

การพัฒนาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง

DEVELOPMENT OF SOLID-STATE MEMBRANE LEAD  
ION-SELECTIVE ELECTRODES

ปราณี ศรีกอบัว  
PRANEE SRIGOBUE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำรงหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการศึกษาวิทยาศาสตร์ (เคมี)

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-103-5

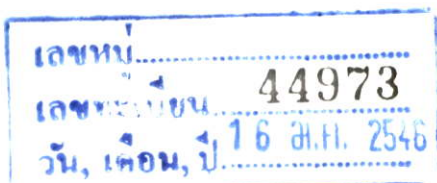
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง

DEVELOPMENT OF SOLID-STATE MEMBRANE LEAD  
ION-SELECTIVE ELECTRODES

ปราณี ศรีกอบัว

PRANEE SRIGOBUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการศึกษาศาสตร์(เคมี)

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-103-5

**DEVELOPMENT OF SOLID-STATE MEMBRANE LEAD  
ION-SELECTIVE ELECTRODES**

**PRANEE SRIGOBUE**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE  
IN SCIENCE OF EDUCATION(CHEMISTRY)  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2002**

**ISBN 974-324-103-5**

**COPYRIGHT 2002**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง
นักศึกษา	นางสาวปราณี ศรีกอบัว
รหัสประจำตัว	39064234
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	การศึกษาวิทยาศาสตร์ (เคมี)
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.เพชฌัญชัช ไชยสิทธิ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง ซึ่งแผ่นเยื่อเตรียมได้จากการตกตะกอนร่วมของ  $Ag_2S$  กับ  $PbS$  ในอัตราส่วน 1: 1 แล้วนำตะกอนมาอัดให้แน่นเป็นแผ่นเยื่อด้วยเครื่องอัด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร และศึกษาเวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้า ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ ช่วงความเป็นกรด-เบสของสารละลายที่มีผลต่อการทำงานของขั้วไฟฟ้า และอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า

จากการทดสอบสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็งปรากฏว่า ให้ค่าความชันตามสมการของเนินสต์เท่ากับ  $30.51 \text{ mV/decade}$  ในช่วงความเข้มข้น  $10^{-4}$ – $10^{-1} \text{ mol/l}$  ของ  $Pb^{2+}$  ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ  $10^{-4} \text{ mol/l}$  ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการวัดศักย์ไฟฟ้า อยู่ในช่วง 3 ถึง 8 เวลาการตอบสนองน้อยกว่า 1 นาที ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วเมื่อมีไอออนทองแดง และแคดเมียมเป็นไอออนรบกวนเท่ากับ 0.34 และ 0.75 ตามลำดับ แสดงว่าขั้วไฟฟ้ามีการตอบสนองต่อไอออนตะกั่วเป็นส่วนใหญ่ และขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมีอายุการใช้งานประมาณ 3 สัปดาห์

Thesis Title	Development of Solid- State Membrane Lead Ion- Selective Electrodes
Student	Miss Pranee Srigobue
Student ID.	39064234
Degree	Master of Science
Programme	Science of Education (Chemistry)
Year	2002
Thesis Advisor	Asst. Prof.Dr.Suwan Chaiyasith
Thesis Co-advisor	Asst. Prof.Dr.Pachernchai Chaiyasith

### ABSTRACT

In this work solid-state membrane lead ion selective electrodes were developed. The solid-state membranes were prepared by coprecipitation of silver sulfide and lead sulfide in the ratio of 1:1 and pressed in KBr die with a 13 mm diameter plunger. Nernstian slope, detection limit, selectivity coefficient, pH range, response time and lifetime of electrodes were determined.

From the studies it was found that the solid-state membrane lead ion selective electrodes gave linear response with Nernstian slope of 30.51 mV per decade within the concentration range  $10^{-4}$  -  $10^{-1}$  mol/l  $Pb^{2+}$ , detection limit was  $10^{-4}$  mol/l, pH range 3-8 and response time less than 1 minute. For interfering ions  $Cu^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  the selectivity coefficient of  $Pb^{2+}$  ion were 0.34 and 0.75 respectively. The lifetime of the electrodes was found to be three weeks.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญชัย ไชยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการวิจัย และการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.รวิวรรณ ชินะตระกูล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรณี ลีกิจวัฒน์ และ รองศาสตราจารย์อรุณี คงศักดิ์ไพศาล ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ ในการทำการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ประพจน์ จิระสกุลพร ที่ให้ความอนุเคราะห์คอมพิวเตอร์ใช้ในวันสอบ วิทยานิพนธ์ขั้นสุดท้าย

ขอขอบคุณ อาจารย์บุญชู สมบุญเพ็ญ อาจารย์ชัยพฤกษ์ อภาเวท และอาจารย์ประยูร สุรินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์บางส่วนในการทำการวิจัย

ขอขอบคุณ พี่อภิญญา เทพรักษา น้องเพียงพิศ วงศ์มณีนิล ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานสถาบัน เทคโนโลยีปทุมวัน และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือจนผู้วิจัยสามารถทำงานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ประโยชน์และคุณค่าอันพึงมีของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขออุทิศให้แก่ผู้มีพระคุณต่อผู้วิจัย ทุกท่าน

ปราณี ศรีก่อบัว

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หลักการของโพเทนชิอเมทรี.....	4
2.1.1 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง.....	7
2.1.2 ขั้วไฟฟ้าเสถียรของเงิน.....	7
2.1.3 เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า.....	12
2.1.4 ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ.....	12
2.1.5 เวลาการตอบสนอง.....	16
2.1.6 ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้.....	16
2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วโดยใช้ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว.....	17
2.2.1 วิธีสร้างกราฟมาตรฐาน.....	17
2.2.2 วิธีเติมสารมาตรฐาน.....	18
2.3 ตะกั่ว.....	20
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....	26
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	26
3.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงาน.....	27
3.2.1 การเตรียมแผ่นเยื่อสถานะของแข็ง.....	27
3.2.2 การทำลวดอ้างอิงใช้ทำขั้วไฟฟ้า.....	28
3.2.3 การประกอบชิ้นส่วนของขั้วไฟฟ้าทำงาน.....	29
3.3 การทำขั้วอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์.....	30
3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าทำงาน.....	31
3.4.1 การศึกษาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าทำงานที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	31
3.4.2 การศึกษาผลของการรบกวนของไอออนอื่น.....	32
3.4.3 การศึกษาผลของพีเอชต่อขั้วไฟฟ้าทำงาน.....	32
3.4.4 การศึกษาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า.....	32
3.4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้ากับเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชัน.....	32
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	32
3.6 สถานที่ทำการวิจัย.....	33
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	34
4.1 การเตรียมแผ่นเยื่อ.....	34
4.2 ขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์.....	35
4.3 ขั้วไฟฟ้าทำงาน.....	36
4.4 ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าทำงาน.....	37
4.4.1 เวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็งเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	38
4.4.2 ผลของการรบกวนของไอออนอื่นต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว.....	38
4.4.3 ผลของพีเอช(pH) ที่มีต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว.....	40
4.4.4 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าทำงาน.....	41
4.4.5 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว(ISE)กับเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์(AAS).....	42

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	44
5.1 สรุปผลการทดลองและอภิปรายผล.....	44
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	45
เอกสารอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก.....	48
ภาคผนวก ก. การคำนวณและข้อมูลการทดลอง.....	48
ภาคผนวก ข. ผลการทดลอง.....	61
ภาคผนวก ค. การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว.....	65
ภาคผนวก ง. รูปเครื่องมือที่ใช้ในการอัดและขัดแต่งแผ่นเชื้อ $Ag_2S$ -PbS .....	67
ประวัติผู้เขียน.....	70

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างแผ่นเชื้อเนื้อเดียวกัน.....	11
2.2 ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าเชื้อผลึกและแผ่นเชื้อเนื้อเดียวกัน.....	11
2.3 ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าแผ่นเชื้อไม่เป็นเนื้อเดียวกัน.....	12
2.4 อุตสาหกรรมและหน่วยงานกับขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยตะกั่วในสิ่งแวดล้อม.....	22
4.1 แสดงอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว $Ag_2S-PbS$ .....	42
4.2 แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว โดยใช้ ISE กับ AAS.....	42
5.1 แสดงสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะ ไอออนตะกั่วชนิดเชื่อมสถานะของแข็ง.....	43
ก.1 แสดงการคำนวณค่าแอกติวิตี .....	48
ก.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วเมื่อมีไอออนทองแดงและ แคดเมียมเป็น ไอออนรบกวน ( $K_{Pb,M}^{Pot}$ ) .....	54
ก.3 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว.....	55
ก.4 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จาก AAS และ ISE โดยใช้หลักสถิติค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เพียร์สัน โพรดัก โมเมนต์.....	56
ก.5 ตารางการคำนวณค่า T-test .....	58
ก.6 ตารางค่าวิกฤตของการแจกแจง t.....	59
ข.1 แสดงข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วในช่วงความเข้มข้น $10^{-7}-10^{-1}$ mol/l .....	58
ข.2 แสดงเวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว $Ag_2S-PbS$ .....	58
ข.3 แสดงข้อมูลการศึกษาผลของการรบกวนของไอออนอื่นที่มีต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว ในช่วงความเข้มข้น $10^{-7}-10^{-1}$ mol/l .....	59
ข.4 แสดงข้อมูลผลการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว $Ag_2S-PbS$ .....	59
ข.5 แสดงข้อมูลผลการศึกษาหาความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว.....	60

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อุปกรณ์ในการทำโพเทนชิอเมตรี.....	5
2.2 ขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็ง.....	9
2.3 แสดงการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ โดยวิธีการทำให้แอกติวิตีเท่ากัน และวิธีทำให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน.....	14
2.4 แสดงรูปแบบการคำนวณ ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ โดยกำหนดให้ แอกติวิตีของไอออน รบกวนคงที่ และวิธีกำหนดให้แอกติวิตีของไอออนที่จะวิเคราะห์คงที่.....	15
2.5 ก. ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้ของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะ ไอออนในทางทฤษฎี.....	17
2.5 ข. ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้ของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะ ไอออนในทางปฏิบัติ.....	17
3.1 แผ่นเยื่อสถานะของแข็ง $Ag_2S-PbS$ .....	28
3.2 แสดงวิธีการ anodizing.....	28
3.3 ขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็งเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วที่ทำจากแผ่นเยื่อ $Ag_2S-PbS$ เมื่อประกอบชิ้นส่วนเสร็จ.....	29
3.4 ขั้วอ้างอิง $Ag/AgCl$ .....	30
4.8 แผ่นเยื่อ $Ag_2S-PbS$ ที่ยังไม่ได้ขัดแต่ง.....	34
4.2 ตำแหน่งการเชื่อมต่อระหว่างสายไฟฟ้ากับลวด $Ag/AgCl$ .....	35
4.3 ขั้วซิลเวอร์ซิลเวอร์คลอไรด์.....	35
4.4 แผ่นเยื่อ $Ag_2S-PbS$ ที่ผ่านการขัดแต่งแล้ว.....	36
4.5 การเชื่อมต่อแผ่นเยื่อ $Ag_2S-PbS$ กับสายไฟฟ้า.....	36
4.6 ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว.....	37
4.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดศักย์ไฟฟ้า.....	37
4.8 เวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น $10^{-7}-10^{-1}$ mol/l...38	38
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอกแอกติวิตีของ $Pb^{2+}$ กับ $Cu^{2+}$ .....	39
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอกแอกติวิตีของ $Pb^{2+}$ กับ $Cd^{2+}$ .....	39
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับพีเอชในช่วงความเข้มข้น $10^{-4}-10^{-1}$ mol/l $Pb^{2+}$ 40	40
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอกแอกติวิตีของ $Pb^{2+}$ ที่ ระดับความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-1}$ mol/l.....	41

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.1 กราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเชื่อมสถานะของแข็ง $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$ ที่ระดับความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-1}$ mol/l .....	49
ก.2 การคำนวณค่าความชันของกราฟมาตรฐาน.....	50
ก.3 วิธีการหาระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้.....	50
ก.4 แสดงกราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเชื่อมสถานะของแข็ง $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$ ที่มีอายุการใช้งาน 2 สัปดาห์.....	51
ก.5 แสดงกราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเชื่อมสถานะของแข็ง $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$ ที่มีอายุการใช้งาน 3 สัปดาห์.....	51
ก.6 แสดงกราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเชื่อมสถานะของแข็ง $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$ ที่มีอายุการใช้งาน 4 สัปดาห์.....	52
ก.7 แสดงกราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเชื่อมสถานะของแข็ง $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$ ที่มีอายุการใช้งาน 5 สัปดาห์.....	52
ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอกแอกติวิตีของ $\text{Pb}^{2+}$ และ $\text{Cu}^{2+}$ .....	52
ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอกแอกติวิตีของ $\text{Pb}^{2+}$ และ $\text{Cd}^{2+}$ .....	53
ง.1 เครื่องอัด Hydraulic Press.....	62
ง.2 แม่พิมพ์ KBr die.....	62
ง.3 เครื่องขัด-แต่ง (Grinding Machine).....	63

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาเรื่องการจัดการและการกำจัดของเสีย เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นทุกประเทศที่กำลังพัฒนา รวมถึงประเทศไทยด้วย ผลของการทิ้งของเสียโดยปราศจากการจัดการที่ดี ได้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมโดยตรง เช่น คุณภาพน้ำ อากาศ ดิน และยังมีส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของประชาชน ดังเช่น การเกิดพิษตะกั่ว ในหมู่บ้านแห่งหนึ่ง ซึ่งอยู่ในตำบลบางครุ อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ เนื่องจากการนำกากแบตเตอรี่ไปถมที่ดิน เป็นเหตุให้เกิดการเจ็บป่วยของตะกั่วในสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้น หรือการตายของคนงานในโรงงานถ่านไฟฉาย อันเนื่องจากโรคแพ้พิษแมงกานีส เป็นต้น

เมื่อสิ่งแวดล้อมถูกทำลายและเสื่อมโทรมลงอย่างเห็นได้ชัด รัฐบาลจึงประกาศใช้พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมในปี พ.ศ. 2535 และให้มีการจัดทำรายงานการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม(Environmental Impact Assessment , EIA) เพื่อให้ผู้ก่อมลพิษรับผิดชอบต่อมลพิษที่เกิดขึ้น ด้วยการบำบัดมลพิษให้ได้มาตรฐานตามที่รัฐกำหนด ซึ่งปัจจุบันมีการนำมาใช้ในรูปของการเก็บค่าธรรมเนียมค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย(Pollution Fee)

การศึกษาผลกระทบของโครงการหรือกิจการ เช่น อุตสาหกรรมผลิตสารอินทรีย์ อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ และอุตสาหกรรมเหล็ก/เหล็กกล้า เป็นต้น จะต้องมีการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อม และเป็นเงื่อนไขที่ทางเจ้าของกิจการต้องเป็นผู้ปฏิบัติ เช่น การตรวจวัดคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

ในสถานการณ์ปัจจุบัน การตรวจสอบคุณภาพน้ำ จึงเป็นวิธีการป้องกันและแก้ไขปัญหาน้ำเสียที่มีความจำเป็นมาก เทคนิคการวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนักในสิ่งแวดล้อม ที่ได้รับความนิยมมากคือ เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชัน(Atomic Absorption Spectroscopy, AAS) เป็นเทคนิคที่ให้ความเที่ยงตรง แม่นยำ แต่เครื่องมือราคาแพง และต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ

ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน(Ion-Selective Electrode, ISE) เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณ ไอออนต่างๆ โดยใช้เทคนิคโพเทนชิอเมตรีในการวิเคราะห์ มีขนาดเล็กสามารถนำไปใช้งานภาคสนามได้ ให้ผลการวิเคราะห์รวดเร็วและแม่นยำ ใช้สารเคมีและสารตัวอย่างปริมาณน้อย

จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าว ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะศึกษาวิจัย และตรวจสอบคุณภาพน้ำทิ้ง โดยการสร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว และทดลองตรวจหาปริมาณตะกั่วในน้ำทิ้งจากโรงฝึกงานด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ของสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ซึ่งมีโรงฝึกงานด้าน

ช่างยนต์ ช่างเชื่อมโลหะ ช่างไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และห้องปฏิบัติการเคมี ที่มีการนำโลหะหนักพวกตะกั่วมาใช้ในการเรียนการสอน มีความเป็นไปได้สูงที่จะมีการปนเปื้อนของตะกั่วในน้ำทิ้งจนถึงขั้นก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาการสร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว ชนิดเยื่อสถานะของแข็ง
2. เพื่อศึกษาผลของ พีเอช การรบกวนไอออนอื่น การตอบสนองของขั้วไฟฟ้าที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ เวลาที่ตอบสนอง และอายุการใช้งานที่มีต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็งที่สร้างขึ้น สามารถวัดปริมาณไอออนตะกั่วได้ถึงระดับ ppm และมีอายุการใช้งานไม่ต่ำกว่า 2 สัปดาห์

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. สร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว ชนิดเยื่อสถานะของแข็ง โดยใช้สารประกอบซิลเวอร์ซัลไฟด์ผสมเลดซัลไฟด์ เป็นเยื่อสถานะของแข็ง
2. สร้างขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์
3. ศึกษาผลของ พีเอช การรบกวนไอออนอื่น การตอบสนองของขั้วไฟฟ้าที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ เวลาที่ตอบสนอง และอายุการใช้งานที่มีต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว

## 1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ขั้วไฟฟ้า(Electrode) หมายถึง ขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ไฟฟ้ามีอย่างน้อย 2 ขั้ว คือขั้วแอโนด และขั้วแคโทด แต่ละขั้วเรียกว่า ครึ่งเซลล์ ต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวิเคราะห์
2. ขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็ง(Solid-state membrane electrode) หมายถึง ขั้วไฟฟ้าที่มีสารประกอบของสารละลายไอออนอยู่ในสถานะของแข็งที่อัดแน่นเป็นแผ่นเนื้อเดียวกัน
3. สัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ (Selectivity coefficient,  $K_{A,B}^{Pot}$ ) หมายถึง ความสามารถของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะ ที่สามารถจำแนกตะกั่วไอออนกับไอออนตัวอื่นในสารละลาย โดยทั่วไปหาได้

จากอัตราส่วนของแอกทิวิตีของไอออนวิเคราะห์ต่อแอกทิวิตีของไอออนอื่น ค่า  $K_{A,B}^{Pot}$  ยิ่งน้อยแสดงว่าขั้วยังมีความเลือกเฉพาะต่อไอออนวิเคราะห์สูง

4. ไอออนตะกั่ว (Lead ion) หมายถึง  $Pb^{2+}$

5. ขีดจำกัดของการวัด (Limit of detection) หมายถึง ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะสามารถวิเคราะห์ได้

6. ความเสถียร (Stability) หมายถึง ความคงทนของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะ ต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส เป็นต้น

7. Nernstian response หมายถึง ช่วงแอกทิวิตีของสารละลายที่สัมพันธ์กับศักย์ไฟฟ้าแบบเชิงเส้น โดยมีค่าความชันเท่ากับ  $2.303 \times 10^3 RT/Z_A F$  mV/decade หรือมีค่าเท่ากับ  $59.16/Z_A$  mV/Unit of  $pa_A$  ที่  $25^\circ C$

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็งที่ใช้งานได้ง่าย มีขนาดเล็กสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการและงานภาคสนาม

2. ทำให้ตรวจวัดไอออนตะกั่วในน้ำทิ้ง จากโรงฝึกงานด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของสถาบันเทคโนโลยีปทุมวันได้ง่ายขึ้น

3. ทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยี โดยสร้างชิ้นใช้เองภายในประเทศ และลดการนำเข้าจากต่างประเทศ

## บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเรื่องการพัฒนาการสร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎี เอกสาร วารสาร รายงาน งานวิจัย และบทความในประเทศและต่างประเทศ เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยดังหัวข้อต่อไปนี้

- 2.1 หลักการของโพเทนชิอเมทรี
- 2.2 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว
- 2.3 ตะกั่ว
- 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หลักการของโพเทนชิอเมทรี [1][2]

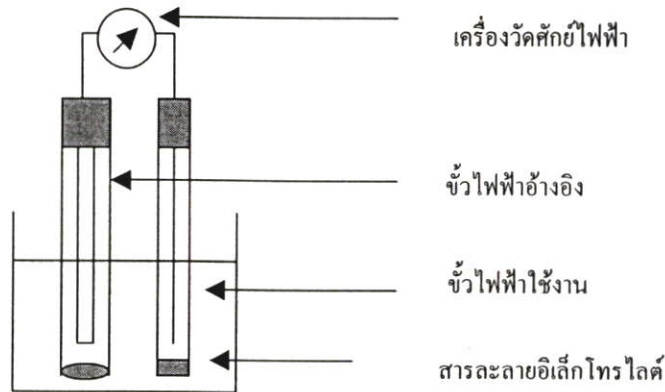
โพเทนชิอเมทรี เป็นวิธีวิเคราะห์หาความเข้มข้นหรือแอกทิวิตีของสารที่สนใจในสารละลาย ตัวอย่าง โดยอาศัยการวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิก ซึ่งประกอบด้วยขั้วอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าใช้งานจมอยู่ในสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์โดยไม่มีกระแสไหลผ่านเซลล์ ศักย์ไฟฟ้าของขั้วอ้างอิงจะมีค่าคงที่ ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จึงแปรผันโดยตรงกับศักย์ไฟฟ้าของขั้วทำงาน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือแอกทิวิตีของสารที่จะวิเคราะห์

