

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การตรวจวัดตะกั่วในน้ำเสียโดยเทคนิคโพเทนชิอเมทรี  
และสกรีน-พรีนซ์อิเล็กทรอนิกส์



นายณัฐภาส ทับเยี่ยม  
นายรักพงศ์ สมทรัพย์

๕๓๓  
๑๓๓๔๒๓  
๒๕๖๐

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....107886  
- 8 ส.ย. 2553.  
วัน,เดือน,ปี.....

b. 12213421.  
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีอุตสาหกรรม-เครื่องมือวิเคราะห์  
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Screen-printed electrode for potentiometric detection of lead in wastewater

Mr. Nuttapas Tabaiam

Mr. Rukpong Somsub



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the

Degree of Bachelor of Science

Major in Industrial Chemistry – Analytical Instrumentation

Department of Chemistry

Faculty of Science

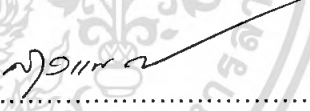
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang


Academic Year 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**โครงการพิเศษเรื่อง** การตรวจวัดตะกั่วในน้ำเสียโดยเทคนิคโพเทนชิอเมทรีและสกรีน-พรีน์ อิเล็กโทรด  
**นักศึกษา** นายณัฐภาส ทับเยี่ยม รหัสนักศึกษา 47050475  
 นายรพีพงศ์ สมทรัพย์ รหัสนักศึกษา 47050476  
**ภาควิชา** เคมี  
**สาขาวิชา** เคมีอุตสาหกรรม-เครื่องมือวิเคราะห์  
**ปีการศึกษา** 2550  
**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ รศ.อรุณี คงศักดิ์ไพศาล	
กรรมการ ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ	วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ
กรรมการ รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์	

  
 (ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์)  
 หัวหน้าภาควิชาเคมี

**ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การตรวจวัดตะกั่วในน้ำเสียโดยเทคนิคโพเทนชิอเมทรีและสกรีน-พรีนอิเล็กโทรด		
นักศึกษา	นายณัฐภาส ทับเอี่ยม	รหัสนักศึกษา	47050475
	นายรภัทพงศ์ สมทรัพย์	รหัสนักศึกษา	47050476
ภาควิชา	เคมี		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม-เครื่องมือวิเคราะห์		
ปีการศึกษา	2550		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์		

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาการตรวจวัดตะกั่วในน้ำเสียตัวอย่างจากโรงงานแบตเตอรี่โดยการผสมสารตัวแลกเปลี่ยนไอออนหรือไอออนฟอว์ 4% (w/w), ผงพีวีซี 28.25% (w/w) และพลาสติกไซเซอร 67.75% (w/w) ในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูราน จากนั้นนำไปหยดลงบนหน้าขั้วสกรีน-พรีนที่อิเล็กโทรด แล้วนำไปตรวจวัดด้วยเทคนิคโพเทนชิอเมทรีซึ่งมีขั้วไฟฟ้าสองขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และขั้วไฟฟ้าทำงาน ในโครงการพิเศษนี้จะทำการศึกษาร่วมกับไอออนฟอว์ที่ใช้ในการเตรียมหน้าขั้วสกรีน-พรีนที่อิเล็กโทรด ระหว่าง 1-Aza-18-crown-6 (A18C6) และ 1,10-Diaza-18-crown-6 (DA18C6) เพื่อหาไอออนฟอว์ที่ให้ค่าความชันที่ใกล้เคียงสมการเนินสต์ที่สุด ต่อจากนั้นจะทำการศึกษาสภาวะทางเคมีไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดตะกั่ว คือ ค่าพีเอช, ชนิดและความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์, ช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง, เวลาการตอบสนอง, สภาพไวของขั้วไฟฟ้า, ความเที่ยงของการตรวจวัด, ขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้, อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า และไอออนรบกวนซึ่งจะศึกษาไอออนของ  $Ag^+$ ,  $Hg^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$

จากการศึกษาพบว่า 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนฟอว์ที่ดีกว่าเพราะให้ค่าความชันตามสมการเนินสต์เท่ากับ 29.14 mV/decade ซึ่งค่าใกล้เคียงค่าความชันตามสมการเนินสต์ที่ดีที่สุดสภาวะทางเคมีไฟฟ้าที่ศึกษาพบว่า มี %RSD เท่ากับ 0.45 ช่วงพีเอช คือ 4-7 ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KCl 1.0 M ช่วงความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-2}$  M  $Pb^{2+}$  เวลาการตอบสนอง 90 วินาที ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่วัดได้เป็น  $1.0 \times 10^{-5}$  M หรือ 2.272 ppm อายุการใช้งานของขั้วอยู่ที่ 3 สัปดาห์ และไอออนที่รบกวนการตรวจวัด คือ  $Ag^+$  และ  $Hg^{2+}$  ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะเป็น 3.98 และ 1.58 ตามลำดับ

**Project Title** Screen-printed electrode for potentiometric detection of lead in wastewater  
**Student** Mr. Nuttapas Tabaiam  
Mr. Rukpong Somsab  
**Department** Chemistry  
**Program** Industrial Chemistry – Analytical Instrumentation  
**Academic** 2007  
**Thesis** Assoc. Prof. Dr. Suwan Chaiyasith

## ABSTRACT

This Project focused on the determination of Pb(II) ions in wastewater from industrial factory using polymeric membrane screen-printed electrode. The membrane consist of ionophore 4% (w/w), plasticizer 67.75% (w/w), poly(vinyl chloride) 28.25% (w/w) then dissolved in tetrahydrofuran and coated on screen-printed electrode. It was used as an ionophore compared with 1-Aza-18-crown-6 (A18C6) and 1,10-Diaza-18-crown-6 (DA18C6) which showed near the Nernstain slope at 29.75 mV/decade. The other studies is %RSD, pH, electrolyte and concentration of electrolyte, concentration range, response time, life time, detection limits and interfere ions.

From this studies it was showed that 1,10-Diaza-18-crown-6 was best selectivity for Pb(II) ions with the Nernstain slope at 29.14 mV/decade , 0.45 %RSD, pH 4-7, in 1.0 M KCl electrolyte solution, over a wide concentration range from  $1.0 \times 10^{-5}$  to  $1.0 \times 10^{-2}$  M  $Pb^{2+}$ , response time 90 seconds, detection limits of  $1.0 \times 10^{-5}$  M or 2.272 ppm, life time in 3 weeks The ions that interfered the determination of  $Pb^{2+}$  were  $Ag^+$  and  $Hg^{2+}$  which given the selectivity coefficient of 3.98 and 1.58 respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องจากได้คำแนะนำข้อมูลที่มีประโยชน์ รวมถึงแนวทาง และวิธีแก้ปัญหาจาก รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์ อาจารย์ผู้ควบคุมโครงการพิเศษ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.อรุณี คงศักดิ์ไพศาล และดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ กรรมการสอบโครงการ พิเศษที่ได้กรุณาให้คำแนะนำทางการแก้ไขปัญหา และตรวจสอบข้อมูลต่าง ๆ ในโครงการพิเศษฉบับนี้ ให้เป็นไปอย่างถูกต้อง

ขอขอบพระคุณบริษัท ยีเอส แบตเตอรี่ และบริษัท ยิวซ่า แบตเตอรี่ ที่กรุณาให้ตัวอย่างน้ำเสียแก่ เราเพื่อนำมาวิเคราะห์ อีกทั้งยังให้คำแนะนำและความรู้ทางด้านการบำบัดน้ำเสียตามโรงงานให้แก่เรา ด้วย

ขอขอบพระคุณพี่ ๆ ฝ่ายห้องปฏิบัติการวิเคราะห์น้ำของบริษัท ซีคอท ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาทางด้านการวิเคราะห์น้ำ

ขอขอบคุณรุ่นพี่ทุกคนที่กรุณาแนะนำ และช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่องที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ พิเศษนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ครอบครัวทับเอี่ยม และครอบครัวสมทรัพย์ สำหรับกำลังใจที่มีให้เสมอมา ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ที่คอยให้กำลังใจ และคอยช่วยเหลือในทุกเรื่อง

สำหรับประโยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากโครงการพิเศษเล่มนี้ ขอมอบให้กับครอบครัวทับเอี่ยม ครอบครัวสมทรัพย์ ตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอด ประสบการณ์ที่ดีให้

ณัฐภาส ทับเอี่ยม

รักพงศ์ สมทรัพย์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการพิเศษ.....	1
2.1 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ.....	2
3.1 ขอบเขตของโครงการพิเศษ.....	2
4.1 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หลักการของโพเทนชิอเมตรี.....	4
2.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ.....	5
2.2 ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะเยื่อของเหลว.....	7
2.3 สกรีน-พรีนที่อิเล็กโทรด.....	9
2.4 ตะกั่ว.....	10
2.4.1 สมบัติทางฟิสิกส์.....	10
2.4.2 สมบัติทางเคมี.....	11
2.4.4 แหล่งกำเนิดของตะกั่วในน้ำ.....	11
2.4.5 พิษจากโลหะตะกั่ว.....	12
2.4.6 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง.....	15
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 การดำเนินงานโครงการพิเศษ.....	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	21
3.1.1 อุปกรณ์.....	21
3.1.2 สารเคมี.....	22
3.2 การสร้างสกรีน-พรีนทีอิล็กโทรด.....	22
3.2.1 การเตรียมแผ่นพีวีซี.....	22
3.2.2 การสร้างขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนที.....	22
3.3 การเตรียมหน้าขั้วสกรีน-พรีนทีอิล็กโทรด.....	24
3.4 การทดสอบประสิทธิภาพสกรีน-พรีนทีอิล็กโทรด.....	24
3.5 วิธีการทดลอง.....	24
3.5.1 การหาสภาวะทางเคมีไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ตะกั่ว.....	24
3.5.1.1 ผลของค่าพีเอช.....	24
3.5.1.2 ชนิดของอิล็กโทรไลต์.....	24
3.5.1.3 ความเข้มข้นของอิล็กโทรไลต์.....	25
3.5.2 การศึกษาสมบัติของขั้ว.....	26
3.5.2.1 การศึกษาช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงของ ความเข้มข้นในการวิเคราะห์.....	26
3.5.2.2 สภาพไวของขั้ว.....	26
3.5.2.3 เวลาการตอบสนอง.....	26
3.5.2.4 ซีดจำกัดความเข้มข้นในการวิเคราะห์.....	26
3.5.2.5 การศึกษาความเที่ยง.....	27
3.5.2.6 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า.....	27
3.5.2.7 การศึกษาผลของการรบกวนจากไอออนอื่น.....	27
3.5.2.8 การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเทคนิคโพเทนชิอเมทรี.....	27
3.5.2.9 การเปรียบเทียบระหว่างสกรีน-พรีนทีอิล็กโทรดกับ อะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมทรี.....	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผล.....	29



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 การเตรียมสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด.....	29
4.1.1 คุณภาพสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด.....	29
4.1.1.1 ลักษณะของสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด.....	29
4.1.1.2 การประกอบสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด.....	29
4.2 การเตรียมหน้าขั้วสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด.....	30
4.3 ผลของการศึกษาชนิดของไอออนโพร์.....	30
4.4 ผลของการศึกษาปริมาณไอออนโพร์ที่มีต่อความชันตามสมการเนินสต์.....	31
4.5 ชนิดอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม.....	32
4.6 ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม.....	33
4.7 พีเอชที่เหมาะสม.....	34
4.8 การศึกษาช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงของความเข้มข้นในการวิเคราะห์.....	35
4.9 สภาพไวของขั้ว.....	36
4.10 เวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้า.....	37
4.11 ขีดจำกัดความเข้มข้นในการวิเคราะห์.....	38
4.12 การศึกษาความเที่ยง.....	39
4.13 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า.....	40
4.14 ผลของไอออนที่มีต่อการรบกวน.....	40
4.15 การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียเปรียบเทียบกับ AAS.....	42
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	43
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	44
เอกสารอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก.....	51
ภาคผนวก ก. การเตรียมสารเคมี.....	51
ภาคผนวก ข. โครงสร้างของสารประกอบ Azacrown ether.....	55
ภาคผนวก ค. ข้อมูลผลการทดลอง.....	56

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของตะกั่ว.....	10
2.2 ระดับตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ก่อนผ่านการบำบัด.....	12
2.3 ผลกระทบของตะกั่วต่อมนุษย์.....	13
2.4 ข้อมูลแสดงอาชีพที่บุคคลมีโอกาสได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย.....	14
2.5 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	15
3.1 แสดงปริมาณสารที่ใช้ในการเตรียมหน้าข้าวสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด.....	24
4.1 แสดงปริมาณสารที่ใช้ในการเตรียมหน้าข้าวสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด.....	30
4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความชันและเวลาการตอบสนองของชนิดไอออนโอฟอร์.....	30
4.3 แสดงอัตราส่วนขององค์ประกอบเยื่อ.....	32
4.4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดสารละลายตะกั่วในสารละลายไอเล็กโทรไลต์ต่างๆ..... ที่ความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-3} M$ ด้วยเทคนิคโพเทนชิอเมทรีและสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด	33
4.5 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดสารละลายตะกั่วในสารละลาย KCl..... ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเทคนิคโพเทนชิอเมทรีและสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด	33
4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความชันจากการวัดศักย์ไฟฟ้าทั้งหมด 4 สัปดาห์..... เพื่อหาอายุการใช้งานของข้าวสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด	40
4.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว ( $K_{Pb,M}$ ).....	41
4.8 แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์โดยเทคนิคชีวไฟฟ้าสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด (SPE) ..... กับเทคนิคอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี (AAS)	42
5.1 แสดงสมบัติข้าวสกรีน-พรีนทีโอในการตรวจวัดไอออนตะกั่ว โดยใช้ 1,10-Diaza-18-crown-6..... เป็นไอออนโอฟอร์	43
5.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว ( $K_{Pb,M}$ ).....	44
5.3 แสดงการเปรียบเทียบการใช้ไอออนโอฟอร์ต่าง ๆ ในการตรวจวัดตะกั่ว.....	45
ค.1 แสดงข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าของข้าวสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรดที่มี..... ไอออนโอฟอร์ 1-Aza-18-crown-6 เป็นส่วนผสมอยู่ปริมาณ 16 mg	56
ค.2 แสดงข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าของข้าวสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรดที่มี..... ไอออนโอฟอร์ 1-Diaza-18-crown-6 เป็นส่วนผสมอยู่ปริมาณ 16 mg	56

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.3 แสดงข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าของขั้วสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่มีไอออนฟอว์ 1-Diaza-18-crown-6 เป็นส่วนผลสมอยู่ปริมาณ 20 mg	57
ค.4 แสดงข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าของขั้วสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่มีไอออนฟอว์ 1-Diaza-18-crown-6 เป็นส่วนผลสมอยู่ปริมาณ 30 mg	57
ค.5 แสดงเวลาการตอบสนองของขั้วสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่มีไอออนฟอว์เป็น 1-Diaza-18-crown-6	58
ค.6 แสดงข้อมูลของการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่มีไอออนฟอว์เป็น 1-Diaza-18-crown-6	59
ค.7.1 แสดงข้อมูลของการศึกษาผลของอายุการใช้งานของขั้วที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่มีไอออนฟอว์เป็น 1-Diaza-18-crown-6 ที่ระดับความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-3}$ M ของสัปดาห์ที่ 1	59
ค.7.2 แสดงข้อมูลของการศึกษาผลของอายุการใช้งานของขั้วที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่มีไอออนฟอว์เป็น 1-Diaza-18-crown-6 ที่ระดับความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-3}$ M ของสัปดาห์ที่ 2	60
ค.7.3 แสดงข้อมูลของการศึกษาผลของอายุการใช้งานของขั้วที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่มีไอออนฟอว์เป็น 1-Diaza-18-crown-6 ที่ระดับความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-3}$ M ของสัปดาห์ที่ 3	60
ค.7.4 แสดงข้อมูลของการศึกษาผลของอายุการใช้งานของขั้วที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่มีไอออนฟอว์เป็น 1-Diaza-18-crown-6 ที่ระดับความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-3}$ M ของสัปดาห์ที่ 4	61
ค.11 แสดงข้อมูลของการศึกษาผลของการรบกวนของไอออนอื่นที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่มีไอออนฟอว์เป็น 1-Diaza-18-crown-6 ที่ระดับความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-3}$ โมลาร์	61
ค.10 แสดงข้อมูลของการศึกษาความเที่ยงในการตรวจวัดตะกั่วความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-3}$ โมลาร์ ทั้งหมด 30 ครั้ง	62

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงรูปแบบการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ โดยวิธีการกำหนดให้.....	6
แอดติวิตีของไอออนที่รบกวนคงที่ และวิธีกำหนดให้แอดติวิตีของไอออนที่จะ	
วิเคราะห์คงที่	
2.2 ขั้วไฟฟ้าเยื่อของเหลว.....	7
2.3 สกรีน-พรีนทีอิลิกโทรด.....	9
2.4 โครงสร้างสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรด.....	9
3.1 แสดงสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่เตรียมได้.....	23
4.1 แสดงลักษณะสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่ได้หลังจากการเตรียม.....	29
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log ความเข้มข้นกับค่าศักย์ไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบ.....	31
ชนิดของไอออนโพรระหว่าง A18C6 กับ DA18C6	
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log ความเข้มข้นกับค่าศักย์ไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบ.....	32
ปริมาณไอออนโพรของ 1,10-Diaza-18-crown-6 ในองค์ประกอบเยื่อ	
4.4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดตะกั่วจากการใช้ 1,10-Diaza-18-crown-6.....	35
เป็นไอออนโพรในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KCl ความเข้มข้น 1.0 M ที่ pH ต่าง ๆ	
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log ความเข้มข้นกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ความเข้มข้นตั้งแต่.....	36
$1.0 \times 10^{-7} - 1.0 \times 10^{-1}$ M ในการตรวจวัดสารละลาย $Pb^{2+}$ โดยใช้	
1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนโพร	
4.6 แสดงค่าความชันของกราฟที่ได้จากการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานตะกั่ว.....	37
4.7 แสดงเวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดในการตรวจวัดตะกั่ว.....	38
ที่ความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-3}$ M โดยใช้ 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนโพร	
4.8 แสดงขีดจำกัดความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจวัดตะกั่วด้วยขั้วสกรีน-พรีนที.....	39
อิลิกโทรดโดยใช้ 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนโพร	
4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการศึกษาไอออนรบกวนจากความสัมพันธ์ระหว่าง log.....	41
ความเข้มข้นของสารละลายกับค่าศักย์ไฟฟ้า โดยให้ไอออนรบกวนคงที่ที่	
ความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-3}$ M	
ข.1 แสดงโครงสร้างของ 1-Aza-18-crown-6.....	55
ข.2 แสดงโครงสร้างของ 1,10-Diaza-18-crown-6.....	55

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ และที่มาของโครงการพิเศษ

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่มีสภาพทางกายภาพ ชีวภาพ ส่วนประกอบทางเคมี ที่ไม่เหมาะสม เป็นมลพิษทางทัศนียภาพและก่อให้เกิดผลเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม มีสิ่งเจือปนต่าง ๆ มากมาย จนกระทั่งกลายเป็นน้ำที่ไม่เป็นที่ต้องการ และน่ารังเกียจของคนทั่วไป ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ประโยชน์อีกต่อไป หรือถ้าปล่อยลงสู่ลำน้ำธรรมชาติก็จะทำให้คุณภาพน้ำของธรรมชาติเสียหายได้ [1]

โรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปใช้น้ำในปริมาณมากน้อยแตกต่างกัน น้ำที่ใช้ทำความสะอาด เครื่องมือและพื้นที่โรงงาน และน้ำทิ้งจากโรงงาน จะเป็นน้ำเสียไหลลงสู่อ่างน้ำล้นคลอง บางโรงงาน อาจมีวัสดุเหลือจากผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมบางประเภทปนไปกับน้ำทิ้ง ทั้งหมดนี้เป็นเหตุให้น้ำใน อ่างน้ำล้นคลองเน่าส่งกลิ่นเหม็น มีสารพิษปะปนอยู่กลายเป็นมลภาวะที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม บริเวณนั้น โรงงานอุตสาหกรรมนั้นๆ จึงต้องมีระบบบำบัดน้ำเสีย ก่อนปล่อยลงสู่อ่างน้ำล้นคลอง โดย มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมที่กรมควบคุมมลพิษ กระทรวง ทรัพยากรสิ่งแวดล้อมได้กำหนดไว้คือ มีปริมาณตะกั่วในน้ำต้องไม่เกิน 0.005 มก./ล. (ppm) [2]

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนของโลหะหนักในน้ำเสีย [3] และในสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไปนิยม ใช้วิธีวิเคราะห์ทางสเปกโตรสโกปี เช่น อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมทรี (Atomic absorption spectrophotometry) [4], Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) [5] เป็นต้น หรือวิธีวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า เช่น โพลีโทเนอเมทรี [6], โวลแทมเมทรี [7-8] เป็นต้น แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์ทางสเปกโตรสโกปีนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ และค่าซ่อมบำรุงรักษามีราคาแพง ดังนั้น การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีผู้วิจัย ให้ความสนใจศึกษามากขึ้นและพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง

วิธีวิเคราะห์ทางโพลีโทเนอเมทรีโดยการประยุกต์กับขั้วของสกรีน-พริ้นท์อิเล็กโทรด (Screen-printed electrode) [9] เป็นวิธีที่เหมาะสมอีกวิธีหนึ่ง เนื่องจากวิธีนี้สามารถเตรียมได้ง่าย อุปกรณ์มีขนาดเล็ก ราคาถูก สามารถเตรียมอุปกรณ์ได้ที่หลายแผ่น ใช้เวลาในการวิเคราะห์สั้น และสามารถนำไปใช้ในงานภาคสนามได้ดี ประกอบกับวิธีการตรวจวัดมีความไวสูง จึงเป็นอีกเทคนิค หนึ่งที่น่าสนใจนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในน้ำเสีย

ในปัจจุบันการเตรียมหน้าขั้วของสกรีน-พริ้นท์อิเล็กโทรดจะนิยมเตรียมบนแผ่นพีวีซีซึบสเตรท โดยทำการผสมผงพีวีซี [10] 25-30 %, ตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) หรือไอออนโพร

(lonophore) [11] 4-7 % และพลาสติกไซเซออร์ [12] 60-70 % จากนั้นละลายด้วยตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูราน [13] เพื่อนำไปหยดลงบนขั้วไฟฟ้าใช้งานที่อยู่บนแผ่นพีวีซีขั้วสเตรทที่เตรียมไว้

สารประกอบในกลุ่ม Aza crown ether [14] มีความเลือกเฉพาะต่อไอออนของโลหะหนักได้ดี เพราะไอออนของโลหะหนักจะเข้าจับกับช่องว่างของสารประกอบนี้ จึงมีการนำสารประกอบในกลุ่มดังกล่าวมาเป็นไอออนโพรเฟอร์ (lonophore) ซึ่งโดยทั่วไปโครงสร้างของสารประกอบนี้จะเสถียรเมื่อจับกับไอออนของโลหะหนักที่มีขนาดพอดีกับช่องว่างของโครงสร้างของสารประกอบ

ในโครงการพิเศษนี้จะใช้เทคนิคโพเทนชิออสแตทริกบนขั้วสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรดเพื่อทำการเปรียบเทียบหาไอออนโพรเฟอร์ที่ใช้ในการเตรียมเยื่อซึ่งเหมาะสมที่สุดในการตรวจวัดตะกั่วในน้ำเสียในโรงงานผลิตแบตเตอรี่ [15] ระหว่าง 1-Aza-18-crown-6 (A18C6) [16] และ 1,10-Diaza-18-crown-6 (A18C6) [16] ตลอดจนจนถึงการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

1. เตรียมสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด สำหรับการตรวจวัดตะกั่ว
2. ศึกษาไอออนโพรเฟอร์ที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดตะกั่วโดยใช้สกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด
3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดตะกั่วโดยใช้สกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด
4. ศึกษาการรบกวนของโลหะหนักอื่น ๆ ในตัวอย่างน้ำเสียที่ทำการตรวจวัด
5. ตรวจวัดตะกั่วในน้ำเสียซึ่งเป็นตัวอย่างจริง

## 1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

1. เตรียมสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด สำหรับการตรวจวัดตะกั่ว
2. ศึกษาไอออนโพรเฟอร์ที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดตะกั่วระหว่าง 1-Aza-18-crown-6 กับ 1,10-Diaza-18-crown-6 โดยการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความชันตามสมการเนินสต์ และเวลาการตอบสนอง
3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดตะกั่ว ได้แก่ ผลของค่าพีเอช, ปริมาณของไอออนโพรเฟอร์, ชนิดของอิเล็กโทรไลต์, ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์, ช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง, ขีดจำกัดความเข้มข้น และอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า
4. ศึกษาการรบกวนของสารอื่น ๆ ในตัวอย่างน้ำเสียที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ เงิน, ปรอท, แคดเมียม, สังกะสี และทองแดง
5. ตรวจวัดตะกั่วในน้ำเสียซึ่งเป็นตัวอย่างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ผลคาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างขั้วไฟฟ้าสำหรับการตรวจวัดตะกั่วได้ง่าย มีขนาดเล็ก ราคาถูก พกพาได้สะดวก เหมาะกับการตรวจวัดได้ทุกสถานที่
2. สามารถตรวจวัดตะกั่วในน้ำเสียได้ง่ายขึ้น
3. สามารถนำวิธีที่ศึกษามาใช้เป็นทางเลือกสำหรับการตรวจวัดตะกั่วในน้ำเสีย โดยใช้แทนเทคนิคอื่น ๆ ที่มีราคาแพง และอาจใช้เวลาในการตรวจวิเคราะห์นานกว่า
4. ทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ โดยการสร้างขึ้นใช้เองภายในประเทศ สามารถลดการนำเข้าจากต่างประเทศได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงการพิเศษเรื่องการเตรียมสกรีน-พรีนทีอิเล็กทรอนิกส์เพื่อตรวจวัดตะกั่วในน้ำเสีย ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีเอกสาร วารสาร รายงาน และบทความในประเทศและต่างประเทศ เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยดังหัวข้อต่อไปนี้

- 2.1 หลักการของเทคนิคโพเทนชิอเมทรี
- 2.2 ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะเยื่อของเหลว
- 2.3 สกรีน-พรีนทีอิเล็กทรอนิกส์
- 2.4 ตะกั่ว
- 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หลักการของเทคนิคโพเทนชิอเมทรี [17-20]

วิธีทางโพเทนชิอเมทรี (Potentiometry) เป็นวิธีที่ศึกษาปริมาณของไอออนในสารละลายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า และองค์ประกอบของสารละลายซึ่งใช้ความสัมพันธ์ตามสมการเนิร์นสต์ ซึ่งสมการนี้ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ากับแอคติวิตีของไอออนขององค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในเทคนิคโพเทนชิอเมทรีประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วดังนี้

1. ขั้วอ้างอิง (Reference electrode) คือ ขั้วไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ และไม่ขึ้นกับปริมาณของไอออนในสารละลายที่จะวิเคราะห์
2. ขั้วทำงาน (Working electrode) คือ ขั้วไฟฟ้าที่ศักย์ของขั้วจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของความเข้มข้นหรือแอคติวิตีของสารละลาย

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากขั้วไฟฟ้าทำงานจะแปรเปลี่ยนไปตามความเข้มข้นของสารละลาย นั่นคือ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอธิบายง่าย ๆ ว่าเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูง ไอออนในสารละลายย่อมมีจำนวนมาก การส่งผ่านอิเล็กตรอนข้ามผิวหน้าขั้วไฟฟ้าย่อมเกิดขึ้นได้ดีกว่า ทำให้สามารถวัดศักย์ไฟฟ้าได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งในทางทฤษฎีความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้ากับแอคติวิตีของตัวทำปฏิกิริยาและผลของปฏิกิริยาจะเป็นไปตามสมการเนิร์นสต์ (2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$E = E^0 - (0.0592 / n) * \log (a_{\text{prod}} / a_{\text{react}}) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $E$  คือ ศักย์ขั้วไฟฟ้า

$E^0$  คือ ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า

$n$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในครึ่งปฏิกิริยา

$a_{\text{prod}} / a_{\text{react}}$  คือ อัตราส่วนแอคติวิตีของผลปฏิกิริยาและตัวทำละลาย

### 2.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ (Selectivity coefficient) [21]

ค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะเป็นสิ่งสำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออน ซึ่งในทางปฏิบัติในกรณีที่มีไอออนอื่นรบกวน สามารถหาสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะได้จากสมการ Nicolsky-Eisenman (Nicolsky-Eisenman Equation)

ซึ่งค่านี้จะบอกอิทธิพลของไอออนรบกวนที่มีต่อศักย์ไฟฟ้าของไอออนที่จะวิเคราะห์ในระบบ ซึ่งถ้าขั้วไฟฟ้ามีการเลือกเฉพาะที่ดีจะมี  $K_{A,B}^{\text{pot}}$  ค่าต่ำ

#### วิธีการผสมสารละลาย (Mixed solution method)

วิธีการผสมสารละลายเป็นวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่มีทั้งแอคติวิตีของสารที่ต้องการวิเคราะห์และไอออนรบกวน ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้

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

วิธีนี้ทำได้โดยการวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าในสารละลายผสมของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์กับไอออนที่รบกวน โดยให้แอคติวิตีของไอออนที่รบกวนคงที่ และเปลี่ยนแปลงแอคติวิตีของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ (A) ที่แอคติวิตีต่างๆ วัดศักย์ไฟฟ้าและเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้าและแอคติวิตีของ A ดังรูปที่ 2.1 เมื่อไอออน A ลดลงการรบกวนของไอออน B จะปรากฏขึ้นมาดังช่วงที่แรเงา และต่อจากนั้นศักย์ไฟฟ้าจะขึ้นกับแอคติวิตีของไอออน A กำหนดให้ จุดตัดระหว่างเส้นสัมผัสของความชันของกราฟและเส้นสัมผัสของกราฟที่ขนานกับแกน X ของแอคติวิตีของไอออนรบกวนที่จุด A ดังรูป 2.1 คือแอคติวิตีของไอออน A ( $a_A$ ) ที่จะนำไปคำนวณหาค่า K ในสมการที่ (2.2)

$$K_{A,B}^{\text{pot}} = \frac{a_A}{(a_B)^{z_A/z_B}} \quad (2.2)$$

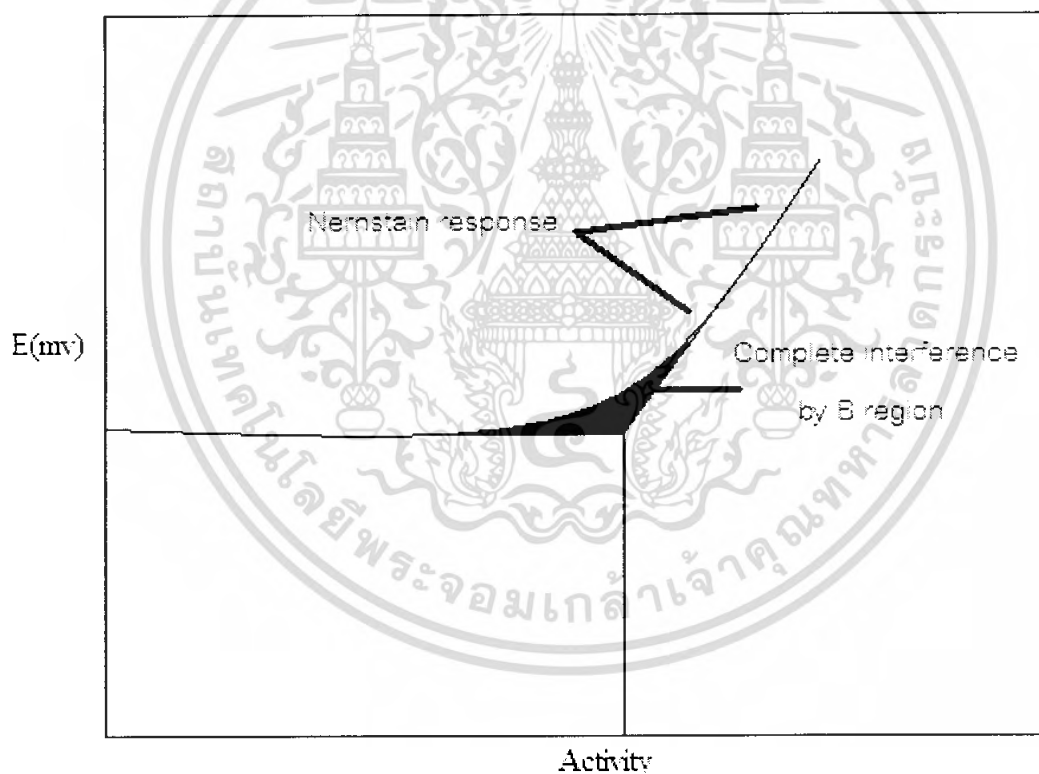
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $Z_A = Z_B$  สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.3)

$$K_{A,B}^{pot} = \frac{a_A}{a_B} \quad (2.3)$$

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

วิธีนี้จะตรงข้ามกับวิธีการแรกคือเป็นวิธีที่ทำให้แอกติวิตีของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ A คงที่ และเปลี่ยนแปลงแอกติวิตีของไอออนที่รบกวน B ที่แอกติวิตีต่างๆ วิธีนี้เป็นประโยชน์มากในการคำนวณการรบกวนของ  $H^+$  ต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนสำหรับตรวจไอออนบวก และ  $OH^-$  ต่อขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนสำหรับไอออนลบ วิธีการคำนวณจะเหมือนกันกับวิธีแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ โดยวิธีการกำหนดให้แอกติวิตีของไอออนที่รบกวนคงที่ และวิธีกำหนดให้แอกติวิตีของไอออนที่จะวิเคราะห์คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

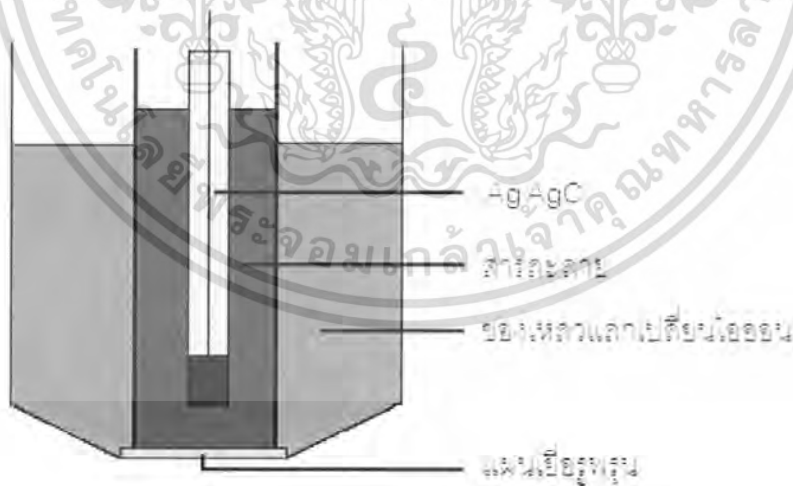
ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะ ซึ่งถ้าค่า  $K_{A,B}^{pot} < 1$  แสดงว่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วมีการตอบสนองต่อ  $K_{A,B}^{pot}$  ไอออนที่ต้องการวิเคราะห์เป็นส่วนใหญ่ และในทางตรงข้ามจะมีการตอบสนองต่อไอออนรบกวน B เมื่อ  $K_{A,B}^{pot} > 1$

## 2.2 ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะเยื่อของเหลว (Liquid-membrane ion-selective electrodes)

ขั้วไฟฟ้าเยื่อของเหลวเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีการตอบสนองต่อไอออนของสารตัวอย่าง โดยเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างของเหลวแลกเปลี่ยนไอออนที่แทรกตามแผ่นเยื่อพอร์กับไอออนของสารตัวอย่าง ซึ่งการเคลื่อนที่ของไอออนระหว่างการเกิดการแลกเปลี่ยน จะทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นภายในแผ่นเยื่อที่มีส่วนสัมผัสกับสารละลายอ้างอิงภายในด้วย จึงทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้น

ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนเยื่อของเหลว สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1. ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนเยื่อของเหลวที่ใช้ตัวพาที่มีประจุ ตัวอย่างเช่น ตัวแลกเปลี่ยนไอออน
2. ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนที่ใช้ตัวพาที่เป็นกลางทางไฟฟ้าที่เป็นของเหลว



รูปที่ 2.2 ขั้วไฟฟ้าเยื่อของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างขั้วไฟฟ้าแบบของเหลวในอดีตจะใช้แผ่นที่มีรูพรุนที่อิมมัลด้วยตัวทำละลายอินทรีย์บรรจุสารที่เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนหรือไอโอโนฟอร์ แต่ปัญหาตรงที่มีการหลุดของสารที่มีความไวทางไฟฟ้าหรือตัวแลกเปลี่ยนไอออนเข้าไปในสารละลายที่ทดสอบที่ละเอียดที่ละเอียดทำให้ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าไม่เสถียร และมีความยุ่งยากในการเติมของเหลวเข้าไปในรูพรุนที่เล็กมาก

ในปัจจุบันการสร้างขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนแบบเยื่อของเหลว พัฒนาเป็นแบบเยื่อพอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยสารที่ไวทางไฟฟ้า เช่น ตัวแลกเปลี่ยนไอออนหรือไอโอโนฟอร์ โดยผสมพลาสติกไซเซออร์และสารพอลิเมอร์เข้าด้วยกันในตัวทำละลายอินทรีย์ แล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำแผ่นเยื่อไปติดกับขั้วไฟฟ้า

โครงการนี้เราจะใช้ตัวแลกเปลี่ยนไอออนหรือไอโอโนฟอร์ที่เหมาะสมไปทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับตะกั่ว แล้วนำไปผสมกับพลาสติกไซเซออร์ที่เหมาะสมและผงพีวีซี โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์เตตระไฮโดรฟูราน จากนั้นเราจะหยดสารละลายที่ได้ลงบนขั้วไฟฟ้าทำงานแล้วทิ้งไว้ให้แห้งซึ่งจะเกิดฟิล์มบางๆขึ้น

การใช้ขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนเยื่อของเหลวส่วนใหญ่จะมีการรบกวนจากไอออนอื่นที่นอกเหนือไปจากไอออนที่เราต้องการวิเคราะห์ เช่น ถ้าใช้วัดความเข้มข้นของไอออน A แต่ในสารละลายมีไอออน B, C และไอออนอื่นๆที่รบกวน ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะอยู่ในรูปตามสมการที่ (2.4)

$$E_{\text{cell}} = K + (0.0591 / n) \cdot \log(a_A + K_{A,B}a_B + K_{A,C}a_C + \dots) \quad (2.4)$$

