.12)

$$E_2 - E_1 = \pm S \log \left[\frac{C_x V_x + C_s V_s}{V_x + V_s} \right] - S \log C_x \quad (1.14)$$

เมื่อ $V_t = V_x + V_s$

$$\Delta E = \pm S \log \left(\left[\frac{C_x V_x + C_s V_s}{V_t} \right] / C_x \right) \quad (1.15)$$

$$\text{anti log} \frac{E}{S} = \frac{C_x V_x + C_s V_s}{V_t} / C_x \quad (1.16)$$

E_1 = ศักย์ไฟฟ้าของสารตัวอย่างก่อนเติมสารมาตรฐาน

E_2 = ศักย์ไฟฟ้าของสารตัวอย่างหลังเติมสารมาตรฐาน

E^0 = ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน

C_x = ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง

C_s = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

V_x = ปริมาตรของตัวอย่าง

V_s = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานที่เติม

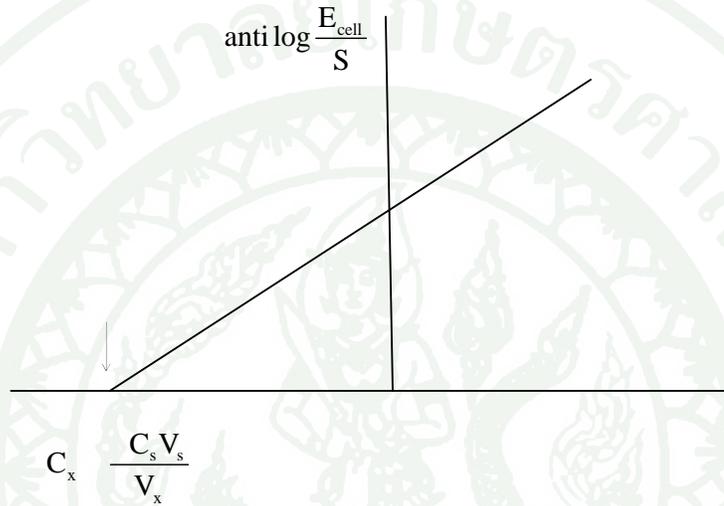
V_t = ปริมาตรรวมของสารละลายทั้งหมด ($V_x + V_s$)

ΔE = ผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้ เมื่อเติมสารละลายมาตรฐานกับไม่ได้เติมสารละลายมาตรฐาน

S คือความชันที่ได้จากสมการเนินสต์ ซึ่งค่าทางทฤษฎีคือ $\frac{0.059}{n}$ โวลต์ เมื่อแทนค่าตัวแปร

ต่างๆ จะสามารถคำนวณหาค่า C_x ได้

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\text{anti log } \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ กับความเข้มข้นที่เติมจะได้สมการเส้นตรงตัดแกน x ซึ่งสามารถหาค่าความเข้มข้นของ C_x ได้ (อัจฉนา, 2553)



ภาพที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{anti log } \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ กับ V_s เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีเติมสารมาตรฐาน

ที่จุดตัดแกน x ค่า $\text{anti log } \frac{E_{\text{cell}}}{S} = 0$ เมื่อแทนค่าจะได้

$$0 = \frac{C_x V_x}{V_t} - \frac{C_s V_s}{V_t} \quad (1.17)$$

$$C_x V_x = -C_s V_s \quad (1.18)$$

$$C_x = \frac{-C_s V_s}{V_x} \quad (1.19)$$

2. วิธีโพเทนชิโอเมตริกไทเทรชัน (potentiometric titration method)

โพเทนชิโอเมตริกไทเทรชันเป็นเทคนิคในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้า ในขณะที่เติมไทเทรนต์ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนในปริมาตรต่างๆกันลงไป ในสารละลายตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในเซลล์เคมีไฟฟ้า

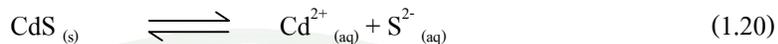
ขณะที่มีการไทเทรต ขั้วไฟฟ้าจะจุ่มอยู่ในสารละลายที่ถูกไทเทรต เพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับปริมาตรของไทเทรนต์ที่เติม เมื่อพล็อตกราฟจะได้รับความสัมพันธ์ที่เรียกว่า กราฟการไทเทรต (titration curve) โดยทั่วไปจะเติมไทเทรนต์จำนวนมากในช่วงแรก ต่อมาจะเติมน้อยลง เมื่อเข้าใกล้จุดยุติซึ่งจะทราบโดยจะมีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าอย่างมากต่อการเติมไทเทรนต์ลงไป จนสุดท้ายจึงเติม 1 หยดหรือน้อยกว่า 1 หยด เพื่อให้การหาจุดยุติมีความถูกต้องมากที่สุด การคนอย่างดีจะช่วยให้อถึงสมดุลเร็วขึ้น ดังนั้นขณะไทเทรตจึงต้องมีการคนอย่างทั่วถึง

ประโยชน์ที่สำคัญของโพเทนชิโอเมตริกไทเทรชัน คือการหาจุดยุติของการไทเทรต ซึ่งสามารถใช้ได้กับปฏิกิริยาชนิดใดก็ได้ ถ้ามีขั้วไฟฟ้าทำงานที่ตอบสนองต่อแอกทิวิตีของสารที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาทั้งหมดอย่างน้อยหนึ่งชนิด

ในงานวิจัยนี้ใช้ขั้วไฟฟ้าทำงานเป็นขั้วไฟฟ้าเมมเบรนชนิดของแข็ง ซึ่งเตรียมได้จากสารประกอบอินเทอร์คาเลชันแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนต์ ลักษณะของขั้วจะเป็นผลึกผสมอัดแน่นและเลือกใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายใน (internal electrolyte) ที่เหมาะสม

หลักการทำงานของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นนี้ คือ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ที่อยู่ในชั้นของเบนทอไนต์เป็นสารที่ละลายน้ำได้น้อย มีค่าคงที่ผลคูณในการละลาย ดังนั้นจะมีสมดุลระหว่างเกลือที่ไม่ละลายและไอออนในสารละลาย เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของแคดเมียมไอออนหรือซัลไฟด์ไอออนที่ความเข้มข้นต่างกันจะมีผลต่อไอออนในสารละลาย ซึ่งทำให้วัดค่าศักย์ไฟฟ้าได้ต่างกัน

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าของขั้วของแข็งแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนต์ คือ



จากสมการ (1.20) ค่าคงที่ผลคูณการละลาย (solubility product constant, K_{sp}) ของปฏิกิริยา คือ

$$K_{sp} = [\text{Cd}^{2+}][\text{S}^{2-}] \quad (1.21)$$

เพราะฉะนั้น

$$\frac{K_{sp}}{[\text{S}^{2-}]} = [\text{Cd}^{2+}] \quad (1.22)$$

สมการเนินสต์ที่ตอบสนองต่อแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) คือ

$$E_{\text{WE}} = E^0 + \frac{0.0591}{2} \log[\text{Cd}^{2+}] \quad (1.23)$$

$$E_{\text{WE}} = E^0 + 0.0296 \log [\text{Cd}^{2+}] \quad (1.24)$$

หรือ

$$E_{\text{WE}} = E^0 + 0.0296 \log \left[\frac{K_{sp}}{[\text{S}^{2-}]} \right] \quad (1.25)$$

$$E_{\text{WE}} = E^0 + 0.0296 \log [K_{sp}] - 0.0296 \log [\text{S}^{2-}] \quad (1.26)$$

เมื่อ $0.0296 \log K_{sp}$ มีค่าคงที่ ดังนั้นสมการเนินสต์ที่ตอบสนองต่อซัลไฟด์ไอออนที่อุณหภูมิ 25 °C คือ (Evants, 1987)

$$E_{\text{WE}} = E^0 - 0.0296 \log [\text{S}^{2-}] \quad (1.27)$$

เมื่อนำไปวัดคู่กับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะหาได้ดังนี้

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{WE}} - E_{\text{ref}} \quad (1.28)$$

$$E_{\text{cell}} = L - 0.0296 \log [S^2] \quad (1.29)$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์เซลล์ เพื่อพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดสารหรือไอออนต่างๆ มีดังนี้

Bard *et al.* (1983) ผสม sodium montmorillonite ลงในขั้วไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าและเตรียมเป็นฟิล์มบาง จากการศึกษาพบว่าเมื่อผสม sodium montmorillonite กับสารละลายของแพลทินัมจะทำให้ได้สารประกอบที่มีลักษณะชั้นเหนียว ซึ่งเหมาะแก่การเตรียมฟิล์มและเมื่อนำ sodium montmorillonite มาผสมกับ active compounds เช่น $[\text{Ru}(\text{NH}_3)_6]$ $[\text{Fe}(\text{bpy})_3]$ และ TMA $\text{Fe}(\text{Cp})_2$ เมื่อศึกษาด้วยวิธี cyclic voltammetry พบว่าเมื่อผสมเซลล์กับ $[\text{Fe}(\text{bpy})_3]$ ให้พีคที่มีความเข้มมากซึ่งแสดงว่าสารประกอบที่เตรียมขึ้นนี้เสถียร แต่อย่างไรก็ตามกลไกที่ทำให้ขั้วไฟฟ้านี้เป็น electroactive นั้นยังไม่ทราบแน่ชัด ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมและปรับปรุงสมบัติของเซลล์ให้ดีขึ้น เพื่อให้มีความเหมาะสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีคุณภาพ

Guth *et al.* (1996) รายงานการประยุกต์เซลล์เพื่อเป็นตัวตรวจวัด จากการศึกษาพบว่าความไว (sensitivity) และความจำเพาะ (selectivity) ต่อไอออนหรือโมเลกุลใดๆ ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซลล์กับไอออนหรือโมเลกุลนั้นๆ เช่น การเกิด chemisorption จะทำให้เกิดความจำเพาะเจาะจงและเกิดความไวต่อไอออนหรือโมเลกุลนั้นๆ มากกว่าการเกิด physisorption เป็นต้น นอกจากนี้ยังอธิบายถึงการใช้เซลล์เป็นตัวตรวจวัดด้วยวิธีต่างๆ เช่น โปเทนซิโอเมทรี แคลอริเมทรี และคัลเลอร์ริเมทรี เป็นต้น ซึ่งขึ้นอยู่กับความเหมาะสมตามการใช้งาน

Rodriguez *et al.* (1997) เตรียม bentonite modified carbon paste electrode เพื่อตรวจหา 2-nitrophenol โดยวิธี differential pulse voltammetry จากการศึกษาพบว่า accumulation time มีผลต่อการดูดซับ 2-nitrophenol ของขั้วไฟฟ้า พบว่าพีเอชที่เหมาะสมของการศึกษาคั้งนี้เท่ากับ 4 ช่วง

ความเข้มข้นของ 2-nitrophenol ที่ตรวจวัดได้คือ 0.07-10 ppm และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้คือ 0.03 ppm สำหรับการตรวจหา 2-nitrophenol ในตัวอย่างน้ำทะเลโดยวิธี spiked sample พบว่าให้ % recovery ที่ดีคือ 103.96 และ 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมี 2-nitrophenol อยู่ในตัวอย่างน้ำทะเลเท่ากับ 0.5 l และ 5 ppm ตามลำดับ

Rodriguez *et al.* (1997) เตรียม bentonite modified carbon paste electrode และศึกษาพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมี เพื่อตรวจหาสารประกอบของฟีนอลในระบบ flow injection จากการศึกษาดูด้วยวิธี differential pulse voltammetry พบว่าขั้วไฟฟ้านี้สามารถตรวจหาสารประกอบไนโตรฟีนอลได้ เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าช่วง -450 - -475 mV และ 750 - 800 mV พบว่าลักษณะของโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทั้งสองช่วงนี้มีลักษณะคล้ายกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึง strong overlap signal สำหรับการตรวจหาสารประกอบไนโตรฟีนอลในตัวอย่างน้ำทะเลโดยวิธี spiked sample พบว่าให้ % recovery อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้คือ 95.4 และ 101.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีไนโตรฟีนอลอยู่ในตัวอย่างน้ำทะเลเท่ากับ 0.5 ppm และ 98.4 และ 99.2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีไนโตรฟีนอลอยู่ในตัวอย่างน้ำทะเลเท่ากับ 2.5 ppm

Orata *et al.* (1998) เตรียมพอลิอะนิลีน โดยวิธี electrodeposit ลงบนเบนทอนไนด์ เพื่อเตรียมเป็น bentonite modified electrode และศึกษาพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีและการสลายตัวด้วยไฟฟ้า (electro-degradation) โดยใช้วิธี cyclic voltammetry จากการศึกษาค้นคว้าอัตราการสะสมของพอลิอะนิลีนบน bentonite modified electrode มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของอะนิลีนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อความเข้มข้นของอะนิลีนเท่ากับ 0.4 M มีอัตราการเพิ่มขึ้นสูงมาก เนื่องจากอะนิลีนเข้าไปอยู่ในสารประกอบของเบนทอนไนด์/พอลิอะนิลีน สำหรับการศึกษากการสลายตัวด้วยไฟฟ้า พบว่าเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า -0.25 - -0.85 V ในสารละลายของกรดซัลฟิวริก พบว่าแอนอดิกและแคโทดิกพีคมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่ความเข้มข้นของอะนิลีนเท่ากับ 0.1 และ 0.2 N แต่เมื่อความเข้มข้นของอะนิลีนเท่ากับ 0.4 N จะไม่ปรากฏพีคของอะนิลีน เนื่องจากอะนิลีนเข้าไปอยู่ในสารประกอบของเบนทอนไนด์/พอลิอะนิลีน ซึ่งสอดคล้องกับที่กล่าวไว้ในตอนแรก

Anaissi *et al.* (1999) เตรียม modified electrode โดยผสมกรดพอลิอะนิลีนกับเบนทอนไนด์ ซึ่งได้เป็นสารประกอบสีเขียว จากนั้นนำไปตรวจหาคุณสมบัติด้วยเทคนิค XRD, TG, DTG, FT-IR, XRF และ SEM จากการดูคลื่นสเปกตรัมของสารประกอบนี้พบว่ามี strong absorption band ในช่วงแสงที่ตามองเห็นและมีการดูดซับไปจนถึงช่วง near IR ซึ่งแบนด์นี้ แสดงให้เห็นว่าเกิด

inter-valence transfer ซึ่งอาจเกิด ligand field transition ระหว่าง V^{4+} กับ Fe^{2+}/Fe^{3+} ในเบนทอนไนต์ การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมีโดยวิธี cyclic voltammetry พบว่าสารประกอบชนิดนี้มีความเหมาะสมที่จะเตรียมเป็น metallic electrode และเมื่อนำมาผสมกับสารที่มีความว่องไว (active species) คือ $[Ru(NH_3)_6]^{3+}$ พบว่าขั้วไฟฟ้าที่มีการนำไฟฟ้าที่ดี เนื่องจาก $[Ru(NH_3)_6]^{3+}$ สามารถแทรกสอดอยู่ในชั้นของเบนทอนไนต์ได้

Kula *et al.* (1999) ศึกษาการดูดซับปรอทในรูปของแอนไอออนิก $[HgCl_4]^{2-}$ โดยใช้ clay modified carbon paste electrode ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยวิธีโวลแทมเมตรี จากการทดลองพบว่า clay modified carbon paste electrode สามารถดูดซับปรอทได้โดยอาศัยสมบัติการดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออนของเคลย์ โดยช่วงความเข้มข้นที่อยู่ในเส้นตรงที่สามารถวัดได้คือ 1.24×10^{-7} - 9.86×10^{-7} M และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้คือ 4.98×10^{-8} M

Khaorapapong *et al.* (2001) ศึกษาการเกิดสารประกอบอินเทอร์คาเลชันของ Co^{2+} , Ni^{2+} และ Cu^{2+} ในมอนต์มอริลโลไนต์กับ 4,4'-bipyridine (4BPY) และ 1,2-di(4-pyridine)ethylene (DPE) ซึ่งเป็นไบเดนเทติแกนด์ โดยใช้ปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับของแข็ง จากการตรวจหาคุณลักษณะด้วยวิธี XRD, IR, CHN analysis และ TG-DTA พบว่าโลหะทั้งสามชนิดนี้สามารถเกิดเป็นสารประกอบได้ดีกับ (4BPY) และ (DPE) ซึ่งนับเป็นแนวทางใหม่ในการเตรียมเคลย์-โคออร์ดิเนชันพอลิเมอร์ในสารประกอบอินเทอร์คาเลชัน

Duffy *et al.* (2002) เตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธี electrodeposit จากอิเล็กโทรไลต์กรดที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมไอออนสูงและมี TeO_2 ความเข้มข้นต่ำ ซึ่งใช้เตรียมชั้นของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดยใช้ substrate คือ fluorine doped tin oxide coated glass การตรวจหาคุณลักษณะของ CdTe | CdS ทำได้โดยการเผาซึ่งใช้วิธี photocurrent spectroscopy และมี $Na_2S_2O_3$ เข้มข้น 1 M เป็นอิเล็กโทรไลต์ จากการทดลองพบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ CdTe | CdS ที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส CdTe ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n-type จะเปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p-type และเกิดการรวมกับ CdS จาก photocurrent spectroscopy แสดงให้เห็นว่า CdS จะไวต่อแสงหลังจากมีการให้ความร้อน ดังนั้นจึงมี electroabsorbance spectra เกิดขึ้น แต่ถ้าความหนาของฟิล์มนี้มากกว่า $2 \mu m$ ในชั้นของ CdS จะไม่ไวต่อแสงซึ่งส่งผลให้ band gap ของ CdTe เปลี่ยนแปลง และ CdTe | CdS มีสมบัติเป็นอัลลอย

Darder *et al.* (2005) เตรียมไอโทซาน-เคลย์ นาโนคอมโพสิต เพื่อใช้เป็นโพเทนชิโอเมตริก เซ็นเซอร์สำหรับตรวจหาแอนไอออน จากการศึกษาพบว่าเซ็นเซอร์ที่เตรียมได้ตอบสนองต่อ ไนเตรตและฟลูออไรด์ไอออน โดยมีค่าความชันเท่ากับ -57.4 และ -56.1 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับสมการเนินสต์ ช่วงความเข้มข้นที่สามารถวัดได้คือ 10^{-4} - 10^{-1} M และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้เท่ากับ 9.3×10^{-5} M เซ็นเซอร์นี้มีความเสถียร อายุการใช้งานนาน และต้นทุนการผลิตต่ำ

Manisankar *et al.* (2005) ศึกษาพฤติกรรมการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารมลพิษ 3 ชนิด คือ endosulfan (EN) *o*-chlorophenol (OCP) และ direct orange (DO8) โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีซึ่งใช้ sodium montmorillonite modified glassy carbon electrode และศึกษาอิทธิพลของพีเอช อัตราการสแกน และความเข้มข้นโดยวิธีโวลแทมเมตรี จากการศึกษาพบว่าความเหมาะสมของการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของ EN คือ พีเอชเท่ากับ 1 และพีเอชเท่ากับ 13 ใน OCP และ DO8 จากโวลแทมโมแกรมพบว่า EN มีรีดักชันพีคที่ชัดเจนนั้นแสดงให้เห็นว่ามีการขนส่งอิเล็กตรอน (electron transfer) เกิดขึ้น OCP มีออกซิเดชันพีคเกิดขึ้นซึ่งเกิดจาก phenoxy radical และ DO8 เกิดรีดักชันพีค 1 พีค เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของหมู่เอโซ และเกิดออกซิเดชันพีค 2 พีค เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ฟีนอกไซด์ ความเข้มข้นที่ขั้วไฟฟ้าสามารถตรวจวัด EN OCP และ DO8 ได้อยู่ในช่วง 5-300 10-800 และ 50-800 ppb ตามลำดับ

Rezaei *et al.* (2008) ใช้ modified bentonite-porphyrin carbon paste electrode สำหรับตรวจหาแมงกานีสไอออนโดยวิธีแวนดิกสทริปพิงโวลแทมเมตรี ซึ่งสามารถตรวจหาคุณลักษณะของ modified bentonite-porphyrin carbon paste electrode ด้วยวิธีเทอร์โมแกรมเมตรี (TG) และ UV-visible ช่วงความเข้มข้นของแมงกานีสไอออนที่สามารถวัดได้คือ 6×10^{-7} - 5×10^{-4} M และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้คือ 1×10^{-7} M สำหรับการศึกษาไอออนรบกวนทำโดยการเติมสารละลายของไอออนนั้นลงไป ในสารละลายของแมงกานีส เมื่อศึกษาโดยใช้วิธีแวนดิกสทริปพิงโวลแทมเมตรี พบว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้นได้น้อย และมีเปอร์เซ็นต์ของไอออนรบกวนน้อยกว่า 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า modified bentonite-porphyrin carbon paste electrode มีความจำเพาะเจาะจงต่อแมงกานีสไอออน

Khaorapapong *et al.* (2008) รายงานว่าแคดเมียมซัลไฟด์ซึ่งมีสมบัติทางไฟฟ้าและเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) สามารถแทรกสอดอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยใช้ปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับของแข็งระหว่างแคดเมียม-มอนต์มอริลโลไนต์และ

โซเดียมซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธี XRD, TG-DTA, และ TG-MS และจากการตรวจหาคุณลักษณะโดยวิธี Raman, ยูวี-วิสิเบิล แอบซอร์บชันและโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกตรา พบว่า อนุภาคของแคดเมียมซัลไฟด์สามารถแทรกเข้าอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ได้

Khaorapapong *et al.* (2010) เตรียมแคดเมียมซัลไฟด์และซิงค์ซัลไฟด์ภายในช่องว่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยใช้ปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับของแข็ง ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งโดยทั่วไปสารทั้งสองนี้สามารถนำไปพัฒนาเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้ จากการศึกษาพบว่าโซเดียมซัลไฟด์สามารถแทรกเข้าไปในชั้นของแคดเมียม-มอนต์มอริลโลไนต์และซิงค์-มอนต์มอริลโลไนต์ได้ ซึ่งสามารถตรวจหาคุณลักษณะได้โดยวิธี XRD, TG-DTA และ TG-MS

Saelim *et al.* (2010) เตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสมกับเคลย์ (TiO_2 modified natural clay) เพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรดสำหรับ natural dye-sensitize solar cell โดยใช้อัตราส่วน Ti:Si เท่ากับ 85:15 molar ratio จากการทดลองพบว่า ความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (photovoltaic properties) ของขั้วไฟฟ้านี้มีค่าน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากสมบัติความเป็นฉนวนของเคลย์ ทำให้ขัดขวางการเกิด photoinduced charge ในขั้วไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับเคลย์ ยังให้ค่าที่สามารถยอมรับได้และประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดอื่น ส่วนผลของ additive (natural dye) ที่เติมลงในขั้วไฟฟ้านั้นพบว่า สารสกัด benzoyl chloride ที่ได้จากกะหล่ำมวง ทำให้ประสิทธิภาพของ TiO_2 ที่ผสมกับเคลย์ มีค่า short circuit current (J_{sc} , mA/cm^2) สูงขึ้น จาก 0.19 เป็น 0.21

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่อง pH meter / ion meter รุ่น model 420A ยี่ห้อ ORION
2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์
3. เครื่องคนที่ใช้ไฟฟ้า (magnetic stirrer)
4. ตู้อบ
5. เครื่องชั่งละเอียด
6. ครกบด (agate mortar)

สารเคมี

1. แคลเซียม-เบนทอไนต์ (จาก อ.ชัยบาดาล จ.ลพบุรี) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทคลองยาง
2. 3% คาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลส (carboxymethyl cellulose, CMC)
3. 60% พอลิเททระฟลูออโรเอทิลีน บริษัท ดูปองท์ (polytetrafluoroethylene; PTFE, Dupont)
4. กาวซิลิโคน ยี่ห้อ นีโอบอนด์ (Neobond)
5. แกรไฟต์สังเคราะห์ บริษัท ไทยคาร์บอนและแกรไฟต์ (graphite artificial , Thai carbon and graphite)
6. โซเดียมซัลไฟด์ บริษัท แพนรีแอค (Sodium sulfide; $\text{Na}_2\text{S}\cdot x\text{H}_2\text{O}$, Panreac)
7. แคลเมียมคลอไรด์ บริษัท ยูนิวาร์ (Cadmium chloride; $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$, Univar)
8. ซิงค์ซัลเฟต บริษัท ยูนิวาร์ (Zinc sulphate; $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, Univar)
9. แมงกานีสคลอไรด์ บริษัท ยูนิวาร์ (Manganese chloride; $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Univar)
10. โพแทสเซียมฟลูออไรด์ บริษัท ยูนิแลบ (Potassium fluoride; KF, Unilab)
11. แอมโมเนียมไนเตรด บริษัท ยูนิแลบ (Ammonium nitrate; NH_4NO_3 , Unilab)
12. โพแทสเซียมคลอไรด์ บริษัท เมิร์ก (Potassium chloride; KCl, Merck)
13. คอปเปอร์คลอไรด์ บริษัท คิวเรค (Copper chloride; $\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, QR&C)

14. นิกเกิลคลอไรด์ บริษัท คาร์โล เออร์บา (Nickel chloride; $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Carlo Erba)
15. เมอคิวรีไนเตรต บริษัท คาร์โล เออร์บา (Mercury nitrate; $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Carlo Erba)
16. ซิลเวอร์ไนเตรต บริษัท คาร์โล เออร์บา (Silver nitrate; AgNO_3 , Carlo Erba)
17. กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 6 M บริษัท คาร์โล เออร์บา (Hydrochloric acid; HCl , Carlo Erba)
18. น้ำกลั่น
19. น้ำจืดไอออนหรือน้ำ DI (Deionized water)

วิธีการ

1. การเตรียมสารประกอบอินเทอร์คาลเซชัน

1.1 ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออน

1.1.1 นำเบนทอไนต์ที่เป็นแคลเซียม-เบนทอไนต์ มาล้างให้สะอาดเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ไม่ต้องการออกให้หมด โดยใช้ น้ำ DI และอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.1.2 นำมาบดละเอียด

1.1.3 นำแคลเซียม-เบนทอไนต์ที่บดละเอียดแล้วมาร้อนผ่านตะแกรงที่มีช่องขนาด 90 ไมโครเมตร จากนั้นนำมาผสมกับสารละลาย CdCl_2 เข้มข้น 1 M โดยใช้อัตราส่วน แคลเซียม-เบนทอไนต์ ต่อสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ปริมาณ 1 กรัม ต่อ 15 มิลลิลิตร แล้วคนด้วยเครื่องคนที่ใช้ไฟฟ้าเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

1.1.4 ล้างแคลเซียม-เบนทอไนต์ ที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนกับแคลเซียมจากข้อ 1.1.3 จนปราศจากคลอไรด์ไอออน (Cl) โดยทดสอบกับ 5% AgNO_3 จนไม่มีตะกอนสีขาวเกิดขึ้น จะได้แคลเซียม-เบนทอไนต์

1.1.5 อบแคลเซียม-เบนทอไนต์ ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น

1.2 การเตรียมแคลเซียมซัลไฟด์-เบนทอไนต์ โดยใช้ปฏิกิริยาของแข็ง-ของแข็ง เป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธีของ Khaorapapong *et al.* (2008) มีวิธีการดังนี้