สำหรับค่าศักย์ที่วัดได้จากเซลล์กัลวานิกเป็นค่ารวมของศักย์อุณหภูมิ และศักย์รอยต่อสารละลายเท่านั้น ซึ่งศักย์อุณหภูมิเป็นผลต่างของศักย์ขั้วไฟฟ้าทั้งสองที่คำนวณได้จากสมการของเนินสต์ โดยขั้วไฟฟ้าหนึ่งเป็นขั้วอ้างอิง และอีกขั้วไฟฟ้าหนึ่งเป็นขั้วใช้งาน

เครื่องมือที่ใช้ในโพเทนชิอเมทรี ประกอบด้วย

1. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง
2. ขั้วไฟฟ้าใช้งาน
3. เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

ผังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ในการทำโพเทนชิโอเมตรี

การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าเพื่อการวัดศักย์สามารถเขียนแทนด้วยแผนภาพ โดยให้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็นแอโนดและขั้วไฟฟ้าแบบเยื่อเป็นแคโทด ดังนี้

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง//สารละลาย/เยื่อ/สารละลายอ้างอิงภายใน/Ag/AgCl  
ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงศักย์ของเซลล์เคมีไฟฟ้าได้ดังนี้

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{ind}} - E_{\text{ref}} + E_j \quad (2.1)$$

เมื่อ

$E_{\text{cell}}$  = ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เคมี

$E_j$  = ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารละลายตัวอย่างและสารละลายของขั้วอ้างอิง

$E_{\text{ref}}$  = ศักย์ไฟฟ้าของขั้วอ้างอิงที่มีค่าคงที่และทราบค่าแน่นอน

$E_{\text{ind}}$  = ศักย์ไฟฟ้าของขั้วใช้งาน ที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของผิวขั้วกับสารละลายตัวอย่าง ซึ่งแปรผันตามเอกทิวิตีของสารที่สนใจตามสมการของเนินสต์ ดังนี้

$$E_{\text{ind}} = k - \frac{RT}{nF} \ln a_A \quad (2.2)$$

หรือ

$$E_{\text{ind}} = k - \frac{RT}{nF} \ln C_A \quad (2.3)$$

เมื่อ  $a_A$  และ  $C_A$  = แอกทिवิตี และความเข้มข้นของสาร A ตามลำดับ  
 $n$  = จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องกับครึ่งปฏิกิริยา  
 $R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ  
 $T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์  
 $F$  = ค่าคงที่ของฟาราเดย์

แทนสมการ (2.2) ลงในสมการ (2.1) จะได้

$$E_{\text{cell}} = k - \frac{RT}{nF} \ln a_A - E_{\text{ref}} + E_j$$

ถ้า  $E_j$  และ  $E_{\text{ref}}$  คงที่  $\therefore E_{\text{cell}} = K - \frac{RT}{nF} \ln a_A$  (2.4)

เมื่อ  $K = k + E_j - E_{\text{ref}}$

สำหรับขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน ความต่างศักย์ที่วัดได้เมื่อจุ่มลงในสารละลายมาตรฐานที่มีไอออนซึ่งให้การตอบสนองต่อขั้วนั้น จะเป็นไปตามสมการของ เนินสต์ดังนี้

$$E = \text{constant} \pm \frac{2.303RT}{Z_A F} \log a_A$$
 (2.5)

$$a_A = f_A c_A$$

$$a_A = \text{แอกทिवิตีของไอออน A เมื่อมีประจุ } Z_A$$

$$f_A = \text{สัมประสิทธิ์ของแอกทिवิตีของไอออน A}$$

$$c_A = \text{ความเข้มข้นของไอออน A}$$

ในสมการ (2.5) เครื่องหมาย + สำหรับไอออนที่มีประจุ +  
 เครื่องหมาย - สำหรับไอออนที่มีประจุ -

ค่า  $f_A$  เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความแรงไอออน (ionic strength,  $\mu$ ) ซึ่งค่าความแรงไอออนขึ้นอยู่กับว่าสารนั้นมีความเข้มข้นมากหรือน้อยเพียงใดในสารละลายและขึ้นอยู่กับจำนวนประจุของไอออนของสารด้วยถ้าความแรงของไอออนในสารละลายมีค่าน้อยมาก ( $<0.001$ ) ค่าความแรงของไอออนมีค่าประมาณศูนย์ หรือ  $f$  มีค่าประมาณ 1 ซึ่งจะทำให้ค่า  $a_A$  มีค่าเท่ากับความเข้มข้น ความต่างศักย์ที่วัดได้ตามสมการที่ (2.5) จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E = \text{constant} \pm \frac{2.303RT}{Z_A F} \log c_A$$
 (2.6)

แต่เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน จะให้การตอบสนองต่อไอออนอื่น ๆ (interfering ion) ได้ ถ้ามีปริมาณของไอออนนั้นในอัตราส่วนที่สูงเมื่อเทียบกับไอออนที่ต้องการวัด ดังนั้นค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ของ ISE เมื่อมีไอออนอื่นอยู่ด้วย เขียนได้ดังนี้

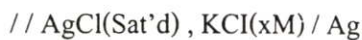
$$E = \text{constant} \pm \frac{2.303RT}{Z_A F} \log(a_A + K_{A,B}^{\text{Pot}} a_B^{Z_A/Z_B}) \quad (2.7)$$

เมื่อ  $a_B$  = แอกทिवิตีของไอออน B ที่มีประจุ  $Z_B$   
 $K_{A,B}^{\text{Pot}}$  = ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ

### 2.1.1 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทฤษฎีซึ่งจัดเป็นขั้วไฟฟ้าโลหะชนิดที่สอง ให้ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่นิยมใช้คือขั้วไฟฟ้าคาโลเมลและขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ประกอบด้วยหลอดแก้วที่มีลวดโลหะเงินจุ่มอยู่ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีซิลเวอร์คลอไรด์อิ่มตัว ส่วนปลายของหลอดแก้วเป็นวุ้นแข็ง ที่มีความพรุน สัญลักษณ์ของขั้วไฟฟ้านี้เขียนได้ดังนี้



ปฏิกิริยาที่ครึ่งเซลล์เป็นดังนี้



ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์ - ซิลเวอร์คลอไรด์ขึ้นกับความเข้มข้นของไอออนคลอไรด์ในขั้วไฟฟ้า ซึ่งปกติใช้ความเข้มข้นที่อิ่มตัวจึงทำให้ค่าศักย์ขั้วไฟฟ้าของซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นค่าคงที่ค่าเดียว และแปรตามอุณหภูมิได้บ้าง

### 2.1.2 ขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็ง(Solid-state membrane electrode)

ขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็งเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน ที่สารประกอบของสารเจาะจงไอออน อยู่ในสถานะของแข็ง ซึ่งทำหน้าที่เป็นแผ่นเยื่อของขั้วไฟฟ้าด้วย โดยอาจอยู่ในสภาพของแผ่นผลึกของสารเจาะจงไอออนเรียกเยื่อผลึก (crystalline membrane) หรือเป็นสารประกอบในสถานะของแข็งที่อัดแน่นและแผ่นเป็นแผ่นเยื่อ เรียกเยื่อเนื้อเดียวกัน (homogeneous membrane) หรืออาจเป็น

สารประกอบของสารเจาะจงไอออนที่หลอมรวมกับพอลิเมอร์ เพื่อให้แผ่นเป็นแผ่นเชื่อมต่อได้ แผ่นเชื่อมแบบหลังนี้มักเรียกเป็นแผ่นเชื่อมไม่เป็นผลึก (noncrystalline membrane) หรือ แผ่นเชื่อมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous membrane)

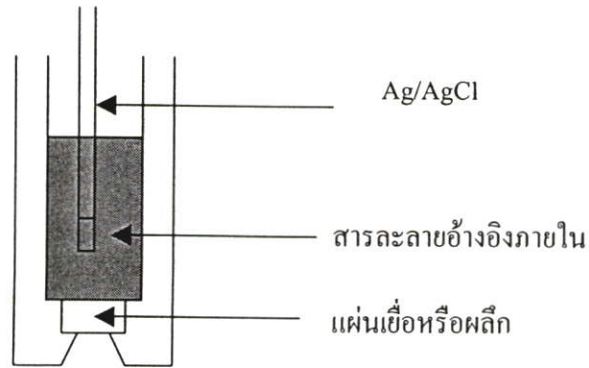
ขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็งเป็นขั้วไฟฟ้าที่ถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อให้เจาะจงเฉพาะกับแอนไอออนเท่านั้น ในลักษณะคล้ายคลึงกับขั้วไฟฟ้าเยื่อแก้วที่เจาะจงเฉพาะกับแคตไอออน การตอบสนองของแผ่นเชื่อมต่อไอออนของสารละลายตัวอย่างสำหรับเยื่อแบบผลึก แตกต่างไปจากแผ่นเชื่อมแบบเนื้อเดียวกัน หรือแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน แต่ศักย์ที่เกิดที่แผ่นเชื่อม ไม่ว่าจะแบบใดยังคงมีความสัมพันธ์กับแอกทิวิตีของไอออนของสารตัวอย่าง

#### ส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็งมีส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้า เช่นเดียวกับขั้วไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อทั่วไปคือมีซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในสารละลายคลอไรด์ ซึ่งเป็นสารละลายอ้างอิงภายใน และมีส่วนผสมของสารละลายเจาะจงไอออนอยู่ด้วย เช่น ถ้าเป็นขั้วไฟฟ้าฟลูออไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สารละลายภายในเป็นส่วนผสมของโซเดียมคลอไรด์ และโซเดียม ฟลูออไรด์ โดยมีแผ่นผลึกของ  $\text{LaF}_3$  อยู่ที่ปลายสุดของขั้วไฟฟ้า

#### ขั้วไฟฟ้าเยื่อผลึก

เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีความจำเพาะค่อนข้างสูง เพราะส่วนของแผ่นเยื่อเป็นผลึกของสารประกอบเจาะจงไอออน ขั้วไฟฟ้าเยื่อผลึก ที่มีประโยชน์มาก และเป็นที่ยอมรับ คือ ขั้วไฟฟ้าฟลูออไรด์ ขั้วไฟฟ้าฟลูออไรด์ เป็นขั้วไฟฟ้าที่แผ่นเยื่อเป็นผลึกของสารประกอบแลนทานัมฟลูออไรด์ ( $\text{LaF}_3$ ) ผสมกับไอออนยูโรเทียม ( $\text{Eu}^{2+}$ ) เล็กน้อย เพื่อลดความต้านทานของผลึก โดย  $\text{Eu}^{2+}$  จับกับไอออนฟลูออไรด์ได้เพียง 2 ไอออน ทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อผลึก เพื่อให้การเคลื่อนที่ของ  $\text{F}^-$  ในเนื้อผลึกจากแขนที่ว่างหนึ่ง ไปยังอีกที่หนึ่งได้ดีขึ้น ผลึกของ  $\text{LaF}_3$  ละลายน้ำได้น้อยมาก ๆ หรือแทบไม่ละลายเลย การเคลื่อนที่ของ  $\text{F}^-$  ระหว่างสารละลายตัวอย่างกับในเนื้อผลึก ทำให้เกิดศักย์ขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับแอกทิวิตีของ  $\text{F}^-$  ในสารละลายตัวอย่าง ในช่วงความเข้มข้นของฟลูออไรด์อิ่มตัวจนถึง  $1 \times 10^{-6} \text{ M}$



รูปที่ 2.2 ขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็ง

ความจำเพาะเจาะจงต่อการตอบสนองไอออนของขั้วไฟฟ้าเยื่อผลึก ดีกว่าขั้วไฟฟ้าแบบเยื่ออื่น ๆ เพราะความจำเพาะของช่องว่างในเนื้อผลึก ค่อนข้างสูง ดังตัวอย่างของขั้วไฟฟ้าฟลูออไรด์ ขนาดของ  $F^-$  ในโครงสร้างของผลึก ในการจับยึดระหว่างโมเลกุลยากที่จะพอเหมาะกะกับไอออนอื่น ๆ นอกจาก  $F^-$  ดังนั้น ขั้วไฟฟ้าฟลูออไรด์จึงจัดเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีความเจาะจงไอออนสูงมากเหมาะกับสารละลายในช่วง pH ที่มากกว่า 3.0 และน้อยกว่า 8.0 ถ้าสารละลายเป็นกรดเกินไป จะเกิดการรบกวนของ  $HF$  ( $pK_a$  ประมาณ 3) และในสารละลายด่าง  $OH^-$  ถูกตอบสนองได้ด้วย

ขั้วไฟฟ้าที่ฟลูออไรด์ เหมาะแก่การนำไปใช้หาปริมาณของฟลูออไรด์ในน้ำดื่ม น้ำทะเล ชีวสาร ผลิตภัณฑ์ที่ผสมฟลูออไรด์ และอื่น ๆ อีกมาก

ขั้วไฟฟ้าเยื่อเนื้อเดียวกัน

ส่วนประกอบเยื่อของขั้วไฟฟ้านี้ยังคงเป็นสารประกอบเจาะจงไอออน เช่นเดียวกับเยื่อผลึก เพียงแต่สารประกอบเจาะจงไอออนเหล่านี้ไม่ได้เป็นผลึก แต่เป็นสารประกอบในสถานะของแข็ง ดังนั้น การนำมาทำเป็นเยื่อจึงต้องใช้วิธีอัดสารประกอบนี้แล้วแผ่ออกเป็นเยื่อ โดยอาจรวมอัดสารประกอบมากกว่าหนึ่งชนิดเข้าด้วยกัน หรือเป็นเพียงชนิดเดียวก็ได้ ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าแบบนี้ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าคลอไรด์ ขั้วไฟฟ้าซัลไฟด์ เป็นต้น

ขั้วไฟฟ้าซัลไฟด์ ส่วนของเยื่อเป็นสารประกอบของซิลเวอร์ซัลไฟด์ ( $Ag_2S$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความคงตัวสูง ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อถูกกับแสง เป็นสารที่ละลายยาก มีค่าคงที่ของการละลายน้อยมาก ( $K_{sp, Ag_2S} \approx 10^{-51}$ ) เมื่อใช้  $Ag_2S$  เป็นเยื่อ สามารถเจาะจงทั้ง  $Ag^+$  และ  $S^{2-}$  โดย  $Ag_2S$  มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า มี  $Ag^+$  เป็นไอออนที่มีการเคลื่อนที่ได้ภายในเยื่อ ดังนั้น ศักย์ที่เกิดที่เยื่อสัมพันธ์กับแอกทิวิตีของ  $Ag^+$  ของสารละลายตัวอย่าง ดังสมการ

$$E_m = K + 0.0592 \cdot \log(a_{Ag^+})^2 \quad (2.9)$$

ถ้าเป็นการตรวจวัด  $S^{2-}$  ความสัมพันธ์ที่แผ่นเยื่อ แปรตามเอกทิวติของ  $S^{2-}$  โดยผ่านค่า  $K_{sp}$  ของ  $Ag_2S$  ดังสมการ

$$E_m = K + 0.0592 \cdot \log \left( \frac{K_{sp}}{a_{S^{2-}}} \right) \quad (2.10)$$

หรือ

$$E_m = K' - 0.0592 \cdot \log a_{S^{2-}} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $K'$  เท่ากับผลรวมของ  $K$  และ  $0.0592 \cdot \log K_{sp}$

ขั้วไฟฟ้าซัลไฟด์ หรือซิลเวอร์ซัลไฟด์นี้ มีความจำเพาะกับทั้ง  $Ag^+$  และ  $S^{2-}$  แต่ไม่ตอบสนองต่อไอออนอื่น ๆ จึงเหมาะแก่การใช้วิเคราะห์  $Ag^+$  หรือ  $S^{2-}$  อย่างใดอย่างหนึ่ง โดยต้องไม่มีอีกไอออนหนึ่งผสมอยู่ด้วย

ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์ซัลไฟด์ ที่ผลิตออกทางการค้า เพื่อให้สามารถนำขั้วไฟฟ้านี้ไปตรวจวัดไอออนอื่น ๆ นอกเหนือจาก  $Ag^+$  หรือ  $S^{2-}$  จึงได้มีการผสมสารประกอบในสถานะของแข็งนี้มากกว่าหนึ่งชนิด ตัวอย่างเช่น การผสมซิลเวอร์ซัลไฟด์กับซิลเวอร์เฮไลด์ เขียนแทนเป็น  $Ag_2S-AgX$  โดยไอออนเฮไลด์ ( $X^-$ ) อาจเป็น  $Cl^-$ ,  $Br^-$ ,  $I^-$  หรือ  $SCN^-$  ทำให้ขั้วไฟฟ้าที่ได้ครอบคลุมจำเพาะกับไอออนได้มากขึ้น ขณะเดียวกันโอกาสการเกิดการรบกวนจากไอออนเหล่านี้ถ้าปนร่วมในสารละลายตัวอย่างก็มีมากเช่นกัน หลักทั่วไปของความจำเพาะเจาะจงต่อไอออนสำหรับขั้วไฟฟ้าลักษณะนี้ คือ ถ้าสารละลายตัวอย่างประกอบด้วยไอออนใดที่เพิ่งเกิดเป็นสารประกอบกับส่วนประกอบของแผ่นเยื่อ แล้วละลายได้น้อยที่สุดหรือมีค่าคงที่การละลาย ( $K_{sp}$ ) ต่ำสุด จะเป็นไอออนที่ถูกตอบสนองจากขั้วไฟฟ้าก่อนไอออนอื่น ๆ ยกตัวอย่าง เช่น แผ่นเยื่อ  $Ag_2S-AgCl$  ตอบสนองต่อ  $Br^-$  และ  $I^-$  ได้ดีกว่า  $Cl^-$  เพราะค่า  $K_{sp}$  ของ  $AgBr$  และ  $AgI$  น้อยกว่า  $AgCl$  เป็นต้น

การผสม  $Ag_2S$  กับสารประกอบโลหะซัลไฟด์อื่น ๆ เขียนแทนเป็น  $Ag_2S-MS$  เช่น  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  เป็นต้น ทำให้แผ่นเยื่อที่ได้สามารถตอบสนองต่อแคตไอออนได้ โดยสัทธิที่อยู่ที่แผ่นเยื่อสัมพันธ์กับเอกทิวติของแคตไอออนที่เกี่ยวข้องนั้น สำหรับความเจาะจงไอออนของแผ่นเยื่อนี้ ก็เช่นเดียวกับแผ่นเยื่อผสมของซิลเวอร์ที่กล่าวไปแล้ว คือ แคตไอออนใดที่เมื่อเกิดเป็นสารประกอบแล้วมีค่า  $K_{sp}$  ต่ำสุด ต้องถูกตอบสนองโดยแผ่นเยื่อได้ก่อน ทั้งนี้ อาจรวมถึงแคตไอออนอื่น ๆ ที่อาจไม่ได้เป็นไอออนร่วมของแผ่นเยื่อก็ได้ ตัวอย่างของแผ่นเยื่อเนื้อเดียวกันแบบต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างแผ่นเชื่อมเนื้อเดียวกัน

ส่วนประกอบสาร	ไอออนเจาะจงวิเคราะห์
Ag <sub>2</sub> S	Ag <sup>+</sup> , S <sup>2-</sup>
Ag <sub>2</sub> S-AgBr	Br <sup>-</sup>
Ag <sub>2</sub> S- AgCl	Cl <sup>-</sup>
Ag <sub>2</sub> S- AgCN	CN <sup>-</sup>
Ag <sub>2</sub> S- AgI	I, CN <sup>-</sup>
Ag <sub>2</sub> S- AgSCN	SCN <sup>-</sup>
Ag <sub>2</sub> S- CdS	Cd <sup>2+</sup>
Ag <sub>2</sub> S- CuS	Cu <sup>2+</sup>
Ag <sub>2</sub> S- PbS	Pb <sup>2+</sup>

### ขั้วไฟฟ้าแผ่นเชื่อมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

การผสมผลึกหรือสารประกอบในสถานะของแข็ง กับพอลิเมอร์ ยางซิลิโคน หรือเมทริกซ์เชื่อมต่าง ๆ แล้วจึงอัดและแผ่เป็นแผ่นเชื่อม ได้เป็นแผ่นเชื่อมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งมีข้อดีกว่าแผ่นเชื่อมผลึกหรือแผ่นเชื่อมเนื้อเดียวกัน ตรงที่แผ่นเชื่อมมีความแข็งแรงมากขึ้นไม่แตกหักง่าย สำหรับความสัมพันธ์ที่แผ่นเชื่อมกับเอกทิวติของสารตัวอย่าง เป็นไปในหลักการเดียวกับขั้วไฟฟ้าแผ่นเชื่อมเนื้อเดียวกันที่ได้กล่าวไปแล้ว ตัวอย่างของขั้วไฟฟ้าเชื่อมสถานะของแข็งแบบต่าง ๆ ที่ผลิตออกทางการค้า แสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าเชื่อมผลึก และแผ่นเชื่อมเนื้อเดียวกัน

