

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรง
ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 7ว

ของ
นายคมสัน ต้นยืนยงค์
นักวิทยาศาสตร์ 6ว

เรื่องที่ 2

การศึกษาเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์
ปริมาณสารลดแรงตึงผิวแคตไอออนิก

ผู้ร่วมดำเนินการ
นางสาวสมจิตต์ บวรวัฒนาโสภณ
นักวิทยาศาสตร์ 7ว

กลุ่มกำกับดูแลมาตรฐานห้องปฏิบัติการ
สำนักบริหารและรับรองห้องปฏิบัติการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ข้อมูลข่าวสารของกรมวิทยาศาสตร์บริการ
ตาม พ.ร.บ. ข้อมูลข่าวสารของราชการ พ.ศ. 2540

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรง
ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 7ว

ของ
นายคมสัน ตันยีนยงค์
นักวิทยาศาสตร์ 6ว

เรื่องที่ 2

เลขหมู่	กศ บธ
	๑๑ 13
เลขทะเบียน	13898
วันที่	๒๕/๖๖/๕๙

การศึกษาเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์
ปริมาณสารลดแรงดึงผิวแคตไอออนิก

ผู้ร่วมดำเนินการ
นางสาวสมจิตต์ บวรวัฒนาโสภณ
นักวิทยาศาสตร์ 7ว

กลุ่มกำกับดูแลมาตรฐานห้องปฏิบัติการ
สำนักบริหารและรับรองห้องปฏิบัติการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

บทคัดย่อ

การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณ Benzalkonium chloride โดยใช้วิธี ตามมาตรฐาน The United States Pharmacopeia⁸ ด้วยการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไอโอเดต (potassium iodate, KIO_3) กับวิธีการใช้หลักการทางกระแสไฟฟ้าหรือ โฟเทนซิอเมตริก (Potentiometric) โดยอาศัยการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของขั้วที่บอกที่ไวต่อ ชนิดของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณ และพบว่าวิธีที่เหมาะสมคือวิธีใช้หลักการทาง กระแสไฟฟ้า ที่ให้ความถูกต้องไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ที่ช่วง ความเป็นกรด - ด่างของสารละลายตัวอย่างตั้งแต่ 6 ถึง 8

การพิสูจน์ความถูกต้อง (accuracy) ของวิธีวิเคราะห์จะต้องใช้สารอ้างอิงมาตรฐาน (CRM) เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ มาเป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์เปรียบเทียบ แต่เนื่องจากไม่สามารถหาสาร อ้างอิงมาตรฐานตัวนี้ได้ จึงต้องใช้หลักการทางสถิติมาเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา โดยใช้สมการ Horwitz ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) จะแปรตามความเข้มข้น ของผลการวิเคราะห์ ถ้าค่า RSD ที่คำนวณได้จากผลการวิเคราะห์น้อยกว่าค่า RSD ที่คำนวณจากสม การ Horwitz ถือว่าวิธีวิเคราะห์นั้นมีความเที่ยง (precision) ยอมรับได้ และเปรียบเทียบค่าความ แปรปรวนของวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน The United States Pharmacopeia กับวิธีโฟเทนซิอ เมตริกไทเทรชันพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปว่าวิธีโฟเทนซิอเมตริกไทเทร ชันให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องไม่แตกต่างกับวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน The United States Pharmacopeia

จากข้อมูลผลการวิเคราะห์พบว่าวิธีโฟเทนซิอเมตริกไทเทรชันเป็นวิธีที่ให้ผลการวิเคราะห์ ที่มีความถูกต้องและมีความแม่นยำสูง โดยพิจารณาจากค่า %RSD และ F - test อีกทั้งวิธีนี้ยังให้ ความปลอดภัยต่อตัวผู้วิเคราะห์และไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่ต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ คลอโรฟอร์ม (chloroform, $CHCl_3$) ในขั้นตอนการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน The United States Pharmacopeia

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
สารบัญ	ii
สารบัญตาราง	iii
สารบัญภาพ	v
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาและที่มาของการศึกษาทดลอง	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษาทดลอง	1
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	1
1.5 ระยะเวลาดำเนินการ	2
1.6 ขั้นตอนการดำเนินการ	2
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์	3
2.1 วิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน	3
2.2 การแบ่งชนิดของขั้วชี้บอก	3
2.3 การหาปริมาณโดยโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน	9
2.4 สารลดแรงตึงผิว (surface – active agent or surfactant)	14
2.5 ความเป็นพิษของคลอโรฟอร์ม	15
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ	17
3.1 ตัวอย่าง	17
3.2 วัสดุ อุปกรณ์	17
3.3 สารเคมี สารละลายและวิธีเตรียม	17
3.4 วิธีดำเนินการ	19
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์	24
บทที่ 5 วิจารณ์ผล	26
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	27
กิตติกรรมประกาศ	28
เอกสารอ้างอิง	29
ภาคผนวก	30

ผนวก ก. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีมาตรฐาน The United States Pharmacopeia	31
ผนวก ข. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ค่า 1 ถึง 10	33

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1. แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีมาตรฐาน The United States Pharmacopeia	20
ตารางที่ 2. แสดงผลการวัดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานสารลด แรงดึงผิวชนิดแคตไอออนที่ความเข้มข้นต่างกัน 10 เท่า	21
ตารางที่ 3. แสดงผลการทดลองหาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีโพเทนชิอเมตริก ไทเทรชันที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง 1 ถึง 10	23
ตารางที่ 4. แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีมาตรฐาน The United States Pharmacopeia 10 ซ้ำ	24
ตารางที่ 5. แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชันที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง 1 ถึง 10 อย่างละ 10 ซ้ำ	24
ตารางที่ 6. แสดงผลการเปรียบเทียบความถูกต้องและความเที่ยงของการวิเคราะห์ ตัวอย่างเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีมาตรฐาน The United States Pharmacopeia และวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน	25
ตารางที่ 7. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีมาตรฐาน The United States Pharmacopeia	32
ตารางที่ 8. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 1	34
ตารางที่ 9. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 2	35
ตารางที่ 10. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 3	36
ตารางที่ 11. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 4	37
ตารางที่ 12. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 5	38
ตารางที่ 13. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 6	39

- ตารางที่ 14. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์
โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 7 40
- ตารางที่ 15. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์
โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 8 41
- ตารางที่ 16. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์
โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 9 42
- ตารางที่ 17. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์
โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 10 43

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1. แผนภาพวงจรไฟฟ้า	3
ภาพที่ 2. เซลล์ไฟฟ้าเคมีสำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้า	4
ภาพที่ 3. PVC matrix – membrane coated wire ion selective electrode	8
ภาพที่ 4. กราฟมาตรฐานของแคลเซียมไอออน	10
ภาพที่ 5. แสดงการประกอบเครื่องมือเพื่อทำการไทเทรตโพเทนชิอเมตริก	10
ภาพที่ 6. Experimental curve	11
ภาพที่ 7. แสดงวิธีหาจุดยุติของเคอร์ฟที่สมมาตร	11
ภาพที่ 8. การหาจุดยุติวิธี circle fitting	12
ภาพที่ 9. วิธีหาจุดยุติโดยการสร้างสี่เหลี่ยมผืนผ้า	12
ภาพที่ 10. First derivative curve	13
ภาพที่ 11. Second derivative curve	13
ภาพที่ 12. Gran's plot	13

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาและที่มาของการศึกษาทดลอง

ปัจจุบันมีการนำเข้าสารเบนซาโคเนียมคลอไรด์จากต่างประเทศเป็นจำนวนมากและสารเบนซาโคเนียมคลอไรด์จัดเป็นวัตถุอันตรายควบคุมชนิดที่ 3 ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 ต้องขออนุญาตขึ้นทะเบียนวัตถุอันตรายจากกรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ก่อนที่จะนำออกจำหน่ายให้เกษตรกรเพื่อนำไปใช้ในทางการประมงและเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังนั้นจึงมีผู้นำส่งตัวอย่างสารเบนซาโคเนียมคลอไรด์ให้กลุ่มงานอินทรีย์เคมีวิเคราะห์ โครมเคมี วิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์สารเบนซาโคเนียมคลอไรด์เพื่อนำผลการวิเคราะห์ไปแสดงต่อกรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

โครมเคมี ได้ตระหนักถึงความสำคัญในเรื่องการควบคุมวัตถุอันตรายและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากวิธีการวิเคราะห์ จึงได้ศึกษาพัฒนาวิธีวิเคราะห์หาปริมาณสารเบนซาโคเนียมคลอไรด์ โดยไม่ใช้คลอโรฟอร์ม (chloroform, CHCl_3) ในขบวนการวิเคราะห์

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพัฒนาวิธีวิเคราะห์หาปริมาณสารเบนซาโคเนียมคลอไรด์ โดยใช้หลักการทางกระแสไฟฟ้า เปรียบเทียบกับวิธีการไทเทรตโดยใช้ไทเทรนต์โพแทสเซียมไอโอเดต และคลอโรฟอร์มซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน The United States Pharmacopeia

1.3 ขอบข่ายของการศึกษาทดลอง

ทำการศึกษาวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาโคเนียมคลอไรด์ ในตัวอย่างเบนซาโคเนียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 80 โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรตชัน (Potentiometric titration) กับวิธีการไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอเดตและคลอโรฟอร์ม (วิธี USP)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- ได้วิธีวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาโคเนียมคลอไรด์ ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้อง ความเที่ยง (precision) เหมือนวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน The United States Pharmacopeia และให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว
- ลดมลพิษการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์คลอโรฟอร์ม ในขบวนการวิเคราะห์เพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม
- เผยแพร่ข้อมูล เพื่อเป็นประโยชน์แก่ห้องปฏิบัติการอื่นทั้งของรัฐและเอกชน สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงวิธีวิเคราะห์ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

- จากผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจประเมินทางเทคนิคด้านวิชาการ สำหรับผู้ทำหน้าที่ตรวจประเมินทางด้านวิชาการให้ห้องปฏิบัติการที่ต้องการมาขอการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการทดสอบตาม ISO/IEC 17025

1.5 ระยะเวลาในการดำเนินการ

มิถุนายน ถึง พฤศจิกายน 2545

1.6 ขั้นตอนการดำเนินการ

- 1.6.1 หาค่าความถูกต้องและความเที่ยงของการวิเคราะห์ตัวอย่างเบนซาโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน The United States Pharmacopeia
- 1.6.2 การตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือโพเทนชิออมิเตอร์
- 1.6.3 หาค่าความถูกต้องและความเที่ยงของการวิเคราะห์ตัวอย่างเบนซาโคเนียมคลอไรด์โดยวิธีโพเทนชิออมेटริกไทเทรตชัน
- 1.6.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเบนซาโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน The United States Pharmacopeia กับวิธีโพเทนชิออมेटริกไทเทรตชัน โดยใช้ F - test และ t - test เป็นเครื่องมือ