1.2.1 นำแคดเมียม-เบนทอไนด์มาบดกับโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ในอัตราส่วนเบนทอไนด์ต่อโซเดียมซัลไฟด์ 1:1 โดยโมล (การคำนวณน้ำหนักเบนทอไนด์และโซเดียมซัลไฟด์แสดงไว้ในภาคผนวก ก) เป็นเวลาประมาณ 15 นาที จนสีของสารที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะได้สารประกอบอินเทอร์คาลาเลชันแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนด์ ลักษณะของแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนด์ แสดงในภาพที่ 12

1.2.2 ล้างแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนด์ ด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดโซเดียมซัลไฟด์ส่วนเกินออก อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น



ภาพที่ 12 ลักษณะของแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนด์

2. การเตรียมขั้วไฟฟ้า

2.1 นำแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนด์ 0.2 กรัม ผสมกับแกรไฟต์สังเคราะห์ 0.025 กรัม บดในครกบด ประมาณ 10 นาที จากนั้นนำสารทั้งหมดใส่ในขวดขนาดเล็กที่มีเม็ดแก้ว เขย่าประมาณ $1\frac{1}{2}$ ชั่วโมง

2.2 ผสม 3% CMC 0.4 กรัม และ 60% PTFE 0.3 กรัม ลงในภาชนะที่ถ้วยขนาดเล็ก คนให้เข้ากัน

2.3 นำแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนด์ที่ผสมกับแกรไฟต์สังเคราะห์แล้วจากข้อ 2.1 มาผสมกับตัวยึด คือ 3% CMC และ 60% PTFE คนให้เข้ากันมากที่สุด

2.4 นำสารจากข้อ 2.3 ใส่ในแม่พิมพ์ (หลอดแก้วไพเร็กซ์เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร) อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ประมาณ 15 นาที ซึ่งจะใช้ในการเตรียม ขั้วไฟฟ้าต่อไป

2.5 แคะสารจากข้อ 2.4 ออกจากแม่พิมพ์ อบซ้ำให้แห้งที่ 70 องศาเซลเซียส ประมาณ 6 ชั่วโมง ขัดขั้วด้วยกระดาษทรายละเอียด เพื่อให้ผิวหน้าของขั้วเรียบ

2.6 นำขั้วจากข้อ 2.5 ใส่ในหลอดแก้วไพเร็กซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว ประมาณ 6 นิ้ว ใช้กาวซิลิโคนปิดทับช่องว่างระหว่างขั้วกับแก้ว เพื่อป้องกันสารละลายเข้าไปใน ขั้วไฟฟ้า

2.7 ใส่สารละลาย 0.1 M Na_2S หรือสารละลายของไอออนที่ต้องการจะวัดเพื่อให้เป็น อิเล็กโทรไลต์ภายใน (internal electrolyte) ลงไปในแท่งแก้วที่มีขั้วอยู่

2.8 นำลวดทองแดงมาเชื่อมกับสายนำสัญญาณ (AV cable) โดยการเชื่อมตะกั่ว แล้วปิดทับ รอยเชื่อมด้วยกาวซิลิโคน

2.9 นำขั้วที่เชื่อมกับสายนำสัญญาณ (หัว BNC) ใส่ในแก้วไพเร็กซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 6 นิ้ว

3. วิธีการวัดความต่างศักย์ในสารละลายโดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้น

3.1 นำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ต่อเข้ากับเครื่อง ไอออนมิเตอร์

3.2 จุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองลงในสารละลายที่จะวิเคราะห์ดังภาพที่ 2 เพื่อทำการวัดค่า ศักย์ไฟฟ้า

3.3 ล้างขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงด้วยน้ำกลั่น ใช้กระดาษทิชชูซับให้แห้ง ก่อน นำไปวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลายอื่นๆต่อไป



ภาพที่ 13 แสดงการวัดการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าต่อไอออนในสารละลาย

4. การศึกษาการทำซ้ำ (reproducibility)

การศึกษาการทำซ้ำทำโดยเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอนไนต์ แกรไฟต์สังเคราะห์ 3% CMC และ 60% PTFE เท่ากับ 0.2 : 0.025 : 0.4 : 0.3 กรัม ตามลำดับ โดยเตรียมขั้วไฟฟ้าจำนวน 10 ขั้ว จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ไปวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายซัลไฟด์ไอออน แล้วนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟ เพื่อเปรียบเทียบค่าความชันและ R^2 ของขั้วไฟฟ้าทั้ง 10 ขั้วนี้

5. การศึกษาความเที่ยง (precision)

การศึกษาความเที่ยงของการวัดซัลไฟด์ไอออน ทำโดยนำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ไปวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายซัลไฟด์ไอออนซ้ำ 4 ครั้ง และคำนวณหาค่า %RSD

6. การศึกษาเปอร์เซ็นต์การกลับคืน (recovery)

การศึกษาเปอร์เซ็นต์การกลับคืน เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ ซึ่งทำโดยการเติมสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นและปริมาตรที่แน่นอนลงในตัวอย่างควบคู่ไปกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การกลับคืนของวิธีวิเคราะห์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) สามารถคำนวณได้จาก

$$\% \text{ Recovery} = \frac{C_{\text{sp}} - C_{\text{s}}}{C_{\text{a}}} \times 100$$

C_{sp} = ความเข้มข้นของตัวอย่างน้ำที่เติมสารมาตรฐาน (spike sample)

C_{s} = ความเข้มข้นของตัวอย่างน้ำที่ไม่ได้เติมสารมาตรฐาน (unspike sample)

C_{a} = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมลงในตัวอย่างน้ำ

การหาเปอร์เซ็นต์การกลับคืนของงานวิจัยนี้ทำโดยเลือกจุดความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐานประมาณ 4 จุด และเลือกจุดแรกเป็นความเข้มข้นของตัวอย่างเริ่มต้นที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน โดยจุดต่อไปเป็นความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงในตัวอย่าง ซึ่งวิธีการวิเคราะห์จะคล้ายกับวิธีเติมสารมาตรฐาน ดังนั้นในการวิเคราะห์สามารถหาจุดตัดแกน x ที่ $y = 0$ ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{anti log} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ กับความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติม

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การกลับคืนที่ได้ควรอยู่ในช่วง 95-105 % หรือ $100 \pm 5 \%$ ตัวอย่างการหาเปอร์เซ็นต์การกลับคืน แสดงไว้ในภาคผนวก ก

7. การศึกษาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าต่อไอออนอื่นๆ

การศึกษาความเฉพาะเลือกต่อไอออนของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ ทำโดยนำขั้วไฟฟ้าไปวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนชนิดอื่น ได้แก่ ฟลูออไรด์ คลอไรด์ ไนเตรต ซัลเฟต คอปเปอร์ แมงกานีส เมอคิวรี นิกเกิล และ ซิลเวอร์ ไอออน เปรียบเทียบค่าความชันและ R^2 เมื่อใช้ 0.1 M Na_2S และสารละลายของไอออนแต่ละชนิดเป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

8. วิธีการทดลองใช้ขั้วไฟฟ้าวัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำธรรมชาติ

นำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นมาวัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำธรรมชาติ โดยเก็บน้ำตัวอย่างมาจากแหล่งน้ำภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และใช้วิธีวิเคราะห์ 2 วิธีคือ วิธีวัดโดยตรงจากกราฟมาตรฐานและวิธีเติมสารมาตรฐาน

8.1 วิธีวัดโดยสร้างกราฟมาตรฐาน (calibration curve method)

8.1.1 วัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายมาตรฐานของซัลไฟด์ไอออนในช่วงความเข้มข้น $10^{-4} - 1$ M และสร้างกราฟมาตรฐานระหว่าง E กับ $\log[S^{2-}]$

8.1.2 วัดศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับกราฟมาตรฐาน เพื่อหาความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ

8.2 วิธีการเติมสารมาตรฐาน (standard addition method)

8.2.1 วัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนในช่วงความเข้มข้น $10^{-4} - 1$ M เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน และหาความชันของกราฟ (S)

8.2.2 ปีเปิดตัวอย่างน้ำธรรมชาติปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ 5 บีกเกอร์

8.2.3 เติมสารละลายมาตรฐานโซเดียมซัลไฟด์ความเข้มข้น 0.5 M ปริมาตร 0, 0.2, 0.4 0.6 และ 0.8 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ของตัวอย่างน้ำธรรมชาติทั้ง 5 บีกเกอร์ และวัดศักย์ไฟฟ้า

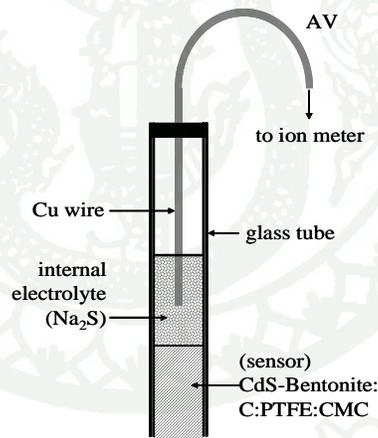
8.2.4 พล็อตกราฟระหว่าง $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ (S คือ ค่าความชันที่ได้จากข้อ 8.2.1) กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่เติมลากเส้นตรงตัดแกน x โดยหาค่าความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติได้จากสมการเส้นตรง เมื่อแทน $y = 0$

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ผลการเตรียมขั้วไฟฟ้า

ส่วนประกอบที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าคือ แคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอนไนต์ (CdS-BT) แกรไฟต์สังเคราะห์ 3% carboxymethyl cellulose (CMC) และ 60% polytetrafluoroethylene (PTFE) โดยอัตราส่วนที่ใช้คือ 0.2 : 0.025 : 0.4 : 0.3 กรัม ตามลำดับ ภาพที่ 14 แสดงแผนภาพของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้



ภาพที่ 14 แผนภาพขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้

ในองค์ประกอบของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้น แคดเมียมซัลไฟด์เป็นเกลือที่ละลายน้ำได้น้อย การตอบสนองของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะตอบสนองได้ทั้งแคดเมียมไอออนและซัลไฟด์ไอออน ดังนั้นจึงได้ทดลองวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์วัดการตอบสนองต่อแคดเมียมไอออน และสารละลายโซเดียมซัลไฟด์วัดการตอบสนองของซัลไฟด์ไอออนซึ่งการทดลองทำโดยนำขั้วไฟฟ้าต่อเข้ากับเครื่องไอออนมิเตอร์ model 420A ยี่ห้อ ORION และขั้วไฟฟ้า

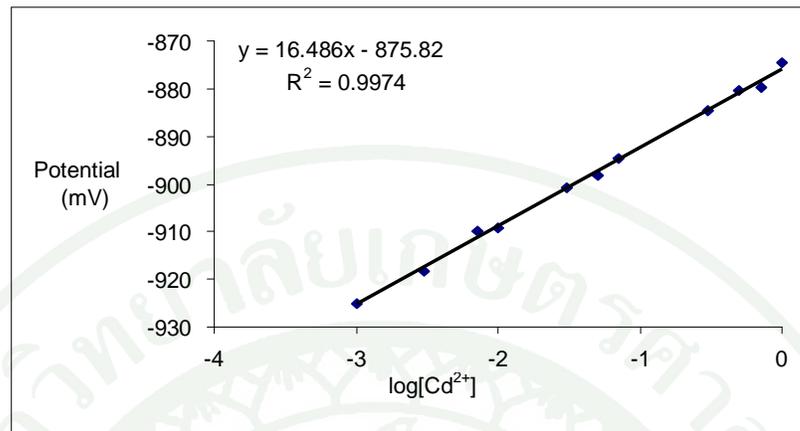
อ้างอิงที่ใช้คือ ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (silver-silver chloride electrode) จากนั้นจุ่มขั้วทั้งสองลงในสารละลายที่ต้องการวัด โดยสารละลายที่วัดอยู่ในช่วงความเข้มข้น 10^{-4} - 1 M

2. ผลการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าต่อแคดเมียมไอออน

เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน โดยใช้ 0.1 M CdCl_2 เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[\text{Cd}^{2+}]$ จะได้กราฟเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 1×10^{-3} - 1 M และมีความชันเป็นบวก ดังภาพที่ 15

ตารางที่ 3 ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้ 0.1 M CdCl_2 เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

$[\text{Cd}^{2+}]$ M	$\text{Log} [\text{Cd}^{2+}]$	mV
1×10^{-3}	-3	-925
3×10^{-3}	-2.52	-918.3
7×10^{-3}	-2.15	-909.8
1×10^{-2}	-2	-909.2
3×10^{-2}	-1.52	-900.8
5×10^{-2}	-1.3	-898.1
7×10^{-2}	-1.15	-894.5
0.3	-0.52	-884.5
0.5	-0.3	-880.5
0.7	-0.15	-879.6
1	0	-874.6



ภาพที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cd^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ มี 0.1 M CdCl_2 เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

การทดลองวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของแคดเมียมไอออน 3 ครั้ง พบว่ามีค่าความชันเฉลี่ยเท่ากับ 10.078 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้านั้นตอบสนองต่อแคดเมียมไอออนและให้ค่า R^2 ที่ดี แต่ค่าความชันที่ได้ไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์

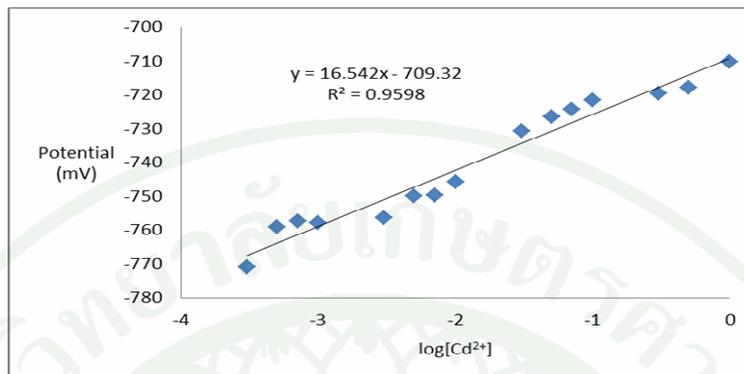
วัดครั้งที่	R^2	ความชัน
1	0.9974	16.49
2	0.9799	6.44
3	0.9953	7.31
เฉลี่ย	0.9908	10.08

ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อวัด 3 ครั้ง โดยใช้ 0.1 M CdCl_2 เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายในและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{Cd}^{2+}]$ แสดงในภาคผนวก ข

เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ ที่มีความเข้มข้นต่างๆกันโดยใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3 เมื่อพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[\text{Cd}^{2+}]$ จะได้กราฟเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 3×10^{-4} -1 M และมีความชันเป็นบวก ดังภาพที่ 16

ตารางที่ 5 ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

$[\text{Cd}^{2+}]$ M	$\text{Log} [\text{Cd}^{2+}]$	mV
3×10^{-4}	-3.52	-771
5×10^{-4}	-3.3	-759.1
7×10^{-4}	-3.15	-757.4
1×10^{-3}	-3	-758
3×10^{-3}	-2.52	-756.3
5×10^{-3}	-2.3	-750.1
7×10^{-3}	-2.15	-749.8
1×10^{-2}	-2	-745.9
3×10^{-2}	-1.52	-730.8
5×10^{-2}	-1.3	-726.6
7×10^{-2}	-1.15	-724.3
0.1	-1	-721.7
0.3	-0.52	-719.5
0.5	-0.3	-717.9
1	0	-710.1



ภาพที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cd^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ มี $0.1 M Na_2S$ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

การทดลองวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของแคดเมียมไอออน 3 ครั้ง พบว่ามีค่าความชันเฉลี่ยเท่ากับ 11.059 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้านั้นตอบสนองต่อแคดเมียมไอออนและให้ค่า R^2 ที่ดี แต่ค่าความชันที่ได้ไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์

วัดครั้งที่	R^2	ความชัน
1	0.9598	16.54
2	0.9847	10.24
3	0.9812	6.39
เฉลี่ย	0.9752	11.06

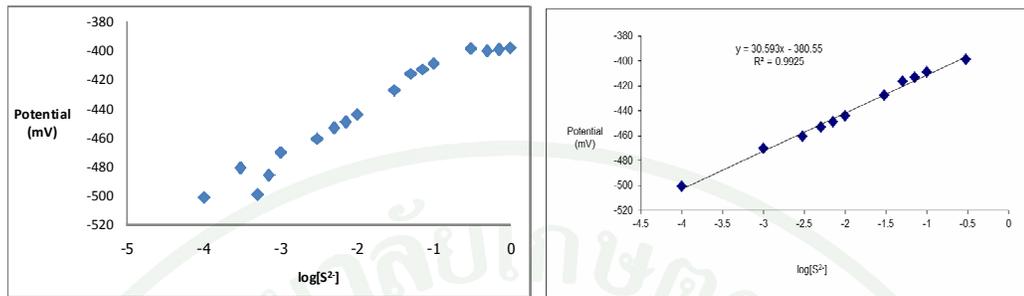
ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อวัด 3 ครั้ง โดยใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายในและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{Cd}^{2+}]$ แสดงในภาคผนวก ข

3. ผลการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าต่อซัลไฟด์ไอออน

เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ โดยใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{S}^{2-}]$ จะได้กราฟเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 3×10^{-4} -0.1 M และมีความชันเป็นบวก ดังภาพที่ 17 (b)

ตารางที่ 7 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

$[\text{S}^{2-}] \text{ M}$	$\text{Log} [\text{S}^{2-}]$	mV
3×10^{-4}	-3.52	-979.2
5×10^{-4}	-3.3	-974.5
7×10^{-4}	-3.15	-969.1
1×10^{-3}	-3	-964.8
3×10^{-3}	-2.52	-962.6
5×10^{-3}	-2.3	-954.2
7×10^{-3}	-2.15	-951.3
1×10^{-2}	-2	-945.2
3×10^{-2}	-1.52	-925.2
5×10^{-2}	-1.3	-916.4
7×10^{-2}	-1.15	-909.4
0.1	-1	-903.7



(a)

(b)

ภาพที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ มี $0.1 \text{ M Na}_2\text{S}$ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน โดยยังไม่ตัดค่าความเข้มข้นที่คลาดเคลื่อนออกไป (a) และตัดค่าความเข้มข้นที่คลาดเคลื่อนออกไป (b)

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

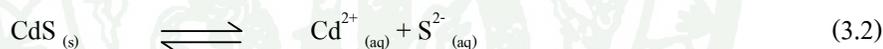
วัดครั้งที่	R^2	ความชัน
1	0.9872	31.91
2	0.9925	30.59
3	0.9969	29.44
ค่าเฉลี่ย	0.9922	30.64

ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์เมื่อวัด 3 ครั้ง โดยใช้ $0.1 \text{ M Na}_2\text{S}$ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายในและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ แสดงในภาคผนวก ค

ผลการทดลองเมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ พบว่าให้ค่า R^2 เกือบเท่ากับ 0.9922 และมีค่าความชันเท่ากับ 30.647 ซึ่งสอดคล้องกับสมการเนินสต์ ดังสมการที่ (3.1) แต่ความชันที่ได้มีค่าเป็นบวกซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎี เพราะเมื่อวัดในสารละลายของแอนไอออนควรจะมีค่าความชันเป็นลบ การที่ได้ความชันเป็นบวกแสดงว่ามีการตอบสนองทางอ้อมต่อซัลไฟด์ไอออน

$$E_{\text{cell}} = E^0 - 0.0296 \log a_i \quad (3.1)$$

การทำงานของขั้วไฟฟ้าชนิดนี้อธิบายได้ว่า แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ที่อยู่ในชั้นของเบนทอนไนต์เป็นสารที่ละลายน้ำได้น้อยและมีค่าคงที่ผลคูณการละลาย จึงมีสมดุลระหว่างเกลือที่ไม่ละลายและไอออนในสารละลาย ดังสมการที่ (3.2) เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของแคดเมียมไอออนหรือซัลไฟด์ไอออนที่ความเข้มข้นต่างกันจะมีผลต่อไอออนสมดุล จึงทำให้วัดค่าศักย์ไฟฟ้าได้ต่างกัน



การที่วัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายซัลไฟด์ไอออนแล้วได้ค่าความชันเป็นบวก เนื่องจากเมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายซัลไฟด์ไอออนที่ความเข้มข้นมากขึ้น จะทำให้ปริมาณของแคดเมียมไอออนที่อยู่ในสมดุลเดียวกันมีค่าลดลง ดังนั้นการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าจึงการตอบสนองต่อแคดเมียมไอออนก่อนแล้วมีผลทางอ้อม (indirect response) ต่อซัลไฟด์ไอออน จึงทำให้ค่าความชันที่ได้มีค่าเป็นบวกเมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายซัลไฟด์ไอออน

4. ผลการทดสอบการทำซ้ำ (reproducibility) ของขั้วไฟฟ้า

การศึกษการทำซ้ำเป็นการศึกษาเพื่อพิสูจน์ว่าวิธีการและอัตราส่วนที่ใช้ประกอบขั้วไฟฟ้านั้นมีความเหมาะสมและเตรียมซ้ำแล้วได้ผลดีเหมือนเดิม จึงได้เตรียมขั้วไฟฟ้า 10 ขั้ว โดยมีอัตราส่วนของแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอนไนต์ แกรไฟต์สังเคราะห์ 3% carboxymethyl cellulose (CMC) และ 60% polytetrafluoroethylene (PTFE) เท่ากับ 0.2 : 0.025 : 0.4 : 0.3 กรัม ตามลำดับ พบว่าให้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 9 ค่าความชันและ R^2 ของขั้วไฟฟ้า 10 ขั้วเมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

หมายเลขของขั้วไฟฟ้า	R^2	ความชัน
1	0.9933	30.02
2	0.986	28.82
3	0.9925	30.59
4	0.967	27.3
5	0.99	29.32
6	0.9944	35.87
7	0.9721	32.22
8	0.9933	33.16
9	0.9903	29.05
10	0.985	31.39

จากตารางที่ 9 จะเห็นว่าขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว มีความชันใกล้เคียงกับค่าตามสมการเนินสต์คือ 29.5 และเป็นเส้นตรงที่ดี (R^2 สูง) ยกเว้นขั้วที่ 6 และ 8 แสดงว่าขั้วไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการเตรียมขั้วใหม่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ของขั้วไฟฟ้า 10 ขั้ว เมื่อใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายในและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ แสดงในภาคผนวก

5. ผลการทดสอบความเที่ยง (precision) ของขั้วไฟฟ้า

เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ซ้ำ 4 ครั้ง เพื่อทดสอบความเที่ยงของขั้วไฟฟ้า พบว่าความชันที่ได้เป็นไปตามสมการเนินสต์และให้ช่วงเส้นตรงที่ดี ข้อมูลที่ได้แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ซ้ำ 4 ครั้ง

วัดครั้งที่	ความชัน	R^2
1	30.02	0.9933
2	29.54	0.9886
3	29.02	0.9775
4	29.44	0.9969
ค่าเฉลี่ย	29.48	0.9891
% RSD	1.39	0.85

ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์เมื่อวัดซ้ำ 4 ครั้งเมื่อใช้ $0.1 \text{ M Na}_2\text{S}$ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายในและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{S}^{2-}]$ แสดงใน ภาคผนวก จ

6. ผลการหาเปอร์เซ็นต์การกลับคืน (recovery)

ในการหาเปอร์เซ็นต์การกลับคืนที่ความเข้มข้นต่างๆ ตลอดช่วงการใช้งาน พบว่าให้ผลการทดลองดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 เปอร์เซ็นต์การกลับคืนที่คำนวณได้ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของตัวอย่าง (M)	% recovery ที่คำนวณได้
7×10^{-4}	102
1×10^{-2}	90
3×10^{-2}	100

จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้น 7×10^{-4} และ 3×10^{-2} M สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ recovery ได้อยู่ในช่วง 100 ± 5 ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ ยกเว้นที่ความเข้มข้น 1×10^{-2} M เปอร์เซ็นต์ recovery เท่ากับ 90 (วิธีการคำนวณหา % recovery แสดงในภาคผนวก จ)

7. ผลการศึกษาการตอบสนองต่อไอออนอื่นๆ

การศึกษาการตอบสนองต่อไอออนอื่นๆ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลาย แคตไอออนและแอนไอออนได้แก่ แมงกานีส ซิลเวอร์ คอปเปอร์ เมอคิวรี นิกเกิล ฟลูออไรด์ คลอไรด์ ซัลเฟต และไนเตรต ไอออนและทดลองโดยใช้ $0.1 \text{ M Na}_2\text{S}$ และไอออนที่ต้องการจะวัด เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน พบว่าให้ผลการทดลองดังตารางที่ 12 และผลการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ \log ความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 12 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนชนิดต่างๆ

ชนิดของไอออน	ค่าความชัน			ค่า R^2 เฉลี่ย
	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง (n = 3)*		ค่าความชันตาม ทฤษฎี	
	a	b		
S^{2-}	29.50	29.50	29.5	0.9891
SO_4^{2-}	12.92	5.15	29.5	0.9879
F^-	19.22	28.25	59.0	0.9931
Cl^-	23.65	36.89	59.0	0.9881
NO_3^-	22.91	28.17	59.0	0.9927
Mn^{2+}	4.05	9.40	29.5	0.8720
Cu^{2+}	4.74	12.18	29.5	0.9183
Ni^{2+}	19.71	14.67	29.5	0.9700
Hg^{2+}	24.35	21.56	29.5	0.9846
Ag^+	16.8	nd ^c	59.0	0.9765

* a = ใช้โซเดียมซัลไฟด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน b = ใช้ไอออนที่จะวัดเป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน
c = ความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง

จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ 0.1 M Na_2S และสารละลายของไอออนแต่ละชนิดเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายใน ค่าความชันที่ได้ไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ดังนั้นขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นนี้ มีการตอบสนองต่อขั้วไฟฟ้าไอออนได้ดีที่สุด

8. ผลการทดลองใช้ขั้วไฟฟ้าวัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำธรรมชาติ

8.1 ผลการวัดโดยสร้างกราฟมาตรฐาน (calibration curve method)

นำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นมาวัดศักย์ไฟฟ้าเพื่อหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำธรรมชาติ ซึ่งเก็บจากแหล่งน้ำภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการทดลองเมื่อใช้วิธีวัดโดยสร้างกราฟมาตรฐาน พบว่าขั้วไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าของน้ำธรรมชาติได้จริงและจากการวัดศักย์ไฟฟ้า 3 ครั้ง และคำนวณหาปริมาณซัลไฟด์ไอออน พบว่าความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.051 0.013 M แสดงดังตารางที่ 11 การวัดศักย์ไฟฟ้าและการคำนวณหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนจากน้ำธรรมชาติด้วยวิธีวัดโดยสร้างกราฟมาตรฐาน แสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 13 ปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่วัดได้ในน้ำธรรมชาติด้วยวิธีวัดโดยสร้างกราฟมาตรฐาน

วัดครั้งที่	วัดโดยสร้างกราฟมาตรฐาน ความเข้มข้น (M)
1	4.8×10^{-2}
2	3.9×10^{-2}
3	6.5×10^{-2}
ค่าเฉลี่ย	0.051 0.013

8.2 ผลการวัดโดยวิธีเติมสารมาตรฐาน (standard addition method)

นำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นมาวัดศักย์ไฟฟ้าเพื่อหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำธรรมชาติ ซึ่งเก็บจากแหล่งน้ำภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการทดลองเมื่อใช้วิธีเติมสารมาตรฐาน พบว่าขั้วไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าของน้ำธรรมชาติได้จริงในน้ำธรรมชาติได้จริงและจากการวัดศักย์ไฟฟ้า 3 ครั้งและคำนวณหาปริมาณ

ซัลไฟด์ไอออนพบว่าความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.023 0.006 M ดังตารางที่ 14 การวัดศักย์ไฟฟ้าและการคำนวณหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนจากน้ำธรรมชาติด้วยวิธีเติมสารมาตรฐาน แสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 14 ปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่วัดได้ในน้ำธรรมชาติด้วยวิธีเติมสารมาตรฐาน

วัดครั้งที่	วิธีเติมสารมาตรฐาน ความเข้มข้น (M)
1	3×10^{-2}
2	2×10^{-2}
3	2×10^{-2}
ค่าเฉลี่ย	0.023 0.006

ผลการทดลองเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ ด้วยวิธีวัดโดยสร้างกราฟมาตรฐานและวิธีเติมสารมาตรฐานได้ผลต่างกันคือ ความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนที่คำนวณได้โดยวิธีวัดโดยสร้างกราฟมาตรฐานได้ค่ามากกว่าวิธีเติมสารมาตรฐาน ซึ่งน่าจะมาจากปัญหา matrix effect และผลจากวิธีเติมสารมาตรฐานน่าจะเชื่อถือได้มากกว่าเพราะได้เติมสารมาตรฐานโซเดียมซัลไฟด์ลงไปในตัวอย่งน้ำธรรมชาติด้วย ซึ่งเป็นการกำจัดปัญหา matrix effect ออกไป

วิจารณ์

การเตรียมสารประกอบอินเทอร์คาลเซชันแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนต์ (CdS-BT) เพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical sensor) มีปฏิกิริยาหลักๆ อยู่ 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยน Ca(II) ในเบนทอไนต์ เป็น Cd(II) และทำได้ที่อุณหภูมิห้องกับการเตรียมแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนต์ ซึ่งใช้ปฏิกิริยาของแข็งกับของแข็ง โดยการบดเป็นเวลา 10-15 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์สังเกตได้จากสีขาวของ Cd(II)-เบนทอไนต์ ที่ได้จากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนเปลี่ยนเป็นสีเหลืองชัดเจน เมื่อบดกับ

โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ส่วนประกอบที่ใช้ในการเตรียมขี้ไฟฟ้าคือสารประกอบอินเทอร์คาเลชัน แคลเซียมซัลไฟด์-เบนทอนไนต์ 0.2 กรัม ผสมกับแกรไฟต์สังเคราะห์ 0.025 กรัม โดยการบดเป็นเวลา 10-15 นาทีเพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า จากนั้นนำแคลเซียมซัลไฟด์-เบนทอนไนต์ที่ผสมกับแกรไฟต์สังเคราะห์แล้วมาผสมกับตัวยึด (binder) คือ 3% carboxy methyl cellulose 0.4 กรัม และ 60% polytetrafluoroethylene (PTFE) 0.3 กรัม เพื่อช่วยทำให้ขี้ไฟฟ้ามีความแข็งแรง จากการศึกษพบว่าขี้ไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นนี้สามารถวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายได้ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมตรี

การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไอออนและแคลเซียมไอออนในเบนทอนไนต์ สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรมิเตอร์ (atomic absorption spectrometer, AAS) ผลจากการวิเคราะห์พบว่ามีแคลเซียมไอออนที่อยู่ในชั้นของเบนทอนไนต์เท่ากับ 54.48 meq. /100 g. of clay และเมื่อเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยน Ca(II) ในเบนทอนไนต์เป็น Cd(II) สามารถวัดปริมาณแคลเซียมไอออนได้เท่ากับ 43.59 meq. /100 g. of clay

การวิเคราะห์การตอบสนองของขี้ไฟฟ้า ทำได้โดยวัดศักย์ไฟฟ้าของแคลเซียมไอออนในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ โดยใช้หลักการโพเทนชิโอเมตรี

ผลการตอบสนองของขี้ไฟฟ้าต่อแคลเซียมไอออน เมื่อใช้ขี้ไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าของแคลเซียมไอออนในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยใช้ 0.1 M CdCl_2 เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายในพบว่าขี้ไฟฟ้าตอบสนองต่อแคลเซียมไอออนเนื่องจากมีค่าความชันเป็นบวกและให้ค่า R^2 ที่ดี แต่อย่างไรก็ตามค่าความชันที่ได้ไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์

ผลการตอบสนองของขี้ไฟฟ้าต่อแคลเซียมไอออน เมื่อใช้ขี้ไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าของแคลเซียมไอออนในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยใช้ $0.1 \text{ M Na}_2\text{S}$ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายในพบว่าขี้ไฟฟ้าตอบสนองต่อแคลเซียมไอออนเนื่องจากมีค่าความชันเป็นบวกและให้ค่า R^2 ที่ดี แต่ค่าความชันที่ได้ไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์

ผลการตอบสนองของขี้ไฟฟ้าต่อซัลไฟด์ไอออน เมื่อใช้ขี้ไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ โดยใช้ $0.1 \text{ M Na}_2\text{S}$ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน พบว่าช่วง

ความเข้มข้นที่สามารถวัดได้อยู่ในช่วง $1 \times 10^{-4} - 1 \text{ M}$ ดังภาพที่ 17 (a) และเมื่อตัดค่าความเข้มข้นที่คลาดเคลื่อนออกพบว่าความชันเป็นบวกและให้ค่า R^2 ที่ดี ดังภาพที่ 17 (b) ค่าความชันที่ได้เป็นไปตามสมการเนินสต์คือ 29.5 ซึ่งตามทฤษฎีเมื่อวัดในสารละลายของแอนไอออนควรจะมีค่าความชันเป็นลบ หลักการทำงานของขั้วไฟฟ้าชนิดนี้คือ แคดเมียมซัลไฟด์ที่อยู่ในชั้นของเบนทอไนต์เป็นสารที่ละลายน้ำได้น้อย จึงมีสมดุระหว่างเกลือที่ไม่ละลายและไอออนในสารละลาย เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของแคดเมียมไอออนหรือซัลไฟด์ไอออนที่ความเข้มข้นต่างกันจะมีผลต่อไอออนสมดุ จึงทำให้วัดค่าศักย์ไฟฟ้าได้ต่างกัน การที่ได้ความชันเป็นบวกแสดงว่าขั้วไฟฟ้าตอบสนองต่อแคดเมียมไอออนก่อนแล้วมีผลทางอ้อม (indirect response) ต่อซัลไฟด์ไอออน ซึ่งอยู่ในสมดุเดียวกัน

การทดสอบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าทำได้โดยศึกษาการทำซ้ำ ความเที่ยง การหาเปอร์เซ็นต์ recovery การศึกษาการตอบสนองต่อไอออนอื่นๆ และการทดลองใช้ขั้วไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าเพื่อหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำธรรมชาติ

ผลการทดสอบการทำซ้ำ (reproducibility) ของขั้วไฟฟ้า เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้า 10 ขั้ว วัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ โดยใช้ $0.1 \text{ M Na}_2\text{S}$ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน โดยอัตราส่วนของแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนต์ แกรไฟต์สังเคราะห์ 3% carboxymethyl cellulose (CMC) และ 60% polytetrafluoroethylene (PTFE) เท่ากับ 0.2 : 0.025 : 0.4 : 0.3 กรัม ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว มีค่าความชันใกล้เคียงกับสมการเนินสต์ คือ 29.5 และ ให้ R^2 ที่ดังแสดงในตารางที่ 7 ส่วนขั้วไฟฟ้าอีก 2 ขั้วนั้นค่าความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งอาจจะเกิดความคิดพลาดในขั้นตอนของการเตรียมขั้วไฟฟ้าได้

ผลการทดสอบความเที่ยง (precision) ของขั้วไฟฟ้า เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ซ้ำ 4 ครั้ง โดยใช้ $0.1 \text{ M Na}_2\text{S}$ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน พบว่าค่าความชันที่ได้เป็นบวกและมีค่าใกล้เคียงกับสมการเนินสต์ คือ 29.5 แสดงว่าขั้วไฟฟ้ามีความเที่ยงที่ดี

ผลการหาเปอร์เซ็นต์การกลับคืน (recovery) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ตลอดช่วงการใช้งาน เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธี พบว่าเมื่อความเข้มข้นของตัวอย่างเท่ากับ 7×10^{-4} และ $3 \times 10^{-2} \text{ M}$

สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การกลับคืนอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้คือไม่เกิน 100 ± 5 ยกเว้นที่ความเข้มข้น 1×10^{-2} M สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การกลับคืน recovery ได้ 90 เปอร์เซ็นต์

ผลการศึกษาการตอบสนองต่อไอออนอื่นของขั้วไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน และศักย์ไฟฟ้าของไอออนต่างๆทั้งแคตไอออนและแอนไอออนได้แก่ แมงกานีส ซิลเวอร์ คอปเปอร์ เมอร์คิวรี นิกเกิล ฟลูออไรด์ คลอไรด์ ซัลเฟต และไนเตรต ไอออน พบว่าความชันที่ได้มีค่าบวก เมื่อใช้สารละลายของไอออนแต่ละชนิดเป็นอิเล็กโทรไลต์ภายในและศักย์ไฟฟ้า พบว่าความชันที่ได้ไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์เช่นกัน ซึ่งค่าความชันที่ตอบสนองต่อสมการเนินสต์ควรอยู่ในช่วง ± 3 ถ้าค่าความชันต่ำหรือสูงกว่านี้แสดงว่าขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้านั้นไม่ดีหรือขั้วไฟฟ้านั้นไม่ตอบสนองต่อไอออนที่ต้องการวัด จากการทดลองเบื้องต้นนี้แสดงว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นนั้นมีความจำเพาะต่อซัลไฟด์ไอออน เนื่องจากค่าความชันมีค่าเป็นไปตามสมการเนินสต์มากที่สุด

ผลการทดลองเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำธรรมชาติ โดยวิธีวัดโดยตรงจากกราฟมาตรฐาน พบว่าขั้วไฟฟ้าสามารถวัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำธรรมชาติได้มากกว่าวิธีเดิมสารมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 11 เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนด้วยวิธีวัดโดยตรงจากกราฟมาตรฐานพบว่ามีความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนมากกว่าวิธีเดิมสารมาตรฐาน ซึ่งน่าจะมาจากปัญหา matrix effect ของวิธีวัดโดยตรงจะมีมากกว่าและผลจากวิธีเดิมสารมาตรฐานน่าจะเชื่อถือได้มากกว่าเพราะได้เดิมสารมาตรฐานโซเดียมซัลไฟด์ลงไปในตัวอย่างน้ำธรรมชาติด้วย ซึ่งเป็นการกำจัดปัญหา matrix effect ออกไป จากการทดลองแสดงว่า ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในน้ำตัวอย่างจริงได้

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในงานวิจัยนี้สามารถเตรียมสารประกอบอินเทอร์คาล์ชันแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนต์ โดยใช้ปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งสามารถยืนยันการเกิดสารดังกล่าวได้ คือ เบนทอไนต์ที่มีสีขาวเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และจากการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมและแคดเมียมไอออน เมื่อเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนพบว่าแคดเมียมไอออนสามารถแลกเปลี่ยนกับแคลเซียมไอออนที่อยู่ในชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ได้

การเตรียมขั้วไฟฟ้าสำหรับประยุกต์ใช้วัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำ โดยเทคนิคโพเทนชิโอเมทรี สามารถเตรียมได้ โดยนำสารประกอบอินเทอร์คาล์ชันแคดเมียมซัลไฟด์-เบนทอไนต์ผสมกับแกรไฟต์สังเคราะห์ และใช้ตัวยึดจับ (binder) 2 ชนิด คือ 3% carboxy methyl cellulose และ 60% polytetrafluoroethylene พบว่าขั้วไฟฟ้าสามารถตอบสนองต่อซัลไฟด์ไอออนได้แบบทางอ้อมเพราะมีความชันเป็นบวก กล่าวคือ ขั้วไฟฟ้าตอบสนองต่อแคดเมียมไอออนก่อนแล้วมีผลทางอ้อม (indirect response) ต่อซัลไฟด์ไอออน ซึ่งอยู่ในสมดุลเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากแคดเมียมซัลไฟด์ที่อยู่ในชั้นของเบนทอไนต์เป็นสารที่ละลายน้ำได้น้อย

จากการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าชนิดนี้พบว่า ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ให้ผลการทดสอบการทำซ้ำ ความเที่ยง เปอร์เซนต์การคืนกลับ และความจำเพาะเลือกต่อซัลไฟด์ไอออนได้ดี และสามารถนำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นไปวัดตัวอย่างน้ำธรรมชาติได้

งานวิจัยนี้เป็นการนำสารประกอบอินเทอร์คาล์ชันในเบนทอไนต์มาเตรียมเป็นโพเทนชิโอเมทริกเซ็นเซอร์ เพื่อวัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำเป็นครั้งแรกโดยไม่พบรายงานว่ามีผู้ทำมาก่อน

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะที่ผู้วิจัยแนะนำคือ

1. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับพิษของสารละลายเพิ่มเติม เนื่องจากแคดเมียมซัลไฟด์เป็นสารที่ละลายได้ในกรด ดังนั้นในสถานะที่เป็นกรดนี้อาจจะทำการละลายของไอออนที่อยู่ในสมดุลละลายได้ดีขึ้น ทำให้ช่วงความเข้มข้นที่สามารถวัดได้กว้างขึ้น ซึ่งถือเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น
2. ขั้นตอนการเตรียมเซ็นเซอร์ เมื่อผสมส่วนประกอบทั้งหมดแล้ว ก่อนนำไปอบควรนำไปอัดด้วยแรงดัน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเซ็นเซอร์และเป็นการยืดอายุการใช้งาน
3. ควรมีการศึกษาความจำเพาะ (selectivity) ของขั้วไฟฟ้าเพิ่มเติม เพื่อดูการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าต่อไอออนชนิดอื่นๆ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความจำเพาะเลือก (selectivity coefficient, K_{ij})

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- นิธิมา เคารพพงศ์. 2545. วัสดุนาโนคอมโพสิตและสารประกอบอินเทอร์คาลชัน.
วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 30(3): 169-179.
- 2549. พอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมโพสิต ออร์แกโนฟิลิกเคลย์. วารสารวิทยาศาสตร์ มข.
60(3): 240-245.
- นิรมล วรสิขุ. 2547. การใช้เบนทอไนด์ฟอสเฟตในน้ำมันปาล์มที่ใช้ทอดแล้วหลายครั้ง.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เลิศลักษณ์ สุพฤทธิพานิชย์. 2539. เบนทอไนด์. ข่าวสารการธรณี. 41: 39-45.
- สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ 2547. คู่มือการประกันและควบคุมคุณภาพ การติดตาม
ตรวจสอบคุณภาพน้ำทะเล ส่วนแหล่งน้ำทะเล. ม.ป.ท. กรุงเทพฯ.
- อัจฉนา วงศ์ชัยสุวัฒน์. 2553. เอกสารคำสอน วิชา 403534 วิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า. ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Anaissi, F. J., Gregoire J.-F Demets, H. E Toma and A. Coelho. 1999. Modified electrodes based
on mixed bentonite vanadium(V) oxide xerogels. **J. Electroanal Chem.** 464: 48-53.
- Darder, M., M. Colilla and E. Ruiz-Hitzky. 2005. Chitosan-clay nanocomposites: application as
electrochemical sensors. **Appl. Clay Sci.** 28: 199-208.
- Duffy, N.W., L.M. Peter and R.L. Wang. 2002. Characterization of CdS/CdTe heterojunctions by
photocurrent spectroscopy and electrolyte electroreflectance/absorbance spectroscopy
(EEA/EER). **J. Electroanal Chem.** 532: 207-214.

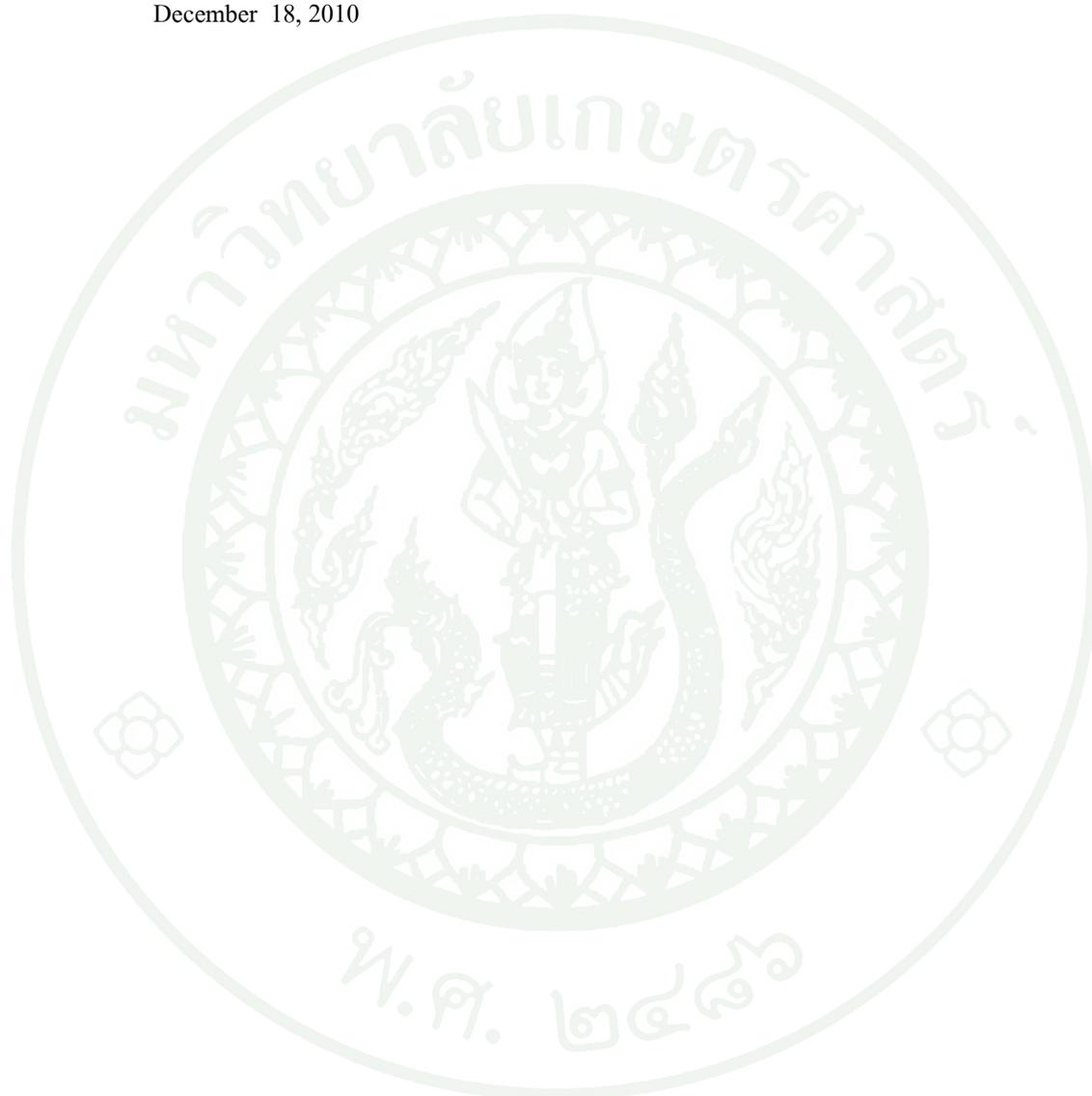
- Evans, A. 1987. **Potentiometry and ion selective electrode**. Thames polytechnique, London.
- Fauze, J. A., J.F. Demets Gregoire, E. Toma Henrique and C.V. Coelho Antonio. 1999. Modified electrodes based on mixed bentonite vanadium (V) oxide xerogels. **J. Electroanal Chem.** 464: 48-53.
- Generalic, E. **Glass electrode**. Croatian-English chemistry dictionary and glossary. Available Source: <http://glossary.periodni.com/glossary.php?en=glass+electrode>, December 18, 2010
- Guth, U., S. Brosda and J. Schomburg. 1996. Applications of caly minerals in sensor techniques. **Appl. Clay Sci.** 11: 229-236.
- Khaorapong, N., K. Kuroda, H. Hashizume and M. Ogawa. 2001. Solid-state intercalation of 4,4'-bipyridine and 1,2-di(4-pyridine) ethylene into interlayer spaces of Co(II)-Ni(II)-and Cu(II)-montmorillonites. **Appl. Clay Sci.** 19: 69-76.
- Khaorapong, N., A. Ontam, S. Youngmea and M. Ogawa. 2008. Solid-state intercalation and in situ formation of cadmium sulfide in the interlayer space of montmorillonite. **J. Phys. Chem. Solids.** 69:1107-1111.
- Khaorapong, N., A. Ontam and M. Ogawa. 2010. Formation of ZnS and CdS in the interlayer spaces of montmorillonite. **Appl. Clay Sci.** 50: 19-24.
- Kula, P., Z. Navrátilová, P. Kulová and M. Kotoucek. 1999. Sorption and determination of Hg(II) on clay modified carbon paste electrodes. **Anal. Chim Acta.** 385: 91-101.
- Laribi, S., J-M. Fleureau and B. Jouffrey 2003. **Couplage nano-micro-macro dans les argiles**. Available Source: http://www.mssmat.ecp.fr/IMG/pdf/poster_Laribi_.pdf, December 18, 2010.

- Manisankar, P., C. Vedhi, S. Viswanathan and H.G. Prabu. 2005. Investigation on the usage of clay modified electrode for the electrochemical determination of some pollutants. **J. Environ. Sci. Heal. B.** 39: 89-100.
- Mousty, C. 2004. Sensors and biosensors based on clay-modified electrodes—new trends. **Appl. Clay Sci.** 27: 159-177.
- Orata, D. and S. Kamau David. 2000. A comparative study of the electrochemical/electrodegradation of polyaniline from aniline loaded in a clay-mineral/polyaniline composite matrix to that of the bulk solution. **React Funct Polym.** 43: 133-138.
- Pushpito K. G. and J. Bard Allen. 1983. Clay-modified electrodes. **J. Am. Chem. Soc.** 105: 5691-5693.
- Rezaei, B., M. Ghiaci and M. Ebrahim Sedaghat. 2008. A selective modified bentonite- porphyrin carbon paste electrode for determination of Mn(II) by using anodic stripping voltammetry. **Sensors and actuators B.** 131: 439-447.
- Rodriguez, I. N., J. A. Munoz Leyva and J. L. Hidalgo de Cisneros. 1997. Use of a bentonite-modified carbon paste electrode for determination of some phenols in flow system by differential pulse voltammetry. **The analyst.** 122: 601-604.
- Rodriguez, I. N., M. Barea Zamora, J. M. Barberá Salvador, J. A. Munoz Leyva, M. P. Hernandez-Artiga and J. L. Hidalgo de Cisneros. 1997. Voltammetric determination of 2-nitrophenol at a bentonite modified carbon paste electrode. **Mikrochim Acta.** 126: 87-92.
- Saelim, N., R. Magaraphan and T. Sreethawong. 2011. TiO₂/modified natural clay semiconductor as a potential electrode for natural dye-sensitized solar cell. **Ceram Int.** 37: 659-663.

Silverman, D. C. **Tutorial on reference electrodes for corrosion.** Available Source:

http://www.argentumsolutions.com/tutorials/refelectrode_tutorialpg4.html,

December 18, 2010





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์ปริมาณไอออนโลหะในเบนทอไนต์

1. การคำนวณสารที่ใช้ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออน

นำแคลเซียม-มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรง ผสมกับสารละลาย CdCl_2 เข้มข้น 1 M โดยใช้อัตราส่วนแคลเซียม-มอนต์มอริลโลไนต์ต่อสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ปริมาณ 1 กรัม ต่อ 15 มิลลิลิตร แล้วคนด้วยเครื่องคนที่ใช้ไฟฟ้าเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

วิธีการคำนวณ

เตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 1 M ปริมาตร 100 ml จาก $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$

จาก

$$\frac{g}{m} = \frac{CV}{1000}$$

$$\frac{g}{228.35} = \frac{1 \times 100}{1000}$$

$$g = \frac{1 \times 100 \times 228.35}{1000} = 22.835 \text{ g}$$

ดังนั้นในการเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 1 M ปริมาตร 100 ml จะต้องชั่ง $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ เท่ากับ 22.835 กรัม

2. การคำนวณน้ำหนัก Cd(II)-เบนทอไนต์และโซเดียมซัลไฟด์ปริมาณ 1:1 โดยโมลเพื่อเตรียม CdS -เบนทอไนต์

$$\text{มวลสูตร } \text{Na}_2\text{S} = 78.04$$

$$\text{มวลอะตอม } \text{Cd(II)} = 112.40$$

ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity, CEC) ของเบนทอไนต์เท่ากับ 64 milli equivalent/100 กรัม (วิเคราะห์โดยกรมพัฒนาที่ดิน) และกำหนดให้ Cd(II) แลกเปลี่ยนกับ Ca(II) ในเบนทอไนต์ได้หมด

ในการเตรียม CdS -เบนทอไนต์ ใช้ Cd(II) 2 กรัม ซึ่ง $= 1.28 \times 10^{-3}$ eq.