ไอออนเจาะจง	ส่วนประกอบแผ่นเชื่อม	ไอออนรบกวน
F <sup>-</sup>	LaF <sub>3</sub>	OH <sup>-</sup>
Cl <sup>-</sup> , S <sup>-</sup>	AgCl	Br <sup>-</sup> , I <sup>-</sup> , CN <sup>-</sup> , NH <sub>3</sub> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , S <sub>2</sub>
Br <sup>-</sup>	AgBr	I <sup>-</sup> , CN <sup>-</sup> , NH <sub>3</sub> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , S <sup>2-</sup>
I <sup>-</sup>	AgI	CN <sup>-</sup> , S <sup>2-</sup>
CN <sup>-</sup>	AgI	I <sup>-</sup> , S <sup>2-</sup>
S <sup>2-</sup>	Ag <sub>2</sub> S	Ag <sup>+</sup>
Ag <sup>+</sup>	Ag <sub>2</sub> S	S <sup>2-</sup>
Pb <sup>2+</sup>	PbS+Ag <sub>2</sub> S	Cu <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup>

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าแผ่นเยื่อไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

ไอออนเจาะจง	ส่วนประกอบแผ่นเยื่อ	ไอออนรบกวน
F <sup>-</sup>	LaF <sub>3</sub> ในยางซิลิโคน	OH <sup>-</sup>
Cl <sup>-</sup>	AgCl ในยางซิลิโคน	S <sup>2-</sup> , I <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup> , SCH <sub>3</sub> , NH <sub>3</sub>
S <sup>2-</sup>	Ag <sub>2</sub> S ในยางซิลิโคน	ไม่มี
Cu <sup>2+</sup>	Cu <sub>2</sub> S+Ag <sub>2</sub> S ในเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์	Cu <sup>+</sup>

### 2.1.3 เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า [2]

เป็นเครื่องมือในการอ่านหรือบอกศักย์ของเซลล์ ที่เกิดจากสมดุลของปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เครื่องมือนี้เรียกว่า โพลเทนซีอิมิตอร์ ใช้วัดศักย์ได้ละเอียดถึง  $\pm 0.1$  หรือ  $\pm 0.01$  mV โดยมีขีดจำกัดการใช้งานขึ้นกับความต้านทานของเซลล์ และความไวของมาตรวัดกระแส ถ้าขั้วไฟฟ้ามีความต้านทานมากจะไม่สามารถวัดศักย์ด้วยเครื่องโพลเทนซีอิมิตอร์ได้ แต่ใช้เครื่องวัดศักย์ที่เรียกว่า พี-เอชมิเตอร์ หรือ พี-ไอมิเตอร์ หรือ ไอออนมิเตอร์ แทน ภายในตัวเครื่อง พี-เอชมิเตอร์ที่ทำให้ปรากฏค่าศักย์ หรือ pH บนหน้าปัทม์ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดศักย์ที่เรียกว่า voltage follower operational amplifier หรือ op-amp เป็นอุปกรณ์วัดศักย์ ที่ถูกพัฒนาขึ้นเป็นวงจรรีเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้กับวงจรที่มีความต้านทานสูง ซึ่งถูกใช้แยกส่วนของแหล่งศักย์กับส่วนของเซลล์ที่ต้องการวัดค่า โดยอยู่ในวงจรไฟฟ้าเดียวกัน การทำงานของ op-amp เป็นการทำให้ศักย์ที่ออกจากเซลล์ มีค่าเท่ากับศักย์ที่ให้กับวงจร เมื่อเกิดศักย์จากปฏิกิริยาสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้าใช้งาน ค่าศักย์ที่เกิดขึ้นเป็นศักย์ที่ให้เข้ากับ op-amp ซึ่งปรับให้ศักย์ที่ออกจากวงจรให้ค่าเท่ากับค่าที่ปรับถูกปรากฏบนโวลต์มิเตอร์ ทำให้รู้ค่าของการเกิดปฏิกิริยาซึ่งแปรตามแอกติวิตีของสารตัวอย่าง

### 2.1.4 ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ (Selectivity coefficient, $K_{A,B}^{Pot}$ ) [3]

ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะเป็นสิ่งสำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน ซึ่งในทางปฏิบัติในกรณีที่มีไอออนอื่นรบกวน สามารถหาสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะได้จากสมการ Nicolsky-Eisenman (Nicolsky-Eisenman Equation) ดังสมการ (2.7)

ซึ่งค่านี้จะบอกให้ทราบถึงอิทธิพลของไอออนรบกวนที่มีต่อศักย์ไฟฟ้าของไอออนที่จะวิเคราะห์ในระบบ ซึ่งถ้าขั้วไฟฟ้ามีการเลือกเฉพาะที่ดีจะมีค่า  $K_{A,B}^{Pot}$  ต่ำ

วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะมีหลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมี 2 วิธีดังนี้

1. วิธีการแยกสารละลาย (Separated solution method)

วิธีการแยกสารละลายทำได้โดยการแยกศักย์ไฟฟ้าของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์และไอออนที่รบกวนที่แอทวิตี ต่าง ๆ และพลอตกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับแอทวิตี ในกราฟเดียวกันดังรูปที่ 2.3 ซึ่งวิธีการแยกสารละลายสามารถแบ่งได้ เป็น 2 วิธีดังนี้

ก. วิธีทำให้แอทวิตีเท่ากัน (Iso-activity method)

วิธีนี้ทำได้โดยวัดศักย์ไฟฟ้าของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ (A) ที่แอทวิตีต่าง ๆ โดยที่ไม่มีไอออนอื่นรบกวน (B) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ ดังสมการ (2.12)

$$E_1 = E^\circ \pm \frac{RT}{Z_A F} \ln a_A \quad (2.12)$$

และวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่มีเฉพาะไอออนรบกวน B ที่แอทวิตีต่าง ๆ โดยไม่มีไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ (A) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ ดังสมการ (2.13)

$$E_2 = E^\circ + \frac{RT}{Z_A F} \ln (K_{A,B}^{pot} \cdot a_B^{Z_A/Z_B}) \quad (2.13)$$

วิธีการคำนวณหาค่า  $K_{A,B}^{pot}$  ทำได้โดยพลอตกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับแอทวิตี ในกราฟเดียวกัน ดังรูปที่ 2.3 แล้วหาจุดตัดของกราฟทั้งสองที่ทำให้  $a_A = a_B$  ดังในรูปที่ 2.3 จะได้จุดตัด W และ X ต่อจากนั้นลากเส้นตรงตั้งฉากให้ตัดกับแกนค่าศักย์ไฟฟ้าของกราฟทั้งสองจะได้จุดตัด Y และ Z ซึ่งเป็นแกนค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดซึ่งจะทำให้ทราบค่า  $E_1$  และ  $E_2$  และนำไปแทนค่าในสมการ (2.14) ซึ่งได้จากการเอาสมการ (2.13) ลบสมการ (2.12) จะได้สมการที่ (2.14)

$$\log K_{A,B}^{pot} = \frac{(E_2 - E_1)Z_A F}{2.303RT} + \left(1 - \frac{Z_A}{Z_B}\right) \log a_A \quad (2.14)$$

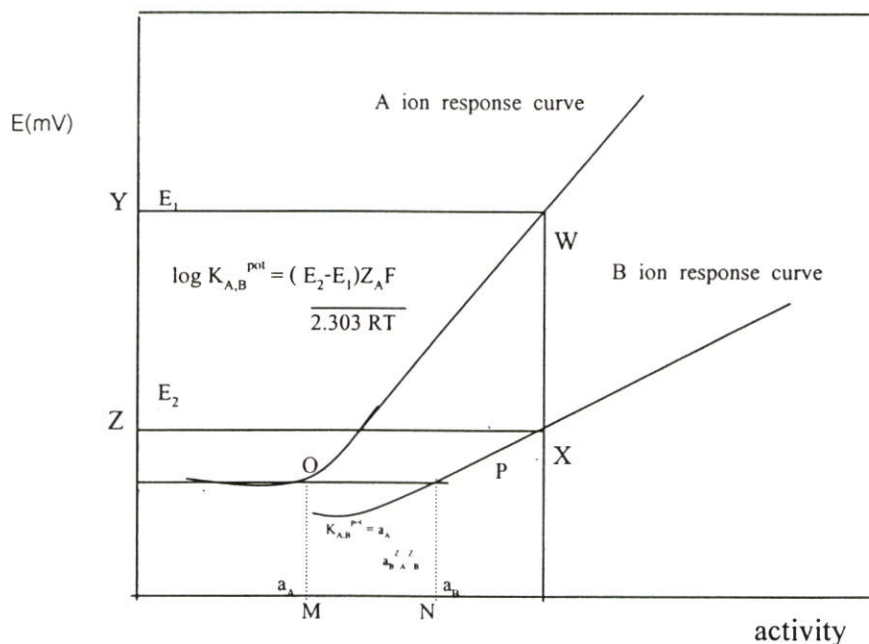
ข. วิธีทำให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน (Iso-potential method)

วิธีนี้คล้ายกับวิธีแรกคือวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่มีไอออนที่จะวิเคราะห์ A ที่แอทวิตีต่าง ๆ และวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่มีเฉพาะไอออนรบกวน B ที่แอทวิตีต่าง ๆ และหาค่า  $K_{A,B}^{pot}$  ได้โดยทำวิธีการเดียวกับวิธีทำแอทวิตีเท่ากันแต่จะต่างกันตรงที่เป็นการหาจุดที่  $E_1 = E_2$  โดยการลากเส้นตรงตั้งให้ฉากตัดกับแกนของศักย์ไฟฟ้าเส้นกราฟทั้งสองเส้น จะได้จุดตัด O และ P จากนั้นลากเส้นตรงให้ตั้งฉากตัดกับ

แกนค่าแอกทิวิตีที่จุด M และ N ของกราฟทั้งสอง จะได้ค่า  $a_A$  และ  $a_B$  และนำไปแทนค่าในสมการ (2.15) ซึ่งได้จากการสมการ (2.12) เท่ากับ สมการ (2.13) จะได้สมการ (2.15)

$$K_{A,B}^{pot} = \frac{a_A}{(a_B)^{Z_A/Z_B}} \quad (2.15)$$

วิธีการทำให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน และวิธีทำให้แอกทิวิตีเท่ากัน แสดงได้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ โดยวิธีการทำให้แอกทิวิตีเท่ากันและวิธีทำให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน

## 2. วิธีการผสมสารละลาย (Mixed solution method)

วิธีการผสมสารละลายเป็นวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่มีทั้งแอกทิวิตีของสารที่ต้องการวิเคราะห์และไอออนรบกวน ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 วิธี ดังนี้

ก. วิธีสร้างกราฟโดยทำให้แอกทิวิตีของไอออนรบกวนคงที่ (Graphical method of fixed interfering ion activity)

วิธีนี้ได้โดยการวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าในสารละลายผสมของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์กับไอออนที่รบกวน โดยให้แอกทิวิตีของไอออนที่รบกวนคงที่ และเปลี่ยนแปลงแอกทิวิตีของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ (A) ที่แอกทิวิตีต่าง ๆ วัดศักย์ไฟฟ้า และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้ากับแอกทิวิตีของ A ดังรูปที่ 2.4 เมื่อไอออน A ลดลงการรบกวนของไอออน B จะปรากฏขึ้นมอดังช่วงที่แลง และต่อจากนั้นศักย์ไฟฟ้าจะขึ้นกับแอกทิวิตีของไอออน

A กำหนดให้จุดตัดระหว่างเส้นสัมผัสของความชันของกราฟและเส้นสัมผัสของกราฟที่ขนานกับแกน X ของ แอกทิวิตีของไอออนรบกวนที่จุด A ดังรูปที่ 2.4 คือ แอกทิวิตีของไอออน A ( $a_A$ ) ที่ จะนำไปคำนวณหาค่า  $K_{A,B}^{Pot}$  ในสมการที่ (2.15)

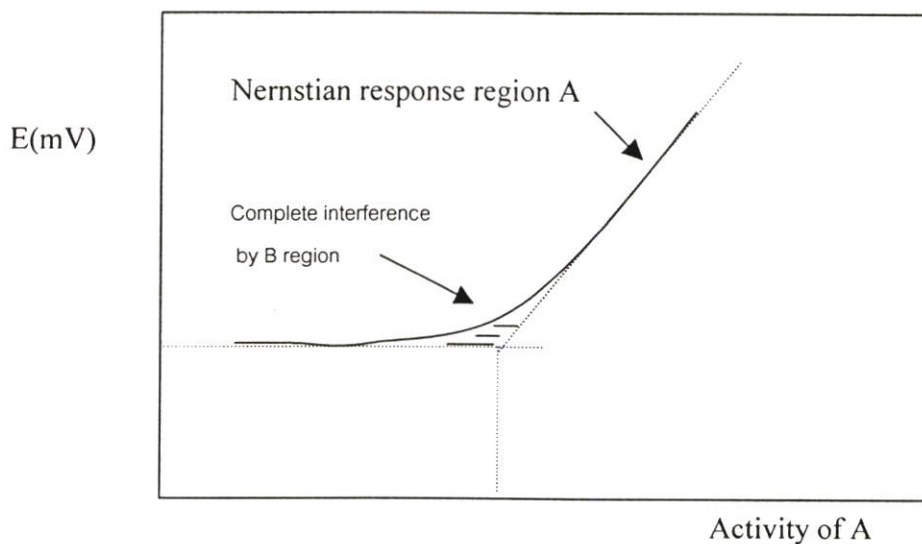
$$K_{A,B}^{pot} = \frac{a_A}{(a_B)^{Z_A/Z_B}} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $Z_A = Z_B$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$K_{A,B}^{pot} = \frac{a_A}{a_B} \quad (2.16)$$

ข. วิธีสร้างกราฟโดยกำหนดให้แอกทิวิตีของไอออนที่จะวิเคราะห์คงที่ (Graphical method of fixed primary ion activity)

วิธีนี้จะตรงข้ามกับวิธีการแรกคือเป็นวิธีที่ทำให้แอกทิวิตีของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ A คงที่ และเปลี่ยนแปลงแอกทิวิตีของไอออนที่รบกวน B ที่แอคทิวิตีต่าง ๆ วิธีนี้เป็นประโยชน์มากในการคำนวณการรบกวนของ  $H^+$  ต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนสำหรับตรวจไอออนบวก และ  $OH^-$  ต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนสำหรับไอออนลบ วิธีการคำนวณจะเหมือนกันกับวิธีการแรกดัง แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ โดยวิธีกำหนดให้แอกทิวิตีของไอออนรบกวนคงที่และวิธีกำหนดให้แอกทิวิตีของไอออนที่จะวิเคราะห์คงที่

ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ ซึ่งถ้าค่า  $K_{A,B}^{Pot} < 1$  แสดงว่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วมีการตอบสนองต่อไอออนที่ต้องการวิเคราะห์เป็นส่วนใหญ่ และในทางตรงข้ามจะมีการตอบสนองต่อไอออนรบกวน B เมื่อ  $K_{A,B}^{Pot} > 1$

### 2.1.5 เวลาการตอบสนอง (Response time)

เวลาการตอบสนองคือเวลาที่ใช้ในการทำให้ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเข้าสู่สมดุลหรือคงที่ และในทางปฏิบัติสามารถหาเวลาการตอบสนองได้หลายวิธี ดังเช่นวิธีต่อไปนี้

#### ก. วิธีการจุ่ม (Immersion method)

วิธีการจุ่มทำได้โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนและขั้วอ้างอิงในสารละลายที่มีแอกทิวิตี  $a_{A1}$  และวัดจนได้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่จะได้  $E_{(คงที่)}$  ต่อจากนั้นจุ่มขั้วไฟฟ้าลงในสารละลายที่ต้องการทดสอบที่มีแอกทิวิตี  $a_{A2}$  ซึ่งค่าแอกทิวิตีที่เลือกควรมีความแตกต่างกันดังนี้คือ  $[a_{A1}/a_{A2}] \approx 10^3/1$  หรือ  $1/10^3$  และวัดศักย์ไฟฟ้าจนกระทั่งสมดุลจะได้  $E'_{(คงที่)}$

ต่อจากนั้นล้างและเช็ดขั้วทั้งสองให้แห้ง แล้วจุ่มในสารละลายที่มี  $a_{A1}$  ทันทัน และจับเวลาจนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่สมดุลช่วงเวลาขณะที่เมื่อค่าศักย์ไฟฟ้า  $E$  เบี่ยงเบนไปจากศักย์ไฟฟ้าที่สมดุล  $1 \text{ mV}$  เวลาที่ได้เป็นเวลาการตอบสนอง ถ้า ช่วงเวลา

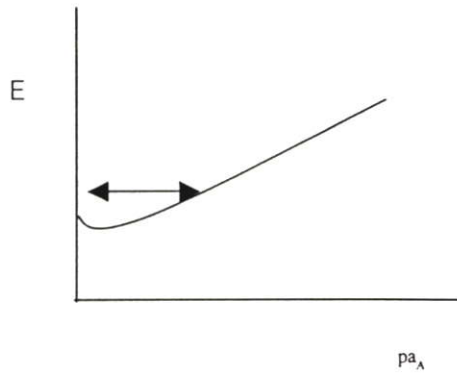
$$E - E'_{(คงที่)} = \{E_{(คงที่)} - E'_{(คงที่)}\} \times 95\% \text{ คือเวลาการตอบสนอง 95\%}$$

#### ข. วิธีต่อเนื่อง (Continuous method)

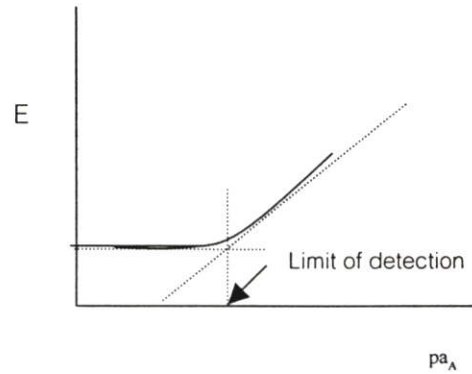
จุ่มขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนและขั้วอ้างอิงลงในสารละลายทดสอบ และบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลาจนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่สมดุล ต่อจากนั้นเติมจำนวนไอออน A หรือปริมาณที่แน่นอนลงไป ในสารละลายทดสอบ และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลใหม่ เวลาที่ใช้คือเวลาการตอบสนองที่เสนอโดย IUPAC หรือ 95% ของเวลาการตอบสนอง

### 2.1.6 ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้ (Detection limit)

ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน หมายถึง ความเข้มข้นที่ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีการเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของช่วง 1 ดังรูปที่ 2.5 ก ซึ่งในทางปฏิบัติหาได้โดยการหาจุดตัดระหว่างเส้นสัมผัสของความชันของกราฟและเส้นสัมผัสในแกนอนที่ขนานกับแกน X ซึ่งศักย์ไฟฟ้าไม่ขึ้นกับแอกทิวิตีของไอออนดังรูปที่ 2.5 ข



รูปที่ 2.5 ก



รูปที่ 2.5 ข

รูปที่ 2.5 ก ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้ของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนในทางทฤษฎี

รูปที่ 2.5 ข ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้ของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนในทางปฏิบัติ

ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนขึ้นกับระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้ด้วย ซึ่งถ้ามีค่าต่ำแสดงว่ามีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สูง แต่กราฟมาตรฐานที่อยู่ใกล้กับจุดระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้จะมีความแม่นยำและความเที่ยงในการวิเคราะห์ต่ำ เนื่องจากความไม่เสถียรของศักย์ของขั้วไฟฟ้าที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ

## 2.2 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วโดยใช้ ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว

### 2.2.1 วิธีสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve method) [4]

เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแอกทิวิตีของไอออน โดยทั่วไปเรานิยมที่จะวิเคราะห์หาปริมาณไอออนในหน่วยของความเข้มข้นมากกว่าค่าแอกทิวิตี ในการทำกราฟมาตรฐานจะต้องเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เฉื่อยให้มากเกินไปจนเกินพอลงในสารละลายมาตรฐานและตัวอย่างในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตีคงที่ จากสมการเนินสต์จะได้

$$\begin{aligned}
 E_{\text{cell}} &= k - 0.0591 \log a \\
 &= k - 0.0591 \log f - 0.0591 \log C \\
 &= k - 0.0591 \log C
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

เมื่อ  $k$  และ  $k'$  เป็นค่าคงที่

แม้ว่าเราจะไม่ทราบค่า  $f$  แต่เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $E_{cell}$  ของสารละลายตัวอย่างมาเทียบกับกราฟมาตรฐานนี้ก็สามารถคำนวณหาความเข้มข้นของตัวอย่างได้

