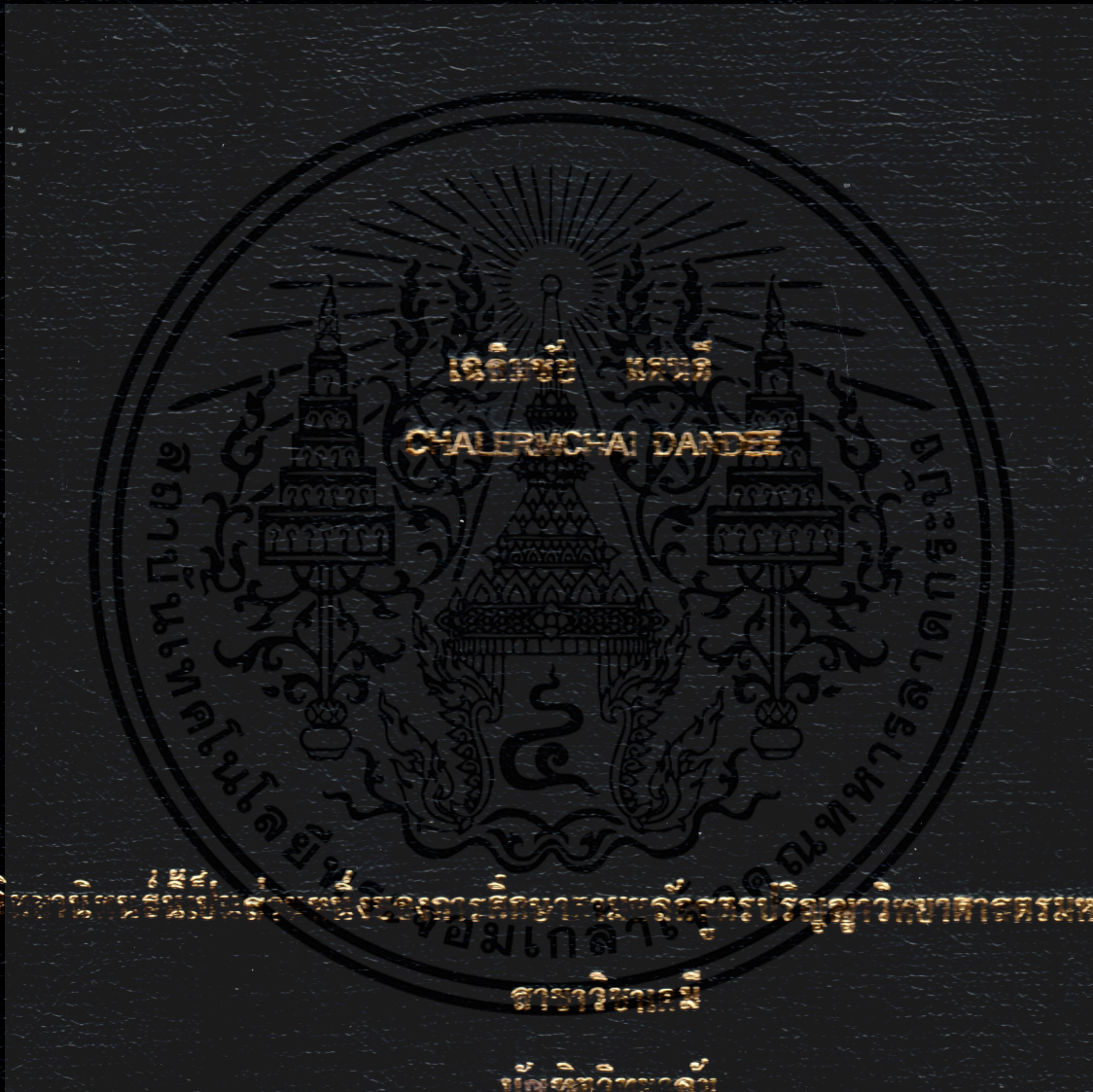


การพัฒนาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วชนิดเยื่อพอลิเมอร์
DEVELOPMENT OF LEAD ION-SELECTIVE POLYMERIC MEMBRANE
ELECTRODES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของกรณีศึกษาของมูลนิธิศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์มหาดไทย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สาขาวิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-945-1

การพัฒนาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วชนิดเยื่อพอลิเมอร์

DEVELOPMENT OF LEAD ION-SELECTIVE POLYMERIC MEMBRANE
ELECTRODES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-945-1

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 38521

วัน, เดือน, ปี 5 ส.ค. 2544

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF LEAD ION-SELECTIVE POLYMERIC
MEMBRANE ELECTRODES



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

2000

ISBN 974-622-945-1



COPYRIGHT 2000

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วชนิดเยื่อพอลิเมอร์
DEVELOPMENT OF LEAD ION-SELECTIVE POLYMERIC
MEMBRANE ELECTRODES

ชื่อนักศึกษา

นายเฉลิมชัย แคนดี

รหัสประจำตัว

40064000

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

เคมี

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.สุวรรณ

ไชยสิทธิ์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

ผศ.ดร.เพ็ญชัย

ไชยสิทธิ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	
รศ.อรุณี คงศักดิ์ไพศาล	
ผศ.ดร.เพ็ญชัย ไชยสิทธิ์	
ผศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์	
ดร.วีระศักดิ์ สุระเรืองชัย	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 20 กันยายน 2543 เวลา 10.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ ห้อง 424 ห้องประชุม-สัมมนา

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว



(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัคร)

รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่... ๗... เดือน... ๒๕๔๓... พ.ศ. ๒๕๔๓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วชนิดเยื่อพอลิเมอร์
นักศึกษา	นายเฉลิมชัย แคนดี
รหัสประจำตัว	40064000
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมี(เคมีวิเคราะห์)
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร. เเชษฐชัย ไชยสิทธิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วชนิดเยื่อพอลิไวนิลคลอไรด์ ที่มีสารประกอบ crown ether เป็นไอออโนเฟอร์ โดยการหาชนิด และ ปริมาณที่เหมาะสมของ crown ether และพลาสติกไซเซอร์ และปริมาณที่เหมาะสมของพอลิไวนิลคลอไรด์ และ THF ที่มีผลต่อความชันตามสมการของเนินสต์ และศึกษาเวลาการตอบสนอง ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกตอบสนอง ช่วงความเป็นกรด-เบสของสารละลาย และอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า สารประกอบ crown ether ที่ใช้ในการศึกษามีดังนี้คือ 18-crown-6, dibenzo-18-crown-6, dicyclohexano-18-crown-6, 4',4''(5)''-di-tertbutyldibenzo-18-crown-6, 15-crown-5 และพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้มีดังนี้ คือ dibutyl phthalate (DBP) dioctyl phthalate (DOP) และ di-isononyl phthalate (DINP) นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเยื่อพอลิเมอร์โดยการใช้กระดาษกรองเป็นตัวเสริมแรงไมโครไฟเบอร์ด้วย

ผลการทดสอบสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว ปรากฏว่าขั้วไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของ dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออโนเฟอร์ และใช้ dibutyl phthalate เป็นพลาสติกไซเซอร์ มีความเหมาะสม ที่จะใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในน้ำ ซึ่งให้ค่าความชันตามสมการของเนินสต์เท่ากับ 30.7 mV/decade ในช่วงความเข้มข้น 1.0×10^{-1} – 1.0×10^{-4} M ของ Pb^{2+} พีเอช ที่เหมาะสมในการวัดอยู่ในช่วง 4–7 และเวลาการตอบสนองน้อยกว่า 1 นาที จากค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของ Cu^{2+} แสดงให้เห็นว่าการรบกวนที่เกิดจาก Cu^{2+} จะน้อยกว่า Na^+ และ K^+ และขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมีอายุการใช้งาน 3 สัปดาห์

Thesis Title	Development of Lead Ion-Selective Polymeric Membrane Electrodes
Student	Mr. Chalermchai Dandee
Student ID.	40064000
Degree	Master of Science
Programme	Chemistry (Analytical Chemistry)
Year	2000
Thesis Advisor	Asst.Prof. Dr.Suwan Chaiyasith
Thesis Co-advisor	Asst.Prof. Dr.Pachernchai Chaiyasith

ABSTRACT

In this work the lead ion-selective polymeric membrane electrodes based on crown ether as ionophores were developed. The effects of crown ethers, plasticizers, poly(vinyl chloride) and THF on the Nernstian slope, response time, selectivity coefficient, pH range and lifetime of electrodes were studied. The crown ethers used were 18-crown-6, dibenzo-18-crown-6, dicyclohexano-18-crown-6, 4',4''(5)''-di-tertbutyldibenzo-18-crown-6, 15-crown-5 and the plasticizers were dibutyl phthalate, (DBP) dioctyl phthalate (DOP), and di-isononyl phthalate (DINP). Furthermore, the mechanical properties of the polymeric membrane were improved by using filter paper as a microfibre matrix.

The experimental data show that the poly(vinyl chloride) electrode with dibenzo-18-crown-6 as the ionophore and dibutyl phthalate as the plasticizer was useful as a lead(II) ion-selective electrode. This membrane electrode gave linear response with near-Nernstian slope of 30.7 mV per decade within the concentration range 1.0×10^{-1} - 1.0×10^{-4} mol/l Pb^{2+} , pH range 4-7, and the response time less than 1 minute. For interfering ions the selectivity coefficient of Cu^{2+} is less than those of Na^+ and K^+ ions. The lifetime of the electrode was found to be 3 weeks.

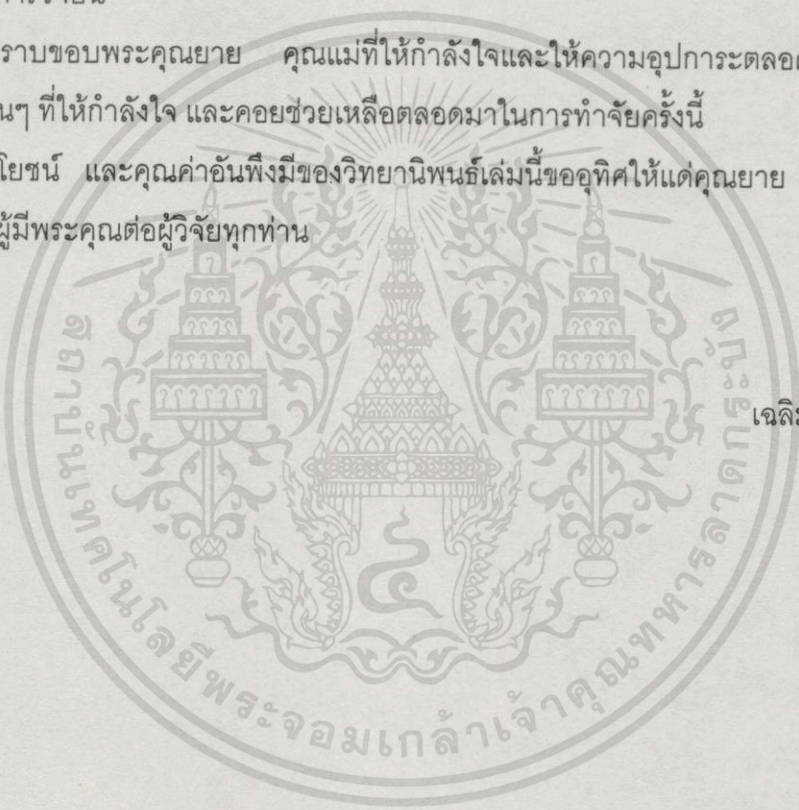
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำ และข้อมูลที่มีประโยชน์จาก ผศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.เมธิญชัย ไชยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง รศ.อรุณี คงศักดิ์ไพศาล ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ และ ดร.วีระศักดิ์ สุระเรืองชัย ที่กรุณาเป็นกรรมการ ในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณยาย คุณแม่ที่ให้กำลังใจและให้ความอุปการะตลอดมา และขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจ และคอยช่วยเหลือตลอดมาในการทำวิจัยครั้งนี้

ประโยชน์ และคุณค่าอันพึงมีของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขออุทิศให้แก่คุณยาย คุณแม่ ครู อาจารย์และผู้มีพระคุณต่อผู้วิจัยทุกท่าน



เฉลิมชัย แดนดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ และที่มาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ตะกั่วและผลกระทบต่อมนุษย์	4
2.1.1 สมบัติทางฟิสิกส์	4
2.1.2 สมบัติทางเคมี	6
2.1.3 แหล่งกำเนิดของตะกั่วในน้ำ	7
2.1.4 รูปแบบของตะกั่วในน้ำ	8
2.2 มาตรฐานคุณภาพน้ำ	9
2.3 สมบัติของสารประกอบ crown ether	10
2.3.1 กลไกของปฏิกิริยาของ crown ether กับไอออนบวก	10
2.3.2 การประยุกต์ใช้สารประกอบ crown ether.....	11
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
2.5 หลักการทางโพเทนชิอเมทรี	13
2.5.1 ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ.....	16
2.5.2 เวลาการตอบสนอง	19
2.5.3 ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้.....	20
2.6 ประเภทของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน.....	21

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6.1 ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนชนิดเยื่อของเหลว	22
บทที่ 3 การทดลอง.....	23
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	23
3.1.1 สารเคมี.....	24
3.1.2 อุปกรณ์.....	24
3.2 การเตรียมเยื่อ	25
3.3 การเตรียมขั้วซิลเวอร์ – ซิลเวอร์คลอไรด์.....	25
3.4 การประกอบขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน	26
3.5 การวัดศักย์ไฟฟ้า	26
3.6 การศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว	27
3.6.1 การวัดศักย์ไฟฟ้า และทำกราฟมาตรฐาน.....	27
3.6.2 การศึกษาผลของพีเอช.....	27
3.6.3 การศึกษาผลของการรบกวนของไอออนอื่น	27
3.6.4 การศึกษาอายุการใช้งาน	29
3.6.5 การเปรียบเทียบระหว่าง ISE และ AAS	27
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล	28
3.8 การสรุป และรายงานผล.....	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผล.....	29
4.1 การเตรียมเยื่อ.....	29
4.2 ขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Silver-silver chloride electrode).....	33
4.3 ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน.....	33
4.4 สมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว.....	34
4.4.1 เวลาการตอบสนองและกราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว.....	35

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4.2 เวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว.....	40
4.4.3 ผลของการศึกษาปริมาณไอออนโพรที่มีต่อความชันตามสมการของ เนินสต์.....	41
4.4.4 ผลการศึกษาของสารละลายอ้างอิงภายในที่มีต่อความไวของขั้วไฟฟ้าเลือก เฉพาะไอออน.....	42
4.4.5 ผลของพีเอช (pH) ที่มีต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว.....	43
4.4.6 ผลของไอออนอื่นที่มีต่อการรบกวนของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของ ไอออนตะกั่ว.....	44
4.4.7 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว.....	47
4.4.8 เปรียบเทียบ ISE และ AAS.....	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก. สูตรโครงสร้างของสารประกอบ crown ether.....	59
ภาคผนวก ข. การคำนวณ.....	61
ภาคผนวก ค. ผลการทดลอง.....	63
ภาคผนวก ง. รูปของเยื่อ.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของตะกั่ว.....	4
2.2 ผลกระทบของตะกั่วต่อมนุษย์.....	6
2.3 ระดับตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ ก่อนผ่านการบำบัด.....	7
2.4 ตะกั่วในมาตรฐานน้ำดื่ม.....	9
2.5 ประเภทของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน.....	21
4.1 แสดงอัตราส่วนขององค์ประกอบของเยื่อ.....	29
4.2 แสดงความหนาของเยื่อ.....	31
4.3 ก. แสดงสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนของไอออนตะกั่วที่ใช้ 4',4''(5'')-di-tert-butyl-dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโพร.....	36
4.3 ข. แสดงสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนของไอออนตะกั่วที่ใช้ dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโพร.....	36
4.3 ค. แสดงสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนของไอออนตะกั่วที่ใช้ 18-crown-6 เป็นไอออนโพร.....	37
4.3 ง. แสดงสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนของไอออนตะกั่วที่ใช้ dicyclohexano-18-crown-6 เป็นไอออนโพร.....	37
4.3 จ. แสดงสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนของไอออนตะกั่วที่ใช้ 15-crown-5 เป็นไอออนโพร.....	38
4.4 แสดงอัตราส่วนของเยื่อ.....	41
4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่มี dibenzo-18-crown-6 + dibutyl phthalate	46
4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ($K_{Pb^{2+},M}^{pot}$) ของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่สร้างขึ้นกับขั้วไฟฟ้าอื่นๆ	46
4.7 แสดงอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่มีส่วนผสมของ dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโพรและ dibutyl phthalate เป็นพลาสติกไซเซอ์.....	48
4.8 แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่สร้างขึ้นกับอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์.....	49

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.1 แสดงการคำนวณค่าแอกติวิตี.....	61
ข.2 แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์โดยใช้ ISE กับ AAS.....	63
ข.3 แสดงการคำนวณ t-test.....	64
ข.4 ตารางค่าวิกฤตของการแจกแจง t.....	65
ค.1 แสดงข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออน dibenzo-18-crown-6+DBP	67
ค.2 แสดงเวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว dibenzo-18-crown-6 +DBP.....	68
ค.3 แสดงข้อมูลการศึกษาผลของการรบกวนของไอออนอื่นที่มีต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน ตะกั่ว dibenzo-18-crown-6 + DBP ที่ระดับความเข้มข้น 1×10^{-3} mol/l.....	68
ค.4 แสดงข้อมูลการศึกษาผลของการรบกวนของไอออนอื่นที่มีต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน ตะกั่ว dibenzo-18-crown-6 + DBP ที่ระดับความเข้มข้น 1×10^{-2} mol/l.....	69
ค.5 แสดงข้อมูลผลของการศึกษาผลของพีเอช ที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะ ไอออนตะกั่ว dibenzo-18-crown-6 + DBP.....	70

สารบัญญรูป

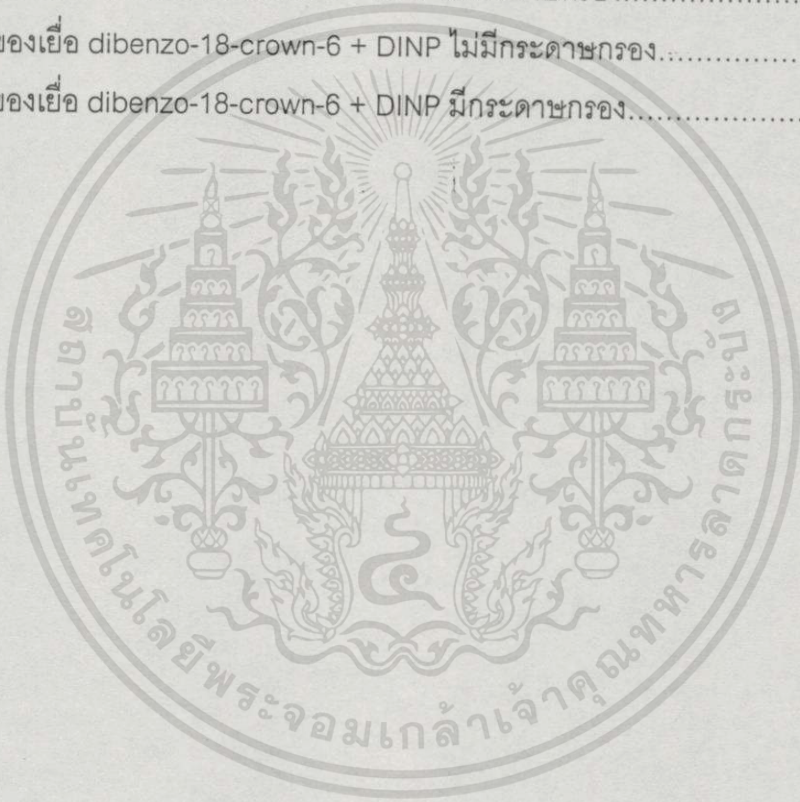
รูปที่	หน้า
2.1 รูปต่างๆ ของตะกั่วในน้ำ.....	8
2.2 รูป 18-crown-6.....	10
2.3 แสดงการดึงดูดระหว่างสารประกอบ dibenzo-18-crown-6 กับไอออนของโพแทสเซียม.....	10
2.4 ส่วนประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีของเทคนิคโพเทนชิอเมตรี.....	14
2.5 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะโดยวิธีการทำให้แอกติวิตีของไอออนเท่ากันและวิธีทำให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน.....	18
2.6 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะโดยวิธีกำหนดให้แอกติวิตีของไอออนรบกวนคงที่ และวิธีกำหนดให้แอกติวิตีที่จะวิเคราะห์หนึ่ง.....	19
2.7 ก นิยามของระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้ของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน.....	21
2.7 ข ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้ของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนในทางปฏิบัติ.....	21
3.1 ก. การเตรียมเยื่อ.....	25
3.1 ข. การเตรียมเยื่อ.....	25
3.2 ขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์.....	25
3.3 ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนของตะกั่ว.....	26
4.1 ก. รูปของเยื่อที่ใช้กระดาษกรอง.....	30
4.1 ข. รูปของเยื่อที่ไม่ใช้กระดาษกรอง.....	30
4.2 ตำแหน่งการเชื่อมต่อระหว่างสายไฟกับ Ag/AgCl.....	33
4.3 ขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์.....	33
4.4 การติดเยื่อเข้ากับหลอดแก้ว.....	34
4.5 ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว.....	34
4.6 การจัดอุปกรณ์ที่วัดศักย์ไฟฟ้า.....	34
4.7. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอการิทึมของแอกติวิตีของตะกั่วที่ใช้ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนที่มีสารละลายอ้างอิงภายในเข้มข้น $1.0 \times 10^{-3} \text{ M Pb}^{2+}$	39