และเนื่องจาก 1 eq. = น้ำหนักอะตอม/ประจุไอออน

$$\text{ดังนั้น 1 eq. ของ Cd(II)} = \left(\frac{112.40}{2} \right) = 56.2 \text{ กรัม}$$

$$\text{ดังนั้น Cd(II) } 1.28 \times 10^{-3} \text{ eq. จะมีน้ำหนัก} = \left(\frac{1.28 \times 10^{-3} \times 56.2}{1} \right) = 0.0719 \text{ กรัม}$$

$$\left(\frac{0.0719 \text{ g}}{112.4 \text{ g/mol}} \right) = 0.000639 \text{ โมล}$$

แสดงว่าต้องใช้ $\text{Na}_2\text{S} = 0.000639$ โมล

$$\begin{aligned} \text{Na}_2\text{S } 0.000639 \text{ โมล} &= 0.000639 \text{ โมล} \times 78.04 \text{ กรัม/โมล} \\ &= 0.0498 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้น ในการเตรียมสารประกอบอินเทอร์คาลชัน CdS-เบนทอไนต์ ซึ่งมีอัตราส่วน 1:1 โดยโมล เมื่อใช้ Cd(II)-เบนทอไนต์ 2 กรัม จะต้องชั่งโซเดียมซัลไฟด์ 0.0498 กรัม

3. การคำนวณหาปริมาณแคลเซียมไอออนในแคลเซียม-เบนทอไนต์ ด้วยเทคนิคอะตอมมิก แอ็บซอร์บชัน สเปกโทรเมทรี (atomic absorption spectrometer, AAS)

ก่อนวิเคราะห์ปริมาณไอออนในเบนทอไนต์ ต้องย่อยเบนทอไนต์ด้วยเตาอบไมโครเวฟ โดยใช้ตัวอย่างเบนทอไนต์ 0.2 กรัม สารเคมีที่ใช้ย่อย คือ กรดไฮโดรคลอริก (37%) 7 ml และกรด ไนตริก (70%) 3 ml

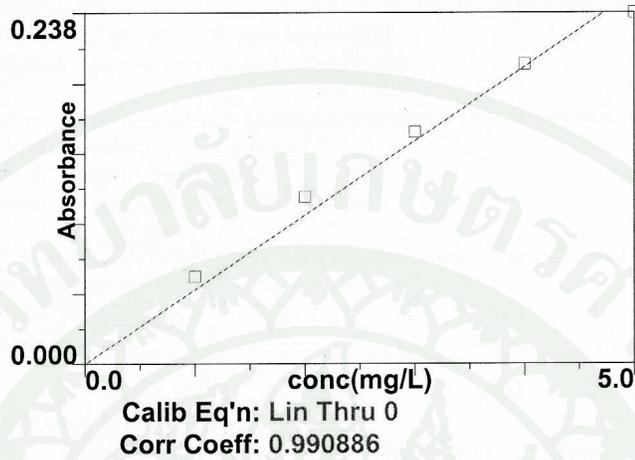
ตารางผนวกที่ ก1 สภาวะที่ใช้ในการย่อยตัวอย่างเบนทอไนต์

Heating program	Standard control					
Stage	Max pw.	% Pw	Time (min)	P (psi)	Temp (°C)	Hold
1	600 W	100	15.00	130	210	10:00

เมื่อย่อยตัวอย่างแล้ว จะได้สารละลายสีที่มีตะกอนปนจึงต้องกรองตะกอนออกจากสารละลาย แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 ml

การวิเคราะห์ไอออนต้องทำกราฟมาตรฐาน (calibration graph) โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานแคลเซียมความเข้มข้นเท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5 ppm แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ซึ่งได้ผลดังภาพผนวกที่ ก2 สำหรับตัวอย่างแคลเซียม-เบนทอไนต์ก่อนนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมไอออน ต้องเจือจางตัวอย่าง 100 เท่า โดยเปิดตัวอย่าง 1 ml จากตัวอย่าง 100 ml แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 ml จากการวิเคราะห์แคลเซียม-เบนทอไนต์ด้วยเครื่อง AAS พบว่ามีแคลเซียมไอออน = 2.344 mg/l

Ca 422.7



ภาพผนวกที่ ก1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนและค่าการดูดกลืน

4. วิธีการคำนวณหาปริมาณแคลเซียมไอออนในเบนทอไนต์

ในสารละลาย 1000 ml มีแคลเซียมไอออน = 2.344 mg/l

$$\begin{aligned} \text{ถ้าสารละลาย 100 ml จะมี แคลเซียมไอออน} &= \left(\frac{2.344 \text{ mg} / 1 \times 100 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \right) \\ &= 0.2344 \text{ mg} \end{aligned}$$

แสดงว่า ในสารละลายที่ปิเปต 10 ml มีแคลเซียมไอออน = 0.2344 mg

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นสารละลายเริ่มต้น 100 ml มีแคลเซียมไอออน} &= \left(\frac{0.2344 \text{ mg} \times 100 \text{ ml}}{10 \text{ ml}} \right) \\ &= 2.344 \text{ mg} \end{aligned}$$

ดังนั้นแคลเซียม-เบนทอไนต์ 0.2 กรัม มีแคลเซียมไอออน = 2.344 mg = 2.344×10^{-3} g
(น้ำหนักอะตอม Ca(II) = 40.08)

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{2.344 \times 10^{-3} \text{ g}}{20.04 \text{ g / eq.}} \right) \\ &= 1.169 \times 10^{-4} \text{ eq.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ถ้าแคลเซียม-เบนทอไนต์ 100 กรัม แคลเซียมไอออน} &= \left(\frac{1.169 \times 10^{-4} \text{ eq} \times 100 \text{ g}}{0.2 \text{ g}} \right) \\ &= 0.05848 \text{ eq.} \end{aligned}$$

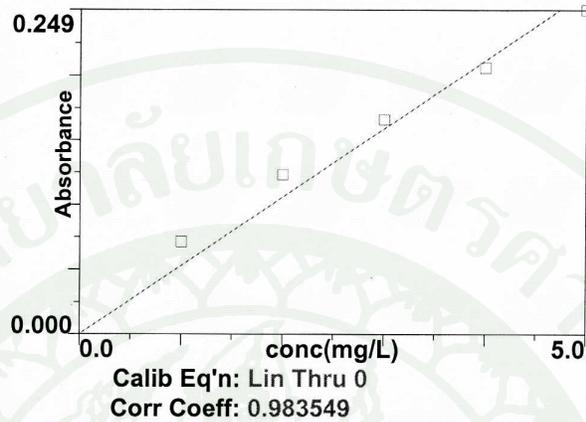
เพราะฉะนั้นแคลเซียม-เบนทอไนต์ 100 กรัม มีแคลเซียมไอออนเท่ากับ 58.48 meq.

5. การวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมไอออนในแคลเซียม-เบนทอไนต์ ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโทรเมทรี (atomic absorption spectrometer, AAS)

ก่อนวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไอออนในเบนทอไนต์ ต้องย่อยเบนทอไนต์ด้วยเตาอบไมโครเวฟ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไอออนในเบนทอไนต์ เมื่อย่อยตัวอย่างแล้วจะได้สารละลายที่มีลักษณะใสและต้องกรองตะกอนออกจากสารละลาย จะได้สารละลายใสที่มีตะกอนปนจึงต้องกรองตะกอนออกจากสารละลาย แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 ml

การวิเคราะห์ไอออนต้องทำกราฟมาตรฐาน (calibration graph) โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานแคลเซียมความเข้มข้นเท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 ppm แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ซึ่งได้ผลดังภาพผนวกที่ 2 สำหรับตัวอย่างแคลเซียม-เบนทอไนต์ก่อนนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมไอออน ต้องเจือจางตัวอย่าง 100 เท่า โดยเปิดตัวอย่าง 1 ml จากตัวอย่าง 100 ml แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 ml จากการวิเคราะห์แคลเซียม-เบนทอไนต์ด้วยเครื่อง AAS พบว่ามีแคลเซียมไอออน = 0.49 mg/l

Cd 228.8



ภาพผนวกที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียมไอออนและค่าการดูดกลืน

ในสารละลาย 1000 ml มีแคดเมียมไอออน = 0.49 mg/l

$$\begin{aligned} \text{ในสารละลาย 100 ml จะมี แคดเมียมไอออน} &= \left(\frac{0.49 \text{ mg} / 1 \times 100 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \right) \\ &= 0.049 \text{ mg} \end{aligned}$$

แสดงว่า ในสารละลายที่ปีเปิด 1 ml มีแคดเมียมไอออน = 0.049 mg

$$\begin{aligned} \text{ในสารละลายเริ่มต้น 100 ml มีแคดเมียมไอออน} &= \left(\frac{0.049 \text{ mg} \times 100 \text{ ml}}{1 \text{ ml}} \right) \\ &= 4.9 \text{ mg} = 4.9 \times 10^{-3} \text{ g} \\ &= \left(\frac{4.9 \times 10^{-3} \text{ g}}{56.2 \text{ g / eq.}} \right) \\ &= 8.718 \times 10^{-5} \text{ eq.} \end{aligned}$$

$$\text{แคดเมียม-เบนทอไนต์ 100 กรัมมีแคดเมียมไอออน} = \left(\frac{8.718 \times 10^{-5} \text{ eq} \times 100 \text{ g}}{0.2 \text{ g}} \right)$$

$$= 0.04359 \text{ eq}$$

เพราะฉะนั้นแคลเซียม-เบนทอไนต์ 100 กรัม มีแคลเซียมไอออนเท่ากับ 43.59 meq.





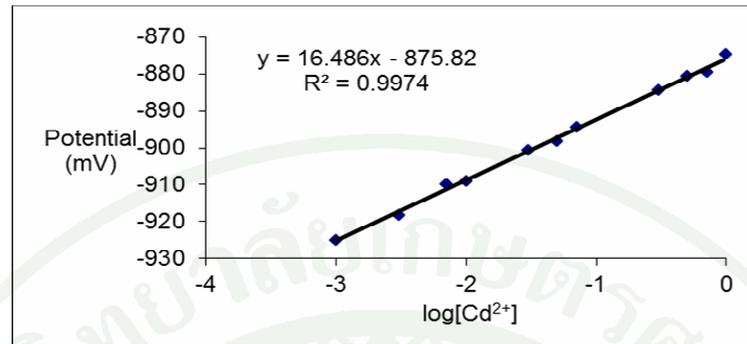
ภาคผนวก ข
กราฟและผลการทดลองเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียม
คลอไรด์

2. ผลการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าต่อแคดเมียมไอออน

2.1 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ 3 ครั้ง โดยใช้ 0.1 M CdCl₂ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ข1 ข2 และ ข3 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ log[Cd²⁺] จะได้กราฟเส้นตรงและมีความชันเป็นบวก ดังภาพที่ ข1 ข2 และ ข3

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้ 0.1 M CdCl₂ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 1

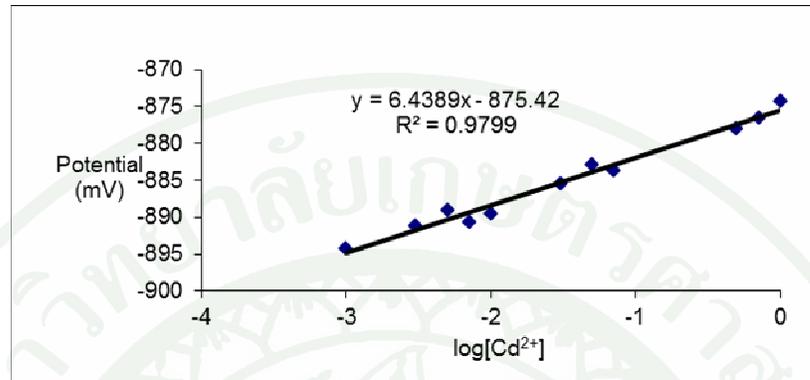
[Cd ²⁺] M	Log [Cd ²⁺]	mV
1x10 ⁻³	-3	-925
3x10 ⁻³	-2.52	-918.3
7x10 ⁻³	-2.15	-909.8
1x10 ⁻²	-2	-909.2
3x10 ⁻²	-1.52	-900.8
5x10 ⁻²	-1.3	-898.1
7x10 ⁻²	-1.15	-894.5
0.3	-0.52	-884.5
0.5	-0.3	-880.5
0.7	-0.15	-879.6
1	0	-874.6



ภาพผนวกที่ ข1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cd^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์

ตารางที่ผนวก ข2 ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้ 0.1 M CdCl_2 เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 2

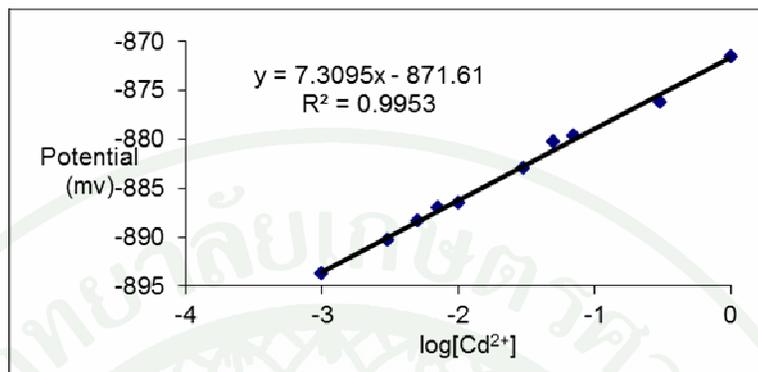
$[Cd^{2+}] \text{ M}$	$\text{Log } [Cd^{2+}]$	mV
1×10^{-3}	-3	-894.2
3×10^{-3}	-2.52	-891.2
5×10^{-3}	-2.3	-889
7×10^{-3}	-2.15	-890.6
1×10^{-2}	-2	-889.5
3×10^{-2}	-1.52	-885.4
5×10^{-2}	-1.3	-882.9
7×10^{-2}	-1.15	-883.7
0.5	-0.3	-878
0.7	-0.15	-876.5
1	0	-874.2



ภาพผนวกที่ ข2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cd^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้ 0.1 M CdCl₂ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 3

$[Cd^{2+}]$ M	$\log [Cd^{2+}]$	mV
1×10^{-3}	-3	-893.7
3×10^{-3}	-2.52	-890.3
5×10^{-3}	-2.3	-888.4
7×10^{-3}	-2.15	-887
1×10^{-2}	-2	-886.5
3×10^{-2}	-1.52	-882.9
5×10^{-2}	-1.3	-880.2
7×10^{-2}	-1.15	-879.6
0.3	-0.52	-876.2
1	0	-871.6

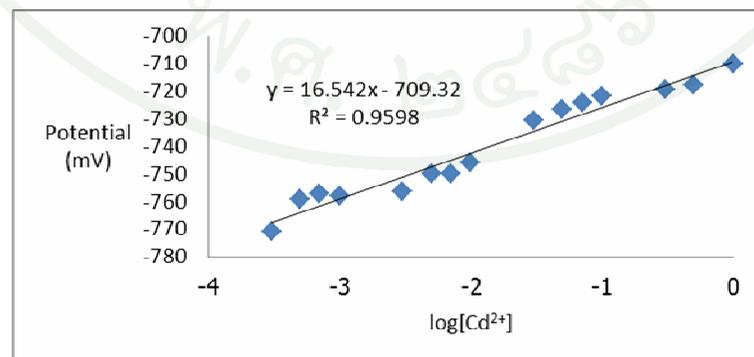


ภาพผนวกที่ ข3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cd^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์

2.2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ 3 ครั้งโดยใช้ $0.1 \text{ M Na}_2\text{S}$ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ข4 ข5 และ ข6 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cd^{2+}]$ จะได้กราฟเส้นตรงและมีความชันเป็นบวก ดังภาพที่ ข4 ข5 และ ข6

ตารางผนวกที่ ข4 ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้
0.1 M Na₂S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 1

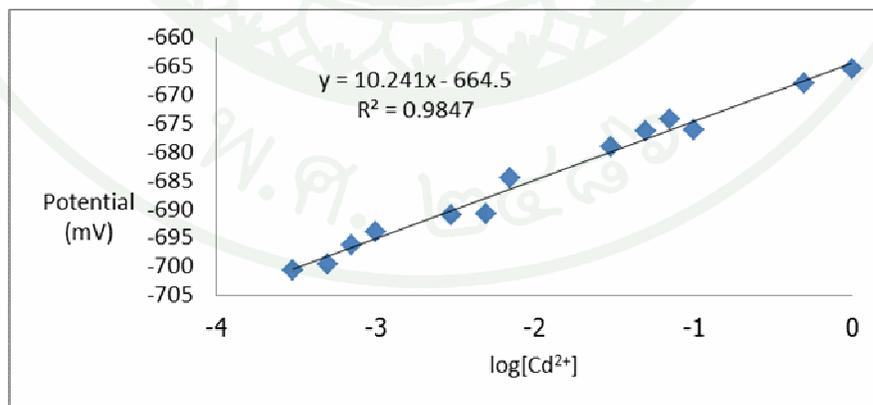
[Cd ²⁺] M	Log [Cd ²⁺]	mV
3x10 ⁻⁴	-3.52	-771
5x10 ⁻⁴	-3.3	-759.1
7x10 ⁻⁴	-3.15	-757.4
1x10 ⁻³	-3	-758
3x10 ⁻³	-2.52	-756.3
5x10 ⁻³	-2.3	-750.1
7x10 ⁻³	-2.15	-749.8
1x10 ⁻²	-2	-745.9
3x10 ⁻²	-1.52	-730.8
5x10 ⁻²	-1.3	-726.6
7x10 ⁻²	-1.15	-724.3
0.1	-1	-721.7
0.3	-0.52	-719.5
0.5	-0.3	-717.9
1	0	-710.1



ภาพผนวกที่ ข4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ log [Cd²⁺] เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้า
ของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์

ตารางผนวกที่ ข5 ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na_2 เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 2

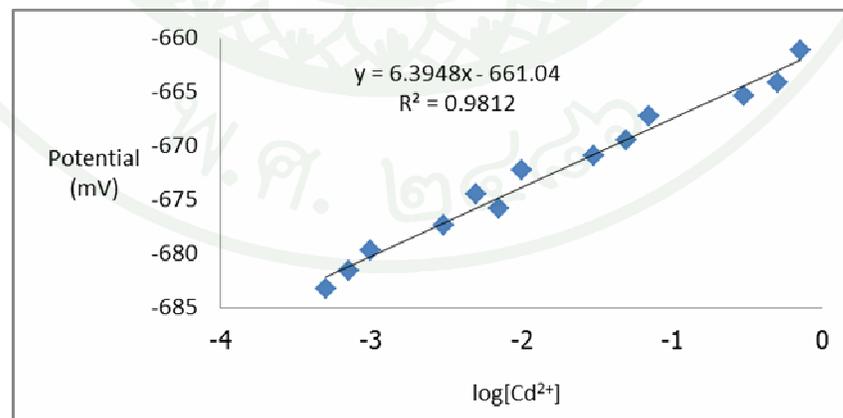
$[\text{Cd}^{2+}]$ M	$\text{Log} [\text{Cd}^{2+}]$	mV
3×10^{-4}	-3.52	-700.7
5×10^{-4}	-3.3	-699.7
7×10^{-4}	-3.15	-696.2
1×10^{-3}	-3	-694.1
3×10^{-3}	-2.52	-691.1
5×10^{-3}	-2.3	-690.8
7×10^{-3}	-2.15	-684.5
3×10^{-2}	-1.52	-679.1
5×10^{-2}	-1.3	-676.4
7×10^{-2}	-1.15	-674.3
0.1	-1	-676.2
0.5	-0.3	-668.1
1	0	-665.5



ภาพผนวกที่ ข5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{Cd}^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์

ตารางผนวกที่ ข6 ค่าศักย์ไฟฟ้าของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ เมื่อใช้
0.1 M Na₂S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 3

[Cd ²⁺] M	Log [Cd ²⁺]	mV
5x10 ⁻⁴	-3.3	-683.2
7x10 ⁻⁴	-3.15	-681.6
1x10 ⁻³	-3	-679.7
3x10 ⁻³	-2.52	-677.4
5x10 ⁻³	-2.3	-674.5
7x10 ⁻³	-2.15	-675.8
1x10 ⁻²	-2	-672.3
3x10 ⁻²	-1.52	-670.9
5x10 ⁻²	-1.3	-669.5
7x10 ⁻²	-1.15	-667.3
0.3	-0.52	-665.4
0.5	-0.3	-664.1
0.7	-0.15	-661.2



ภาพผนวกที่ ข6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ log [Cd²⁺] เมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้า
ของแคดเมียมไอออนในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์

การทดลองวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของแคดเมียมไอออน 3 ครั้ง พบว่าขั้วไฟฟ้านั้น
ตอบสนองต่อแคดเมียมไอออนและให้ค่า R^2 ที่ดี แต่ค่าความชันที่ได้ไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์



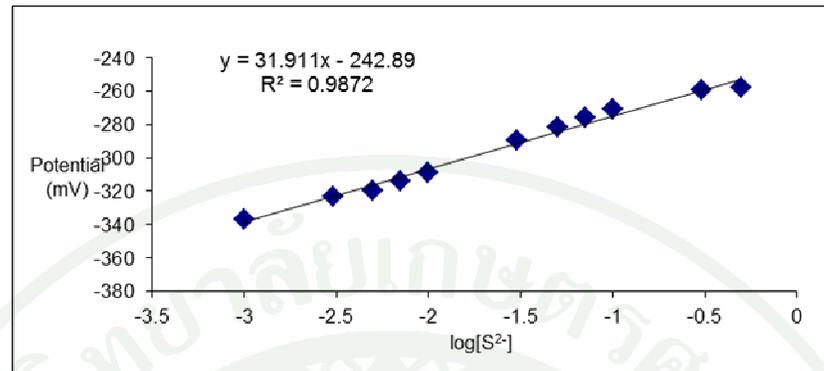


3. ผลการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าต่อซัลไฟด์ไอออน

เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ 3 ครั้ง โดยใช้ $0.1 \text{ M Na}_2\text{S}$ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ค1 ค2 และ ค3 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[S^{2-}]$ จะได้กราฟเส้นตรงและมีความชันเป็นบวก ดังภาพผนวกที่ ค1 ค2 และ ค3

ตารางผนวกที่ ค1 ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ $0.1 \text{ M Na}_2\text{S}$ เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายในวัดครั้งที่ 1

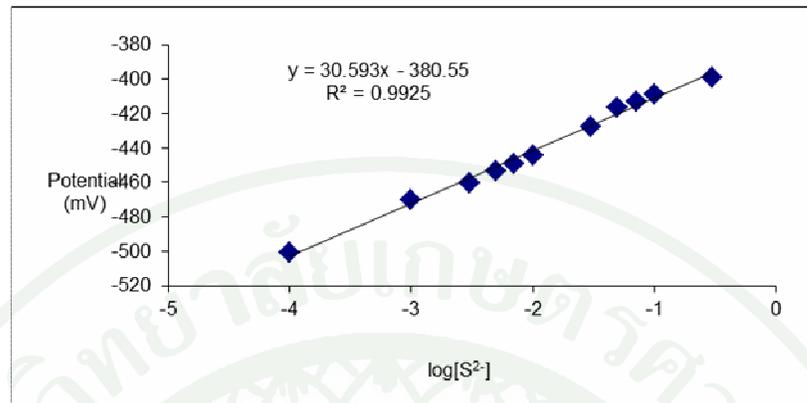
$[S^{2-}] \text{ M}$	$\text{Log } [S^{2-}]$	mV
1×10^{-3}	-3	-336.7
3×10^{-3}	-2.52	-323.6
5×10^{-3}	-2.3	-319.6
7×10^{-3}	-2.15	-314.2
1×10^{-2}	-2	-308.9
3×10^{-2}	-1.52	-289.5
5×10^{-2}	-1.3	-281.5
7×10^{-2}	-1.15	-276
0.1	-1	-271.1
0.3	-0.52	-259.4
0.5	-0.3	-258



ภาพผนวกที่ ค1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ ค2 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายในวัดครั้งที่ 2

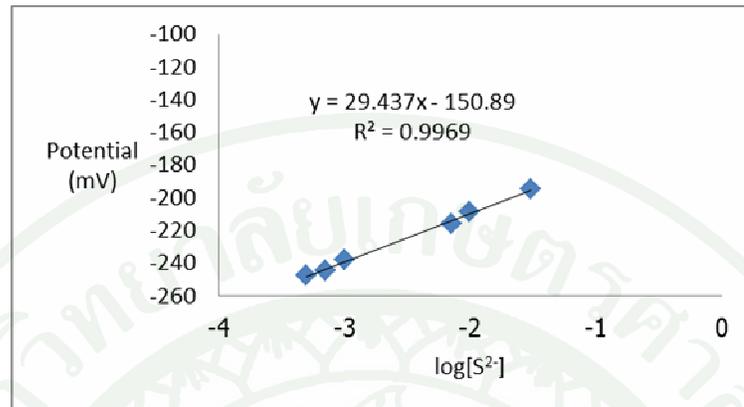
$[S^{2-}]$ M	$\log[S^{2-}]$	mV
1×10^{-4}	-4	-500.9
1×10^{-3}	-3	-470.1
3×10^{-3}	-2.52	-460.7
5×10^{-3}	-2.3	-453.2
7×10^{-3}	-2.15	-449.1
1×10^{-2}	-2	-444
3×10^{-2}	-1.52	-427.5
5×10^{-2}	-1.3	-416.2
7×10^{-2}	-1.15	-413.1
0.1	-1	-409
0.3	-0.52	-398.8



ภาพผนวกที่ ค2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ ค3 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายในวัดครั้งที่ 3

$[S^{2-}]$ M	Log $[S^{2-}]$	mV
5×10^{-4}	-3.3	-247.3
7×10^{-4}	-3.15	-244.7
1×10^{-3}	-3	-238.3
7×10^{-3}	-2.15	-216.1
1×10^{-2}	-2	-209
3×10^{-2}	-1.52	-195



ภาพผนวกที่ ๓ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^2]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์



ภาคผนวก ง
กราฟและผลการทดลอง เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าทดสอบการทำซ้ำ

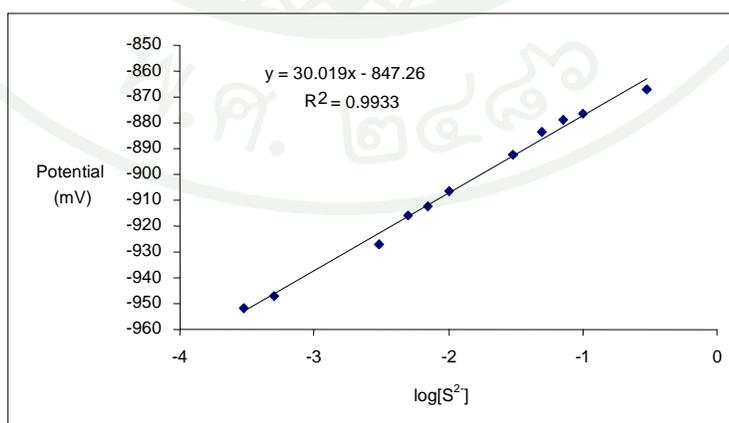
4. ผลการทดสอบการทำซ้ำ (reproducibility) ของขั้วไฟฟ้า

ผลการทดสอบการทำซ้ำ (reproducibility) ของขั้วไฟฟ้าทั้ง 10 ขั้ว คือ

ตารางผนวกที่ 1 ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้า

หมายเลข 1 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na₂S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

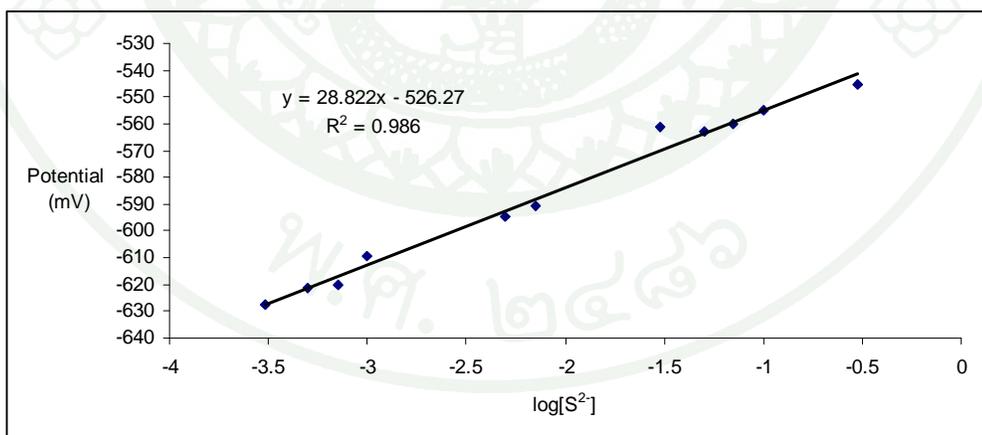
[S ²⁻] M	Log [S ²⁻]	mV
3x10 ⁻⁴	-3.52	-951.5
5x10 ⁻⁴	-3.3	-946.9
3x10 ⁻³	-2.52	-927
5x10 ⁻³	-2.3	-916
7x10 ⁻³	-2.15	-912.5
1x10 ⁻²	-2	-906.5
3x10 ⁻²	-1.52	-892.3
5x10 ⁻²	-1.3	-883.8
7x10 ⁻²	-1.15	-878.8
0.1	-1	-876.3
0.3	-0.52	-867.1