### 2.2.2 วิธีเติมสารมาตรฐาน (Standard addition method)

วิธีนี้ให้เติมสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นมากกว่าตัวอย่างประมาณ 10 เท่าโดยต้องทราบปริมาตรสารละลายตัวอย่าง และสารละลายมาตรฐานที่เติมลงไป จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นของสารตัวอย่างได้ดังนี้

$$C_x = \frac{C_s V_s}{(V_x + V_s) \times 10^{-n\Delta E/0.0591} - V_x} \quad (2.18)$$

เมื่อ

$C_x$	=	ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง
$C_s$	=	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน
$V_x$	=	ปริมาตรของสารละลายตัวอย่าง
$V_s$	=	ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน
$n$	=	จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยา
$\Delta E$	=	ศักย์ไฟฟ้าหลังเติมสารละลายมาตรฐาน-ศักย์ไฟฟ้าก่อนเติมสารละลายมาตรฐาน

สมการนี้เป็นการคำนวณที่แก้ไขข้อผิดพลาดอันเนื่องจากการเจือจางแล้ว (dilution effect)

การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคทางโพเทนชิอเมตริกส่วนใหญ่จะเป็นการวัดศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่เหมาะสมกับขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยใช้กราฟมาตรฐานหรืออ่านค่า  $pI$  ของไอออน  $I$  โดยตรงจากเครื่องวัด ( $pI$  meter) หรืออาจจะหาโดยวิธีการเติมสารมาตรฐาน (standard addition) กราฟที่ได้จากการพล็อตความต่างศักย์ที่วัดได้กับค่า  $\log$  ของแอกทิวิตีของไอออนที่ขั้วไฟฟ้าตอบสนองจะเป็นเส้นตรงตามสมการ

$$E = K + \frac{0.0591}{Z_A} \log a_A \quad (2.19)$$

แต่เนื่องจากสารละลายที่ทำกรวิเคราะห์มักจะมีมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำทำให้ค่าแอกทิวิตีของไอออนมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นของไอออนนั้น ๆ ทำให้การพล็อตกราฟมาตรฐานโดย

ทั่วไปในทางปฏิบัติเป็นการพล็อตระหว่าง  $\log$  ของความเข้มข้นของไอออนกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กโทรด และกราฟที่ได้ค่อนข้างจะเป็นเส้นตรง

ในกรณีที่มีการวิเคราะห์จะกระทำโดยการอ่านค่าโดยตรงจากเครื่องวัดที่เป็นแบบ pH-มิเตอร์จำเป็นจะต้องมีสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นสองค่า โดยที่ค่าหนึ่งต่ำกว่าค่าที่ควรจะเป็นของสารตัวอย่าง และอีกค่าหนึ่งจะต้องสูงกว่า ในการวัดนั้น จะใช้สารละลายมาตรฐานของไอออนที่สนใจ มาปรับค่าของเครื่องวัดให้อ่านค่าได้สอดคล้องกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทั้งสองดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามในการวัดโดยวิธีนี้หรือการสร้างกราฟมาตรฐานต้องมั่นใจว่าสารละลายทั้งหลายที่ทำการวัดจะต้องมีสารที่ระบวงวนการวิเคราะห์ในปริมาณที่เท่ากัน และการกระทำเช่นนั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ยากมากในทางปฏิบัติ ส่วนใหญ่เนื่องจากสารตัวอย่างจริง ๆ นั้น มักจะไม่มีผู้ใดทราบถึงชนิดและปริมาณของสารที่จะระบวงวนที่แท้จริง ดังนั้นในทางปฏิบัติเทคนิคการเติมสารมาตรฐาน (standard addition technique) จึงเป็นวิธีที่จะแก้ไขปัญหาลักษณะนี้ได้ซึ่งจะใช้การคำนวณโดยการเติมสารละลายมาตรฐานของไอออนที่สนใจเพียงครั้งเดียว ทำการวัดความต่างศักย์ของสารละลายตัวอย่างก่อน และหลังจากเติมสารมาตรฐานทำให้ได้สมการดังนี้

ก. ก่อนการเติมสารมาตรฐาน

$$E_1 = K + \frac{0.0591}{Z} \log C_{unk} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $C_{unk}$  เป็นความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างที่มีปริมาตร  $V \text{ cm}^3$

ข. เมื่อเติมสารมาตรฐานเข้มข้น  $C_s$  ปริมาตร  $v \text{ cm}^3$  ลงไป

$$E_2 = K + \frac{0.0591}{Z} \log \left| \frac{VC_{unk} + vC_s}{V + v} \right| \quad (2.21)$$

นำสมการที่ (2.21) ลบด้วยสมการที่ (2.20) จะได้

$$E_2 - E_1 = E = \frac{0.0591}{Z} \log \left| \frac{VC_{unk} + vC_s}{(V + v)C_{unk}} \right| \quad (2.22)$$

สมการที่ 2.22 นี้ จะสามารถใช้ในการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างได้

## 2.3 ตะกั่ว (Lead) [5][6]

ตะกั่ว (Pb) เป็นโลหะหนักในหมู่ IV A ของตารางธาตุ มีมวลอะตอม 207.22 จุดหลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1470 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 11.34 มีลักษณะอ่อน เป็นสีเทา(gray) ไม่เปราะสามารถดัดได้ง่าย เป็นตัวนำไฟฟ้าที่เร็ว แต่คงทนต่อการสึกกร่อน ละลายได้เล็กน้อยในน้ำเย็นและน้ำร้อน ละลายได้ดีในกรดไนตริก และกรดซัลฟูริกที่ร้อน ตะกั่วที่ปรากฏเป็นธาตุอิสระมีน้อย ส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารประกอบ เช่น แร่ gellenite หรือ gelena ซึ่งเป็นซัลไฟด์ของตะกั่ว (PbS) แร่ cerussite ( $PbCO_3$ ), anglesite ( $PbSO_4$ ), pyromophite ( $PbCl_2 \cdot 3Pb_3(PO_4)_2$ ), minium ( $Pb_3O_4$ ) เป็นต้น

ในธรรมชาติทั่วไปตะกั่วจะเจือปนได้ทั้งในดิน หิน น้ำ อากาศ และพืช แต่มีปริมาณค่อนข้างต่ำ กล่าวคือ ในดินจะมีเฉลี่ย 5-25 ppm ในน้ำ 1-60 ppb ในอากาศ 0.0001-0.001  $\mu g/m^3$  และในพืช 0.1-2.5 ppm การเจือปนของตะกั่วในธรรมชาติมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เช่นในแหล่งน้ำตรวจพบตะกั่วได้ตั้งแต่ 20 ppb จนถึง 400 ppb หรือตะกั่วจากกากแบตเตอรี่บริเวณถนนของหมู่บ้านพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ ที่ถมด้วยกากแบตเตอรี่มีตะกั่วสูงถึง 3,900 ppm ซึ่งนับว่าสูงมากเกินไปจนขีดความสามารถที่ร่างกายมนุษย์และสิ่งมีชีวิตจะทนได้

ตามปกติตะกั่วจากสิ่งแวดล้อม สามารถเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ได้ 3 ทางคือ

- 1.ทางจมูก โดยการหายใจเอาฝุ่นละอองและไอของตะกั่วเข้าไป หากเข้าทางลมหายใจประมาณ 35% ของตะกั่วทั้งหมดที่ปนกับลมหายใจเข้า จะถูกเก็บเข้าไปในปอด การหายใจเอาอากาศที่มีไอหรืออนุภาคตะกั่ว 1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะเพิ่มปริมาณตะกั่วในเลือดได้ 1-2 ไมโครกรัมเปอร์เซ็นต์ ตะกั่วจะถูกดูดซับได้ทุกส่วนของทางเดินหายใจตั้งแต่รูจมูกจนถึงปลายสุดของถุงลมเล็กๆของปอด และยังปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูงๆ ในส่วนลึกของปอดจะทำให้ตะกั่วดูดซับเข้าทางปอดได้ดียิ่งขึ้น ถ้าคาร์บอนไดออกไซด์บนท้องถนนและโรงงานก็จะมีส่วนในการเร่งการดูดซึมของตะกั่วได้เหมือนกัน

2. ทางปาก ตะกั่วที่เข้าไปกับอาหารไม่ว่าจะอยู่ในรูปสารละลายหรือไม่ เช่น ตะกอนตะกั่วซัลเฟต ตะกั่วซัลไฟด์ เมื่อตกถึงกระเพาะอาหารซึ่งมีกรดไฮโดรคลอริกอยู่ มันจะละลายได้มากขึ้น แม้แต่โลหะตะกั่วซึ่งแข็งก็จะกลายเป็นตะกั่วกลอไรด์ซึ่งละลายได้ดี ตะกั่วที่ละลายได้ส่วนใหญ่จะถูกดูดซึมที่ส่วนต้นของลำไส้เล็ก ส่วนที่เหลือจะถูกขับออกทางอุจจาระ

- 3.ทางผิวหนัง ตะกั่วอินทรีย์ เช่น ตะกั่วเตตระเอทิลในไอเสียรถยนต์ จะถูกดูดซึมทางผิวหนังได้ง่าย ส่วนตะกั่วอนินทรีย์จะไม่ถูกดูดซึมทางผิวหนัง ถ้าผิวหนังมีแผลหรือรอยถลอกและสัมผัสกับสารตะกั่ว โอกาสและปริมาณตะกั่วจะเพิ่มขึ้น

ตะกั่วเป็นพิษต่อร่างกายอย่างแรง ถ้าร่างกายรับตะกั่วเข้าไปปริมาณสูง โดยปกติคนเราสามารถทนต่อตะกั่วในปริมาณสูงพอสมควร อาการแพ้พิษตะกั่วสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ

1. อาการเฉียบพลัน จะเกิดเมื่อร่างกายได้รับตะกั่วเข้าไปในปริมาณมากในทันทีทันใด เช่น ในเลือดมีมากกว่า 0.8 ppm จะเกิดอาการปวดท้องอย่างแรง อุจจาระสีดำ (เกิดจาก PbS ในอุจจาระ) เกิดอาการช็อก(shock) ตื่นเต้นง่าย ความจำเสื่อม ปกติจะเกิดกับคนงานที่ทำงานในอุตสาหกรรมที่ใช้ตะกั่วในกระบวนการผลิต

2. อาการเรื้อรัง ซึ่งจะเกิดกับคนทั่วไปที่มีการสะสมตะกั่วในร่างกายโดยจะมีอาการทางประสาทและทางเดินอาหารคือ นอนไม่หลับ ตาพร่าเกิดภาพหลอน ปวดศีรษะ เบื่ออาหาร ตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายและสะสมในร่างกายจะมีผลต่ออวัยวะต่างๆในร่างกายมากมาย เช่น เยื่อหุ้มเซลล์ เม็ดเลือดแดง ไต สารพันธุกรรม สมอ และระบบประสาท ดังนั้น โรคที่เกิดจากพิษของตะกั่วมีมากมาย เช่น โรคโลหิตจาง เพราะตะกั่วจะเป็นตัวไปขัดขวางการสร้างฮีโมโกลบินของเม็ดเลือดแดง ความจำเสื่อม เพราะตะกั่วจะทำลายระบบประสาทที่มีหน้าที่จดจำ และยังเกี่ยวข้องกับการรับรู้ความรู้สึกด้วย โรคเก๊าท์(gout) เนื่องจากทำให้การกรองที่ไตลดลง จึงมีการขับกรดยูริกออกจากร่างกายน้อยกว่าปกติ

นอกจากนี้ตะกั่วยังรบกวนการทำงานทางชีวภาพของ DNA และ RNA ดังนั้น จึงถือว่าสารตะกั่วเป็นสารก่อการกลายพันธุ์ด้วย และเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง ตะกั่วยังมีผลกระทบทางอ้อมต่อร่างกาย โดยทำให้ความต้านทานของร่างกายต่อโรคหลายชนิดลดลง เช่น โรคไทฟอยด์

ตารางที่ 2.4 อุตสาหกรรมและหน่วยงานกับขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยตะกั่วในสิ่งแวดล้อม

ประเภทอุตสาหกรรม	ขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับสารพิษ	ชนิดสารพิษ
-อุตสาหกรรมผลิตเม็ดสีอนินทรีย์ (Inorganic Pigment Manufacturing)	-การล้าง	ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม
	-การกรอง	ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม
	-การเหวี่ยงตะกอนแคดเมียม และสารประกอบแคดเมียม	แคดเมียม
	-น้ำทิ้งจากการล้างแก๊ส	ปรอท ตะกั่ว โครเมียม อาร์เซนิก
-อุตสาหกรรมผลิตสารอนินทรีย์(Inorganic Chemicals Manufacturing)	-การกรอง	ปรอท ตะกั่ว โครเมียม อาร์เซนิก
	-การเหวี่ยงตะกอน	ปรอท ตะกั่ว โครเมียม อาร์เซนิก
	-น้ำทิ้งจากการล้างแก๊ส	ปรอท ตะกั่ว โครเมียม อาร์เซนิก
-อุตสาหกรรมการผลิตสารอินทรีย์ (Organic Chemicals Manufacturing)	-การเก็บฝุ่นชนิดเปียก	ปรอท ตะกั่ว โครเมียม อาร์เซนิก
	-น้ำล้าง	ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม
-อุตสาหกรรมผลิตยา (Pharmaceutical Manufacturing)	-การกรอง	ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม
	-น้ำทิ้งจากการล้างแก๊ส	ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม
	-การกรอง	ปรอท ตะกั่ว โครเมียม อาร์เซนิก
	-การแยก	ปรอท ตะกั่ว โครเมียม อาร์เซนิก
	-การผสม	ปรอท ตะกั่ว โครเมียม อาร์เซนิก

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

ประเภทอุตสาหกรรม	ขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับสารพิษ	ชนิดสารพิษ
-อุตสาหกรรมผลิต รีเอเจนต์( Reagent Manufacturing)	-ขบวนการผลิต	ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม อาร์เซนิก
-อุตสาหกรรมแก้ว (Glass Manufacturing)	-การบดและการล้าง -การล้างแก๊ส	ตะกั่ว แคดเมียม ตะกั่ว แคดเมียม
-อุตสาหกรรมโลหะนอน เฟอร์รัส ( Nonferrous Metal Manufacturing)	-น้ำล้างแก๊ส  -การเก็บฝุ่นแก๊ส	ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม อาร์เซนิก ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม อาร์เซนิก
-อุตสาหกรรมเหล็กและ เครื่องกล ( Metallic Goods Manufacturing and Machinery Industry)	-อิเล็กทรอนิกส์ -การผลิตอิเล็กทรอนิกส์ และตะกั่ว -น้ำทิ้งจากการล้างแก๊ส	โครเมียม ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม
-การชุบโลหะ (Electroplating Facilities)		แคดเมียม โครเมียม
-สถาบันหรือห้องปฏิบัติการ สำหรับงานวิจัย,ทดสอบ และเทคโนโลยี (Institute or Laboratory for Research, Examination Test and Technology)	-การล้าง	ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม อาร์เซนิก

จากตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่ามีอุตสาหกรรมและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยสารตะกั่วในธรรมชาติ

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี 1971 Hiroshi Hirata และ Kenji Higashiyama [7][8] สร้างขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็งเซรามิก เลือเฉพาะไอออนตะกั่ว ซึ่งแผ่นเยื่อเตรียมจากสารผสมของ PbS-Ag<sub>2</sub>S-Cu<sub>2</sub>S ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน นำมาอัดให้เป็นแผ่นหนา 2-3 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร แล้วนำไปอัดร้อนที่อุณหภูมิ 350-500 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศของ H<sub>2</sub>S ได้ผลการทดลองดังนี้

1. แผ่นเยื่อที่เตรียมจาก PbS ผสม Ag<sub>2</sub>S ในอัตราส่วน 30% ต่อ 70% โดยน้ำหนัก ค่าสโลปเท่ากับ 29.5 mV ที่ 25 องศาเซลเซียส การตอบสนองไว สามารถวิเคราะห์ตะกั่วได้ในช่วง 10<sup>-1</sup>-10<sup>-7</sup> M

2. แผ่นเยื่อที่เตรียมจาก PbS บริสุทธิ์ไม่มี Ag<sub>2</sub>S ผสม เมื่อวัดด้วยเทคนิคอิมิตชันสเปกโทรสโกปี ไม่มีการตอบสนองของ Pb<sup>2+</sup> แต่เมื่อมี Ag<sub>2</sub>S ผสมน้อยกว่า 0.01 % โดยน้ำหนัก สภาพไวจะดีขึ้นและค่าศักย์เปลี่ยนเป็น 27 mV เมื่อผสม Ag<sub>2</sub>S ลงไปอีก 10 เท่า สามารถวัดไอออนตะกั่วได้ในช่วง 10<sup>-1</sup> - 10<sup>-5</sup> M

3. แผ่นเยื่อที่มี PbS 30% Ag<sub>2</sub>S 40-70%และมี Cu<sub>2</sub>S 5-20% ค่าสโลปเป็นไปตามสมการของเนินสต์ แต่ถ้าแผ่นเยื่อมี Cu<sub>2</sub>S ผสมมากกว่า 30% ค่าสโลปจะเบี่ยงเบน

4. แผ่นเยื่อเซรามิกที่ได้รับความร้อนจากเตาไฟฟ้ามีความหนาแน่นมากกว่า และไม่มีรูพรุนเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเยื่อที่อัดร้อน และแผ่นเยื่อที่มีส่วนผสมของ PbS ประมาณ 30% ,50% และ 80%โดยน้ำหนัก ค่าสโลปเป็นไปตามสโลปของเนินสต์

ต่อมา ทั้งสองได้ใช้ Lead selenide (PbSe) ,Lead telluride (PbTe) ผสม Ag<sub>2</sub>S ทำแผ่นเยื่อสถานะของแข็ง โดยอัดร้อนที่อุณหภูมิ 100-600 องศาเซลเซียส ในโอกาสเฉื่อยและการอัดแน่นพบว่าแผ่นเยื่อที่อัดร้อนมีสภาพไว และการตอบสนองดีกว่าการอัดแน่น

ในปี 1972 Marco Mascini และ Arnaldo Liberti [9] ได้สร้างขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็งชนิดแผ่นเยื่อไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เลือเฉพาะไอออนตะกั่ว โดยแผ่นเยื่อมีขนาด 1.1 cm<sup>2</sup> เตรียมจากใช้ PbS หลอมรวมกับพอลิเมอร์ หรือใช้ PbS ผสม Ag<sub>2</sub>S แล้วหลอมรวมกับพอลิเมอร์ และใช้ 10<sup>-3</sup> M Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - 10<sup>-2</sup> M KCl เป็นสารละลายอ้างอิงภายในมี Ag/AgCl เป็นขั้วอ้างอิงภายใน ใช้ขั้วคาโธดเป็นขั้วอ้างอิง ผลปรากฏว่าแผ่นเยื่อที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจาก PbS ผสม Ag<sub>2</sub>S ให้ค่าการตอบสนองดีกว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจาก PbS เพียงอย่างเดียว ความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ 10<sup>-4</sup> - 10<sup>-1</sup> M อายุการใช้งานประมาณ 1 สัปดาห์ แต่ถ้าแผ่นเยื่อผ่านการให้ความร้อน 600 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง จะมีอายุการใช้งาน 45 วัน มีการแทรกสอดจากไอออน Hg<sup>+</sup> ,Hg<sup>2+</sup> ,Ag<sup>+</sup> และ Cu<sup>2+</sup> ซึ่งมีค่า K<sub>sp</sub> ต่ำกว่า

ปี 1973 J.D. Czaban และ G.A. Rechnitz[10] สร้างขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็งชนิดปลายเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100-150 ไมโครเมตร เลือกเฉพาะโลหะหนักพวก  $Ag^+$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ ไอออนเฮไลด์พวก  $S^{2-}$ ,  $Br^-$ ,  $Cl^-$  และ  $I^-$  ในสารตัวอย่างปริมาณ 0.05 ไมโครลิตร ผลปรากฏว่า แผ่นเยื่อที่ทำขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วเตรียมจากการตกตะกอนร่วมของ  $PbS-Ag_2S$  นำไปอัดรีดที่ความดันประมาณ 115,000 psi 17 ชั่วโมง แผ่นเยื่อจะไม่แตก การตอบสนองต่อไอออนที่ระดับต่ำเท่ากับ  $10^{-5}$  M ในสารตัวอย่างน้อยกว่า 1 ไมโครลิตร ภายใน 10 วินาที ค่าศักย์คงที่ 2-3 นาที สำหรับแผ่นเยื่อที่ทำขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนแคดเมียม มีการตอบสนองที่  $10^{-5}$  M ศักย์คงที่ภายใน 1 นาที ขั้วไฟฟ้าที่มีปลายเล็กเลือกเฉพาะไอออนไอโอดีนเป็นขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็งที่ยังไม่สมบูรณ์แต่เหมาะที่จะใช้สำรวจหาวัสดุที่เป็นตัวนำที่สมบูรณ์ต่อไป

## บทที่ 3

### การดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อพัฒนาข้าวไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็งเลือกเฉพาะ ไอออนตะกั่ว ซึ่งผู้วิจัยจะดำเนินการวิจัยดังนี้