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 เวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 1.0×10^{-3} mol/l สารละลายอ้างอิงภายในเข้มข้น 1.0×10^{-1} mol/l.....	40
4.9 ผลของปริมาณของ dibenzo-18-crown-6 ในขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อพอลิเมอร์	41
4.10 ผลของสารละลายอ้างอิงภายในของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วที่มี dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์ และ dibutylphthalate เป็นพลาสติไซเซอร์.....	42
4.11 ก. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับพีเอช ที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-4} mol/IPb ²⁺	43
4.11 ข. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับพีเอช ที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-3} mol/IPb ²⁺	43
4.11 ค. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับพีเอช ที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-2} mol/IPb ²⁺	43
4.12 ก. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอกแอคติวิตีของตะกั่วที่ใช้ขั้วไฟฟ้า dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์ และ dibutyl phthalate เป็นพลาสติไซเซอร์....	45
4.12 ข. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอกแอคติวิตีของตะกั่วที่ใช้ขั้วไฟฟ้า dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์ และ dibutyl phthalate เป็นพลาสติไซเซอร์....	45
4.12 ค. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอกแอคติวิตีของตะกั่วที่ใช้ขั้วไฟฟ้า dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์ และ dibutyl phthalate เป็นพลาสติไซเซอร์.....	46
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย ISE และ AAS.....	49
ก.1 18-crown-6.....	58
ก.2 Dibenzo-18-crown-6	58
ก.3 Dicyclohexano-18-crown-6.....	58
ก.4 4',4''(5'')-di-tert-butyl dibenzo-18-crown-6.....	59
ก.5 15-crown-5.....	59
ข.1 กราฟมาตรฐานของ ISE.....	62
ข.2 การคำนวณค่าความชันของกราฟมาตรฐาน.....	62

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.3 วิธีการหาระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้.....	62
ง.1 รูปภาพของเยื่อ dibenzo-18-crown-6 + DBP ไม่มีกระดาษกรอง.....	72
ง.2 รูปภาพของเยื่อ dibenzo-18-crown-6 + DBP มีกระดาษกรอง.....	72
ง.3 รูปภาพของเยื่อ dibenzo-18-crown-6 + DOP ไม่มีกระดาษกรอง.....	73
ง.4 รูปภาพของเยื่อ dibenzo-18-crown-6 + DOP มีกระดาษกรอง.....	73
ง.5 รูปภาพของเยื่อ dibenzo-18-crown-6 + DINP ไม่มีกระดาษกรอง.....	74
ง.6 รูปภาพของเยื่อ dibenzo-18-crown-6 + DINP มีกระดาษกรอง.....	74



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาวิทยานิพนธ์

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนของโลหะหนักในน้ำ และในสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไปนิยมใช้วิธีวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี เช่น อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมทรี (Atomic absorption spectrophotometry) Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy(ICP-AES) เป็นต้น หรือวิธีวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า เช่น โวลแทมเมทรี เป็นต้น แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวนี้อุปกรณ์ที่ใช้ และค่าซ่อมบำรุงมีราคาแพง ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยวิธีโพเทนชิโอเมทรี ซึ่งใช้หัววัดที่มีความเลือกเฉพาะกับไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ หรือที่เรียกกันว่าขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน (Ion-selective electrode, ISE) จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมอย่างหนึ่ง เนื่องจากอุปกรณ์มีราคาถูก มีขนาดเล็ก และสามารถนำไปใช้ในภาคสนามได้ นอกจากนี้ยังมีความสะดวก รวดเร็วในการวิเคราะห์ และการเตรียมตัวอย่างไม่ยุ่งยาก โดยทั่วไปสามารถวิเคราะห์ได้ในระดับความเข้มข้นต่ำสุดประมาณ 10^{-5} M [1]

ในปัจจุบันนี้มีการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนในงานด้านต่างๆมากขึ้นเช่น ทางด้านการแพทย์ การรักษาพยาบาล และการวิเคราะห์ทางสิ่งแวดล้อม [2] รวมทั้งใช้วิเคราะห์และเฝ้าระวังอย่างต่อเนื่องอีกด้วย [3]

โดยทั่วไปการพัฒนาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน จะศึกษาและพัฒนาส่วนประกอบของเยื่อ (Membrane) และตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchanger) หรือไอออนฟอว์ (Ionophore) ซึ่งปัจจุบันนี้โดยทั่วไปจะนิยมเตรียมเยื่อจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) เนื่องจากทำได้ง่าย และก็ไม่ยุ่งยาก อย่างไรก็ตามเยื่อที่เตรียมได้จากพอลิไวนิลคลอไรด์มีข้อเสียคือ ไม่แข็งแรง และไม่ทนทานต่อความร้อน อีกทั้งเยื่อที่เตรียมได้ยังมีความยุ่งยากในการเตรียมหัววัด [4] ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาและพัฒนาเพื่อให้ได้เยื่อที่มีความแข็งแรงทนทานมากยิ่งขึ้น โดยการเพิ่มความแข็งแรงด้วยไมโครไฟเบอร์ (Microfibre) เช่น กระดาษกรองซึ่งจากการศึกษาพบว่าเยื่อที่เตรียมได้โดยวิธีนี้จะให้ความไวในการวิเคราะห์ (Sensitivity) เวลาในการตอบสนอง (Response time) ได้ดีเหมือนเดิม [5]

เนื่องจากสมบัติของสารประกอบในกลุ่ม crown ether มีความเลือกเฉพาะต่อไอออนของโลหะบางชนิดจึงได้ใช้สารประกอบในกลุ่มนี้ในกระบวนการแยกสารให้บริสุทธิ์ [6] รวมทั้งใช้เป็น

ตัวพาที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (Neutral carrier) ในการสร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนของโพแทสเซียม (K^+) [7] โซเดียม (Na^+) [8] ยูเรนิล (UO_2^{2+}) [9] และ ตะกั่ว (Pb^{2+}) [10] เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนที่สามารถนำไปใช้วัดหาปริมาณของไอออนตะกั่วในสารละลายได้ โดยการหาตัวพาที่เป็นกลางทางไฟฟ้าและพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมในการสร้างแผ่นเยื่อพอลิเมอร์ ตลอดจนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแผ่นเยื่อพอลิเมอร์โดยการเสริมแรงด้วยไมโครไฟเบอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาเทคนิคการสร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนชนิดเยื่อพอลิเมอร์
2. เพื่อหาตัวพาที่เป็นกลางทางไฟฟ้า โดยการเลือกใช้ตัวพาที่เป็นกลางทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ ได้แก่ 18-crown-6, dibenzo-18-crown-6, dicyclohexano-18-crown-6, 4,4',(5'')-di-tert-butyl-dibenzo-18-crown-6 และ 15-crown-5 และพลาสติกไซเซอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ dibutyl phthalate (DBP), dioctyl phthalate (DOP), และ di-isononyl phthalate (DINP) ที่เหมาะสมสำหรับสร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนของตะกั่ว โดยการศึกษาสมบัติต่างๆ ดังนี้ ค่าความชันตามสมการของเนินสต์ ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ และอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า
3. เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแผ่นเยื่อพอลิเมอร์ให้ดียิ่งขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วชนิดเยื่อพอลิไวนิลคลอไรด์ เพื่อให้ได้ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดไอออนตะกั่ว โดยการเลือกใช้ตัวพาที่เป็นกลางทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ ได้แก่ 18-crown-6, dibenzo-18-crown-6, dicyclohexano-18-crown-6, 4,4',(5'')-di-tert-butyl-dibenzo-18-crown-6 และ 15-crown-5 และพลาสติกไซเซอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ dibutyl phthalate (DBP), dioctyl phthalate (DOP), และ di-isononyl phthalate (DINP)
2. ศึกษาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าต่อไอออนตะกั่ว ค่าความชันตามสมการของเนินสต์ ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว ความเป็นกรด - เบสของสารละลาย ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ และอายุการใช้งานของ ขั้วไฟฟ้า
3. ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแผ่นเยื่อพอลิเมอร์ให้ดียิ่งขึ้น โดยใช้เยื่อกระดาษของขั้วไฟฟ้า

เลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว

ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. สามารถพัฒนาเทคโนโลยี สำหรับการสร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน
3. ทำให้ทราบสมบัติของสารประกอบพวก crown ether พลาสตีไซเซอ์ และกระดาษกรองที่มีต่อการสร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนของไอออนตะกั่ว
3. สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของไอออนตะกั่วในน้ำได้



บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตะกั่วและผลกระทบที่มีต่อมนุษย์

2.1.1 สมบัติทางฟิสิกส์ [11]

ตะกั่วเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ที่ 4 ของตารางธาตุโดยปกติจะมีสี่เทา และมีไอโซโทปที่มีเลขมวล ดังนี้ คือ 204(15%), 206(23.6%), 207(22.6%) และ 208(52.3%) ไอโซโทปที่เสถียรของตะกั่ว เกิดจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี 3 ชนิดคือ ^{206}Pb เกิดจากการสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม ^{208}Pb เกิดจากอนุกรมทอเรียม และ ^{207}Pb เกิดจากอนุกรมแอกทีไนต์ โครงสร้างผลึกของตะกั่วเป็นแบบ face - centered cubic ความยาวของขอบของเซลล์ เท่ากับ 0.49389 nm จำนวนอะตอมต่อหน่วยเซลล์ เท่ากับ 4 อะตอม และมีสมบัติอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของตะกั่ว

Properties	Value
atomic number	82
atomic weight	207.2
melting point, °C	327.4
boiling point, °C	1770
latent heat of fussion, J/g	25
specific heat, J/(kg.K)	130
electrochemical equivalent of Pb^{2+} , g/(A.h)	3.8651
velocity of sound in lead, cm/s	122,700
coefficient linear expansion at 20 °C, °C ⁻¹	29.1×10^{-6}

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Properties	Value
thermal conductivity, W/(m.K)	
at 28 °C	34.7
100 °C	33.0
electrical resistivity, $\mu\Omega/cm$	
at 20 °C	20.65
100 °C	27.02
330 °C	96.73
normal electrode potential, vs standard hydrogen electrode = 0,V	0.22
viscosity, mPa.s(=cP)	
at 440 °C	2.12
550 °C	1.70
845 °C	1.19
magnetic susceptibility at 20 °C, m^3/kg	-0.29×10^{-6}
hardness	
Mohs'	1.5
Brinell	
common lead	3.2 – 4.5
chemical lead	4.5 – 6
Young's modulus,Gpa	16.5

2.1.2 สมบัติทางเคมี [11]

ตะกั่วในสารประกอบมีเลขออกซิเดชัน 2 ค่า คือ +2 และ +4 แต่โดยมากเกิดเป็นสารประกอบที่มีเลขออกซิเดชัน +2 สารประกอบของตะกั่วเป็นสารประกอบโคเวเลนต์ และสามารถเกิดเป็นเกลือได้ 2 ชนิดคือ plumbous (Pb (II)) และ plumbic (Pb (IV)) ซึ่งเป็นเกลือที่ละลายในน้ำได้และเป็นสารที่มีความเสถียรมากชนิดหนึ่ง ซึ่งใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างเนื่องจากมีสมบัติที่ทนทานต่อการกัดกร่อนทั้งเมื่ออยู่ในอากาศ น้ำ และดิน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของธาตุนี้ทำให้เกิดเป็นฟิล์มเคลือบที่ผิวซึ่งป้องกันการกัดกร่อนหรือทำให้เกิดขึ้นได้ช้า และเป็นโลหะที่มีความสำคัญต่อสังคมของมนุษย์มาเป็นเวลานานหลายร้อยปีมาแล้ว โดยที่ปริมาณการผลิตและการใช้มีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการปล่อยและเกิดการปนเปื้อนของตะกั่วในสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นซึ่งมนุษย์จะได้รับมลพิษของตะกั่ว โดยผ่านทางหายใจ และการกินอาหาร และน้ำดื่มที่มีตะกั่วปนเปื้อนอยู่

สรุประดับปริมาณ และความเป็นพิษของตะกั่วที่มีต่อมนุษย์ ซึ่งสำรวจโดย US EPA ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [12]

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของตะกั่วต่อมนุษย์

Lowest observed effect level $\mu\text{g}/100 \text{ ml}$	Effect	Population group
10	δ -LAD enzyme inhibition	Children and adults
17-20	Erythrocyte protoporphyrin elevation	Women and children
25-30	Erythrocyte protoporphyrin elevation	Adult males
40	Increased urinary ALA excretion	Children and adults
40	Anaemia	Children
40	Co-protoporphyrin elevation	Children and adults
50	Anaemia	Adults
50-60	Cognitive (central nervous system) deficits	Children
50-60	Peripheral neuropathies	Children and adults
80-100	Encephalopathic symptoms	Children
100-120	Encephalopathic symptoms	Adults

2.1.3 แหล่งกำเนิดของตะกั่วในน้ำ [12]

ปริมาณของตะกั่วในน้ำสาเหตุใหญ่มาจากการปล่อยของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และจากการชะล้างจากถนนซึ่งในอดีตมีการใช้น้ำมันที่มีส่วนผสมของสารตะกั่ว และเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ รวมทั้งบริเวณใกล้กับการทำเหมืองตะกั่ว ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำที่เป็นมลพิษโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 1-100 mg/dm³ ซึ่งสามารถทำให้ลดลงได้โดยการบำบัดก่อนที่จะปล่อยสู่แหล่งรับน้ำ ซึ่งในตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณของตะกั่วในน้ำเสียต่างๆ

ตารางที่ 2.3 ระดับตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ ก่อนผ่านการบำบัด

Industry	Lead (mg dm ⁻³)
Battery manufacture	
Particulate	5 – 48
Soluble	0.5 – 25
Plating	
Television tube manufacture	2 – 140
Mine drainage	400
Mine process water	0.02 – 2.5
Tetraethyllead manufacture	0.018 – 0.098
Organic	127 – 145
Inorganic	66 – 85
Multiproduct dyestuffs	3
Steelworks	
Soluble	< 0.05 – 9.5
Particulate	0.016 – 49

2.1.4 รูปแบบของตะกั่วในน้ำ

ตะกั่วเมื่ออยู่ในน้ำจะมีรูปที่แตกต่างกัน ซึ่ง Stum และ Bilinski [12] ได้สรุปไว้ ดังรูปที่ 2.1

Size ← 1 nm — 10 nm — 100 nm — 1000 nm

		Soluble		Colloidal		Particulate
Free metal ions	Inorganic ion pairs: organic chelates	Organic complex	Metal species bound to high molecular weight organic material	Metal species adsorbed on colloids	Metals incorporated with organic particles and remains of living organisms	Mineral solids: metal adsorbed on solids: precipitates and co-precipitate
Pb ²⁺	PbHCO ₃ ⁺ Pb-EDTA	Pb-fulvic acid	Pb-humic acid	Pb-Fe-(OH) ₃ Pb-MnO ₂	Pb-organic solid	Pb-clay PbCO ₃ (s)

รูปที่ 2.1 รูปต่างๆของตะกั่วในน้ำ

2.2 มาตรฐานคุณภาพน้ำ

มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่ม และน้ำบริโภคของประเทศต่าง ๆ ที่กำหนดปริมาณของตะกั่วในน้ำดื่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.4 [12]

ตารางที่ 2.4 ตะกั่วในมาตรฐานน้ำดื่ม

	ปี	ค่ามาตรฐาน (mg dm ⁻³)	อ้างอิง
USSR	1970	0.1	[12]
WHO			
European 1970	1970	0.1(0.3) ^a	
International 1971	1971	0.1	
South Africa	1971	0.05	
EEC	1975	0.05	
US EPA	1975	0.05	
US Nation Academy of Science	1977	0.025 ^b	
Ontario, Canada	1978	0.05	
Anglian Water Authority, England	1978	0.1(0.07) ^c	
Thailand	1993	0.05	[13]

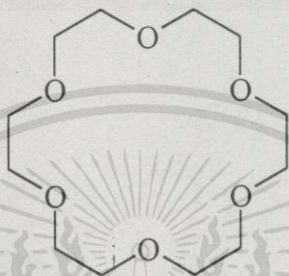
^aThe higher limit is for water in contact with lead pipes for 16 h.

^bThe US National Academy of Science State 'The no-observe-de-adverse-health-effect level cannot be set with assurance at any value greater than 0.025 mgdm⁻³,

^c 0.07 mgdm⁻³ is a maximum desirable.

2.3 สมบัติของสารประกอบ crown ether [14]

สารประกอบ crown ether เป็นสารที่มีโครงสร้างเป็นวง ซึ่งมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ อยู่ 4, 5, 6 อะตอมหรือมากกว่า เช่น 18-crown-6 มีออกซิเจนอยู่ 6 อะตอม มีรูปร่างเป็นวง โครงสร้างของ 18-crown-6 ดังแสดงในรูปที่ 2.2

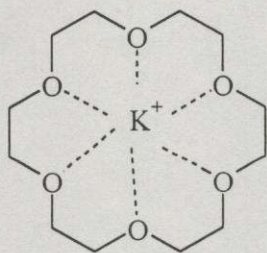


รูปที่ 2.2 18-crown-6

โมเลกุลมีรูปร่างคล้ายกับโดนัท และมีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.7 \AA ด้านในรู มีอะตอมของออกซิเจน และด้านนอกมีหมู่ CH_2 12 หมู่ซึ่งทำให้ด้านในมีสมบัติการละลายน้ำ และด้านนอกมีสมบัติไม่ละลายในน้ำ

2.3.1 ปฏิกริยาระหว่างสารประกอบ crown ether กับไอออนของโลหะ

จากโครงสร้างของสารประกอบ crown ether ที่มีรูอยู่ตรงกลางและมีออกซิเจนอยู่ 6 อะตอม อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวบนอะตอมของออกซิเจนจะเกิดแรงดึงดูดกับไอออนบวกที่อยู่รูได้ แรงดึงดูดนี้เรียกว่า dipole – induced dipole interaction ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการดึงดูดระหว่างสารประกอบ dibenzo-18-crown-6 กับไอออนโพแทสเซียม

2.3.2 การประยุกต์ใช้สารประกอบ crown ether

การประยุกต์ใช้สารประกอบ crown ether ในการดูดซับโลหะหนัก [6] ซึ่งใช้ dibenzo-18-crown-6- phosphotungstic acid หรือ phosphomolybdic acid ผสมกับ polyacrylamide จะให้ความเลือกเฉพาะในการดูดซับสูงต่อ Ag^+ , Pb^{2+} และ Hg^{2+} สำหรับไอออนขนาดเล็ก เช่น Cu^{2+} , Fe^{2+} และ Zn^{2+} พบว่ามีความเลือกเฉพาะที่ต่ำกว่าเนื่องจากขนาดของไอออน Ag^+ (ca. 2.56 Å) ซึ่งมีความพอดีกับช่องว่างของ dibenzo-18-crown-6 (ca. 2.60 Å) แต่ Pb^{2+} (2.42 Å) Hg^{2+} (2.20 Å) และ Cd^{2+} (1.94 Å) ซึ่งมีขนาดของไอออนเล็กกว่า ทำให้การดูดซับจะลดลงตามลำดับดังนี้ $\text{Ag}^+ > \text{Pb}^{2+} \approx \text{Hg}^{2+} > \text{Cd}^{2+}$ ทำให้สารประกอบ crown ether มีความเลือกเฉพาะต่อไอออนในกระบวนการดูดซับ

Petranck และ Ryba [7] ได้สร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนโพแทสเซียม โดยใช้ macrocyclic polyether พบว่าจะให้การตอบสนองต่อที่ดีต่อไอออนโพแทสเซียมในช่วง $10^{1.5} - 10^{-5}$ mol/l KCl และเมื่อใช้ dibenzo-18-crown-6 จะให้การตอบสนองที่ดีกับ KCl ในช่วง $10^{-2.5} - 10^{-5}$ mol/l และค่าความชันของกราฟมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 51 mV/decade

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน ชนิดแรกที่มีจำหน่ายประมาณปี 1932 คือ ขั้วไฟฟ้าเป็นเยื่อแก้ว ผลิตโดย Annelid Beckman และต่อมาในปี 1963 Orion ได้มีการพัฒนาเครื่องวัดพีเอช ยี่ห้อคอร์นิง (Corning) ออกจำหน่ายและได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้าให้ดีขึ้นโดยการเปลี่ยนองค์ประกอบของเยื่อแก้วใหม่ เช่น Corning 015 [15]

ในปี 1968 Seago และคณะ [16] ได้สร้างขั้วไฟฟ้าซึ่งเยื่อผลิตจากยางซิลิโคนผสมกับเกลือของโลหะทรานซิลันทำให้ขั้วไฟฟ้ามีการตอบสนองดีต่อโลหะทรานซิลัน แต่คุณสมบัติเชิงกลต้องปรับปรุง

ในปี 1972 Mascini และ Liberti [17] ได้เตรียมและศึกษาคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้าเยื่อที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันสำหรับตรวจวัดตะกั่วเยื่อนี้ประกอบด้วยซิลิโคนซิลไฟด์-เลดซิลไฟด์ที่เตรียมได้จากการผสมเลดซิลไฟด์และซิลเวอร์ซิลไฟด์เข้ากับพอลิเอทิลีนและอัดเป็นแผ่นซึ่งการตอบสนองต่อ Pb^{2+} อยู่ในช่วงความเข้มข้น $10^{-5} - 10^{-1}$ M และมีไอออนที่รบกวนที่สำคัญคือไอออน Fe^{2+} , Hg^{2+} , Ag^+ และ Cu^{2+}