ภาพผนวกที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ ๑๒ ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้า
หมายเลข 2 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na₂S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

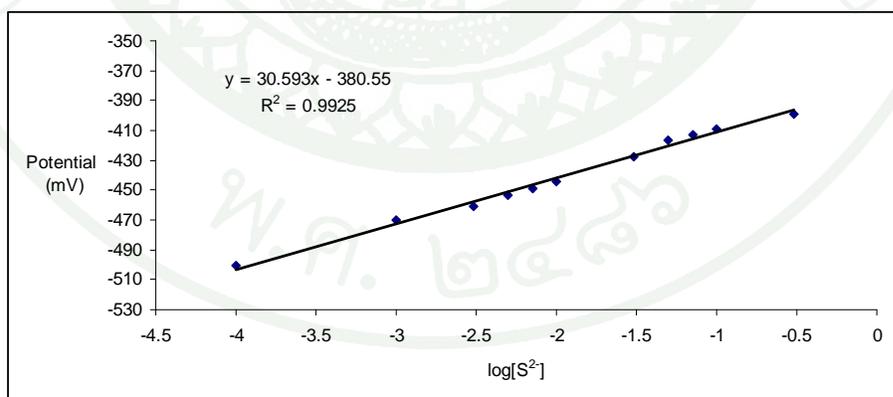
[S ²⁻] M	Log [S ²⁻]	mV
3x10 ⁻⁴	-3.52	-627.8
5x10 ⁻⁴	-3.3	-621.4
7x10 ⁻⁴	-3.15	-620.2
1x10 ⁻³	-3	-609.6
5x10 ⁻³	-2.3	-594.9
7x10 ⁻³	-2.15	-590.9
3x10 ⁻²	-1.52	-561.2
5x10 ⁻²	-1.3	-563
7x10 ⁻²	-1.15	-559.9
0.1	-1	-554.9
0.3	-0.52	-545.5



ภาพผนวกที่ ๑๒ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ log [S²⁻] เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ
เซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ 3 ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 3 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na₂S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

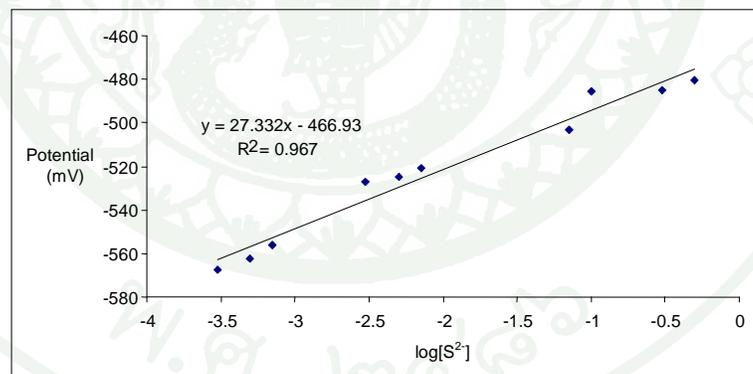
[S ²⁻] M	Log [S ²⁻]	mV
1x10 ⁻⁴	-4	-500.9
1x10 ⁻³	-3	-470.1
3x10 ⁻³	-2.52	-460.7
5x10 ⁻³	-2.3	-453.2
7x10 ⁻³	-2.15	-449.1
1x10 ⁻²	-2	-444
3x10 ⁻²	-1.52	-427.5
5x10 ⁻²	-1.3	-416.2
7x10 ⁻²	-1.15	-413.1
0.1	-1	-409
0.3	-0.52	-398.8



ภาพผนวกที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ log [S²⁻] เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ ๔ ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 4 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na₂S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

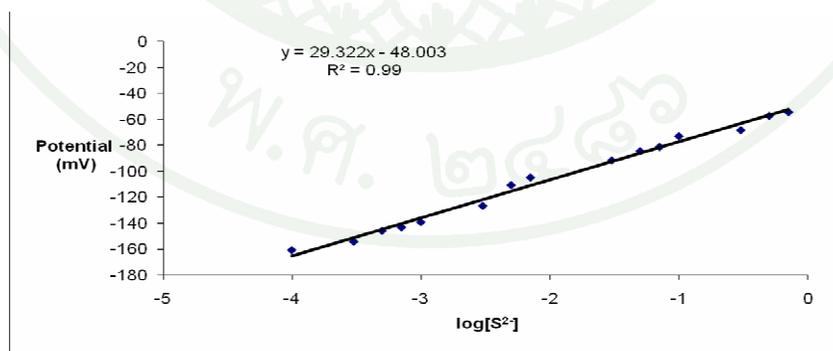
[S ²⁻] M	Log [S ²⁻]	mV
3x10 ⁻⁴	-3.52	-567.3
5x10 ⁻⁴	-3.3	-562.6
7x10 ⁻⁴	-3.15	-556
3x10 ⁻³	-2.52	-527.3
5x10 ⁻³	-2.3	-525.1
7x10 ⁻³	-2.15	-521
7x10 ⁻²	-1.15	-503.1
0.1	-1	-485.4
0.3	-0.52	-485.1
0.5	-0.3	-480.6



ภาพผนวกที่ ๔ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ log [S²⁻] เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ 5 ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 5 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

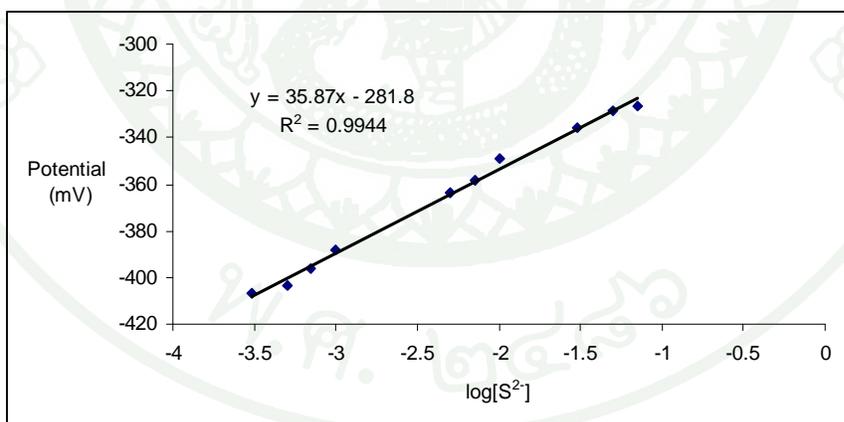
$[\text{S}^{2-}] \text{ M}$	$\text{Log} [\text{S}^{2-}]$	mV
1×10^{-4}	-4	-161
3×10^{-4}	-3.52	-154.4
5×10^{-4}	-3.3	-146.1
7×10^{-4}	-3.15	-143.3
1×10^{-3}	-3	-139.3
3×10^{-3}	-2.52	-126.8
5×10^{-3}	-2.3	-110.7
7×10^{-3}	-2.15	-104.8
3×10^{-2}	-1.52	-91.6
5×10^{-2}	-1.3	-84.5
7×10^{-2}	-1.15	-81.2
0.1	-1	-72.9
0.3	-0.52	-68.2
0.5	-0.3	-57.1



ภาพผนวกที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{S}^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ 6 ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้า
หมายเลข 6 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na₂S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

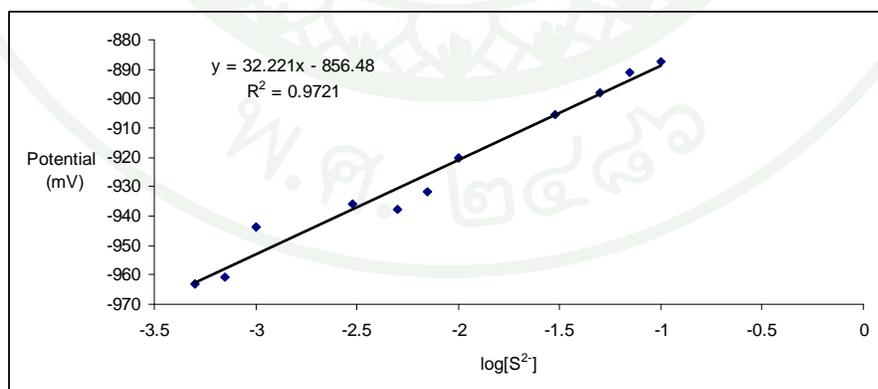
[S ²⁻] M	Log [S ²⁻]	mV
3x10 ⁻⁴	-3.52	-407
5x10 ⁻⁴	-3.3	-403.7
7x10 ⁻⁴	-3.15	-395.9
1x10 ⁻³	-3	-388.1
5x10 ⁻³	-2.3	-363.8
7x10 ⁻³	-2.15	-358.6
1x10 ⁻²	-2	-349.2
3x10 ⁻²	-1.52	-335.5
5x10 ⁻²	-1.3	-328.6
7x10 ⁻²	-1.15	-326.6



ภาพผนวกที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ log [S²⁻] เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ
เซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ 7 ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้า
หมายเลข 7 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na₂S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

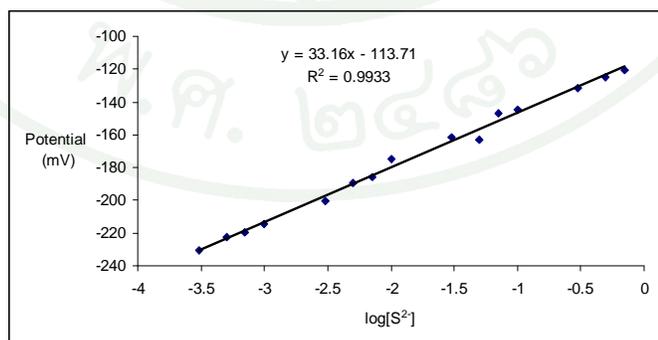
[S ²⁻] M	Log [S ²⁻]	mV
5x10 ⁻⁴	-3.3	-963.2
7x10 ⁻⁴	-3.15	-960.9
1x10 ⁻³	-3	-943.5
3x10 ⁻³	-2.52	-935.8
5x10 ⁻³	-2.3	-937.7
7x10 ⁻³	-2.15	-931.6
1x10 ⁻²	-2	-920.3
3x10 ⁻²	-1.52	-905.5
5x10 ⁻²	-1.3	-898.1
7x10 ⁻²	-1.15	-891.1
0.1	-1	-887.2
0.3	-0.52	-879.9
0.5	-0.3	-878.7



ภาพผนวกที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ log [S²⁻] เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ
เซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ ๘ ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าหมายเลข ๘ วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na₂S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

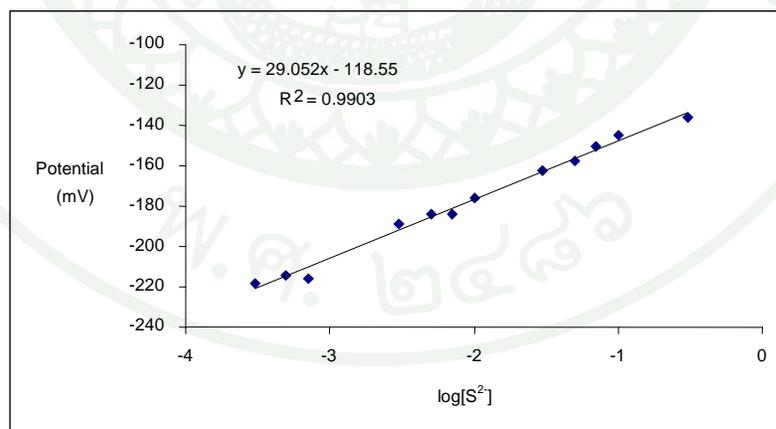
[S ²⁻] M	Log [S ²⁻]	mV
1x10 ⁻⁴	-4	-229.3
3x10 ⁻⁴	-3.52	-230.8
5x10 ⁻⁴	-3.3	-222.2
7x10 ⁻⁴	-3.15	-219.8
1x10 ⁻³	-3	-214.3
3x10 ⁻³	-2.52	-200.2
5x10 ⁻³	-2.3	-189.3
7x10 ⁻³	-2.15	-185.5
3x10 ⁻²	-1.52	-161.3
5x10 ⁻²	-1.3	-163.2
7x10 ⁻²	-1.15	-146.9
0.1	-1	-144.8
0.3	-0.52	-131.3
0.5	-0.3	-125.1
0.7	-0.15	-120.8



ภาพผนวกที่ ๘ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ log [S²⁻] เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ 9 ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 9 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na₂S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

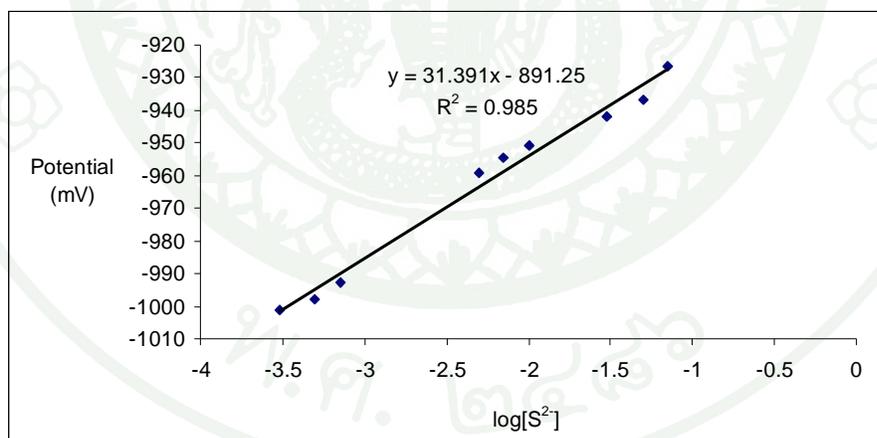
[S ²⁻] M	Log [S ²⁻]	mV
3x10 ⁻⁴	-3.52	-218
5x10 ⁻⁴	-3.3	-214.1
7x10 ⁻⁴	-3.15	-216.3
3x10 ⁻³	-2.52	-188.5
5x10 ⁻³	-2.3	-183.9
7x10 ⁻³	-2.15	-183.7
1x10 ⁻²	-2	-176
3x10 ⁻²	-1.52	-162.6
5x10 ⁻²	-1.3	-157.5
7x10 ⁻²	-1.15	-150.5
0.1	-1	-144.9
0.3	-0.52	-136.3



ภาพผนวกที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ log [S²⁻] เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ 10 ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าหมายเลข 10 วัดศักย์ไฟฟ้าและมี 0.1 M Na₂S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน

[S ²⁻] M	Log [S ²⁻]	mV
3x10 ⁻⁴	-3.52	-1001.2
5x10 ⁻⁴	-3.3	-997.7
7x10 ⁻⁴	-3.15	-992.7
5x10 ⁻³	-2.3	-959.3
7x10 ⁻³	-2.15	-954.5
1x10 ⁻²	-2	-950.8
3x10 ⁻²	-1.52	-941.7
5x10 ⁻²	-1.3	-937
7x10 ⁻²	-1.15	-926.4



ภาพผนวกที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์



ภาคผนวก จ

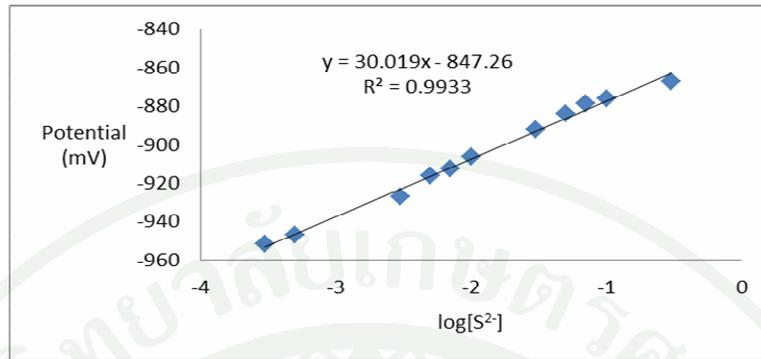
กราฟและผลการทดลองของการทดสอบความเที่ยงของขั้วไฟฟ้า

5. ผลการทดสอบความเที่ยง (precision) ของขั้วไฟฟ้า

เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ซ้ำ 4 ครั้ง พบว่าให้ผลการทดลองดังนี้

ตารางผนวกที่ ๑1 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 1

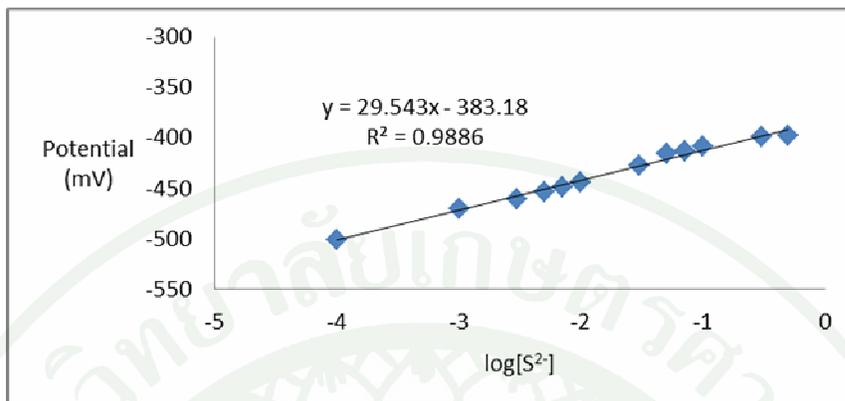
$[\text{S}^{2-}] \text{ M}$	$\text{Log} [\text{S}^{2-}]$	mV
3×10^{-4}	-3.52	-951.5
5×10^{-4}	-3.3	-946.9
3×10^{-3}	-2.52	-927
5×10^{-3}	-2.3	-916
7×10^{-3}	-2.15	-912.5
1×10^{-2}	-2	-906.5
3×10^{-2}	-1.52	-892.3
5×10^{-2}	-1.3	-883.8
7×10^{-2}	-1.15	-878.8
0.1	-1	-876.3
0.3	-0.52	-867.1



ภาพผนวกที่ จ1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^2]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ
ซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ จ2 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ 0.1 M
 Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 2

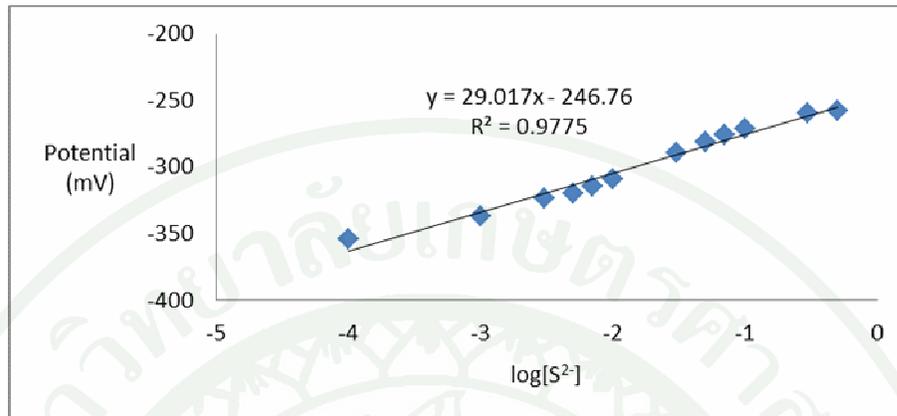
$[S^2]$ M	Log $[S^2]$	mV
1×10^{-4}	-4	-500.9
1×10^{-3}	-3	-470.1
3×10^{-3}	-2.52	-460.7
5×10^{-3}	-2.3	-453.2
7×10^{-3}	-2.15	-449.1
1×10^{-2}	-2	-444
3×10^{-2}	-1.52	-427.5
5×10^{-2}	-1.3	-416.2
7×10^{-2}	-1.15	-413.1
0.1	-1	-409
0.3	-0.52	-398.8
0.5	-0.3	-398.4



ภาพผนวกที่ ๑๒ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ ๑๓ ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 3

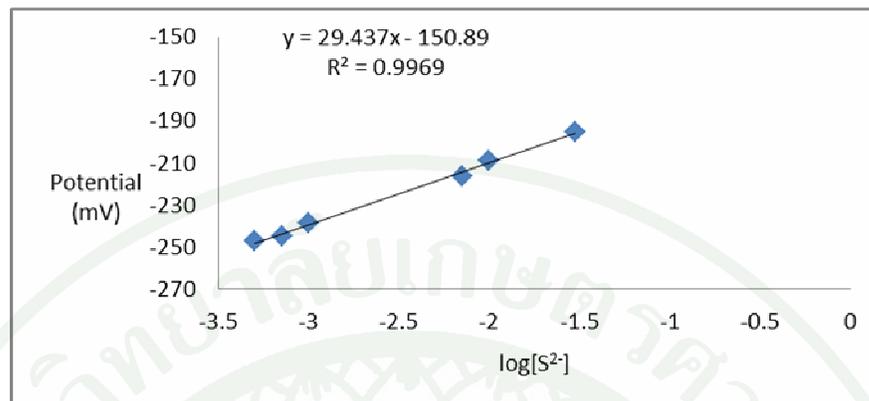
$[S^{2-}]$ M	Log $[S^{2-}]$	mV
1×10^{-4}	-4	-354
1×10^{-3}	-3	-336.7
3×10^{-3}	-2.52	-323.6
5×10^{-3}	-2.3	-319.6
7×10^{-3}	-2.15	-314.2
1×10^{-2}	-2	-308.9
3×10^{-2}	-1.52	-289.5
5×10^{-2}	-1.3	-281.5
7×10^{-2}	-1.15	-276
0.1	-1	-271.1
0.3	-0.52	-259.4
0.5	-0.3	-258



ภาพผนวกที่ ๓ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ ๔ ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อใช้ 0.1 M Na_2S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน วัดครั้งที่ 4

$[S^{2-}]$ M	Log $[S^{2-}]$	mV
5×10^{-4}	-3.3	-247.3
7×10^{-4}	-3.15	-244.7
1×10^{-3}	-3	-238.3
7×10^{-3}	-2.15	-216.1
1×10^{-2}	-2	-209
3×10^{-2}	-1.52	-195



ภาพผนวกที่ ๔ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^2]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ
เซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

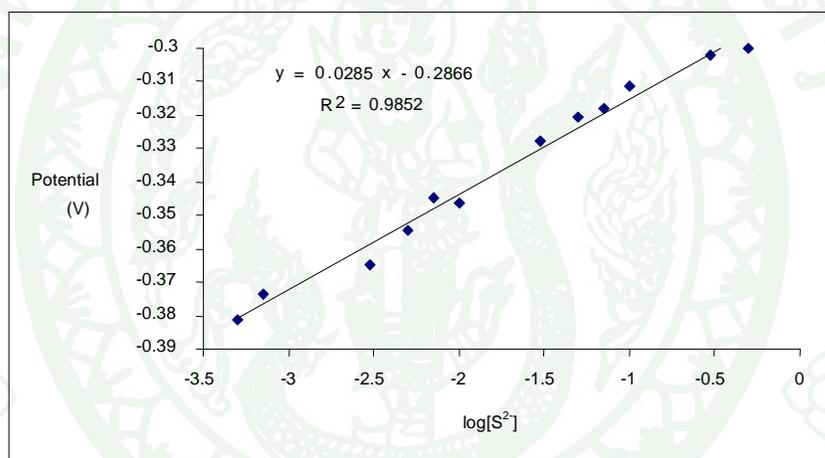


ภาคผนวก จ

กราฟและผลการทดลองของการหาเปอร์เซ็นต์การกลับคืน (recovery)

6. วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกลับคืน (recovery)

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกลับคืนของการทดลองนี้ ทำโดยเลือกจุดความเข้มข้นของตัวอย่างจากกราฟมาตรฐาน โดยให้จุดที่เลือกเป็นจุด 0 และจุดต่อไปเป็นความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เดิม จากนั้นพล็อตกราฟระหว่าง $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ กับความเข้มข้นที่เดิม ลากเส้นตรงตัดแกน x เพื่อหาความเข้มข้นที่จุดนี้ ซึ่งหาค่าได้จากสมการเส้นตรงของกราฟ โดยแทน $y = 0$ โดยที่จุดตัดแกน x ควรมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่เลือกเป็นจุด 0 และเปอร์เซ็นต์การกลับคืนคำนวณได้ควรอยู่ในช่วง 95-105 % หรือ $100 \pm 5 \%$



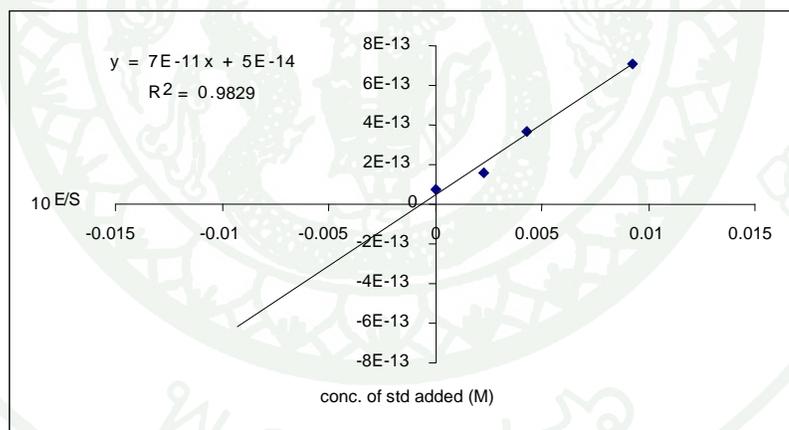
ภาพผนวกที่ ๑1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^2]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

จากกราฟมาตรฐาน ค่าความชัน (slope, S) ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.0285 เมื่อศักย์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (V) ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกลับคืนที่ความเข้มข้น 7×10^{-4} M สามารถคำนวณหาค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ ได้ดังตารางผนวกที่ ๑1

ตารางผนวกที่ ๑1 ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมและค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$

$[S^{2-}] \text{ M}$	ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติม (M)	E	$\frac{E_{\text{cell}}}{S}$	$10 \frac{E_{\text{cell}}}{S}$
7×10^{-4}	0	-0.3736	-13.1088	7.78×10^{-14}
3×10^{-3}	0.0023	-0.3649	-12.8035	1.57×10^{-13}
5×10^{-3}	0.0043	-0.3543	-12.4316	3.7×10^{-13}
1×10^{-2}	0.0093	-0.3462	-12.1474	7.12×10^{-13}

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ กับความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติม สามารถหาจุดตัดแกน x ได้ ดังแสดงในภาพผนวกที่ ๑2



ภาพผนวกที่ ๑2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมกับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$