- 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี
- 3.2 การเตรียมข้าวไฟฟ้าทำงาน
- 3.3 การทำข้าวไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์
- 3.4 การทดสอบประสิทธิภาพข้าวไฟฟ้าทำงาน
- 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล
- 3.6 สถานที่ทำการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. pH/Ion/Meter รุ่น 720A ผลิต โดย Orion
2. Stirrers,magnetic-hotplate รุ่น REC-G ผลิต โดย IKAMAG
3. ข้าวอ้างอิงใช้ Ag/AgCl อิเล็กโทรด
4. สายไฟฟ้าพร้อมแจ็ก
5. กระดาษกรองวูดแมนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11.0 เซนติเมตร
6. ลวดเงิน
7. เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงหม้อแปลง AC-DC
8. ข้าวโลหะแพลทินัม
9. เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด ยี่ห้อ PAG OERLIKON AG. แบบ TYPE 240A ผลิต โดย ประเทศสวีตเซอร์แลนด์
10. เตาไฟฟ้าพร้อมที่คน ยี่ห้อ IKA ผลิต โดยประเทศเยอรมันนี
11. เตาเผาอุณหภูมิสูง ยี่ห้อ BLUE M. แบบ M.30A.-2C.
12. แม่พิมพ์ KBr DIE
13. เครื่องอัด HYDARULIC PRESS
14. หลอดแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm
15. เครื่องขัด-แต่ง (Grinding Machine)
16. กระดาษทราย เบอร์ P 1200C

### 3.1.2 สารเคมี

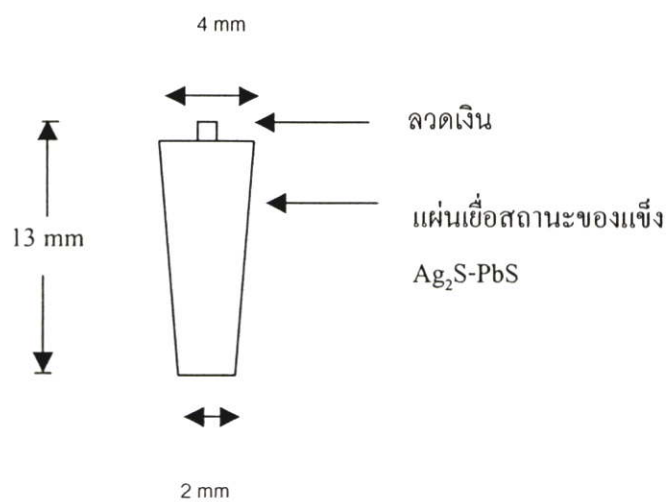
1. ซิลเวอร์ไนเตรท (AR) ผลิตโดย APS Ajax Finechem
2. เลดไนเตรท (AR) ผลิตโดย APS Ajax Finechem
3. โซเดียมซัลไฟด์ (AR) ผลิตโดย AJAX CHEMICALS
4. โปแทสเซียมคลอไรด์ (AR) ผลิตโดย CARLO ERBA
5. ู้น
6. อะซีโตน
7. กาวอีพอกซี

### 3.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงาน มีขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมแผ่นเยื่อสถานะของแข็ง
2. การทำลวดอ้างอิงใช้ทำขั้วไฟฟ้า
3. การประกอบชิ้นส่วนของขั้วไฟฟ้าทำงาน

#### 3.2.1 การเตรียมแผ่นเยื่อสถานะของแข็ง [10]

1. ชั่ง  $Pb(NO_3)_2$ ,  $AgNO_3$ ,  $Na_2S$  2.0763, 2.0564 และ 3.8462 กรัม ตามลำดับ นำสารแต่ละชนิดมาทำให้เป็นสารละลาย ปริมาตร 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น
2. ผสมสารละลาย  $Pb(NO_3)_2$  และ  $AgNO_3$  เข้าด้วยกัน
3. ค่อยๆเติมสารละลาย  $Na_2S$  ลงในสารละลายข้อ 2 จะเกิดการตกตะกอนร่วมของ  $Ag_2S-PbS$
4. กรองตะกอน  $Ag_2S-PbS$  และล้างด้วยน้ำร้อน 2-3 ครั้ง ตามด้วยอะซีโตน
5. อบ ตะกอน  $Ag_2S-PbS$  ที่กรองได้ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15-18 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
6. บดตะกอน  $Ag_2S-PbS$  ให้ละเอียด แล้วนำไปชั่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 2 กรัม
7. นำตะกอน  $Ag_2S-PbS$  2 กรัม และลวดเงินยาวประมาณ 1 เซนติเมตร เข้าเครื่องอัด KBr die เพื่ออัดให้เป็นเม็ด ที่อุณหภูมิห้อง
8. นำเม็ดแผ่นเยื่อ  $Ag_2S-PbS$  ออกจากเครื่องอัด จะได้เม็ดแผ่นเยื่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร นำไปขัด-แต่ง ด้วยเครื่องขัด เพื่อให้มีรูปร่างดังรูปที่ 3.1

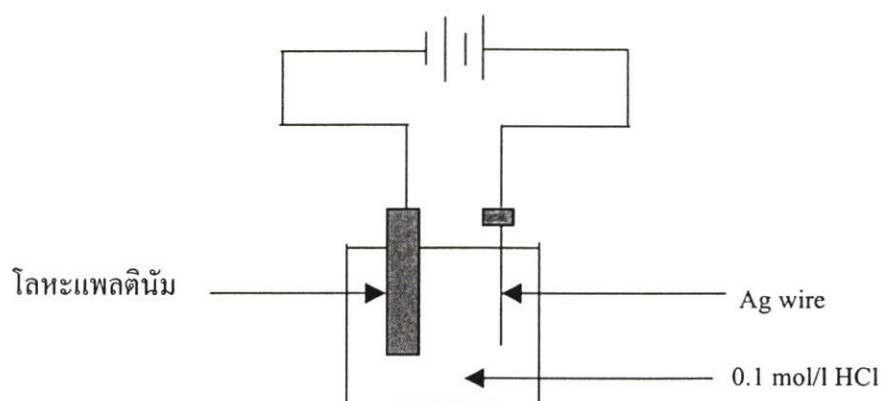


รูปที่ 3.1 แผ่นเชื่อมสถานะของแข็ง  $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$

### 3.2.2 การทำลวดอ้างอิงใช้ทำขั้วไฟฟ้า[11]

เตรียมโดยการ anodizing ลวดเงินด้วยกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง 0.1 mol/l

ดังรูปที่3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการ anodizing

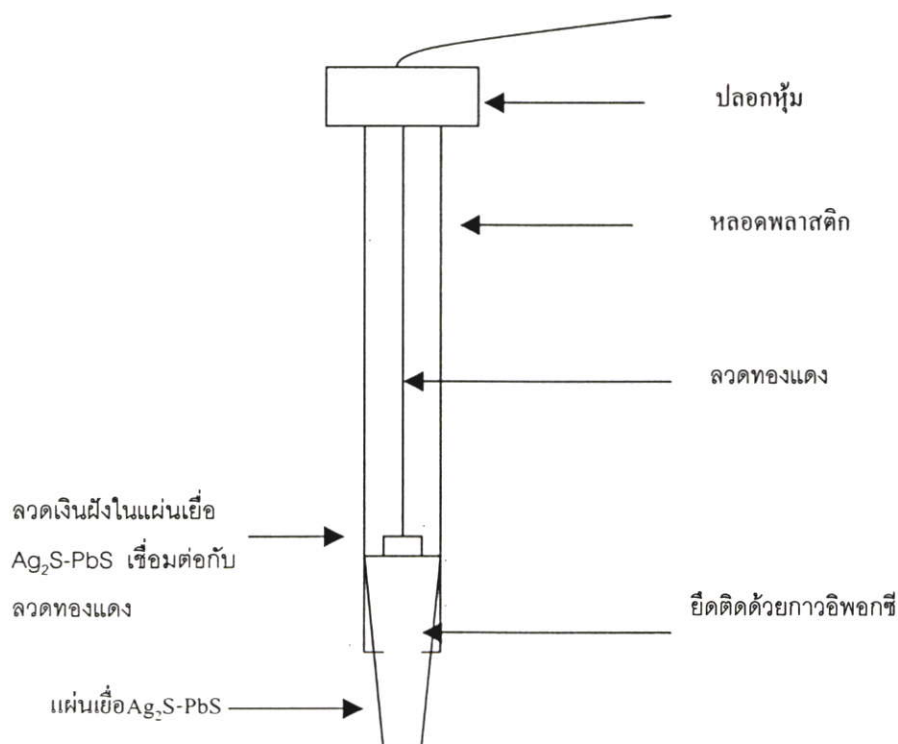
วิธีการ anodizing มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดลวดเงินยาว 15 เซนติเมตร ด้วย  $\text{NH}_4\text{OH}$  ผสมกับ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ด้วยอัตราส่วน 1:3 โดยปริมาตร แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น
2. จัดเตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.2
3. ปรับอุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส และความหนาแน่นกระแส  $1 \text{ mA Vm}^{-2}$
4. ดำเนินการ anodizing เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
5. หลังจากทำคลอโรไดเซชัน (Chlorodization) เสร็จแล้วจุ่มขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ในสารละลายไฮโดรคลอริกเจือจาง 1-2 วัน แล้วนำไปจุ่มในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์อิ่มตัว

### 3.2.3 การประกอบชิ้นส่วนของขั้วไฟฟ้าทำงาน

มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำลวดทองแดง เชื่อมต่อกับลวดเงินที่โผล่ออกมาจากแผ่นเยื่อ  $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$
2. นำแผ่นเยื่อ  $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$  ติดกับปลายหลอดพลาสติกด้วยกาวอีพอกซี
3. เมื่อประกอบชิ้นส่วนเรียบร้อยแล้วจะได้ขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็งเลือกเฉพาะ ไอออนตะกั่ว ดังรูป 3.3

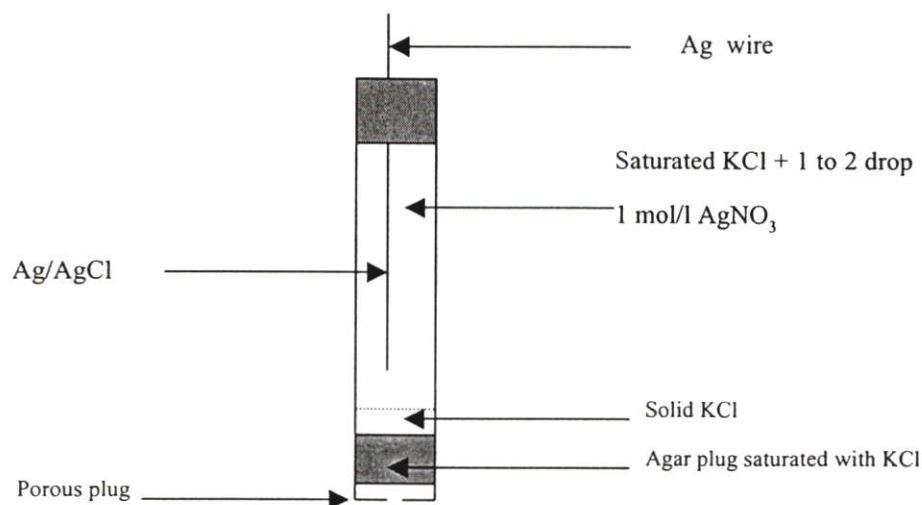


รูปที่ 3.3 ขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็งเลือกเฉพาะ ไอออนตะกั่วที่ทำจากแผ่นเยื่อ  $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$  เมื่อประกอบชิ้นส่วนเสร็จ

### 3.3 การทำขั้วอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

เตรียม สารละลายวุ้นที่อิ่มตัวด้วย KCl (Agar plug saturated) ดังนี้

1. ใช้วุ้น 5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเติม KCl 35 กรัม นำไปต้มให้เดือด ตั้งทิ้งไว้พอสารละลายวุ้นอุ่นๆ ให้เทลงในหลอดแก้ว ทิ้งไว้ให้เย็น
2. เติม KCl ที่เป็นของแข็งลงไปเล็กน้อย แล้วเติมสารละลาย KCl ที่อิ่มตัวลงไป หยด 1 mol/l  $\text{AgNO}_3$  ลงไป 1-2 หยด เพื่อให้แน่ใจว่าสารละลายอิ่มตัวด้วย AgCl
3. ใส่ลวด Ag/AgCl ที่เตรียมจากข้อ 3.2.2 ลงไปให้สัมผัสกับสารละลายเพื่อเป็นตัวนำไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้วอ้างอิง Ag/AgCl

### 3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าทำงาน

3.4.1 การศึกษาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็งเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

วิธีทดลอง

1. เตรียมสารละลายเลดไนเตรทในช่วงความเข้มข้น  $10^{-7}$ - $10^{-1}$  mol/l
2. นำขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วและขั้วอ้างอิง(Ag/AgCl) ประกอบเข้ากับเครื่องวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือเครื่อง pH/Ion meter
3. นำมาวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายเลดไนเตรทในช่วงความเข้มข้น  $10^{-7}$ - $10^{-1}$  mol/l แล้วบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทุกๆ 10 วินาที
4. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาเป็นวินาทีแล้วหาค่าเวลาการตอบสนองจากกราฟมาตรฐาน ค่าแอกทิวิตีของไอออนตะกั่ว จำนวนโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตี( $f$ ) จากการปรับปรุงสมการของ Debye-Huckel ซึ่งเสนอโดย Robinson, Guggenheim และ Bate เมื่อความแรงของไอออนมีค่าสูง [12][13]

$$\log f_i = -0.511Z_i^2 \left[ \frac{\sqrt{\mu}}{(1 + 1.5\sqrt{\mu})} - 0.2\mu \right] \quad (3.1)$$

0.5, 0.2 และ 1.5 = ค่าคงตัว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

$f_i$  = สัมประสิทธิ์แอกทิวิตี

$Z_i$  = ประจุของไอออนที่วิเคราะห์

$\mu$  = ความแรงของไอออน ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\mu = \sum C_i Z_i^2 \quad (3.2)$$

ให้  $C_i$  = ความเข้มข้นของไอออน

$a_i$  = แอกทิวิตีของไอออน

$$a_i = f_i C_i \quad (3.3)$$

### 3.4.2 การศึกษาผลของการรบกวนของไอออนอื่น

โดยวิธีการแยกสารละลาย ทำได้โดยการแยกศักย์ไฟฟ้าของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ คือสารละลายเลดในเตรทในช่วงความเข้มข้น  $10^{-1}$ - $10^{-7}$  mol/l และไอออนที่รบกวนคือ  $\text{Cu}^{2+}$  และ  $\text{Cd}^{2+}$  ในช่วงความเข้มข้น  $10^{-1}$ - $10^{-7}$  mol/l และพลอตกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับแอกทิวิตีในกราฟเดียวกันดังรูปที่ 2.3 การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะใช้สมการ 2.14 และ สมการ 2.15

### 3.4.3 การศึกษาผลของ pH ต่อขั้วไฟฟ้าทำงาน

ทำได้โดยนำขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้น ไปวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยใช้สารละลายมาตรฐานเลดในเตรทในช่วงความเข้มข้น  $10^{-7}$ - $10^{-1}$  mol/l ที่ทำการปรับพีเอช ตั้งแต่ 2-10 ด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น  $10^{-1}$  mol/l และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น  $10^{-1}$  mol/l ที่ละหยดเทียบกับขั้วอ้างอิง (Ag/AgCl) บันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าและนำมาพลอตกราฟระหว่างค่าพีเอชกับค่าศักย์ไฟฟ้า

### 3.4.4 การศึกษาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าทำงาน

ทำได้โดยการหาค่าความชัน ระดับความเข้มข้นของสารละลายต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ และค่าเวลาการตอบสนองในช่วง 1-5 สัปดาห์ โดยทำการวัดทุกๆ สัปดาห์เป็นเวลา 5 สัปดาห์

### 3.4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้นกับเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ทำได้โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนที่สร้างขึ้น และเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ นำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกัน

## 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อทดลองเสร็จแล้วนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel Office 97 และโปรแกรม Microcal Original 3.5 เพื่อ

1. เขียนกราฟหาค่าความชัน ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ
2. หาค่าเวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้า ผลของ พีเอช ต่อขั้วไฟฟ้า ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้
3. เปรียบเทียบข้อมูลระหว่างขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้นกับเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชัน

### 3.6 สถานที่ทำการวิจัย

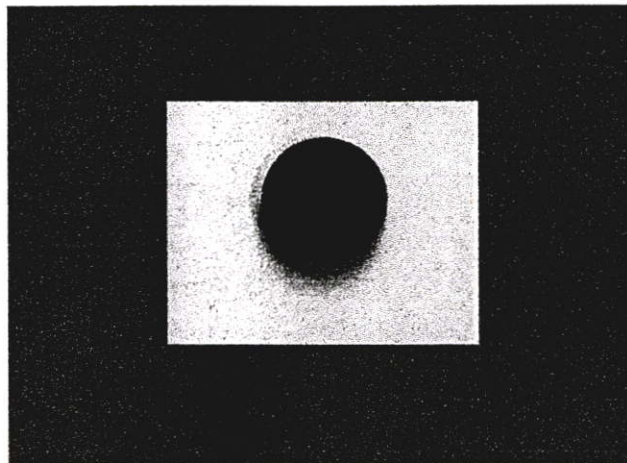
ห้องปฏิบัติการเคมีชั้น 5 อาคารวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และห้องปฏิบัติการเคมี ชั้น3 ตึกประพจน์จักษกรกิจ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 การเตรียมแผ่นเยื่อตามหัวข้อ 3.2

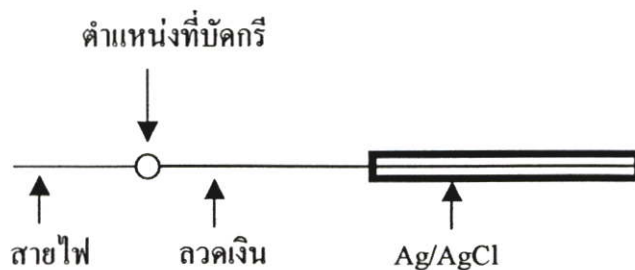
การเตรียมแผ่นเยื่อ  $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$  ให้เป็นแผ่นเยื่อเนื้อเคียวกันสถานะของแข็ง มีส่วนผสมของ  $\text{Ag}_2\text{S}$  และ  $\text{PbS}$  ในอัตราส่วน 1:1 แล้วนำมาอัดให้แน่นเป็นแผ่นเยื่อ ดังรูปที่ 4.1 วิธีการเตรียมแผ่นเยื่ออยู่ในหัวข้อ 3.2



รูปที่ 4.1 แผ่นเยื่อ  $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$  ที่ยังไม่ได้ขัดแต่ง

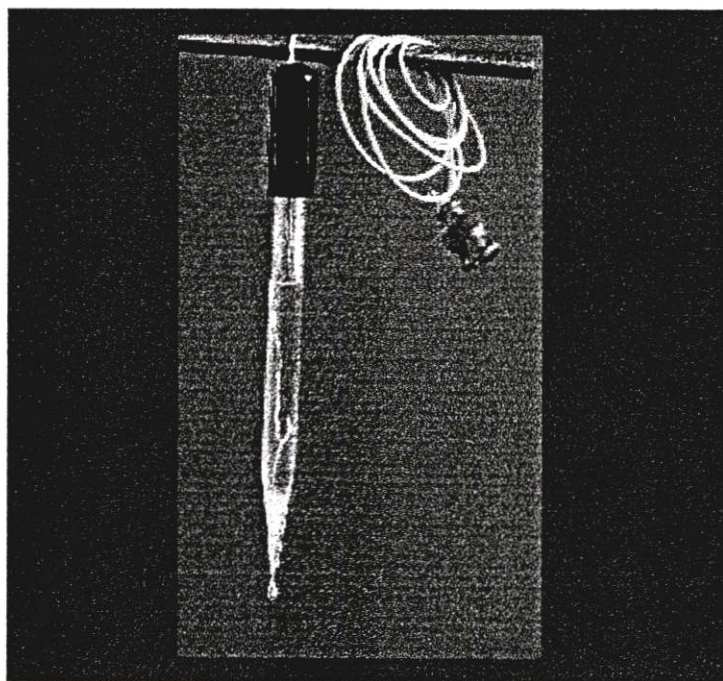
## 4.2 ขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

การเตรียมขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ ทำได้โดยนำลวด Ag/AgCl ที่ผ่านการทำ anodizing ตามหัวข้อ 3.2.2 มาเชื่อมต่อกับสายไฟฟ้าโดยการบัดกรีตรงปลายลวด Ag/AgCl ด้านที่ไม่ได้ทำ anodizing ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการเชื่อมต่อระหว่างสายไฟกับลวด Ag/AgCl