ในปี 1974 Craggs และ Moody [18] ได้สร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนชนิดเยื่อพีวีซี โดยใช้พีวีซีเป็นตัวค้ำจุนตัวแลกเปลี่ยนไอออนที่เป็นของเหลว (Liquid ion exchanger) เยื่อชนิดนี้ใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 1974 Petranck และ Ryba [7] สร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนสำหรับตรวจวัดโพแทสเซียม โดยใช้ macrocyclic polyether และศึกษาผลของโครงสร้างของตัวพาที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (Neutral carrier) ที่มีต่อการเลือกเฉพาะไอออน จากการศึกษาพบว่าการตอบสนองต่อไอออนของโพแทสเซียม ในช่วง 10^{-1} - 10^{-5} mol/l KCl และค่าความชันเท่ากับ 59 ± 1 mV/decade ที่อุณหภูมิ 25°C และสำหรับ dibenzo-18-crown-6 มีการตอบสนองในช่วง $10^{-2.3}$ - 10^{-5} mol/l KCl และค่าความชันเท่ากับ 51 mV/decade

ในปี 1984 Lihdher และคณะ [19] ได้ศึกษาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนสำหรับไอออนตะกั่ว โดยใช้ตัวพาที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (Neutral carrier) ที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นไอออนิฟออร์ซึ่งพบว่า N,N-dioctadecyl-N',N'-dipropyl-3,6-dioxactancediamine สามารถลดการรบกวนจากไอออนของโลหะอัลคาไลด์ และอัลคาไลน์เอิร์ท

ในปี 1987 Tzing และคณะ [20] ได้ศึกษาการดูดซับของสารประกอบ crown ether ที่มีต่อโลหะหนัก (Heavy metal ions) โดยใช้ crown ether -phosphotungstic acid (PW) และ crown ether - phosphomolybdic acid (Pmo) ใน polyacrylamide โดยการทำให้เกิดเป็นเจล และสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ ดังเช่น Ag^+ , Pb^{2+} , Hg^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{2+} , และ Zn^{2+} ซึ่งพบว่า dibenzo-18-crown-6 -PW (or Pmo) polyacrylamide มีการดูดซับที่สูงสำหรับไอออนของโลหะที่มีขนาดใหญ่เช่น Ag^+ , Pb^{2+} และ Hg^{2+} และสำหรับ dibenzo-18-crown-6-Pmo ใช้เป็นฟิล์มสำหรับดูดซับ Ag^+ ออกจากไอออนโลหะอื่นๆ ในสารละลาย

และในปีเดียวกันนี้ Jabber [21] ได้สร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะสำหรับวัดไอออนตะกั่ว โดยใช้สารประกอบพวก polyalkoxylated ได้แก่ 1540 (PEG 1540), antraro-co-880 และ polypropylene glycol (PPG 425) เป็นสารที่ไวทางไฟฟ้าต่อไอออน Pb^{2+} โดยเตรียมเป็นขั้วไฟฟ้าเยื่อพีวีซี ซึ่งปรากฏว่าขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนเยื่อพีวีซีที่มีส่วนผสมของ antraro-co-880 และ TPO-NOPE จะมีความเลือกเฉพาะสูงต่อไอออน Pb^{2+} ในสารละลายที่มีไอออนของโลหะอื่นปนอยู่ และมีค่าการตอบสนองในช่วง 10^{-1} - 10^{-5} mol/l Pb^{2+}

ในปี 1995 Srivastava และคณะ [10] ใช้ 15-crown-5 เป็นไอออนิฟออร์ สำหรับการเตรียมเยื่อของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนสำหรับตรวจวัดไอออนตะกั่ว ซึ่งสามารถตรวจวัดตะกั่วได้ในช่วงความเข้มข้น 5.20 mgdm^{-3} - $20.72 \times 10^3 \text{ mgdm}^{-3}$ ช่วงค่าพีเอชที่ทำงานได้ดีอยู่ในช่วง 3-6 และไอออนรบกวนก็ไม่มีผลต่อกัญไฟฟ้า เวลาการตอบสนอง 30 วินาที และมีอายุการใช้งานประมาณ 4 เดือน

ในปีเดียวกันนี้ Sheen และคณะ [22] ได้สร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนสำหรับตรวจวัดไอออนตะกั่ว โดยใช้ crown ether คือ monobenzo-15-crown-5 (MB15C5), MB15C5-phosphotungstic acid (PW) และ MB15C5-phosphomolybdic acid (PMo) เป็นตัวพาที่เป็น

กลาง (Neutral carrier) ซึ่งค่าการตอบสนองอยู่ในช่วง 10^{-1} - 1×10^{-5} mol/l และค่าความชันมีค่าเท่ากับ 30 mV /decade

ในปีเดียวกันนี้ Malinoska และคณะ [23] ศึกษาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนสำหรับตรวจวัดไอออนตะกั่ว โดยใช้ Calix [4] arene เป็นไอออนฟออร์ ซึ่งค่าการตอบสนองอยู่ในช่วง 10^{-6} - 10^{-2} mol/l Pb^{2+} และค่าความเลือกเฉพาะดีกว่าต่อ Cu^{2+} , Zn^{2+} และ Cd^{2+} เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนแบบเยื่อของแข็งที่มีจำหน่าย

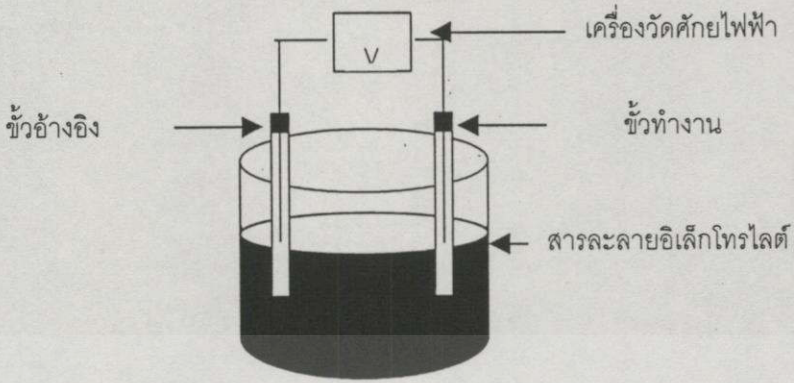
และในปีเดียวกันนี้ Knoll และคณะ [5] ได้ใช้ไมโครไฟเบอร์เป็นตัวเยื่อพีวีซีเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเยื่อ และพบว่าขั้วไฟฟ้าใหม่นี้ให้การตอบสนองดีเหมือนเดิม

2.5 หลักการของโพเทนชิอเมทรี [24] [26][29][38][39][46]

วิธีทางโพเทนชิอเมทรี (Potentiometry) เป็นวิธีที่ศึกษาปริมาณของไอออนในสารละลาย โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า และองค์ประกอบของสารละลายซึ่งใช้ความสัมพันธ์ตามของสมการเนินสต์ ซึ่งสมการนี้ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ากับ แอคติวิตีของไอออน องค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในเทคนิคโพเทนชิอเมทรี ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วดังนี้

1. ขั้วอ้างอิง (Reference electrode) คือขั้วไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ และไม่ขึ้นกับปริมาณ ของไอออนในสารละลายที่จะวิเคราะห์
2. ขั้วทำงาน (Working electrode) คือขั้วไฟฟ้าที่ศักย์ของขั้วจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของความเข้มข้นหรือแอคติวิตี (Activity) ของสารในสารละลาย

ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน (Ion-selective electrode, ISE) เป็นขั้วทำงานชนิดหนึ่งในเซลล์ไฟฟ้าเคมีของเทคนิคโพเทนชิอเมทรี ซึ่งมีสมบัติคือมีความเลือกเฉพาะต่อไอออนในสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ ส่วนประกอบของเซลล์ไฟฟ้าของเทคนิคทางโพเทนชิอเมทรี สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีของเทคนิคโพเทนชิอเมทรี

การเกิดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในระบบโพเทนชิอเมทรีสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E = E_m + E_m' + E_R + E_R' + E_j \tag{2.1}$$

- เมื่อ
- E = ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้
 - E_m = ศักย์ไฟฟ้าระหว่างเยื่อของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนกับสารละลายที่วิเคราะห์
 - E_m' = ศักย์ไฟฟ้าระหว่างเยื่อกับสารละลายภายในขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนที่มีค่าแอกติวิตีคงที่
 - E_R = ศักย์ไฟฟ้าของขั้วอ้างอิง
 - E_R' = ศักย์ไฟฟ้าของขั้วอ้างอิงภายในขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน
 - E_j = ศักย์ไฟฟ้าของรอยต่อของของเหลว

แต่เนื่องจากในการทดลองในสภาวะคงที่ที่ทำให้เทอมทั้งหมดที่อยู่ทางขวามือของสมการ (2.1) มีค่าคงที่ ยกเว้นเทอมแรก (E_m) ดังนั้นสมการที่ (2.1) จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$E = \text{const } t + E_m \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อขั้วไฟฟ้ามีการตอบสนองเป็นไปตามสมการของเนิร์นสต์ ค่า E จะมีความสัมพันธ์กับค่าแอกติวิตีของไอออน a_A ในสารละลายดังสมการที่ (2.3)

$$E = E^\circ + \frac{RT}{z_A F} \ln a_A \quad (2.3)$$

ในกรณีที่ในสารละลายที่วิเคราะห์มีไอออนอื่นเป็นตัวรบกวน ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นไปตามสมการของ Nicolsky-Eisenman (Nicolsky-Eisenman Equation) ดังสมการที่ (2.4)

$$E = E^\circ + \frac{RT}{z_A F} \ln \left[a_A + \sum_{X=B,C} K_{A,X}^{\text{pot}} (a_X)^{z_A/z_B} \right] \quad (2.4)$$

เมื่อ

E = ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้

E° = ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

R = ค่าคงที่ของแก๊ส

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์

a_A = แอกติวิตีของไอออนที่วิเคราะห์

a_X = แอกติวิตีของไอออนที่รบกวน

$K_{A,X}^{\text{pot}}$ = ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของขั้วไฟฟ้าที่มีต่อไอออน X เทียบกับไอออน A

z_A = ประจุของไอออน

การเกิดศักย์ไฟฟ้าของเยื่อ (Membrane potential, E_m) สมการที่ 2.5

$$E_m = \frac{RT}{z_1 F} \ln \frac{a_1'}{a_1''} \quad (2.5)$$

เมื่อ a_1' = แอกติวิตีของไอออนในสารละลายภายนอก(สารละลายตัวอย่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- a_i'' = แอคติวิตีของสารละลายภายในขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน
 z_i = ประจุของไอออนรวมทั้งเครื่องหมาย
 R = ค่าคงที่ของแก๊ส (8.31441 J/K.mol)
 F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96484.56 C/M; 1 C=1A.s)
 T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

2.5.1 ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ (Selectivity coefficient, $K_{A,B}^{pot}$) [28][32][33]

ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะเป็นสิ่งสำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน ซึ่งในทางปฏิบัติในกรณีที่มีไอออนอื่นรบกวน สามารถหาสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะได้จากสมการ Nicolsky-Eisenman (Nicolsky-Eisenman Equation) ดังสมการ (2.4)

ซึ่งค่านี้จะบอกอิทธิพลของไอออนรบกวนที่มีต่อศักย์ไฟฟ้าของไอออนที่จะวิเคราะห์ในระบบ ซึ่งถ้าขั้วไฟฟ้ามีการเลือกเฉพาะที่ดีจะมีค่า $K_{A,B}^{pot}$ ต่ำ

วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะมีหลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมี 2 วิธีดังนี้

1. วิธีการแยกสารละลาย (Separated solution method)
2. วิธีการผสมสารละลาย (Mixed solution method)

1. วิธีการแยกสารละลาย (Separated solution method)

วิธีการแยกสารละลายทำได้โดยการแยกวัดศักย์ไฟฟ้าของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ และไอออนที่รบกวนที่แอคติวิตีต่าง ๆ และพลอตกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับแอคติวิตี ในกราฟเดียวกัน ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งวิธีการแยกสารละลายสามารถแบ่งได้ เป็น 2 วิธี ดังนี้

ก. วิธีทำให้แอคติวิตีเท่ากัน (Iso-activity method)

วิธีนี้ทำได้โดยวัดศักย์ไฟฟ้าของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ A ที่แอคติวิตีต่างๆ โดยที่ไม่มีไอออนอื่นรบกวน (B) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ ดังสมการ (2.6)

$$E_i = E^\circ \pm \frac{RT}{z_A F} \ln a_A \quad (2.6)$$

และวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่มีเฉพาะไอออนรบกวน B ที่แอคติวิตีต่างๆ โดยไม่มีไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ (A) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ ดังสมการ (2.4) ซึ่งจะลดรูปเป็นสมการ (2.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_2 = E^\circ + \frac{RT}{z_A F} \ln(K_{A,B}^{pot} \cdot a_B^{z_A/z_B}) \quad (2.7)$$

วิธีการคำนวณหาค่า $K_{A,B}^{pot}$ ทำได้โดยพลอตกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับแอคติวิตี ในกราฟเดียวกัน ดังรูปที่ 2.5 แล้วกำหนดจุดตัดของกราฟทั้งสองที่ทำให้ $a_A = a_B$ ดังในรูปที่ 2.5 จะได้จุดตัด W และ X ต่อจากนั้นลากเส้นตรงตั้งฉากให้ตัดกับแกนค่าศักย์ไฟฟ้าของกราฟทั้งสองจะได้จุดตัด Y และ Z ซึ่งเป็นแกนค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดซึ่งจะทำให้ทราบค่า E_1 และ E_2 และนำไปแทนค่าในสมการ (2.8) ซึ่งได้จากการเอาสมการ (2.7) - สมการ (2.6) จะได้สมการที่

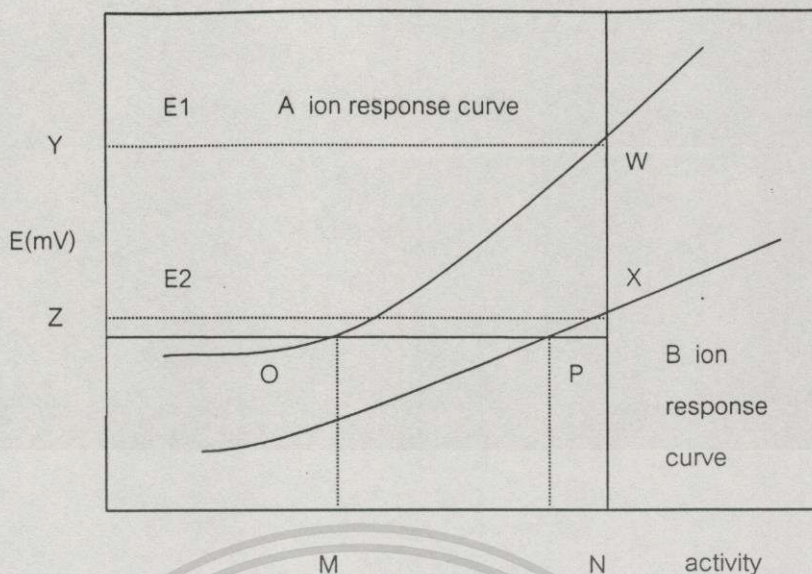
$$\log K_{A,B}^{pot} = \frac{(E_2 - E_1)z_A F}{2.303RT} + (1 - \frac{z_A}{z_B}) \log a_A \quad (2.8)$$

ข. วิธีทำให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน (Iso - potential method)

วิธีนี้คล้ายกับวิธีแรกคือวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่มีไอออนที่จะวิเคราะห์ A ที่แอคติวิตีต่างๆ และวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่มีเฉพาะไอออนรบกวน B ที่แอคติวิตีต่างๆ และหาค่า $K_{A,B}^{pot}$ โดยกำหนดจุดที่ $E_1 = E_2$ โดยการลากเส้นตรงตัดกับแกนของศักย์ไฟฟ้าเส้นกราฟทั้งสองเส้น จะได้จุดตัด O และ P จากนั้นลากเส้นตรงให้ตั้งฉากตัดกับแกนค่าแอคติวิตีที่จุด M และ N ของกราฟทั้งสอง จะได้ค่า a_A และ a_B และนำไปแทนค่าในสมการ (2.9) ซึ่งได้จากการสมการ (2.6) + สมการ (2.7) จะได้สมการ (2.9)

$$K_{A,B}^{pot} = \frac{a_A}{(a_B)^{z_A/z_B}} \quad (2.9)$$

วิธีการทำให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน และวิธีทำให้แอคติวิตีเท่ากัน แสดงได้ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะโดยวิธีการทำให้แอคติวิตีเท่ากัน และวิธีทำให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน

2. วิธีการผสมสารละลาย (Mixed solution method)

วิธีการผสมสารละลายเป็นวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่มีทั้งแอคติวิตีของสารที่ต้องการวิเคราะห์และไอออนรบกวน ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 วิธี ดังนี้

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

วิธีนี้ทำได้โดยการวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าในสารละลายผสมของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์กับไอออนที่รบกวน โดยให้แอคติวิตีของไอออนที่รบกวนคงที่ และเปลี่ยนแปลงแอคติวิตีของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ (A) ที่แอคติวิตีต่างๆ วัดศักย์ไฟฟ้าและเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้ากับแอคติวิตีของ A ดังรูปที่ 2.6 เมื่อไอออน A ลดลงการรบกวนของไอออน B จะปรากฏขึ้นมาดังช่วงที่แลง และต่อจากนั้นศักย์ไฟฟ้าจะขึ้นกับแอคติวิตีของไอออน A กำหนดให้จุดตัดระหว่างเส้นสัมผัสของความชันของกราฟและเส้นสัมผัสของกราฟที่ขนานกับแกน X ของ แอคติวิตีของไอออนรบกวนที่จุด A ดังรูปที่ 2.6 คือ แอคติวิตีของไอออน A (a_A) ที่จะนำไปคำนวณหาค่า $K_{A,B}^{pot}$ ในสมการที่ 2.9

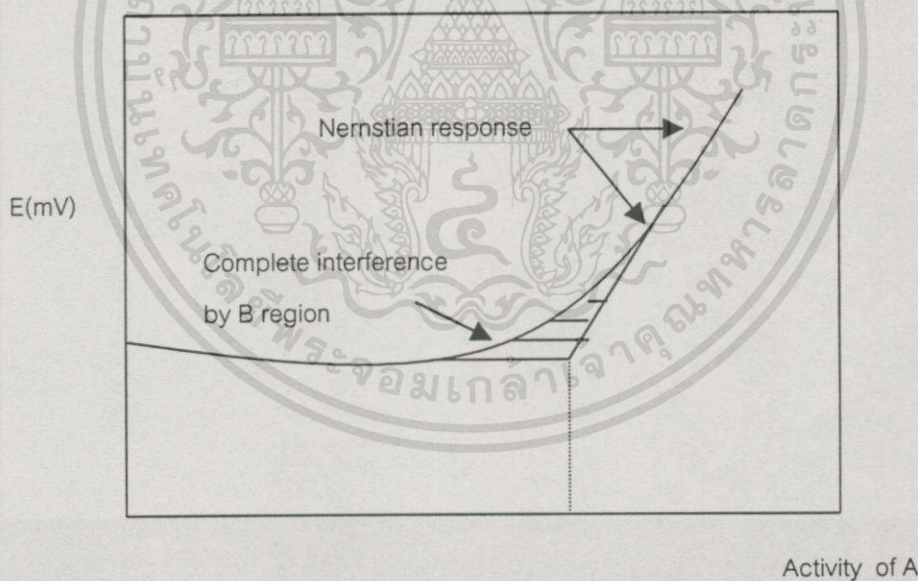
$$K_{A,B}^{pot} = \frac{a_A}{(a_B)^{z_A/z_B}} \quad (2.9)$$

เมื่อ $z_A = z_B$ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$K_{A,B}^{\text{pot}} = \frac{a_A}{a_B} \quad (2.10)$$

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

วิธีนี้จะตรงข้ามกับวิธีการแรกคือเป็นวิธีที่ทำให้แอกติวิตีของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ A คงที่ และเปลี่ยนแปลงแอกติวิตีของไอออนที่รบกวน B ที่แอกติวิตีต่างๆ วิธีนี้เป็นประโยชน์มากในการคำนวณการรบกวนของ H^+ ต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนสำหรับตรวจไอออนบวก และ OH^- ต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนสำหรับไอออนลบ วิธีการคำนวณจะเหมือนกันกับวิธีการแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ โดยวิธีกำหนดให้แอกติวิตีของไอออนรบกวนคงที่ และวิธีกำหนดให้แอกติวิตีของไอออนที่จะวิเคราะห์คงที่

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

2.5.3 เวลาการตอบสนอง (Response time)[24][45][47]

เวลาการตอบสนองคือเวลาที่ใช้ในการทำให้ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเข้าสู่สมดุลหรือคงที่ และในทางปฏิบัติสามารถหาเวลาการตอบสนองได้หลายวิธี ดังเช่นวิธีต่อไปนี้

เวลาการตอบสนองหาได้โดยการวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะที่ความเข้มข้น a_{A1} และจับเวลาจนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าคงที่ แล้วเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่เวลาต่างๆ กันแล้วหาจุดตัดของกราฟที่ความชันเริ่มคงที่จะได้เวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน

2.5.3 ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้ (Detection limit) [48]

ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนหมายถึง ความเข้มข้นที่ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีการเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของช่วง I ดังรูปที่ 2.7 ก ซึ่งในทางปฏิบัติหาได้โดยการหาจุดตัดระหว่างเส้นสัมผัสของความชันของกราฟและเส้นสัมผัสในแกนอนที่ขนานกับแกน X ซึ่งศักย์ไฟฟ้าไม่ขึ้นกับแอคติวิตีของไอออนดังรูปที่ 2.7 ข