จากสมการเส้นตรง $y = 7E-11x + 5E-14$ หรือ $y = (7 \cdot 10^{-11}x) + (5 \cdot 10^{-14})$ เมื่อแทน $y = 0$ สามารถคำนวณหาค่า x ได้ คือ

$$x = \left(\frac{5 \times 10^{-14}}{7 \times 10^{-11}} \right)$$

$$x = 7.14 \times 10^{-4}$$

$$\% \text{ recovery} = \left(\frac{7.14 \times 10^{-4}}{7 \times 10^{-4}} \right) \times 100$$

$$= 102.04$$

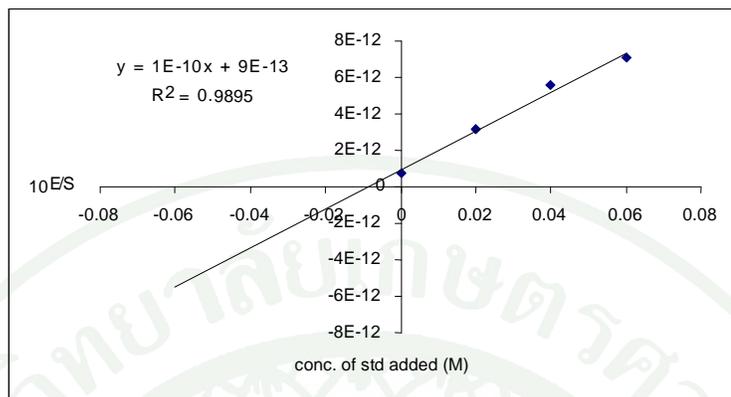
เพราะฉะนั้นที่ความเข้มข้น $7 \times 10^{-4} \text{ M}$ สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ recovery ได้เท่ากับ 102.4

ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกลับคืนที่ความเข้มข้นที่ $1 \times 10^{-2} \text{ M}$ สามารถคำนวณหาค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ ได้ดังตารางผนวกที่ ๓

ตารางผนวกที่ ๓ ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เดิมและค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ ที่ความเข้มข้น $1 \times 10^{-2} \text{ M}$

$[S^{2-}] \text{ M}$	ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เดิม (M)	E	E/S	$10^{E/S}$
0.01	0	-0.3462	-12.1474	7.12×10^{-13}
0.03	0.02	-0.3278	-11.5018	3.15×10^{-12}
0.05	0.04	-0.3208	-11.2561	5.54×10^{-12}
0.07	0.06	-0.3178	-11.1509	7.07×10^{-12}

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ กับความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เดิม สามารถหาจุดตัดแกน x ได้ ดังแสดงในภาพผนวกที่ ๓



ภาพผนวกที่ ๓3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมกับค่า

$$\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$$

จากสมการเส้นตรง $y = 1E-10x + 9E-13$ หรือ $y = (1 \times 10^{-10}x) + (9 \times 10^{-13})$ เมื่อแทน $y = 0$ สามารถคำนวณหาค่า x ได้ คือ

$$x = \left(\frac{9 \times 10^{-13}}{1 \times 10^{-10}} \right)$$

$$x = 0.009$$

$$\begin{aligned} \% \text{ recovery} &= \left(\frac{9 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-2}} \right) \times 100 \\ &= 90 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นที่ความเข้มข้น 1×10^{-2} M สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การกลับคืนได้เท่ากับ 90

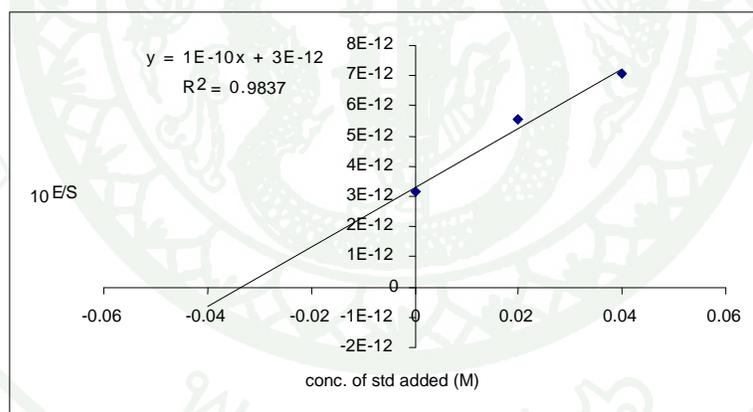
ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกลับคืนที่ความเข้มข้นที่ 3×10^{-2} M สามารถคำนวณหาค่า

$\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ ได้ดังตารางผนวกที่ ๓3

ตารางผนวกที่ ๓ ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมและค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ ที่ความเข้มข้น $3 \times 10^{-2} \text{ M}$

$[S^2] \text{ M}$	ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติม (M)	E	E/S	$10^{E/S}$
0.03	0	-0.3278	-11.5018	3.15×10^{-12}
0.05	0.02	-0.3208	-11.2561	5.54×10^{-12}
0.07	0.04	-0.3178	-11.1509	7.07×10^{-12}

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ กับความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติม สามารถหาจุดตัดแกน x ได้ ดังแสดงในภาพผนวกที่ ๓4



ภาพผนวกที่ ๓4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมกับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$

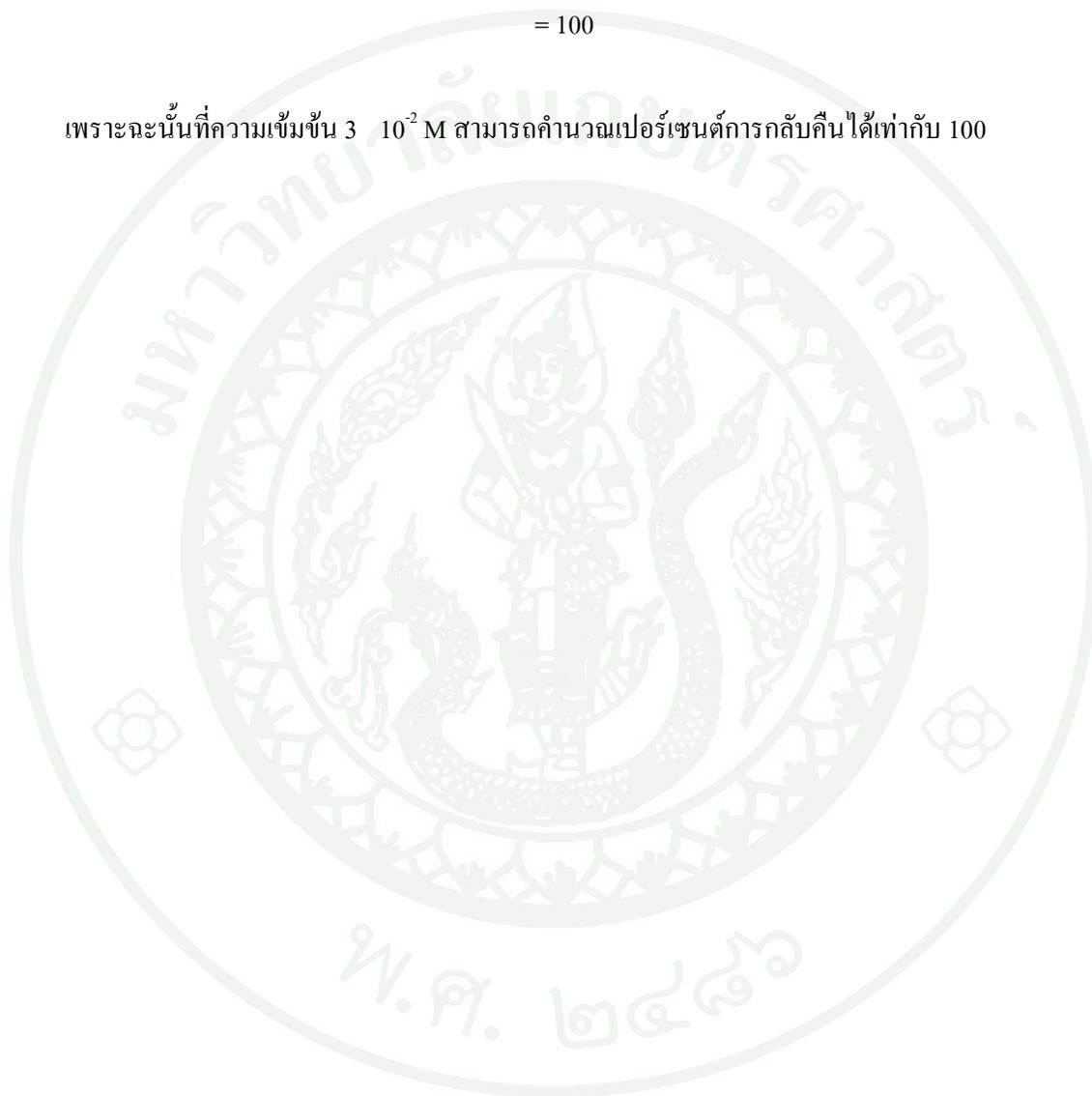
จากสมการเส้นตรง $y = 1E-10x + 3E-12$ หรือ $y = (1 \times 10^{-10}x) + (3 \times 10^{-12})$ เมื่อแทน $y = 0$ สามารถคำนวณหาค่า x ได้ คือ

$$x = \left(\frac{3 \times 10^{-12}}{1 \times 10^{-10}} \right)$$

$$x = 0.03$$

$$\begin{aligned}\% \text{ recovery} &= \left(\frac{3 \times 10^{-2}}{3 \times 10^{-2}} \right) \times 100 \\ &= 100\end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นที่ความเข้มข้น 3×10^{-2} M สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การกลับคืนได้เท่ากับ 100





ภาคผนวก ข

กราฟและผลการทดลองของการศึกษาการตอบสนองต่อไอออนอื่นๆ

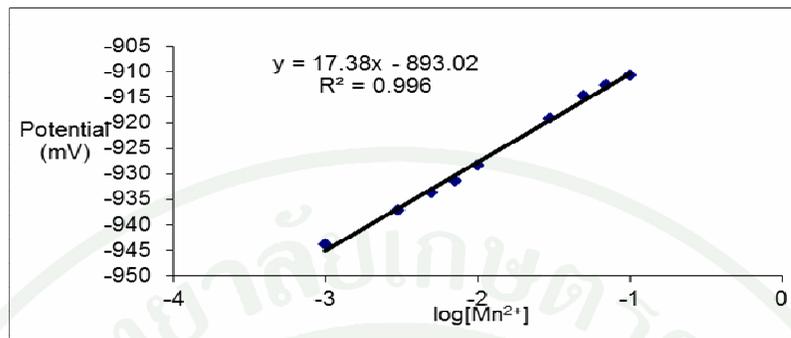
7. ผลการศึกษาการตอบสนองต่อไอออนอื่นๆ

7.1 ผลการศึกษาการตอบสนองต่อไอออนอื่นๆ (เมื่อใช้ 0.1 M Na₂S เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน)

7.1.1 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแมงกานีสไอออนในสารละลายแมงกานีสคลอไรด์ (MnCl₂·4H₂O) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 29.5 ได้ผลการทดลอง ดังตารางผนวกที่ ซ1 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ log[Mn²⁺] จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ซ1

ตารางผนวกที่ ซ1 ค่าศักย์ไฟฟ้าของแมงกานีสไอออนในสารละลายแมงกานีสคลอไรด์

[Mn ²⁺] M	Log [Mn ²⁺]	mV
1x10 ⁻³	-3	-943.9
3x10 ⁻³	-2.52	-937.1
5x10 ⁻³	-2.3	-933.6
7x10 ⁻³	-2.15	-931.4
1x10 ⁻²	-2	-928.4
3x10 ⁻²	-1.52	-919.1
5x10 ⁻²	-1.3	-914.8
7x10 ⁻²	-1.15	-912.6
0.1	-1	-910.7



ภาพผนวกที่ ข1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Mn^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแมงกานีสไอออนในสารละลายแมงกานีสคลอไรด์

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลดังตารางผนวกที่ ข2

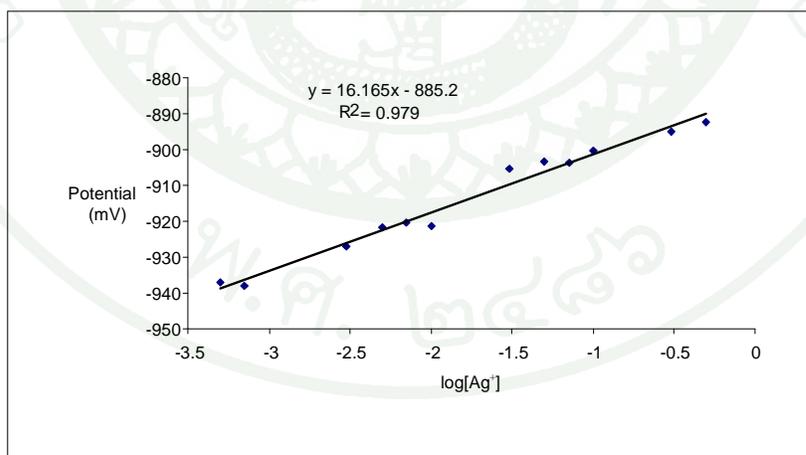
ตารางผนวกที่ ข2 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแมงกานีสไอออนในสารละลายแมงกานีสคลอไรด์

วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.8784	17.38	$1 \times 10^{-3} - 0.1$
2	0.742	-3.5254	$1 \times 10^{-4} - 1$
3	0.9957	4.251	$5 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-2}$
ค่าเฉลี่ย	0.872	6.035	-

7.1.2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซิลเวอร์ไอออนในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ($AgNO_3$) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 59 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ข3 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Ag^+]$ จะได้กราฟผนวกดังภาพที่ ข2

ตารางผนวกที่ ๓3 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซิลเวอร์ไอออนเมื่อวัดในสารละลายซิลเวอร์ไอออน

[Ag ⁺] M	Log [Ag ⁺]	mV
5x10 ⁻⁴	-3.3	-937.1
7x10 ⁻⁴	-3.15	-938
3x10 ⁻³	-2.52	-927
5x10 ⁻³	-2.3	-921.6
7x10 ⁻³	-2.15	-920.4
1x10 ⁻²	-2	-921.2
3x10 ⁻²	-1.52	-905.4
5x10 ⁻²	-1.3	-903.3
7x10 ⁻²	-1.15	-903.7
0.1	-1	-900.2
0.3	-0.52	-895
0.5	-0.3	-892.4



ภาพผนวกที่ ๓2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ log [Ag⁺] เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซิลเวอร์ไอออนในสารละลายซิลเวอร์ไอออน

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ ๓4

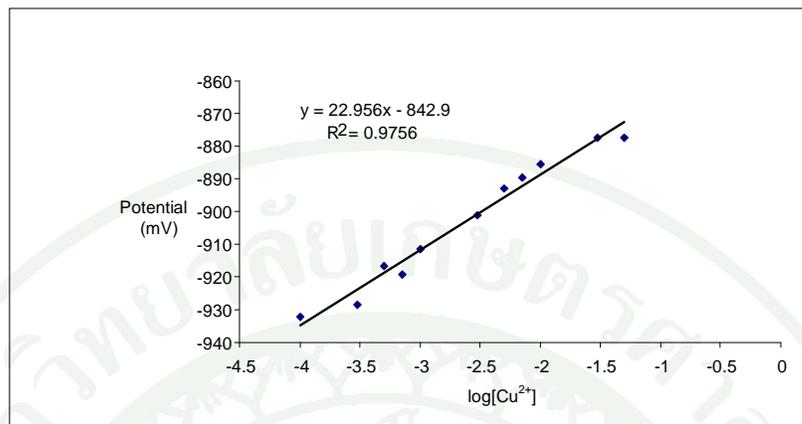
ตารางผนวกที่ ๓4 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซิลเวอร์ไอออนในสารละลายซิลเวอร์ในเทรต

วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.9832	19.81	$1 \times 10^{-3} - 0.7$
2	0.9674	14.43	$1 \times 10^{-3} - 0.7$
3	0.979	16.17	$5 \times 10^{-4} - 0.5$
ค่าเฉลี่ย	0.9765	16.8	-

7.1.3 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคอปเปอร์ไอออน ในสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์ ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 29.5 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ๓5 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[\text{Cu}^{2+}]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ๓3

ตารางผนวกที่ ๓5 ค่าศักย์ไฟฟ้าของคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์

$[\text{Cu}^{2+}] \text{ M}$	$\text{Log} [\text{Cu}^{2+}]$	mV
1×10^{-4}	-4	-932.2
3×10^{-4}	-3.52	-928.4
5×10^{-4}	-3.3	-916.8
7×10^{-4}	-3.15	-919.3
1×10^{-3}	-3	-911.4
3×10^{-3}	-2.52	-901.2
5×10^{-3}	-2.3	-893
7×10^{-3}	-2.15	-889.6
1×10^{-2}	-2	-885.4
3×10^{-2}	-1.52	-877.5
5×10^{-2}	-1.3	-877.3



ภาพผนวกที่ ๓3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cu^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ ๓6

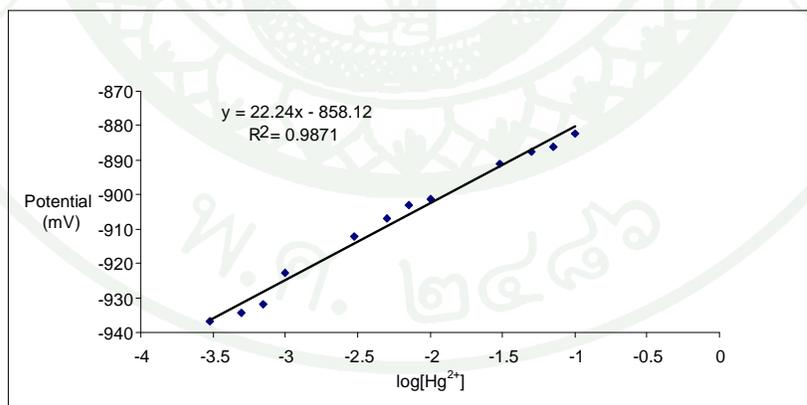
ตารางผนวกที่ ๓6 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์

วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.9756	22.96	$1 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-2}$
2	0.8239	-3.57	$5 \times 10^{-3} - 1$
3	0.9555	-5.17	$1 \times 10^{-2} - 1$
ค่าเฉลี่ย	0.9183	4.74	-

7.1.4 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเมอคิวรีไอออน ในสารละลายเมอคิวรีไนเตรด ($Hg(NO_3)_2 \cdot H_2O$) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 29.5 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ๓7 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[Hg^{2+}]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ๓4

ตารางผนวกที่ ๗ ค่าศักย์ไฟฟ้าของเมอคิวรีไอออนในสารละลายเมอคิวรีไนเตรต

[Hg ²⁺] M	Log [Hg ²⁺]	mV
3x10 ⁻⁴	-3.52	-936.8
5x10 ⁻⁴	-3.3	-934.2
7x10 ⁻⁴	-3.15	-931.8
1x10 ⁻³	-3	-922.6
3x10 ⁻³	-2.52	-912.1
5x10 ⁻³	-2.3	-907.1
7x10 ⁻³	-2.15	-903
1x10 ⁻²	-2	-901.3
3x10 ⁻²	-1.52	-891.2
5x10 ⁻²	-1.3	-887.5
7x10 ⁻²	-1.15	-886.1
0.1	-1	-882.2



ภาพผนวกที่ ๔ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Hg^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเมอคิวรีไอออนในสารละลายเมอคิวรีไนเตรต

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ ข8

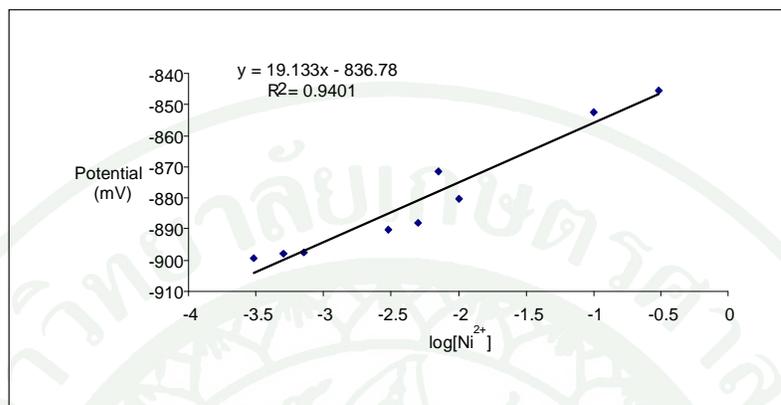
ตารางผนวกที่ ข8 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเมอคิวรีไอออนในสารละลาย
เมอคิวรีในเทรต

วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.9947	25.18	$1 \times 10^{-3} - 0.1$
2	0.9871	22.24	$3 \times 10^{-4} - 0.1$
3	0.972	25.64	$3 \times 10^{-4} - 7 \times 10^{-2}$
ค่าเฉลี่ย	0.9846	24.35	-

7.1.5 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลไอออนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์ ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 29.5 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ผนวก ข9 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[\text{Ni}^{2+}]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ข5

ตารางผนวกที่ ข9 ค่าศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลไอออนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์

$[\text{Ni}^{2+}] \text{ M}$	$\text{Log} [\text{Ni}^{2+}]$	mV
3×10^{-4}	-3.52	-899.4
5×10^{-4}	-3.3	-897.8
7×10^{-4}	-3.15	-897.4
5×10^{-3}	-2.3	-888
7×10^{-3}	-2.15	-871.5
1×10^{-2}	-2	-880.4
0.1	-1	-852.3
0.3	-0.52	-845.4



ภาพผนวกที่ ๕5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Ni^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลไอออนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ ๕10

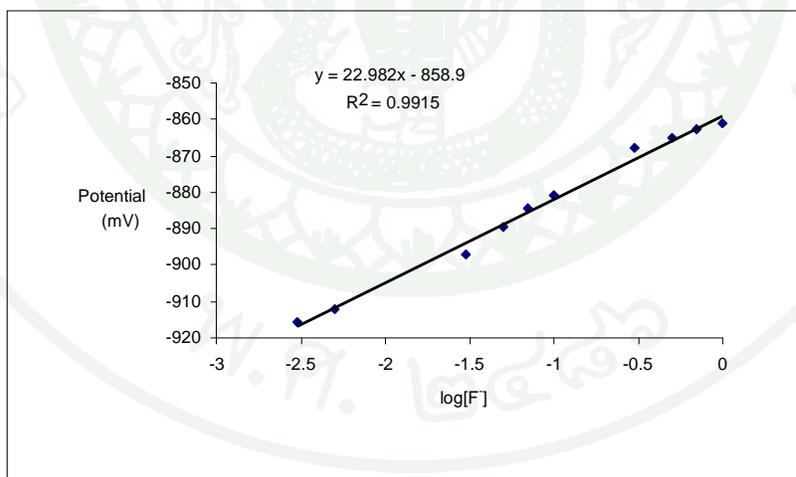
ตารางผนวกที่ ๕10 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลไอออนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์

วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.9882	25.77	$1 \times 10^{-3} - 0.1$
2	0.9817	14.21	$3 \times 10^{-4} - 0.3$
3	0.9401	19.13	$3 \times 10^{-4} - 0.3$
ค่าเฉลี่ย	0.97	19.71	-

7.1.6 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมฟลูออไรด์ (KF) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 59 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ๕11 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [F^-]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ๕6

ตารางผนวกที่ ข11 ค่าศักย์ไฟฟ้าของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมฟลูออไรด์

[F ⁻] M	Log [F ⁻]	mV
3×10^{-3}	-2.52	-915.7
5×10^{-3}	-2.3	-912
3×10^{-2}	-1.52	-897.2
5×10^{-2}	-1.3	-889.5
7×10^{-2}	-1.15	-884.4
0.1	-1	-881
0.3	-0.52	-867.7
0.5	-0.3	-864.9
0.7	-0.15	-862.8
1	0	-861.1



ภาพผนวกที่ ข6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [F^-]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมฟลูออไรด์

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ ข12

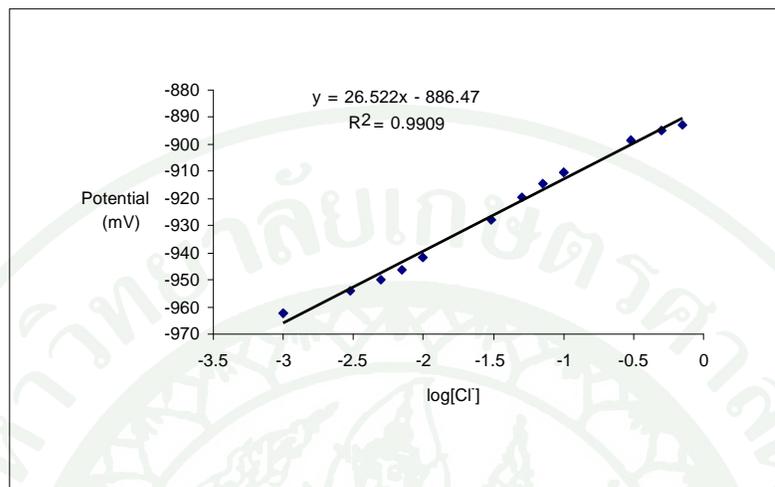
ตารางผนวกที่ ข12 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมฟลูออไรด์

วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.9915	22.98	$3 \times 10^{-3} - 1$
2	0.995	20.67	$5 \times 10^{-4} - 1$
3	0.9928	13.99	$3 \times 10^{-3} - 1$
ค่าเฉลี่ย	0.9931	19.22	-

7.1.7 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคลอไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 59 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ข13 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[Cl^-]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ข7

ตารางผนวกที่ ข13 ค่าศักย์ไฟฟ้าของคลอไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์

$[Cl^-] M$	$\log [Cl^-]$	mV
1×10^{-3}	-3	-962.2
3×10^{-3}	-2.52	-954.3
7×10^{-3}	-2.15	-946.2
5×10^{-2}	-1.3	-919.6
7×10^{-2}	-1.15	-914.5
0.1	-1	-910.2
0.3	-0.52	-898.6
0.5	-0.3	-894.9
0.7	-0.15	-893.1



ภาพผนวกที่ ข7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cl^-]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคลอไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ ข14

ตารางผนวกที่ ข14 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคลอไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์

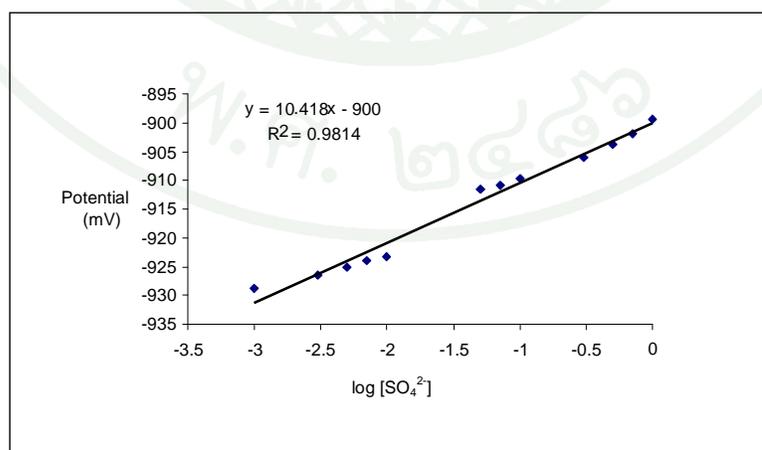
วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.9909	26.52	1×10^{-3} -0.1
2	0.9878	21.64	1×10^{-3} - 0.7
3	0.9858	22.78	1×10^{-4} - 0.5
ค่าเฉลี่ย	0.9881	23.65	-

7.1.8 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลเฟตไอออนในสารละลายซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 29.5 ได้ผลการ