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

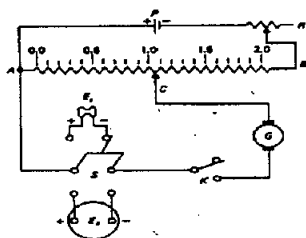
2.1 วิธีโพเทนชิโอเมตริก (Potentiometric method) ¹

คือวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วชี้บอกที่ไวต่อชนิดไอออนที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณ ลักษณะของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้สำหรับวิธีการวิเคราะห์นี้คือ กัลวานิกเซลล์ การใช้วิธีโพเทนชิโอเมตริกควบคุมกับเทคนิคของการไทเทรตเพื่อศึกษาหาจุดยุติของปฏิกิริยาจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า ทำให้เกิดเทคนิคของการวิเคราะห์ที่เรียกว่าโพเทนชิโอเมตริกไทเทรชัน (Potentiometric titration)

ศักย์ไฟฟ้าของขั้ว (Electrode potential, E)

หมายถึงพลังงานทางไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการทำให้ประจุลบเคลื่อนที่จากขั้วไปยังจุดๆหนึ่ง ที่มีระยะทางอนันต์หรือหมายถึงพลังงานทางไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการดึงประจุบวกจากจุดอนันต์ให้เคลื่อนที่เข้าหาขั้ว

เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าของกัลวานิกเซลล์ขึ้นอยู่กับแอคติวิตีของไอออนที่ไวต่อขั้วที่มีอยู่ในสารละลาย ดังนั้นในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของสารได้ ถ้าขั้วหนึ่งของเซลล์ที่นำมาใช้เป็นขั้วที่ไวต่อไอออนที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณ ขั้วนั้นเรียกว่าขั้วชี้บอก (Indicator electrode) หรือขั้วทำงาน (Working electrode) ส่วนอีกขั้วหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ต้องเป็นขั้วที่ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนในสารละลายและต้องมีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ เรียกว่าขั้วอ้างอิง (Reference electrode) นั่นคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้จะแปรผันโดยตรงกับศักย์ไฟฟ้าของขั้วชี้บอก หรือความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ต้องการวิเคราะห์โดยที่ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่าโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) วงจรไฟฟ้าของเครื่องมือโพเทนชิโอมิเตอร์มีลักษณะดังแสดงในรูป

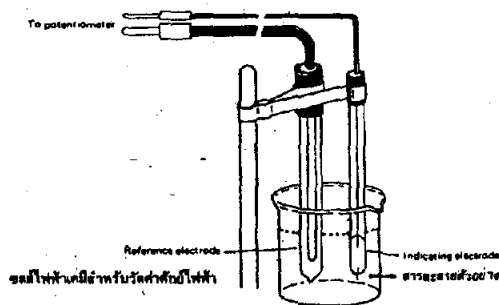


ภาพที่ 1. แผนวงจรไฟฟ้า

หลักในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าทำได้โดยอาศัยเซลล์มาตรฐานที่ทราบค่าศักย์ไฟฟ้าแล้วต่อเข้าวงจรของเครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์และปรับความต้านทานจนไม่มีกระแสไหลในวงจร จะได้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มาตรฐานสัมพันธ์กับความยาวของลวดต้านทาน ครั้นเมื่อต่อเซลล์ตัวอย่างเข้ากับวงจรของเครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์บ้าง และปรับความต้านทานจนไม่มีกระแสไหลในวงจรอีก จะได้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ตัวอย่างสัมพันธ์กับความยาวของลวดต้านทานที่วัดได้ทั้งสองค่า และค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มาตรฐานจะทำให้สามารถคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ตัวอย่างได้

2.2 การแบ่งชนิดของขั้วชี้บอก

สารละลายที่ต้องการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหรือ pH ต้องประกอบเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยมีขั้ว 2 ชนิดคือขั้วชี้บอกซึ่งไวต่อสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์และขั้วอ้างอิงซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ จากนั้นจึงนำขั้วของเซลล์ทั้งสองต่อเข้าเครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์เพื่อวัดค่าดังแสดงในรูป



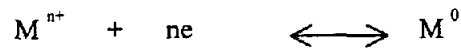
ภาพที่ 2. เซลล์ไฟฟ้าเคมีสำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้า

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้นั้นขึ้นอยู่กับขั้วชี้บอกและความเข้มข้นของไอออนที่ไวต่อขั้วชี้บอก ดังนั้นขั้วชี้บอกที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีโพเทนชิโอมิเตอร์แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ขั้วชี้บอกที่เป็นแท่งโลหะและขั้วชี้บอกที่เป็นเยื่อ (membrane)

1. ขั้วชี้บอกที่เป็นโลหะ (Metallic indicator electrode)

โลหะที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผันกลับได้ สามารถนำมาใช้เป็นขั้วชี้บอกได้ ขั้วชี้บอกชนิดนี้สามารถแบ่งได้เป็นหลายแบบตามลักษณะของขั้วและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้

แบบที่ 1. ขั้วชนิดนี้ประกอบด้วยแท่งโลหะที่จุ่มอยู่ในสารละลายที่เป็นไอออนของโลหะนั้น โดยครึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถผันกลับได้ระหว่างโลหะกับไอออนของโลหะนั้นเช่น Ag, Cu, Hg, Pb, Zn และ Cd ตัวอย่างเช่นถ้าต้องการวัดความเข้มข้นของสารละลาย Ag^+ ควรใช้แท่งเงินจุ่มในสารละลายเงินไนเตรต สามารถพิจารณาศักย์ไฟฟ้าของขั้วชี้บอกสำหรับโลหะต่างๆไปได้ดังนี้



เมื่อใช้ขั้วชี้บอกเป็นแคโทดจะได้

$$E_{\text{cell}} = Q + \frac{0.0591}{n} \log [M^{n+}]$$

$$\begin{aligned} \text{pM} &= -\log [M^{n+}] \\ &= \frac{Q - E_{\text{cell}}}{\frac{0.0591}{n}} \end{aligned}$$

เมื่อใช้ขั้วชี้บอกเป็นแอโนดจะได้

$$E_{\text{cell}} = k - \frac{0.0591}{n} \log [M^{n+}]$$

$$\begin{aligned} \text{pM} &= -\log [M^{n+}] \\ &= \frac{E_{\text{cell}} - k}{\frac{0.0591}{n}} \end{aligned}$$

การพิจารณาว่าควรใช้ขั้วใดเป็นขั้วแคโทดหรือแอโนด พิจารณาได้จากค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้ว ถ้าขั้วใดมีค่า E เป็นบวกมากกว่าต้องใช้ขั้วนั้นเป็นขั้วแคโทด ขั้วที่นำมาใช้เป็นขั้วชี้บอกได้ต้องมีคุณสมบัติที่สามารถให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากสารละลายเดียวกันเท่าๆกันหรือซ้ำๆกันได้ทุกครั้งที่วัด

แบบที่ 2. คือขั้วชี้บอกที่ประกอบด้วยแท่งโลหะที่ฉาบด้วยเกลือที่ละลายน้ำยากของโลหะนั้น ขั้วชนิดนี้สามารถใช้วัดความเข้มข้นของแอนไอออนที่สามารถเกิดเป็นเกลือที่ละลายน้ำยากกับไอออนของโลหะนั้น เพื่อให้การวิเคราะห์ได้ผลถูกต้องสารละลายของแอนไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ต้องอิมมัวด้วยเกลือที่ละลายน้ำยากของไอออนนั้นเช่นกัน ตัวอย่างขั้วชนิดนี้คือ Ag/AgCl ซึ่งสามารถใช้หาความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างคลอไรด์ไอออนได้ แต่ถ้าในสารละลายคลอไรด์ที่ต้องการวิเคราะห์มีแอนไอออนตัวอื่นที่สามารถเกิดเป็นเกลือที่ละลายน้ำยากกับเงินไอออนด้วย จะพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้นั้นผิดพลาด ปริมาณของคลอไรด์ไอออนที่คำนวณได้ผิดพลาดด้วย

แบบที่ 3. คือขั้วชี้บอกที่ประกอบด้วยโลหะที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ ขั้วชนิด

นี้ใช้สำหรับการทำโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน แบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อนตัวคอมเพลกซิงเอเจนต์ที่นำมาใช้เป็นตัวไทเทรนต์สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรกับไอออนของโลหะที่ใช้เป็นขั้ว ตัวอย่างขั้วชนิดนี้คือขั้วปรอท ขั้วปรอทจะถูกทำให้สัมผัสกับสารละลายไอออนของโลหะที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณ โดยที่ในสารละลายนี้ต้องมีสารประกอบเชิงซ้อนของปรอทกับไทเทรนต์จำนวนหนึ่ง (มีความเข้มข้นน้อยๆ)ผสมอยู่ด้วย ไทเทรนต์ซึ่งเป็นคอมเพลกซิงเอเจนต์ตัวที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ EDTA (Ethylene diamine tetraacetic acid)

แบบที่ 4. เรียกว่าขั้วรีดอกซ์ (Redox electrode) ใช้สำหรับสารละลายที่มีตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์อยู่ในสภาพที่เป็นไอออนทั้งสองตัว โลหะที่นำมาใช้เป็นขั้วชนิดนี้ได้คือ โลหะเฉื่อยได้แก่ทอง แพลตินัม และคาร์บอน ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์ในสารละลาย ตัวอย่างเช่นใช้ขั้วแพลตินัมจุ่มอยู่ในสารละลายที่ประกอบด้วย Fe^{2+} Fe^{3+} ขั้วแพลตินัมไม่เหมาะสำหรับงานวิเคราะห์สารละลายของไอออนที่มีกำลังในการรีดิวซ์สูงๆเช่น โครเมียม (III) โทเทเนียม (III) และวานาเดียม (II) เพราะแพลตินัมจะเป็นตัวเร่งให้ตัวรีดิวซ์เหล่านี้เกิดปฏิกิริยารีดักชันกับไฮโดรเจนไอออนที่ผิวของแพลตินัม

2. ขั้วขั้วบอที่เป็นเมมเบรน (Membrane electrode)