รูปที่ 2.7 ก นิยามของระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน

รูปที่ 2.7 ข ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้ของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนในทางปฏิบัติ

ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนขึ้นกับระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้ด้วย ซึ่งถ้ามีค่าต่ำแสดงว่ามีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สูง แต่ความเข้มข้นที่อยู่ใกล้กับจุดระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้จะมีความแม่นยำ และความเที่ยงในการวิเคราะห์ต่ำ เนื่องจากความไม่คงที่ของศักย์ไฟฟ้า

2.6 ประเภทของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน [34][35][36][37][38][39]

ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนสามารถแบ่งออกได้ดังตารางที่ 2.5 โดยใช้สารที่ใช้ทำเยื่อเป็นเกณฑ์

ตารางที่ 2.5 ประเภทของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน

Category	Type	Material	Example
Glass	Glass	Glass	H^+, Na^+, K^+
Solid – state membrane	Crystal	$LaF_3, AgCl$	F^-, Cl^-
	Mixed crystal	$AgCl/Ag_2S,$ CuS/Ag_2S	Cl^- Cu^{2+}
Liquid – membrane	Ion-exchanger	Ion-exchanger	Ca^{2+}, NO_3^-
	Neutral carrier	Neutral carrier	K^+, Ca^{2+}, Na^+
ISFET	Coated grid	Polyphenyldiammine	NO_3^-
	Treated grid	Neutral carrier	K^+ H^+

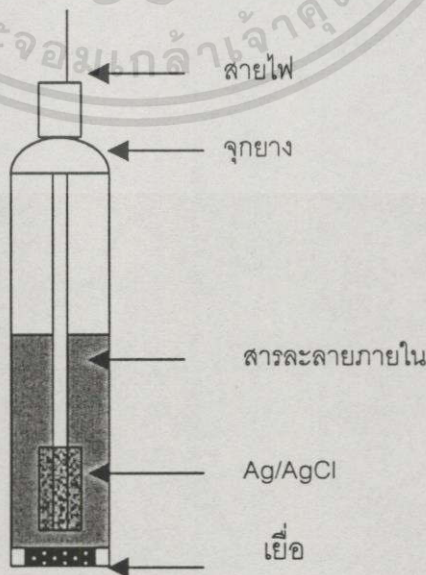
2.6.1 ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะเยื่อของเหลว (Liquid – membrane ion-selective electrodes)

ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนเยื่อของเหลว สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1. ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนเยื่อของเหลวที่ใช้ตัวพาที่มีประจุ (Charge carrier) ตัวอย่างเช่น ตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchanger)
2. ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนที่ใช้ตัวพาที่เป็นกลางทางไฟฟ้าที่เป็นของเหลว (Neutral carrier liquid)

การสร้างขั้วไฟฟ้าแบบของเหลวในอดีตจะใช้แผ่นที่มีรูพรุนที่อิมมิดด้วยทำละลายอินทรีย์บรรจุสารที่เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนหรือไอออนิฟอร์แต่มีปัญหาตรงที่มีการหลุดของสารที่มีความไวทางไฟฟ้า หรือตัวแลกเปลี่ยนไอออนเข้าไปในสารละลายที่ทดสอบที่ละเล็กทีละน้อยทำให้ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าไม่เสถียร และมีความยุ่งยากในการเติมของเหลวเข้าไปในรูพรุนที่เล็กมาก

ในปัจจุบันการสร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนแบบเยื่อของเหลวพัฒนาเป็นแบบเยื่อพอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยสารที่ไวทางไฟฟ้า เช่น ตัวแลกเปลี่ยนไอออนหรือ ไอออนิฟอร์ โดยผสมพลาสติกไซเซอร์ และสารพอลิเมอร์ เข้าด้วยกันและละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ถ้าพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นตัวค้ำจุนพีวีซีขั้วไฟฟ้านั้นจะเรียกว่าขั้วไฟฟ้าชนิดเยื่อพีวีซี ซึ่งเป็นที่นิยมเตรียมกันมากในปัจจุบัน การสร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนชนิดนี้ เยื่อจะติดที่ปลายของตัวขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งโดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนชนิดอื่นๆ ก็จะมีลักษณะโครงสร้างที่เหมือนกันดังนี้



รูปที่ 2.9 ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนชนิดเยื่อของเหลว

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี และ อุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

3.1.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเยื่อ (membrane) มีดังต่อไปนี้

1. Poly(vinylchloride) (PVC) (commercial grade) ผลิตโดย Siamvic Co.Ltd. (Thailand)
2. Filter paper ผลิตโดย Whatman (Germany).
3. 18-crown-6(GC grade) ผลิตโดย Fluka (Buchs, Switzerland)
4. Dibenzo-18-crown6 (UVgrade) ผลิตโดย Fluka (Buchs, Switzerland)
5. Dicyclohexano-18-crown-6 (GC grade) ผลิตโดย Fluka (Buchs, Switzerland)
6. 4',4''(5'')-Di-tert-butyl dibenzo-18-crown-6 (HPLC grade) ผลิตโดย Fluka (Buchs, Switzerland)
7. 15-crown-5 (GC grade) ผลิตโดย Fluka (Buchs, Switzerland)
8. Dibutyl phthalate (DBP)(for synthesis grade) ผลิตโดย Merck (Germany)
9. Dioctyl phthalate (DOP)(laboratory grade) ผลิตโดย Aldrich (Germany)
10. Di-isononyl phthalate (DINP) (laboratory grade) ผลิตโดย Fluka (Buchs, Switzerland)
11. Tetrahydrofuran (THF)(HPLC grade) ผลิตโดย Fluka (Buchs, Switzerland)

3.1.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานเกรดการวิเคราะห์ ทุกตัว ผลิตโดย Carlo erba

1. $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

2. KCl

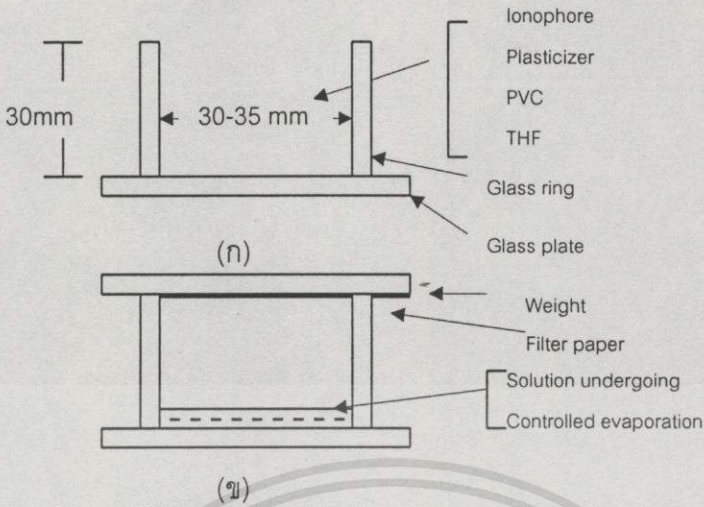
3. $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$
4. Ethylene diammine tetraacetic acid disodium salt (EDTA- Na_2)
5. NaNO_3
6. KNO_3

3.1.2 เครื่องมือ (Instruments)

1. เครื่องวัด พีเอช (Microprocessor pH/ion meter pMX3000)
(GmbH, Germany)
2. อะตอมมิคแอนบอร์พชั่น สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ผลิตโดย Shimadzu AA-680
(Japan)
3. เครื่องชุบโลหะ (Electroplating battery charger Hull cell Model SC
2BH) (Thailand)

3.2 การเตรียมเยื่อ

การเตรียมเยื่อพีวีซี เตรียมตามวิธีของ Craggs และ คณะ [5][18] โดยละลายพีวีซี และพลาสติกไซเซอรินในอัตราส่วนที่เหมาะสม ในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรน (THF) ต่อจากนั้นเติม ไอออนโนเฟอร์ (ionophore) และผสมให้เข้ากันได้ดีใส่ฟองอากาศออกให้หมด แล้วเทลงอุปกรณ์ที่จัดไว้ ดังรูปที่ 3.1ก ปิดด้านบนของแบบด้วยกระดาษกรอง และวางทับด้วยกระดาษฟิวส์ ดังรูป 3.1ข ทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออกไปหมด ลอกออกจากแผ่นแก้วอย่างระมัดระวัง และตัดแบ่งเยื่อออกเป็น 3 แผ่น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. ในกรณีที่เตรียมเยื่อที่มีกระดาษกรองเป็นตัวค้ำจุน การเตรียมเหมือนเยื่อที่ไม่ใช้กระดาษกรองเป็นตัวค้ำจุนทุกขั้นตอน โดยการตัดกระดาษกรองให้เป็นวงกลมขนาดพอดีกับแบบที่จะเทสารละลายลงไป และต่อจากนั้นเทสารละลายลงไปและคั่นฟองอากาศหมด แล้วปิดทับด้วยกระดาษกรองและกระดาษฟิวส์



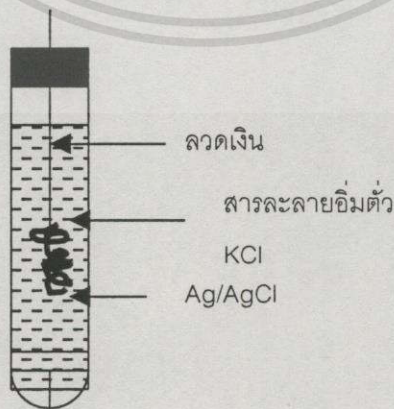
(ข)

รูปที่ 3.1 ก และ รูปที่ 3.1ข แสดงการเตรียมเยื่อ

3.3 การเตรียมขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

การเตรียมขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ เตรียมโดยวิธีอิเล็กโทรไลซิส [24] โดยใช้ลวดเงินยาว 10 เซนติเมตร ล้างให้สะอาดด้วยแอมโมเนียเจือจาง และน้ำกลั่น ตามลำดับ

การทำอิเล็กโทรไลซิสในสารละลาย HCl เข้มข้น 0.1 โมลาร์ จะใช้ลวดเงินเป็นขั้วแอโนด และลวดแพลทินัม เป็นขั้วแคโทด และให้กระแสไฟฟ้า 1 mA/cm^2 เป็นเวลา 10 ชั่วโมง หลังจากทำคลอไรด์เซชัน (Chlorodization) เสร็จแล้ว จุ่มลวดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ในสารละลาย HCl เจือจาง 0.1 mol/l 1-2 วัน และในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์อิ่มตัวตามลำดับ ขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ที่เตรียมได้ แสดงดังรูปที่ 3.2



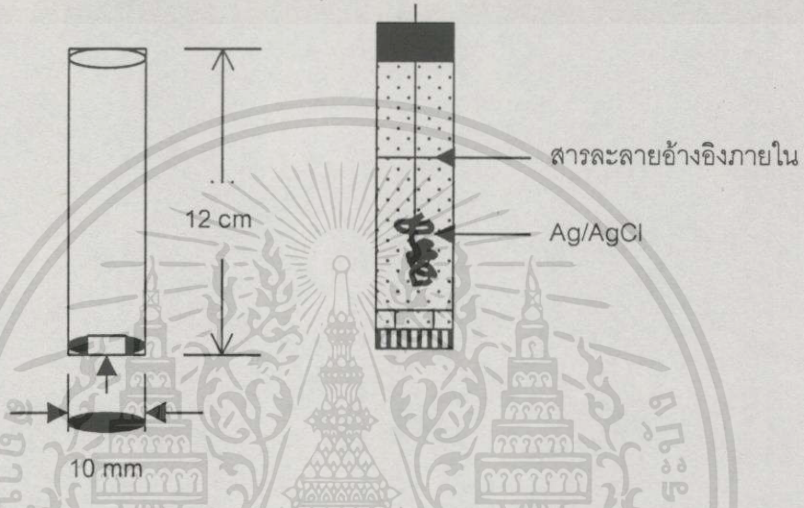
รูปที่ 3.2 ขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การประกอบชิ้นทำงาน

เยื่อที่เตรียมได้ในข้อ 3.2 มาตัดที่หลอดแก้วที่ใช้ทำเป็นชิ้นทำงานโดยใช้กาวยิปซั่มที่เสร็จแล้ว
ทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วใส่ลวดซิลเวอร์ – ซิลเวอร์คลอไรด์ และสารละลายอ้างอิงภายในลงไป
โครงสร้างของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนของไอออนตะกั่ว ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว

3.5 การวัดศักย์ไฟฟ้า [44]

ก่อนที่จะวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนของไอออนตะกั่ว ต้องแช่เยื่อในสาร
ละลาย Pb^{2+} เข้มข้น $1.0 \times 10^{-1} \text{ mol/l}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่อุณหภูมิ
 $25 \pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ โดยใช้ Microprocessor pH/ion meter pMX3000 การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมี เป็นดังนี้

Ag/AgCl | สารละลายภายใน | เยื่อ | สารละลายตัวอย่าง | ขั้วอ้างอิงภายนอก

การวัดศักย์ไฟฟ้าทำได้โดยวัดเทียบกับขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ เป็นขั้วอ้างอิง

3.6 การศึกษาสมบัติของ ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว

3.6.1 การวัดศักย์ไฟฟ้า และการทำกราฟมาตรฐาน [22]

ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว สามารถหาได้จากการวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานของ Pb^{2+} ในช่วงความเข้มข้น $10^{-7} - 10^{-1}$ mol/l แล้วพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าแอดคิวิตี แล้วหาค่าความชัน ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ และค่าเวลาการตอบสนองจากกราฟที่พล็อตระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลาเป็นวินาทีแล้วหาจุดที่ความชันของกราฟเริ่มคงที่และลากเส้นตรงตัดกับแกนของเวลาจะได้เวลาการตอบสนอง

3.6.2 การศึกษาผลของ พีเอช [6][44]

การศึกษาค่าพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนของไอออนตะกั่วทำได้โดยการวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐาน และปรับค่าพีเอชของสารละลายมาตรฐานให้อยู่ในช่วงตั้งแต่ค่าพีเอช 3-9 โดยการเติมกรดไนตริก เข้มข้น 1.0×10^{-1} mol/l และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1.0×10^{-1} mol/l ในปริมาณเล็กน้อย ในสารละลายมาตรฐานของ Pb^{2+} เข้มข้น $1.0 \times 10^{-2}, 1.0 \times 10^{-3}$ และ 1.0×10^{-4} mol/l บันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าและพล็อต กราฟระหว่างค่าพีเอชกับค่าศักย์ไฟฟ้า

3.6.3 การศึกษาผลของการรบกวนของไอออนอื่น

ไอออนรบกวนที่มีผลต่อการวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว ในที่นี้ได้แก่ K^+ Cu^{2+} และ Na^+ การศึกษาผลของการรบกวนของไอออน[22][28] จะเลือกใช้วิธีให้ความเข้มข้นของไอออนรบกวนคงที่คือ 1.0×10^{-3} mol/l และความเข้มข้นของ Pb^{2+} อยู่ในช่วง $1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-1}$ mol/l

3.6.4 การศึกษาอายุการใช้งาน

การศึกษาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนทำได้โดยการหาค่าความชันของกราฟระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอการิทึมของแอดคิวิตีในช่วงความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-7} - 1.0 \times 10^{-1}$ mol/l และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ ในช่วง 1-5 สัปดาห์

3.6.5 การเปรียบเทียบระหว่าง ISE กับ AAS [1][6][10][45]

ได้ทำการเปรียบเทียบการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในน้ำตัวอย่างอย่างสังเคราะห์ โดยใช้ ISE

และ AAS เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel Office97 และโปรแกรม Microcal Original 3.5 ในการเขียนกราฟหาค่าความชัน ความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ และค่าเวลาการตอบสนอง

3.8 การสรุป และรายงานผล



บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การเตรียมเยื่อตามหัวข้อ 3.2

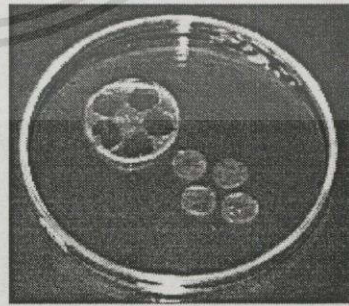
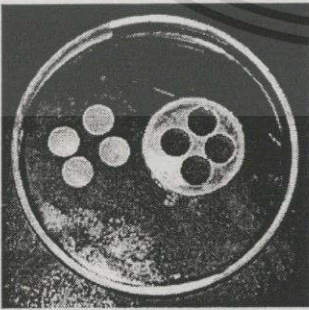
การเตรียมเยื่อ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เยื่อชนิดที่ใช้ และ ไม่ใช้กระดาษกรอง เป็นตัวเสริมแรงและ ทำการเตรียมเยื่อที่มีส่วนผสมของไอออนโฟร์ที่ต่างกัน 5 ชนิด คือ 18-crown-6(181C 6), dicyclohexano-18- crown-6(DC18C6) , 4',4''(5'')-di-tert-butyl-dibenzo-18-crown-6(4,518C6) และ 15-crown-5(15C5) นำมาละลายในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรน 4 ml วิธีการเตรียมเยื่อดูในหัวข้อ 3.2 โดยใช้ส่วนผสมดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนขององค์ประกอบของเยื่อ

สูตรที่	ไอออนโฟร์ (mg)	พีวีซี (mg)	กระดาษกรอง		พลาสติไซเซอร์		
			ใช้	ไม่ใช้	DBP (271mg)	DOP (271mg)	DINP (271mg)
1	DB18C6	113	-	✓	✓	-	-
2	DB18C6	113	✓	-	✓	-	-
3	DB18C6	113	-	✓	-	✓	-
4	DB18C6	113	✓	-	-	✓	-
5	DB18C6	113	-	✓	-	-	✓
6	DB18C6	113	✓	-	-	-	✓
7	18C6	113	-	✓	✓	-	-
8	18C6	113	✓	-	✓	-	-
9	18C6	113	-	✓	-	✓	-
10	18C6	113	✓	-	-	✓	-
11	18C6	113	-	✓	-	-	✓
12	18C6	113	✓	-	-	-	✓
13	DC18C6	113	-	✓	✓	-	-
14	DC18C6	113	✓	-	✓	-	-

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

15	DC18C6	113	-	✓	-	✓	-
16	DC18C6	113	✓	-	-	✓	-
17	DC18C6	113	-	✓	-	-	✓
18	DC18C6	113	✓	-	-	-	✓
19	4,518C6	113	-	✓	✓	-	-
20	4,518C6	113	✓	-	✓	-	-
21	4,518C6	113	-	✓	-	✓	-
22	4,518C6	113	✓	-	-	✓	-
23	4,518C6	113	-	✓	-	-	✓
24	4,518C6	113	✓	-	-	-	✓
25	15C5	113	-	✓	✓	-	-
26	15C5	113	✓	-	✓	-	-
27	15C5	113	-	✓	-	✓	-
28	15C5	113	✓	-	-	✓	-
29	15C5	113	-	✓	-	-	✓
30	15C5	113	✓	-	-	-	✓



รูปที่ 4.1 ก เยื่อที่ใช้กระดาษกรอง

รูปที่ 4.1 ข เยื่อที่ไม่ใช้กระดาษกรอง

ความหนาของเยื่อแต่ละชนิดที่เตรียมได้วัดจากค่าเฉลี่ยของเยื่อ 3 แผ่นดังรูปที่ 4.1 ก-4.1 ข และค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 4.2

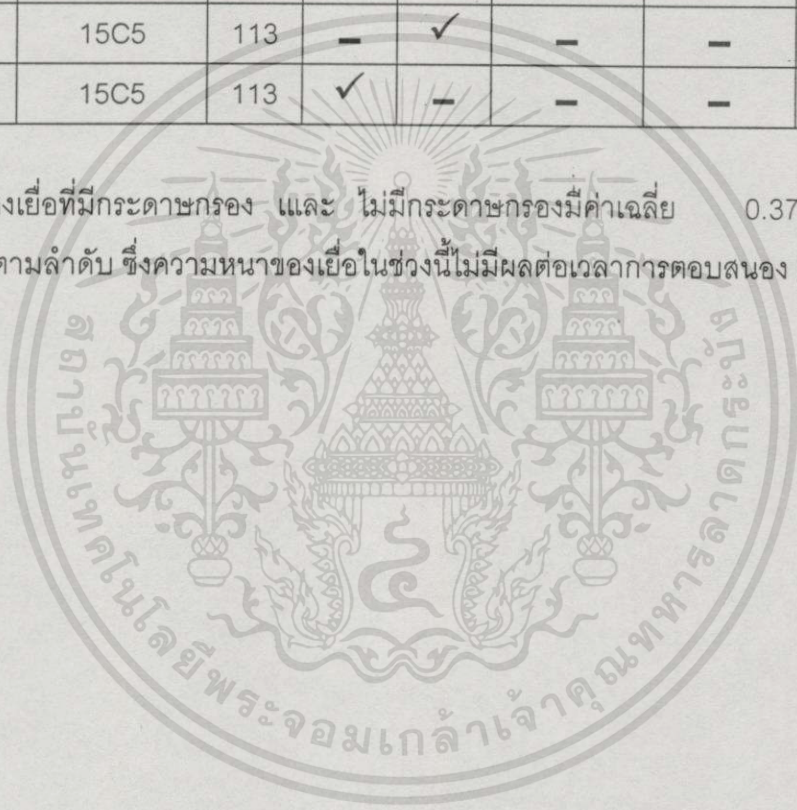
ตารางที่ 4.2 แสดงความหนาของเยื่อ

สูตรที่	ไฮออนโฟร์ (mg)	พีวีซี (mg)	กระดาษกรอง		ความหนา (mm)		
			ใช่	ไม่ใช่	DBP (271mg)	DOP (271mg)	DINP (271mg)
1	DB18C6	113	-	✓	0.258	-	-
2	DB18C6	113	✓	-	0.385	-	-
3	DB18C6	113	-	✓	-	0.298	-
4	DB18C6	113	✓	-	-	0.370	-
5	DB18C6	113	-	✓	-	-	0.256
6	DB18C6	113	✓	-	-	-	0.406
7	18C6	113	-	✓	0.210	-	-
8	18C6	113	✓	-	0.288	-	-
9	18C6	113	-	✓	-	0.138	-
10	18C6	113	✓	-	-	0.334	-
11	18C6	113	-	✓	-	-	0.173
12	18C6	113	✓	-	-	-	0.261
13	DC18C6	113	-	✓	0.200	-	-
14	DC18C6	113	✓	-	0.288	-	-
15	DC18C6	113	-	✓	-	0.227	-
16	DC18C6	113	✓	-	-	0.334	-
17	DC18C6	113	-	✓	-	-	0.261
18	DC18C6	113	✓	-	-	-	0.215
19	4,518C6	113	-	✓	0.238	-	-
20	4,518C6	113	✓	-	0.287	-	-
21	4,518C6	113	-	✓	-	0.242	-