เมื่อ

$E_{\text{cell}}$  คือ ศักย์เซลล์ไฟฟ้า

$a_A$  คือ ค่าแอกติวิตีของไอออน A

$a_B$  คือ ค่าแอกติวิตีของไอออน B

$a_C$  คือ ค่าแอกติวิตีของไอออน C

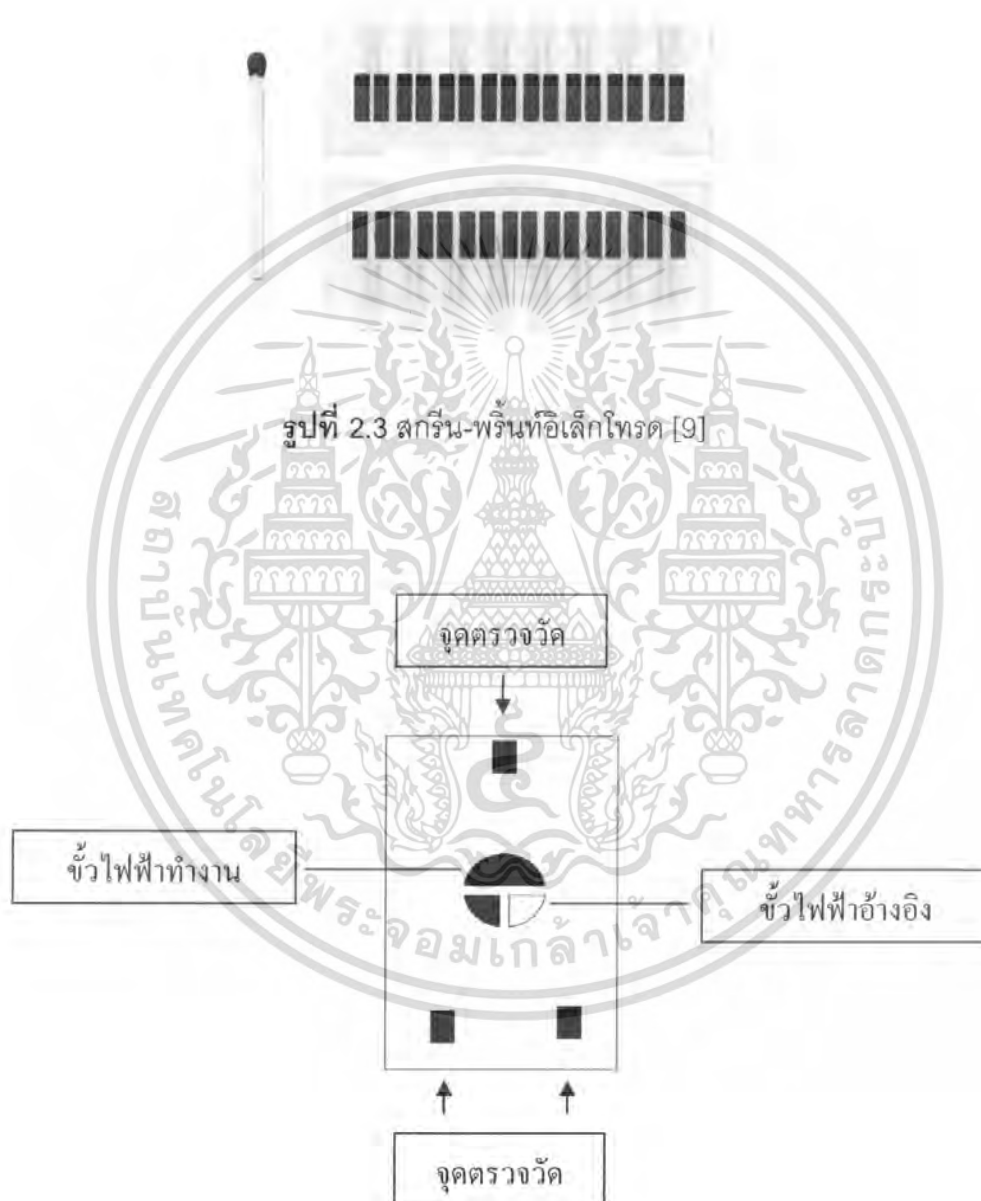
$K_{A,B}$  คือ ค่าคงที่ของการเลือกเฉพาะของไอออน A ต่อไอออน B

$K_{A,C}$  คือ ค่าคงที่ของการเลือกเฉพาะของไอออน A ต่อไอออน C

ตัวอย่างเช่น ถ้า  $K_{A,B}$  เท่ากับ 2 หมายความว่า ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากขั้วไฟฟ้าที่จุ่มลงในสารละลายของ A จะมีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าแห่งนี้จุ่มในสารละลายของ B และมีความเข้มข้นเป็น 3 เท่าของ A ในสารละลายแรก

### 2.3 สกรีน-พรีนท้อเล็กโทรด [9]

สกรีน-พรีนท้อเล็กโทรดเป็นขั้วไฟฟ้าที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการตรวจวิเคราะห์ มีลักษณะคล้ายคลึงกับขั้วไฟฟ้าโดยทั่วไป แต่มีข้อดีเพิ่มขึ้นคือ สามารถเตรียมได้ง่าย ใช้เวลาในการวิเคราะห์สั้น เป็นขั้วไฟฟ้าที่สามารถใช้เพียงครั้งเดียวแล้วทิ้ง



รูปที่ 2.4 โครงสร้างสกรีน-พรีนท้อเล็กโทรด [9]

สกรีน-พรีนท้อเล็กโทรดมีลักษณะเป็นแผ่นอาจเตรียมขึ้นจากกระดาษ เซรามิกส์ หรือพอลิเมอร์

ภายในประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) และขั้วไฟฟ้าทำงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Working electrode) ในการตรวจวิเคราะห์สารทำได้โดยการต่อสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดเข้ากับเครื่องตรวจวัด หยอดสารที่ต้องการวิเคราะห์ลงบนแผ่นสามารถวิเคราะห์ผลได้ทันที

นอกจากนี้แล้วสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดยังมีคุณสมบัติที่ดีอีกหลายประการ เช่น สามารถหลีกเลี่ยงสิ่งเจือปน ลดปัญหาสัญญาณที่ตรวจวัดได้ค่อนข้างต่ำเนื่องจากมีประสิทธิภาพของขั้วต่ำลง และสามารถเตรียมขึ้นได้จำนวนมากบนแผ่นรองรับที่เหมือนกันหรือแตกต่างกัน

## 2.4 ตะกั่ว [22]

### 2.4.1 สมบัติทางฟิสิกส์ [22]

ตะกั่ว (Lead) เป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ 4 ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 82 และสัญลักษณ์คือ Pb (มาจากภาษาละตินว่า Plumbum) ปกติจะมีสีขาวอมน้ำเงิน แต่เมื่อถูกกับอากาศสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทา การจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็น  $[Xe] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^2$  โครงสร้างผลึกเป็น face – centered cubic จำนวนอะตอมต่อหน่วยเซลล์ เท่ากับ 4 อะตอมไอโซโทปมีเลขมวลเป็น 204(15%), 206(23.6%), 207(22.6%), 208(52.3%) และมีสมบัติอื่นๆดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางฟิสิกส์ [22]

Properties	Value
Atomic weight	207.2
Density, g.cm <sup>-3</sup>	11.34
Melting point, °C	327.4
Boiling point, °C	1749
Specific heat, J/(kg•K)	130
Electrical resistivity, $\mu\Omega/cm$	
at 20°C	20.65
at 100°C	27.02
at 330°C	96.73
Thermal conductivity, W/(m•K)	
at 28°C	35.3
at 100°C	33.0
Heat capacity at 25°C, J•mol <sup>-1</sup> •K <sup>-1</sup>	26.650
Velocity of sound in lead, cm/s	122,700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Properties	Value
Coefficient linear expansion at 20°C, °C <sup>-1</sup>	29.1 × 10 <sup>-6</sup>
Normal electrode potential, vs standard	0.22
Magnetic susceptibility at 20°C, m <sup>3</sup> /kg	-0.29 × 10 <sup>-6</sup>
Young's modulus, Gpa	16.5
Viscosity, mPa.s (=cP)	
at 440°C	2.12
at 550°C	1.70
at 845°C	1.19
Heat of fusion, kJ•mol <sup>-1</sup>	4.77
Heat of vaporization, kJ•mol <sup>-1</sup>	179.5
Atomic radius, pm	180
Covalent radius, pm	147
Van der Waals radius, pm	202

#### 2.4.2 สมบัติทางเคมี [22]

ตะกั่วในสารประกอบมีเลขออกซิเดชัน 2 ค่า คือ +2 และ +4 แต่ส่วนมากเกิดเป็นสารประกอบมีเลขออกซิเดชัน +2 สารประกอบของตะกั่วเป็นสารประกอบโควาเลนต์ และสามารถเกิดเป็นเกลือได้ 2 ชนิดคือ Plumbous (Pb(II)) และ Plumbic (Pb(IV)) ซึ่งใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างเนื่องจากมีสมบัติที่ทนทานต่อการกัดกร่อนทั้งเมื่ออยู่ในอากาศ น้ำ และดิน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของธาตุนี้ทำให้เกิดเป็นฟิล์มเคลือบที่ผิวซึ่งป้องกันการกัดกร่อนหรือทำให้เกิดขึ้นได้ช้า และเป็นโลหะที่มีความสำคัญต่อมนุษย์มาเป็นเวลานานหลายร้อยปีมาแล้ว โดยที่ปริมาณการผลิตและการใช้ปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการปล่อยและเกิดการปนเปื้อนของตะกั่วในสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นซึ่งมนุษย์จะไ้รับมลพิษของตะกั่ว โดยผ่านทาง การหายใจ และการกินอาหาร และดื่มน้ำที่มีตะกั่วปนเปื้อนอยู่

#### 2.4.3 แหล่งกำเนิดของตะกั่วในน้ำ

ปริมาณของตะกั่วในน้ำสาเหตุใหญ่มาจากการปล่อยของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และจากการชะล้างจากถนนซึ่งในอดีตมีการใช้น้ำมันที่มีส่วนผสมของสารตะกั่ว และเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ รวมทั้งบริเวณใกล้กับการทำเหมืองตะกั่ว ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำที่เป็นมลพิษโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 1-100 mg/dm<sup>3</sup> ซึ่งสามารถทำให้ลดลงได้โดยการบำบัดก่อนที่จะปล่อยสู่แหล่ง

รับน้ำ ซึ่งในตารางที่ 2.2 จะแสดงปริมาณของตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ก่อนผ่านการบำบัดน้ำ

ตารางที่ 2.2 ระดับตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ก่อนผ่านการบำบัดน้ำ

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

#### 2.4.4 พิษจากโลหะตะกั่ว [23]

ในบรรดาโลหะในโลก ตะกั่วเป็นโลหะที่มนุษย์สนใจกับความเป็นพิษของมันมากที่สุด เนื่องจากการใช้ประโยชน์อย่างมากมาย โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่รถยนต์ซึ่งใช้ตะกั่วเกือบร้อยละ 50 ของผลผลิตตะกั่วทั้งหมด

ในอุตสาหกรรมสี และสารเคมี ใช้สารประกอบตะกั่วมาก เช่น สีแดงจากตะกั่วออกไซด์ (Red lead) สีเหลืองจากตะกั่วโครเมต (Lead chromate) สีขาวจากตะกั่วคาร์บอเนต (Lead carbonate) และตะกั่วซัลเฟต (Lead sulfate) สารฆ่าแมลงจากตะกั่วอาร์เซนเนทใช้ผสมสีทาอาคาร ซึ่งสีที่มีตะกั่วเหล่านี้ อาจผสมในสีของเล่นสำหรับเด็ก สีวาดภาพ สีที่ใช้พิมพ์ในวารสาร หนังสือพิมพ์ ซึ่งเป็นสีที่ต้องสัมผัสเสมอในชีวิตประจำวัน ทำให้บุคคลที่สัมผัส มีโอกาสได้รับสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้สูง ประโยชน์ของตะกั่วมีมาก แต่ก็มีโทษมากเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นอกจากนี้ ยังมีการนำตะกั่วออกไซด์มาใช้เป็นเครื่องสำอางด้วย กองพิษวิทยา เคยตรวจพบ แป้งโรยตัวเด็ก เป็นผงสีขาว และ สีแดงอ่อน มีตะกั่วปนอยู่ร้อยละ 74 ซึ่งอันตรายต่อเด็กมาก เนื่องจากผิวหนังเด็กดูดซึมตะกั่วได้ดีกว่าผู้ใหญ่

สรุประดับปริมาณ และความเป็นพิษของตะกั่วที่มีต่อมนุษย์ ซึ่งสำรวจโดย US EPA ดังแสดง ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของตะกั่วต่อมนุษย์ [23]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอกาสที่บุคคลทั่วไปได้รับสารตะกั่วที่เกิดจากท่อไอเสียรถยนต์ (Alkyl lead) แล้วยังได้รับจากอาหาร น้ำ และสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ตะกั่วเป็นโลหะที่ไม่จำเป็นในขบวนการดำรงชีวิตของมนุษย์อย่างโลหะอื่นๆ เช่น โซเดียม แคลเซียม หรือ เหล็ก จึงมีการกำหนดมาตรฐาน เพื่อป้องกันสารตะกั่วปนเปื้อนในอากาศ อาหาร และน้ำ เพื่อความปลอดภัยขึ้นในหลายประเทศ รวมทั้งไทยด้วย

สำหรับบุคคลทั่วไป ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้จาก ทางปากโดยรับประทานอาหาร และน้ำดื่ม ที่ปนเปื้อนตะกั่ว, ทางการหายใจ จากไอเสียรถยนต์, ทางผิวหนัง ส่วนมากเกิดกับ บุคคลที่มีอาชีพเกี่ยวข้องกับตะกั่วเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 แสดงอาชีพที่มีโอกาสได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลแสดงอาชีพที่บุคคลมีโอกาสได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย [23]

อาชีพที่โอกาสได้รับตะกั่ว	อาชีพที่โอกาสได้รับตะกั่วปานกลาง
หลอมตะกั่ว	เหมืองตะกั่ว
หลอมโลหะที่ทาสีกันสนิม	ทำสายไฟ
ตัดโลหะจากเรือเก่า	ประกอบเครื่องเสียงวิทยุโทรทัศน์
โรงงานแบตเตอรี่	โรงงานลูกปืน
โรงงานสีที่มีตะกั่วผสมอยู่	ซ่อมเครื่องยนต์
โรงงานสีชนิดฉีดย่น	ประกอบรถยนต์
โรงงาน PVC Stabilizer	ทำเครื่องปั้น เครื่อง

ส่วนพิษเรื้อรัง (Chronic toxicity or poisoning) จากตะกั่วนั้น อาการจะค่อยๆ แสดงออกมาภายหลังจากได้รับสารตะกั่วที่ละลายที่เข้าสู่ของเหลวในร่างกายและค่อยๆ สะสมในร่างกาย จนถึงระยะเวลาหนึ่ง อาจนานเป็นปีจึงแสดงอาการ ซึ่งส่วนมากมักเกิดกับบุคคลที่มีอาชีพที่สัมผัสกับตะกั่วโดยตรง ตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายแล้ว ไม่ว่าจะทางใด จะถูกดูดซึมเข้าสู่ระบบไหลเวียนโลหิต ไปจับกับเม็ดเลือดแดง แทนที่เหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) ซึ่งเป็นโลหะที่จำเป็น ในการสร้างเม็ดเลือดแดง ทำให้เกิดอาการโลหิตจาง (Anaemia) และมีผลให้ ปริมาณเหล็กในน้ำเหลือง เพิ่มขึ้นผิดปกติ จะมีตะกั่วบางส่วน ไปสะสมในกระดูก โดยตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ ) จะเข้าไปแทนที่แคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) ซึ่งเป็นโลหะ ที่จำเป็นในการสร้างกระดูก และฟัน ทำให้มีอาการปวดตามข้อ กระดูก และหักง่าย ถ้าไปสะสมที่รากฟัน จะทำให้เห็นสีม่วงหรือสีดำบริเวณเหงือก บางครั้งเรียกว่า เส้นตะกั่ว (Lead line) ทำให้ฟันหลุดได้ง่าย นักวิจัยพบว่าตะกั่ว สามารถเกาะกับกระดูกในร่างกาย ได้นานถึง 32 ปี และยังคงสะสมในไขมัน ระบบประสาท สมอง ระบบน้ำเหลือง ตับ และไต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาการพิษเรื้อรังที่พบบ่อย คือ อาการของระบบย่อยอาหาร จะเกิดการปวดท้อง น้ำหนักลด เบื่ออาหารคลื่นไส้ อาเจียน ท้องผูก อาการพิษทางประสาท และสมอง ทำให้ทรงตัวไม่อยู่ เกิดอาการประสาทหลอน ซึมไม่รู้สึกตัว ชัก มือและเท้าตก เป็นอัมพาต สลบ และอาจตายได้

การรักษาอาการพิษเฉียบพลัน จากสารตะกั่ว ส่วนมากเกิดจากการรับประทานอาหารที่มีการปนเปื้อนของตะกั่ว ฉะนั้นแพทย์จะต้องล้างท้อง โดยใช้สารละลาย 3 เปอร์เซ็นต์โซเดียม หรือ แมกนีเซียมซัลเฟต และ/หรือให้ผงถ่าน (Activated charcoal) เพื่อป้องกันการดูดซึม อาการเริ่มแรกของพิษตะกั่วจะสังเกตค่อนข้างยาก เช่น อาการปวดหัว กระสับกระส่าย ซึ่งมีหลายสาเหตุ จึงมักใช้ผลวิเคราะห์ทางเคมีในเลือด และปัสสาวะ เป็นข้อบ่งชี้ ร่วมกับสังเกตอาการทางคลินิก การรักษาทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ แพทย์ใช้หลักการเดียวกัน คือ พยายามเร่งการขับตะกั่วออกจากร่างกาย โดยการให้สารเคมีเกาะ แล้วดึงตะกั่วออกจากร่างกายทางปัสสาวะ (Chelating agent) ส่วนมากใช้แคลเซียมโซเดียม เอดีเตด ( $\text{CaNa}_2 \text{EDETATE}$ ) ฉีดเข้าเส้นเลือดดำ 1-2 กรัมต่อวัน

#### 2.4.5 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง [2]

ตามประกาศของกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่องการกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539 ได้กำหนดมาตรฐาน ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม [2]

ดัชนีคุณภาพ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5 - 9.0	pH Meter
2. ค่าที่ดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	- ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือทะเลค่าที่ดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าที่ดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อย	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103 -105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีคุณภาพ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
	หรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล.	
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Titrate
7. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลายแล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ Spectrophotometry (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (5 วันที่อุณหภูมิ 20 °C) (Biochemical Oxygen-	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีคุณภาพ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
Demand : BOD)	หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	เป็นเวลา 5 วัน
14. ค่าที่เคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้ว แต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม	Kjeldahl
ดัชนีคุณภาพ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
	ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้ว แต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	Potassium Dichromate Digestion
16. โลหะหนัก (Heavy Metal)		
สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	Atomic Absorption
โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	Spectrophotometry ชนิด Direct Aspiration
โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด
ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	Inductively Coupled
แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.	Plama: ICP
แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	Atomic Absorption
เซลีนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation

ดัชนีคุณภาพ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
		หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma: ICP
ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	Atomic Absorption Cold Vapour Technique

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tavakkoli N. และคณะ [24] ศึกษาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนชนิดแผ่นเยื่อพีวีซีสำหรับการตรวจวัดไอออนของตะกั่ว(II) โดยการทำอนุพันธ์ 9,10-anthraquinone เพื่อเป็นไอออนโพลาร์ พบว่า 1,8-dihydroxy-2,7-bis(prop-20-enyl)-9,10-anthraquinone ให้ค่าความชันตามสมการของเนินสดีดีที่ดีที่สุดในการตรวจวัดไอออนของตะกั่ว(II) คือ  $29.0 \pm 0.3$  mV/decade ที่ช่วงความเข้มข้นตั้งแต่  $2.0 \times 10^{-3}$  ถึง  $2.0 \times 10^{-6}$  M  $Pb^{2+}$  เวลาในการตอบสนอง 30 วินาที สามารถใช้เยื่อได้นาน 4 เดือน ค่าพีเอช 6.0 และขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดที่  $1.1 \times 10^{-6}$  M

Mousavi M.F. และคณะ [25] ศึกษาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนชนิดแผ่นเยื่อพีวีซีสำหรับการตรวจวัดไอออนของตะกั่ว(II) โดยใช้ 1,10-dibenzyl-1,10-diaza-18-crown-6 เป็นไอออนโพลาร์ พบว่า ให้ค่าความชันตามสมการของเนินสดีดีในการตรวจวัดไอออนของตะกั่ว(II) คือ  $29.3 \pm 0.7$  mV/decade ที่ช่วงความเข้มข้นตั้งแต่  $5.0 \times 10^{-5}$  ถึง  $1.0 \times 10^{-2}$  M  $Pb^{2+}$  เวลาในการตอบสนอง 20 วินาที สามารถใช้เยื่อได้นาน 2 สัปดาห์ ค่าพีเอช 5.5 และขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดที่  $2.8 \times 10^{-5}$  M

Eric S. M. และคณะ [26] ศึกษาโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซเดียม, น้ำ และ/หรือ 1,10-diaza-18-crown-6 โดยใช้การวิเคราะห์ทาง X-Ray

Chia-Ching S. และคณะ [27] ศึกษาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนชนิดแผ่นเยื่อพีวีซีสำหรับการตรวจวัดไอออนซิลเวอร์(I)และไอออนตะกั่ว(II) โดยการทำอนุพันธ์ของ sym-dibenzo-16-crown-5 ether และใช้พลาสติกไซเซอร์ต่างๆ คือ 2-nitrophenyl-octyl ether (NPOE), tris(2-ethylhexyl) phosphate (TOP), bis(2-ethylhexyl) sebacate (DOS) and dibutyl phthalate (DBP) พบว่า 3-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

butenyl *sym*-dibenzo-16-crown-5 ether เหมาะที่สุดในกาตรวจวัดไอออนของซิลเวอร์ ซึ่งให้ค่าความชัน 55.4 mV/decade และ 2'-methoxyethoxyl *sym*-dibenzo-16-crown-5 ether เหมาะที่สุดในกาตรวจวัดไอออนของซิลเวอร์ ซึ่งให้ค่าความชัน 28.9 mV/decade ใช้ 2-nitrophenyl-octyl ether (NPOE) เป็นพลาสติกไซเซออร์ที่เหมาะสม ทั้งสองไอออนมีช่วงความเข้มข้น  $5.0 \times 10^{-5}$  ถึง  $5.0 \times 10^{-1}$  M  $Pb^{2+}$  และความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เป็น  $1.0 \times 10^{-6}$  M

Abdolkarim A. และ Bahnam K. [28] ศึกษาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนชนิดแผ่นเยื่อพีวีซีสำหรับการตรวจวัดไอออนตะกั่ว(II)โดยใช้ฟีนิลไดซัลไฟด์ (Phenyl disulfide) เป็นไอออนโพรพพบว่าได้ค่าความชันตามสมการของเนินสต์เป็น  $29.3 \pm 0.7$  mV/decade ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่  $2.0 \times 10^{-6}$  ถึง  $1.0 \times 10^{-2}$  M  $Pb^{2+}$  ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้เป็น  $1.2 \times 10^{-6}$  M แผ่นเยื่อที่เตรียมได้มีความเลือกเฉพาะต่อไอออนตะกั่ว(II) สูงซึ่งมีค่าการตอบสนอง 45 วินาทีและสามารถใช้ได้อย่างน้อย 50 วัน สามารถใช้ได้ในช่วงค่าพีเอช 3.5 ถึง 6.3

Saad S.M.H. และคณะ [29] ศึกษาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนชนิดแผ่นเยื่อพีวีซีสำหรับการตรวจวัดไอออนตะกั่ว(II)โดยใช้ อนุพันธ์ของ 2,6-bis-pyridinecarboximide เป็นไอออนโพรพพบว่าได้ค่าความชันตามสมการของเนินสต์เป็น 26.0-33.1 mV/decade ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่  $4.0 \times 10^{-6}$  ถึง  $1.0 \times 10^{-2}$  M  $Pb^{2+}$  ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้เป็น 0.4-3.7  $\mu\text{g/ml}$  และสามารถใช้ได้ดีในช่วงค่าพีเอช 4.5 ถึง 7.0

Gupta V. K. และคณะ [30] ศึกษาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนชนิดแผ่นเยื่อพีวีซีสำหรับการตรวจวัดไอออนตะกั่ว(II)โดยใช้ *N,N'*-dibenzyl-1,4,10,13-tetraoxa-7,16-diazacyclooctadecane เป็นไอออนโพรพพบว่าได้ค่าความชันตามสมการของเนินสต์เป็น เป็น  $30.0 \pm 0.1$  mV/decade ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่  $8.2 \times 10^{-6}$  ถึง  $1.0 \times 10^{-1}$  M  $Pb^{2+}$  ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้เป็น 0.4-3.7  $\mu\text{g/ml}$  และสามารถใช้ได้ดีในช่วงค่าพีเอช 2.0 ถึง 6.8

Mohammad R.Y. และคณะ [31] ศึกษาขั้วไฟฟ้าเลือกเฉพาะไอออนชนิดแผ่นเยื่อพีวีซีสำหรับการตรวจวัดไอออนตะกั่ว (II) โดยใช้ 5,11,17,23-tetra-*tert*-butyl-25,26,27,28-tetrakis-(diphenylphosphino-ylmethoxy)calix[4]arene เป็นไอออนโพรพ ซึ่งอัตราส่วนการผสม คือ พีวีซี 30%, *ortho*-nitrophenyloctylether 57%, sodium tetraphenylborate 4% และไอออนโพรพ 9% พบว่าได้ค่าความชันตามสมการของเนินสต์เป็น  $28.0 \pm 0.2$  mV/decade ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่  $1.0 \times 10^{-5}$  ถึง  $1.0 \times 10^{-2}$  M  $Pb^{2+}$  ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้เป็น  $1.4 \times 10^{-6}$  M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นเยื่อที่เตรียมได้มีความเลือกเฉพาะต่อไอออนตะกั่ว(II)สูงซึ่งมีค่าการตอบสนอง 17 วินาทีและสามารถใช้ได้อย่างน้อย 50 วัน สามารถใช้ได้ในช่วงค่าพีเอช 3.5 ถึง 5.0 การศึกษาไอออนรบกวนมี  $\text{Th}^{4+}$ ,  $\text{La}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Y}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$  และ  $\text{K}^+$

Tolga B. และคณะ [32] ศึกษาการวิเคราะห์ไอออนตะกั่ว(II)ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแบคทีเรียด้วยเทคนิค Biosorption โดยใช้ *Rhizopus arrhizus* รายละเอียดการศึกษานำไปสู่การกำจัดไอออนตะกั่ว(II) ซึ่งเป็นพิษมากเมื่อเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณน้อย ๆ ความเข้มข้นเฉลี่ยของปริมาณไอออนตะกั่ว(II) ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแบคทีเรียที่พบมี 3.0 mg/L และเป้าหมายค่าที่ลดลงต้องต่ำกว่า 0.5 mg/L สภาวะที่เหมาะสม คือ พีเอช 4.5, อุณหภูมิ 30°C และความเข้มข้นมวลชีวภาพ 1.0 g/L ปริมาณมากที่สุดที่ Biosorption ดูดซับได้ คือ 2.643 mg ของไอออนตะกั่ว(II)

Ghaedi M. และคณะ [33] ศึกษาการวิเคราะห์ไอออนตะกั่ว(II)ในตัวอย่างน้ำด้วยเทคนิค Solid phase extraction โดยใช้อะลูมินา-โซเดียม ไดเดซิล ซัลเฟต (alumina-sodium dodecyl sulfate) โค้ดบิน 4-(4-methoxybenzylideneimine) thiophenole เพื่อเตรียมความเข้มข้นก่อนแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย Flame atomic absorption spectrometry พบว่ามีช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 0.05 ถึง 1.2 µg/mL ระดับความเข้มข้นต่ำสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ คือ 1.6 ng/mL และ 0.9 % ตามลำดับ



## บทที่ 3

### การดำเนินงานโครงการพิเศษ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อเตรียมหน้าข้าวสกรีนพรีน-อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับตรวจวัดตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสีย ซึ่งผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยดังนี้

- 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี
- 3.2 การสร้างสกรีน-พรีนทีอิเล็กทรอนิกส์
- 3.3 การเตรียมหน้าข้าวสกรีน-พรีนทีอิเล็กทรอนิกส์
- 3.4 การทดสอบประสิทธิภาพสกรีน-พรีนทีอิเล็กทรอนิกส์
- 3.5 วิธีการทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องวัดพีเอช 645 (pH Meter)
2. เครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะที่มีระบบปฏิบัติการวินโดวส์เอกซ์พี (© Microsoft Corporation)
3. เครื่องทำน้ำปราศจากไอออน รุ่น Mill-Q (Milford, MA, USA)
4. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด (Denver Instrument Company)
5. ไมโครปีเปต
6. ผ้าสกรีน 140T
7. แผ่นพีวีซีที่ขั้วสเตรท
8. กาวซิลิโคน
9. เฟรมสกรีนอะลูมิเนียม 16×20 นิ้ว (ขอบใน)
10. โถดูดความชื้น
11. ตู้อบ
12. กระดาษกรอง
13. ไมโครปีเปต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 สารเคมี

1. 1-Aza-18-crown-6 (A18C6) (GC grade) บริษัท Fluka (Buchs, Switzerland)
2. 1,10-Diaza-18-crown-6 (DA18C6) (GC grade) บริษัท Fluka (Buchs, Switzerland)
3. Dioctyl Phthalate (DOP)
4. หมึกคาร์บอน (Acheson, USA)
5. หมึกซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Acheson, USA)
6. หมึกซิลเวอร์ (Acheson, USA)
7. สีนํ้ามัน (Chaiyabon Brather, Thailand)
8. สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium Chloride, KCl)
9. สารละลายโพแทสเซียมไดซัลเฟต (Potassium disulphate,  $K_2SO_4$ )
10. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl)
11. สารละลายโซเดียมไดซัลเฟต (Sodium disulphate,  $Na_2SO_4$ )
12. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)
13. ผงพีวีซี (Poly(vinylchloride), PVC)
14. สารละลายเตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran, THF)
15. เลด(II)ไนเตรท (Lead(II) nitrate,  $Pb(NO_3)_2$ )
16. คอปเปอร์(II)ไนเตรท (Copper(II) nitrate,  $Cu(NO_3)_2$ )
17. ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate,  $AgNO_3$ )
18. ปรอท(II)ไนเตรท (Mercury(II) nitrate,  $Hg(NO_3)_2$ )
19. แคดเมียมไนเตรท (Cadmium(II) nitrate,  $Cd(NO_3)_2$ )
20. ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride,  $ZnCl_2$ )

## 3.2 การสร้างสกรีน-พริ้นท์อิเล็กทรอนิกส์

### 3.2.1 การเตรียมแผ่นพีวีซี

นำแผ่นพีวีซีความหนา 0.4 มิลลิเมตรที่เตรียมมาตัดให้ได้ขนาด กว้าง 18 เซนติเมตรและ ยาว 48 เซนติเมตร

### 3.2.2 การสร้างข้อไฟฟ้าสกรีน-พริ้นท์

3.2.2.1 ออกแบบลายสกรีน ซึ่งเป็นการกำหนดขนาด ตำแหน่ง และรูปร่างของข้อไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม Corel Draw Version 12 และโปรแกรม Adobe Illustrator Creative Suit 2 ซึ่งลายสกรีนจะประกอบไปด้วยชั้นทั้งหมด 4 ชั้น เรียงลำดับจากชั้นล่างสุด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) ลายแถบการนำไฟฟ้า (Conducting track)
- 2) ลายขั้วไฟฟ้าใช้งาน และจุดตรวจวัด
- 3) ลายขั้วไฟฟ้าอ้างอิง
- 4) ลายฉนวนไฟฟ้า (Insulator)

แบบลายสกรีนทั้ง 4 แบบที่ใช้ศึกษาในการวิจัยครั้งนี้แสดงดังรูปที่ 3.1

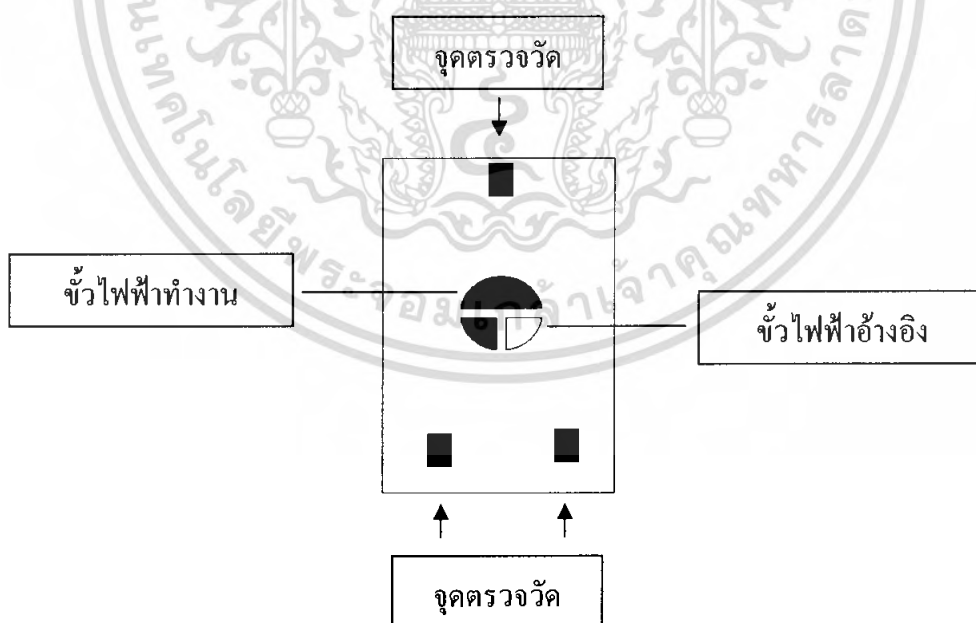
3.2.2.2 นำแบบที่ได้ไปเตรียมเฟรมสกรีนโดยพิมพ์แม่พิมพ์ด้วยวิธีกาวอัด จากนั้นซึ่งผ้าสกรีนที่พิมพ์แม่พิมพ์แล้วลงบนกรอบอะลูมิเนียม

3.2.2.3 ทำการสกรีนลายแถบการนำไฟฟ้าด้วยหมึกซิลเวอร์บนแผ่นพีวีซี นำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อระเหยตัวทำละลายที่อยู่ในหมึกซิลเวอร์

3.2.2.4 ทำการสกรีนลายขั้วไฟฟ้าใช้งาน และจุดตรวจวัดด้วยหมึกคาร์บอน นำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อระเหยตัวทำละลายที่อยู่ในหมึกคาร์บอน

3.2.2.5 ทำการสกรีนลายขั้วไฟฟ้าอ้างอิงด้วยหมึกซิลเวอร์/ซิลเวอร์คัลโรด์ นำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อระเหยตัวทำละลายที่อยู่ในหมึกซิลเวอร์/ซิลเวอร์คัลโรด์

3.2.2.6 ทำการสกรีนลายแถบฉนวนไฟฟ้าด้วยสีน้ำมันบนแผ่นพีวีซี นำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อระเหยตัวทำละลายที่อยู่ในสีน้ำมัน



รูปที่ 3.1 แสดงสกรีน-พรีนที่อิเล็กทรอนิกส์ที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การเตรียมหน้าขั้วสกรีน-พรีนทีอเล็กโทรด

ทำการเตรียมสารเพื่อเตรียมหน้าขั้วสกรีน-พรีนทีอเล็กโทรดตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารที่ใช้ในการเตรียมหน้าขั้วสกรีน-พรีนทีอเล็กโทรด

No	PVC, mg	DOP, mg	A18C6, mg	DA18C6, mg	THF, ml
1	113	271	30	-	1.5
2	113	271	-	30	1.5

จากนั้นนำสารที่เตรียมได้ไปหยดลงบนหน้าขั้วสกรีน-พรีนทีอเล็กโทรดตรงขั้วไฟฟ้าทำงาน ด้วยเข็มฉีดยา แล้วทิ้งไว้ให้สารแห้งติดหน้าขั้ว

### 3.4 การทดสอบประสิทธิภาพสกรีน-พรีนทีอเล็กโทรด

3.4.1 ต่อสกรีน-พรีนทีอเล็กโทรดที่เตรียมได้เข้ากับตำแหน่งขั้วไฟฟ้าของเครื่องตรวจวัดเพื่อทำการทดสอบ

3.4.2 ปิเปตสารละลาย  $1.0 \times 10^{-1}$  M  $Pb^{2+}$  มาตรวจวัดด้วยเทคนิคโพเทนชิอเมตรี บันทึกลับที่ศักย์ไฟฟ้าที่ได้

3.4.3 เก็บชิ้นงานที่มีประสิทธิภาพไว้ จากนั้นทดสอบแผ่นสกรีน-พรีนทีอเล็กโทรดที่ขึ้นต่อไปตามขั้นตอนที่ 1 และ 2

### 3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การหาสภาวะทางเคมีไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ตะกั่ว

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดตะกั่ว ด้วยเทคนิคโพเทนชิอเมตรี โดยใช้สกรีน-พรีนทีอเล็กโทรดเป็นขั้วไฟฟ้า

3.5.1.1 ชนิดของอิเล็กโทรไลต์

1) ปิเปตสารละลาย  $1.0 \times 10^{-2}$  M  $Pb^{2+}$  มา 1 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เพื่อเตรียมเป็นสารละลาย  $1.0 \times 10^{-3}$  M  $Pb^{2+}$

2) ปิเปตสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 M KCl ลง 1 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยสารละลายฟิเชอ์ที่เหมาะสมจากข้อ 3.5.1.1

3) ปิเปตสารละลายที่ได้มาหยดลงบนแผ่นสกรีน-พรีนทีอเล็กโทรด บันทึกลับที่ศักย์ไฟฟ้าที่ได้ และทำซ้ำ 3 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1)-3) แต่เปลี่ยนจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 M KCl เป็น NaCl,  $K_2SO_4$ ,  $Na_2SO_4$  และ NaOH ตามลำดับ

5) นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อหาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม

### 3.5.1.2 ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์

1) ปิเปตสารละลาย  $1.0 \times 10^{-2}$  M  $Pb^{2+}$  มา 1 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เพื่อเตรียมเป็นสารละลาย  $1.0 \times 10^{-3}$  M  $Pb^{2+}$

2) ปิเปตสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมจากข้อ 3.5.1.2 ลง 1 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยสารละลายพีเอชที่เหมาะสมจากข้อ 3.5.1.1

3) ปิเปตสารละลายที่ได้มาหยดลงบนแผ่นสกรีน-พรีนทีอิเล็กโทรด บันทึกศักย์ไฟฟ้าที่ได้ และทำซ้ำ 3 ครั้ง

4) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1)-3) แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมจากข้อ 3.5.1.2 จาก 0.1 M เป็น 0.01, 0.05, 0.5 และ 1 M ตามลำดับ

5) นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม

### 3.5.1.3 ผลของค่าพีเอช

1) ปิเปตสารละลาย  $1.0 \times 10^{-2}$  M  $Pb^{2+}$  มา 1 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เพื่อเตรียมเป็นสารละลาย  $1.0 \times 10^{-3}$  M  $Pb^{2+}$

2) ปรับปริมาตรด้วยสารละลายพีเอช 3 (ดูวิธีเตรียมสารละลาย pH ที่ภาคผนวก ก.) จนถึงขีดบอกปริมาตร

3) ปิเปตสารละลายที่ได้มาหยดลงบนแผ่นสกรีน-พรีนทีอิเล็กโทรด บันทึกศักย์ไฟฟ้าที่ได้ และทำซ้ำ 3 ครั้ง

4) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1)-3) แต่เปลี่ยนจากสารละลาย  $Pb^{2+}$  ที่ปรับด้วยสารละลายพีเอช 3 เป็นสารละลาย  $Pb^{2+}$  ที่ปรับด้วยสารละลายพีเอช 4-9

5) นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าพีเอช เพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

### 3.5.2 การศึกษาสมบัติของขั้ว

#### 3.5.2.1 การศึกษาช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงของความเข้มข้นในการวิเคราะห์ (Linear Range)

เลือกใช้ค่าพีเอช สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม จากข้อ 3.5.1.1-3.5.1.3 เพื่อทำการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้นตั้งแต่  $1.0 \times 10^{-7}$  -  $1.0 \times 10^{-1}$  M ตามลำดับ โดยปิเปตสารละลายมาหยดลงบนแผ่นสกรีน-พรีนทีอิเล็กโทรด บันทึกศักย์ไฟฟ้าที่ได้ และทำซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลาย  $Pb^{2+}$  แล้วจึงเลือกช่วงที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงของการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  จากกราฟมาตรฐานเป็น Linear Range ของขั้วไฟฟ้า

#### 3.5.2.2 สภาพไวของขั้ว (Sensitivity)

การศึกษาสภาพไวในการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้าทำได้โดยหาความชันของกราฟการตอบสนองเชิงเส้นที่ได้จากการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  ในข้อ 3.5.2.1 ความชันที่ได้จากการตอบสนองเชิงเส้นจะเป็นสภาพไวของไฟฟ้า (ความชันได้จากสัมประสิทธิ์นำหน้าค่าความเข้มข้นในสมการที่ได้จากการพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นกับศักย์ไฟฟ้าจากโปรแกรม Microsoft Excel)

#### 3.5.2.3 เวลาการตอบสนอง (Response time)

การศึกษาสภาพไวในการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้าทำได้โดยทำการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M แล้วบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าทุก ๆ 10 วินาที จนกระทั่งค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่หรือศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่สมดุล จากนั้นพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา ซึ่งค่าเวลาการตอบสนองหาได้จากจุดที่กราฟเริ่มคงที่

#### 3.5.2.4 ขีดจำกัดความเข้มข้นในการวิเคราะห์ (Detection Limit)

การศึกษาขีดจำกัดความเข้มข้นในการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้าทำได้โดยหาจุดตัดของกราฟการตอบสนองเชิงเส้นที่ได้จากการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  ในข้อ 3.5.2.1 ระหว่างเส้นสัมผัสของความชันของกราฟและเส้นสัมผัสในแกนนอนที่ขนานกับแกน X

#### 3.5.2.5 การศึกษาความเที่ยง (Precision)

การศึกษาคความเที่ยงในการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้าทำได้โดยปิเปตสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M มาหยดลงบนแผ่นสกรีน-พรีนทีอิเล็กโทรด บันทึกศักย์ไฟฟ้าที่ได้ และทำซ้ำ 30 ครั้ง จากนั้นคำนวณหา %RSD (Percent of Relative Standard Deviation) ของขั้วไฟฟ้า จากสมการ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\% RSD = (SD / \bar{X}) \times 100 \quad (3.1)$$

โดย SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดทั้ง 30 ครั้ง  
 $\bar{X}$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดทั้งหมด 30 ครั้ง

### 3.5.2.6 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า (Life time)

การศึกษาอายุการใช้งานในการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้าทำได้โดยเปิดสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M มาหยดลงบนแผ่นสกรีน-พรีนทีอิลิกโทโรด บนที่กักศักย์ไฟฟ้าที่ได้ และทำการทดลองซ้ำโดยล้างด้วยน้ำกลั่นหลังการใช้อย่างเดียว บนที่กักศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจนกระทั่ง ค่าความชันตามสมการเนินสต์ที่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากค่าความชันตามสมการเนินสต์จากการตรวจวัดครั้งแรก

### 3.5.2.7 การศึกษาผลของการรบกวนจากไอออนอื่น

การศึกษาไอออนรบกวนที่มีผลต่อการวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลาย  $Pb^{2+}$  จะศึกษาโดยวิธีสร้างกราฟโดยทำให้แอคติวิตีของไอออนรบกวนคงที่ (Graphical method of fixed interfering ion activity) ในที่ทำการทดลองนี้จะใช้ไอออนของ  $Ag^+$ ,  $Hg^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  โดยให้ไอออนรบกวนความเข้มข้นคงที่ที่  $1.0 \times 10^{-3}$  M และปรับความเข้มข้นของสารละลาย  $Pb^{2+}$  ตั้งแต่  $1.0 \times 10^{-7}$  ถึง  $1.0 \times 10^{-1}$  M

### 3.5.2.8 การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเทคนิคโพเทนชิอเมตรี

ตรวจวัดตะกั่วในน้ำเสียตัวอย่าง โดยใช้สกรีน-พรีนทีอิลิกโทโรดและเลือกใช้ค่าพีเอช สารละลายอิเล็กโทโรไลต์ และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทโรไลต์ที่เหมาะสมจากข้อ 3.5.1.1-

3.5.1.3 สำหรับรายละเอียดในการวิเคราะห์น้ำเสียตัวอย่าง มีดังนี้

#### การเก็บน้ำเสียตัวอย่าง

- 1) ล้างขวดพลาสติกที่ทนกรดด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปตากแห้ง
- 2) ล้างขวดพลาสติกที่ทนกรดต่อด้วยกรดไนตริก 20 เปอร์เซ็นต์
- 3) เติมกรดไนตริก:น้ำ ในอัตราส่วน 1:1 ลงขวดพลาสติกทนกรด 5 มิลลิลิตร ต่อน้ำเสียตัวอย่าง ปริมาณ 1 ลิตร
- 4) ปิดฝาขวดให้แน่นสนิท เก็บขวดไว้ที่อุณหภูมิ  $4^{\circ}C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การตรวจวัดตะกั่วในน้ำเสียตัวอย่าง

- 1) ต่อสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดเข้ากับตำแหน่งขั้วไฟฟ้าของเครื่องตรวจวัดศักย์ไฟฟ้าเพื่อทำการตรวจวัด
- 2) ปิดตัวอย่างน้ำเสียมาหยดลงบนแผ่นสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรด บันทึกศักย์ไฟฟ้าที่ได้
- 3) นำค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟการตอบสนองเชิงเส้นที่ได้จากการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  ในข้อ 3.5.2.1 เพื่อหาปริมาณตะกั่วในน้ำเสียตัวอย่าง

### 3.5.2.9 การเปรียบเทียบระหว่างสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรด (SPE) กับอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมทรี (AAS)

ศึกษาการเปรียบเทียบของการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในน้ำเสียตัวอย่างระหว่างสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรด (SPE) กับอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมทรี (AAS)





## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และอภิปรายผล

#### 4.1 การเตรียมสกรีน-พรีนซ์อิเล็กโทรด

##### 4.1.1 คุณภาพสกรีน-พรีนซ์อิเล็กโทรด

##### 4.1.1.1 ลักษณะของสกรีน-พรีนซ์อิเล็กโทรด

สกรีน-พรีนซ์อิเล็กโทรดได้จากการเตรียมด้วยการสกรีน-พรีนซ์ที่สภาวะ ดังนี้

ความดัน 1 บรรยากาศ

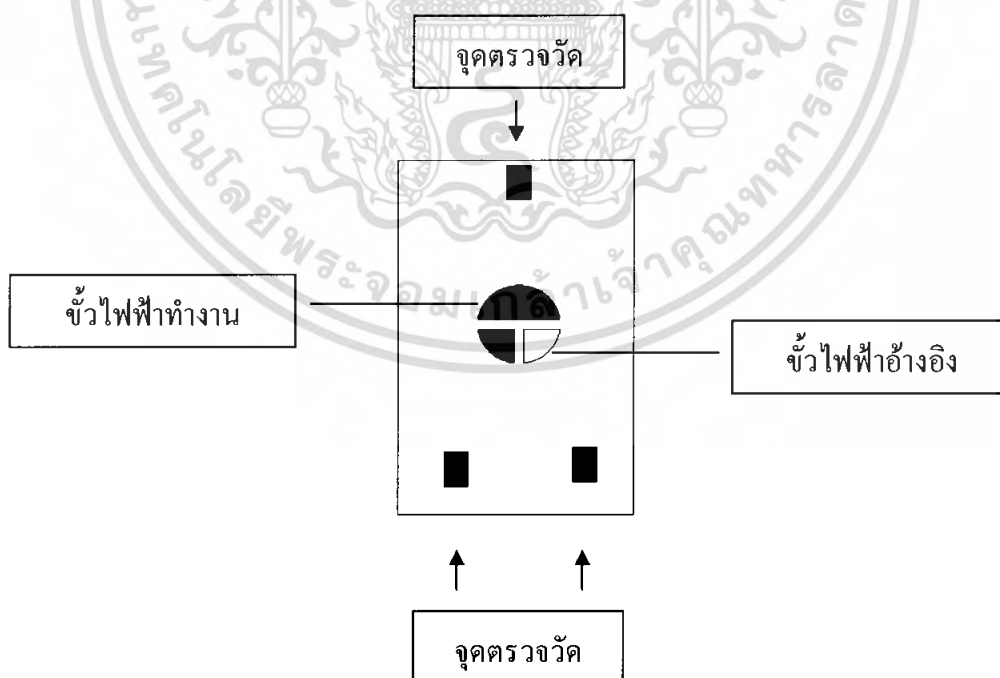
อุณหภูมิในการเตรียม 25 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิในการอบ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการเตรียมสกรีน-พรีนซ์อิเล็กโทรด 4 ชั่วโมง

##### 4.1.1.2 การประกอบสกรีน-พรีนซ์อิเล็กโทรด

รูปสกรีน-พรีนซ์อิเล็กโทรดที่ได้หลังการเตรียม แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะสกรีน-พรีนซ์อิเล็กโทรดที่ได้หลังจากการเตรียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของสกรีน-พรีนทีอเล็กโทรดที่เตรียมได้มีความยาว 3 เซนติเมตร กว้าง 2 เซนติเมตร หนา 0.4 เซนติเมตร แต่ละแผ่นพีวีซีสามารถเตรียมชิ้นงานได้ 9 แผ่น แผ่นพีวีซีที่ใช้ทั้งหมด 20 แผ่น ดังนั้น จะเตรียมสกรีน-พรีนทีอเล็กโทรดได้ทั้งหมด 180 ชิ้น

## 4.2 การเตรียมหน้าขั้วสกรีน-พรีนทีอเล็กโทรด

ทำการเตรียมสารเพื่อเตรียมหน้าขั้วสกรีน-พรีนทีอเล็กโทรดตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณสารที่ใช้ในการเตรียมหน้าขั้วสกรีน-พรีนทีอเล็กโทรด

No	PVC, mg	DOP, mg	A18C6, mg	DA18C6, mg	THF, ml
1	113	271	16	-	1.5
2	113	271	-	16	1.5

จากนั้นนำสารที่เตรียมได้ไปหยดลงบนหน้าขั้วสกรีน-พรีนทีอเล็กโทรดตรงขั้วไฟฟ้าทำงานด้วย เข็มฉีดยา แล้วทิ้งไว้ให้สารแห้งติดหน้าขั้ว

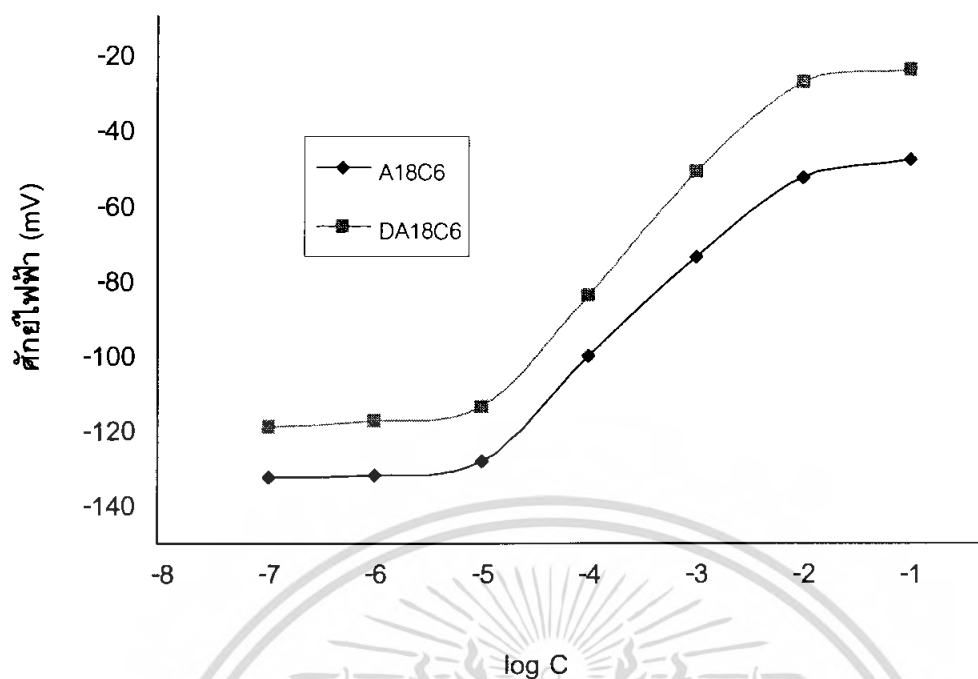
## 4.3 ผลของการศึกษาชนิดของไอออโนฟอร์

ทำการศึกษาผลของชนิดไอออโนฟอร์ระหว่าง 1-Aza-18-crown-6 (A18C6) และ 1,10-Diaza-18-crown-6 (DA18C6) โดยหยดสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้นตั้งแต่  $1.0 \times 10^{-7}$  –  $1.0 \times 10^{-1}$  M  $Pb^{2+}$  เพื่อวัดศักย์ไฟฟ้าแล้วนำไปหาการตอบสนองตามความสัมพันธ์ของสมการเนินสต์ และเวลาการตอบสนองแสดง ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความชันและเวลาการตอบสนองของชนิดไอออโนฟอร์

ชนิดไอออโนฟอร์	ค่าความชัน, mV/decade	เวลาการตอบสนอง, วินาที
A18C6	25.34	110
DA18C6	29.14	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log ความเข้มข้นกับค่าศักย์ไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบชนิดของไอออนโฟอร์ระหว่าง A18C6 กับ DA18C6

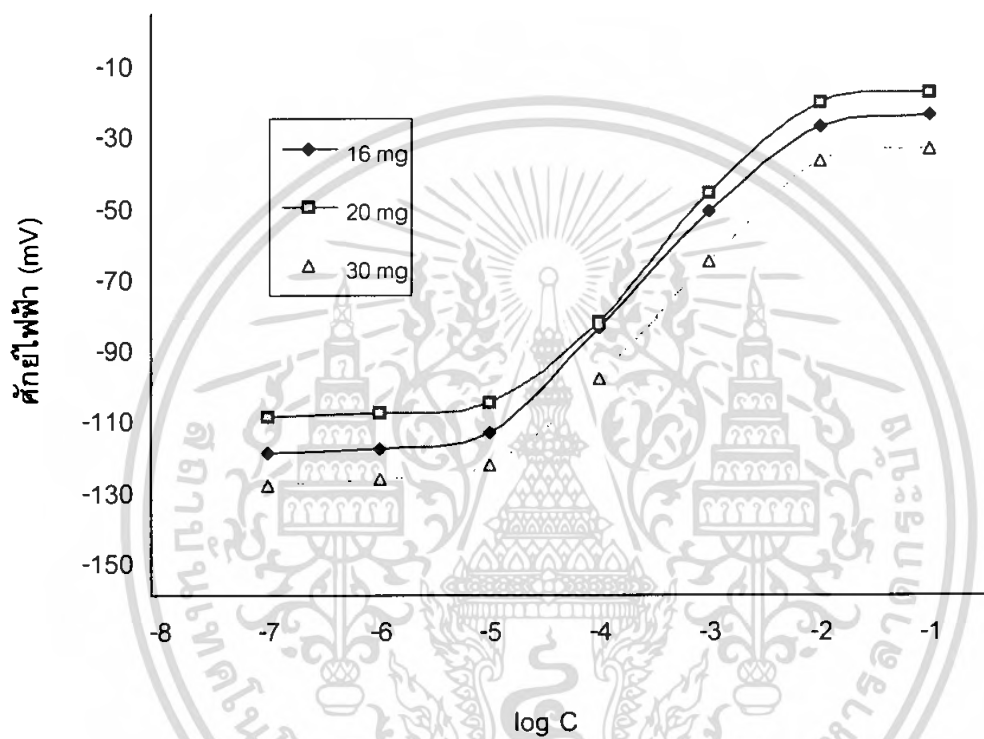
จากผลการทดลองพบว่าสารที่มีองค์ประกอบของ 1,10-Diaza-18-crown-6 มีสมบัติที่ดีในการตรวจวัดไอออนตะกั่ว (โครงสร้างของไอออนโฟอร์ทั้งสองตัวดูในภาคผนวก ข.) เนื่องจากมีสมบัติการตอบสนองใกล้เคียงสมการของเนินสต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 29.57 mV/decade มากกว่า 1-Aza-18-crown-6 และจากโครงสร้างของไอออนโฟอร์ การจับกันของหมู่ไนโตรเจนสองหมู่ที่อยู่ตรงข้ามกันจะเสถียรมั่นคงมากกว่าการจับกันของหมู่ไนโตรเจนกับออกซิเจน ทำให้ 1,10-Diaza-18-crown-6 สามารถจับกับไอออนของโลหะหนักได้แน่นกว่า 1-Aza-18-crown-6 ดังนั้น จึงเลือก 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนโฟอร์เพื่อทำการศึกษสมบัติอื่นต่อไป

#### 4.4 ผลของการศึกษาปริมาณไอออนโฟอร์ที่มีต่อความชันตามสมการเนินสต์

การศึกษาผลของปริมาณไอออนโฟอร์ของ 1,10-Diaza-18-crown-6 ที่มีต่อความชันของกราฟมาตรฐาน โดยเพิ่มปริมาณของ 1,10-Diaza-18-crown-6 ตามตารางที่ 4.3 และค่าความชันตามสมการของเนินสต์หาได้จากกราฟในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงอัตราส่วนขององค์ประกอบเยื่อ

No	PVC, mg	DOP, mg	DA18C6, mg	THF, ml
1	113	271	16	1.5
2	113	271	20	1.5
3	113	271	30	1.5



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log ความเข้มข้นกับค่าศักย์ไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบปริมาณไอออนฟอรัของ 1,10-Diaza-18-crown-6 ในองค์ประกอบเยื่อ

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณของ 1,10-Diaza-18-crown-6 ต่างกันคือ 16, 20 และ 30 mg จะให้ค่าความชันของกราฟเท่ากับ 29.14, 29.04, 28.97 mV/decade ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณของไอออนฟอรัไม่มีผลต่อความชันในช่วงความเข้มข้นดังกล่าว

#### 4.5 ชนิดอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม

จากการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 0.1 M ด้วยสกรีน-พรีนทีอิเล็กโทรด โดยใช้ 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนฟอว์ และค่าพีเอชเป็น 5 จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดสารละลายตะกั่วในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M ด้วยเทคนิคโพเทนชิอเมทรีและสกรีน-พรีนทีอิเล็กโทรด

ชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์	ค่าศักย์ไฟฟ้า (mV)			เฉลี่ย (mV)
	1	2	3	
0.1 M KCl	-50.8	-51.0	-50.9	-50.9
0.1 M NaCl	-61.5	-61.1	-61.2	-61.3
0.1 M $K_2SO_4$	-59.6	-59.5	-59.9	-59.7
0.1 M $Na_2SO_4$	-64.0	-63.7	-63.6	-63.8
0.1 M NaOH	-72.5	-72.9	-72.4	-72.6

จากการศึกษาหาชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  โดยใช้สกรีน-พรีนทีอิเล็กโทรด พบว่า เมื่อใช้สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงที่สุด ดังนั้น จึงเลือกใช้สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์สำหรับการตรวจวัดตะกั่วต่อไป

#### 4.6 ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม

จากการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  โมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 โมลาร์ ด้วยสกรีน-พรีนทีอิเล็กโทรด โดยใช้ 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนฟอว์ และค่าพีเอชเป็น 5 จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.5

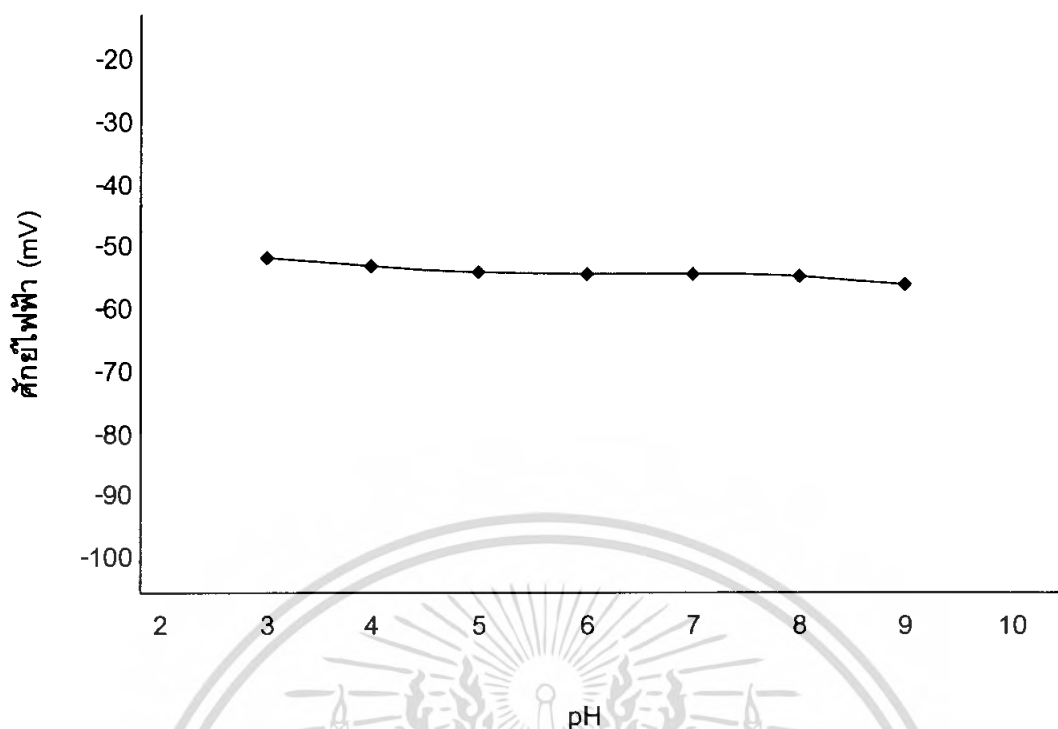
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดสารละลายตะกั่วในสารละลาย KCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเทคนิคโพเทนชิอเมทรีและสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรด

ความเข้มข้นสารละลาย KCl	ค่าศักย์ไฟฟ้า (mV)			เฉลี่ย (mV)
	1	2	3	
1.0 M	-41.9	-41.7	-41.8	-41.8
0.5 M	-47.3	-47.1	-47.1	-47.2
0.1 M	-50.9	-50.5	-50.4	-50.6
0.05 M	-52.6	-52.3	-52.2	-52.4
0.01 M	-58.8	-58.5	-58.7	-58.7

จากการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  โดยใช้สกรีน-พรีนทีอิลิกโทรด พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น จึงเลือกใช้สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 1.0 M เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์สำหรับการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  ต่อไป

#### 4.7 พีเอช (pH) ที่เหมาะสม

จากการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M ในช่วงค่าพีเอช ตั้งแต่ pH 3-9 ด้วยสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรด โดยใช้ 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนฟอว์ จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.4



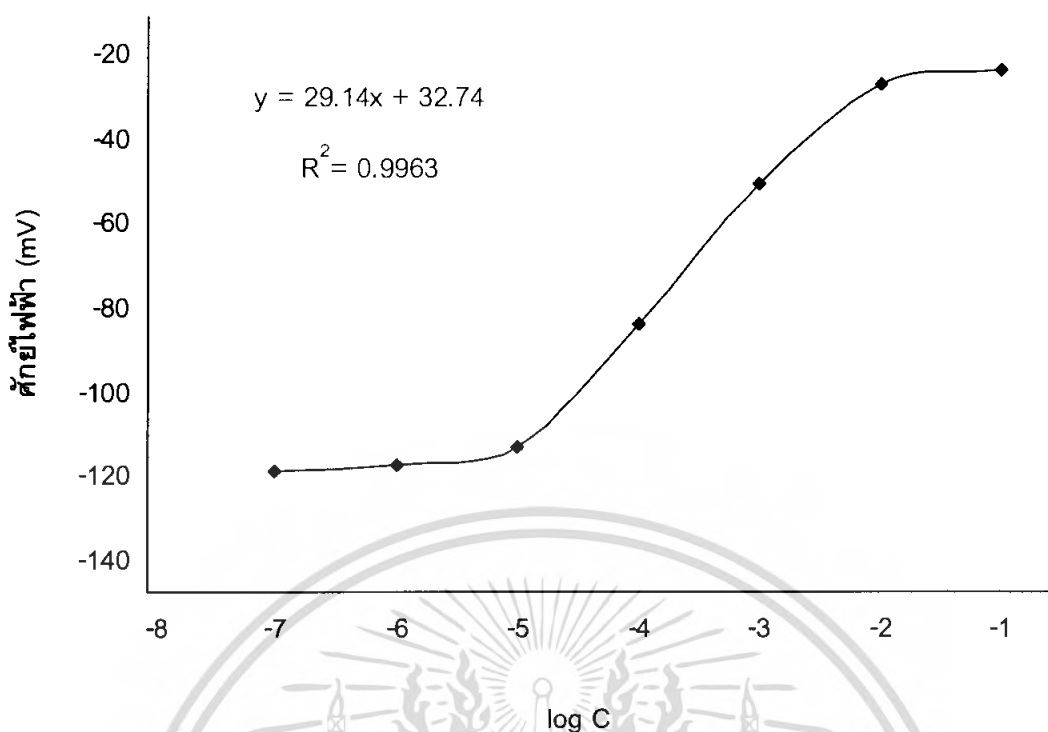
รูปที่ 4.4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดตะกั่วจากการใช้ 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนฟอว์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KCl ความเข้มข้น 1.0 M ที่ pH ต่าง ๆ

จากการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M โดยใช้สกรีน-พรีนทีอเล็กโทรด พบว่า ค่าพีเอชคงที่อยูระหว่าง 4-7 สรุปได้ว่าช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 4-7 และในการศึกษาต่อไปเราจะเลือกค่าพีเอชเป็น 5 เนื่องจากเป็นค่าพีเอชที่เป็นกรดอ่อน ๆ เหมาะกับตะกั่ว ซึ่งถ้าเป็นกรดมากจะทำให้ตะกั่วเกิดการแตกตัวเยอะเกินไปทำให้ตะกั่วสามารถจับกับไอออนฟอว์ได้น้อยลง และถ้าเป็นเบสจะทำให้ไอออนของตะกั่วเกิดการตกตะกอนไม่สามารถละลายได้

#### 4.8 การศึกษาช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงของความเข้มข้นในการวิเคราะห์ (Linear Range)

การศึกษาช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงของการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  โดยใช้สกรีน-พรีนทีอเล็กโทรด ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่ความเข้มข้น 1.0 M โดยใช้ 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนฟอว์ และค่าพีเอชเป็น 5 จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้



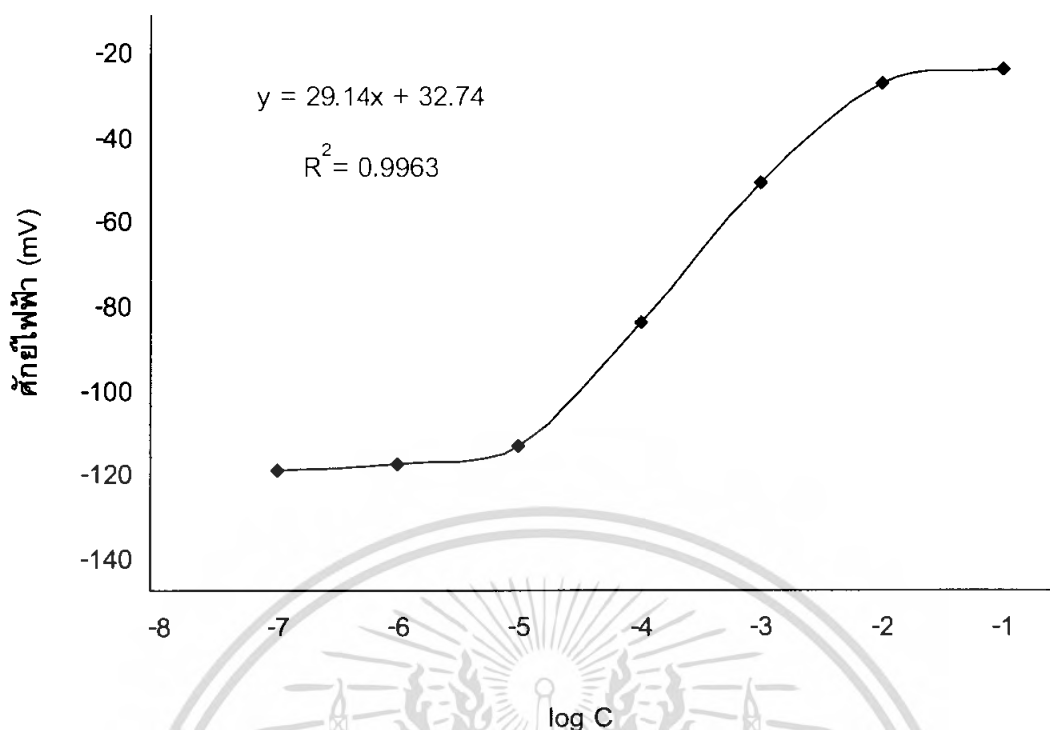
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log ความเข้มข้นกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ความเข้มข้นตั้งแต่  $1.0 \times 10^{-7}$  -  $1.0 \times 10^{-1}$  M ในการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  โดยใช้ 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนโพร

จากการศึกษาช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงของการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  โดยใช้สกรีน-พรีนทีอิลิกโทรด พบว่า ช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงของการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  อยู่ระหว่าง  $1.0 \times 10^{-5}$  -  $1.0 \times 10^{-2}$  M

#### 4.9 สภาพไวของขั้ว (Sensitivity)

การศึกษาสภาพไวในการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้าทำได้โดยหาความชันของกราฟการตอบสนองเชิงเส้นที่ได้จากการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  ในข้อ 3.5.2.1 ความชันที่ได้จากการตอบสนองเชิงเส้นจะเป็นสภาพไวของไฟฟ้า (ความชันได้จากสัมประสิทธิ์นำหน้าค่าความเข้มข้นในสมการที่ได้จากการพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นกับศักย์ไฟฟ้าจากโปรแกรม Microsoft Excel) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 29.14 mV/decade ดังแสดงในรูปที่ 4.6

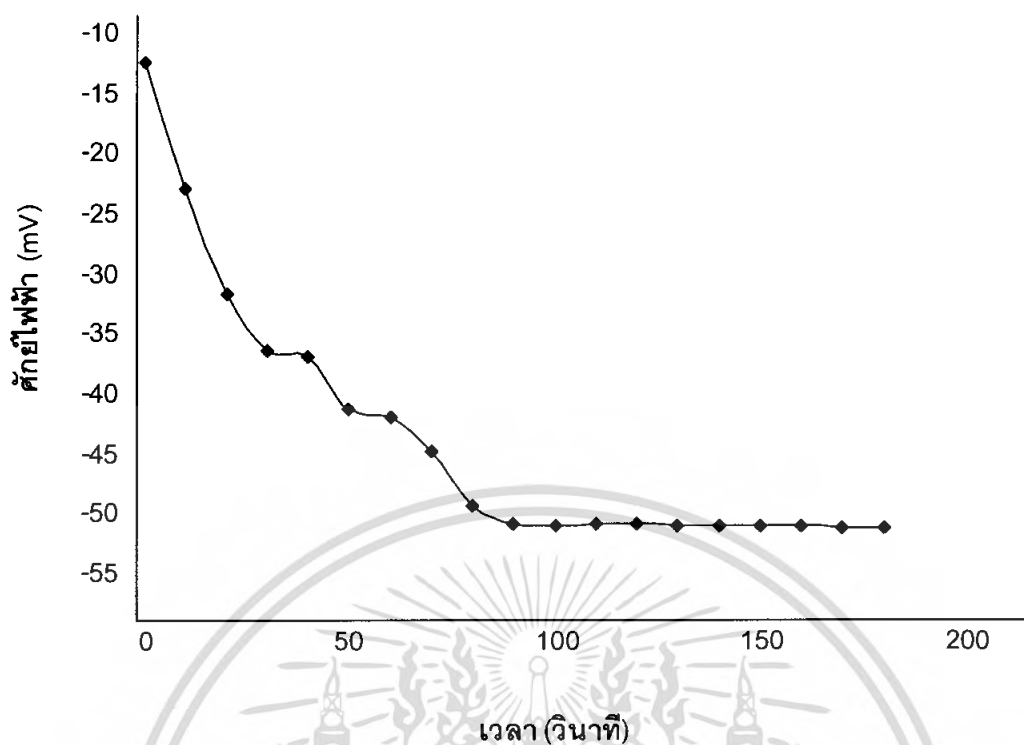




รูปที่ 4.6 แสดงค่าความชันของกราฟที่ได้จากการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานตะกั่ว

#### 4.10 เวลาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้า

การศึกษาเวลาการตอบสนองในการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้าทำได้โดยทำการตรวจวัดสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M โดยใช้สกรีน-พรีนทีอีเล็กโทรด ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่ความเข้มข้น 1.0 M โดยใช้ 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์ และค่าพีเอชเป็น 5 แล้วบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าทุก ๆ 10 วินาที จนกระทั่งค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่หรือศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่สมดุล จากนั้นพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา ซึ่งค่าเวลาการตอบสนองหาได้จากจุดที่กราฟเริ่มคงที่ กราฟที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7

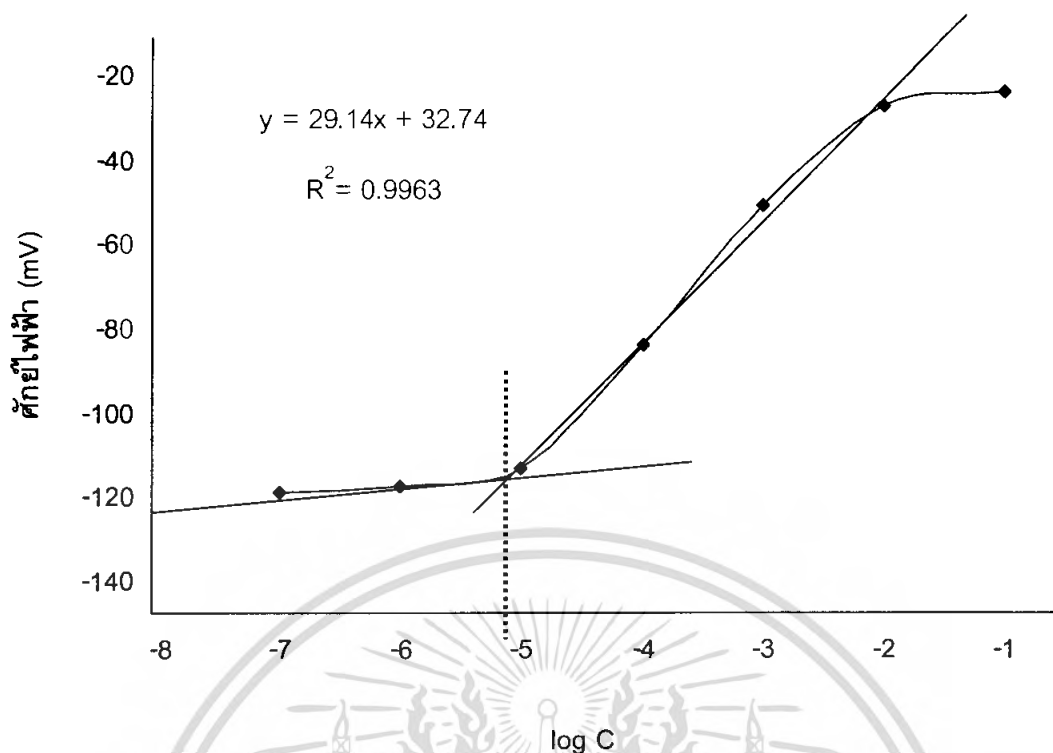


รูปที่ 4.7 แสดงเวลาการตอบสนองของตัวไฟฟาสกรีน-ฟลูออโรโปรตีนในการตรวจวัดตะกั่วที่ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M โดยใช้ 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์

การศึกษาพบว่า เมื่อถึงเวลาที่ 90 วินาที ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ดังนั้น เวลาการตอบสนองของตัวไฟฟ้าจึงอยู่ที่ 90 วินาที

#### 4.11 ขีดจำกัดความเข้มข้นในการวิเคราะห์

ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายที่สามารถตรวจวัดได้ แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งวิธีการหาในทางปฏิบัติทำได้โดยการหาจุดตัดระหว่างเส้นสัมผัสของความชันของกราฟและเส้นสัมผัสในแกนนอนที่ขนานกับแกน X ซึ่งศักย์ไฟฟ้าไม่ขึ้นกับแอกติวิตีของไอออน แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงขีดจำกัดความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจวัดตะกั่วด้วยขั้วสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรดโดยใช้ 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนโนเฟอร์

จากการหาขีดจำกัดต่ำสุดของความเข้มข้นในการวิเคราะห์ พบว่า ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ นี้มีความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-5}$  M หรือ 2.272 ppm

#### 4.12 การศึกษาความเที่ยง

การศึกษาความเที่ยงในการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้าทำได้โดยปิเปตสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M มาหยดลงบนแผ่นสกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรด บันทึกศักย์ไฟฟ้าที่ได้ และทำซ้ำ 30 ครั้งจากนั้นคำนวณหา %RSD (Percent of Relative Standard Deviation )

$$\text{จากสมการ} \quad \% RSD = (SD / \bar{X}) \times 100 \quad (4.1)$$

โดย SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดทั้ง 30 ครั้ง

$\bar{X}$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดทั้งหมด 30 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองการตรวจวัดซ้ำทั้งหมด 30 ครั้ง ได้ค่า SD เป็น 0.2330 และ  $\bar{X}$  เป็น 51.39 เมื่อคำนวณตามสมการ (4.1) จะได้ค่า %RSD เป็น 0.45

#### 4.13 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า

การหาอายุการใช้งานของสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่เตรียม จะดูจากความชันของกราฟมาตรฐาน โดยศึกษาในระยะเวลา 4 สัปดาห์ ข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.6

**ตารางที่ 4.6** แสดงการเปรียบเทียบค่าความชันจากการวัดศักย์ไฟฟ้าทั้งหมด 4 สัปดาห์ เพื่อหาอายุการใช้งานของขั้วสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรด

สัปดาห์	ค่าความชัน, mV/decade
1	29.14
2	29.12
3	29.03
4	27.41

จากการศึกษา พบว่าตั้งแต่สัปดาห์ที่ 4 เป็นต้นไปค่าความชันที่ได้ลดลงมาก ดังนั้นอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 3 สัปดาห์

#### 4.14 ผลของไอออนอื่นที่มีต่อการรบกวน

การศึกษาไอออนรบกวนที่มีผลต่อการวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลาย  $Pb^{2+}$  โดยวิธีสร้างกราฟ โดยทำให้แอคติวิตีของไอออนรบกวนคงที่ (Graphical method of fixed interfering ion activity) ซึ่งการทดลองนี้จะศึกษาไอออนของ  $Ag^+$ ,  $Hg^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  โดยให้ไอออนรบกวนความเข้มข้นคงที่ที่  $1.0 \times 10^{-3}$  M และปรับความเข้มข้นของสารละลาย  $Pb^{2+}$  ตั้งแต่  $1.0 \times 10^{-7}$  ถึง  $1.0 \times 10^{-1}$  M  $Pb^{2+}$  ผลการทดลองที่ได้แสดง ดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการศึกษาไอออนรบกวนจากความล้มพันธ์ระหว่าง log ความเข้มข้นของสารละลายกับค่าศักย์ไฟฟ้า โดยให้ไอออนรบกวนคงที่ที่ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M

ตาราง 4.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว ( $K_{Pb,M}$ )

Ag <sup>+</sup>	Hg <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>
3.98	1.58	0.25	0.06	0.13

วิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว ( $K_{Pb,M}$ ) แสดงไว้ในภาคผนวก ค. จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วใดที่มีค่ามากกว่า 1 นั้นแสดงว่าไอออนนั้นรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนตะกั่ว แต่ทางตรงกันข้ามถ้าค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วใดที่มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าไอออนนั้นไม่ได้ส่งผลการตรวจวัดไอออนตะกั่ว ซึ่งจากการคำนวณพบว่า Ag<sup>+</sup> และ Hg<sup>2+</sup> มีค่ามากกว่า 1 ดังนั้น Ag<sup>+</sup> และ Hg<sup>2+</sup> รบกวนการตรวจวัดไอออนตะกั่ว เนื่องจากค่ารัศมีไอออนของเงินและปรอทเมื่อแตกตัวในน้ำ (Ag<sup>+</sup> = 2.56 Å และ Hg<sup>2+</sup> = 2.20 Å) นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่ารัศมีไอออนของตะกั่วเมื่อแตกตัวในน้ำ (Pb<sup>2+</sup> = 2.42 Å) ซึ่งช่องว่างของไอออนโพรที่เรารู้จักคือ 1,10-Diaza-18-crown-6 เมื่อแตกตัวในน้ำนั้นมีค่าประมาณ 2.50-2.60 Å ดังนั้นไอออนของเงินและปรอทอาจเกิดการเข้าไปแทนที่ไอออนของตะกั่วในช่องว่างของ 1,10-Diaza-18-crown-6 ได้ ส่วน Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> และ Cu<sup>2+</sup> ไม่รบกวนการวิเคราะห์ไอออนตะกั่ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วน้อยกว่า 1 และค่ารัศมีไอออนเมื่อแตกตัวในน้ำ ( $\text{Cd}^{2+} = 1.94 \text{ \AA}$ ,  $\text{Zn}^{2+} = 3.53 \text{ \AA}$ ,  $\text{Cu}^{2+} = 3.48 \text{ \AA}$ ) ไม่ใกล้เคียงกับไอออนของตะกั่ว

#### 4.15 การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียเปรียบเทียบกับ AAS

เราจะทำการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ของเทคนิคชีวไฟฟ้าสกิน-พรีนทีอิลิกโทรดกับเทคนิคอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปคโตรสโกปี (AAS) ในตัวอย่างน้ำเสียทั้งหมด 4 ตัวอย่าง คือ

ตัวอย่างที่ 1 เป็นน้ำเข้าก่อนการบำบัดน้ำเสียของบริษัท ยีเอส แบทเตอรี จำกัด

ตัวอย่างที่ 2 เป็นน้ำออกหลังการบำบัดน้ำเสียของบริษัท ยีเอส แบทเตอรี จำกัด

ตัวอย่างที่ 3 เป็นน้ำเข้าก่อนการบำบัดน้ำเสียของบริษัท ยิวซ่า แบทเตอรี จำกัด

ตัวอย่างที่ 4 เป็นน้ำออกหลังการบำบัดน้ำเสียของบริษัท ยิวซ่า แบทเตอรี จำกัด

ข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์โดยเทคนิคชีวไฟฟ้าสกิน-พรีนทีอิลิกโทรด (SPE) กับเทคนิคอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปคโตรสโกปี (AAS)

ตัวอย่าง	SPE (ppm)	AAS (ppm)
1	3.58	2.350
2	น้อยกว่า LOD	0.332
3	11.387	8.564
4	น้อยกว่า LOD	น้อยกว่า 0.1

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษครั้งนี้เป็นการเตรียมสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดเพื่อใช้ในการตรวจวัดตะกั่วในน้ำเสีย ตัวอย่างโดยใช้ไอออนโพลาร์ 2 ตัว คือ 1-Aza-18-crown-6 และ 1,10-Diaza-18-crown-6 เพื่อทำการเปรียบเทียบหาไอออนโพลาร์ที่ให้ผลการตรวจวัดไอออนของตะกั่วที่ดีที่สุดพร้อมทั้งศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม ในการทดสอบ สมบัติชั่วคราว พบว่า

5.1.1 ผลการทดสอบชนิดของไอออนโพลาร์ที่ใช้เตรียมขั้วสกรีน-พรีนทีอิลิกเพื่อตรวจวัดตะกั่ว (II)ไอออน โดยการศึกษาค่าความชันของกราฟ ค่าเวลาการตอบสนอง พบว่า 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนโพลาร์ที่มีความเหมาะสมที่สุดในการตรวจวัดตะกั่ว(II)ไอออน ซึ่งสมบัติของขั้วที่มี 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนโพลาร์ สรุปไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงสมบัติขั้วสกรีน-พรีนทีอิลิกในการตรวจวัดไอออนตะกั่ว โดยใช้ 1,10-Diaza-18-crown-6 เป็นไอออนโพลาร์

ค่าความชัน (mV/decade)	ช่วงพีเอช	เวลาการ ตอบสนอง (วินาที)	อายุการใช้งาน (สัปดาห์)	ช่วงความ เข้มข้น (โมลาร์)	ระดับความ เข้มข้นต่ำสุด ที่วัดได้ (โมลาร์)	ระดับความ เข้มข้นต่ำสุด ที่วัดได้ (ppm)
28.23	4-7	90	3	$1.0 \times 10^{-5}$ – $1.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-5}$	2.272

5.1.2 ผลการศึกษาปริมาณไอออนโพลาร์ที่ใช้ คือ 16, 20 และ 30 mg พบว่าให้ค่าความชันตามสมการเนินสต์ที่ไม่ต่างกัน

5.1.3 ความเที่ยงจากการตรวจวัดตะกั่วในน้ำเสียจากการคำนวณมีค่า 0.45 %RSD

5.1.3 ผลการศึกษาการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่า ช่วยทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นแต่ไม่มากนัก และทำให้ค่าความชันใกล้เคียงตามสมการเนินสต์เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นการใช้อิเล็กโทรไลต์จึงอาจไม่จำเป็นต้องใช้ก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 ผลการศึกษาไอออนรบกวนถ้าค่าที่คำนวณได้มากกว่า 1 แสดงว่าไอออนนั้นรบกวนการตรวจวัดไอออนของตะกั่ว แต่ถ้าค่าที่คำนวณได้น้อยกว่า 1 แสดงว่าไอออนนั้นไม่รบกวนการตรวจวัดไอออนของตะกั่ว ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่วได้แสดงไว้ในตาราง 5.2 พบว่า ไอออนของเงินและไอออนของปรอทรบกวนไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  โมลาร์ เนื่องจากค่ารีซีมีไอออนของเงินและปรอทนั้นมีค่าใกล้เคียงกับไอออนของตะกั่ว จึงอาจไปอยู่ในช่องว่างของไอออนโพรแทนไอออนของตะกั่วได้

ตาราง 5.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเลือกเฉพาะของไอออนตะกั่ว ( $K_{Pb,M}$ )

$Ag^+$	$Hg^{2+}$	$Cd^{2+}$	$Zn^{2+}$	$Cu^{2+}$
3.98	1.58	0.25	0.06	0.13

5.1.5 ผลการเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในน้ำเสียตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ กับสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรด พบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นวิธีสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดจึงเหมาะสมและแม่นยำในการวิเคราะห์ อีกทั้งยังเป็นเทคนิคที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว ในการวิเคราะห์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรมีการปรับปรุง ศึกษาไอออนโพรเพื่อทำให้การวิเคราะห์ได้ในช่วงกว้าง ๆ และวิเคราะห์ได้ที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ ได้ดี
- 2) อาจทำการเพิ่มสารอื่นลงไปในเรื่องเพื่อทำให้การวิเคราะห์ดีขึ้น หรือทำให้ชีวสามารถใช้นาน
- 3) การหยุดสารวัดควรหยุดให้ทั่ว ๆ ขั้วทำงานเพื่อประสิทธิภาพในการวัดที่ดียิ่งขึ้น



ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบการใช้ไอออนฟอร่ต่าง ๆ ในการตรวจวัดตะกั่ว

ผู้วิจัย	ไอออนฟอร่	ช่วงความเข้มข้น	พีเอช	ขีดความเข้มข้น ต่ำสุด	อายุการใช้งาน	เวลาการ ตอบสนอง	ค่าความชัน
Tavakkoli N. และคณะ [24]	9,10-anthraquinone derivatives	$2.0 \times 10^{-6} - 2.0 \times 10^{-3}$ M	6	$1.1 \times 10^{-6}$ M	30 วินาที	4 เดือน	$29.0 \pm 0.3$
Xiaoqiao L. และคณะ [34]	Aquatic humic substances	$1.0 \times 10^{-5.5} - 1.0 \times 10^{-2.2}$ M	4.5	$1.1 \times 10^{-5.7}$ M	20 วินาที	2 สัปดาห์	28.6
Mousavi M.F. และคณะ [25]	1,10-dibenzyl-1,10- diaza-18-crown-6	$5.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-2}$ M	5.5	$2.8 \times 10^{-5}$ M	10 วินาที	10 เดือน	$29.3 \pm 0.7$
Chia-Ching S. และคณะ [27]	Lariat crown ethers	$5.0 \times 10^{-5} - 5.0 \times 10^{-1}$ M	3.23	$1.0 \times 10^{-6}$ M	30 วินาที	3 เดือน	28.9
Shamsipur M. และคณะ [35]	Hexathia-18-crown-6	$1.0 \times 10^{-6} - 8.0 \times 10^{-3}$ M	3.0-6.0	$8.0 \times 10^{-7}$ M	40 วินาที	2 เดือน	$29.0 \pm 1.0$
Abbaspour A. และคณะ [28]	Phenyl disulfide	$2.0 \times 10^{-6} - 1.0 \times 10^{-2}$ M	3.5-6.3	$1.2 \times 10^{-6}$ M	45 วินาที	15 วัน	$29.3 \pm 0.7$
Hassan S.S.M. และคณะ [29]	2,6-bis-pyridinecarboximide derivatives	$4.0 \times 10^{-6} - 1.0 \times 10^{-2}$ M	57.0	$1.8 \times 10^{-5}$ M	25 วินาที	1 เดือน	26.0-31.1
Ardakany M.M. และคณะ [30]	N,N'-bis(5-methyl salicylidene)-p-phenyl methane diamine	$5.0 \times 10^{-6} - 1.0 \times 10^{-1}$ M	1.7-6.0	$2.0 \times 10^{-6}$ M	15 วินาที	3 เดือน	$29.4 \pm 0.6$
Mazloun M. และคณะ [36]	Bis(2-hydroxyacetophenone) ethylenediimine	$1.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-1}$ M	2.0-5.0	$5.0 \times 10^{-6}$ M	10 วินาที	2 เดือน	$29.4 \pm 0.5$
Gupta V.K. และคณะ [37]	N,N'-dibenzyl-1,4,10,13-tetraoxa-7,16-diazacyclooctadecane	$8.2 \times 10^{-6} - 1.0 \times 10^{-1}$ M	2.0-6.8	$8.0 \times 10^{-6}$ M	10 วินาที	3 เดือน	$30.0 \pm 0.1$
Yaftianm M.R. และคณะ [31]	Phosphorylated Calix[4]arene Derivative	$1.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-2}$ M	3.5-5.0	$1.4 \times 10^{-6}$ M	17 วินาที	8 สัปดาห์	$28.0 \pm 0.2$
งานวิจัยนี้	1,10-Diaza-18-crown-6	$1.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-2}$ M	4.0-7.0	$1.0 \times 10^{-5}$ M	90 วินาที	3 สัปดาห์	29.14

## เอกสารอ้างอิง

- [1] "Wastewater". [Online] Available:  
[http://www.pcd.go.th/info\\_serv/en\\_water\\_wt.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/en_water_wt.html). 2008.
- [2] "Water Quality Standard". [Online] Available:  
[http://www.pcd.go.th/info\\_serv/en\\_reg\\_std\\_water04.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/en_reg_std_water04.html). 2008.
- [3] Mohammadi T., Razmi A. and Sadrzadeh M. "Effect of operating parameters on Pb<sup>2+</sup> separation from wastewater using electrodialysis". *Desalination.*, vol. 167, 2004. pp 379-385.
- [4] Ghaedi M., Ahmadi F., Tavakoli Z., Montazerzohori M., Khanmohammadi A. and Soylak M. "Three modified activated carbons by different ligands for the solid phase extraction of copper and lead". *Journal of Hazardous Materials.*, vol. 152, 2008. pp 1248-1255.
- [5] Nimmagadda V. V. J., Pavuluri C. M. and Srinivasula R. J. R. "Determination of zinc, copper, lead and cadmium in some medicinally important leaves by differential pulse anodic stripping analysis". *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology.*, vol. 17, 2003. pp 79-83.
- [6] Herrero-Martínez J. M., Repollés C., Bosch E., Rosés M. and Ràfols C. "Potentiometric determination of aqueous dissociation constants of flavonols sparingly soluble in water". *Talanta.*, vol. 74, 2008. pp 1008-1013.
- [7] Boguslaw B. and Malgorzata J. "The renovated silver ring electrode in determination of lead traces by differential pulse anodic stripping voltammetry". *Anal. Chim. Acta.*, vol. 615, 2008. pp 39-46.
- [8] Palchetti I., Laschi S. and Mascini M. "Miniaturised stripping-based carbon modified sensor for infield analysis of heavy metals". *Anal. Chim. Acta.*, vol. 530, 2005. pp 61-67.
- [9] Pchelintsev N. A. and Millner P. A. "A novel procedure for rapid surface functionalisation and mediator loading of screen-printed carbon electrodes". *Anal. Chim. Acta.*, vol. 612, 2008. pp 190-197.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] "PVC". [Online] Available:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/PVC>. 2008.
- [11] "Ionophore". [Online] Available:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Ionophore>. 2008.
- [12] "Plasticizer". [Online] Available:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Plasticizer>. 2008.
- [13] "Tetrahydrofuran". [Online] Available:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/THF>. 2008.
- [14] Badaoui F. Z. and Bourson J. "Chromoionophores derived from a coumarin linked to monoaza-and diaza-crown ethers: Formation of divalent 3d metal complexes". *Anal. Chim. Acta.*, vol. 302, 1995. pp 341-354.
- [15] Bahadir T., Bakan G., Altas L. and Buyukgungor H. "The investigation of lead removal by biosorption: An application at storage battery industry wastewaters". *Enzyme and Microbial Technology.*, vol. 41, 2007 pp 98-102.
- [16] Elshani S., Kobzar E. and Bartsch R. A. "Macrocyclic Ligands with Partially Fluorinated Sidearms: Synthesis and Metal Ion Complexation Tetrahedron.", vol. 56, 2000. pp 3291-3301.
- [17] "Potentiometric". [Online] Available:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Potentiometric>. 2008.
- [18] Vlasov Y., Legin A. and Rudnitskaya A. "Cross-Sensitivity Evaluation of Chemical Sensors for Electronic Tongue Determination of Heavy Metal Ions". *Sensors and Actuator B.*, vol. 44, 1997. pp 532-537.
- [19] Liyushchenko A. M. and 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.
- [20] Pungor E. "Ion-selective Electrode, Misinterpretation of Functional Mechanism, and New Result". *Microchemical Journal.*, vol. 57, 1997. pp 251-254.
- [21] Bakker E. "Selectivity comparison of neutral carrier-based ion-selective optical and potentiometric sensing schemes". *Anal. Chim. Acta*, vol. 350, 1997. pp 329-340.

- [22] "Lead". [Online] Available:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Lead>. 2008.
- [23] "Lead Poisoning". [Online] Available:  
[http://webdb.dmsc.moph.go.th/afc\\_toxic/a\\_tx\\_1\\_001c.asp?info\\_id=41](http://webdb.dmsc.moph.go.th/afc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=41). 2008.
- [24] Tavakkoli N., Khojasteh Z., Sharghi H. and Shamsipur M. "Lead ion-selective membrane electrodes based on some recently synthesized 9,10-anthraquinone derivatives". *Anal. Chim. Acta.*, vol. 360, 1998. pp 203-208.
- [25] Mousavi M. F., Sahari S., Alizadeh N. and Shamsipur M. "Lead ion-selective membrane electrode based on 1,10-dibenzyl-1,10-diaza-18-crown-6". *Anal. Chim. Acta.*, vol. 414, 2000. pp 189-194.
- [26] Eric S. M., Leonard J. B., Frank R. F., Cheri M. E., Steven F. W. and George W. G. "Channel-like structures formed from extended networks of 4,13-diaza-18-crown-6 complexes". *Inor. Chim. Acta.*, vol. 300-302, 2000. pp 333-338.
- [27] Chia-Ching S., Min-Chuah C., Lillian K. L. "New Ag<sup>+</sup> and Pb<sup>2+</sup> selective electrodes with lariat crown ethers as ionophores". *Anal. Chim. Acta.*, vol. 432, 2001. pp 261-267.
- [28] Abdolkarim A. and Bahnam K. "Lead(II)-Selective Electrode Based on Phenyl Disulfide". *Anal. Sci.*, vol.18, 2002. pp 987-991.
- [29] Saad S. M. H., Abou Ghalia M. H., Abdel-Galil E. A. and Mohamed A. H. K. "New lead (II) selective membrane potentiometric sensors based on chiral 2,6-bis-pyridinecarboximide derivatives". *Talanta.*, vol. 60, 2003. pp 81-91.
- [30] Gupta V. K., Jain A. K. and Kumar P. "PVC-based membranes of N,N-dibenzyl-1,4,10,13-tetraoxa-7,16-diazacyclooctadecane as Pb(II)-selective sensor". *Sensors and Actuators B.*, vol. 120, 2006. pp 259-265.
- [31] Mohammad R. Y., Saeed R., Daryoush E. and Dominique . "A Coated Wire-type Lead(II) Ion-Selective Electrode Based on a Phosphorylated Calix[4]arene Derivative". *Anal. Sci.*, vol. 22, 2006. pp 1075-1078.
- [32] Bahadir T., Bakan G., Altas L. and Buyukgungor H. "The investigation of lead removal by biosorption: An application at storage battery industry wastewaters". *Enzyme and Microbial Technology.*, vol. 41, 2007 pp 98-102.

- [33] Ghaedi M., Montazerzohori M. and Soylak M. "Solid phase extraction method for selective determination of Pb(II) in water samples using 4-(4-methoxybenzylideneimine)thiophenole". *Journal of Hazardous Materials.*, vol. 142, 2007. pp 368-373.
- [34] Xiaoqiao L., Zuliang C., Simon B. H. and Xinhao Y. "Evaluation and characteristics of a Pb(II) ion-selective electrode based on aquatic humic substances". *Anal. Chim. Acta.*, vol. 418, 2000. pp 205–212.
- [35] Shamsipur M., Ganjali M. R., and Rouhollahi A. "Lead-Selective Membrane Potentiometric Sensor Based on an 18-Membered Thiacrown Derivative". *The Japan Society for Analytical Chemistry.*, vol. 17, 2001. pp 935-938.
- [36] Ardakani M. M., Pourhakak P. and Salavati-Niasari M. "Bis(2-hydroxyacetophenone)ethylenediimine as a Neutral Carrier in a Coated-Wire Membrane Electrode for Lead(II)". *The Japan Society for Analytical Chemistry.*, vol. 22, 2006. pp 865-870.
- [37] Gupta V. K., Jain A. K., Kumar P. "PVC-based membranes of N,N'-dibenzyl-1,4,10,13-tetraoxa-7,16-diazacyclooctadecane as Pb(II)-selective sensor". *Sensors and Actuators B.*, vol. 120, 2006. pp 259–265.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก. การเตรียมสารเคมี

- ก.1 การเตรียมสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $10^{-1}$  โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร  
ชั่งเลด(II)ไนเตรท ( $Pb(NO_3)_2$ ; น้ำหนักโมเลกุล 331.2) มา 0.3312 กรัม ละลายด้วย  
สารละลายฟิเชช 5 จนสารละลายหมด แล้วปิเปตสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.0 โมลาร์ลง 1  
มิลลิลิตร จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร ด้วย  
สารละลายฟิเชช 5
- ก.2 การเตรียมสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $10^{-2}$  โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร  
ปิเปตสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $10^{-1}$  โมลาร์ จากภาคผนวก ก.1 มา 1 มิลลิลิตร แล้วปิ  
เปตสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.0 โมลาร์ลง 1 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด  
10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายฟิเชช 5
- ก.3 การเตรียมสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร  
ปิเปตสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $10^{-2}$  โมลาร์ จากภาคผนวก ก.2 มา 1 มิลลิลิตร แล้วปิ  
เปตสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.0 โมลาร์ลง 1 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด  
10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายฟิเชช 5
- ก.4 การเตรียมสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $10^{-4}$  โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร  
ปิเปตสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์ จากภาคผนวก ก.3 มา 1 มิลลิลิตร แล้วปิ  
เปตสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.0 โมลาร์ลง 1 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด  
10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายฟิเชช 5
- ก.5 การเตรียมสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $10^{-5}$  โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร  
ปิเปตสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $10^{-4}$  โมลาร์ จากภาคผนวก ก.4 มา 1 มิลลิลิตร แล้วปิ  
เปตสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.0 โมลาร์ลง 1 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด  
10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายฟิเชช 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.6 การเตรียมสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $10^{-6}$  โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

ปีเปตสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $10^{-5}$  โมลาร์ จากภาคผนวก ก.5 มา 1 มิลลิลิตร แล้วปีเปตสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.0 โมลาร์ลง 1 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายฟิเอช 5

ก.7 การเตรียมสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $10^{-7}$  โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

ปีเปตสารละลาย  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้น  $10^{-6}$  โมลาร์ จากภาคผนวก ก.5 มา 1 มิลลิลิตร แล้วปีเปตสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.0 โมลาร์ลง 1 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายฟิเอช 5

ก.8 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ซึ่งโพแทสเซียมคลอไรด์ ( $KCl$ ; น้ำหนักโมเลกุล 74.55) 0.7455 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนจนสารละลายหมด จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

ก.9 การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ซึ่งโพแทสเซียมคลอไรด์ ( $NaCl$ ; น้ำหนักโมเลกุล 58.44) 0.5844 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนจนสารละลายหมด จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

ก.10 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ซึ่งโพแทสเซียมคลอไรด์ ( $K_2SO_4$ ; น้ำหนักโมเลกุล 174.27) 1.7427 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนจนสารละลายหมด จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

ก.11 การเตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ซึ่งโพแทสเซียมคลอไรด์ ( $Na_2SO_4$ ; น้ำหนักโมเลกุล 142.04) 1.4204 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนจนสารละลายหมด จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน



ก.12 การเตรียมสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร  
ซึ่งโพแทสเซียมคลอไรด์ (NaOH; น้ำหนักโมเลกุล 49.00) 0.4900 กรัม ละลายด้วยน้ำ  
ปราศจากไอออนจนสารละลายหมด จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับ  
ปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

ก.13 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร  
ซึ่งโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl; น้ำหนักโมเลกุล 74.55) 7.4550 กรัม ละลายด้วยน้ำ  
ปราศจากไอออนจนสารละลายหมด จากนั้นเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับ  
ปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

ก.14 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์  $\text{CH}_3\text{COOH} - \text{CH}_3\text{COONa}$   
เตรียมสารละลาย 0.1 M ของ  $\text{CH}_3\text{COOH}$  โดยปีเปตมาจากกรดไฮโดรคลอริก 37%  
ปริมาตร 1.4 มิลลิลิตร ถ่ายลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำ  
ปราศจากไอออน

เตรียมสารละลาย 0.1 M ของ  $\text{CH}_3\text{COONa}$  โดยซึ่งโซเดียมอะซิเตรทมา 0.8198 กรัม  
ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ถ่ายลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วย  
น้ำปราศจากไอออน

นำสารละลาย 0.1 M  $\text{CH}_3\text{COONa}$  ถ่ายลงบีกเกอร์ วัดค่า pH แล้วนำสารละลาย 0.1 M  
 $\text{CH}_3\text{COOH}$  มาหยดเพื่อปรับค่า pH ให้ได้ 3,4 และ 5 ตามลำดับ

ก.14 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์  $\text{KH}_2\text{PO}_4 - \text{K}_2\text{HPO}_4$   
เตรียมสารละลาย 0.1 M ของ  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  โดยซึ่งโซมา 1.7418 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจาก  
ไอออน ถ่ายลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

เตรียมสารละลาย 0.1 M ของ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  โดยซึ่งมา 1.3609 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจาก  
ไอออน ถ่ายลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

นำสารละลาย 0.1 M  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  ถ่ายลงบีกเกอร์ วัดค่า pH แล้วนำสารละลาย 0.1 M  
 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  มาหยดเพื่อปรับค่า pH ให้ได้ 6 และ 7 ตามลำดับ

ก.14 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์  $\text{NH}_3 - \text{NH}_4\text{Cl}$   
เตรียมสารละลาย 0.1 M ของ  $\text{NH}_3$  โดยปีเปตมาจากสารละลายแอมโมเนีย 37% ปริมาตร  
0.5 มิลลิลิตร ถ่ายลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมสารละลาย 0.1 M ของ  $\text{NH}_4\text{Cl}$  โดยชั่งมา 0.5446 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ถ่ายลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

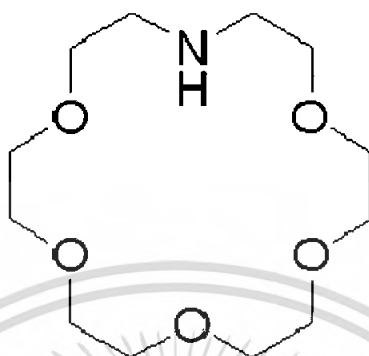
นำสารละลาย 0.1 M  $\text{NH}_3$  ถ่ายลงบีกเกอร์ วัดค่า pH แล้วนำสารละลาย 0.1 M  $\text{NH}_4\text{Cl}$  มาหยดเพื่อปรับค่า pH ให้ได้ 8 และ 9 ตามลำดับ



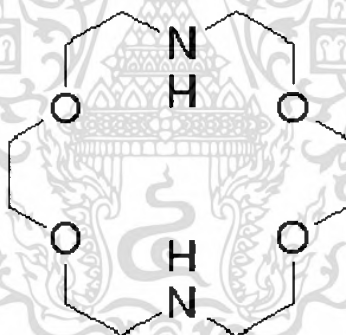
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## โครงสร้างของสารประกอบ Azacrown ether



รูปที่ ข.1 1-Aza-18-crown-6



รูปที่ ข.2 1,10-Diaza-18-crown-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ค.**  
**ข้อมูลผลการทดลอง**

**ตารางที่ ค.1** แสดงข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าของข้าวสกรีน-พรีนทีอิลเล็กโทรดที่มีไอออนโฟร์ 1-Aza-18-crown-6 เป็นส่วนผสมอยู่ปริมาณ 16 mg

ความเข้มข้น A18C6 (mol/l)	ค่าศักย์ไฟฟ้า (mV)			เฉลี่ย (mV)
	1	2	3	
$1.0 \times 10^{-7}$	-133.3	-139.1	-133.2	-133.2
$1.0 \times 10^{-6}$	-132.7	-132.4	-132.7	-132.6
$1.0 \times 10^{-5}$	-128.5	-128.3	-128.4	-128.4
$1.0 \times 10^{-4}$	-100.9	-100.6	-100.6	-100.7
$1.0 \times 10^{-3}$	-74.3	-74.0	-73.9	-74.1
$1.0 \times 10^{-2}$	-52.9	-53.0	-52.6	-52.8
$1.0 \times 10^{-1}$	-48.5	-48.1	-48.2	-48.3

**ตารางที่ ค.2** แสดงข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าของข้าวสกรีน-พรีนทีอิลเล็กโทรดที่มีไอออนโฟร์ 1-Diaza-18-crown-6 เป็นส่วนผสมอยู่ปริมาณ 16 mg

ความเข้มข้น DA18C6 (mol/l)	ค่าศักย์ไฟฟ้า (mV)			เฉลี่ย (mV)
	1	2	3	
$1.0 \times 10^{-7}$	-119.2	-119.2	-119.4	-119.3
$1.0 \times 10^{-6}$	-118.0	-118.2	-118.2	-118.1
$1.0 \times 10^{-5}$	-113.6	-113.8	-114.0	-113.8
$1.0 \times 10^{-4}$	-84.1	-84.2	-84.3	-84.2
$1.0 \times 10^{-3}$	-51.3	-51.4	-51.5	-51.4
$1.0 \times 10^{-2}$	-27.4	-27.6	-27.8	-27.6
$1.0 \times 10^{-1}$	-24.1	-24.5	-24.4	-24.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ค.3** แสดงข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าของข้าวสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่มีไอออนฟออร์ 1-Diaza-18-crown-6 เป็นส่วนผสมอยู่ปริมาณ 20 mg

ความเข้มข้น DA18C6 (mol/l)	ค่าศักย์ไฟฟ้า (mV)			เฉลี่ย (mV)
	1	2	3	
$1.0 \times 10^{-7}$	-109.5	-109.3	-109.3	-109.4
$1.0 \times 10^{-6}$	-108.3	-108.0	-108.4	-108.2
$1.0 \times 10^{-5}$	-105.5	-105.1	-105.3	-105.3
$1.0 \times 10^{-4}$	-82.5	-82.8	-82.8	-82.7
$1.0 \times 10^{-3}$	-45.9	-46.1	-46.3	-46.1
$1.0 \times 10^{-2}$	-20.5	-20.7	-20.6	-20.6
$1.0 \times 10^{-1}$	-17.8	-18.0	-17.9	-17.9

**ตารางที่ ค.4** แสดงข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าของข้าวสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่มีไอออนฟออร์ 1-Diaza-18-crown-6 เป็นส่วนผสมอยู่ปริมาณ 30 mg

ความเข้มข้น DA18C6 (mol/l)	ค่าศักย์ไฟฟ้า (mV)			เฉลี่ย (mV)
	1	2	3	
$1.0 \times 10^{-7}$	-128.3	-128.4	-128.2	-128.3
$1.0 \times 10^{-6}$	-126.6	-126.9	-126.6	-126.7
$1.0 \times 10^{-5}$	-122.7	-123.1	-122.9	-122.9
$1.0 \times 10^{-4}$	-98.3	-98.5	-98.4	-98.4
$1.0 \times 10^{-3}$	-65.5	-65.9	-66.1	-65.8
$1.0 \times 10^{-2}$	-37.0	-37.3	-37.3	-37.2
$1.0 \times 10^{-1}$	-33.5	-34.0	-33.9	-33.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 แสดงเวลาการตอบสนองของข้าวสกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่มีไอออนฟอว์เป็น 1-Diaza-18-crown-6

เวลา (วินาที)	ศักย์ไฟฟ้า (mV)
0	-12.7
10	-23.2
20	-31.9
30	-36.6
40	-37.2
50	-41.5
60	-42.2
70	-45.1
80	-49.6
90	-51.2
100	-51.3
110	-51.2
120	-51.2
130	-51.3
140	-51.3
150	-51.3
160	-51.3
170	-51.4
180	-51.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 แสดงข้อมูลของการศึกษามวลของพีเอชที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วสกรีน-พรีนทีอิลเล็กโทรดที่มีไอออนโพรเป็น 1-Diaza-18-crown-6

pH	ค่าศักย์ไฟฟ้า (mV)			เฉลี่ย (mV)
	1	2	3	
3	-52.2	-52.4	-52.3	-52.3
4	-53.1	-53.5	-53.6	-53.4
5	-54.2	-54.3	-54.7	-54.4
6	-54.5	-54.8	-54.8	-54.7
7	-54.7	-54.9	-55.0	-54.9
8	-55.1	-54.9	-55.2	-55.1
9	-56.3	-56.6	-56.7	-56.5

ตารางที่ ค.7.1 แสดงข้อมูลของการศึกษามวลของอายุการใช้งานของขั้วที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วสกรีน-พรีนทีอิลเล็กโทรดที่มีไอออนโพรเป็น 1-Diaza-18-crown-6 ที่ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M ของสปีดานท์ที่ 1

ความเข้มข้น DA18C6 (mol/l)	ค่าศักย์ไฟฟ้า (mV)			เฉลี่ย (mV)
	1	2	3	
$1.0 \times 10^{-7}$	-119.2	-119.2	-119.4	-119.3
$1.0 \times 10^{-6}$	-118.0	-118.2	-118.2	-118.1
$1.0 \times 10^{-5}$	-113.6	-113.8	-114.0	-113.8
$1.0 \times 10^{-4}$	-84.1	-84.2	-84.3	-84.2
$1.0 \times 10^{-3}$	-51.3	-51.4	-51.5	-51.4
$1.0 \times 10^{-2}$	-27.4	-27.6	-27.8	-27.6
$1.0 \times 10^{-1}$	-24.1	-24.5	-24.4	-24.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7.2 แสดงข้อมูลของการศึกษามวลของอายุการใช้งานของขั้วที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้ว สกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่มีไอออนฟอว์เป็น 1-Diaza-18-crown-6 ที่ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M ของ สัปดาห์ที่ 2

ความเข้มข้น DA18C6 (mol/l)	ค่าศักย์ไฟฟ้า (mV)			เฉลี่ย (mV)
	1	2	3	
$1.0 \times 10^{-7}$	-121.9	-121.7	-121.7	-121.8
$1.0 \times 10^{-6}$	-120.6	-120.3	-120.4	-120.4
$1.0 \times 10^{-5}$	-115.9	-115.6	-115.8	-115.8
$1.0 \times 10^{-4}$	-85.5	-85.3	-85.1	-85.3
$1.0 \times 10^{-3}$	-52.2	-52.2	-51.9	-52.1
$1.0 \times 10^{-2}$	-30.0	-29.7	-29.7	-29.8
$1.0 \times 10^{-1}$	-26.4	-26.2	-26.3	-26.3

ตารางที่ ค.7.3 แสดงข้อมูลของการศึกษามวลของอายุการใช้งานของขั้วที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้ว สกรีน-พรีนทีอิลิกโทรดที่มีไอออนฟอว์เป็น 1-Diaza-18-crown-6 ที่ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M ของ สัปดาห์ที่ 3

ความเข้มข้น DA18C6 (mol/l)	ค่าศักย์ไฟฟ้า (mV)			เฉลี่ย (mV)
	1	2	3	
$1.0 \times 10^{-7}$	-129.4	-129.6	-129.6	-129.5
$1.0 \times 10^{-6}$	-128.0	-128.4	-128.3	-128.2
$1.0 \times 10^{-5}$	-121.6	-121.8	-121.7	-121.7
$1.0 \times 10^{-4}$	-87.8	-88.0	-88.0	-87.9
$1.0 \times 10^{-3}$	-58.1	-58.4	-58.4	-58.3
$1.0 \times 10^{-2}$	-34.7	-35.0	-34.8	-34.8
$1.0 \times 10^{-1}$	-31.5	-31.9	-31.7	-31.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ค.7.4 แสดงข้อมูลของการศึกษามวลของอายุการใช้งานของขั้วที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้ว สกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรดที่มีไอออนโพลีเมอร์เป็น 1-Diaza-18-crown-6 ที่ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M ของ สัปดาห์ที่ 4

ความเข้มข้น DA18C6 (mol/l)	ค่าศักย์ไฟฟ้า (mV)			เฉลี่ย (mV)
	1	2	3	
$1.0 \times 10^{-7}$	-137.3	-137.1	-137.6	-137.3
$1.0 \times 10^{-6}$	-134.8	-134.8	-135.0	-134.9
$1.0 \times 10^{-5}$	-129.5	-129.5	-129.7	-129.6
$1.0 \times 10^{-4}$	-107.3	-107.4	-107.5	-107.4
$1.0 \times 10^{-3}$	-74.0	-74.1	-74.5	-74.2
$1.0 \times 10^{-2}$	-49.2	-49.5	-49.3	-49.3
$1.0 \times 10^{-1}$	-45.6	-45.9	-45.9	-45.8

ตารางที่ ค.8 แสดงข้อมูลของการศึกษามวลของการรบกวนของไอออนอื่นที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้ว สกรีน-พรีนทีโอเล็กโทรดที่มีไอออนโพลีเมอร์เป็น 1-Diaza-18-crown-6 ที่ระดับความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M

ความเข้มข้น ของ	ไอออนของ	ไอออนของ	ไอออนของ	ไอออนของ	ไอออน
(mol/l)	Ag <sup>+</sup>	Hg <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>
$1.0 \times 10^{-7}$	-120.9	-127.4	-122.4	-120.3	-121.3
$1.0 \times 10^{-6}$	-120.4	-126.8	-123.7	-121.8	-120.7
$1.0 \times 10^{-5}$	-119.1	-124.3	-124.2	-120.1	-119.6
$1.0 \times 10^{-4}$	-118.3	-121.8	-123.7	-122.4	-120.4
$1.0 \times 10^{-3}$	-114.9	-117.3	-126.9	-123.1	-123.7
$1.0 \times 10^{-2}$	-98.4	-115.1	-130.2	-133.7	-134.1
$1.0 \times 10^{-1}$	-68.3	-108.4	-132.5	-135.2	-135.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.8 แสดงข้อมูลของการศึกษาความเที่ยงในการตรวจวัดตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-3}$  M ทั้งหมด 30 ครั้ง

ครั้งที่	ศักย์ไฟฟ้า (mV)	ครั้งที่	ศักย์ไฟฟ้า (mV)
1	51.4	16	51.3
2	51.4	17	51.6
3	51.4	18	51.4
4	51.3	19	51.3
5	51.4	20	51.5
6	51.4	21	51.1
7	51.3	22	50.8
8	51.4	23	51.4
9	51.7	24	51.5
10	51.5	25	51.4
11	51.4	26	51.4
12	51.3	27	51.9
13	51.6	28	51.6
14	51.5	29	51.1
15	51.3	30	51.3
ศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย (mV)			51.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้