ทดลองดังตารางผนวกที่ ข15 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[\text{SO}_4^{2-}]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ข8

ตารางผนวกที่ ข15 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลเฟตไอออนในสารละลายซิงค์ซัลเฟต

$[\text{SO}_4^{2-}]$ M	$\text{Log} [\text{SO}_4^{2-}]$	mV
1×10^{-3}	-3	-928.8
3×10^{-3}	-2.52	-926.4
5×10^{-3}	-2.3	-925.1
7×10^{-3}	-2.15	-924
1×10^{-2}	-2	-923.3
5×10^{-2}	-1.3	-911.5
7×10^{-2}	-1.15	-910.8
0.1	-1	-909.8
0.3	-0.52	-906.1
0.5	-0.3	-903.7
0.7	-0.15	-901.8
1	0	-899.4



ภาพผนวกที่ ข8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{SO}_4^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลเฟตไอออนในสารละลายซิงค์ซัลเฟต

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ ข16

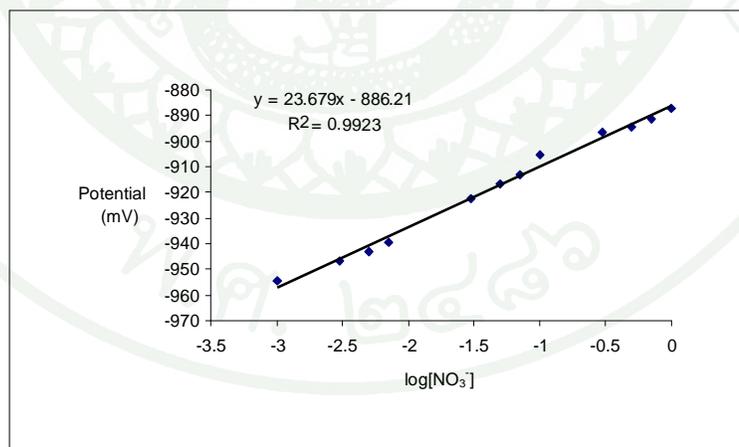
ตารางผนวกที่ ข16 ค่าความชื้นและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลเฟตไอออนในสารละลาย
ซิงค์ซัลเฟต

วัดครั้งที่	R^2	ความชื้น	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.9946	19.14	$1 \times 10^{-3} - 1$
2	0.9878	9.19	$1 \times 10^{-3} - 0.7$
3	0.9814	10.42	$1 \times 10^{-3} - 1$
ค่าเฉลี่ย	.9879	12.92	-

7.1.9 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของไนเตรตไอออนในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต (NH_4NO_3) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชื้นไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 59 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ข17 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[\text{NO}_3^-]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ข9

ตารางผนวกที่ ข17 ค่าศักย์ไฟฟ้าของไนเตรดไอออนในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรด

$[\text{NO}_3^-]$ M	Log $[\text{NO}_3^-]$	mV
1×10^{-3}	-3	-954.7
3×10^{-3}	-2.52	-946.8
5×10^{-3}	-2.3	-942.9
7×10^{-3}	-2.15	-939.7
3×10^{-2}	-1.52	-922.5
5×10^{-2}	-1.3	-916.8
7×10^{-2}	-1.15	-912.9
0.1	-1	-905.6
0.3	-0.52	-896.4
0.5	-0.3	-894.3
0.7	-0.15	-891.3
1	0	-887.4



ภาพผนวกที่ ข9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{NO}_3^-]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของไนเตรดไอออนในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรด

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ ข18

ตารางผนวกที่ ข18 ความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของไนเตรตไอออนในสารละลาย
แอมโมเนียมไนเตรต

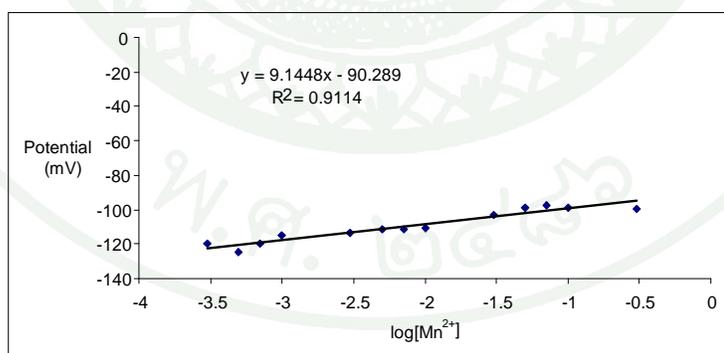
วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.9923	23.68	1×10^{-3} - 1
2	0.9938	21.54	1×10^{-3} - 1
3	0.9921	23.50	1×10^{-3} - 1
ค่าเฉลี่ย	0.9879	22.91	-

7.2 ผลการศึกษาการตอบสนองต่อ ไอออนอื่นๆ (เมื่อใช้สารละลายของไอออนที่ต้องการจะวัดเข้มข้น 0.1 M เป็นอิเล็กโทรไลต์ภายใน)

7.2.1 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแมงกานีสไอออนในสารละลายแมงกานีสคลอไรด์ ($MnCl_2 \cdot 4H_2O$) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 29.5 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ข19 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[Mn^{2+}]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ข10

ตารางผนวกที่ ๑๙ ค่าศักย์ไฟฟ้าของแมงกานีสไอออนในสารละลายแมงกานีสคลอไรด์

$[\text{Mn}^{2+}] \text{ M}$	$\text{Log} [\text{Mn}^{2+}]$	mV
3×10^{-4}	-3.52	-120
5×10^{-4}	-3.3	-125
7×10^{-4}	-3.15	-120.1
1×10^{-3}	-3	-114.6
3×10^{-3}	-2.52	-113.7
5×10^{-3}	-2.3	-111.7
7×10^{-3}	-2.15	-111.2
1×10^{-2}	-2	-110.4
3×10^{-2}	-1.52	-103.2
5×10^{-2}	-1.3	-98.6
7×10^{-2}	-1.15	-97.6
0.1	-1	-98.6
0.3	-0.52	-99.9



ภาพผนวกที่ ๑๐ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{Mn}^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแมงกานีสไอออนในสารละลายแมงกานีสคลอไรด์

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ ข20

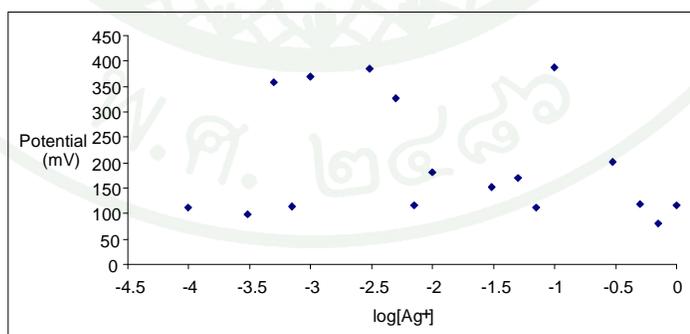
ตารางผนวกที่ ข20 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของแมงกานีสไอออนในสารละลายแมงกานีสคลอไรด์

วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.771	6.23	$1 \times 10^{-3} - 1$
2	0.9587	12.82	$3 \times 10^{-4} - 0.3$
3	0.9114	9.15	$3 \times 10^{-4} - 0.3$
ค่าเฉลี่ย	0.8803	9.40	-

7.2.2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซิลเวอร์ไอออนในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) พบว่ากราฟไม่เป็นเส้นตรงและความชันที่ได้ไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 59 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ข21 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[\text{Ag}^+]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ข11

ตารางผนวกที่ ข21 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อวัดในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด

[Ag ⁺] M	Log [Ag ⁺]*	mV*
1x10 ⁻⁴	-4	112.6
3x10 ⁻⁴	-3.52	98.7
5x10 ⁻⁴	-3.3	358.6
7x10 ⁻⁴	-3.15	113.3
1x10 ⁻³	-3	368.6
3x10 ⁻³	-2.52	384
5x10 ⁻³	-2.3	326
7x10 ⁻³	-2.15	117
1x10 ⁻²	-2	180.9
3x10 ⁻²	-1.52	153
7x10 ⁻²	-1.15	112.5
0.1	-1	386.9
0.3	-0.52	200.7
0.5	-0.3	119.4
0.7	-0.15	80.8



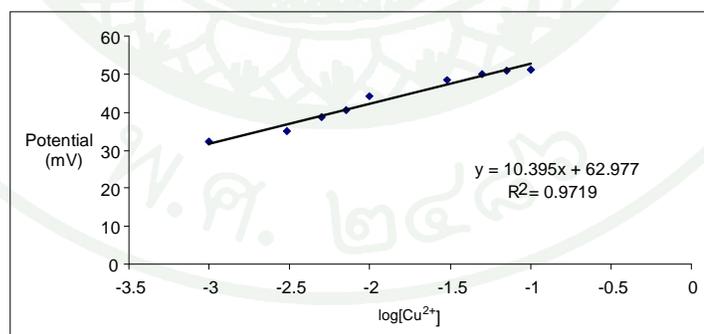
ภาพผนวกที่ ข11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ log [Ag⁺] เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซิลเวอร์ไอออนในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด

* หมายเหตุ; ความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง ไม่สามารถหาความชันได้

7.2.3 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์ ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 29.5 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ข22 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[\text{Cu}^{2+}]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ข12

ตารางผนวกที่ ข22 ค่าศักย์ไฟฟ้าของคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์

$[\text{Cu}^{2+}] \text{ M}$	$\text{Log} [\text{Cu}^{2+}]$	mV
1×10^{-3}	-3	32.2
3×10^{-3}	-2.52	35
5×10^{-3}	-2.3	38.6
7×10^{-3}	-2.15	40.4
1×10^{-2}	-2	44.2
3×10^{-2}	-1.52	48.4
5×10^{-2}	-1.3	49.9
7×10^{-2}	-1.15	50.9
0.1	-1	51.1



ภาพผนวกที่ ข12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{Cu}^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ ข23

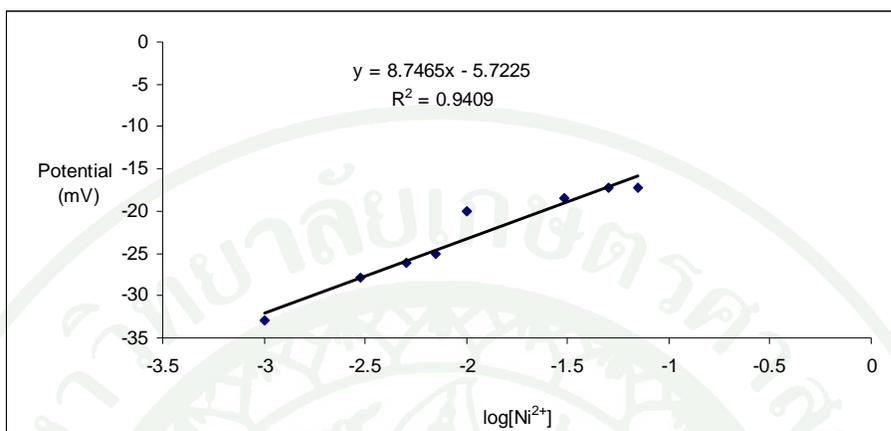
ตารางผนวกที่ ข23 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์

วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.975	13.15	$3 \times 10^{-4} - 0.1$
2	0.9719	10.40	$1 \times 10^{-3} - 0.1$
3	0.9776	13.01	$3 \times 10^{-4} - 0.1$
ค่าเฉลี่ย	0.9748	12.18	-

7.2.4 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลไอออนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์ ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 29.5 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ข24 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[\text{Ni}^{2+}]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ข13

ตารางผนวกที่ ข24 ค่าศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลไอออนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์

$[\text{Ni}^{2+}] \text{ M}$	$\text{Log} [\text{Ni}^{2+}]$	mV
1×10^{-3}	-3	-32.9
3×10^{-3}	-2.52	-27.9
5×10^{-3}	-2.3	-26.2
7×10^{-3}	-2.15	-25
1×10^{-2}	-2	-20.1
3×10^{-2}	-1.52	-18.5
5×10^{-2}	-1.3	-17.3
7×10^{-2}	-1.15	-17.3



ภาพผนวกที่ ข13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Ni^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลไอออนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ ข25

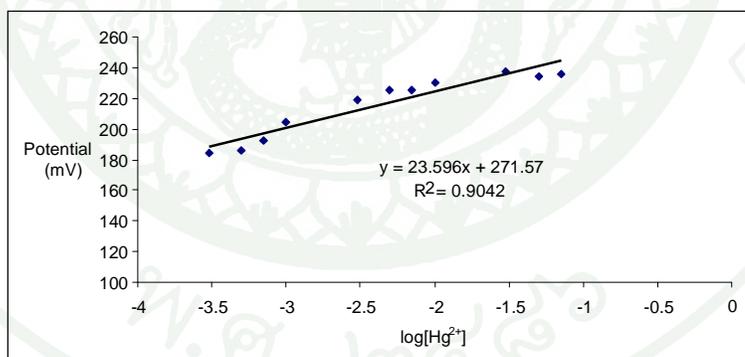
ตารางผนวกที่ ข25 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลไอออนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์

วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.9907	27.19	1×10^{-4} -0.1
2	0.9409	8.75	1×10^{-3} - 7×10^{-2}
3	0.886	8.08	1×10^{-3} - 0.1
ค่าเฉลี่ย	0.9392	14.67	-

7.2.5 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเมอคิวรีไอออนในสารละลายเมอคิวรีไนเตรต ($Hg(NO_3)_2$) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 29.5 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ข26 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[Hg^{2+}]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ข14

ตารางผนวกที่ ข26 ค่าศักย์ไฟฟ้าของเมอคิวรีไอออนในสารละลายเมอคิวรีไนเตรต

$[\text{Hg}^{2+}] \text{ M}$	$\text{Log} [\text{Hg}^{2+}]$	mV
3×10^{-4}	-3.52	184.6
5×10^{-4}	-3.3	185.9
7×10^{-4}	-3.15	192.5
1×10^{-3}	-3	204.8
3×10^{-3}	-2.52	218.8
5×10^{-3}	-2.3	225.5
7×10^{-3}	-2.15	225.7
1×10^{-2}	-2	230.3
3×10^{-2}	-1.52	237.2
5×10^{-2}	-1.3	234.6
7×10^{-2}	-1.15	236



ภาพผนวกที่ ข14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\text{log} [\text{Hg}^{2+}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเมอคิวรีไอออนในสารละลายเมอคิวรีไนเตรต

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ ข27

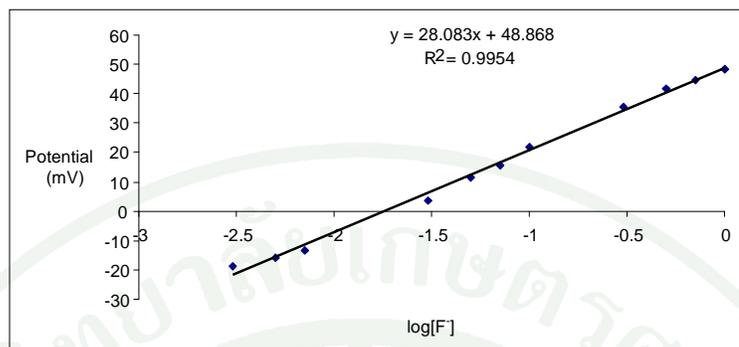
ตารางผนวกที่ ข27 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเมอคิวรีไอออนในสารละลาย
เมอคิวรีในเทรต

วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.9042	23.60	3×10^{-4} - 7×10^{-2}
2	0.9345	24.60	3×10^{-4} - 5×10^{-2}
3	0.9788	16.48	1×10^{-4} - 0.1
ค่าเฉลี่ย	0.9391	21.56	-

7.2.6 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมฟลูออไรด์ (KF) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 59 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ข28 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[F^-]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ข15

ตารางผนวกที่ ข28 ค่าศักย์ไฟฟ้าของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมฟลูออไรด์

[F ⁻] M	Log [F ⁻]	mV
3×10^{-3}	-2.52	-18.6
5×10^{-3}	-2.3	-16
7×10^{-3}	-2.15	-13.3
3×10^{-2}	-1.52	3.4
5×10^{-2}	-1.3	11.6
7×10^{-2}	-1.15	15.8
0.1	-1	22
0.3	-0.52	35.6
0.5	-0.3	41.7
0.7	-0.15	44.6
1	0	48.2



ภาพผนวกที่ ข15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [F^-]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมฟลูออไรด์

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ ข29

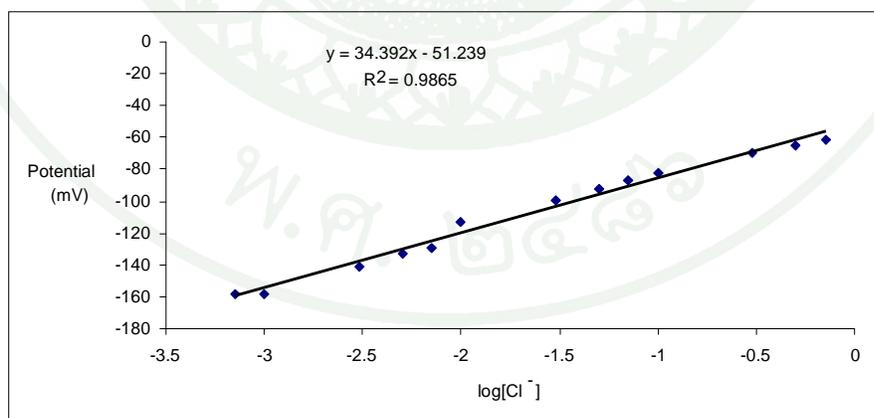
ตารางผนวกที่ ข29 ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมฟลูออไรด์

วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.9932	26.04	$1 \times 10^{-3} - 1$
2	0.9924	30.63	$3 \times 10^{-3} - 1$
3	0.9954	28.08	$3 \times 10^{-3} - 1$
ค่าเฉลี่ย	0.9938	28.25	-

7.2.7 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคลอไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 59 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ข30 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [Cl^-]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ข16

ตารางผนวกที่ 30 ค่าศักย์ไฟฟ้าของคลอไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์

[Cl ⁻] M	Log [Cl ⁻]	mV
7x10 ⁻⁴	-3.15	-158.1
1x10 ⁻³	-3	-158.3
3x10 ⁻³	-2.52	-141.2
5x10 ⁻³	-2.3	-133
7x10 ⁻³	-2.15	-129.2
1x10 ⁻²	-2	-112.8
3x10 ⁻²	-1.52	-99.7
5x10 ⁻²	-1.3	-92.3
7x10 ⁻²	-1.15	-87.2
0.1	-1	-82.7
0.3	-0.52	-69.6
0.5	-0.3	-64.7
0.7	-0.15	-61.6



ภาพผนวกที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ log [Cl⁻] เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคลอไรด์ไอออนในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ 31

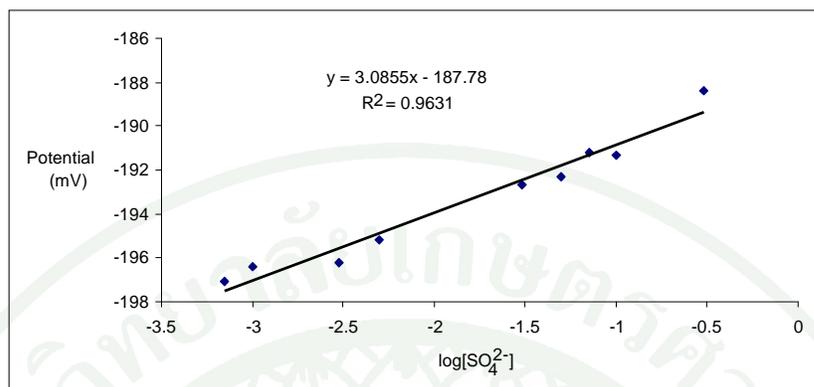
ตารางผนวกที่ ข31 ความชันและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของคลอไรด์ไอออนในสารละลาย
โพแทสเซียมคลอไรด์

วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.9903	38.35	3×10^{-4} - 1
2	0.9905	37.93	3×10^{-4} - 0.5
3	0.9865	34.39	1×10^{-3} - 0.1
ค่าเฉลี่ย	0.9891	36.89	-

7.2.8 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลเฟตไอออนในสารละลายซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนิร์นสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 29.5 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ข32 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[SO_4^{2-}]$ จะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ข17

ตารางผนวกที่ ข32 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ของซัลเฟตไอออนในสารละลายซิงค์ซัลเฟต

$[SO_4^{2-}]$ M	$\log [SO_4^{2-}]$	mV
7×10^{-4}	-3.15	-197.1
1×10^{-3}	-3	-196.4
3×10^{-3}	-2.52	-196.2
5×10^{-3}	-2.3	-195.2
3×10^{-2}	-1.52	-192.7
5×10^{-2}	-1.3	-192.3
7×10^{-2}	-1.15	-191.2
0.1	-1	-191.3
0.3	-0.52	-188.4



ภาพผนวกที่ ๑๗ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{SO}_4^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลเฟตไอออนในสารละลายซิงค์ซัลเฟต

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ ๑๓๓

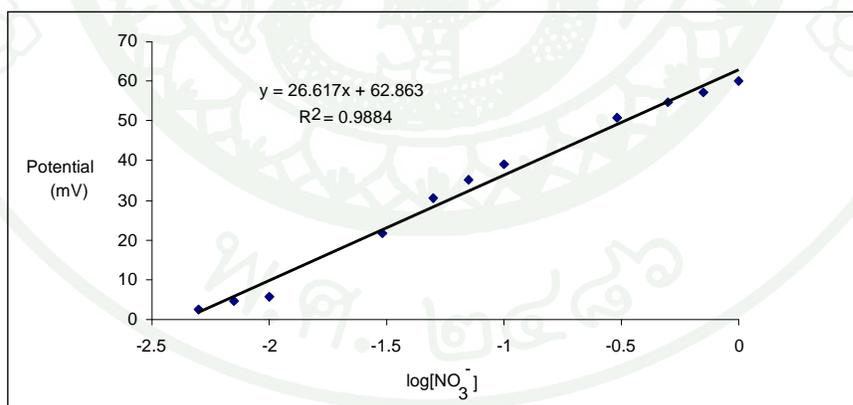
ตารางผนวกที่ ๑๓๓ ค่าความชันและ R^2 เมื่อวัดในสารละลายซิงค์ซัลเฟต ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

วัดครั้งที่	R^2	ความชัน	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.9884	9.68	1.9264
2	0.9631	3.09	$7 \times 10^{-4} - 0.3$
3	0.9676	2.69	$1 \times 10^{-3} - 0.1$
ค่าเฉลี่ย	0.973	1.93	-

7.2.9 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของไนเตรตไอออนในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรด (NH_4NO_3) พบว่าได้กราฟเส้นตรงแต่ความชันไม่เป็นไปตามสมการเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าเท่ากับ 59 ได้ผลการทดลองดังตารางผนวกที่ ๑๓๔ และเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[\text{NO}_3^-]$ จะได้กราฟดังภาพที่ผนวก ๑๑๘

ตารางผนวกที่ 34 ค่าศักย์ไฟฟ้าของไนเตรตไอออนในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต

[NO ₃ ⁻] M	Log [NO ₃ ⁻]	mV
5x10 ⁻³	-2.3	2.4
7x10 ⁻³	-2.15	4.5
1x10 ⁻²	-2	5.6
3x10 ⁻²	-1.52	21.7
5x10 ⁻²	-1.3	30.4
7x10 ⁻²	-1.15	35.3
0.1	-1	39.2
0.3	-0.52	50.7
0.5	-0.3	54.7
0.7	-0.15	57.3
1	0	59.9



ภาพผนวกที่ 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [\text{NO}_3^-]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของไนเตรตไอออนในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต

จากการทดลองวัด 3 ครั้ง ได้ผลทดลองดังตารางผนวกที่ 35

ตารางผนวกที่ ข35 ค่าความชื้นและ R^2 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของไนเตรตไอออนในสารละลาย
แอมโมเนียมไนเตรต

วัดครั้งที่	R^2	ความชื้น	ช่วงความเข้มข้น (M)
1	0.9869	32.82	1×10^{-3} -0.5
2	0.9941	25.06	7×10^{-4} -0.1
3	0.9884	26.62	5×10^{-3} - 1
ค่าเฉลี่ย	0.9898	1.93	-



ภาคผนวก ข

กราฟและผลการทดลอง เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติด้วยวิธี
วัดโดยสร้างกราฟมาตรฐานและวิธีเติมสารมาตรฐาน

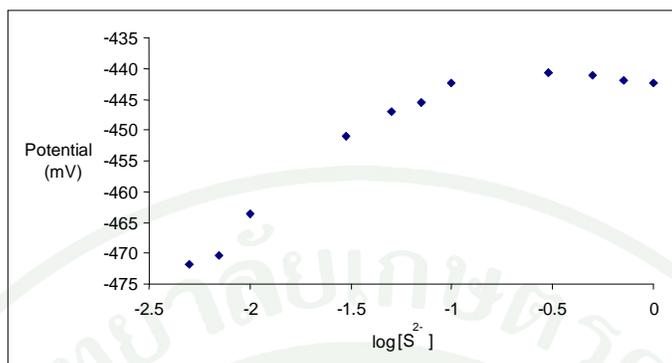
8. ผลการทดลองใช้ขั้วไฟฟ้าวัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำธรรมชาติ

8.1 ผลการวัดโดยตรงจากกราฟมาตรฐาน (calibration curve method)

8.1.1 เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน วัดครั้งที่ 1

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

$[S^{2-}]$ M	Log $[S^{2-}]$	mV
5×10^{-3}	-2.3	-471.8
7×10^{-3}	-2.15	-470.4
1×10^{-2}	-2	-463.7
3×10^{-2}	-1.52	-450.9
5×10^{-2}	-1.3	-446.9
7×10^{-2}	-1.15	-445.5
0.1	-1	-442.3
0.3	-0.52	-440.6
0.5	-0.3	-441.1
0.7	-0.15	-442
1	0	-442.3

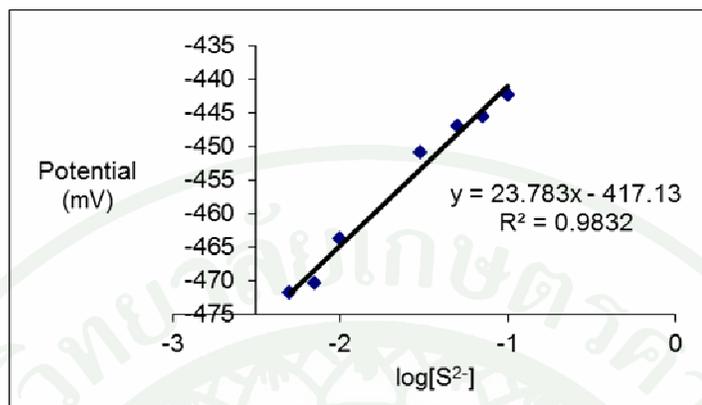


ภาพผนวกที่ ข1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ
เซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

8.1.2 วัดศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำธรรมชาติเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อหาความ
เข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้า
วัดตัวอย่างน้ำธรรมชาติเทียบกับกราฟมาตรฐาน แสดงดังตารางผนวกที่ ข2