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

22	4,518C6	113	✓	-	-	0.385	-
23	4,518C6	113	-	✓	-	-	0.249
24	4,518C6	113	✓	-	-	-	0.265
25	15C5	113	-	✓	0.253	-	-
26	15C5	113	✓	-	0.320	-	-
27	15C5	113	-	✓	-	0.315	-
28	15C5	113	✓	-	-	0.389	-
29	15C5	113	-	✓	-	-	0.250
30	15C5	113	✓	-	-	-	0.370

ความหนาของเยื่อที่มีกระดาษกรอง และ ไม่มีกระดาษกรองมีค่าเฉลี่ย 0.372 mm. และ 0.276 mm. ตามลำดับ ซึ่งความหนาของเยื่อในช่วงนี้ไม่มีผลต่อเวลาการตอบสนอง [19]

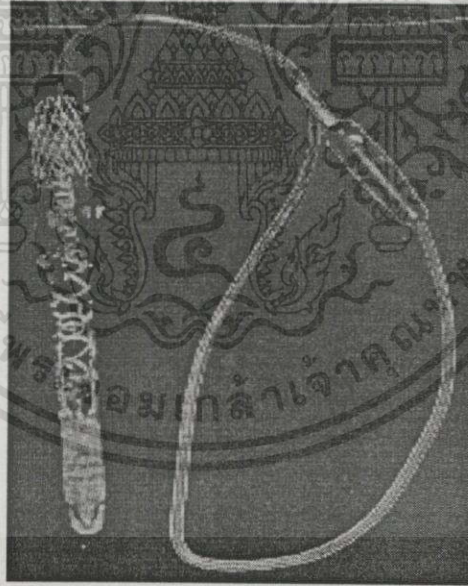


4.2 ขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Silver- silver chloride electrode)

วิธีการเตรียมขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ ทำได้โดยการประกอบลวด Ag/AgCl ที่เตรียมในหัวข้อ 3.3 และ เชื่อมเข้ากับสายไฟฟ้าโดยการบัดกรีตรงปลายด้านที่ไม่ได้คลอไรโดเซชัน (Chlorodization) ดังรูปที่ 4.2 เติม agar และสารละลาย KCl อิ่มตัวลงในหลอดแก้วที่เตรียมไว้ในหัวข้อ 3.3 และใส่ลวด Ag/AgCl ลงในหลอดแก้วแล้วปิดด้านบนของหลอดแก้วด้วยจุกยาง จะได้ขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการเชื่อมต่อระหว่างสายไฟฟ้ากับลวด Ag/AgCl

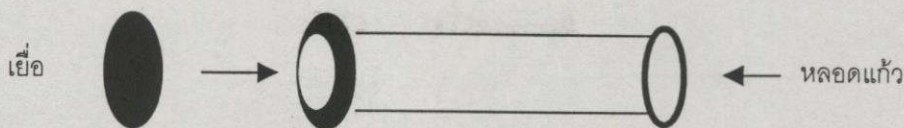


รูปที่ 4.3 ขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

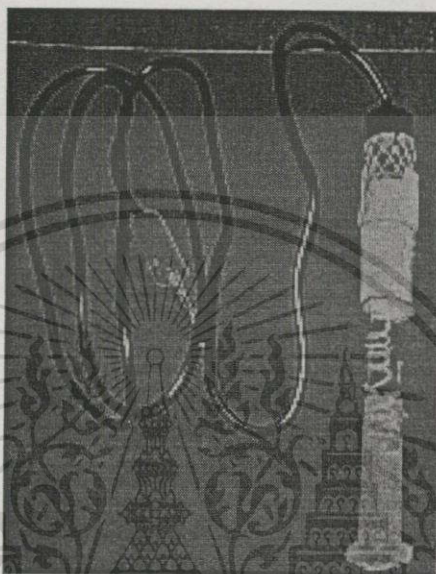
4.3 ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน

ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนเตรียมได้โดยนำเยื่อที่เตรียมได้ในหัวข้อ 3.2 ติดตรงปลายของหลอดแก้วด้วยกาวอีพอกซีเรซินแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง ดังรูปที่ 4.4 แล้วประกอบสายไฟฟ้ากับลวด Ag/AgCl และเติมสารละลายอ้างอิง จะได้ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนที่มีสารละลายอ้างอิงบรรจุ

เอกลอยู่ในขั้วไฟฟ้างดรูปที่ 4.5 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



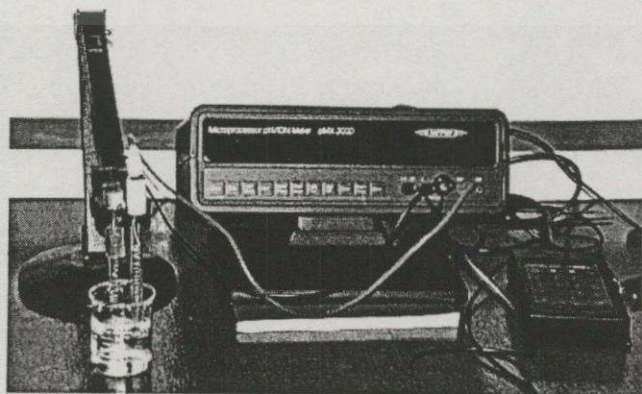
รูปที่ 4.4 การติดเยื่อเข้ากับหลอดแก้ว



รูปที่ 4.5 ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว

4.4 สมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว

จากการศึกษาสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว โดยใช้อุปกรณ์ดังแสดงในรูป 4.6 ได้ข้อมูลดังนี้



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ที่ใช้วัดศักย์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 เวลาการตอบสนองและกราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว

เวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่เตรียมได้ ในหัวข้อ 4.1 ซึ่งค่าเวลาการตอบสนองขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนศึกษาโดยวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าทุก 10 วินาที จนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าคงที่หรือศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่สมดุล ที่ระดับความเข้มข้น 1.0×10^{-3} mol/l และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา ซึ่งค่าเวลาการตอบสนองหาได้จากจุดที่กราฟเริ่มคงที่ และการวัดศักย์ไฟฟ้าของเยื่อแต่ละชนิดต้องมีค่าการตอบสนองเป็นไปตามสมการของเนินสต์ (2.3) ซึ่งเมื่อแทนค่าคงที่ลงในสมการของเนินสต์จะได้สมการที่ (4.1) ถึง (4.3)

$$E = \text{constant} + 2.303RT \frac{\log a_A}{z_A F} \quad (4.1)$$

$$E = \text{constant} + S \log a_A \quad (4.2)$$

$$S = \frac{2.303 \times 8.314 \text{ J/K} \cdot \text{mol} \times 298.15 \text{ K}}{2 \times 96484.56 \text{ C/mol}} \quad (4.3)$$

$$S = 0.02957 \text{ V}$$

$$S = 29.57 \text{ mV}$$

เมื่อ $S =$ ค่าความชันตามสมการของเนินสต์ที่ 25°C

เวลาการตอบสนอง และความชันของกราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าของแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ก-จ.

ตารางที่ 4.3 ก แสดงสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่ใช้ 4',4''(5'')-di-tert-butylidibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์

ขั้วไฟฟ้า	พลาสติกไซเซออร์	กระดาษกรอง		ค่าความชัน (mV/decade)	เวลาการตอบสนอง (วินาที)
		ใช้	ไม่ใช้		
E1	DBP	-	✓	47.9	120
E2	DBP	✓	-	21.2	100
E3	DOP	-	✓	38.5	100
E4	DOP	✓	-	64.4	100
E5	DINP	-	✓	64.0	110
E6	DINP	✓	-	38.9	110

ตารางที่ 4.3 ข แสดงสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่ใช้ dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์

ขั้วไฟฟ้า	พลาสติกไซเซออร์	กระดาษกรอง		ค่าความชัน (mV/decade)	เวลาการตอบสนอง (วินาที)
		ใช้	ไม่ใช้		
E7	DBP	-	✓	30.7	50
E8	DBP	✓	-	25.2	90
E9	DOP	-	✓	24.9	90
E10	DOP	✓	-	25.2	100
E11	DINP	-	✓	34.2	130
E12	DINP	✓	-	16.0	120

ตารางที่ 4.3 ค แสดงสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่ใช้ 18-crown-6 เป็นไอออนโพร

ขั้วไฟฟ้า	พลาสติกไซเซออร์	กระดาษกรอง		ค่าความชัน (mV/decade)	เวลาการตอบสนอง (วินาที)
		ใช้	ไม่ใช้		
E13	DBP	-	✓	49.0	60
E14	DBP	✓	-	23.5	70
E15	DOP	-	✓	39.0	90
E16	DOP	✓	-	33.0	90
E17	DINP	-	✓	38.0	100
E18	DINP	✓	-	26.8	120

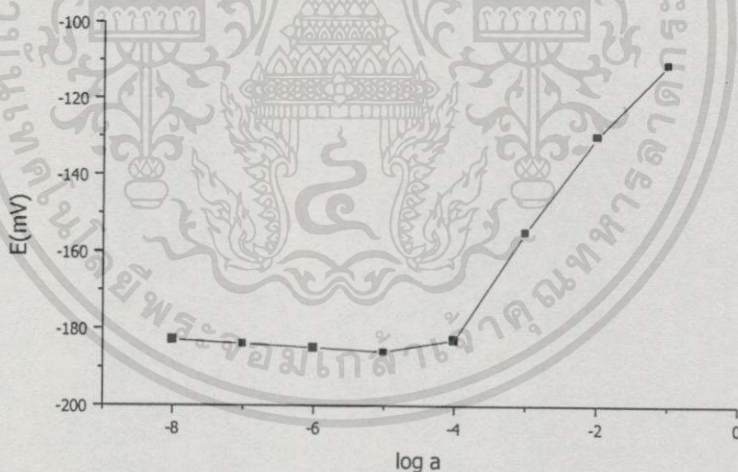
ตารางที่ 4.3 ง แสดงสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่ใช้ dicyclohexano-18-crown-6 เป็นไอออนโพร

ขั้วไฟฟ้า	พลาสติกไซเซออร์	กระดาษกรอง		ค่าความชัน (mV/decade)	เวลาการตอบสนอง (วินาที)
		ใช้	ไม่ใช้		
E19	DBP	-	✓	56.0	90
E20	DBP	✓	-	52.0	70
E21	DOP	-	✓	63.0	100
E22	DOP	✓	-	62.9	90
E23	DINP	-	✓	60.0	120
E24	DINP	✓	-	60.0	80

ตารางที่ 4.3 จ แสดงสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่ใช้ 15-crown-5 เป็นไอออนโพร

ขั้วไฟฟ้า	พลาสติกไซเซออร์	กระดาษกรอง		ค่าความชัน (mV/decade)	เวลาการตอบสนอง (วินาที)
		ใช้	ไม่ใช้		
E25	DBP	—	✓	43.5	100
E26	DBP	✓	—	61.8	80
E27	DOP	—	✓	39.7	100
E28	DOP	✓	—	36.0	110
E29	DINP	—	✓	64.0	100
E30	DINP	✓	—	49.2	100

ตัวอย่างของกราฟมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว ที่มี dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโพร กับ dibutyl phthalate เป็นพลาสติกไซเซออร์ แสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอการิทึมของกิจกรรมของไอออนตะกั่วที่มีสารละลายอ้างอิงภายใน เข้มข้น 1.0×10^{-3} mol/l Pb^{2+}

สำหรับขั้วไฟฟ้าที่มีไอออนโพร และพลาสติกไซเซออร์ ที่แตกต่างกันแต่สารละลายอ้างอิงภายในเข้มข้นเท่ากัน คือ 1.0×10^{-3} mol/l Pb^{2+} จะให้ค่าความชันของกราฟมาตรฐานที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ก – 4.3 จ ค่าความชันที่ต่างกันอาจเป็นผลมาจาก

1. โครงสร้างของไอออนโพร ที่มีรูตรงกลางและแขนข้างต่างกันทำให้เกิดการตอบสนอง

ที่แตกต่างกันเพราะผลของความเกาะกะ และขนาดของไอออนที่มีขนาดที่พอดีกับรู (size-fit-effect) [50] ทำให้ไอออนของตะกั่วมีความสามารถในการเกิดเป็นสารประกอบที่แตกต่างกัน

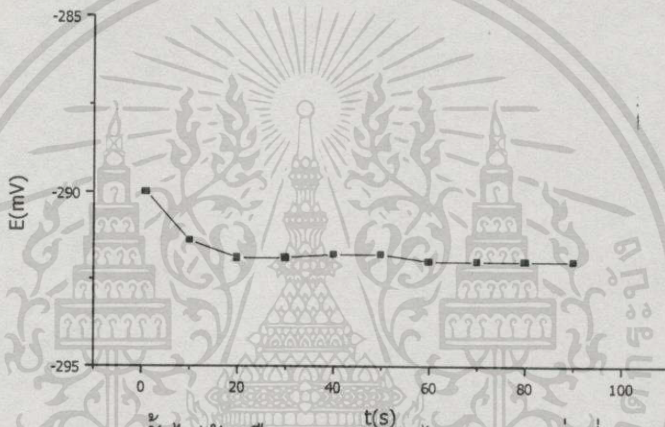
2. เยื่อที่เตรียมโดยใช้ และไม่ใช้กระดาษกรองเป็นส่วนประกอบของเยื่อ โดยส่วนใหญ่จะไม่มีผลต่อเวลาการตอบสนองแต่จะมีผลต่อค่าความชันของกราฟมาตรฐานตามสมการของเนินสต์ ซึ่งเยื่อที่ใช้กระดาษกรองโดยส่วนใหญ่จะมีความชันลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ใช้กระดาษกรองและใช้ไอออนโนเฟอร์ชนิดเดียวกัน ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเป็นเนื้อเดียวกันของเยื่อที่ใช้กระดาษกรองน้อยกว่า หรือเกิดการกระจายตัวของไอออนโนเฟอร์ได้ไม่ดีในกรณีที่ใช้กระดาษกรอง

3. เยื่อที่มีไอออนโนเฟอร์ชนิดเดียวกันแต่มีพลาสติกไซเซออร์ต่างชนิดกัน จะให้ค่าการตอบสนองที่แตกต่างกันเป็นการยากที่จะอธิบายแต่อาจจะเกิดจากสาเหตุดังนี้ การละลายเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างพลาสติกไซเซออร์กับไอออนโนเฟอร์ในองค์ประกอบของพีวีซีที่มีพลาสติกไซเซออร์ต่างชนิดกัน ทำให้การตอบสนองของเยื่อที่ได้มีค่าที่แตกต่างกัน และ การเกิดโครงสร้างของโมเลกุลขนาดใหญ่ [49] แต่อย่างไรก็ตามสาเหตุที่แท้จริงของการตอบสนองของเยื่อนี้จะต้องมีการศึกษาต่อไป

จากผลการทดลองพบว่าเยื่อที่มีองค์ประกอบของ dibenzo-18-crown-6 และ dibutyl phthalate (DBP) มีสมบัติที่ดีในการตรวจวัดไอออนตะกั่วเนื่องจากมีสมบัติการตอบสนองเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการของเนินสต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 29.57 mV/decade ดังนั้นจึงคัดเลือกเยื่อนี้มาศึกษาสมบัติอื่น ต่อไป

4.4.2 เวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว

การศึกษาเวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าชนิดที่มี dibenzo-18-crown-6 เป็น ไอออนโนเฟอร์ และ dibutyl phthalate เป็นพลาสติกไซเซออร์ เป็นองค์ประกอบของเยื่อ ซึ่งการศึกษาเวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าทำโดยวิธีการบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าที่ความเข้มข้นต่างๆ ทุก ๆ 10 วินาที จนกระทั่งศักย์ไฟฟ้ามีค่าคงที่ และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ กับ เวลาเป็นวินาที ซึ่งกราฟที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากรูปเวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าจะอยู่ที่ 20 วินาที ซึ่งที่เวลาดังกล่าวค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะเริ่มคงที่



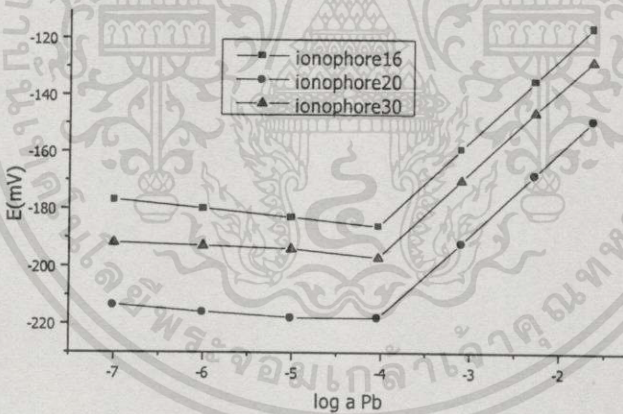
รูปที่ 4.8 เวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 1.0×10^{-3} mol/l สารละลายอ้างอิงภายในเข้มข้น 1.0×10^{-1} mol/l Pb^{2+}

4.4.3 ผลของการศึกษาปริมาณไอออนโพลีที่มีต่อความชันตามสมการของเนินสต์

การศึกษาผลของปริมาณไอออนโพลีของ dibenzo-18-crown-6 ที่มีต่อความชันของกราฟมาตรฐาน โดยการเพิ่มปริมาณของ dibenzo -18-crown-6 ดังตารางที่ 4.4 และค่าความชันตามสมการของเนินสต์หาได้จากกราฟในรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราส่วนของเยื่อ

สูตรที่	พลาสติกไซเซออร์ DBP (mg)	ไอออนโพลี DB18C6 (mg)	พีวีซี (mg)
1	271	16	113
2	271	20	113
3	271	30	113

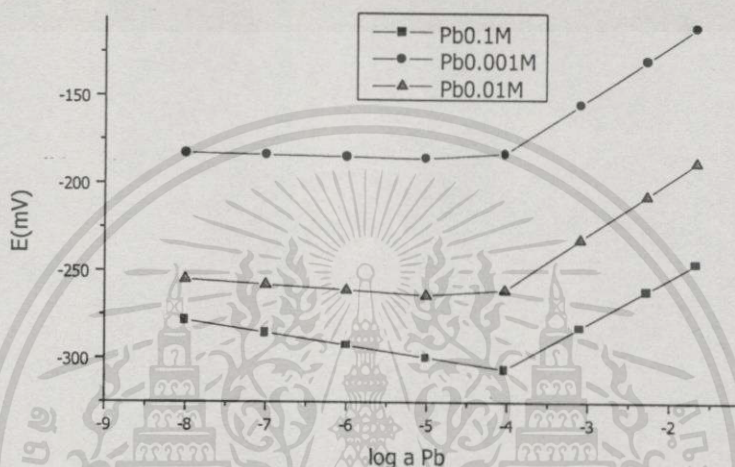


รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณของ dibenzo-18-crown-6 ในขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วชนิดเยื่อพอลิเมออร์

โดยเยื่อที่มีปริมาณ dibenzo-18-crown-6 ต่างกัน คือ 16, 20 และ 30 mg จะให้ค่าความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 29.0 , 29.1 และ 29.2 mV/decade ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณของไอออนโพลีไม่มีผลต่อความชันในช่วงความเข้มข้นดังกล่าวซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Sheen S-R และคณะ [22]

4.4.4 ผลการศึกษาสารละลายอ้างอิงภายในที่มีต่อความไวของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน

การศึกษาผลของสารละลายอ้างอิงภายในของไฟฟ้าเลือกเฉพาะที่มีต่อความไวต่อไอออนตะกั่ว ทำโดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่เป็นสารละลายอ้างอิงภายในขั้ว ซึ่งสารละลายที่ใช้มีดัง $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 1.0×10^{-3} , 1.0×10^{-2} และ 1.0×10^{-1} mol/l ซึ่งผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.10

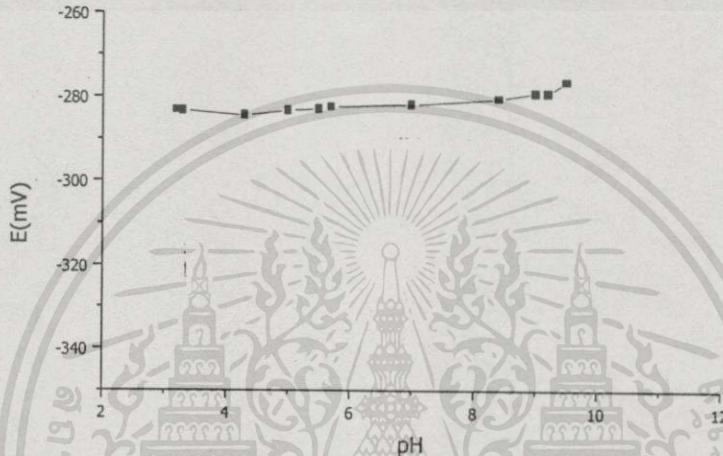


รูปที่ 4.10 ผลของสารละลายอ้างอิงภายในของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่วที่มี dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโพรบ์ และ dibutyl phthalate เป็นพลาสติกไซเซออร์