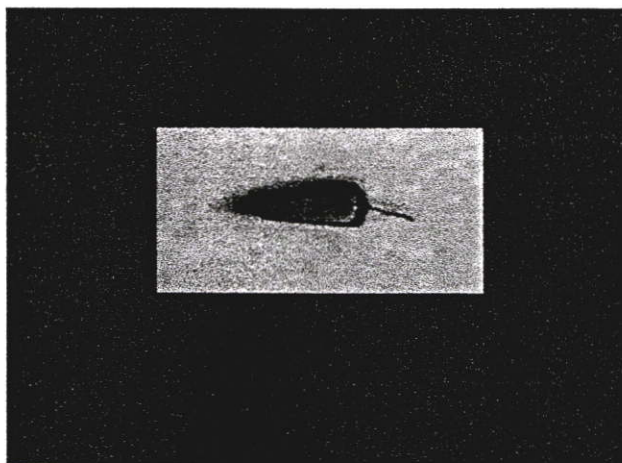
เติม agar และสารละลาย KClอิ่มตัว ที่เตรียมไว้ตามหัวข้อ3.3ลงในหลอดแก้วที่เตรียมไว้สำหรับทำขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ ดังรูปที่ 4.3



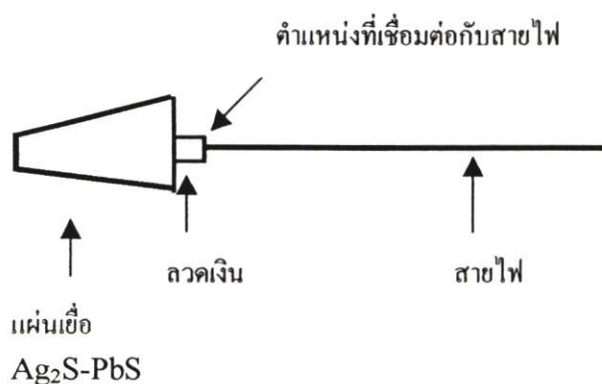
รูปที่ 4.3 ขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

### 4.3 ขั้วไฟฟ้าทำงาน

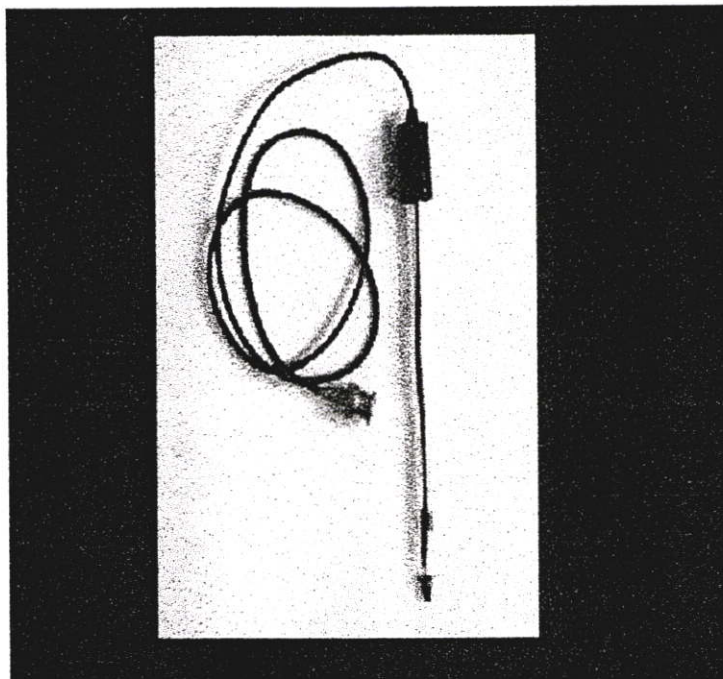
ขั้วไฟฟ้าทำงานเป็นขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเชื่อมสถานะของแข็ง ที่เตรียมได้ตามหัวข้อ 3.2 โดยนำแผ่นเชื้อ  $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$  ที่ผ่านการขัดแต่งแล้วดังรูปที่ 4.4 เชื่อมต่อกับสายไฟฟ้าตรงตำแหน่งลวดเงินที่โผล่ออกมาจากแผ่นเชื้อ โดยการบัดกรี ดังรูปที่ 4.5 แล้วประกอบเข้ากับหลอดแก้วที่เตรียมไว้สำหรับทำขั้วไฟฟ้าทำงานด้วยกาวอีพอกซี จะได้ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.4 แผ่นเชื้อ  $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$  ที่ผ่านการขัดแต่งแล้ว



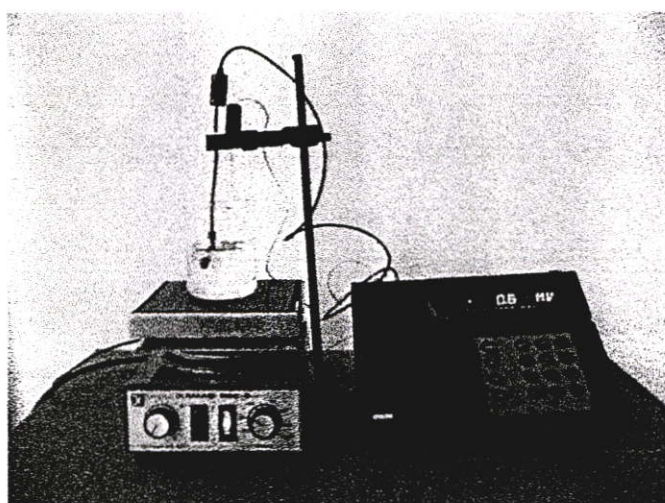
รูปที่ 4.5 การเชื่อมต่อแผ่นเชื้อ  $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$  กับสายไฟ



รูปที่ 4.6 ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะ ไอออนตะกั่วชนิดเชื่อมสถานะของแข็ง

#### 4.4 ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าทำงาน

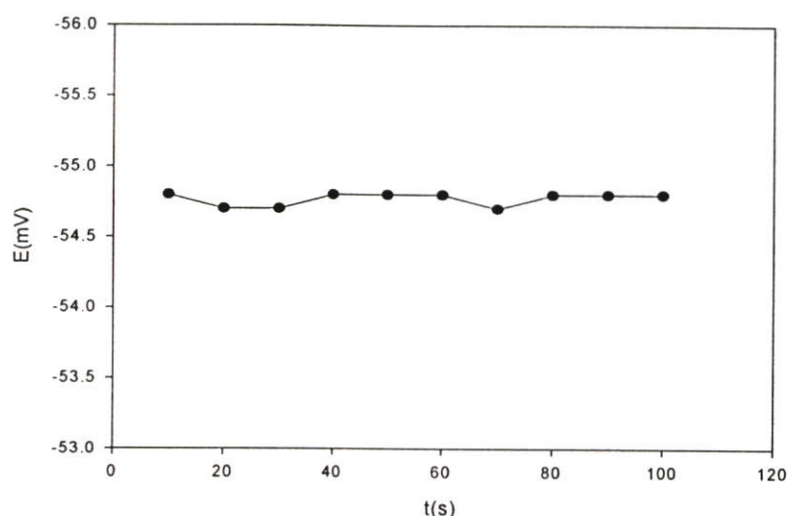
จากการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยใช้อุปกรณ์วัดศักย์ไฟฟ้าดังรูปที่ 4.7 ได้ข้อมูลดังนี้



รูปที่ 4.7 อุปกรณ์ใช้วัดศักย์ไฟฟ้า

4.4.1 เวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเยื่อสถานะของแข็งเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

เวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วที่เตรียมได้ในหัวข้อ 4.1 ศึกษาโดยวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายเลดไนเตรทในช่วงความเข้มข้น  $10^{-7}$ - $10^{-1}$  mol/l ทุกๆ 10 วินาที และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา ค่าเวลาการตอบสนองหาได้จากจุดที่กราฟเริ่มคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.8

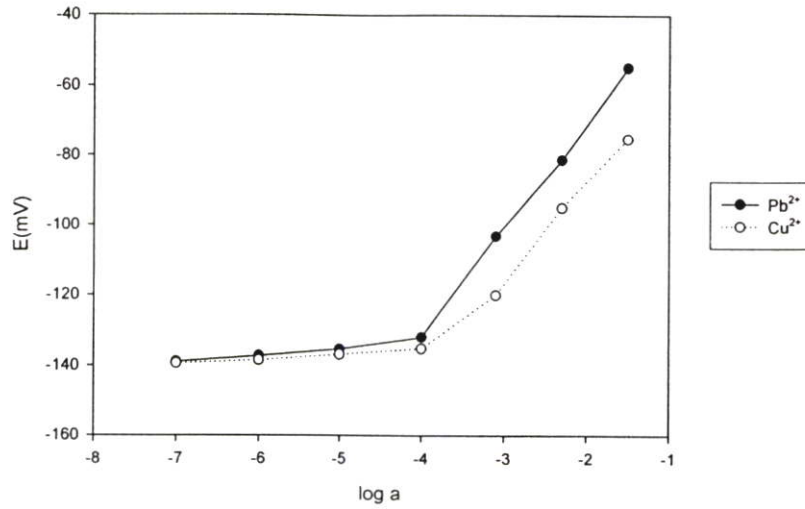


รูปที่ 4.8 เวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-1}$  mol/l

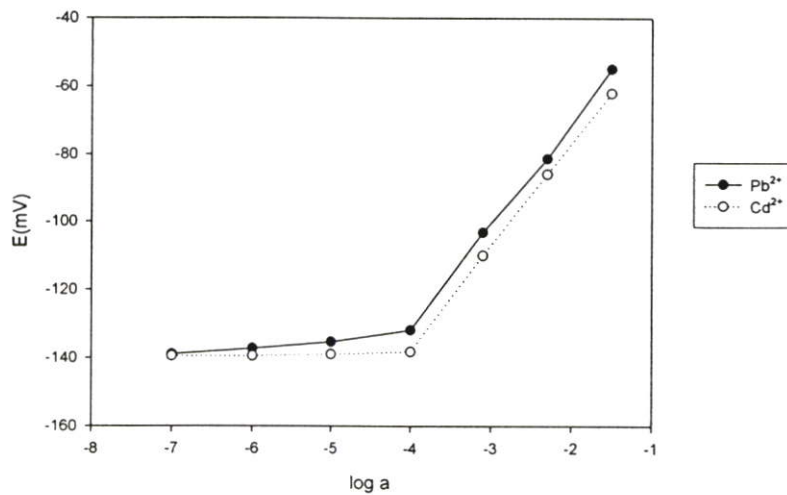
จากรูปที่ 4.8 เวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วจะอยู่ที่เวลา 40 วินาที

4.4.2 ผลของการรบกวนของไอออนอื่นต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว

การศึกษาผลของการรบกวนของไอออนอื่น โดยใช้วิธีการแยกสารละลายทำได้โดยการแยกวัดศักย์ไฟฟ้าของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์คือไอออนตะกั่วในสารละลายเลดไนเตรทในช่วงความเข้มข้น  $10^{-7}$ - $10^{-1}$  mol/l และไอออนรบกวนคือไอออนทองแดงในสารละลายคอปเปอร์(II)ไนเตรทในช่วง ความเข้มข้น  $10^{-7}$ - $10^{-1}$  mol/l และ ไอออนแคดเมียมในสารละลายแคดเมียมไนเตรทในช่วงความเข้มข้น  $10^{-7}$ - $10^{-1}$  mol/l แล้วนำข้อมูลมาพลอตกราฟระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอการิทึมของกิจกรรมในกราฟเดียวกันดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



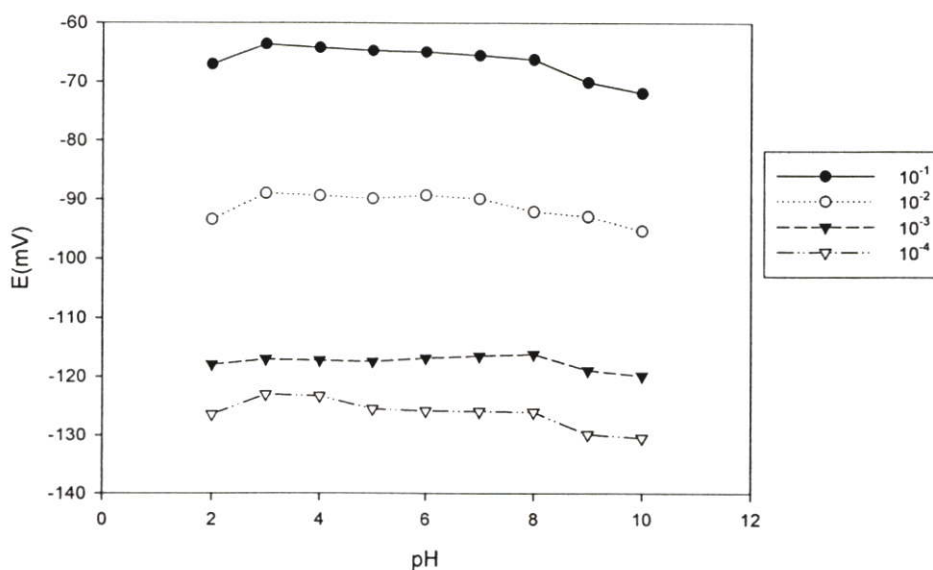
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอการิทึมของ Pb<sup>2+</sup> และ Cu<sup>2+</sup>



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอการิทึมของ Pb<sup>2+</sup> และ Cd<sup>2+</sup>

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว ( $K_{Pb,M}^{Pot}$ ) เมื่อมีไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมเป็นไอออนรบกวน มีค่าเท่ากับ 0.34 และ 0.75 ตามลำดับ แสดงว่า Cu<sup>2+</sup> และ Cd<sup>2+</sup> ไม่มีผลต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง

4.4.3 ผลของพีเอช(pH)ที่มีต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง การศึกษาผลของพีเอช(pH) ที่มีต่อศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง  $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$  โดยทำการศึกษาดตามหัวข้อ 3.4.3 พบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้สามารถใช้งานได้ดีในช่วงค่าพีเอชตั้งแต่ 3-8 ดังแสดงในรูปที่ 4.11



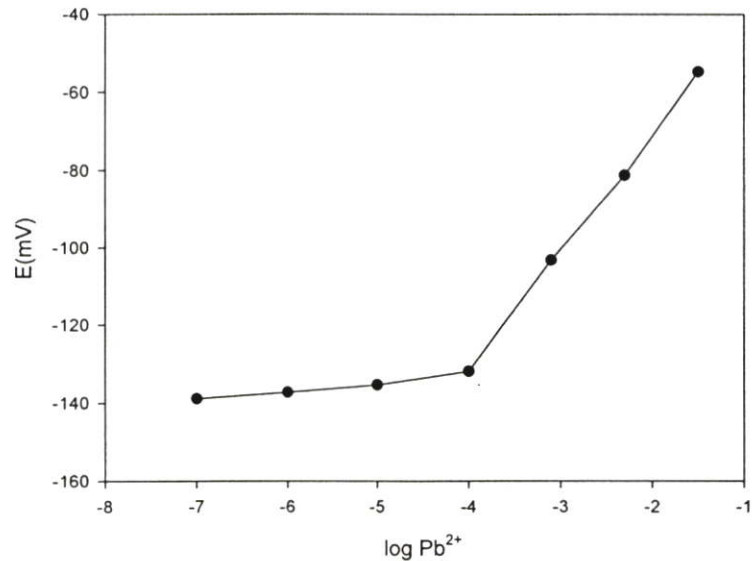
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าพีเอช(pH) ในช่วงความเข้มข้น  $10^{-4} - 10^{-1}$  mol/l  $\text{Pb}^{2+}$

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับค่าพีเอชแสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมในการวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง อยู่ระหว่าง pH 3-8 จากผลการทดลองอาจสรุปได้ดังนี้

1. การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่พีเอชน้อยกว่า 3 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีแนวโน้มที่จะลดลงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากในสารละลายที่เป็นกรด เยื่อสถานะของแข็งเกิดการรับโปรตอน เป็นผลทำให้ความสามารถในการเกิดสารประกอบระหว่างโลหะกับเยื่อสถานะของแข็งลดลง
2. การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่พีเอชมากกว่า 8 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีแนวโน้มที่จะลดลงเช่นกัน ทั้งนี้เกิดจากในสารละลายที่เป็นเบส ไอออนตะกั่วเกิดเป็นตะกอน ทำให้ปริมาณของไอออนตะกั่วในสารละลายมีปริมาณลดลง

#### 4.4.4 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าทำงาน

ผลการศึกษาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะ ไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง โดยดูจากค่าความชันของกราฟมาตรฐาน และระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ในช่วงระยะเวลา 1-5 สัปดาห์ พบว่าอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าประมาณ 3 สัปดาห์ ซึ่งช่วงเวลานี้กราฟมาตรฐานมีค่าความชันใกล้เคียงกับสมการของเนินสต์ และระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ยังคงเท่าเดิม ดังรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอการิทึมของไอออนตะกั่วในช่วงความเข้มข้น  $10^{-7}$  -  $10^{-1}$  mol/l

ตารางที่ 4.1 แสดงอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง  
Ag<sub>2</sub>S-PbS

สัปดาห์ที่	ค่าความชัน(mV/decade)	ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้(mol/l)
1	30.51	10 <sup>-4</sup>
2	30.53	10 <sup>-4</sup>
3	29.33	10 <sup>-4</sup>
4	28.97	10 <sup>-4</sup>
5	22.61	10 <sup>-4</sup>

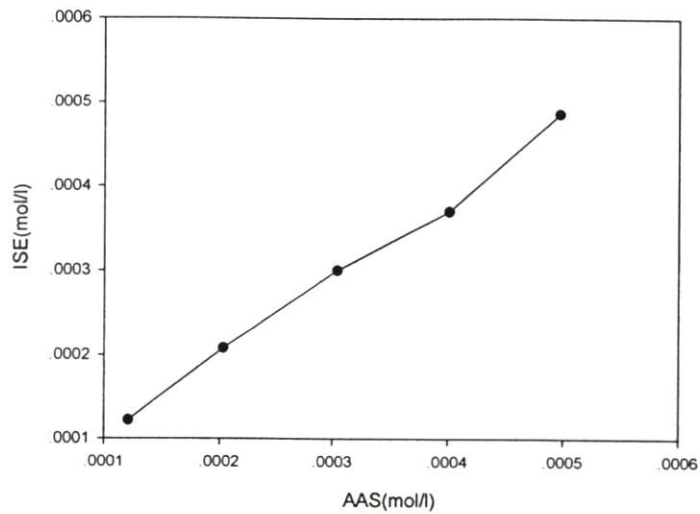
4.4.5 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง(ISE)กับเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์(AAS)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง(ISE) ที่ผู้วิจัยสร้างกับเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์(AAS) รุ่น AAS-3100 Perkin Elmer ในการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว 5 ตัวอย่าง ได้ข้อมูลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว โดยใช้ ISE กับ AAS

ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว(mol/l)	
	AAS	ISE
1	1.21X10 <sup>-4</sup>	1.22X10 <sup>-4</sup>
2	2.03X10 <sup>-4</sup>	2.08X10 <sup>-4</sup>
3	3.04X10 <sup>-4</sup>	3.00X10 <sup>-4</sup>
4	4.01X10 <sup>-4</sup>	3.70X10 <sup>-4</sup>
5	4.97X10 <sup>-4</sup>	4.86X10 <sup>-4</sup>

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักสถิติค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พบว่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ด้วย ISE และ AAS มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.99 แสดงว่าการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในน้ำเสีย โดยวิธีทั้งสองมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.13(ดูในภาคผนวก ก.)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย ISE กับ AAS

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้หลักสถิติ t-test ปรากฏว่าการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วทั้งสองวิธี ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ดูในภาคผนวก ก.)