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดตัวอย่างน้ำธรรมชาติเทียบกับ
กราฟมาตรฐาน

$[S^{2-}] M$	$\text{Log } [S^{2-}]$	mV	mV ของน้ำธรรมชาติ
5×10^{-3}	-2.3	-471.8	-444.1
7×10^{-3}	-2.15	-470.4	-450.3
1×10^{-2}	-2	-463.7	-450.4
3×10^{-2}	-1.52	-450.9	
5×10^{-2}	-1.3	-446.9	
7×10^{-2}	-1.15	-445.5	
0.1	-1	-442.3	



ภาพผนวกที่ ๗2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[S^2]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

จากกราฟมาตรฐาน พบว่าความชันมีค่าเท่ากับ 23.783 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำธรรมชาติ 3 ครั้ง โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานแล้วหาค่าเฉลี่ย พบว่าความเข้มข้นของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 4.8×10^{-2} M แสดงดังตารางผนวกที่ ๗3

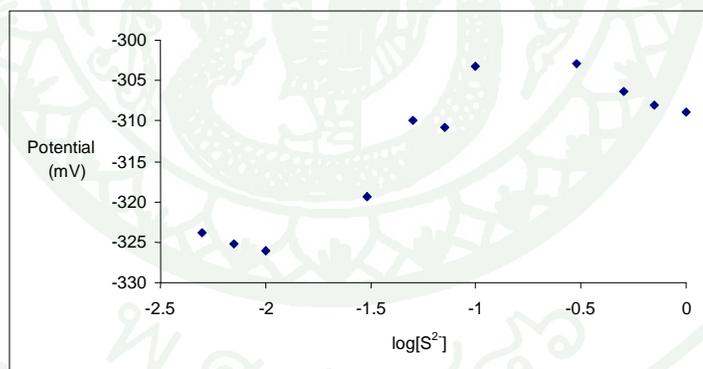
ตารางผนวกที่ ๗3 ความเข้มข้นของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐาน

วัดครั้งที่	mV ของตัวอย่างน้ำธรรมชาติ	ความเข้มข้นของเซลล์ไฟฟ้าไอออน (M)
1	-444.1	7.1×10^{-2}
2	-450.3	3.8×10^{-2}
3	-450.4	3.7×10^{-2}
ค่าเฉลี่ย	-448.3	4.8×10^{-2}

8.1.3 เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน วัดครั้งที่ 2

ตารางที่ผนวก ข4 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

$[S^{2-}]$ M	$\text{Log } [S^{2-}]$	mV
5×10^{-3}	-2.3	-323.8
7×10^{-3}	-2.15	-325.2
1×10^{-2}	-2	-326
3×10^{-2}	-1.52	-319.3
5×10^{-2}	-1.3	-309.9
7×10^{-2}	-1.15	-310.8
0.1	-1	-303.2
0.3	-0.52	-302.9
0.5	-0.3	-306.3
0.7	-0.15	-308.1
1	0	-308.9

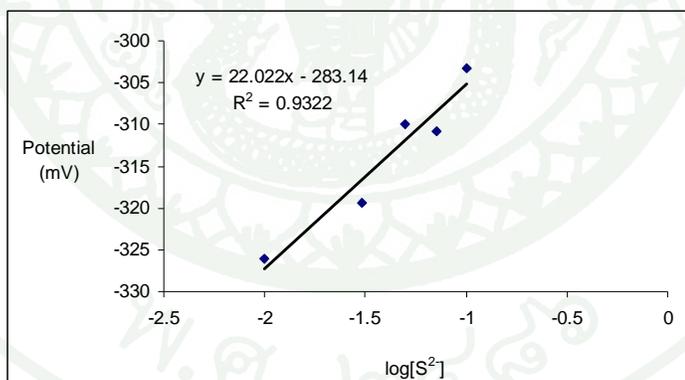


ภาพผนวกที่ ข3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\text{log } [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ ๕5 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดตัวอย่างน้ำธรรมชาติเทียบกับกราฟมาตรฐาน

$[S^{2-}]$ M	Log $[S^{2-}]$	mV	mV ของน้ำธรรมชาติ
1×10^{-2}	-2	-326	-311.8
3×10^{-2}	-1.52	-319.3	-314
5×10^{-2}	-1.3	-309.9	-317.6
7×10^{-2}	-1.15	-310.8	
0.1	-1	-303.2	

8.1.4 วัดศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำธรรมชาติเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อหาความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดตัวอย่างน้ำธรรมชาติเทียบกับกราฟมาตรฐาน แสดงดังตารางผนวกที่



ภาพผนวกที่ ๕4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

จากกราฟมาตรฐาน พบว่าความชันมีค่าเท่ากับ 22.022 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำ
ธรรมชาติ 3 ครั้ง โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานแล้วหาค่าเฉลี่ย พบว่าความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน
ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 3.9×10^{-2} M แสดงดังตารางผนวกที่ ๗6

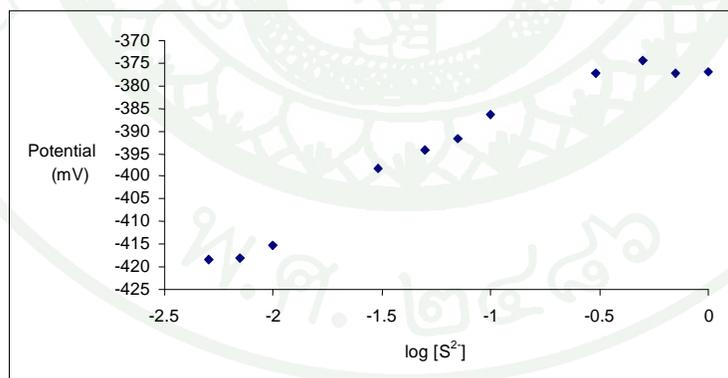
ตารางผนวกที่ ๗6 ความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อเทียบกับ
กราฟมาตรฐาน

วัดครั้งที่	mV ของตัวอย่างน้ำธรรมชาติ	ความเข้มข้นของซัลไฟด์ ไอออน (M)
1	-311.8	5×10^{-2}
2	-314	3.9×10^{-2}
3	-317.6	2.8×10^{-2}
ค่าเฉลี่ย	-314.5	3.9×10^{-2}

8.1.5 เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์
เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน วัดครั้งที่ 3

ตารางผนวกที่ ๗7 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

$[S^{2-}] M$	$\text{Log } [S^{2-}]$	mV
5×10^{-3}	-2.3	-418.3
7×10^{-3}	-2.15	-418.1
1×10^{-2}	-2	-415.2
3×10^{-2}	-1.52	-398.3
5×10^{-2}	-1.3	-394.1
7×10^{-2}	-1.15	-391.8
0.1	-1	-386.2
0.3	-0.52	-377.1
0.5	-0.3	-374.4
0.7	-0.15	-377.3
1	0	-376.9

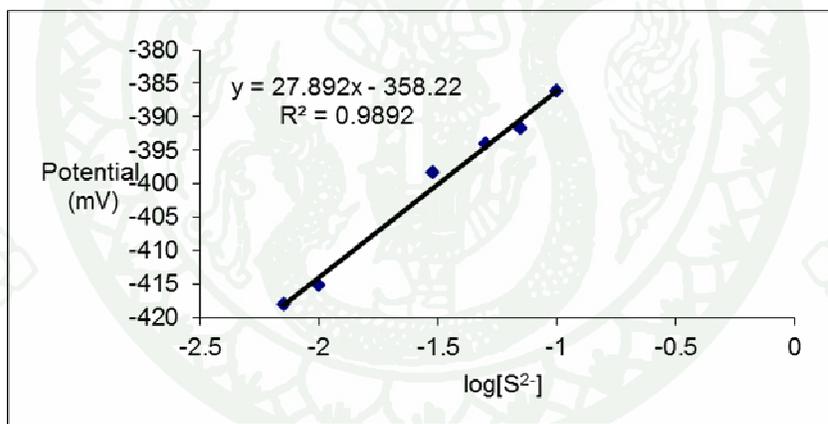


ภาพผนวกที่ ๗5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

8.1.6 วัดศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำธรรมชาติเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อหาความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดตัวอย่างน้ำธรรมชาติเทียบกับกราฟมาตรฐาน แสดงดังตารางผนวกที่ ๗8

ตารางผนวกที่ ๗8 ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าไอออนเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดตัวอย่างน้ำธรรมชาติเทียบกับ
กราฟมาตรฐาน

$[S^{2-}]$ M	$\text{Log}[S^{2-}]$	mV	mV ของน้ำธรรมชาติ
7×10^{-3}	-2.15	-418.1	-385.7
1×10^{-2}	-2	-415.2	-393.7
3×10^{-2}	-1.52	-398.3	-392
5×10^{-2}	-1.3	-394.1	
7×10^{-2}	-1.15	-391.8	
0.1	-1	-386.2	



ภาพผนวกที่ ๗6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log[S^{2-}]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของ
ขั้วไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

จากกราฟมาตรฐาน พบว่าความชันมีค่าเท่ากับ 27.892 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำ
ธรรมชาติ 3 ครั้ง โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานแล้วหาค่าเฉลี่ย พบว่าความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน
ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 6.5×10^{-2} M แสดงดังตารางผนวกที่ ๗9

ตารางผนวกที่ ๙ ความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อเทียบกับ
กราฟมาตรฐาน

วัดครั้งที่	mV ของตัวอย่างน้ำธรรมชาติ	ความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน (M)
1	-385.7	0.1
2	-393.7	4.7×10^{-2}
3	-392	5×10^{-2}
ค่าเฉลี่ย	-390.5	6.5×10^{-2}

8.2 ผลการวัดโดยวิธีเติมสารมาตรฐาน (standard addition method)

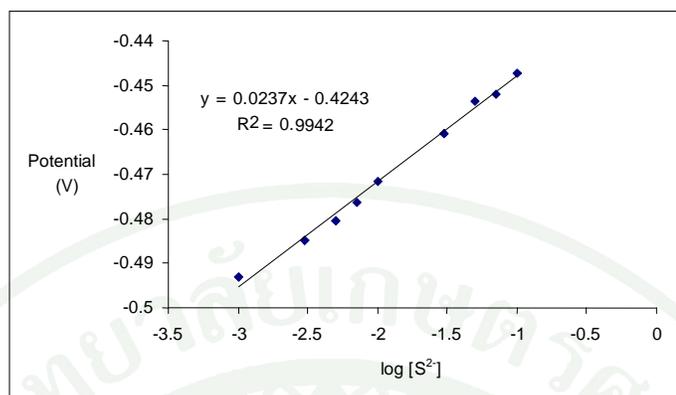
นำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นมาวัดปริมาณซัลไฟด์ไอออนในน้ำธรรมชาติ ซึ่งเก็บจากแหล่งน้ำ
ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนพบว่าให้ผลดังนี้

วัดครั้งที่ 1

8.2.1 วัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานเพื่อหาความชัน

ตารางผนวกที่ ๑๐ ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

$[S^{2-}]$ M	$\text{Log } [S^{2-}]$	E
1×10^{-3}	-3	-0.4932
3×10^{-3}	-2.52	-0.4849
7×10^{-3}	-2.15	-0.4764
1×10^{-2}	-2	-0.4716
3×10^{-2}	-1.52	-0.4608
5×10^{-2}	-1.3	-0.4537
7×10^{-2}	-1.15	-0.452
0.1	-1	-0.4473



ภาพผนวกที่ ๗7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^2]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

จากกราฟมาตรฐาน ค่าความชัน (slope, S) มีค่าเท่ากับ 0.0237 เมื่อศักย์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

8.2.2 วัดศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำธรรมชาติและคำนวณค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ เมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน Na_2S เข้มข้น 0.5 M ที่ปริมาตรต่างกัน

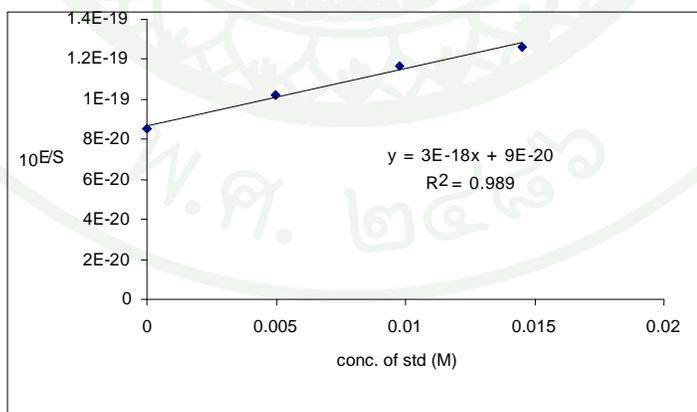
ตารางผนวกที่ ๗11 ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ ของตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน Na_2S เข้มข้น 0.5 M

เติม Na_2S 0.5 M (ml)	E of B _s	$\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$
0	-0.4519	8.560×10^{-20}
0.2	-0.4501	1.019×10^{-19}
0.4	-0.4487	1.168×10^{-19}
0.6	-0.4479	1.262×10^{-19}
0.8	-0.4484	1.2028×10^{-19}

8.2.3 พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมกับ $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ เพื่อหาความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ ค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม (M) กับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ แสดงดังตารางผนวกที่ ซ8 และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม (M) กับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ แสดงในภาพผนวกที่ ซ8

ตารางผนวกที่ ซ12 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม (M) กับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม (M)	$\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$
0	8.56E-20
0.00495	1.019E-19
0.0098	1.168E-19
0.0145	1.262E-19



ภาพผนวกที่ ซ8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงในตัวอย่างน้ำธรรมชาติกับ $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$

จากสมการเส้นตรง $y = 3E-18x + 9E-20$ หรือ $y = 3 \cdot 10^{-18}x + 9 \cdot 10^{-20}$ เมื่อแทน $y = 0$ สามารถคำนวณหาค่า x ได้ คือ

$$x = \left(\frac{9 \times 10^{-20}}{3 \times 10^{-18}} \right)$$

$$x = 3 \times 10^{-2}$$

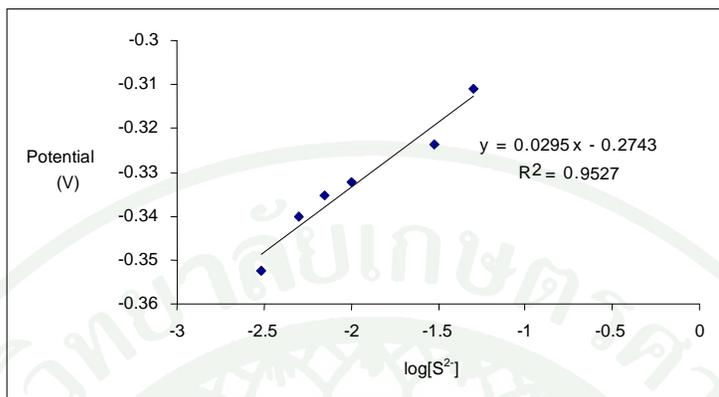
เพราะฉะนั้นปริมาณซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อวัดด้วยวิธีเติมสารมาตรฐานจะมีค่าเท่ากับ 3×10^{-2} M

วัดครั้งที่ 2

8.2.4 วัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้น

ตารางผนวกที่ ข13 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

$[S^{2-}]$ M	Log $[S^{2-}]$	E
3×10^{-3}	-2.52	-0.3523
5×10^{-3}	-2.3	-0.34
7×10^{-3}	-2.15	-0.3352
1×10^{-2}	-2	-0.3323
3×10^{-2}	-1.52	-0.3235
5×10^{-2}	-1.3	-0.3109



ภาพผนวกที่ ๙9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^2]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟต์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

จากกราฟมาตรฐาน ค่าความชัน (slope, S) มีค่าเท่ากับ 0.0295 เมื่อศักย์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

8.2.5 วัดศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำธรรมชาติและคำนวณหาค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ เมื่อเติม

สารละลายมาตรฐาน Na_2S เข้มข้น 0.5 M ที่ปริมาตรต่างกัน

ตารางผนวกที่ ๑๔ ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ ของตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อเติม

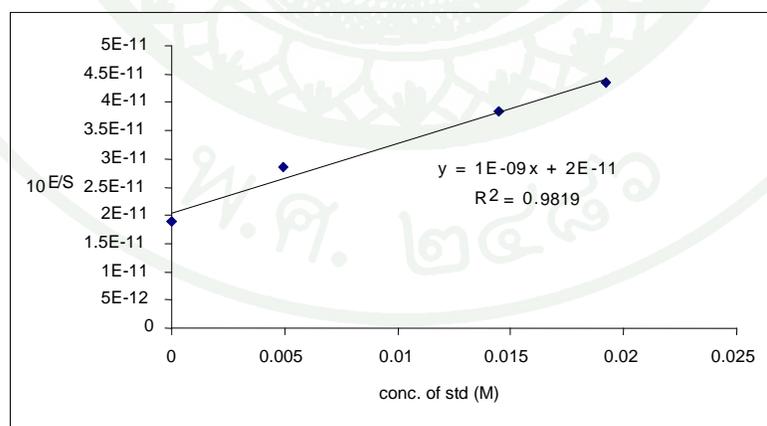
สารละลายมาตรฐาน Na_2S เข้มข้น 0.5 M

เติม Na_2S 0.5 M (ml)	E of B ₅	$\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$
0	-0.3163	1.896×10^{-11}
0.2	-0.3111	2.846×10^{-11}
0.4	-0.3072	3.859×10^{-11}
0.6	-0.3037	3.829×10^{-11}
0.8	-0.3057	4.338×10^{-11}

8.2.6 พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมกับ $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ เพื่อหาความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ ค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม (M) กับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ แสดงดังตารางผนวกที่ ๑15 และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม (M) กับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ แสดงในภาพผนวกที่ ๑10

ตารางผนวกที่ ๑15 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม (M) กับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม (M)	$\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$
0	1.896E-11
0.00495	2.846E-11
0.0145	3.829E-11
0.0192	4.338E-11



ภาพผนวกที่ ๑10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงในตัวอย่างน้ำธรรมชาติกับ $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$

จากสมการเส้นตรง $y = 1E-09x + 2E-11$ หรือ $y = 1 \cdot 10^{-9}x + 2 \cdot 10^{-11}$ เมื่อแทน $y = 0$ สามารถคำนวณหาค่า x ได้ คือ

$$x = \left(\frac{2 \times 10^{-11}}{1 \times 10^{-9}} \right)$$

$$x = 2 \times 10^{-2}$$

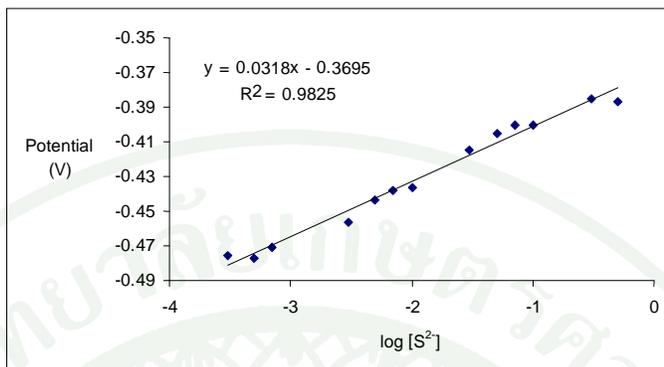
เพราะฉะนั้นปริมาณซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อวัดด้วยวิธีเติมสารมาตรฐานจะมีค่าเท่ากับ 2×10^{-2} M

วัดครั้งที่ 3

8.2.7 วัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้น

ตารางผนวกที่ 16 ค่าศักย์ไฟฟ้าของซัลไฟด์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

$[S^{2-}]$ M	Log $[S^{2-}]$	E
3×10^{-4}	-3.52	-0.4756
7×10^{-4}	-3.15	-0.4705
3×10^{-3}	-2.52	-0.456
5×10^{-3}	-2.3	-0.4434
7×10^{-3}	-2.15	-0.4383
1×10^{-2}	-2	-0.4363
3×10^{-2}	-1.52	-0.4144
7×10^{-2}	-1.15	-0.4003
0.1	-1	-0.4
0.3	-0.52	-0.3849
0.5	-0.3	-0.3869



ภาพผนวกที่ ข11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log [S^2]$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟต์ไอออนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

จากกราฟมาตรฐาน ค่าความชัน (slope, S) มีค่าเท่ากับ 0.0318 เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

8.2.8 วัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟต์ไอออนและคำนวณหาค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ ของตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน Na_2S เข้มข้น 0.5 M ที่ปริมาตรต่างกัน

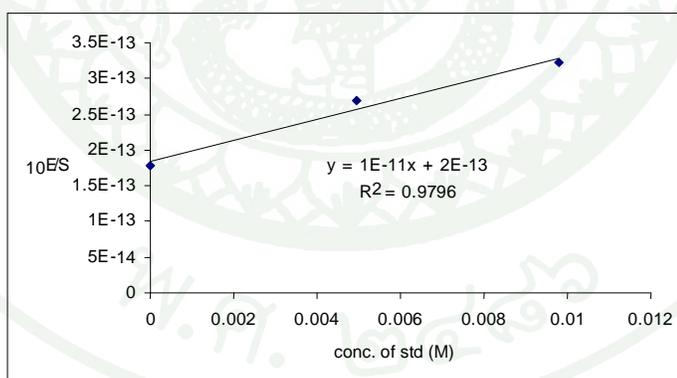
ตารางผนวกที่ ข17 ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ ของตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน Na_2S เข้มข้น 0.5 M

เติม Na_2S 0.5 M (ml)	E of B_5	$\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$
0	-0.4055	1.77×10^{-13}
0.2	-0.3998	2.69×10^{-13}
0.4	0.3973	3.23×10^{-13}
0.6	-0.3980	2.95×10^{-13}
0.8	-0.3988	2.88×10^{-13}

8.2.9 พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมกับ $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ เพื่อหาความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ ค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม (M) กับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ แสดงดังตารางผนวกที่ ซ17 และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม (M) กับค่า $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$ แสดงในภาพผนวกที่ ซ12

ตารางผนวกที่ ซ18 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมกับ $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม (M)	$\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$
0	1.77×10^{-13}
0.00495	2.69×10^{-13}
0.0098	3.23×10^{-13}



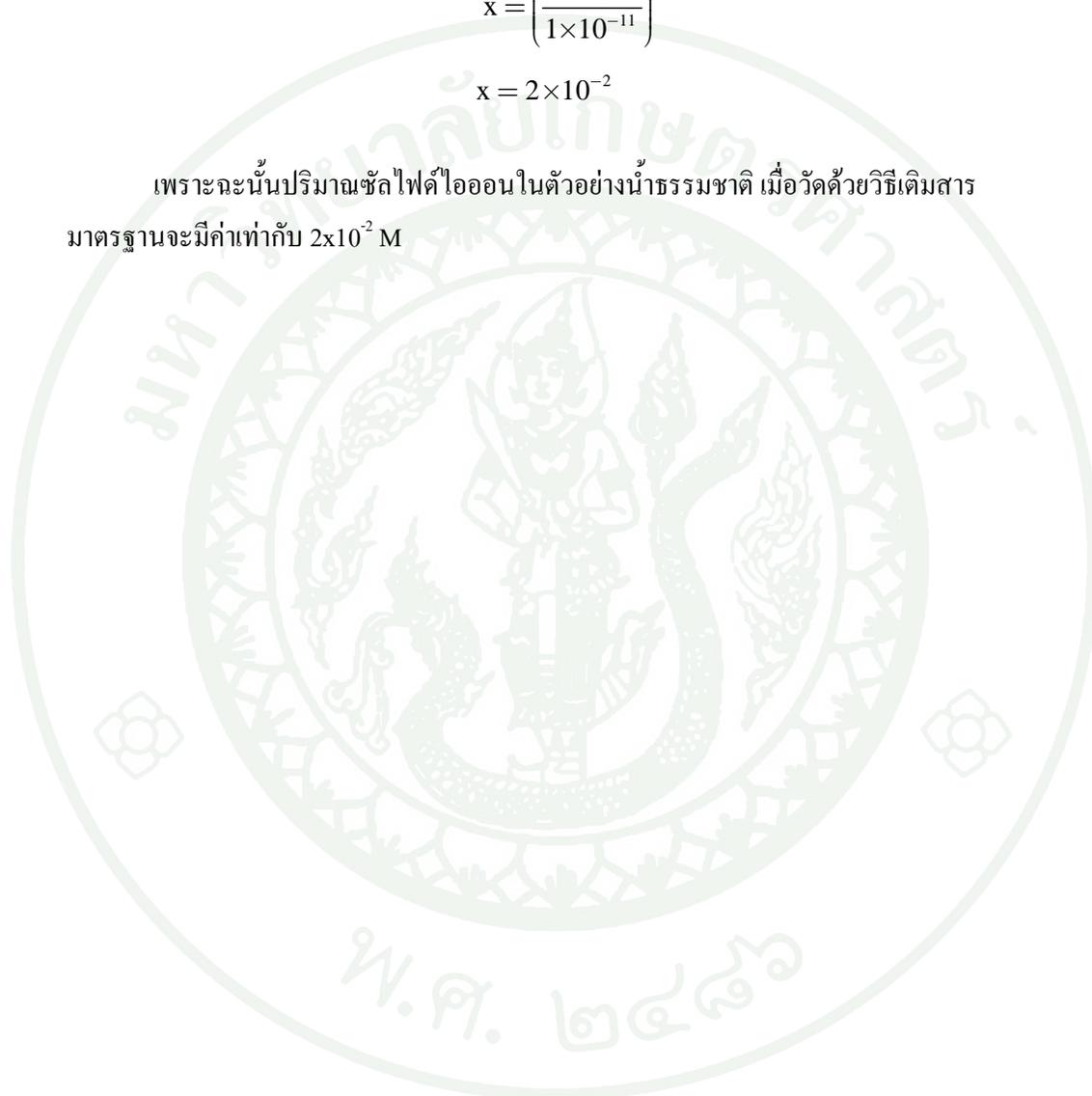
ภาพที่ผนวก ซ12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงในตัวอย่างน้ำธรรมชาติกับ $\text{antilog} \frac{E_{\text{cell}}}{S}$

จากสมการเส้นตรง $y = 1E-11x + 2E-13$ หรือ $y = 1 \cdot 10^{-11}x + 2 \cdot 10^{-13}$ เมื่อแทน $y = 0$
สามารถคำนวณหาค่า x ได้ คือ

$$x = \left(\frac{2 \times 10^{-13}}{1 \times 10^{-11}} \right)$$

$$x = 2 \times 10^{-2}$$

เพราะฉะนั้นปริมาณเซลล์ไฟโตไอออนในตัวอย่งน้ำธรรมชาติ เมื่อวัดด้วยวิธีเดิมสาร
มาตรฐานจะมีค่าเท่ากับ 2×10^{-2} M



ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นางสาวเขมาวดี อุดมพันธ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 16 มิถุนายน 2529
สถานที่เกิด	อ. เมือง จ. ขอนแก่น
ประวัติการศึกษา	วท.บ. เคมี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นิสิตระดับปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	รางวัลนำเสนอผลงานดีเยี่ยม (ภาคบรรยาย) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ประจำปีการศึกษา 2553 ได้รับทุนวิจัยจากศูนย์นาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์