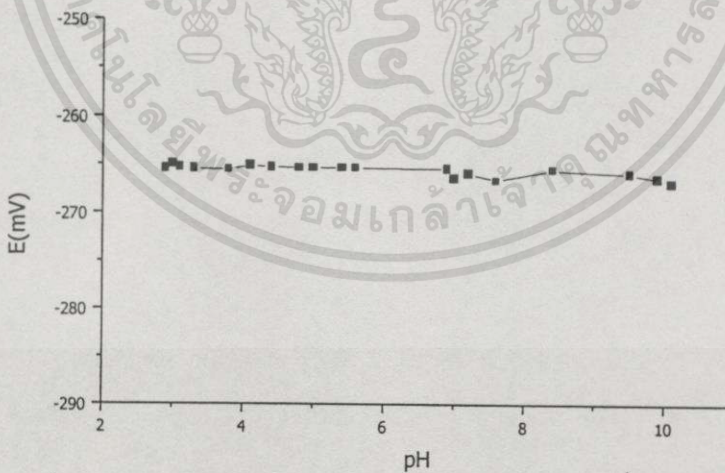
ซึ่งจากการทดลองพบว่า สารละลายอ้างอิงภายในขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วทั้ง 3 จะให้ค่าความชันของกราฟใกล้เคียงกันดังนี้ คือถ้าสารละลายอ้างอิงภายในของ Pb^{2+} เข้มข้น 1.0×10^{-1} , 1.0×10^{-2} และ 1.0×10^{-3} mol/l จะได้กราฟที่มีค่าความชัน เท่ากับ 29.4, 30.6 และ 30.7 mV/decade ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของสารละลายอ้างอิงภายในที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-1} mol/l จะให้ค่าความชันที่ใกล้เคียงกับค่าความชันตามสมการของเนินสต์ คือ 29.57 mV/decade และความเข้มข้นต่ำสุดที่คำนวณได้จากกราฟมีค่าเท่ากัน แม้ว่าความเข้มข้นของสารละลายอ้างอิงภายในจะแตกต่างกันก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Sheen S-R และคณะ [22]

4.4.5 ผลของพีเอช (pH) ที่มีต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว

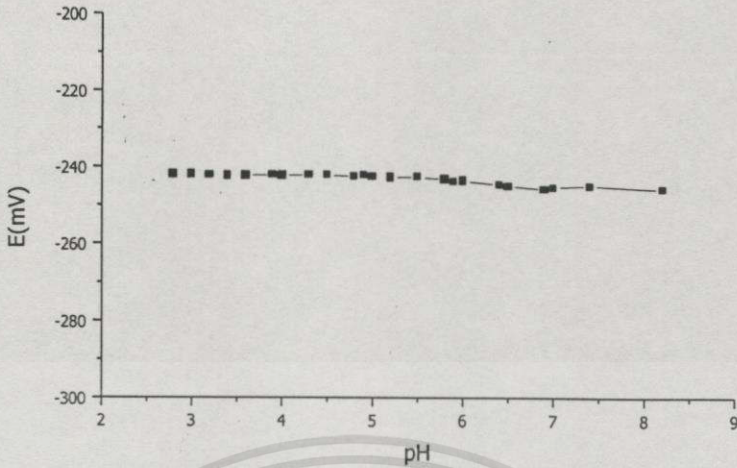
การศึกษาผลของพีเอช (pH) ที่มีต่อศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วชนิดเยื่อ dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์ และ dibutyl phthalate เป็นพลาสติกไซเซออร์ และสารละลายอ้างอิงภายในใช้สารละลาย Pb^{2+} เข้มข้น 1.0×10^{-1} mol/l โดยทำการศึกษาตามหัวข้อ 3.6.2 พบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้สามารถใช้งานได้ดีในช่วงค่าพีเอช ตั้งแต่ 4-7 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ก-ค.



รูปที่ 4.11 ก. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ พีเอชที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-4} mol/l Pb^{2+}



รูปที่ 4.11 ข. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับพีเอชที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-3} mol/l Pb^{2+}



รูปที่ 4.11 ค. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับพีเอชที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-2} mol/l Pb^{2+}

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับค่าพีเอช แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมในการวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วชนิดเยื่อพอลิเมอร์ที่มี dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์ และ dibutyl phthalate เป็นพลาสติกไซเซอรัอยู่ระหว่างพีเอช 4-7 จากผลการทดลองอาจสรุปได้ดังนี้

1. การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ $pH < 4$ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีแนวโน้มที่จะลดลงเล็กน้อย กล่าวคือในสารละลายที่เป็นกรด เยื่อที่มี dibenzo-18-crown-6 เกิดการจับโปรตอน (protonation) เป็นผลทำให้ความสามารถในการเกิดสารประกอบระหว่างโลหะกับ crown ether ลดลง
2. การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ $pH > 7$ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อยเช่นกัน ทั้งนี้เกิดจากการที่ไอออนตะกั่วเกิดไฮโดรไลซิส (hydrolysis) หรือไอออนตะกั่วเกิดเป็นตะกอนทำให้ปริมาณของไอออนตะกั่วในสารละลายมีปริมาณต่ำลง

4.4.6 ผลของไอออนอื่นที่มีต่อการรบกวนของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว

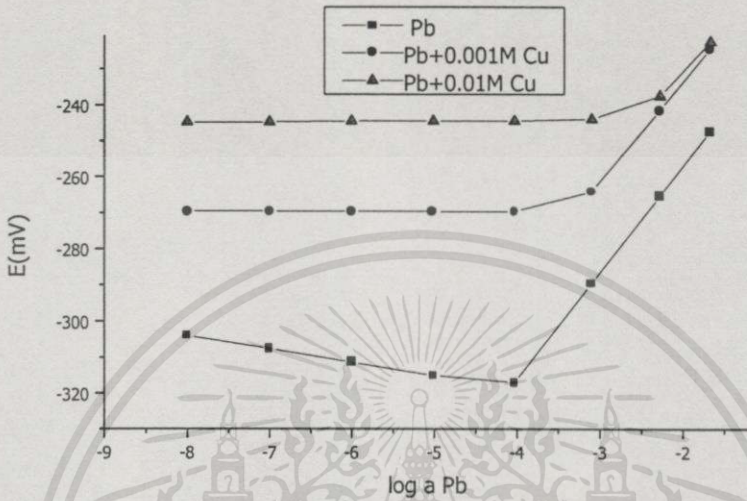
สมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนนอกจากจะพิจารณาจากค่าความชัน เวลาการตอบสนอง แล้วสมบัติที่สำคัญที่สุดอีกอย่างหนึ่งคือค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ ($K_{A,B}^{pot}$) ซึ่งถ้าค่า $K_{A,B}^{pot} < 1$ แสดงว่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วมีการตอบสนองต่อไอออนที่ต้องการวิเคราะห์เป็นส่วนใหญ่ และในทางตรงข้ามจะมีการตอบสนองต่อไอออนรบกวน B เมื่อ $K_{A,B}^{pot} > 1$ สำหรับกรณีที่มี $K_{A,B}^{pot}$ มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าขั้วไฟฟ้ามีการตอบสนองต่อไอออนรบกวนเท่ากับไอออนที่ต้องการวิเคราะห์

การศึกษาผลของการรบกวนของไอออนอื่น โดยใช้วิธีการกำหนดให้ความเข้มข้นของไอออนที่รบกวน

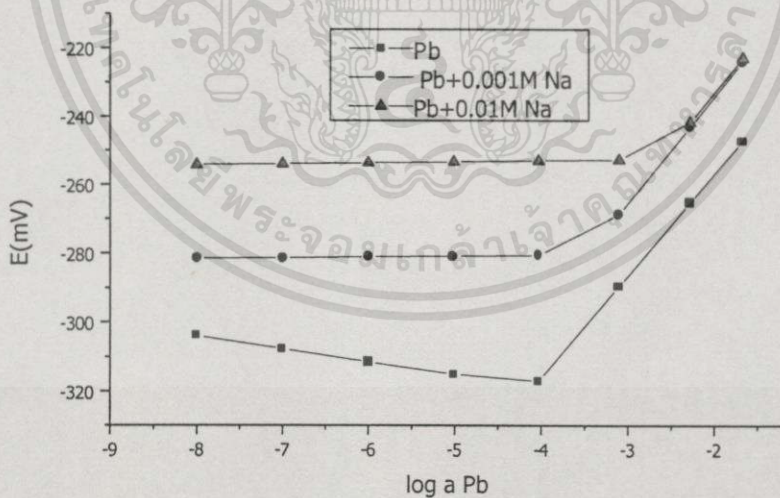
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

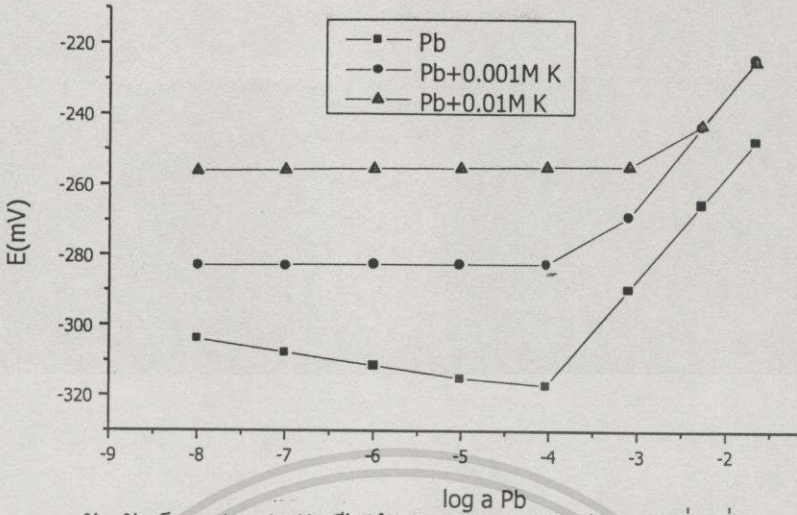
กวนคงที่ ดังในหัวข้อ 3.6.3 ซึ่งไอออนรบกวนที่ใช้มี 3 ชนิด คือ K^+ , Na^+ และ Cu^{2+} ซึ่งไอออนรบกวนจะมีผลต่อการวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ก - ค. ค่าการรบกวนของไอออน ทั้งสามชนิดคือ Cu^{2+} , Na^+ และ K^+ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.12 ก. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอกแอคติวิตีของตะกั่ว ที่ใช้ dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์ และ dibutyl phthalate เป็นพลาสติกไซเซออร์



รูปที่ 4.12 ข. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอกแอคติวิตีของตะกั่วที่ใช้ dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์และ dibutyl phthalate เป็นพลาสติกไซเซออร์



รูปที่ 4.12 ค. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอการิทึมของกิจกรรมของตะกั่ว ที่ใช้ dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์ และ dibutyl phthalate เป็นพลาสติกไซเซออร์

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่มี dibenzo-18-crown-6 + dibutyl phthalate

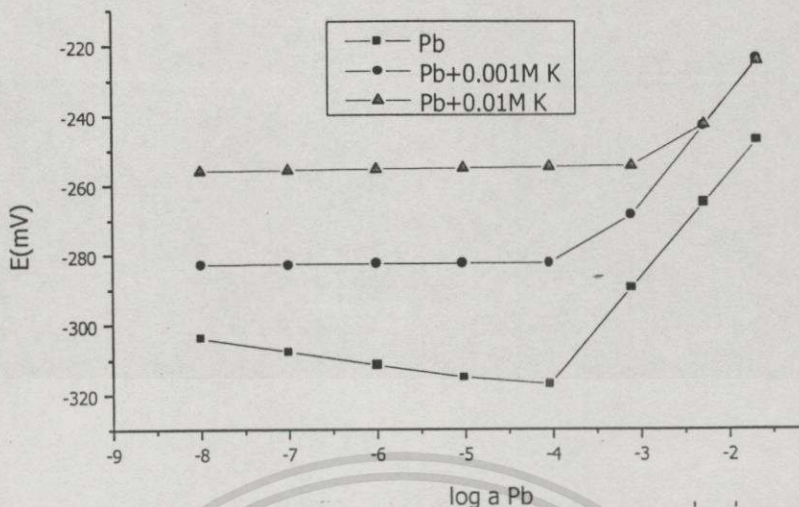
ไอออน	ความเข้มข้น (M)	ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ $\log(K_{Pb,M}^{pot})$
Cu^{2+}	1.0×10^{-3}	-0.15
Na^+	1.0×10^{-3}	2.63
K^+	1.0×10^{-3}	2.48

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ ($K_{Pb,M}^{pot}$) ของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่สร้างขึ้นกับขั้วไฟฟ้าอื่นๆ

การศึกษา	วิธีการ	$\log(K_{Pb,M}^{pot})$		
		Cu^{2+}	K^+	Na^+
1.งานวิจัยครั้งนี้	MS	0.50	2.42	2.53
3 Ohki A. และคณะ[53]	SM	0.40-0.60	0.90	1.10
4.Sokalski T. และคณะ[52]	SM	-0.50	-2.20	-2.20
5 Sheen S-R และคณะ[22]	MS	-4.09	-0.65	-0.81

MS= mixed solution method, SM= separated method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ค. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับลอการิทึมของตะกั่วที่ใช้ dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์ และdibutyl phthalateเป็นพลาสติกไซเซออร์

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่มี dibenzo-18-crown-6 + dibutyl phthalate

ไอออน	ความเข้มข้น (M)	ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ $\log(K_{Pb,M}^{pot})$
Cu^{2+}	1.0×10^{-3}	-0.15
Na^+	1.0×10^{-3}	2.63
K^+	1.0×10^{-3}	2.48

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ ($K_{Pb,M}^{pot}$) ของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่สร้างขึ้นกับขั้วไฟฟ้าอื่นๆ

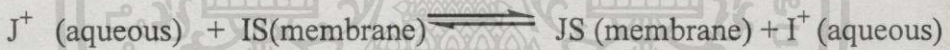
การศึกษา	วิธีการ	$\log(K_{Pb,M}^{pot})$		
		Cu^{2+}	K^+	Na^+
1.งานวิจัยครั้งนี้	MS	0.50	2.42	2.53
3 Ohki A. และคณะ[53]	SM	0.40-	0.90	1.10
4.Sokalski T. และคณะ[52]	SM	0.60	-2.20	-2.20
5 Sheen S-R และคณะ[22]	MS	-0.50	-0.65	-0.81
		-4.09		

MS= mixed solution method, SM= separated method

ซึ่งลำดับของการรบกวนของไอออนอื่นจากมากไปหาน้อยเป็นดังนี้ $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Cu}^{2+}$ จากค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของขั้วไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่า Cu^{2+} ไม่มีผลต่อการวัดศักย์ไฟฟ้า แต่สำหรับกรณีของ Na^+ และ K^+ มีอิทธิพลต่อการวัดศักย์ไฟฟ้ามากที่ความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นพบว่าลำดับการรบกวนของไอออนอื่นเป็นดังนี้ $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Cu}^{2+}$ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าไอออนที่มีประจุ +1 จะมีค่ารบกวนมากกว่าไอออนที่มีประจุ +2 จากผลการทดลองพบว่าการรบกวนของไอออนมาจากสาเหตุดังนี้ [6][7]

1. ขนาดของไอออนบวก (ionic diameter)
2. ขนาดของรู (hole หรือ cavity) ของ crown ether

ขนาดของไอออนมีค่าดังนี้ $\text{K}^+(2.66 \text{ \AA})$ $\text{Na}^+(1.94 \text{ \AA})$ [42] $\text{Cu}^{2+}(0.87 \text{ \AA})$ [11] และ $\text{Pb}^{2+}(1.32 \text{ \AA})$ [54] และขนาดของรู (hole) ของ dibenzo-18-crown-6 มีขนาดเท่ากับ 2.60 \AA [6] ซึ่งกลไกการเกิดสารประกอบของไอออนบวกกับไอออนฟอรที่โมเลกุลเป็นกลางทางไฟฟ้า (neutral carrier) จะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อขนาดของไอออนมีขนาดที่พอดีกับรู (size-fit-effect)[50][51] ของ dibenzo-18-crown-6 กลไกการเกิดเป็นสารประกอบสามารถแสดงดังสมการ [52]



เมื่อ S เป็นไอออนฟอร และ I^+ , J^+ เป็นไอออนที่ต้องการวัด และไอออนรบกวนตามลำดับ

นอกจากนี้ปัจจัยอื่นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนยังขึ้นกับวิธีการที่เลือกใช้สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะด้วย[28]

4.4.7 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว

การหาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่เตรียมขึ้น โดยจะดูความชันของกราฟมาตรฐาน และระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ โดยศึกษาในช่วงระยะเวลา 1-5 สัปดาห์ พบว่าอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าอยู่ประมาณ 3 สัปดาห์ เนื่องจากในช่วงเวลานี้กราฟมาตรฐานยังคงมีความชันใกล้เคียงกับสมการของเนินสต์ และระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ยังคงเท่าเดิม ดังแสดงในตารางที่ 4.7 .ในการเก็บรักษาขั้วไฟฟ้าจะต้องแช่ในสารละลาย $1 \text{ mol/l Pb}(\text{NO}_3)_2$ ดังนั้นถ้าขั้วไฟฟ้าถูกใช้งานไปนานๆ จะทำให้ไอออนฟอรหลุดละลายออกไปจากเยื่อได้มากขึ้น ซึ่งค่าการละลายของ dibenzo-18-crown-6 มีค่าเท่ากับ

7.30 mg/l [41] และจากการที่แช่ในสารละลายตลอดเวลา นั้นอาจจะมีผลต่อค่าความชันของกราฟที่ได้

ตารางที่ 4.7 แสดงอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่มีส่วนผสมของ dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโฟร์และ dibutyl phthalate เป็นพลาสติไซเซอร์

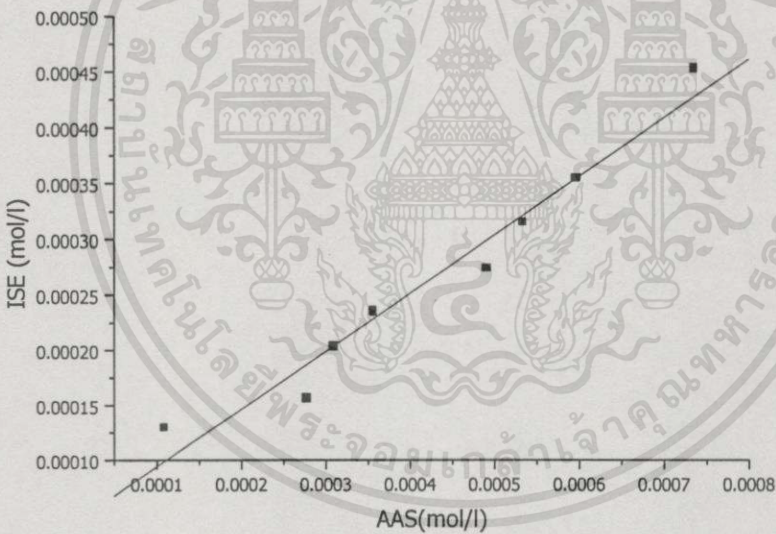
ลำดับที่	ค่าความชัน (mV/decade)	ค่าความเข้มข้นต่ำ สุดที่วิเคราะห์ได้ (M)
1	30.7	1.0×10^{-4}
2	29.3	1.0×10^{-4}
3	29.0	1.0×10^{-4}
4	25.0	1.0×10^{-4}
5	25.0	1.0×10^{-4}

4.4.8 เปรียบเทียบ ISE และ AAS

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว (ISE) กับเทคนิคอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี (AAS) ในการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ดังข้อมูลในตารางที่ 4.8 แล้ววิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักสถิติ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พบว่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ด้วย ISE และ AAS มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.98 แสดงว่าในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Pb^{2+} โดยวิธีทั้งสองมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น และได้เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากทั้งสองวิธีด้วยหลักสถิติ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปรากฏว่าทั้งสองวิธีมีค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ดูในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ โดยใช้ ISE กับ AAS

ตัวอย่างที่	AAS (mol/l)	ISE (mol/l)
1	1.09×10^{-4}	1.29×10^{-4}
2	2.78×10^{-4}	1.56×10^{-4}
3	3.10×10^{-4}	2.03×10^{-4}
4	3.56×10^{-4}	2.35×10^{-4}
5	4.91×10^{-4}	2.74×10^{-4}
6	5.34×10^{-4}	3.15×10^{-4}
7	5.97×10^{-4}	3.54×10^{-4}
8	7.36×10^{-4}	4.52×10^{-4}



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย ISE และ AAS

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการสร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วชนิดเยื่อพอลิเมอร์ โดยใช้สารประกอบ crown ether ได้แก่ 18-crown-6 dibenzo-18-crown6 dicyclohexano-18-crown-6, 4',4''(5'')-di-tert-butyl-dibenzo-18-crown-6 และ 15-crown-5 เป็นไอออนโพรและใช้ dibutyl phthalate (DBP) dioctyl phthalate (DOP) และ di-isononyl phthalate (DINP) เป็นพลาสติกไซเซออร์ ผสมกับพีวีซี และละลายในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรน (THF) ตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 4.1