ขั้วเมมเบรนเป็นขั้วที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อให้การวิเคราะห์ใช้ได้กว้างขวางขึ้นและสามารถวิเคราะห์ไอออนได้หลายชนิด ขั้วเมมเบรนบางชนิดที่ผลิตขึ้นสามารถใช้ได้ดีกับไอออนแต่ละตัวไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Ion selective electrode ขั้วเมมเบรนที่ถูกค้นพบขึ้นก่อนคือขั้วที่ใช้กลาสเมมเบรนซึ่งไวต่อไฮโดรเจนไอออนและยอมให้ไฮโดรเจนไอออนผ่านเมมเบรนได้เพียงอย่างเดียว ขั้วชนิดนี้มีไว้สำหรับวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายเท่านั้น มีชื่อเรียกทั่วไปว่าขั้วกลาสสำหรับวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (Glass electrode for pH measurement) นอกจากนี้ยังมีกลาสเมมเบรนชนิดอื่นๆที่ยอมให้ไอออนอื่นนอกเหนือจาก H^+ ผ่านได้

ถ้าพิจารณาประเภทของขั้วเมมเบรนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

- ขั้วกลาสเมมเบรน (Glass membrane electrode) ชนิดสำหรับวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง และชนิดสำหรับวัดไอออนอื่นๆ
- Ion selective electrode ขั้วชนิดนี้สามารถแบ่งออกได้อีกหลายแบบตามชนิดของเมมเบรนที่ใช้

Liquid membrane electrode

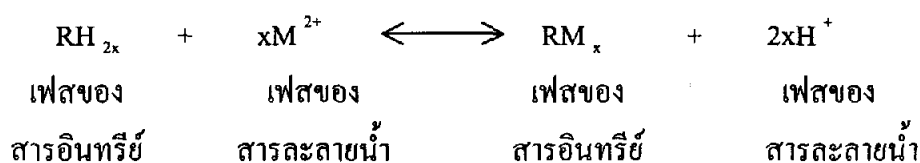
Solid-state or precipitate electrode

Gas-sensing membrane electrode

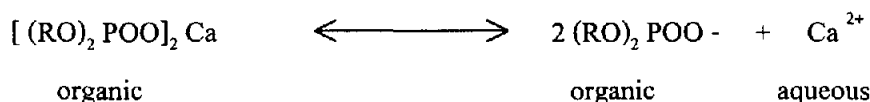
Enzyme electrode

Coated wire ion selective electrode

Liquid membrane electrode ขั้วเมมเบรนเหลว ศักย์ไฟฟ้าของขั้วเกิดขึ้นเนื่องจากของเหลวอยู่ที่ผิวของเมมเบรนไวต่อ (response) ไอออนในสารละลาย ของเหลวที่อยู่ผิวของเมมเบรนจะเป็นชนิดที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ (immiscible liquid) และไวต่อไอออนชนิดหนึ่งๆ ได้โดยเฉพาะ ของเหลวที่ใช้คือสารอินทรีย์ที่ไม่ระเหยและประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันนอลต่างๆ ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของกรดและเบส จึงทำให้สามารถวิเคราะห์แคตไอออนชนิดที่เป็นโพลีวาเลนซ์ (polyvalence) ได้ดีพอๆกับการวิเคราะห์แอนไอออน เมื่อของเหลวที่เป็นสารอินทรีย์สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ต้องการวิเคราะห์ จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนทำให้เกิดสมดุลของปฏิกิริยาดังนี้



ส่วนของของเหลวที่อยู่ผิวของเมมเบรนซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนคือ aliphatic diester ของกรดฟอสฟอริกที่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นโพลาร์ ความยาวของโซ่ (chain) ของ aliphatic group ในเอสเทอร์ประมาณ 8 – 16 เชน ไดเอสเทอร์จะประกอบด้วยโปรตอนเพียงตัวเดียว ดังนั้น 2 โมเลกุลของของเหลวจะแลกเปลี่ยนไอออนที่สนใจที่เป็นไดวาเลนซ์แคตไอออนได้หนึ่งตัว (ในที่นี้คือแคลเซียม) สารละลายที่อยู่ภายในขั้วคือสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นคงที่ ซึ่งสัมผัสกับเมมเบรนด้านในมี Ag/AgCl เป็นขั้วอ้างอิงภายในจุ่มอยู่ในสารละลาย CaCl_2 สมดุลของการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นดังนี้



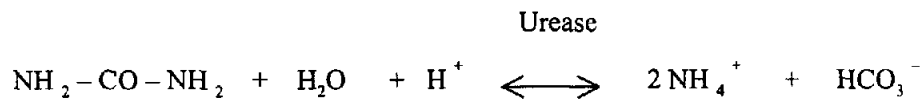
เมื่อมีการแลกเปลี่ยนไอออนที่เมมเบรนจะเกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นเช่นเดียวกับกลาสเมมเบรน ด้วยวิธีเดียวกับการหาศักย์ไฟฟ้าของขั้วกลาส จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Ca^{2+} ในสารละลายกับค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เช่นเดียวกันดังสมการ

$$E_{\text{cell}} = k + \frac{0.0591}{2} \log \frac{1}{[\text{Ca}^{2+}]}$$

Solid - stat and precipitat electrode เมมเบรนชนิดที่เป็นของแข็งก็สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนหรือไวต่อไอออน ที่ต้องการวิเคราะห์ได้เช่นกัน และส่วนใหญ่จะเลือกไวต่อแอนไอออนซึ่งตรงข้ามกับกลาสเมมเบรน ขั้วที่เรียกว่า precipitate electrode เหมาะสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณแฮไลด์ เช่น ไอโอดีน โบรมีน และคลอไรด์ และสามารถวิเคราะห์ซัลไฟด์ได้ด้วย ขั้ว solid - state electrode ที่รู้จักกันดีและใช้งานมากที่สุดคือขั้วที่ไวต่อฟลูออไรด์ (fluoride electrode)

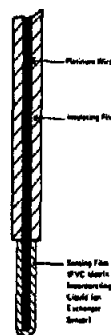
Gas – sensing electrode ขั้วที่ไวต่อก๊าซ ขั้วเมมเบรน ขั้วอ้างอิง และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะบรรจุอยู่ในภาชนะพลาสติกทรงกระบอกโดยมีเมมเบรนที่ยอมให้ก๊าซผ่านได้เป็นตัวกั้นระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสารละลายที่มีก๊าซที่ต้องการวิเคราะห์ละลายอยู่

Enzyme electrode ขั้วเอนไซม์ ใช้วัดความเข้มข้นของเอนไซม์ได้ โดยขั้วที่ใช้จะไวต่อเอนไซม์ ซับสเตรด (enzyme substrates) เช่นในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของซับสเตรดยูเรีย เมื่อมีเอนไซม์ยูริเอส (urease)



ขั้วที่ใช้วัดสารละลายของเอนไซม์ เตรียมได้โดยใช้เอนไซม์ซับสเตรดยูเรีย ทำให้เป็นเจลแล้วฉาบที่ผิวของขั้วกลาสที่เป็นชนิด cation – sensitive เมื่อเอนไซม์เกิดการแพร่กระจายไปที่ขั้วของเจลหรือชั้นที่มีเอนไซม์ซับสเตรด จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้ NH_4^+ ซึ่งไวต่อขั้วกลาส จึงทำให้สามารถวัดปริมาณ NH_4^+ ที่เกิดขึ้นได้ และปริมาณของ NH_4^+ ที่เกิดขึ้นก็สัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของเอนไซม์ ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์หาปริมาณเอนไซม์ได้โดยใช้ขั้วชนิดนี้

Coated wire ion selective electrode (CWISE) โดยอาศัยหลักการเดียวกับ liquid membrane electrode คือส่วนประกอบของเมมเบรนจะมีของเหลวที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ และมีสารที่ไวต่อการแลกเปลี่ยนไอออนกับสารที่สนใจละลายอยู่ โดยที่เมมเบรนนี้จะฉาบอยู่ที่ผิวของลวดตัวนำไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ ลวดแพลตินัม หรือลวดทองแดง จึงเรียกขั้วชนิดนี้ว่า coated wire ion selective electrode (CWISE) สารที่เป็นตัวช่วยทำให้ของเหลวและตัวแลกเปลี่ยนไอออนฉาบอยู่ที่ลวดตัวนำได้คือ พลาสติกไซเซออร์ (plasticizer) พลาสติกไซเซออร์ที่นิยมใช้กันมากคือ โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) ลักษณะของขั้วชนิดนี้แสดงไว้ในรูป



ภาพที่ 3. PVC matrix – membrane coated wire ion selective electrode

ขั้วที่ใช้ PVC เป็นพลาสติกไอออนเลือกที่มีชื่อเรียกเฉพาะว่า PVC matrix – membrane ion selective electrode

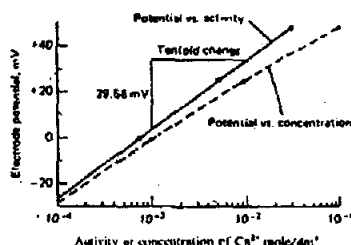
ปัจจุบันการวิเคราะห์โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมาก เพราะสามารถผลิตขั้ว ISE ที่สามารถใช้งานได้เหมาะสม สำหรับงานวิเคราะห์แต่ละอย่างโดยเฉพาะ แต่อย่างไรก็ตามขั้ว ISE ก็มีทั้งข้อดีและข้อเสีย ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าที่ขั้ววัดได้คือ แอคติวิตีไม่ใช่ความเข้มข้น สามารถคำนวณย้อนกลับเพื่อหาความเข้มข้นได้ เมื่อทราบค่าความแรงของไอออน (ionic strength)
2. การวัดโดยใช้ขั้วชนิดนี้ เกิดได้เมื่อสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์อยู่ในรูปของไอออน ดังนั้นข้อผิดพลาดของการวัดจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนหรือเกิดการโปรโตเนต (protonate) เข้ามารบกวน
3. ไม่สามารถวัดสิ่งรบกวนที่มีความไวต่อขั้วได้ เพราะขั้วไม่ได้มีความเฉพาะเจาะจงต่อไอออนที่ต้องการวิเคราะห์เพียงไอออนเดียว
4. ขั้วที่มีลักษณะขุ่นหรือมีสี จะทำให้การวิเคราะห์ไม่ได้ผล
5. ในสารละลายที่เจือจางมากๆ ต้องให้เวลาในการเกิดสมดุลอย่างน้อย 1 นาที แล้วจึงวัดค่า
6. ค่าที่วัดได้จะขึ้นกับอุณหภูมิด้วย เพราะตามสมการของเนินส์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดจะมีเทอม RT/nF อยู่ด้วย
7. สารละลายที่มีปริมาณน้อยๆ ขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถนำมาวิเคราะห์ได้
8. สารละลายตัวอย่างไม่ถูกทำลาย
9. ต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือและขั้วทุกครั้งที่ยัดค่า

2.3 การหาปริมาณโดยวิธีโพเทนชิอเมตริก มี 2 วิธีคือ

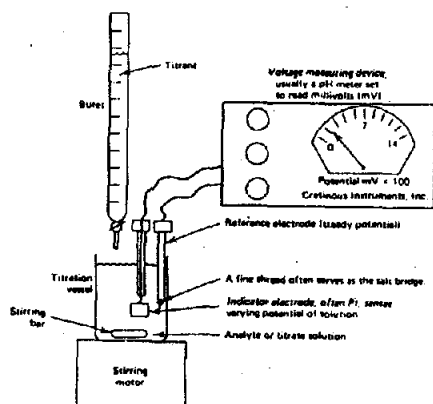
1. วิธีวัดค่าศักย์ไฟฟ้าโดยตรง (direct potentiometric measurement) การวิเคราะห์ทำได้โดยการเลือกขั้วที่บอกรวมที่เหมาะสมวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนเทียบกับขั้วอ้างอิง จากนั้นใช้ขั้วจุดเดิมนุ่มในสารละลายตัวอย่างที่ต้องการหาความเข้มข้นและวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในทำนองเดียวกัน อาจจะใช้สารละลายมาตรฐานเพียงตัวเดียวหรือใช้สารละลายมาตรฐานหลายตัวแล้วสร้างกราฟสอบเทียบ ระหว่างค่า \log ความเข้มข้นของไอออนที่ไวต่อขั้ว หรือ pM เทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ แต่จะต้องเติมอิเล็กโตรไลต์เฉื่อยให้มากเกินพอและเท่ากันลงในสารละลายทุกตัวที่ต้องการทำการทดลองวัดค่าศักย์ไฟฟ้า เพื่อปรับให้ความแรงของไอออนในสารละลายมาตรฐานและสารละลายตัวอย่างเท่ากัน จะทำให้กราฟที่ได้จากการพลอตแอคติวิตีกับศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นกับศักย์ไฟฟ้ามีลักษณะเหมือนกัน ถ้าการทดลองทำโดยมิได้ควบคุมความแรงไอออน จะทำให้แอคติวิตีของสารละลายขึ้นอยู่กับการปริมาณของไอออนที่นำมาวิเคราะห์

เพียงอย่างเดียว จะพบว่ากราฟที่ได้จากการพลอตระหว่างความเข้มข้นและแอคติวิตีมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูป



ภาพที่ 4. แคลิเบรชันเคอร์ฟของแคลเซียมไอออน

2. โปเทนชิอเมตริกไทเทรชัน (potentiometric titration) คือวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้เทคนิคของการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าควบคู่กับเทคนิคของการไทเทรต โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่ถูกไทเทรตทุกครั้งที่มีการเติมไทเทรนต์ลงไป แล้วนำมาสร้างกราฟโดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้เป็นแกน Y และปริมาณไทเทรนต์ที่เติมเป็นแกน X ซึ่งทำให้ได้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับปริมาณไทเทรนต์ที่เรียกว่าไทเทรชันเคอร์ฟ (titration curve) จากไทเทรชันเคอร์ฟ สามารถหาจุดยุติของการไทเทรตได้ การวิเคราะห์ทำได้โดยเลือกใช้ขั้วขั้วบ่อที่เหมาะสมประกอบเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วคาโทดเป็นขั้วอ้างอิง การติดตั้งเครื่องมือเพื่อการวิเคราะห์ทำดังแสดงในรูป



ภาพที่ 5. แสดงการประกอบเครื่องมือเพื่อทำโปเทนชิอเมตริกไทเทรชัน

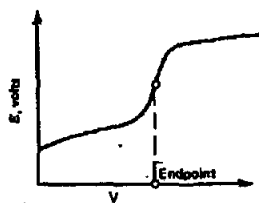
การวิเคราะห์โดยวิธีโปเทนชิอเมตริกไทเทรชันให้ผลถูกต้องมากกว่าการใช้อินดิเคเตอร์ (visual indicator) และใช้ได้กับสารละลายที่เจือจางมากกว่า และสามารถวิเคราะห์ได้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการไทเทรตทุกชนิดคือ

- ปฏิกิริยากรด-เบส (acid-base reaction)
- ปฏิกิริยาการตกตะกอน (precipitation reaction)
- ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexometric reaction)
- ปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction)

วิธีหาจุดยุติของการไทเทรต (End point detection)

จากข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและปริมาณของไทเทรนต์ที่เติม สามารถหาจุดยุติของปฏิกิริยาได้หลายวิธีคือ

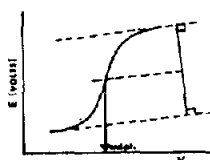
1. การหาจุดยุติจากไทเทรชันเคอร์ฟหรือกราฟที่พลอตได้โดยตรง ไทเทรชันเคอร์ฟที่สร้างโดยการพลอตกราฟให้ปริมาณของไทเทรนต์เป็นแกน X และค่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้เป็นแกน Y จะมีลักษณะเป็นรูปตัว S ดังรูป



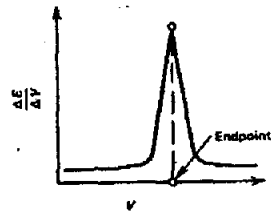
ภาพที่ 6. Experimental curve

ซึ่งมีวิธีหาจุดยุติจากกราฟรูปตัว S ได้ 3 วิธีคือ

- ถ้าลักษณะเคอร์ฟที่ได้สมมาตร (symmetry) หาจุดยุติได้โดยลากเส้นสัมผัสเคอร์ฟตรงส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าน้อยที่สุดทั้งก่อนและหลังจุดยุติ ซึ่งเส้นทั้งสองจะขนานกันเมื่อแบ่งครึ่งเส้นคู่ขนานและลากเส้นขนานให้มาตัดกับเคอร์ฟ จุดตัดบนเคอร์ฟที่ได้คือจุดยุติ จากนั้นหาปริมาณไทเทรนต์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาพอดีที่จุดยุติได้ โดยการลากเส้นขนานกับแกน Y จากจุดยุติมาตัดแกน X ปริมาตรของไทเทรนต์ที่อ่านได้บนแกน X คือปริมาตรของไทเทรนต์ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับสารละลายตัวอย่าง ดังรูป



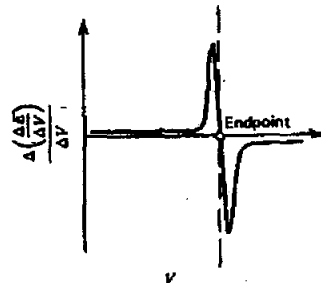
ภาพที่ 7. แสดงวิธีหาจุดยุติของเคอร์ฟที่สมมาตร



ภาพที่ 10. First derivative curve

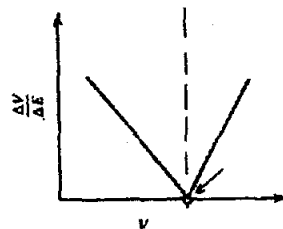
จุดยอดของกราฟหรือจุดที่มี $\Delta E/\Delta V$ มากที่สุดคือจุดยุติ

3. การหาจุดยุติจากกราฟอนุพันธ์ครั้งที่ 2 การหาจุดยุติที่ถูกต้องและแน่นอนกว่า ทำได้โดยการสร้างกราฟอนุพันธ์ครั้งที่ 2 โดยคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของอนุพันธ์ครั้งแรกเทียบกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรครั้งที่สอง $[\Delta(\Delta E/\Delta V)/\Delta V]$ ที่จุดยุติจะมีค่า $\Delta(\Delta E/\Delta V)/\Delta V = 0$ ดังรูป



ภาพที่ 11. Second derivative curve

4. วิธีแกรนพลอต (Gran's plot) นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Gunnar Gran ได้คิดวิธีการสร้างกราฟโดยการพลอตระหว่างเศษส่วนกลับของอนุพันธ์ครั้งแรก ($\Delta V/\Delta E$) เทียบกับปริมาตรของไทเทรนต์ที่เติม ลักษณะกราฟที่ได้เป็นเส้นตรง 2 เส้นตัดกัน ดังแสดงในรูป



ภาพที่ 12. Gran's plot

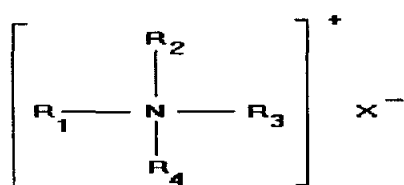
จุดต่ำสุดหรือจุดที่เส้นตรงสองเส้นตัดกันของเคอร์ฟคือจุดยุติ การใช้วิธีนี้อาจพบว่าเส้นตรงช่วงใกล้จุดยุติ จุดที่ใช้พลอตกราฟอาจกระจายได้ ถ้าข้อมูลที่ได้ถูกต้องไม่เพียงพอ ถ้าการทดลองเดิม ปริมาตรแต่ละครั้งเท่ากันตลอด (ΔV คงที่) การสร้างกราฟโดยวิธีแกรนพลอตสามารถใช้ $1/\Delta E$ แทน $\Delta V/\Delta E$ ได้

2.4 สารลดแรงตึงผิว (Surface – active agent or surfactant)

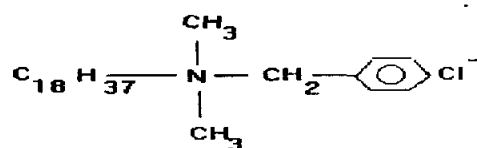
สารลดแรงตึงผิว หมายถึงสารซึ่งเมื่อละลายในน้ำแล้วจะช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ แอนไอออนิก (anionic) แคตไอออนิก (cationic) และนอนไอออนิก (nonionic)

แอนไอออนิกมีคุณสมบัติเป็นสารทำลายแบคทีเรียอย่างอ่อน นอนไอออนิกไม่มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรคแต่มีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิวที่ดี ส่วนแคตไอออนิกมีคุณสมบัติเป็นสารฆ่าเชื้อโรคที่ดี เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง

แคตไอออนิกชนิดที่เป็นที่รู้จักจะเป็นสารประกอบของเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม ได้แก่ ควอท (quats) หรือ แควซ (QACs) เป็นเกลือแอมโมเนียมซึ่งไฮโดรเจนอะตอมถูกแทนที่ด้วยกลุ่มอัลคิล (alkyl) หรือ เอริล (aryl = R) ตัวอย่างเช่น เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ [benzalkonium chloride, $C_6H_5CH_2N(CH_3)_2RCl$] สารตัวนี้ใช้สำหรับทำลายจุลินทรีย์ตามผิวหนังและใช้เป็นตัวฆ่าเชื้อทำความสะอาดเครื่องมือผลิตอาหาร ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังนี้⁶



สูตรโครงสร้างทั่วไปของ QACs



Benzalkonium chloride

ถึงแม้จะไม่มีรายละเอียดเกี่ยวกับขบวนการการฆ่าเชื้อโรคว่าเกิดขึ้นได้อย่างไร แต่จากคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวของแคตไอออนิก ก็ใช้อธิบายถึงกลไกการทำลายเชื้อโรคได้ดังนี้คือ การทำให้ความตึงผิวหน้าของเซลล์จุลินทรีย์ลดลง ซึ่งทำให้เกิดการแตกของเซลล์เนื่องจากโปรตีนภายในเซลล์ถูกทำลาย ทำให้เกิดผลกระทบต่อปฏิกิริยาขบวนการเผาผลาญของเซลล์จึงทำให้เซลล์เชื้อโรคถูกทำลาย

เบนซาลโคเนียมคลอไรด์เป็นสารผสมอัลคิลไดเมทิลเบนซิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (alkyl dimethyl benzylammonium chloride) มีสูตรทั่วไปเป็น $C_6H_5CH_2N(CH_3)_2RCl$ ซึ่ง R หมายถึงสารผสมของอัลคิล (alkyls) จาก C_8H_{17} ถึง $C_{18}H_{37}$ เป็นเกลือแอมโมเนียมชนิดควอเทอร์นารี มีลักษณะเป็นผงหรือของแข็งกึ่งเหลว สีขาวถึงขาวนวล มีกลิ่นเฉพาะตัว ละลายได้ดีในน้ำ แอลกอฮอล์

หรืออะซีโตน จะเกิดฟองถ้าละลายในน้ำแล้วเขย่า ละลายได้เล็กน้อยในเบนซีนและอีเทอร์ เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งานจึงเตรียมเป็นสารละลายเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ ซึ่งจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ ชนิดความเข้มข้นร้อยละ 80 และชนิดความเข้มข้นร้อยละ 50 ความเป็นพิษ เป็นพิษสะสมในร่างกายถ้ากินเข้าทางปากและซึมผ่านทางผิวหนังในปริมาณที่มาก

การนำมาใช้ประโยชน์ สามารถใช้ฆ่าเชื้อโรคได้แต่ต้องใช้ที่ความเข้มข้นต่ำๆประมาณ 1 ต่อ 200,000 ส่วน^๕ ปัจจุบันจึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ทำความสะอาดฟาร์มปลุกสัตว์ ใช้เป็นสารป้องกันและรักษาการติดเชื้อแบคทีเรีย โดยใช้ลดปริมาณของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในน้ำที่มีคุณภาพไม่ดีและเสี่ยงต่อการติดเชื้อ เช่นลดปริมาณแพลงตอนและสาหร่ายที่อยู่ในบ่อเลี้ยงกุ้ง ใช้เตรียมน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงกุ้ง

วิธีวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ ทำได้ 2 วิธี คือวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน The United States Pharmacopeia (USP) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยวิธีไทเทรตจากปฏิกิริยารีดักชัน โดยใช้สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO₃) เป็นไทแทรนต์ และวิธีวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของขั้วขั้วบอกที่ไวต่อไอออนชนิดแคตไอออนหรือวิธีโพเทนชิอเมตริกดิเทรตชัน

2.5 ความเป็นพิษของคลอโรฟอร์ม (Chloroform, CHCl₃)^๖

คลอโรฟอร์มหรือที่เรารู้จักในชื่อของไตรคลอโรมีเทน (trichloromethane) หรือ เมทิลไทรคลอไรด์ (methyltrichloride) มีลักษณะเป็นของเหลว ระเหยง่าย ไม่มีสี กลิ่นระคายเคืองไม่ชวนดม มีรสหวานเล็กน้อย สมัยก่อนใช้คลอโรฟอร์มเป็นยาสลบในการผ่าตัดคนไข้แต่ปัจจุบันเลิกใช้แล้ว

คลอโรฟอร์มที่พบในสิ่งแวดล้อมมาจากโรงงานอุตสาหกรรมเคมีและโรงงานผลิตกระดาษ และยังพบคลอโรฟอร์มในบ่อน้ำบาดาลเสีย ในกระบวนการผลิตน้ำดื่มซึ่งใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อโรค

คลอโรฟอร์มระเหยได้รวดเร็วเมื่อสัมผัสอากาศและสามารถละลายได้ดีในน้ำ ดังนั้นจึงพบคลอโรฟอร์มในชั้นน้ำใต้ดินทั่วไป และพบคลอโรฟอร์มปนเปื้อนทั่วไปในอากาศ อาหาร และน้ำ คาดว่ามีคลอโรฟอร์มปนเปื้อนในอากาศประมาณ 0.02 ถึง 0.05 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) และในน้ำดื่มประมาณ 2 ถึง 44 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) ในการอาบน้ำด้วยฝักบัวถ้าใช้เครื่องทำน้ำอุ่นที่อุณหภูมิสูงมากก็อาจจะเกิดคลอโรฟอร์มจากน้ำประปาได้

คลอโรฟอร์มสามารถเข้าสู่ระบบโลหิตภายในร่างกายโดยทางปอดและลำไส้ จากนั้นจะถูกพาไปสู่อวัยวะต่างๆทั่วร่างกาย และไปสะสมอยู่ที่ชั้นไขมัน ตับ ไต คลอโรฟอร์มที่สะสมอยู่ภายในร่างกายจะเกิดการแตกตัว (metabolites) เป็นสารเคมี (chlorinated hydrocarbon) ขนาดเล็ก และสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีชนิดอื่นภายในเซลล์ ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุของการเจ็บป่วยต่างๆของมนุษย์ ถ้าร่างกายได้รับคลอโรฟอร์มสะสมในปริมาณที่มากจะมีผลต่อระบบประสาทส่วนกลางของ

สมอง ดับ และไต การสูดหายใจเอาอากาศที่มีคลอโรฟอร์มปนเป็น 900 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ช่วงระยะเวลาสั้นๆ จะทำให้เหนื่อย มีนงง และปวดศีรษะ

จากการนำหนูที่ตั้งท้องมาทดลองให้สูดหายใจเอาอากาศที่มีคลอโรฟอร์มปนเป็น 30 ถึง 300 ส่วนในล้านส่วน (ppm) พบว่าหนูทดลองเกิดอาการแท้งลูก และพบว่าเกิดมะเร็งในตับและไตของหนูทดลองที่กินอาหารหรือดื่มน้ำที่มีคลอโรฟอร์มปนเป็นปริมาณมากเป็นระยะเวลานานๆ

The Department of Health and Human Service (DHHS) รายงานว่าจากผลการทดลองในสัตว์ทำให้น้ำเชื่อว่าคลอโรฟอร์มเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen)

The International Agency for Research on Cancer (IARC) และ The Environmental Protection Agency (EPA) รายงานว่ามีความเป็นไปได้ที่คลอโรฟอร์มเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) ในมนุษย์

The EPA กำหนดค่าการยอมให้มีได้ของสารไตรเฮโลมีเทนทั้งหมด (รวมคลอโรฟอร์มด้วย) ในน้ำดื่ม ไม่เกิน 100 ไมโครกรัมต่อลิตร (= 1 ppb)

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 ตัวอย่าง

ตัวอย่างเบนซาโคเนียมคลอไรด์ชนิดความเข้มข้นร้อยละ 80 หมายเลขปฏิบัติการ WF.402 เป็นตัวอย่างที่ส่งมาวิเคราะห์ในกลุ่มงานอินทรีย์เคมีวิเคราะห์

3.2 วัสดุอุปกรณ์

- 3.2.1 เครื่องโพเทนชิออมิเตอร์ รุ่น 686 Titroprocessor ยี่ห้อ Metrohm ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.2.2 Ionic surfactant electrode ยี่ห้อ Metrohm ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.2.3 Ag / AgCl reference electrode ยี่ห้อ Metrohm ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.2.4 เครื่องชั่ง รุ่น AX 304 ยี่ห้อ Mettler ประเทศเยอรมนี
- 3.2.5 เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.3 สารเคมี สารละลายและวิธีเตรียม

- 3.3.1 โพแทสเซียมไอโอเดต (Potassium iodate, KIO_3) ชนิด Volumetric grade
- 3.3.2 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอเดต 0.05 โมลต่อลิตร
เตรียมโดย ชั่งโพแทสเซียมไอโอเดต (ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง) 10.7 กรัมพอดี ละลายในน้ำกลั่นทำเป็น 1 ลิตร เก็บในขวดแก้วสีน้ำตาล
- 3.3.3 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide, KI) ชนิด AR grade
- 3.3.4 โพแทสเซียมไอโอไดด์ 1 ต่อ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
เตรียมโดย ชั่งโพแทสเซียมไอโอไดด์ 5 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 100 มล.
- 3.3.5 คลอโรฟอร์ม (Chloroform, $CHCl_3$) ชนิด AR grade
- 3.3.6 กรดเกลือเข้มข้น (Hydrochloric acid) ชนิด AR grade ความถ่วงจำเพาะ 1.18
- 3.3.7 กรดเกลือเจือจาง 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร
เตรียมโดย ตวงกรดเกลือเข้มข้น 50 มล. ผสมน้ำกลั่น 50 มล.
- 3.3.8 แป้ง (Starch indicator) ชนิด AR grade
- 3.3.9 สารละลายน้ำแป้ง เข้มข้นร้อยละ 0.5
เตรียมโดย ชั่งแป้ง 0.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 10 มล. นำน้ำกลั่นที่ต้มเดือดใหม่ๆ 90 มล. เทลงในสารละลายน้ำแป้งคนด้วยแท่งแก้ว จนได้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- 3.3.10 โซเดียมลอริลซัลเฟต (Sodium lauryl sulfate หรือ Sodium dodecyl sulfate หรือ SLS, $C_{12}H_{25}NaO_4S$) น้ำหนักโมเลกุล 288.38 กรัมต่อโมล ชนิด Lab grade

3.3.11 สารละลายมาตรฐานโซเดียมลอริลซัลเฟต 0.01 โมลต่อลิตร
เตรียมโดย ชั่งโซเดียมลอริลซัลเฟต 2.9 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ทำเป็น 1 ลิตร
การหาความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานโซเดียมลอริลซัลเฟต 0.01 โมลต่อลิตร⁴

- ชั่งโซเดียมลอริลซัลเฟต 5 ± 0.2 กรัม ให้อ่านค่าได้ละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ในขวดกลั่นขนาด 250 มล.
- บีบดัดกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร จำนวน 25 มล. ใส่ในขวดกลั่น ต่อเข้ากับเครื่องควบแน่นแก้ว กลั่นกลับ (reflux) โดยใช้ความร้อนไม่สูงนัก แล้วค่อยๆ เพิ่มความร้อนขึ้น จนกระทั่งได้ของเหลวคล้ายน้ำมันลอยอยู่ด้านบน
- นำตัวให้ความร้อนออก ปล่อยให้ขวดกลั่นเย็นเท่าอุณหภูมิห้อง ค่อยๆรินแอลกอฮอล์ 30 มล.ล้างควบแน่นแก้วอย่างระวัง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น
- เติมฟีนอลทาไลน์อินดิเคเตอร์ 2 – 3 หยด ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร จนกระทั่งถึงจุดยุติได้สารละลายสีชมพูอ่อน
- ทำแบลنگก์โดยการไตเตรตสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร จำนวน 25 มล. ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร

$$\text{ความบริสุทธิ์ของโซเดียมลอริลซัลเฟต} = \frac{28.84 (V1 - V2) T}{m1}$$

- เมื่อ $V1$ = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)
- $V2$ = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ไทเทรตแบลنگก์ (มล.)
- T = ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน NaOH (โมลต่อลิตร)
- $m1$ = น้ำหนักของโซเดียมลอริลซัลเฟต (กรัม)
- 28.84 = น้ำหนักโมเลกุลของโซเดียมลอริลซัลเฟต (กรัมต่อโมล)

$$\text{ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลซัลเฟต} = \frac{m2 \times \text{purity} (\%)}{288.4 \times 100} \quad (\text{โมลต่อลิตร})$$

- เมื่อ $m2$ = น้ำหนักของโซเดียมลอริลซัลเฟตที่ใช้เตรียมสารละลายมาตรฐาน (กรัม)

3.3.12 กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Sulphuric acid, H₂SO₄) AR grade ความถ่วงจำเพาะ 1.84

3.3.13 สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.5 โมลต่อลิตร

เตรียมโดย ตวงกรดซัลฟูริกเข้มข้น 13.9 มล. ค่อยๆเทลงในน้ำกลั่นประมาณ 500 มล. คนให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทิ้งไว้ให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้อง เจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1 ลิตร

3.3.14 ฟีนอลทาไลน์อินดิเคเตอร์ (Phenolphthaleine indicator) ความเข้มข้นร้อยละ 1
เตรียมโดย ชั่งฟีนอลทาไลน์ 1 กรัม ละลายในแอลกอฮอล์ 100 มล.

2.3.15 แอลกอฮอล์ (Ethanol, EtOH) ความเข้มข้นร้อยละ 95

2.3.16 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) AR grade

2.3.17 สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร

เตรียมโดย ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นที่ต้มไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว ทำเป็น 1 ลิตรเก็บในขวดพลาสติก

การหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร

โดยการไทเทรตกับสารมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, KHP) 1.0 กรัม (อบแห้งที่อุณหภูมิ 120° ซ นาน 2 ชม.) ละลายในน้ำกลั่นที่ต้มไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว 25 มล. ใช้ฟีนอลทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์

$$M = \frac{\text{น.น. KHP} \times 1000}{204.23 \quad \text{มล. ของ NaOH}}$$

2.3.18 เบนซีโทเนียมคลอไรด์ (Benzethonium หรือ N-Benzyl-N,N-dimethyl-N-[4-(1, 1, 3, 3-tetramethyl-butyl)-phenoxyethoxyether] ammonium chloride, $C_{27}H_{42}ClNO_2$) น้ำหนักโมเลกุล 448.18 กรัมต่อโมล

2.3.19 สารละลายเบนซีโทเนียมคลอไรด์ 0.01 โมลต่อลิตร

เตรียมโดย ชั่งเบนซีโทเนียมคลอไรด์ 4.4818 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ทำเป็น 1 ลิตร

2.3.20 สารละลายเบนซีโทเนียมคลอไรด์ 0.001 โมลต่อลิตร

เตรียมโดย ปิเปตต์สารละลายเบนซีโทเนียมคลอไรด์ 0.01 โมลต่อลิตร 100 มล. แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่น ทำเป็นทำเป็น 1 ลิตร

3.4 วิธีดำเนินการ

3.4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาโคเนียมคลอไรด์ โดยการไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน KIO_3 วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน The United States Pharmacopeia⁸

- ชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัมให้อ่านค่าละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่กรวยแยก ขนาด 250 มล. ที่มีน้ำกลั่นอยู่ 35 มล. และคลอโรฟอร์ม 25 มล.

- ปิเปตต์สารละลาย KI (1 ต่อ 20) ที่เตรียมใหม่ๆ 10 มล. ใส่ลงในกรวยแยก ปิดจุก เขย่า ตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายแยกชั้น

- ไซชั่นคลอโรฟอร์มทิ้ง ใส่คลอโรฟอร์มใหม่ 10 มล. ลงในกรวยแยก เขย่า ตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายแยกชั้น ไซชั่นคลอโรฟอร์มทิ้ง ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง (เพื่อล้างชั้นน้ำที่มีตัวอย่างละลายอยู่)

- นำชั้นน้ำ (ที่มีตัวอย่างละลายอยู่) ถ่ายใส่ขวดแก้วไอโอดีน ล้างกรวยแยกด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งๆละ 5 มล. นำน้ำล้างไปรวมกับสารละลายตัวอย่าง

- เติมกรดเกลือเข้มข้น 40 มล. ปิดจุกผสมให้เข้ากัน นำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน KIO_3 0.05 โมลต่อลิตร จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนสีจากน้ำตาลเข้มเป็นน้ำตาลอ่อน

- เติมคลอโรฟอร์ม 5 มล. ปิดจุก เขย่าขวดอย่างแรง เปิดจุกเติมสารละลายมาตรฐาน KIO_3 0.05 โมลต่อลิตร ทีละหยดพร้อมทั้งเขย่าตัวอย่างทุกครั้ง จนกระทั่งชั้นคลอโรฟอร์มไม่มีสี และชั้นน้ำกลายเป็นสีเหลืองอ่อนๆ (V1)

- วิเคราะห์แบล็กก็โดยการทำให้เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง แต่ใช้น้ำกลั่น 20 มล. แทนตัวอย่าง (V2)

- ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน KIO_3 ที่แตกต่างกันระหว่างตัวอย่างกับแบล็กก็ หมายถึงปริมาณ KIO_3 ที่สมมูลย์พอดีกับน้ำหนักเบนซาโคเนียมคลอไรด์ในตัวอย่าง
คำนวณหาปริมาณเบนซาโคเนียมคลอไรด์โดยใช้สูตร

$$\% \text{เบนซาโคเนียมคลอไรด์} = \frac{(V2 - V1)M}{1000} \times 720 \times \frac{100}{W}$$

V1 = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน KIO_3 ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)

V2 = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน KIO_3 ที่ใช้ไทเทรตแบล็กก็ (มล.)

M = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน KIO_3 (โมลต่อลิตร)

W = น้ำหนักของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ (กรัม)

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1.

ตารางที่ 1. แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีมาตรฐาน

The United States Pharmacopeia

การวิเคราะห์ ครั้งที่	ผลการวิเคราะห์ เบนซาโคเนียมคลอไรด์ ร้อยละ	$(x - \bar{x})$ ร้อยละ	$(x - \bar{x})^2$ ร้อยละ
1	80.1927	0.0195	3.8×10^{-4}
2	80.2218	-0.0096	9.2×10^{-5}
3	80.1945	0.0177	3.1×10^{-4}
4	80.2346	-0.0224	5.0×10^{-4}
5	80.1789	0.0333	1.1×10^{-3}
6	80.2208	-0.0086	7.3×10^{-5}
7	80.2504	-0.0382	1.4×10^{-3}
8	80.1548	0.0574	3.2×10^{-3}
9	80.2277	-0.0155	2.4×10^{-4}
10	80.2459	-0.0337	1.1×10^{-3}
Mean	80.2122	—	$\Sigma = 0.0083$
S_1	0.030911	—	—
S_1^2	0.000955	—	0.000922
RSD	0.0386		

แต่เนื่องจากไม่สามารถหาสารมาตรฐานเบนซาโคเนียมคลอไรด์ที่รู้ปริมาณแน่นอน (CRM) มาใช้เพื่อทดสอบความถูกต้องด้วยวิธี The United States Pharmacopeia ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวอย่างเบนซาโคเนียมคลอไรด์มาทำการทดสอบ โดยวิเคราะห์ 10 ซ้ำ แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย (\bar{X}) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) โดยพิจารณาเกณฑ์การยอมรับค่า RSD ด้วยสมการ Horwitz ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่า RSD จะแปรตามความเข้มข้นของผลการวิเคราะห์ ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{RSD} &= \pm 2^{(1-0.5 \log C)} \\ &= 1.9339 \end{aligned}$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นเบนซาโคเนียมคลอไรด์ร้อยละ 80

จากผลการทดสอบ (ตารางที่ 1) ได้ค่า RSD = 0.0386 ซึ่งน้อยกว่า RSD ที่คำนวณได้จากสมการ Horwitz และเนื่องวิธีวิเคราะห์เป็นวิธีมาตรฐาน จึงสรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณเบนซาโคเนียมคลอไรด์มีความถูกต้องและความเที่ยงเป็นที่ยอมรับได้

3.4.2 การวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาโคเนียมคลอไรด์โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน

3.4.2.1 การตรวจประสิทธิภาพของ Ionic surfactant electrode โดยการวัดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (U) ของสารละลายมาตรฐานแคตไอออนิก ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 10 เท่า ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าจะแตกต่างกันไม่เกิน 59 มิลลิโวลต์ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2.

ตารางที่ 2. แสดงผลการวัดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานสารลดแรงตึงผิวชนิดแคตไอออน (เบนซีโทเนียมคลอไรด์) ที่ความเข้มข้นต่างกัน 10 เท่า

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเบนซีโทเนียมคลอไรด์ (โมลต่อลิตร)	ค่าความต่างศักย์ (U) (มิลลิโวลต์)	ค่าความแตกต่างของความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (มิลลิโวลต์)
0.001	253	12
0.01	265	

3.4.2.2 การหาสถานะความเป็นกรด - ด่างที่เหมาะสม โดยการไทเทรตสารละลายตัวอย่างเบนซาโคเนียมคลอไรด์ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน ที่สถานะความเป็นกรด - ด่างตั้งแต่ 1 ถึง 10 อย่างละ 10 ครั้ง ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมลอริลซัลเฟต 0.01 โมลต่อลิตร ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3

3.4.3 วิธีวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาโคเนียมคลอไรด์โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน

- ชั่งตัวอย่างเบนซาโคเนียมคลอไรด์ประมาณ 0.5 กรัมให้อ่านค่าละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่บีกเกอร์ขนาด 150 มล. เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 60 มล
- นำสารละลายตัวอย่างปรับค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) ให้ได้ประมาณ 7 ± 1
- นำสารละลายตัวอย่างวิเคราะห์ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมลอร์ริลซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตรจนกระทั่งถึงจุดยุติ เครื่องโพเทนชิออมิเตอร์จะคำนวณผลการวิเคราะห์ ปริมาณเบนซาโคเนียมคลอไรด์ โดยใช้สูตร

$$\% \text{เบนซาโคเนียมคลอไรด์} = \frac{M \times V}{1000} \times 360 \times \frac{100}{W}$$

V = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน โซเดียมลอร์ริลซัลเฟต ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)

M = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน โซเดียมลอร์ริลซัลเฟต (โมลต่อลิตร)

W = น้ำหนักของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ (กรัม)

ตารางที่ 3. แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์โดยวิธีโพเทนชิออสเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง ถึง 10

การวิเคราะห์ ครั้งที่	ผลการวิเคราะห์ปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (น้ำหนักโมเลกุล 360) ร้อยละ									
	PH									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80.8568	81.0348	80.7513	80.5218	80.4348	80.2346	80.1694	80.2376	79.9521	78.8668
2	80.7823	80.9750	80.9021	80.5846	80.3694	80.1735	80.2431	80.2347	79.9511	79.0958
3	80.3849	80.2349	80.7733	80.5215	80.3864	80.1803	80.1657	80.1672	79.5515	79.0926
4	80.7875	81.1100	80.9072	81.2085	80.5044	80.2024	80.2424	80.2937	79.9493	79.1501
5	80.7853	80.9671	80.6382	80.5784	80.4542	80.2086	80.1935	80.2352	79.8989	78.9203
6	80.8678	81.1027	80.4479	80.8022	80.4092	80.1626	80.2183	80.1575	79.7618	78.8999
7	80.8814	81.0142	80.8544	80.6891	80.3684	80.1406	80.1716	80.2490	79.9224	79.0428
8	80.7219	80.7783	80.8825	80.8599	80.3962	80.1900	80.2929	80.1749	79.8952	79.0462
9	80.4535	80.9084	80.6952	80.6773	80.5456	80.2222	80.3091	80.2435	79.9437	79.1395
10	80.6997	80.6085	80.7447	80.5459	80.4401	80.1360	80.2068	80.1974	79.7629	78.9990
Mean	80.7221	80.8733	80.7596	80.6989	80.4308	80.1850	80.2212	80.2190	79.8588	79.0253
S ₂	0.170943	0.271141	0.142479	0.213613	0.058256	0.032925	0.050555	0.043219	0.130230	0.100787
S ₂ ²	0.029221	0.148739	0.020977	0.043029	0.003393	0.001084	0.002555	0.001868	0.001021	0.009655
RSD	0.211767	0.335266	0.176424	0.264703	0.072430	0.041061	0.063019	0.053877	0.163075	0.127538

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างเบนซาลโคเนียมคลอไรด์โดยวิธีมาตรฐาน The United States Pharmacopeia 10 ซ้ำ ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4. แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีมาตรฐาน The United States Pharmacopeia 10 ซ้ำ

เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (\bar{X}_1) ร้อยละ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S_1) ร้อยละ	ความแปรปรวน (S_1^2) ร้อยละ
80.2122	0.030911	0.000922

และจากการวิเคราะห์ตัวอย่างเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชันที่สภาวะความเป็นกรด - ค่า 1 ถึง 10 อย่างละ 10 ซ้ำ ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชันที่สภาวะความเป็นกรด - ค่า 1 ถึง 10 อย่างละ 10 ซ้ำ

สภาวะความเป็นกรด-ค่า	เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (\bar{X}_2) ร้อยละ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S_2) ร้อยละ	ความแปรปรวน (S_2^2) ร้อยละ
1	80.7221	0.170943	0.029221
2	80.8733	0.271141	0.073517
3	80.7596	0.142479	0.020300
4	80.6989	0.213613	0.045630
5	80.4308	0.058256	0.003393
6	80.1850	0.032925	0.001084
7	80.2212	0.050555	0.002555
8	80.2190	0.043219	0.001867
9	79.8588	0.130230	0.016959
10	79.0253	0.100787	0.010158

จากค่าความแปรปรวน (S^2) ของผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี นำมาคำนวณหาค่า F และ t ได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบความถูกต้องและความเที่ยงของการวิเคราะห์ด้วยกับแบบจำลอง
โคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีมาตรฐาน The United States Pharmacopeia และวิธีโพเทน
ซีอเมตริกไทเทรชัน

สภาวะความ เป็น กรด - ด่าง	S_2^2	$(S_{\text{pooled}})^2$	S_{pooled}	$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$	$t = \frac{(x_1 - x_2)}{S_{\text{pooled}} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$
1	0.029221	0.015088	0.122833	0.032681	9.282298
2	0.073517	0.037236	0.192966	0.012990	7.660761
3	0.020300	0.010577	0.102844	0.047014	11.901766
4	0.045630	0.023292	0.152617	0.020929	7.130894
5	0.003393	0.002174	0.046626	0.281461	10.483530
6	0.001084	0.001019	0.031912	0.880996	1.905364
7	0.002555	0.001755	0.041892	0.373776	0.480393
8	0.001867	0.001411	0.037563	0.511515	0.404794
9	0.016959	0.008957	0.094641	0.056312	8.349732
10	0.010158	0.005556	0.074541	0.094014	35.604467

หมายเหตุ 1. F จากตาราง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% = 4.026 ($n_1, n_2 = 9, 9$)

2. t จากตาราง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% = 2.18 ($df = 18$)

จากตารางที่ 6 จะพบว่าค่า F และ t จากการคำนวณน้อยกว่าค่า F และ t ที่ได้จากตาราง F-test และ t-test ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 การวิเคราะห์กับแบบจำลองโคเนียมคลอไรด์โดยใช้วิธีโพเทนซีอเมตริกไทเทรชันที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง 6 ถึง 8 ให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและมีความเที่ยงไม่แตกต่างกับวิธีวิธีมาตรฐาน The United States Pharmacopeia

บทที่ 5

วิจารณ์ผล

ความเที่ยงในการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์โดยใช้วิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชันและวิธีตามมาตรฐาน The United States Pharmacopeia ซึ่งทดสอบโดย F-test (ตารางที่ 6) พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ที่ช่วงความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายตัวอย่างตั้งแต่ 1 ถึง 10 จากผลการทดสอบนี้ทำให้สามารถคำนวณ pooled estimate of standard deviation (S_{pooled}) เพื่อใช้เป็น standard deviation ในการทดสอบความแม่นยำด้วย t-test ได้ (ตารางที่ 6) และพบว่าในการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชันและวิธีตามมาตรฐาน The United States Pharmacopeia ให้ความถูกต้องไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ที่ช่วงความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายตัวอย่างตั้งแต่ 6 ถึง 8

จากผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ ที่สภาวะความเป็นกรด-ด่าง ต่างๆ โดยใช้วิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน (ตารางที่ 3) จะพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) อยู่ในเกณฑ์ต่ำ แสดงถึงผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชันมีความเที่ยงสูง แต่ค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์ไม่ถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีตามมาตรฐาน The United States Pharmacopeia ที่ความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 6 และ สูงกว่า 8 ซึ่งอาจจะเกิดจากการแตกตัวของตัวอย่างทำให้การตรวจวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดความคลาดเคลื่อน จึงทำให้เครื่อง โพเทนชิอเมตริกไทเทรชันหาจุดยุติของการไทเทรตผิดพลาด

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชันและวิธีมาตรฐาน The United States Pharmacopeia พบว่าทั้งสองวิธีให้ความถูกต้องและความเที่ยงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพิจารณาจากค่า F-test และ t-test

ดังนั้นสรุปได้ว่าการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ วิธีที่เหมาะสมคือวิธีโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน แต่ต้องปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ให้เป็น 6 ถึง 8 จึงจะให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง โดยพิจารณาจากค่า F-test และ t-test อีกทั้งวิธีนี้ยังเป็นวิธีที่ปลอดภัยต่อผู้ทำการวิเคราะห์และสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์คลอโรฟอร์มในขั้นตอนการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน The United States Pharmacopeia และให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วกว่า

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณส่องแสง เลี้ยวชวลิต ผู้อำนวยการโครงการเคมี คุณจันทร์เพ็ญ ใจ
ธีรภาพกุล หัวหน้ากลุ่มงานอินทรีย์เคมีวิเคราะห์และผู้ร่วมงานในกลุ่มงานอินทรีย์เคมีวิเคราะห์ ที่
ให้คำแนะนำและช่วยเหลือ ขอขอบคุณกรมวิทยาศาสตร์บริการที่ให้ความเอื้อเฟื้อวัสดุ อุปกรณ์และ
สารเคมีต่างๆ ทำให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. ธวัชชัย ศรีวิบูลย์. เคมีวิเคราะห์ 2 Analytical Chemistry II. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2539.
2. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับประกาศทั่วไป พ.ศ. 2543 เรื่องบัญชีรายชื่อวัตถุอันตราย (ฉบับที่ 2). ราชกิจจานุเบกษา. 8 พฤษภาคม 2543. เล่มที่ 117 ตอนพิเศษ 43 ง ฉบับที่ 2
3. Caulcutt, R. and Boddy R. Statistics for Analytical Chemists. London : Chapman and Hall, 1983. p. 201 – 205.
4. International Organization for Standardization. Surface active agents – Detergents – Determination of anionic – active matter (direct two – phase titration procedure), Determination of purity of sodium lauryl sulphate, ISO : 2271 – 1972 (E),
5. Ken R. Payne. Microbiocides. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Vol. A16. New York : VCH, 1990. p. 566.
6. Michael E. Stiles. Disinfectants. In Y.H. Hui. Encyclopedia of Food Science and Technology. vol.1. New York : Wiley, 1992, p. 581 – 583.
7. Miller, J.C. and Miller, J.N. Statistics for Analytical Chemistry. 3rd.ed. Hichister : Ellis Horwood, 1993. p. 55 - 62, 133 - 137.
8. Public Health Statement for Chloroform. 2004. [online] : <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/phs6.html>.
9. The United States Pharmacopeia. USP 24 NF19, p. 2419.
10. Titrimetric / potentiometric Determination of Anionic and Cationic Detergents with The High – sense Surfactant Electrode. Application Bulletin Metrohm. No. 233 / 1 e.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ตารางที่ 7. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธี
มาตรฐาน The United States Pharmacopeia

การวิเคราะห์ ครั้งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง กรัม	ปริมาตรของ Std KIO ₃ ที่ใช้ไทเทรต ตัวอย่าง (มล.)	ปริมาตรของ แบลنگก์-ปริมาตร ของ Std KIO ₃ ที่ใช้ไทเทรต ตัวอย่าง (มล.)	ปริมาณ เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (น้ำหนักโมเลกุล 360) ร้อยละ
1	0.5094	4.05	11.35	80.1927
2	0.5228	3.75	11.65	80.2218
3	0.5140	3.95	11.45	80.1945
4	0.5115	4.00	11.40	80.2346
5	0.5141	3.95	11.45	80.1789
6	0.5071	4.10	11.30	80.2208
7	0.5271	3.65	11.75	80.2504
8	0.5165	3.90	11.50	80.1548
9	0.5093	4.05	11.35	80.2277
10	0.5204	3.80	11.60	80.2459
			Mean	80.2122
			SD	0.030911
			SD ²	0.000955
			RSD	0.038536

หมายเหตุ 1. ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน KIO₃ = 0.05 โมลต่อลิตร

2. ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน KIO₃ ที่ใช้ไทเทรตแบลنگก์ = 15.40 มล.

ภาคผนวก ข.

ผนวก ข. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธี

โพเทนซีอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง 1 ถึง 10

ตารางที่ 8. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธี

โพเทนซีอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 1

การวิเคราะห์ ครั้งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาตรของ สารละลายมาตรฐาน โซเดียมลอริลซัลเฟต ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)	ปริมาณ เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (น้ำหนักโมเลกุล 360) ร้อยละ
1	0.0527	12.073	80.8568
2	0.0526	12.039	80.7823
3	0.0525	11.957	80.3849
4	0.0533	12.200	80.7875
5	0.0530	12.131	80.7853
6	0.0523	11.983	80.8678
7	0.0525	12.260	80.8814
8	0.0526	12.030	80.7219
9	0.0526	11.990	80.4535
10	0.0531	12.141	80.6997
		Mean	80.7221
		SD	0.170943
		SD ²	0.029221
		RSD	0.211767

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมลอริลซัลเฟต = 0.00980414 โมลต่อ
ลิตร

ตารางที่ 9. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธี
โพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ค่า $n = 2$

การวิเคราะห์ ครั้งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาตรของ สารละลายมาตรฐาน โซเดียมลอร์ริลซัลเฟต ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)	ปริมาณ เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (น้ำหนักโมเลกุล 360) ร้อยละ
1	0.0524	12.053	81.0348
2	0.0531	12.205	80.9750
3	0.0533	12.139	80.2349
4	0.0516	11.880	81.1100
5	0.0520	11.951	80.9671
6	0.0519	11.948	81.1027
7	0.0511	11.751	81.0142
8	0.0536	12.290	80.7783
9	0.0530	12.172	80.9084
10	0.0529	12.104	80.6085
		Mean	80.8733
		SD	0.271141
		SD ²	0.073517
		RSD	0.335266

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมลอร์ริลซัลเฟต = 0.0097860 โมลต่อ
ลิตร

ตารางที่ 10. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธี
โพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 3

การวิเคราะห์ ครั้งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาตรของ สารละลายมาตรฐาน โซเดียมลอร์ริลซัลเฟต ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)	ปริมาณ เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (น้ำหนักโมเลกุล 360) ร้อยละ
1	0.0547	12.338	80.7513
2	0.0531	12.194	80.9021
3	0.0539	12.358	80.7733
4	0.0524	12.034	80.9072
5	0.0533	12.200	80.6382
6	0.0516	11.783	80.4479
7	0.0527	12.095	80.8544
8	0.0532	12.214	80.8825
9	0.0529	12.117	80.6952
10	0.0522	11.964	80.7447
		Mean	80.7596
		SD	0.142479
		SD ²	0.020300
		RSD	0.176424

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมลอร์ริลซัลเฟต = 0.0097860 โมลต่อ
ลิตร

ตารางที่ 11. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธี
โพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สถานะความเป็นกรด - ด่าง = 4

การวิเคราะห์ ครั้งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาตรของ สารละลายมาตรฐาน โซเดียมลอริลซัลเฟต ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)	ปริมาณ เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (น้ำหนักโมเลกุล 360) ร้อยละ
1	0.0620	14.094	80.5218
2	0.0596	13.559	80.5846
3	0.0575	13.071	80.5215
4	0.0582	13.343	81.2085
5	0.0564	12.830	80.5784
6	0.0578	13.185	80.8022
7	0.0585	13.326	80.6891
8	0.0563	12.852	80.8599
9	0.0554	12.618	80.6773
10	0.0571	12.984	80.5459
		Mean	80.6989
		SD	0.213613
		SD ²	0.045630
		RSD	0.264703

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมลอริลซัลเฟต = 0.00983394 โมลต่อ
ลิตร

ตารางที่ 12. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธี
โพเทนซีอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ค่า $n = 5$

การวิเคราะห์ ครั้งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาตรของ สารละลายมาตรฐาน โซเดียมลอริลซัลเฟต ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)	ปริมาณ เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (น้ำหนัก โมเลกุล 360) ร้อยละ
1	0.0527	12.010	80.4348
2	0.0528	12.023	80.3694
3	0.0526	11.980	80.3864
4	0.0550	12.545	80.5044
5	0.0546	12.446	80.4542
6	0.0514	11.710	80.4092
7	0.0523	11.909	80.3684
8	0.0519	11.822	80.3962
9	0.0530	12.095	80.5456
10	0.0526	11.988	80.4401
		Mean	80.4308
		SD	0.058256
		SD ²	0.003393
		RSD	0.072430

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมลอริลซัลเฟต = 0.009830414 โมลต่อ
ลิตร

ตารางที่ 13. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธี
โพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ค่า $n = 6$

การวิเคราะห์ ครั้งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาตรของ สารละลายมาตรฐาน โซเดียมลอร์ริลซัลเฟต ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)	ปริมาณ เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (น้ำหนักโมเลกุล 360) ร้อยละ
1	0.0546	12.435	80.2346
2	0.0540	12.289	80.1735
3	0.0536	12.199	80.1803
4	0.0529	12.043	80.2024
5	0.0533	12.135	80.2086
6	0.0525	11.946	80.1626
7	0.0512	11.647	80.1406
8	0.0538	12.246	80.1900
9	0.0542	12.342	80.2222
10	0.0537	12.215	80.1360
		Mean	80.1850
		SD	0.032925
		SD ²	0.001084
		RSD	0.041061

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมลอร์ริลซัลเฟต = 0.00978602 โมลต่อ
ลิตร

ตารางที่ 14. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธี
โพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 7

การวิเคราะห์ ครั้งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาตรของ สารละลายมาตรฐาน โซเดียมลอร์ซิลเฟต ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)	ปริมาณ เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (น้ำหนักโมเลกุล 360) ร้อยละ
1	0.0521	11.856	80.1694
2	0.0525	11.958	80.2431
3	0.0531	12.083	80.1657
4	0.0529	12.049	80.2424
5	0.0536	12.201	80.1935
6	0.0522	11.886	80.2183
7	0.0510	11.606	80.1716
8	0.0527	12.011	80.2929
9	0.0534	12.173	80.3091
10	0.0519	11.816	80.2068
		Mean	80.2212
		SD	0.050555
		SD ²	0.002555
		RSD	0.063019

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมลอร์ซิลเฟต = 0.00978602 โมลต่อ
ลิตร

ตารางที่ 15. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธี
โพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 8

การวิเคราะห์ ครั้งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาตรของ สารละลายมาตรฐาน โซเดียมลอริลซัลเฟต ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)	ปริมาณ เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (น้ำหนักโมเลกุล 360) ร้อยละ
1	0.0546	12.368	80.2376
2	0.0539	12.209	80.2347
3	0.0541	12.244	80.1672
4	0.0554	12.558	80.2937
5	0.0522	11.824	80.2352
6	0.0537	12.152	80.1575
7	0.0554	12.551	80.2490
8	0.0536	12.132	80.1749
9	0.0540	12.233	80.2435
10	0.0526	11.909	80.1974
		Mean	80.2190
		SD	0.043219
		SD ²	0.001867
		RSD	0.053877

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมลอริลซัลเฟต = 0.0098394 โมลต่อ
ลิตร

ตารางที่ 16. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธี
โพเทนซีอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ค่า $n = 9$

การวิเคราะห์ ครั้งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาตรของ สารละลายมาตรฐาน โซเดียมลอริลซัลเฟต ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)	ปริมาณ เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (น้ำหนักโมเลกุล 360) ร้อยละ
1	0.0546	12.324	79.9521
2	0.0513	11.579	79.9511
3	0.0552	12.397	79.5515
4	0.0545	12.301	79.9493
5	0.0523	11.797	79.8989
6	0.0537	12.092	79.7618
7	0.0579	13.064	79.9224
8	0.0551	12.428	79.8952
9	0.0543	12.255	79.9437
10	0.0527	11.867	79.7629
		Mean	79.8588
		SD	0.130230
		SD ²	0.016959
		RSD	0.163075

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมลอริลซัลเฟต = 0.0098394 โมลต่อ
ลิตร

ตารางที่ 17. แสดงข้อมูลดิบของการวิเคราะห์หาปริมาณเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ โดยวิธี
โพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ที่สภาวะความเป็นกรด - ด่าง = 10

การวิเคราะห์ ครั้งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาตรของ สารละลายมาตรฐาน โซเดียมลอริลซัลเฟต ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)	ปริมาณ เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (น้ำหนักโมเลกุล 360) ร้อยละ
1	0.0532	11.845	78.8668
2	0.0546	12.192	79.0958
3	0.0511	11.410	79.0926
4	0.0542	12.111	79.1501
5	0.0539	12.009	78.9203
6	0.0554	12.340	78.8999
7	0.0537	11.983	79.0428
8	0.0529	11.805	79.0462
9	0.0538	12.020	79.1395
10	0.0549	12.244	78.9990
		Mean	79.0253
		SD	0.100787
		SD ²	0.010158
		RSD	0.127538

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมลอริลซัลเฟต = 0.0098394 โมลต่อ
ลิตร