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลอง อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง และอภิปรายผล

1. การวิจัยครั้งนี้ เป็นการสร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว ชนิดเยื่อสถานะของแข็ง โดยใช้  $Ag_2S$  ผสมกับ  $PbS$  ในอัตราส่วน 1:1 อัดแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีความคงตัวสูง และละลายยาก ซึ่งเหมาะที่จะเป็นขั้วไฟฟ้าในการวิเคราะห์หา ปริมาณของไอออนตะกั่วในสารละลาย ผู้วิจัยได้ปรับปรุงวิธีการสร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว ชนิดเยื่อสถานะของแข็งของ J.D. Czaban และ G.A. Rechnitz [10] จากการใช้ Silver epoxy ซึ่งมีราคาแพง เป็นวิธีฝังลวดเงินแทนในขั้นตอนการอัดแน่นตะกอน  $Ag_2S$ -  $PbS$  (ดูในหัวข้อ 3.2) เมื่อนำขั้วไฟฟ้ามาทดสอบหาค่าความชัน ได้ค่าความชัน เป็นไปตามสมการของเนินสต์เท่ากับ 30.51

2. ผลการทดสอบสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว ชนิดเยื่อสถานะของแข็ง โดยการศึกษาหาค่าความชันของกราฟ เวลาการตอบสนอง ความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ ช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการใช้งานของขั้วไฟฟ้า ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ และอายุการใช้งาน ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง

ค่าความชัน (mV/decade)	ค่าสัมประสิทธิ์การเลือก เฉพาะ ( $K_{Pb,M}^{Pot}$ )		ช่วงพีเอช	เวลาการตอบ สนอง(วินาที)	อายุการใช้งาน (สัปดาห์)
	$Cu^{2+}$	$Cd^{2+}$			
30.51	0.34	0.75	3-8	30-50	3

จากผลการทดลองพบว่า ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว ชนิดเยื่อสถานะของแข็ง ที่มี  $Ag_2S$  ผสมกับ  $PbS$  เป็นขั้วไฟฟ้าที่สามารถตรวจวัดปริมาณไอออนตะกั่วในน้ำได้

3. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว ชนิดเยื่อสถานะของแข็ง(ISE) กับเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์(AAS)รุ่น AAS-3100 Perkin Elmer เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว 5 ตัวอย่าง [14][15] และเปรียบเทียบข้อมูลที่วิเคราะห์ได้เพื่อหาความแตกต่างของข้อมูล โดยใช้หลักสถิติของ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน โพรบาคโมเมนต์และหลักสถิติ t-test [16][17] ปรากฏว่าข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว ชนิดเยื่อสถานะของแข็ง(ISE) กับเครื่องอะตอม

มิกแอปซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ มีค่าเฉลี่ยที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4. จากการทดลอง เมื่อนำขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว ชนิดเยื่อสถานะของแข็งไปใช้งานแล้ว ควรแช่ขั้วไฟฟ้าไว้ในสารละลายเลดไนเตรท ความเข้มข้น 1 mol/l เพื่อทำให้เยื่อ  $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$  มีความว่องไวในการนำไฟฟ้า

5. ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว ชนิดเยื่อสถานะของแข็งที่สร้างขึ้น มีค่าระดับความเข้มข้นต่ำสุด ที่สามารถตรวจวัดได้  $10^{-4}$  mol/l หรือ 20.72 ส่วนในล้านส่วน(ppm) จึงเหมาะที่จะใช้ขั้วไฟฟ้าตรวจหาปริมาณไอออนตะกั่ว ในน้ำทิ้งจากโรงฝึกงานด้านช่างยนต์ ช่างเชื่อมโลหะ ช่างไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และห้องปฏิบัติการเคมี ที่มีการนำโลหะหนักพวกตะกั่วมาใช้ในการเรียนการสอน ถ้าพบว่า น้ำทิ้งมีปริมาณไอออนตะกั่วเกินมาตรฐานน้ำทิ้ง จะได้หาแนวทางแก้ไขป้องกันต่อไป

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาและปรับปรุงขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว ชนิดเยื่อสถานะของแข็งแบบใช้แล้วทิ้ง เนื่องจากมีอายุการใช้งานไม่นาน สร้างได้ง่าย และให้การตอบสนองต่อค่าต่างๆดี จึงเหมาะที่จะสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าใช้ในห้องปฏิบัติการ แทนการสั่งซื้อจากบริษัทซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

2. ควรศึกษาและปรับปรุงวิธีการเตรียมแผ่นเยื่อ  $\text{Ag}_2\text{S-PbS}$  ให้สามารถวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายได้ในระดับความเข้มข้นต่างๆ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang J. **Analytical Electrochemistry**. New York : VCH.Publicshers.Inc. 1994.
- [2] เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539.
- [3] Yu T.R. and Ji G.L. **Electrochemical Methods in Soil and Water Research**. New York : Pergamon Press. 1993.
- [4] สุวรรณ ไชยสิทธิ์. ปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 2. พิมพ์ครั้งที่ 2, แก้ไขปรับปรุง. กรุงเทพฯ : สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2541.
- [5] สุรณี โรจน์อารยานนท์. สภาวะแวดล้อมของเรา ตอนมลพิษสภาวะแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 3, แก้ไขปรับปรุง. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2532.
- [6] นิภากร รอดน้อย. “การหาปริมาณโลหะหนักบางชนิดในตะกอนท้องน้ำโดยวิธีอะตอมมิก แอ็บซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตเมตรี.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการสอนเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2537.
- [7] Hiroshi H. and Kenji H. **A new type of Lead(II) Ion-Selective Ceramic Membrane Electrode**. Anal. Chem. Acta, Vol.54, 1971. pp. 415-422.
- [8] Hiroshi H. and Kenji H. **Ion-Selective Lead Selenide and Lead Telluride Membrane Electrodes**. Anal. Chem. Acta, Vol.57, 1971. pp. 476-477.
- [9] Marco M. and Arnaldo L. **Preparation and Analytical Evaluation of New Lead(II) Heterogeneous Membrane Electrode**. Anal.Chem. Acta, Vol.60, 1972. pp. 405-412.
- [10] Czaban J.D. and Rechnitz G.A.. **Solid State Ion Selective Microelectrodes for Heavy Metals and Halides**. Anal. Chem, Vol.45, no.3, March 1973. pp.471-474.
- [11] Robert D.B. **Introduction to Instrumental Analysis**. Mc Graw- HillBook. 1987.
- [12] John A.Dean. **Lange's HandBook of Chemistry**. 12<sup>th</sup> ed. Mc Graw-Hill Book Company, 1980.
- [13] สุภาพ รณชัยพิกุล. เคมีวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 2, แก้ไขปรับปรุง. กรุงเทพฯ:โปรแกรมวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี,สถาบันราชภัฏพิบูลสงคราม พิษณุโลก. 2542.
- [14] ศุภชัย ไข่เทียมวงศ์. เคมีวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 3, แก้ไขปรับปรุง. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539.

- [15] ธวัชชัย ศรีวิบูลย์. เคมีวิเคราะห์ 2 . พิมพ์ครั้งที่ 4 , แก้ไขปรับปรุง. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2534.
- [16] รวีวรรณ ชินะตระกูล. วิธีวิจัยทางการศึกษา. พิมพ์ครั้งที่ 2 , แก้ไขปรับปรุง. กรุงเทพฯ: คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2538.
- [17] พรรณี ลีกิจวัฒน์. 2539. สถิติเพื่อการวิจัย. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารอัดสำเนา.

ภาคผนวก ก.

แสดงการคำนวณค่าแอกติวิตีและข้อมูลการทดลอง

1. การคำนวณค่าแอกติวิตี

คำนวณค่าแอกติวิตี(a) ได้จากสูตร  $a = f_i c$

เมื่อ  $a =$  แอกติวิตี

$f_i =$  ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตี

$c =$  ความเข้มข้น (mol/l)

และคำนวณหา  $f_i$  ได้จากสูตร 
$$\log f_i = -0.511Z^2 \left[ \frac{\sqrt{\mu}}{1+1.5\sqrt{\mu}} - 0.2\mu \right]$$

ค่าความแรงของไอออน( $\mu$ )คำนวณได้จากสมการ

$$\mu = 0.5 \sum Z_i^2 C_i$$

เมื่อ

$Z_i =$  ประจุของไอออน

$C_i =$  ความเข้มข้นของไอออน

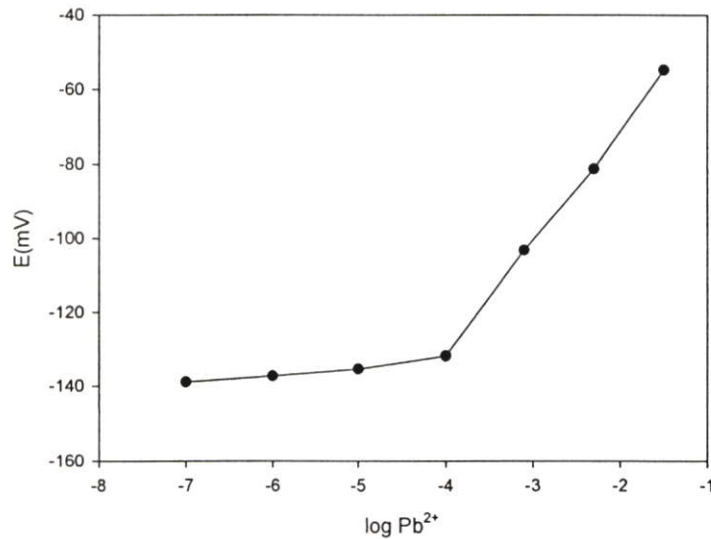
และค่าการคำนวณแสดงในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 แสดงการคำนวณค่าแอกติวิตี

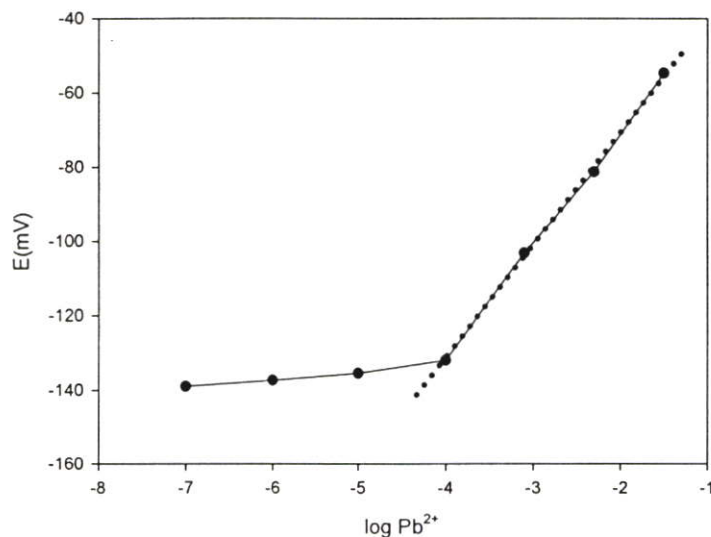
ความเข้มข้น (mol/l)	$\mu$	$\sqrt{\mu}$	$\log f_i$	a	$\log a$
$10^{-1}$	$3 \times 10^{-1}$	$5.48 \times 10^{-1}$	-0.49213	$3.22 \times 10^{-2}$	-1.5
$10^{-2}$	$3 \times 10^{-2}$	$1.73 \times 10^{-1}$	-0.26860	$5.39 \times 10^{-3}$	-2.3
$10^{-3}$	$3 \times 10^{-3}$	$5.48 \times 10^{-2}$	-0.10228	$7.90 \times 10^{-4}$	-3.1
$10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$	$1.73 \times 10^{-2}$	-0.03434	$9.24 \times 10^{-5}$	-4.0
$10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$5.48 \times 10^{-3}$	-0.01109	$9.75 \times 10^{-6}$	-5.0
$10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$1.73 \times 10^{-3}$	-0.00353	$9.92 \times 10^{-7}$	-6.0
$10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$	$5.48 \times 10^{-4}$	-0.00112	$9.97 \times 10^{-8}$	-7.0

## 2. การคำนวณหาค่าความชัน และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้

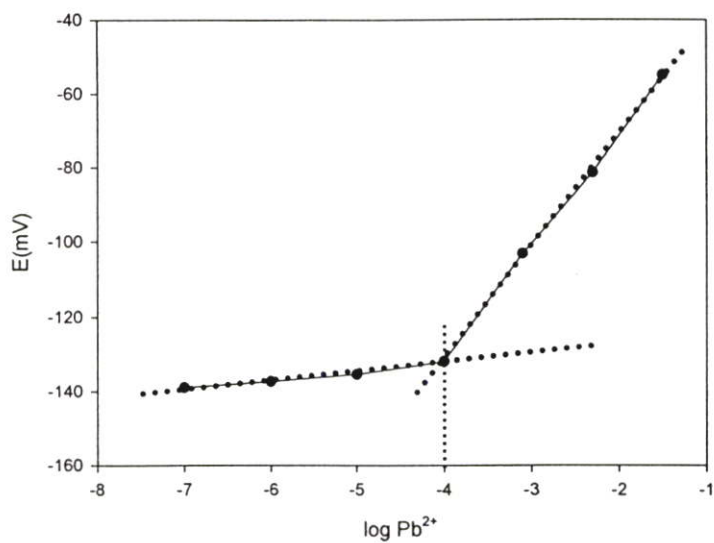
การคำนวณหาค่าความชันของกราฟมาตรฐานทำได้โดยการพลอตกราฟโดยกำหนดให้แกน y เป็นค่าศักย์ไฟฟ้า (mV) และแกน x เป็นค่าลอการิทึมของสารละลายมาตรฐานของไอออนตะกั่ว ( $\log \text{Pb}^{2+}$ ) และหาค่าความชันของกราฟโดยเลือกช่วงที่มีความชันดังรูปที่ ก.2



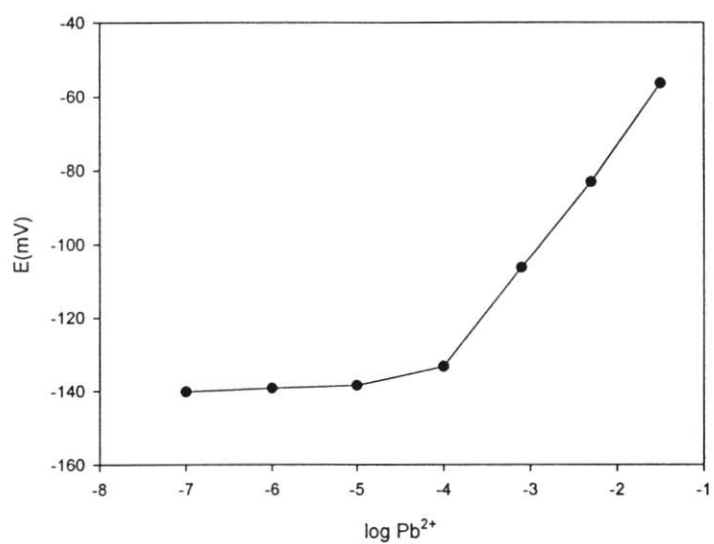
รูปที่ ก.1 แสดงกราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง ที่ระดับความเข้มข้น  $10^{-7} - 10^{-1}$  mol/l



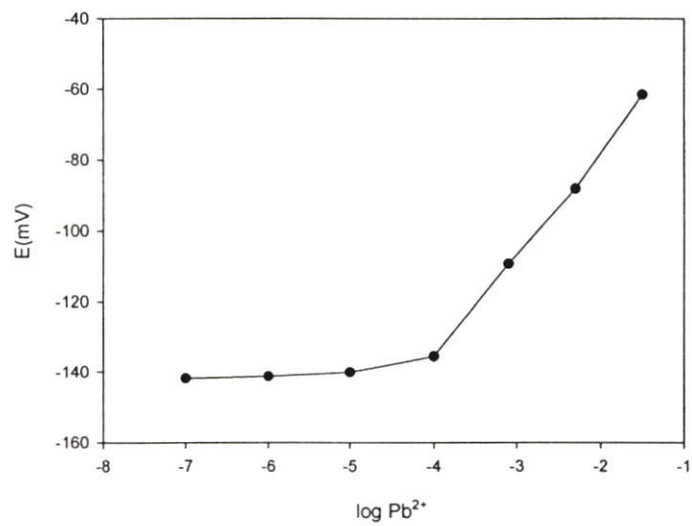
รูปที่ ก.2 แสดงการหาค่าความชันของกราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง



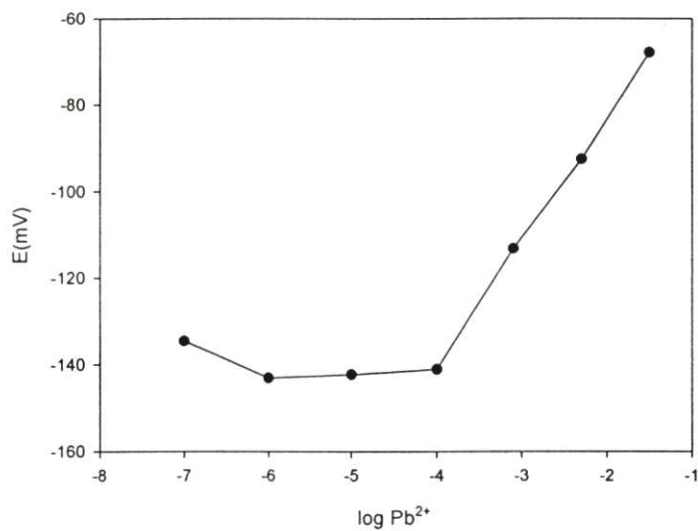
รูปที่ ก.3 แสดงวิธีการหาค่าระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็งสามารถวัดได้



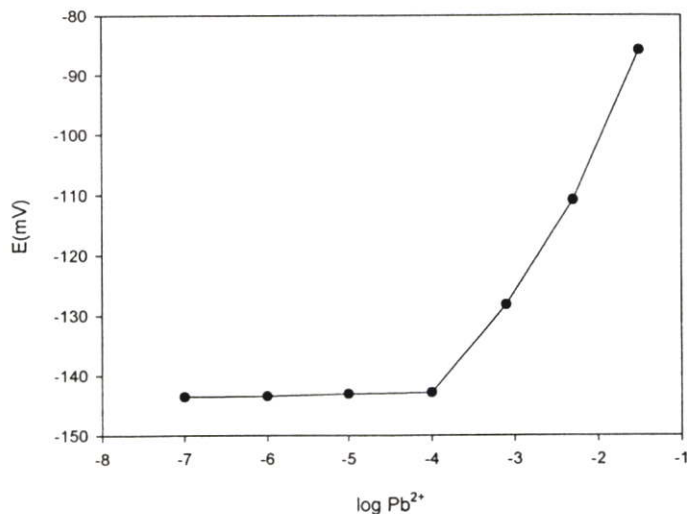
รูปที่ ก.4 แสดงกราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็งที่ระดับความเข้มข้น  $10^{-7} - 10^{-1}$  mol/l ที่มีอายุการใช้งาน 2 สัปดาห์



รูปที่ ก.5 แสดงกราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง ที่ระดับความเข้มข้น  $10^{-7}$  -  $10^{-1}$  mol/l ที่มีอายุการใช้งาน 3 สัปดาห์



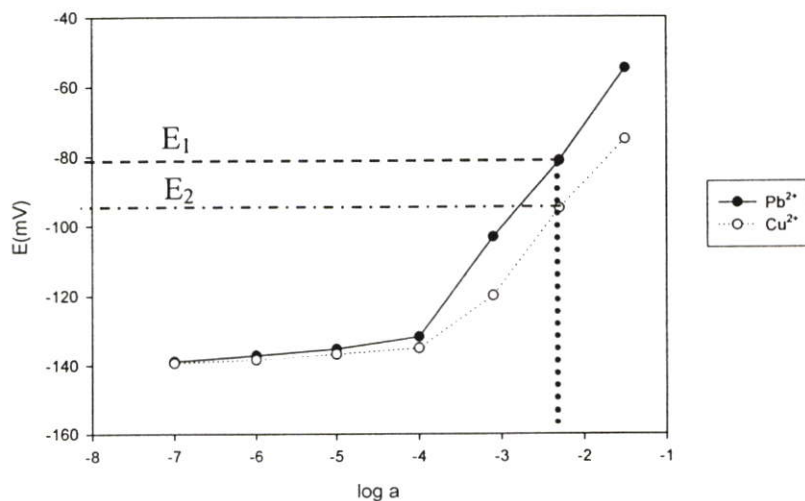
รูปที่ ก.6 แสดงกราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง ที่ระดับความเข้มข้น  $10^{-7}$  -  $10^{-1}$  mol/l ที่มีอายุการใช้งาน 4 สัปดาห์



รูปที่ ก.7 แสดงกราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง ที่ระดับความเข้มข้น  $10^{-7}$  -  $10^{-1}$  mol/l ที่มีอายุการใช้งาน 5 สัปดาห์

3. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วเมื่อมีไอออนทองแดงและแคดเมียมเป็นไอออนรบกวน ( $K_{Pb,M}^{Pot}$ ) โดยวิธีทำให้แอกติวิตีเท่ากัน

$$\text{คำนวณจากสูตร } \log K_{A,B}^{Pot} = \frac{(E_2 - E_1)Z_A F}{2.303RT} + \left(1 - \frac{Z_A}{Z_B}\right) \log a_1$$



รูปที่ ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอการิทึมของแอกติวิตีของ Pb<sup>2+</sup> และ Cu<sup>2+</sup>

จากรูปที่ ก.8 ที่จุด  $\log a = 2.3$

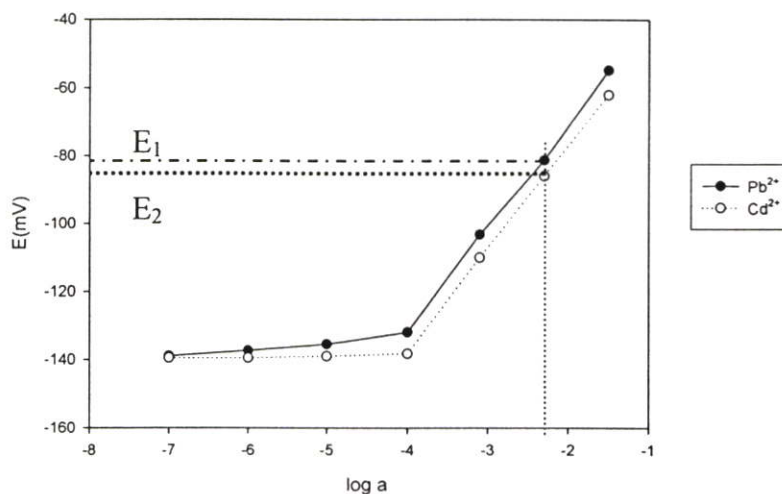
$$E_1 = -81.3 \text{ mV}$$

$$E_2 = -95.0 \text{ mV}$$

แทนค่าลงในสูตร

$$\log K_{\text{Pb,Cu}}^{\text{Pot}} = \frac{(-0.095 + 0.0813)2 \times 96484.56}{2.303 \times 8.314 \times 298.15}$$

$$K_{\text{Pb,Cu}}^{\text{Pot}} = 0.34$$



รูปที่ ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอการิทึมของ  $\text{Pb}^{2+}$  และ  $\text{Cd}^{2+}$