5.1.2 ผลการทดสอบสมบัติของเยื่อที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว โดยการศึกษาค่าเวลาการตอบสนอง ค่าความชันของกราฟ ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ ช่วงพีเอชที่เหมาะสม ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ และอายุการใช้งาน ซึ่งจากการทดลองพบว่า ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะที่ใช้เยื่อที่มีองค์ประกอบของ dibenzo-18-crown-6 เป็นไอออนโพร และ ใช้ dibutyl phthalate เป็นพลาสติกไซเซออร์เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมในการตรวจวัดปริมาณไอออนตะกั่วในน้ำมากที่สุด ซึ่งสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงสมบัติของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วชนิดเยื่อพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของ dibenzo - 18-crown-6 เป็นไอออนโพร และ dibutyl phthalate เป็นพลาสติกไซเซออร์

ค่าความชัน (mV/decade)	ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ log ($K_{Pb,M}$)			ช่วงพีเอช	เวลาการตอบสนอง (นาทีก)	อายุการใช้งาน (สัปดาห์)
	Cu^{2+}	Na^+	K^+			
30.7	-0.15	2.63	2.48	4-7	< 1	3

5.1.3 ผลการเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่ว ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ โดยใช้อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และข้อไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วชนิดเยื่อพอลิเมอร์ที่สร้างขึ้น เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์โดยใช้หลักสถิติ จะให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.98 และเปรียบเทียบโดยใช้ t-test ปรากฏว่าทั้งสองวิธีมีค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5.1.4 ผลการศึกษาปริมาณไอออนไนฟอรัที่ใช้คือ 16, 20 และ 30 mg จะให้ค่าความชันตามสมการของเนิสต์ที่ไม่ต่างกัน

5.1.5 สารละลายอ้างอิงภายในของข้อไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่เหมาะสมคือ สารละลาย $Pb(NO_3)_2$ เข้มข้น 0.1 mol/l และก่อนใช้งานควรแช่อยู่ในสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ เข้มข้น 1 mol/l 24 ชั่วโมง

5.1.6 ข้อไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วที่สร้างขึ้น มีค่าระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ 1.0×10^{-4} mol/l หรือ 20.72 ppm ดังนั้นในการใช้ข้อไฟฟ้าควรใช้วัดหาปริมาณตะกั่วในน้ำจากกระบวนการผลิตในโรงงานที่ใช้ตะกั่วปริมาณที่สูง เช่น โรงงานแบตเตอรี่ โรงงานชุบ หรือ โรงงานผลิตหลอดภาพโทรทัศน์ เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาและปรับปรุงข้อไฟฟ้า เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ได้ที่มีความเข้มข้นต่ำมากๆ ได้
2. ในการเตรียมเยื่อควรให้ไอออนไนฟอรัมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ซึ่งอาจจะทำได้โดยการเพิ่มปริมาณของตัวทำละลายให้มากขึ้น หรือพัฒนาเทคนิคการเตรียมขึ้นมาใหม่
3. ควรปรับปรุงอายุการใช้งานให้นานขึ้น ซึ่งอาจจะทำได้โดยการใช้พลาสติกไซเซอรัชนิดอื่น หรือโดยวิธีการเติมสารลงในเยื่อเพิ่มขึ้น
4. ควรศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์เลือกเฉพาะไอออนของข้อไฟฟ้าเลือกเฉพาะ โดยใช้ไอออนรบกวนชนิดอื่น
5. ควรนำข้อไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วชนิดเยื่อพอลิเมอร์ที่สร้างขึ้นนี้ ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วของน้ำในกระบวนการผลิตของโรงงานแบตเตอรี่ หรือ โรงงานผลิตหลอดภาพโทรทัศน์ เนื่องจากโรงงานดังกล่าวมีปริมาณตะกั่วที่สูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dean J. A., "editor". *Analytical Chemistry Handbook*. New York : McGraw-Hill. 1995
- [2] Malick N., Oktar O., Ozser M. E., Caglar P., Bushby L. and Vaughan A. "Immobilised Reagents for Optical Heavy Metal Ions Sensing". *Sensors and Actuators B.*, vol. 53, 1998. pp. 211-221.
- [3] Cobbon P. L., Egberink R. J. M., Barmer J., Harak J. R., Bergveld P. and Reinhoudt D. N. "Detection of Heavy Metal Ions by ISFET in a Flow Injection Analysis Cell." *Sensors and Actuators B.*, vol. 6, 1992. pp. 304-306.
- [4] Mikhelson K. N. "Ion-selective in PVC matrix". *Sensors and Actuators B.*, vol. 18-19, 1994. pp. 31-37.
- [5] Knoll M., Cammann K., Dumschat C., Borchardt M. and Hogg G. "Microfibre Matrix-Supported Ion-Selective PVC Membranes." *Sensors and Actuators B.*, vol. 20, 1994. pp. 1-5
- [6] Tzeng D-L and Shih J-S. "Adsorption of Heavy Metal ions on Crown Ether Adsorbents." *Analyst.*, vol. 112, 1987. pp.1413-1416.
- [6] Srivastava S. K., Gupta V. K. and Jain S. "Determination of Lead Using a Polyvinyl chloride-based Crown Ether Membrane". *Analyst*, vol. 120, 1995. pp. 495-498.
- [7] Petranek J. and Ryba O. "Potassium-Selective Electrodes Based on Macrocyclic Polyethers. The Effect of Structure of the Neutral Carrier on Selectivity." *Anal.Chim.Acta.*, vol. 72, 1974. pp. 375-380.
- [8] Ohki A., Lu J-P. and Bartsh R. "Effect of Side-Arm Variation in Dibenzo-16-crown-5 Compounds on the Potentionmetric Selectivity for Soduim Ion". *Anal.Chem.*, vol. 66, 1994. pp. 651-654.
- [9] Jain A. K., Gupta V. K. and Singk L. P. "Neutral Carrier and Organic Resin Based Membranes as Sensors for Uranyl Ions". *Analytical Proceeding Including Analytical Communications.*, vol. 32, 1995. pp. 263-266.
- [10] Sheen S-R. and Shi J-S. "Lead(II)- Ion Selective Electrodes Based on Crown Ethers". *Analyst.*, vol. 117, 1992. pp. 1691-1695.
- [11] Kroschwitz J.I., "editor". *KIRK – OTMER Encyclopedia of Chemical technology*. New York : A Wiley – Interscience publication. 1985.

เอกสารนี้ New York : A Wiley – Interscience publication. 1985. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Harrison R. M. and Laxen D. P. H. *Lead Pollution Causes and Control*. London : Cambridge University press. 1981.
- [13] กระทรวงอุตสาหกรรม สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่องน้ำบริโภค เล่ม 2 การวิเคราะห์และทดสอบ (พ.ศ. 2521)**. 2521
- [14] Morrison R. T. and Boyd R. N. *Organic Chemistry*. 5th. Massachusetts : Allyn and Bacon. 1987.
- [15] Frant M. S. "History of the Early Commercialization of Ion-Selective Electrodes " *.Analyst*, vol.119, 1984. pp. 2293-2301.
- [16] Seago J. L. "Study of Impregnated Silicone Rubber Membranes for Potential Indicating Electrodes". *Anal.Chem.*, vol. 40, 1968. pp. 517-521.
- [17] Mascini M. and Liberti A. "Preparation and Analytical Evaluation of a New Lead (II) Heterogenous Membrane Electrode". *Anal.Chim.Acta.*, vol. 60, 1972. pp. 405-412.
- [18] Craggs A., Moody G. J. and Thomas J. D. R. "PVC Matrix Membrane Ion-Selective Electrodes." *J.Chem.Educ.*, vol. 51, 1974. pp. 541-544.
- [19] Lindner E., Toth K. and Pungor E. "Lead-Selective Neutral Carrier Based Liquid Membrane Electrode." *Anal.Chem.*, vol. 56, 1984. pp.1127-1131.
- [20] Tzeng D-L and Shih J-S. " Adsorption of Heavy Metal ions on Crown Ether Adsorbents." *Analyst*, vol. 112, 1987. pp. 1413-1416.
- [21] Jaber A. M. Y. " Studies on Lead Ion-Selective Electrodes Based on Polyalkoxylateds." *Analyst*, vol. 113 , 1987. pp. 1409-1413.
- [22] Sheen S-R. and Shih J-S. " Lead (II) Ion-Selective Electrode Based on Crown Ethers." *Analyst.*, vol. 117, 1992. pp. 1691-1695.
- [23] Malinowska E., Brzozka Z.,Kasiura K., Egberink R.J.M. and Reinboudt D, N. "Lead Selective Electrodes based on Thioamide Functionalized Calix [4] arenes as Ionophores." *Anal.Chim.Acta.*, vol. 298, 1994. pp. 253- 258.
- [24] Yu T.R., Ji G. L. *Electrochemical Methods in Soil and Water Research*. New York: Pergamon Press. 1993.
- [25] Kamata S., Onoyama K. "Lead – sele/ctive electrode using Methylene Bis(diisobutyl)dithio carbamate) Neutral Carrier". *Anal.Chem.*, vol. 63 , 1991. pp. 1295-1298.

- [26] Chistian G.D. *Analytical Chemistry*. 5 th ed. John Wiley & Sons Inc. 1994.
- [27] Pedersen J C. "Cyclic Polyethers and Their Complexs with Metals Salt". *J.Chem.Soc.*, vol. 89, 1967. pp. 7017-7036.
- [28] Bakker E., Pretsch E. and Buhlmann P. "Selectivity of Potentiometric Ion Sensors". *Anal.Chem.*, vol. 72, 2000. pp. 1127-1133. .
- [29] Vamvakaki M., Chaniotakis N A. "Solid-Contact Ion-Selective Electrode with Stable Internal Electrode". *Anal.Chim.Acta.*, vol. 320, 1996. pp. 53-61.
- [30] Casabo J., Escriche L., Perez-Jimenez C., Munoz A.J., Teixidor F.B. and Errachid A. "Application of a New Phosphadithiamacrocycle to ClO_4^- -Selective CHEMFET and Ion-Selective Electrode Devices". *Anal.Chim.Acta.*, vol. 320, 1996. pp. 63-68
- [31] Muller B., Hauser C.P. "Effect of Pressure on the Potentiometric Response of Ion-Selective Electrodes". *Anal.Chim.Acta.*, vol. 320, 1996. pp. 69-75 .
- [32] Rothmarier M., Schaller U., Morf E.W. and Prestsch E. "Response Mechanism of Anion-x-Selective Electrodes based on Mercury Organic Compounds as Ionophores". *Anal.Chim.Acta.*, vol. 327, 1996. pp. 17-28 .
- [33] El Amrani Z.F., Sastre A., Aguilar M., Beyer L., and Florido A. "Iodide-Selective Electrodes based on the Silver(I) complex of a Novel N-thiocarbamoylimine-dithioether Derivative". *Anal.Chim.Acta.*, vol. 329, 1996. pp. 247-252.
- [34] Farrell R.J., lies J.P. and Dimitrakopoulos T. "Photocured Polymers in Ion-Selective Electrodes. Part 5: Photopolymerised Sodium Sensitive Ion-Selective Electrodes for Flow Injection Potentiometry". *Anal.Chim.Acta.*, vol. 334, 1996. pp. 133-137 .
- [35] Farrell R.J., lies J.P. and Dimitrakopoulos T. "Photocured Polymers in Ion-Selective Electrodes. Part 6: Photopolymerised Lithium Sensitive Ion-Selective Electrodes". *Anal.Chim.Acta.*, Vol. 335, 1996. pp. 111-116.
- [37] Brzoka Z., Dawgul M., Pijanowska D., and Torbicz W. "Durable NH_4^+ -Sensitive CHEMFET". *Sensors and Actuators B.*, .vol. 44, 1997. pp. 527-531.
- [38] Vlasov Y., Legin A. and Rudnitskaya A. "Cross-Sensitivity Evaluation of Chemical Sensors for Electronic Tongue Determination of Heavy Metal Ions". *Sensors and Actuators B.*, vol. 44, 1997. pp. 532-537.
- [39] Iiyushchenko A.M., Danilienko V.A. "Corrosion Potentiometric Sensors: Theory and Origin Mechanism of Pseudo-Nernstian Electrode Response". *Sensors and*

Actuators B., vol. 44, 1997. pp. 542-550.

- [40] Gondran C., Seibert E. and Fabry P. "Internal Reference System based on Poly (ethylene oxide) Networks". *Sensors and Actuators B.*, vol. 44, 1997. pp. 554-558.
- [41] Howard P.H., Meylan W.M. "editor". *Hanbook of Physical properties of Organic Chemicals*. N.W. Boca Raton ,FL.: CRC press,inc. 1997.
- [42] Paquette L.A "edtor-in-chief" . *Encycopedia of Reagents for Organic synthesis* vol.2. John-Wiley & Sons. 1995.
- [43] Kamata S., Murata H., Kubo Y., and Bhale A. "Copper(II)- Selective Membrane Electrode based on o-Xylene bis(dithiocarbamates) as Neutrual Carriers". *Analyst*, Vol. 114, 1989. pp. 1029-1031.
- [44] Jain K.A., Gupta D.R., Singh U., Khurana U. and Singh P.L. " Nickel(II)-Selective Sensors based on Heterogeneous Membranes Macrocyclic Compounds". *Sensors and Actuators B.*, vol. 40, 1997. pp. 15-20.
- [45] Hara H., Kondoh Y. and Mitani O. "Solid Solvent Membrane Coated Wire Electrodes and their Response to Nitrate, p-Toluenesulfonate, Chloride, Calcium, and Potassium". *Anal.Chem.*, vol. 62, 1990. pp. 1139-1143.
- [46] Pungor E. "Ion-Selective Electrodes, Misinterpretation of Fungtional Machanism, and New Result". *Microchemical Journal.*, Vol.57, 1997. pp. 251-254.
- [47] Toth K., Gavaller I. and Pungor E. "Transient Phenomena of Ion-Selective Membrane Electrode". *Anal.Chim.Acta.*, vol. 57, 1971. pp. 131-135.
- [48] Guilbault G.G., Drust R.A., Frant M.S., Freiser H., Hansen E.H., Light T.S., Pungor E., Rechnitz G., Rice N.M., Rohm T.J., Simon W. and Thomas J.D.R. "Ion-Selective Electrode". *Pure.Appl.Chem.*, vol. 48, 1976. pp. 127-131.
- [49] Buhlmann K., Reinbold J., Cammann K., Shul'ga A. A., Sundermerier C., Knoll M., Wierig A. and Weber E. "Clathrates as Coating Materials for Dielectric Transducers with Regard to Organic Solvent Vapour Sensors". *Sensors and Actuators B.*, vol. 26-27, 1995. pp. 158-161.
- [50] Rechnitz A. G., Eyal E. "Selectivity of Cyclic Polyether Type Liquid Membrane Electrodes". *Anal.Chem.*, vol. 44, 1972. pp. 370-372.
- [51] Siswanta D., Nagatsuka K., Yamada H., Kumakura K., Hisamoto H., Shichi Y., Toshima

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

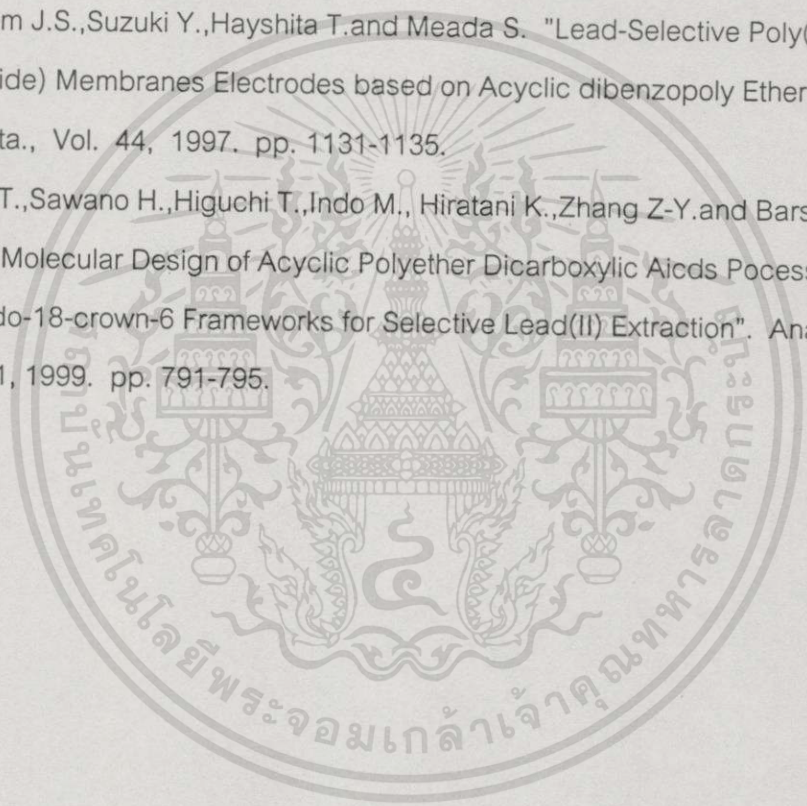
K. and Suzuki K. "Structure Ion Selectivity of Thia Crown Ether Compounds with a Bulky Block Subunit and Their Application as an Ion-Sensing Component for an Ion-Selective Electrode". *Anal.Chem.*, vol. 68, 1996. pp. 4166-4172.

[52] Drust A. R. "editor". *Ion-selective electrodes*. Nation bureau of standards special publication 314. 1969.

[53] Sokaski T., Ceresa A., Zwicky T., and Prestsch E. "Large Improvement of the Lower Detectoin Limit of Ion-Selective Polymer Membrane Electrode". *J.Am.Soc.*, vol. 119, 1997. pp. 11347-11348.

[54] Ohki A., Kim J.S., Suzuki Y., Hayshita T. and Meada S. "Lead-Selective Poly(vinyl Chloride) Membranes Electrodes based on Acyclic dibenzopoly Ether Diamides". *Talanta.*, Vol. 44, 1997. pp. 1131-1135.

[55] Hayashita T., Sawano H., Higuchi T., Indo M., Hiratani K., Zhang Z-Y. and Barstch R.A. "Molecular Design of Acyclic Polyether Dicarboxylic Acids Pocessing Pseudo-18-crown-6 Frameworks for Selective Lead(II) Extraction". *Anal.Chem.*, vol. 71, 1999. pp. 791-795.

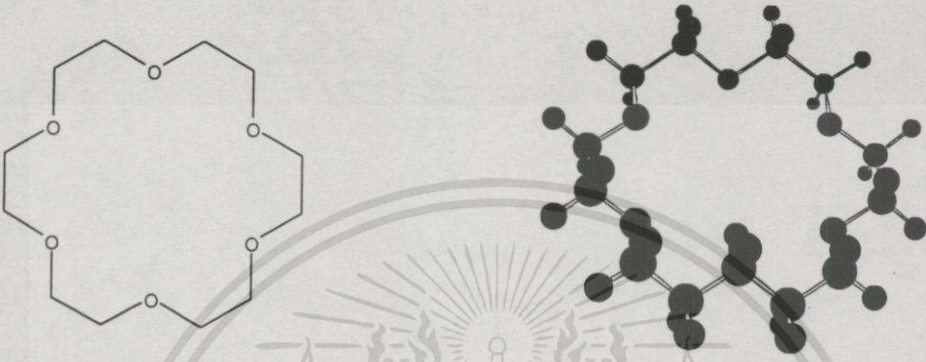




ภาคผนวก ก.

สูตรโครงสร้างของ crown ether

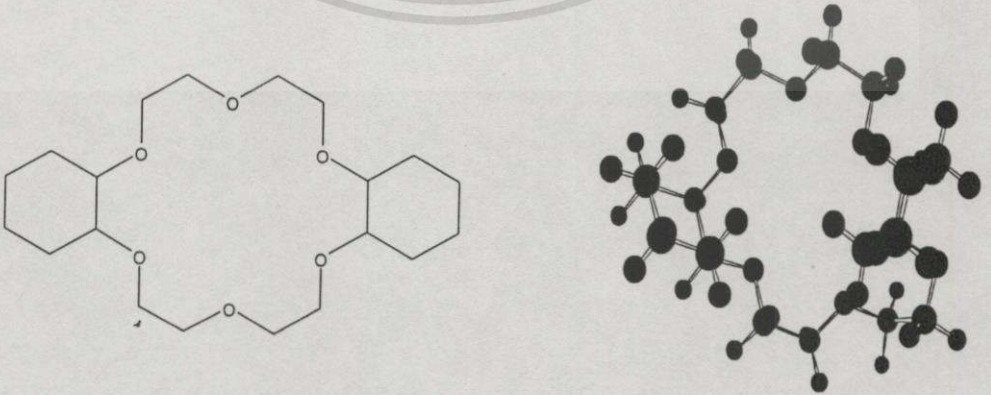
1. สูตรโครงสร้างของสารประกอบ crown ether



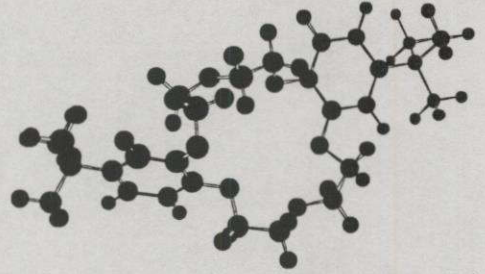
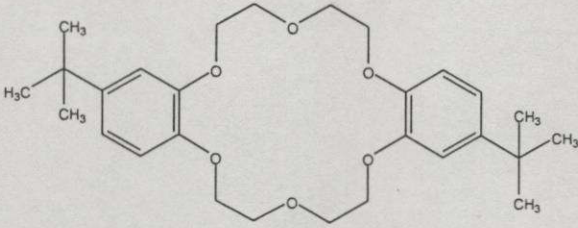
รูปที่ ก.1. 18-crown-6



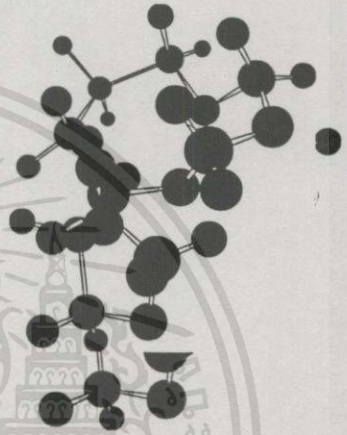
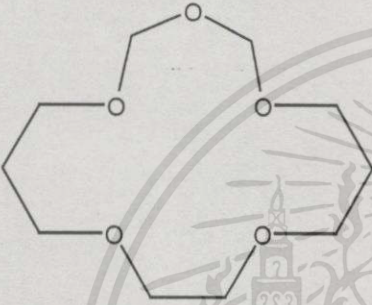
รูปที่ ก.2 Dibenzo-18-crown-6



รูปที่ ก.3 Dicyclohexano-18-crown-6



รูปที่ ก.4 4',4''(5'')-di-tert-butylidibenzo-18-crown-6



รูปที่ ก.5 15-crown-5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงการคำนวณและข้อมูลการทดลอง

1. การคำนวณค่าแอกติวิตี

คำนวณแอกติวิตี (a) ได้จากสูตร
เมื่อ

$$a = \gamma C$$

a = แอกติวิตี

γ = ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตี

C = ความเข้มข้น mol/l

และคำนวณหา γ ได้จากสูตร

$$\log \gamma = -0.511z^2 \left[\frac{\sqrt{\mu}}{1 + 1.5\sqrt{\mu}} - 0.2\mu \right]$$

ซึ่งค่าความแรงไอออน (μ) คำนวณได้จากสมการ

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

เมื่อ

Z_i = ประจุของไอออน

C_i = ความเข้มข้นของไอออน

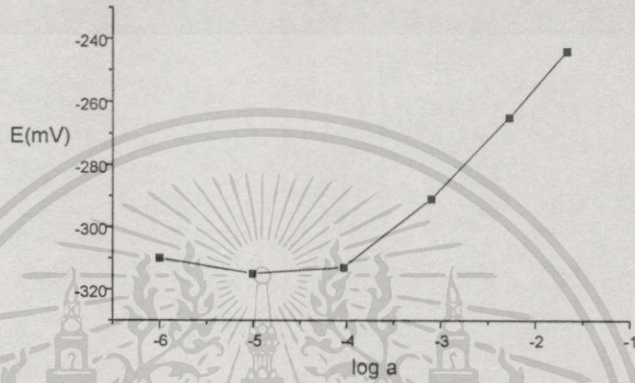
และค่าการคำนวณแสดงในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 แสดงการคำนวณค่าแอกติวิตี

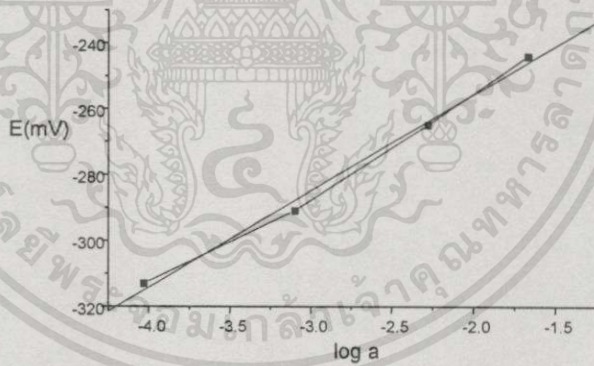
ควาเข้มข้น (mol/l)	Ionic strength (μ)	(μ) ^{1/2}	log γ	γ	a	log a
1.00E-01	3.00E-01	5.48E-01	-0.49196	0.322137	0.032214	-1.6
1.00E-02	3.00E-02	1.73E-01	-0.26876	0.538572	0.005386	-2.3
1.00E-03	3.00E-03	5.48E-02	-0.10223	0.790263	0.00079	-3.1
1.00E-04	3.00E-04	1.73E-02	-0.03438	0.923881	9.24E-05	-4.0
1.00E-05	3.00E-05	5.48E-03	-0.01109	0.974783	9.75E-06	-5.0
1.00E-06	3.00E-06	1.73E-03	-0.00353	0.991905	9.92E-07	-6.0
1.00E-07	3.00E-07	5.48E-04	-0.00112	0.997428	9.97E-08	-7.0
1.00E-08	3.00E-08	1.73E-04	-0.00035	0.999185	9.99E-09	-8.0

2. คำนวณหาความชื้น และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้

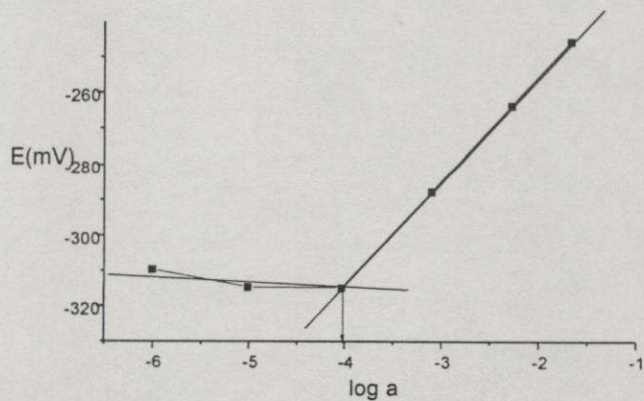
การคำนวณหาค่าความชื้นของกราฟมาตรฐานทำได้โดยการพลอตกราฟโดยกำหนดให้ แกน Y เป็นค่าศักย์ไฟฟ้า (mV) และแกน X เป็นค่าลอกลอกแอกติวิตีของสารละลายมาตรฐานของ ไอออนตะกั่ว ($\log a$) และหาความชื้นของกราฟโดยเลือกช่วงที่มีความชื้นดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.1 แสดงกราฟมาตรฐานของ ISE



รูปที่ ข.2 แสดงการคำนวณค่าความชื้นของกราฟมาตรฐาน



รูปที่ ข.3 แสดงวิธีการหาค่าระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้หลักสถิติ t-test ของข้อมูลที่ได้จาก AAS และ ISE

ในการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างสังเคราะห์จำนวน 8 ตัวอย่าง แล้ววิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วด้วยวิธีแบ่งตัวอย่างออกเป็นสองตัวอย่าง และใช้วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณของไอออนตะกั่วโดย AAS และ ISE ได้ผลดังนี้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ โดยใช้ ISE กับ AAS

ตัวอย่างที่	AAS (mol/l)	ISE (mol/l)
1	1.09×10^{-4}	1.29×10^{-4}
2	2.78×10^{-4}	1.56×10^{-4}
3	3.10×10^{-4}	2.03×10^{-4}
4	3.56×10^{-4}	2.35×10^{-4}
5	4.91×10^{-4}	2.74×10^{-4}
6	5.34×10^{-4}	3.15×10^{-4}
7	5.97×10^{-4}	3.54×10^{-4}
8	7.36×10^{-4}	4.52×10^{-4}

ให้ μ_1 และ μ_2 แทนค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วซึ่งวิเคราะห์ได้โดย AAS และ ISE ตามลำดับ โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

สมมติฐานที่ 1 $H_0: \mu_1 = \mu_2$ หรือ $\mu_D = 0$

สมมติฐานที่ 2 $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ หรือ $\mu_D \neq 0$

$$\alpha = 0.05$$

องศาความอิสระ (Degree of freedom, d.f) = 7

$$t_{0.05} = 1.895$$

บริเวณวิกฤต คือ $T < -1.895$ หรือ $T > 1.895$

ใช้สถิติ
$$T = \frac{\bar{D}}{s_D} \sqrt{N}$$

$$s_D = \sqrt{\frac{\sum (D_i - \bar{D})^2}{N-1}}$$

ตารางที่ ข.3 แสดงการคำนวณ t-test

ตัวอย่างที่	ISE(mol/l)	AAS(mol/l)	D_i	$D_i - \bar{D}$	$(D_i - \bar{D})^2$
1	1.29×10^{-4}	1.09×10^{-4}	2.00×10^{-5}	1.82×10^{-4}	3.31×10^{-8}
2	1.56×10^{-4}	2.78×10^{-4}	-1.22×10^{-4}	4.00×10^{-5}	1.60×10^{-9}
3	2.03×10^{-4}	3.10×10^{-4}	-1.07×10^{-4}	5.50×10^{-5}	3.03×10^{-9}
4	2.35×10^{-4}	3.56×10^{-4}	-1.21×10^{-4}	4.10×10^{-5}	1.68×10^{-9}
5	2.74×10^{-4}	4.91×10^{-4}	-2.17×10^{-4}	-5.50×10^{-5}	3.03×10^{-9}
6	3.15×10^{-4}	5.34×10^{-4}	-2.19×10^{-4}	-5.70×10^{-5}	3.25×10^{-9}
7	3.54×10^{-4}	5.97×10^{-4}	-2.43×10^{-4}	-8.10×10^{-5}	6.56×10^{-9}
8	4.52×10^{-4}	7.36×10^{-4}	-2.84×10^{-4}	-1.22×10^{-4}	1.49×10^{-8}

$$\sum -1.29 \times 10^{-3} \quad \sum 6.71 \times 10^{-8}$$

$$\bar{D} = -1.62 \times 10^{-4}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{-1.62 \times 10^{-4}}{8-1}} = 9.79 \times 10^{-5}$$

$$t = \frac{-1.62 \times 10^{-4}}{9.79 \times 10^{-5}} \times \sqrt{8} = -4.366$$

ค่า t ที่คำนวณได้อยู่ในบริเวณวิกฤต ดังนั้นจึงไม่ยอมรับ H_0 และสรุปว่าทั้งสองวิธีให้ผลในการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.4 ตารางค่าวิกฤตของการแจกแจง t

v	α				
	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005
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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะของไอออน dibenzo-18-crown-6 +DBP

ความเข้มข้น แอกติวิตี (mol/l)	ศักย์ไฟฟ้า E(mV)1	ศักย์ไฟฟ้า Linear1	ศักย์ไฟฟ้า E(mV)2	ศักย์ไฟฟ้า linear2	ศักย์ไฟฟ้า E(mV)3	ศักย์ไฟฟ้า linear3
-8.0	-300.0	-300.0	-301.0	-304.0	-302.0	-305.0
-7.0	-306.0	-306.0	-310.5	-308.0	-310.0	-308.0
-6.0	-311.0	-311.0	-314.0	-312.0	-314.3	-311.0
-5.0	-317.0	-317.0	-312.6	-315.0	-310.0	-313.0
-4.0	-322.0	-324.0	-320.0	-321.7	-316.0	-318.0
-3.1	-299.0	-296.0	-296.0	-292.7	-294.0	-290.0
-2.2	-271.0	-270.0	-268.0	-267.1	-266.0	-266.0
-1.6	-250.0	-251.0	-246.8	-248.1	-245.7	-247.0
ความชัน	30.9		31.2		30.1	

30.7

ตารางที่ ค.2 แสดงเวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว
dibenzo-18-crown-6 + DBP

ความเข้มข้น (mol/l)	1.0×10^4 Pb^{2+}	1.0×10^{-3} Pb^{2+}	1.0×10^{-2} Pb^{2+}	1.0×10^{-1} Pb^{2+}
เวลา(s)	E(mV)	E(mV)	E(mV)	E(mV)
1	-316.0	-290.0	-267.0	-247.0
10	-316.4	-291.4	-267.0	-246.1
20	-316.3	-291.9	-266.9	-246.1
30	-316.6	-291.9	-266.8	-245.9
40	-316.0	-291.8	-266.7	-245.5
50	-316.0	-291.8	-266.8	-245.5
60	-315.9	-292.0	-266.8	-245.5
70	-315.6	-292.0	-266.8	-245.5
80	-315.6	-292.0	-	-
90	-315.6	-292.0	-	-
100	-315.6	-	-	-

ตารางที่ ค.3 แสดงข้อมูลการศึกษาผลของการรบกวนของไอออนอื่นที่มีต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะ
ไอออนตะกั่ว dibenzo-18-crown-6 + DBP ที่ระดับความเข้มข้น 1×10^{-3} mol/l

Log a	E(mV)					
	Cu^{2+}	Cu^{2+} linest	Na^+	Na^+ linest	K^+	K^+ linest
-8.0	-270.0	-269.6	-281.5	-281.5	-282.0	-282.9
-7.0	-270.5	-269.6	-282.1	-281.3	-283.2	-282.8
-6.0	-270.0	-269.7	-282.0	-281.1	-284.0	-282.7
-5.0	-271.0	-269.7	-282.0	-280.9	-283.7	-282.6
-4.0	-270.0	-269.7	-280.2	-280.8	-281.0	-282.4
-3.1	-263.7	-264.4	-268.0	-268.8	-268.5	-268.9
-2.2	-243.0	-241.6	-245.0	-243.1	-244.0	-243.3
-1.6	-223.8	-224.7	-223.5	-224.0	-223.8	-224.3
ความชัน	27.8		31.3		31.2	

ตารางที่ ค.4 แสดงข้อมูลการศึกษาผลของการรบกวนของไอออนอื่นที่มีต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว dibenzo-18-crown-6 + DBP ที่ระดับความเข้มข้น 1×10^{-2} mol/l

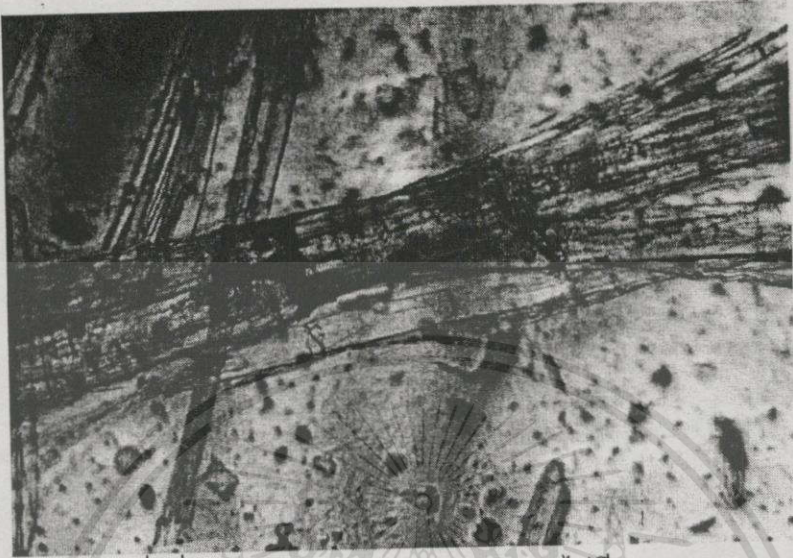
Log a	E(mV)					
	Cu ²⁺	Cu ²⁺ linest	Na ⁺	Na ⁺ linest	K ⁺	K ⁺ linest
-8.0	-244.8	-244.8	-254.0	-254.3	-255.0	-256.0
-7.0	-244.8	-244.6	-254.0	-254.0	-256.0	-255.7
-6.0	-244.5	-244.5	-254.0	-253.7	-256.0	-255.4
-5.0	-244.5	-244.4	-254.0	-253.4	-256.0	-255.1
-4.0	-244.5	-244.2	-253.8	-253.1	-256.0	-254.8
-3.1	-244	-244.1	-252.0	-252.8	-253.0	-254.6
-2.2	-237.5	-237.4	-241.0	-240.8	-243.0	-242.8
-1.6	-222.5	-222.4	-223.0	-222.1	-224.8	-224.6
ความชัน	24.5		30.6		29.8	

ตารางที่ ค.5 แสดงข้อมูลผลของการศึกษาผลของ พีเอชที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนตะกั่ว dibenzo-18-crown-6 + DBP

ความเข้มข้น	1.0×10^{-4}	ความเข้มข้น	1.0×10^{-3}	ความเข้มข้น	1.0×10^{-2}
	mol/l		mol/l		mol/l
pH	ศักย์ไฟฟ้า E(mV)	pH	ศักย์ไฟฟ้า E(mV)	pH	ศักย์ไฟฟ้า E(mV)
3.2	-283.3	2.9	-265.5	2.8	-242.0
3.3	-283.4	3.0	-265.0	3.0	-242.0
4.3	-284.6	3.1	-265.3	3.2	-242.2
5.0	-283.4	3.3	-265.5	3.4	-242.4
5.5	-283.0	3.8	-265.6	3.6	-242.4
5.7	-282.5	4.1	-265.2	3.9	-242.3
7.0	-282.0	4.4	-265.3	4.0	-242.4
8.4	-280.7	4.8	-265.4	4.3	-242.3
9.0	-279.3	5.0	-265.4	4.5	-242.3
9.2	-279.3	5.4	-265.4	4.8	-242.6
9.5	-276.6	5.6	-265.4	4.9	-242.3
9.8	-274.9	6.9	-265.5	5.0	-242.7
10.1	-271.5	7.0	-266.5	5.2	-242.8
10.2	-269.5	7.2	-266	5.5	-242.7
10.4	-263.8	7.6	-266.7	5.8	-243.3
10.7	-255.5	8.4	-265.6	5.9	-243.8
10.8	-254.9	9.5	-266	6.0	-243.7
10.88	-253.5	9.9	-266.5	6.4	-244.6
-	-	10.1	-267	6.5	-245
-	-	-	-	6.9	-245.9
-	-	-	-	7.0	-245.4
-	-	-	-	7.4	-245
-	-	-	-	8.2	-246



รูปภาพของเยื่อที่กำลังขยาย 100 เท่าถ่ายด้วยกล้อง polarizing microscope



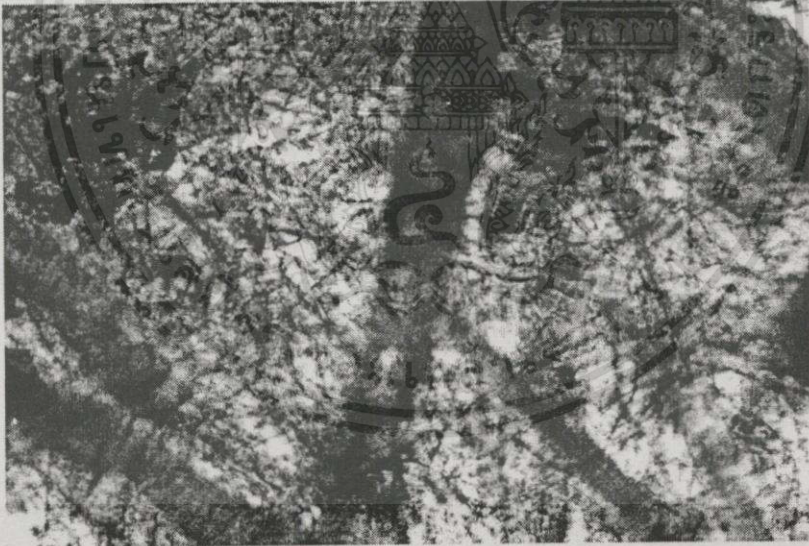
รูปที่ ง.1 รูปภาพของเยื่อที่มี dibenzo-18-crown-6 + DBP ไม่มีกระดาศกรง
: ผลึกที่กระจายอยู่ในเยื่อ คือ dibenzo-18-crown-6



รูปที่ ง.2 รูปภาพของเยื่อที่มี dibenzo-18-crown-6 + DBP มีกระดาศกรง
: ก้อนกลมสีดำ คือ dibenzo-18-crown-6 : เส้นที่มีลักษณะคล้ายตาข่าย คือ กระดาศกรง



รูปที่ ง.3 รูปภาพของเยื่อที่มี dibenzo-18-crown-6 + DOP ไม่มีกระดาศกรง
: ผลึกที่กระจายอยู่ในเยื่อคือ dibenzo-18-crown-6



รูปที่ ง.4 รูปภาพของเยื่อ dibenzo-18-crown-6 + DOP มีกระดาศกรง
: ก้อนกลมสีดำ คือ dibenzo-18-crown-6 : เส้นที่มีลักษณะคล้ายตาข่าย คือ กระดาศกรง



รูปที่ ง.5 รูปภาพของเยื่อที่มี dibenzo-18-crown-6 + DINP ไม่มีกระดาษกรอง
: ผลึกที่กระจายอยู่ในเยื่อ คือ dibenzo-18-crown-6



รูปที่ ง.6 รูปภาพของเยื่อที่มี dibenzo-18-crown-6 + DINP มีกระดาษกรอง
: ก้อนกลมสีดำ คือ dibenzo-18-crown-6 : เส้นที่มีลักษณะคล้ายตาข่าย คือ กระดาษกรอง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายเฉลิมชัย แตนดี เกิดเมื่อวันที่ 21 สิงหาคม พ.ศ. 2513 ที่จังหวัดอุบลราชธานี

การศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี จากสถาบัน
ราชภัฏอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี และในปี พ.ศ.2540 เข้าศึกษาในระดับปริญญาวิทยา
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง

การทำงาน ในปี พ.ศ.2536 และเข้ารับราชการครู ในตำแหน่งอาจารย์ 1 ระดับ 3
ที่โรงเรียนห้วยใหญ่วิทยา อำเภอห้วยใหญ่ จังหวัดมุกดาหาร และ ปี พ.ศ.2539 ตำแหน่ง
อาจารย์ 1 ระดับ 4 ที่โรงเรียนศรีเมืองวิทยาคาร อำเภอศรีเมืองใหม่ จังหวัดอุบลราชธานี