จากรูปที่ ก.9 ที่จุด  $\log a = 2.3$

$$E_1 = -81.3 \text{ mV}$$

$$E_2 = -85.9 \text{ mV}$$

แทนค่าลงในสูตร

$$\log K_{\text{Pb,Cd}}^{\text{Pot}} = \frac{(-0.085 + 0.0813)2 \times 96484.56}{2.303 \times 8.314 \times 298.15}$$

$$K_{\text{Pb,Cd}}^{\text{Pot}} = 0.75$$

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วเมื่อมีไอออนทองแดงและแคดเมียมเป็นไอออนรบกวน ( $K_{Pb,M}^{Pot}$ )

log a	ค่าศักย์ไฟฟ้า (mV)			$K_{Pb,Cu}^{Pot}$	$K_{Pb,Cd}^{Pot}$
	Pb <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>		
-1.5	-54.8	-75.2	-62.0	0.20	0.57
-2.3	-81.3	-95.0	-85.9	0.34	0.75
-3.1	-103.2	-120.0	-110.0	0.27	0.59
-4.0	-131.9	-135.2	-138.2	0.77	0.61
-5.0	-135.4	-136.9	-139.0	0.89	0.76
-6.0	-137.3	-138.5	-139.5	0.91	0.84
-7.0	-138.9	-139.4	-139.5	0.96	0.95

4. การคำนวณหาปริมาณของไอออนตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วด้วย ISE โดยวิธีวัดค่าศักย์ไฟฟ้าโดยตรงแล้วคำนวณจากสูตร

$$-\log C = \frac{K - E_{cell}}{0.0591 \cdot n}$$

เมื่อ  $E_{cell}$  = ค่าศักย์ไฟฟ้า

$C$  = ความเข้มข้น

$$K = E_{ind}^{\circ} - E_{ref} + E_j$$

โดยการเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 25 ppm หรือ  $1.22 \times 10^{-4}$  mol/l เป็นสารละลายมาตรฐาน นำมาวัดค่าศักย์ไฟฟ้าแทนค่าในสูตรเพื่อหาค่าคงที่ K

แทนค่า  $E_{cell} = -0.131$  V,  $C = 1.22 \times 10^{-4}$  mol/l ในสูตรจะได้

$$-\log(1.22 \times 10^{-4}) = \frac{K - (-0.131)}{0.0591 \cdot 2}$$

$$K = -0.0152$$

จากนั้นนำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วมาวัดค่าศักย์ไฟฟ้า จากค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้และค่า K ที่คำนวณได้จากสารละลายมาตรฐานทำให้สามารถคำนวณหาความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วได้ ดังตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว

ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว	$E_{cell}$ (mV)	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว(mol/l)
1	-131.0	$1.22 \times 10^{-4}$
2	-124.0	$2.08 \times 10^{-4}$
3	-119.3	$3.00 \times 10^{-4}$
4	-116.6	$3.70 \times 10^{-4}$
5	-113.1	$4.86 \times 10^{-4}$

5. การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จาก AAS และ ISE โดยใช้หลักสถิติค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

เพียร์สันโปรดักโมเมนต์(Pearson product moment correlation coefficient :  $\rho_{xy}$ )

$$\text{สูตรที่ใช้} \quad \rho_{xy} = \frac{N \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[N \sum x^2 - (\sum x)^2][N \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

$\rho_{xy}$  = ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันโปรดักโมเมนต์

X = ค่าความเข้มข้นในชุดข้อมูลตัวแปร X

y = ค่าความเข้มข้นในชุดข้อมูลตัวแปร y

N = จำนวนตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วทั้งหมด

ตารางที่ ก.4 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จาก AAS และ ISE โดยใช้หลักสถิติค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน โพรดัก โมเมนต์

นำเสี่ย สังเคราะห์ ตะกั่ว	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว(mol/l)		$X^2$	$Y^2$	xy
	AAS (x)	ISE (y)			
1	$1.21 \times 10^{-4}$	$1.22 \times 10^{-4}$	$1.46 \times 10^{-8}$	$1.49 \times 10^{-8}$	$1.48 \times 10^{-8}$
2	$2.03 \times 10^{-4}$	$2.08 \times 10^{-4}$	$4.12 \times 10^{-8}$	$4.33 \times 10^{-8}$	$4.22 \times 10^{-8}$
3	$3.04 \times 10^{-4}$	$3.00 \times 10^{-4}$	$9.24 \times 10^{-8}$	$9.00 \times 10^{-8}$	$9.12 \times 10^{-8}$
4	$4.01 \times 10^{-4}$	$3.70 \times 10^{-4}$	$1.61 \times 10^{-7}$	$1.37 \times 10^{-7}$	$1.48 \times 10^{-7}$
5	$4.97 \times 10^{-4}$	$4.86 \times 10^{-4}$	$2.47 \times 10^{-7}$	$2.36 \times 10^{-7}$	$2.42 \times 10^{-7}$
N=5	$\sum x = 1.53 \times 10^{-3}$ $(\sum x)^2 = 2.33 \times 10^{-6}$	$\sum y = 1.49 \times 10^{-3}$ $(\sum y)^2 = 2.21 \times 10^{-6}$	$\sum x^2 = 5.56 \times 10^{-7}$	$\sum y^2 = 5.21 \times 10^{-7}$	$\sum xy = 5.38 \times 10^{-7}$

แทนค่าในสูตร

$$\begin{aligned} \rho_{xy} &= \frac{(5 \times 5.38 \times 10^6) - [(1.53 \times 10^3)(1.49 \times 10^3)]}{\sqrt{[5(5.56 \times 10^7) - (233 \times 10^6)][5(5.2 \times 10^7) - (22 \times 10^6)]}} \\ &= \frac{4.23 \times 10^{-7}}{4.24 \times 10^{-7}} \\ &= 0.99 \end{aligned}$$

ทดสอบความมีนัยสำคัญทางสถิติของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน โพรดักโมเมนต์( $r_{xy}$ )

ตั้งสมมติฐาน  $H_0 = \rho = 0$

$$H_1 = \rho \neq 0$$

ใช้สูตร  $t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}}$

$$df = N-2$$

กำหนดความมีนัยสำคัญ( $\alpha$ ) = 0.05

เปิดตาราง t หาค่า t ที่  $\alpha = 0.05$ ,  $df = N-2 = 5-2 = 3$

$$t_{.05,3} = \pm 3.182$$

คำนวณค่า t จากสูตร

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } t &= \frac{0.99\sqrt{5-2}}{\sqrt{1-(0.99)^2}} \\ &= 12.21 \end{aligned}$$

ค่า t ที่คำนวณได้เท่ากับ 12.21 มากกว่าค่า t จากตาราง ดังนั้น ปฏิเสธ  $H_0$  และยอมรับ  $H_1$  แสดงว่าความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่วัดได้จากเครื่อง AAS กับความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่วัดได้จาก ISE มีความสัมพันธ์กันสูงมากอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

## 6. การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จาก AAS และ ISE โดยใช้หลักสถิติ t-test

การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว 5 ตัวอย่างแล้ววิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วด้วยวิธีแบ่งตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วเป็น 2 ชุด และใช้วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วโดยใช้ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง(ISE) ที่สร้างขึ้น และเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์(AAS) รุ่น AAS-3110 Perkin Elmer นำข้อมูลที่วิเคราะห์ได้มาเปรียบเทียบโดยใช้หลักสถิติ t-test ดังนี้

ให้  $\mu_1$  และ  $\mu_2$  แทนค่าเฉลี่ยของปริมาณไอออนตะกั่วซึ่งวิเคราะห์ได้จากเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์(AAS) และขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง(ISE) ตามลำดับ โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

$$\text{สมมติฐาน } H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

$$\text{ใช้สูตร } t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left\{ \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right\}}}$$

$$df = n_1 + n_2 - 2$$

$$\alpha = 0.05$$

$$\text{เปิดตาราง } t \quad t = \pm 2.306$$

$$\text{บริเวณวิกฤตคือ } t < -2.306 \text{ หรือ } t > 2.306$$

ตารางที่ ก.5 แสดงการคำนวณ t-test

ตัวอย่าง น้ำเสีย สังเคราะห์ ตะกั่ว	AAS		ISE	
	ความเข้มข้น ของไอออน ตะกั่ว( $x_1$ )	$[(x_1)_i - \bar{x}_1]^2$	ความเข้มข้นของ ไอออนตะกั่ว( $x_2$ )	$[(x_2)_i - \bar{x}_2]^2$
1	$1.21 \times 10^{-4}$	$3.39 \times 10^{-8}$	$1.22 \times 10^{-4}$	$3.03 \times 10^{-8}$
2	$2.03 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^{-8}$	$2.08 \times 10^{-4}$	$9.12 \times 10^{-9}$
3	$3.04 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-12}$	$3.00 \times 10^{-4}$	$1.94 \times 10^{-11}$
4	$4.01 \times 10^{-4}$	$9.22 \times 10^{-9}$	$3.70 \times 10^{-4}$	$5.57 \times 10^{-9}$
5	$4.97 \times 10^{-4}$	$3.69 \times 10^{-8}$	$4.86 \times 10^{-4}$	$3.64 \times 10^{-8}$
	$\bar{x}_1 = 3.05 \times 10^{-4}$	$\sum [(x_1)_i - \bar{x}_1]^2$ $= 9.04 \times 10^{-8}$	$\bar{x}_2 = 2.96 \times 10^{-4}$	$\sum [(x_2)_i - \bar{x}_2]^2$ $= 8.14 \times 10^{-8}$
	$S_1 = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x}_1)^2}{n-1}}$ $= \sqrt{\frac{9.04 \times 10^{-8}}{4}}$ $= 1.5 \times 10^{-4}$		$S_2 = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x}_2)^2}{n-1}}$ $= \sqrt{\frac{8.14 \times 10^{-8}}{4}}$ $= 1.43 \times 10^{-4}$	

แทนค่าลงในสูตร

$$t = \frac{(3.05 \times 10^{-4}) - (2.96 \times 10^{-4})}{\sqrt{\frac{(5-1)(1.5 \times 10^{-4})^2 + (5-1)(1.43 \times 10^{-4})^2}{5+5-2} \left\{ \frac{1}{5} + \frac{1}{5} \right\}}}$$

$$t = 0.101$$

ค่า  $t$  ที่คำนวณได้ น้อยกว่า ค่า  $t$  จากตาราง จึงยอมรับ  $H_0: \mu_1 = \mu_2$  แสดงว่าทั้งสองวิธีให้ผลในการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่ว ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ก.6 ตารางค่าวิกฤตของการแจกแจง  $t$

df	LEVEL OF SIGNIFICANCE FOR TWO-TAILED TEST				
	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845

**ภาคผนวก ข.**

## ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 แสดงข้อมูลค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็งในช่วงความเข้มข้น  $10^{-7}$ - $10^{-1}$  mol/l ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1-5

log a	ศักย์ไฟฟ้า(mV) สัปดาห์ที่				
	1	2	3	4	5
-1.5	-54.8	-56.4	-61.5	-67.9	-85.9
-2.3	-81.3	-83.2	-88.1	-92.5	-110.9
-3.1	-103.2	-106.4	-109.3	-113.2	-128.3
-4.0	-131.9	-133.2	-135.6	-141.1	-142.9
-5.0	-135.4	-138.4	-140.1	-142.3	-143.1
-6.0	-137.3	-139.2	-141.3	-143.1	-143.5
-7.0	-138.9	-140.2	-141.9	-134.6	-143.6
ความชัน	30.51	30.54	29.33	28.97	22.61

ตารางที่ ข.2 แสดงเวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง

เวลา(s)	ค่าศักย์ไฟฟ้า(mV) ในสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ , ความเข้มข้น(mol/l)						
	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$
10	-138.8	-137.5	-135.8	-131.7	-103.5	-81.4	-54.8
20	-138.7	-137.4	-135.6	-131.8	-103.4	-81.4	-54.7
30	-138.7	-137.3	-135.4	-131.9	-103.2	-81.2	-54.7
40	-138.8	-137.3	-135.4	-131.9	-103.3	-81.3	-54.8
50	-138.9	-137.3	-135.4	-131.9	-103.3	-81.3	-54.8
60	-138.9	-137.2	-135.4	-131.9	-103.3	-81.4	-54.8
70	-138.9	-137.3	-135.3	-131.9	-103.3	-81.3	-54.7
80	-138.9	-137.3	-135.3	-131.8	-103.3	-81.2	-54.8
90	-138.9	-137.3	-135.4	-131.9	-103.2	-81.3	-54.8
100	-138.9	-137.3	-135.4	-131.9	-103.2	-81.3	-54.8

ตารางที่ ข.3 แสดงข้อมูลการศึกษาผลของการรบกวนของไอออนอื่นที่มีต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะ  
ไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง

log a	ค่าศักย์ไฟฟ้า (mV)		
	Pb <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>
-1.5	-54.8	-75.2	-62.0
-2.3	-81.3	-95.0	-85.9
-3.1	-103.2	-120.0	-110.0
-4.0	-131.9	-135.2	-138.2
-5.0	-135.4	-136.9	-139.0
-6.0	-137.3	-138.5	-139.5
-7.0	-138.9	-139.4	-139.5

ตารางที่ ข.4 แสดงข้อมูลผลการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะ  
ไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง

pH	ค่าศักย์ไฟฟ้า(mV) ในสารละลายPb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , ความเข้มข้น(mol/l)			
	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>
2	-126.5	-118.0	-93.4	-67.0
3	-123.1	-117.1	-89.0	-63.6
4	-123.4	-117.3	-89.4	-64.2
5	-125.6	-117.5	-89.9	-64.7
6	-125.9	-116.9	-89.3	-64.9
7	-126.0	-116.5	-89.9	-65.5
8	-126.1	-116.2	-92.1	-66.2
9	-129.9	-119.0	-92.9	-70.1
10	-130.5	-119.9	-95.3	-71.9

ตารางที่ ข.5 แสดงข้อมูลผลการศึกษาหาความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์  
ตะกั่วโดยใช้ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อสถานะของแข็ง(ISE)

ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว	ศักย์ไฟฟ้า (mV)	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว (mol/l)
1	-131.0	$1.21 \times 10^{-4}$
2	-124.0	$2.08 \times 10^{-4}$
3	-119.3	$3.00 \times 10^{-4}$
4	-116.6	$3.70 \times 10^{-4}$
5	-113.1	$4.86 \times 10^{-4}$

ภาคผนวก ค.

### การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว

เตรียมจากเกลือไนเตรทของตะกั่วให้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วมีความเข้มข้นเท่ากับ 25 45 65 85 และ 105 ส่วนในล้านส่วน โดยเตรียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วเข้มข้น 1000 ส่วนในล้านส่วน

1. การเตรียมความเข้มข้นของไอออนตะกั่วเข้มข้น 1000 ส่วนในล้านส่วน

ชั่งเลดไนเตรทจำนวน 1.5985 กรัม เทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนครบ 1000 มิลลิลิตร

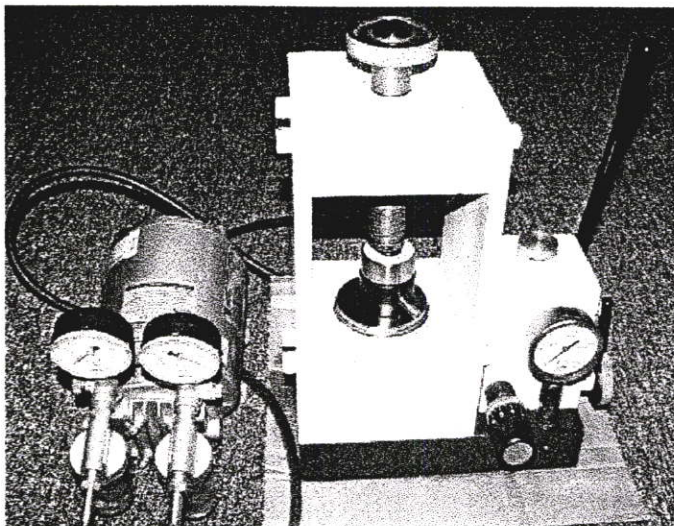
2. การเตรียมความเข้มข้นของไอออนตะกั่วเข้มข้น 25 45 65 85 และ 105 ส่วนในล้านส่วน

ปิเปตสารละลายที่เตรียมจากไอออนตะกั่วเข้มข้น 1000 ส่วนในล้านส่วนด้วย Measuring pipette จำนวน 2.5 4.5 6.5 8.5 และ 10.5 มิลลิลิตร เทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนครบ 100 มิลลิลิตร

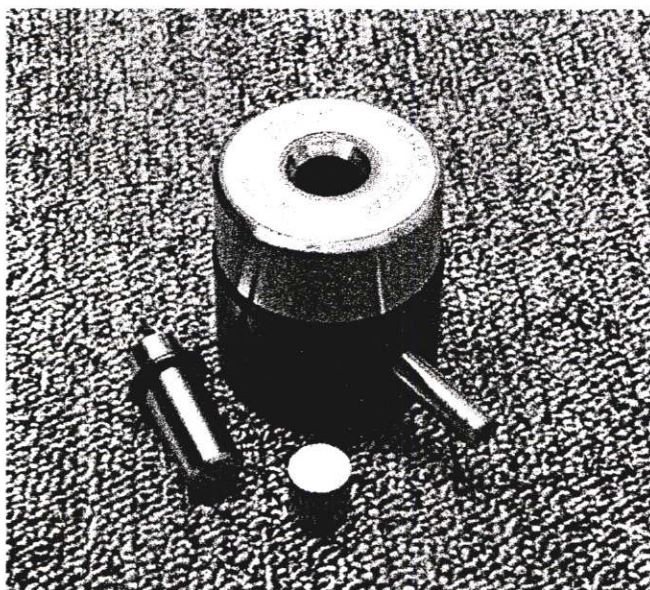
3. การเตรียมความเข้มข้นของไอออนตะกั่วเข้มข้น 2.5 4.5 6.5 8.5 และ 10.5 ส่วนในล้านส่วน

ปิเปตสารละลายที่เตรียมจากไอออนตะกั่วเข้มข้น 1000 ส่วนในล้านส่วนด้วย Measuring pipette จำนวน 0.25 0.45 0.65 0.85 และ 1.05 มิลลิลิตร เทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนครบ 100 มิลลิลิตร

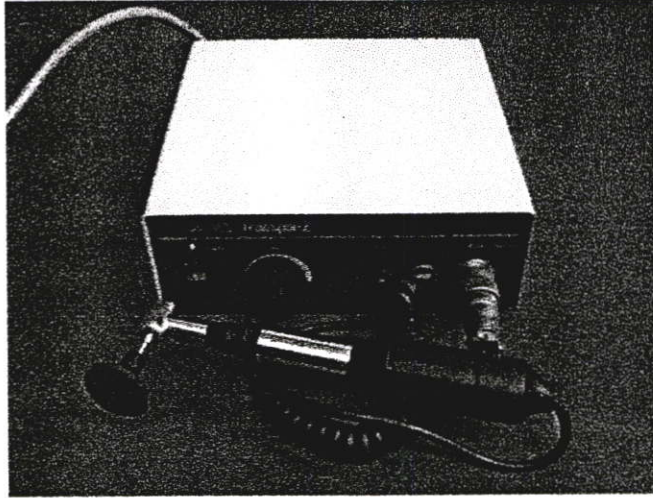
ภาคผนวก ง.



รูปที่ ง.1 เครื่องอัด Hydarulic Press



รูปที่ ง.2 แม่พิมพ์ KBr die



รูปที่ ง.3 เครื่องขัด-แต่ง (Grinding Machine)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวปราณี ศรีกอบัว เกิดเมื่อวันที่ 13 กันยายน พ.ศ. 2504 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ

การศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี-วิทยาศาสตร์ทั่วไป จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2527 และในปี พ.ศ. 2539 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการศึกษาศาสตร์(เคมี) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การทำงาน ในปี พ.ศ. 2527 เข้ารับราชการครูในตำแหน่ง อาจารย์ 1 ระดับ 3 วิทยาลัยอาชีวศึกษาเชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย และในปี พ.ศ. 2536 ขอย้ายมารับราชการที่วิทยาลัยช่างกลปทุมวัน ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ 1 ระดับ 5 สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน