

เอกสารผลงานทางวิชาการ  
เพื่อประเมินแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 7ว

ของ  
นางสาวไตรดา ชุนโห  
ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 6ว

เรื่อง  
การตรวจสอบพารามิเตอร์ของวิธีทดสอบ  
ปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

โครงการเคมี  
กรมวิทยาศาสตร์บริการ  
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
พ.ศ.2547

## บทคัดย่อ

จากการตรวจสอบพารามิเตอร์ของวิธีทดสอบ การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่าง โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์โดยตรวจสอบทั้งหมด 8 พารามิเตอร์คือ หาค่าความไวของเครื่องมือ (Sensitivity)หาช่วงความเป็นเส้นตรง(Lincarity) ค่าขีดจำกัดต่ำ สุดของเครื่องมือ(Instrumental detection limit,IDL) คือ 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ(Limit of quantitative,LOQ)คือ 0.04 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบ(Method detection limit,MDL)คือ 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของวิธีทดสอบ(Limit of quantitative,LOQ)คือ 0.16 มิลลิกรัม/ลิตร การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้น(Matrix effects)พบว่ากราฟที่ได้จากการพล็อตระหว่างความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานแคดเมียมกับความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่เติมลงในตัวอย่างโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น0.5 ,1.0 และ2.0มิลลิกรัม/ลิตรได้ค่า $R^2 = 1$  ความเที่ยง(Precision)แสดงในรูปร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์(Relative standard deviation,% RSD) ร้อยละ 0.36-2.3 ความแม่นยำ(Accuracy)แสดงในรูปร้อยละการกลับคืน(%Recovery)ร้อยละ100.6-101.3

ผลการวิเคราะห์ปริมาณ แคดเมียม(มิลลิกรัม/กิโลกรัม) ไม่พบ โดยปริมาณที่วิเคราะห์ได้น้อยกว่า MDLคือ 0.05 (มิลลิกรัม/ลิตร)ในตัวอย่างโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ค่าความแม่นยำ(Accuracy)แสดงในรูปร้อยละการกลับคืน(%Recovery) คือร้อยละ 98.7 – 104.8

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
สารบัญ	ii
สารบัญตาราง	iii
สารบัญภาพ	iv
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ปัญหาและที่มาของการทดลอง	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษาทดลอง	1
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	1
1.5 ระยะเวลาดำเนินการ	1
1.6 ขั้นตอนการดำเนินการ	2
บทที่ 2 วัสดุอุปกรณ์	3
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือและวิธีดำเนินการ	
3.1 ตัวอย่าง	9
3.2 วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือ	10
3.3 สารเคมี สารละลายและวิธีเตรียม	10
3.4 วิธีดำเนินการ	12
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์	16
บทที่ 5 วิจารณ์ผล	21
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	23
กิตติกรรมประกาศ	25
เอกสารอ้างอิง	26
ภาคผนวก	27

เลขหมู่ ๑๗ คม  
๑๐๓  
เลขทะเบียน 13891  
วันที่ ๒5 / ๙๑ / 49

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1. แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของแคดเมียมในการวิเคราะห์	6
ตารางที่ 2. แสดงสมการเชิงเส้นและ coefficient of determination ของช่วงความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานของแคดเมียม	17
ตารางที่ 3. ข้อมูลการหาช่วงความเป็นเส้นตรงของการวิเคราะห์แคดเมียม วิเคราะห์โดยเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	28
ตารางที่ 4. ข้อมูลการหาความไวของการวิเคราะห์ แคดเมียมวิเคราะห์โดยเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	29
ตารางที่ 5. ข้อมูลการหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือ(Instrument detection limit, IDL)	30
ตารางที่ 6. ข้อมูลการหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดการวิเคราะห์ปริมาณ(Limit of quantitative, LOQ)	31
ตารางที่ 7. ข้อมูลการหาค่าความแม่นยำ(Accuracy) และความเที่ยง(Precision) ของขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ(Limit of quantitative, LOQ)	32
ตารางที่ 8. ข้อมูลการหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบ(Method detection limit, MDL) ของแคดเมียมในตัวอย่าง โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์	33
ตารางที่ 9. ข้อมูลการหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดการวิเคราะห์ปริมาณ(Limit of quantitative, LOQ) แคดเมียมในตัวอย่าง โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์	34
ตารางที่ 10. ข้อมูลการหาค่าความแม่นยำ(Accuracy) และความเที่ยง(Precision) ความเหมาะสมของวิธีทดสอบ	35
ตารางที่ 11. ข้อมูลแสดง Matrix effects ความเหมาะสมของวิธีทดสอบ	36
ตารางที่ 12. แสดงข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมกับค่าการดูดกลืนแสง	37
ตารางที่ 13. ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในตัวอย่าง โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และข้อมูลการหาร้อยละการกลับคืน(%Recovery)	38

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสงของแคดเมียม	16
ภาพที่ 2. แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม	20
ภาพที่ 3. แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่เติมลงไป	20
ภาพที่ 4. แสดงช่วงความสามารถของวิธีทดสอบในการวัดปริมาณแคดเมียมในโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์	23

## บทที่

## บทนำ

### 1.1 ปัญหาและที่มาของการศึกษาทดลอง

เนื่องจากในปัจจุบัน โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ นิยมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ในการผลิตน้ำประปา อุตสาหกรรมกระดาษและเยื่อกระดาษ อุตสาหกรรมเหล็ก เป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นควบคุมคุณภาพของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ได้มีการกำหนดสารเจือปนแคดเมียมให้มีได้ไม่เกิน 5 มิลลิกรัม/ลิตร จึงมีการตรวจสอบพารามิเตอร์ของวิธีทดสอบ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ ทำให้เกิดความมั่นใจในผลการวิเคราะห์จากผู้ให้บริการและสามารถใช้เป็นมาตรฐานวิธีวิเคราะห์ได้

### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อตรวจสอบพารามิเตอร์ของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียมใน โพลีอะลูมิเนียม คลอไรด์ด้วยเครื่องเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษาทดลอง

ทำการศึกษาความสามารถของเครื่องเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และความใช้ได้ของวิธีทดสอบในการหาปริมาณแคดเมียมโดย

- หาความไวของวิธีวิเคราะห์ (Sensitivity)
- หาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือ (Instrumental detection limit , IDL)
- หาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบ (Method detection limit , MDL)
- หาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ (Limit of quantitative , LOQ)และค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ให้กราฟเส้นตรง (Limit of linearity ,LOL)
- หาค่าความสัมพัทธ์เชิงเส้น (Matrix effects)
- หาค่าความแม่นยำ (Accuracy) และ ค่าความเที่ยง (Precision) ของผลการวิเคราะห์ที่ได้จากตัวอย่างโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้มีการตรวจสอบพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบปริมาณแคดเมียมในโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่มีการยืนยัน ความเที่ยงและความแม่นยำ จำนวน 8 พารามิเตอร์

## 1.5 ระยะเวลาดำเนินการ

ตุลาคม 2546 – เมษายน 2547

## 1.6 ขั้นตอนการดำเนินการ

1.6.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารที่เกี่ยวข้อง

1.6.2 จัดหาสารมาตรฐาน เคมีภัณฑ์ เครื่องแก้ว วัสดุ และอุปกรณ์ที่จำเป็นในการเตรียมตัวอย่าง

1.6.3 การตรวจสอบประสิทธิภาพเครื่องมือโดยหาความไวของการวิเคราะห์ การหาช่วงความเป็นเส้นตรงของการวิเคราะห์

1.6.4 หาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือ และหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ

1.6.5 ตรวจสอบพารามิเตอร์ของวิธีทดสอบ

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ( Poly Aluminium Chloride )<sup>2</sup> หรือเรียกย่อ ๆ ว่า “PAC” หรือ PACI ลักษณะทั่วไปของ PAC อาจอยู่ในรูปของผงละเอียดหรือของเหลว PAC ทำให้สารต่างๆ ที่แขวนลอยในน้ำจับตัวกันได้โดยตะกอนสกปรกในน้ำที่มีประจุเป็นลบ จะรวมตัวกับประจุไฟฟ้าบวกของ PAC ในทุกขนาดของอนุภาคตะกอน PAC มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ และมีหลายนิวเคลียสทำให้เกิดตะกอนหนัก จึงสามารถตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว ในปัจจุบันนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการผลิตน้ำประปา และบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

แคดเมียมเป็นสารเจือปนตัวหนึ่งที่มีอยู่ในโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวัตถุดิบหรือสารเคมีที่ใช้ผลิตโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ในการผลิตน้ำประปาถ้ามีปริมาณแคดเมียมอยู่ในโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ใช้ในการตกตะกอนมาก สารตกค้างจากแคดเมียมที่มีอยู่ อาจทำให้เกิดอันตราย โดยความเป็นพิษอาจกล่าวได้ย่อๆดังนี้

#### แคดเมียม (Cd)<sup>3</sup>

แคดเมียมเป็นโลหะสีขาวเงินที่อ่อนใช้ในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น ใช้ทำ Ni-Cd แบตเตอรี่ชนิดอัดประจุใหม่ได้ ใช้ทำโลหะผสมในการชุบโลหะ ใช้ในอุตสาหกรรมยางและพลาสติกต่างๆ สามารถปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกายของคนเราได้ 3 ทาง คือ อากาศ น้ำ และอาหาร ทางอากาศส่วนใหญ่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม ทางน้ำส่วนใหญ่มาจากน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนทางอาหารส่วนใหญ่จะมาจากภาชนะที่ห่อหุ้มหรือบรรจุอาหารเช่น หมึกพิมพ์ที่มีอยู่ในกระดาษห่ออาหาร เนื้อสัตว์ต่างๆ โดยเฉพาะส่วนของเครื่องในจะสะสมแคดเมียมได้มาก พิษของแคดเมียมเมื่อได้รับจากการสูดดมหรือหายใจ อาการแบบเฉียบพลันอย่างอ่อนที่เกิดขึ้น คือ คอแห้ง ระคายคอ แน่นหน้าอก ปวดศีรษะ เมื่อได้รับมากขึ้นจะมีอาการหายใจไม่ออก ไอไม่หยุด อาจถึงเสียชีวิตได้ การได้รับพิษแบบเรื้อรัง จะทำให้เป็นโรคปอดควม เกิดแผลเรื้อรังในปอด ถุงลมในปอดพอง กระดูกเปราะและไตพิการ

การตรวจสอบพารามิเตอร์ของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียมในโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโคปี

เฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่สำหรับใช้วิเคราะห์หาสารปริมาณน้อย ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ได้ง่าย สะดวก และมีความแม่นยำ สามารถวิเคราะห์หาโลหะหนักปริมาณน้อย ๆ ได้ถึงส่วนในล้านส่วน (ppm) เนื่องจากเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสูง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะให้ได้ผลการ



วิเคราะห์ที่มีความน่าเชื่อถือและถูกต้อง ยังผลประโยชน์ต่อผู้ผลิตที่จะนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์

### หลักการของอะตอมมิกแอบซอร์พชัน ( Principle of Atomic Absorption )<sup>1</sup>

อะตอมมิกแอบซอร์พชันเป็นกระบวนการที่อะตอมอิสระของธาตุดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นอันหนึ่งโดยเฉพาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับพลังงานแตกต่างกัน จึงมีการดูดกลืนพลังงานแตกต่างกัน ความยาวคลื่นเหล่านี้เป็นลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละธาตุ

ในการทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดเป็นอะตอมอิสระได้นั้น ต้องมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไป ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปต่างๆกัน เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ หรือความร้อนจากไฟฟ้าเป็นต้น ความร้อนจะทำให้เกิดการแตกตัว (dissociation) หรือเปลี่ยนให้เป็นไอ(vaporization) หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม หรือทำให้อะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้น หรืออาจกลายเป็นไอออนก็ได้

เทคนิคต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโคปีสามารถทำได้หลายวิธีแต่ที่จะกล่าวถึงในที่นี้ได้แก่ Flame Atomization Technique เทคนิคนี้ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างแตกเป็นอะตอมด้วยเปลวไฟ (flame) ที่เหมาะสม เครื่องมือที่ใช้เทคนิคนี้คือ เครื่อง เฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งมีหลักการทำงานคือ สารละลายของตัวอย่างจะถูกดูดผ่านเนบิวไลเซอร์(nebulizer) เข้าไปที่เบิร์นเนอร์ (burner) ที่มีเปลวไฟของก๊าซอะเซทิลีน (acetylene) กับออกซิเจน (oxygen) ทำให้เกิดเป็นอะตอมอิสระ ลำแสงจากหลอดกำเนิดแสงฮอลโลว์แคโทดแลมป์ (hollow cathode lamp) ของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ซึ่งให้พลังงานที่มีความยาวคลื่นเหมาะสม (resonance wavelength) จะผ่านเข้าไปในกลุ่มอะตอมอิสระเหล่านั้นบางส่วนของพลังงานแสงจากหลอดกำเนิดแสงจะถูกดูดกลืนไว้ด้วยอะตอมอิสระ ส่วนที่เหลือผ่านออกมาเข้า ดีเทคเตอร์ (detector) ปริมาณที่อ่านได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับพลังงานแสงต้นเริ่มต้น โดยปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอะตอมอิสระของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนกับความเข้มข้นที่ทราบแน่นอนของสารตัวอย่าง ทำให้สามารถนำมาใช้สำหรับหาความเข้มข้นของธาตุนั้นๆ ในตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ได้ ซึ่งเป็นไปตาม Lambert-Beer Law ดังนี้

$$\log I_0/I_t = \text{Absorbance} = a \times b \times c$$

- เมื่อ  $I_0$  = ความเข้มของพลังงานแสงก่อนผ่านอะตอมอิสระของธาตุ  
 $I_t$  = ความเข้มของพลังงานแสงหลังผ่านอะตอมอิสระของธาตุ  
 $a$  = absorption coefficient (absorptivity) ของแต่ละธาตุ  
 $b$  = ความยาวเซลล์ที่แสงตัดผ่าน

c = ความเข้มข้นของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์  
องค์ประกอบที่สำคัญต่าง ๆ ของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์มี 5 ส่วนด้วยกันดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสง (light source)
2. ส่วนที่ทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมอิสระ (atomizer)
3. โมโนโครเมเตอร์ (monochromator) ซึ่งใช้แยกแสงให้ได้ความยาวคลื่นของแสงที่ต้องการ
4. ดีเทคเตอร์ (detector)
5. เครื่องประมวลผลและอ่านผล (data system and read out unit)

#### การตรวจสอบพารามิเตอร์ของวิธีทดสอบ

##### การหาความไวของการวิเคราะห์ (sensitivity)<sup>6</sup>

การหาความไวของวิธีวิเคราะห์ หรืออาจเรียกว่า characteristic concentration ด้วยเครื่องเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ หมายถึง ความเข้มข้นของธาตุที่ทำให้สัญญาณการดูดกลืนแสงเปลี่ยนไป 0.0044 absorbance unit ค่าดังกล่าวนี้แสดงไว้ในคู่มือการใช้เครื่องมือ โดยกำหนดให้มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 20\%$  โดยคำนวณค่า characteristic concentration จากสูตร

$$\text{characteristic concentration (มิลลิกรัม/ลิตร)} = \frac{0.0044 \times C}{X}$$

เมื่อ C = ความเข้มแสงของสารละลายมาตรฐานที่ใช้ (มิลลิกรัม/ลิตร)

X = ค่าเฉลี่ยของการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานลบด้วยค่าเฉลี่ยของการดูดกลืนแสงของแบล็ค

##### หาช่วงความเป็นเส้นตรง (linearity range) ของกราฟมาตรฐาน<sup>3</sup>

เป็นการแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสง โดยหาความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้น (linear regression) และ coefficient of determination ( $R^2$ )

การคำนวณสมการเชิงเส้น (linear regression) และ coefficient of determination ( $R^2$ ) สามารถคำนวณได้โดยพิจารณาค่า  $R^2$  ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้ามีค่าสูง ( $R^2 > 0.995$ ) แสดงว่ากราฟที่ได้มี goodness of fit of linear graphs

$$R^2 = \frac{(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{(y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{(y_i - \hat{y})^2}{(y_i - \bar{y})^2}$$

เมื่อ  $y_i$  = ค่าการดูดแสงที่วัดได้  
 $\hat{y}$  = ค่าการดูดกลืนแสงที่คำนวณจากสมการเชิงเส้นที่ความเข้มข้นเดียวกับค่า  $y_i$   
 $\bar{y}$  = ค่าเฉลี่ยของการดูดกลืนแสงที่วัดได้

หรือ  $R^2 = r^2$

เมื่อ  $r$  = correlation coefficient

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของแต่ละธาตุในการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1<sup>4</sup>  
**ตารางที่ 1.** แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของธาตุในการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	แคตเมียม
Wavelength, nm	228.8
Slit width, nm	0.7
Instrument type	Flame
Flame type	Air-acetylene
Background correction	on

**หาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือ (Instrumental detection limit, IDL)<sup>4</sup>**

เป็นค่าความเข้มข้นที่ให้ค่าสัญญาณมากกว่า 3 เท่าของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวน ซึ่งสามารถหาได้จากการวัดค่าเบสลงค์ 10 ซ้ำ

$$\text{ขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือ} = \text{ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของเบสลงค์} + 3SD$$

เมื่อ  $SD$  = ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของสารละลายเบสลงค์

**หาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบ (Method detection limit, MDL) หาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ (Limit of quantitative, LOQ)<sup>4</sup>**

ขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบเป็นความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้ในสารตัวอย่างสามารถหาได้จากการวัดค่าสารละลายตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของสารที่ต้องการที่จะวัดในปริมาณต่างๆ ประมาณ 1-5 เท่าของ IDL โดยทำการวัด 10 ซ้ำ

$$\text{ขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบ} = 3 \times S_0$$

เมื่อ  $S_0$  = ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของสารละลายตัวอย่าง

ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณเป็นความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดทางปริมาณได้ในสารตัวอย่างโดยมีความเที่ยงและความแม่นยำในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ หาได้โดยใช้วิธีเดียวกับ MDL

$$\text{ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ} = 10 \times S_0$$

เมื่อ  $S_0$  = ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของสารละลายตัวอย่าง

**หาค่าความเข้มข้นสูงสุดที่วัดได้อย่างน่าเชื่อถือ (Limit of linearity ,LOL)<sup>4</sup>**

ค่าความเข้มข้นสูงสุดที่วัดได้อย่างน่าเชื่อถือ เป็นค่าสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงที่ยังทำให้ค่า coefficient of determination ( $R^2$ ) มากกว่า 0.995

**การควบคุมคุณภาพ<sup>4</sup>**

**การหาค่าความแม่นยำ (Accuracy)**

ค่าความแม่นยำเป็นค่าความใกล้เคียงกันของผลการวัดกับค่าจริง ซึ่งรวมค่าความโน้มเอียงและค่าความเที่ยงของการวิเคราะห์ สามารถหาได้จากการเติมสารละลายมาตรฐานที่ทราบค่าความเข้มข้นลงไปในตัวอย่งที่ต้องการวัด และคำนวณออกมาในรูปร้อยละการกลับคืน (%Recovery)

$$\text{ร้อยละการกลับคืน} = \frac{(B - A) \times 100}{C}$$

เมื่อ A = ความเข้มข้นที่วัดได้ของสารละลายตัวอย่าง (มิลลิกรัม/ลิตร)

B = ความเข้มข้นที่วัดได้ของสารละลายตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน (มิลลิกรัม/ลิตร)

C = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมลงในสารละลายตัวอย่าง (มิลลิกรัม/ลิตร)

เกณฑ์การยอมรับ : ร้อยละการกลับคืนอยู่ในช่วง 85-115%

การหาค่าความเที่ยง (Precision)

ค่าความเที่ยงของการวัดเป็นการนำผลของการวัดซ้ำหลายๆครั้งมาคำนวณซึ่งแสดงผลในรูปร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์(%RSD)

$$\text{ร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์} = \frac{\text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน} \times 100}{\text{ค่าเฉลี่ย}}$$

เกณฑ์การยอมรับ : ความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ไม่เกิน  $\pm 10\%$

**บทที่ 3**  
**วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีดำเนินการ**

**3.1 ตัวอย่าง**

ตัวอย่างโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว ที่กลุ่มงานอินทรีย์เคมีวิเคราะห์ได้รับ จำนวน 17 ตัวอย่าง ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว ที่ใช้ในการศึกษาทดลอง

ลำดับ ที่	ชื่อตัวอย่าง	หมายเลข ปฏิบัติการ	ลักษณะตัวอย่าง	ผู้ส่งตัวอย่าง
1	โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 10%	WM359	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.สยามเอเชีย เคมีคอล อินคัสทรี จก.
2	PAC	WM795	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.ศักดิ์ศรีอุตสาหกรรม จำกัด
3	PAC	WM802	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.โกชู คาเซอิ จก.
4	PAC	WR352	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.ศักดิ์ศรีอุตสาหกรรม จำกัด
5	โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์	WR668	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.อันซิง อินคัสทรี จก
6	Poly aluminium chloride (PAC)	WV326	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.โกชู คาเซอิ จก.
7	PAC	WZ678	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.ศักดิ์ศรีอุตสาหกรรม จำกัด
8	Poly aluminium chloride (PAC)	WZ973	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.โกชู คาเซอิ จก.
9	โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว (พีเอซี)	XA113	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.ไทยพีเอซี อินคัสทรี จำกัด
10	สาร Poly aluminium chloride (PAC)	XC26	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.จีเคไฟน์เคมี จำกัด
11	โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์	XC27	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.เฮลียงเคมีอินเตอร์เนชันแนล จำกัด
12	สาร Poly aluminium chloride (PAC)	XC47	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.เฮลียงเคมีอินเตอร์เนชันแนล จำกัด
13	PAC	XC608	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.ศักดิ์ศรีอุตสาหกรรม จำกัด
14	สารโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์	XD432	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	ฝ่ายควบคุมการผลิตน้ำบางเขน
15	Poly aluminium chloride (PAC)	XD623	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.โกชู คาเซอิ จก.
16	สารโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์	XF59	ของเหลวใส สีเหลืองอ่อน	บ.เฮลียงเคมีอินเตอร์เนชันแนล จำกัด
17	Poly aluminium chloride (PAC 10%)	XF634	ของเหลวใส สีเหลือง	บ.อันซิง อินคัสทรี จก.

### 3.2 วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (atomic absorption spectrophotometer) รุ่น AA 300 ยี่ห้อ Perkin Elmer ประเทศเยอรมนี

3.2.2 เครื่องดีไอออนไนเซอร์ (deionizer) รุ่น D 4742 ยี่ห้อ Branstead ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.3 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Electronic balance) รุ่น BP 301S ยี่ห้อ Satorius ประเทศเยอรมัน

3.2.4 เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการชนิดต่าง ๆ

3.2.5 แท่นให้ความร้อน (hot plate)

3.2.6 หลอดกำเนิดแสงฮอลโลว์แคโทดแลมป์ (hollow cathode lamp) ยี่ห้อ Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา คือ แคดเมียม (Cadmium)

3.2.7 กระดาษกรอง Whatman No.5

### 3.3 สารเคมี สารละลาย และวิธีเตรียม

3.3.1 ก๊าซอะเซทิลีน (acetylene gas)

3.3.2 กรดไนตริกเข้มข้น (nitric acid) ร้อยละ 65 ชนิด AR grade

3.3.3 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (hydrochloric acid) ร้อยละ 37 ชนิด AR grade

3.3.4 กรดไนตริกเข้มข้น (nitric acid) เข้มข้น 1:1 โดยปริมาตร

3.3.5 กรดไนตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร

3.3.6 สารละลายมาตรฐานแคดเมียม (cadmium standard solution) 1000 มิลลิกรัม/ลิตร (ระดับใช้งาน)

3.3.7 สารละลายมาตรฐานแคดเมียม (cadmium standard solution) 1000 มิลลิกรัม/ลิตร (ระดับวัสดุอ้างอิงรับรอง)

3.3.8 สารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร (ระดับใช้งาน)

เตรียมโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติม 1 %HNO<sub>3</sub> จนถึงขีดปริมาตร

3.3.9 สารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร (ระดับใช้งาน)

เตรียมโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติม 1 %HNO<sub>3</sub> จนถึงขีดปริมาตร

3.3.10 สารละลายมาตรฐานแคดเมียม ความเข้มข้น 0.5 , 1.0 และ 3.0 มิลลิกรัม/ลิตร (ระดับใช้งาน)

เตรียมโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตรจำนวน 5 มิลลิลิตรสำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียม ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัม/ลิตรและปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตรจำนวน 1 และ 3 มิลลิลิตรตามลำดับ สำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียม ความเข้มข้น 1.0 และ 3.0 มิลลิกรัม/ลิตรแล้วเติม 1 %HNO<sub>3</sub> จนถึงขีดปริมาตร

3.3.11 สารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร(ระดับวัสดุอ้างอิงรับรอง)

เตรียมโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตรจำนวน 10 มิลลิลิตรใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติม 1 %HNO<sub>3</sub> จนถึงขีดปริมาตร

3.3.12 สารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร(ระดับวัสดุอ้างอิงรับรอง)

เตรียมโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตรจำนวน 10 มิลลิลิตรใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติม 1 %HNO<sub>3</sub> จนถึงขีดปริมาตร

3.3.13 สารละลายมาตรฐานแคดเมียม ความเข้มข้น 0.04 , 0.1 , 0.16 , 0.3 , 0.5 , 0.7 , 1.0, 1.5 , 2.0 , 3.0 , 5.0, และ 7.0 มิลลิกรัม/ลิตร(ระดับวัสดุอ้างอิงรับรอง)

เตรียมโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตรจำนวน 0.4 , 1 , 1.6 , 3. , 5 และ 7 มิลลิลิตรสำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียม ความเข้มข้น 0.04 , 0.1 , 0.16 , 0.3 , 0.5 , และ 0.7 มิลลิกรัม/ลิตรและปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตรจำนวน 1, 1.5 , 2 , 3 , 5 , และ 7 มิลลิลิตรสำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียม ความเข้มข้น 1.0, 1.5 , 2.0 , 3.0 , 5.0, และ 7.0 มิลลิกรัม/ลิตรแล้วเติม 1 %HNO<sub>3</sub> จนถึงขีดปริมาตร

3.3.14 น้ำกลั่น ในที่นี้หมายถึง น้ำดีไอออนไนเซอร์ (deionizer water) เตรียมโดยนำน้ำประปาที่ผ่านการกลั่น 2 ครั้งไปผ่านเครื่องดีไอออนไนเซอร์



### 3.4 วิธีดำเนินการ<sup>(46)</sup>

#### 3.4.1 การตรวจสอบพารามิเตอร์

##### 3.4.1.1 หาความไวของวิธีวิเคราะห์ (sensitivity)

- วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม และสารละลายแบลงค์ ของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม จำนวน 5 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย
- หาค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ลบด้วยค่าเฉลี่ยของการดูดกลืนแสงของ แบลงค์คำนวณค่าความไวของวิธีวิเคราะห์

ผลการทดลองสรุปดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ 4

##### 3.4.1.2 การวิเคราะห์หาขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือ (instrumental detection limit , IDL)

- วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น คือ 0.5 1.0 และ 3.0 มิลลิกรัม/ลิตร จากข้อ 3.3.10 ด้วยเครื่องเฟลมอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เครื่องจะสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

นำสารละลายแบลงค์ ของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมมาวัดค่าการดูดกลืนแสง 10 ชั่วโมงจะประมวลผลข้อมูลออกมาในรูปความเข้มข้น(มิลลิกรัม/ลิตร)โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานที่สร้างไว้ นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อนำไปหาขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือ

ผลการทดลองสรุปดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ 5

##### 3.4.1.3 การวิเคราะห์หาค่าขีดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ (limit of quantitative , LOQ) ที่คำนวณได้จากข้อ 3.4.1.2

นำค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากข้อ 3.4.1.2 มาคำนวณค่าขีดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ

ผลการทดลองสรุปดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ 6

##### 3.4.1.4 การวิเคราะห์หาขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบ (method detection limit , MDL)

เตรียมสารละลายตัวอย่างที่ปริมาณแคดเมียมอยู่น้อยๆ ซึ่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัม ให้น้ำหนักที่แน่นอนในบีกเกอร์เติมน้ำกลั่นประมาณ 50 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 5 มิลลิลิตรและกรดไนตริกเข้มข้นจำนวน 2 มิลลิลิตรนำตัวอย่างไปตั้งบนแท่นให้ความร้อนจนเดือดประมาณ 2-3 นาทีปล่อยสารละลายตัวอย่างให้เย็น ถ่ายลงในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรและเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตรกรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 5

นำไปวัดความเข้มข้นของสารละลายเทียบกับกราฟมาตรฐานในข้อ 3.4.1.2

- ทำการวิเคราะห์ซ้ำ 10 ซ้ำหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- หาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบ

ผลการทดลองสรุปดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ 8

#### 3.4.1.5 การวิเคราะห์หาค่าขีดต่ำสุดการวิเคราะห์ปริมาณของวิธีทดสอบ (limit of quantitative , LOQ) ที่คำนวณได้จากข้อ 3.4.1.4

- เตรียมสารละลายมาตรฐานปริมาณเท่ากับ LOQ ที่คำนวณได้จากข้อ 3.4.1.4
- วัดความเข้มข้นของสารละลายเทียบกับกราฟมาตรฐานในข้อ 3.4.1.2
- ตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ คำนวณหาค่าความเที่ยง และ ค่าความแม่นยำ

ผลการทดลองสรุปดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ 9

#### 3.4.1.6 การหาช่วงความเป็นเส้นตรงของการวิเคราะห์แคดเมียม

- นำสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.1 , 0.3 ,0.5, 0.7, 1.0 ,1.5, 3.0 ,5.0 และ7.0 มิลลิกรัม/ลิตรจากข้อ 3.3.13 มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

- นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม

- คำนวณสมการเชิงเส้นและcoefficient of determination ( $R^2$ )

ผลการทดลองสรุปดังแสดงในภาพที่ 1 และตารางที่ 2

#### 3.4.1.7 การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้น

- หาค่า matrix effects

นำสารละลายตัวอย่างที่มีความเข้มข้นน้อยๆ มาเติมสารละลายแคดเมียมมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 2.0 มิลลิกรัม/ลิตร เตรียมสารละลายตามข้อ 3.3.13 วัดค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับปริมาณสารละลายแคดเมียมมาตรฐานที่เดิม โดยวิเคราะห์ 10 ซ้ำที่ แต่ละระดับความเข้มข้น คำนวณหาค่า  $R^2$  เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้น

ผลการทดลองสรุปดังแสดงภาพที่ 2 , 3 และภาคผนวกตารางที่ 11 ,12

- หาค่า ความแม่นยำและค่าความเที่ยง

นำสารละลายตัวอย่างที่เตรียมจากข้อ3.4.1.7 มาหาค่าความเข้มข้นแต่ละจุดจุดละ 10 ซ้ำ เทียบกับกราฟสอบเทียบจากข้อ3.4.1.2 ค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความแม่นยำในรูปร้อยละการกลับคืน และค่าความเที่ยงในรูปร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์

ผลการทดลองสรุปดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ 10 ,12

### 3.4.2 การเตรียมตัวอย่างหาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

- ชั่งตัวอย่างโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ประมาณ 5 กรัม ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนในปิอกเกอร์ เติมน้ำกลั่นประมาณ 50 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 5 มิลลิลิตรและกรดไนตริกเข้มข้นจำนวน 2 มิลลิลิตร นำตัวอย่างไปตั้งบนแท่นให้ความร้อนจนเดือดประมาณ 2-3 นาที ปลดยสารละลายตัวอย่างให้เย็น ถ่ายลงในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรและเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตรกรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรองwhatman เบอร์ 5

- ทำการเตรียมสารละลายตัวอย่างทั้งหมดจำนวน 2 ซ้ำ
- เตรียมสารละลายแบลลงค์โดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่าง

### 3.4.3 วิธีวิเคราะห์ การหาปริมาณ แคดเมียม โดยเฟลมอะตอมมิคแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

- วัดค่าความดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม 3 ความเข้มข้นคือ 0.5 , 1.0 และ 3.0 มิลลิกรัม/ลิตรจากข้อ3.3.10 ด้วยเฟลมอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เครื่องจะสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าความดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม นำสารละลายตัวอย่างและสารละลายแบลลงค์จากข้อ 3.4.2 มาวัดค่าความดูดกลืนแสงด้วย เฟลมอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เครื่องจะประมวลผลข้อมูลออกมาในรูปความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร) โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานที่สร้างไว้ นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณผลต่อไป

#### การคำนวณ

$$\text{แคดเมียม (Cd) มิลลิกรัม / กิโลกรัม} = \frac{A \times V}{S}$$

A = ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร) ที่วัดได้ของสารละลายตัวอย่างลบด้วยความเข้มข้นของสารละลายแบลลงค์

V = ปริมาตรเริ่มต้น (มิลลิลิตร)

S = น้ำหนักตัวอย่าง ( กรัม )

ผลการทดลองสรุปดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ 13

### 3.4.4 การควบคุมคุณภาพ(Internal quality control)

- Recovery of spike sample

เตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับข้อ 3.4.2 จำนวน 1 ขวดโดยเติมสารละลายมาตรฐาน แคดเมียม ในข้อ 3.3.11 จำนวน 1 มิลลิลิตรได้ ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัม/ลิตรในสารละลายตัวอย่าง แล้วนำไปวิเคราะห์ตามข้อ 3.4.3

ผลการทดลองสรุปดังแสดงในภาคผนวกตารางที่13

### 3.4.5 การรายงานผล

- ค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง น้อยกว่า MDL รายงานผลการวิเคราะห์ว่า “ ไม่พบ ”
- ค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง มากกว่า MDLแต่น้อยกว่า LOQ รายงานผลการวิเคราะห์ว่า“น้อยกว่าLOQ”
- ค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง มากกว่า LOQ ออกผลการวิเคราะห์เป็นตัวเลขที่คำนวณได้

## บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์

### 4.1 ค่าความไวของวิธีวิเคราะห์ แคดเมียม

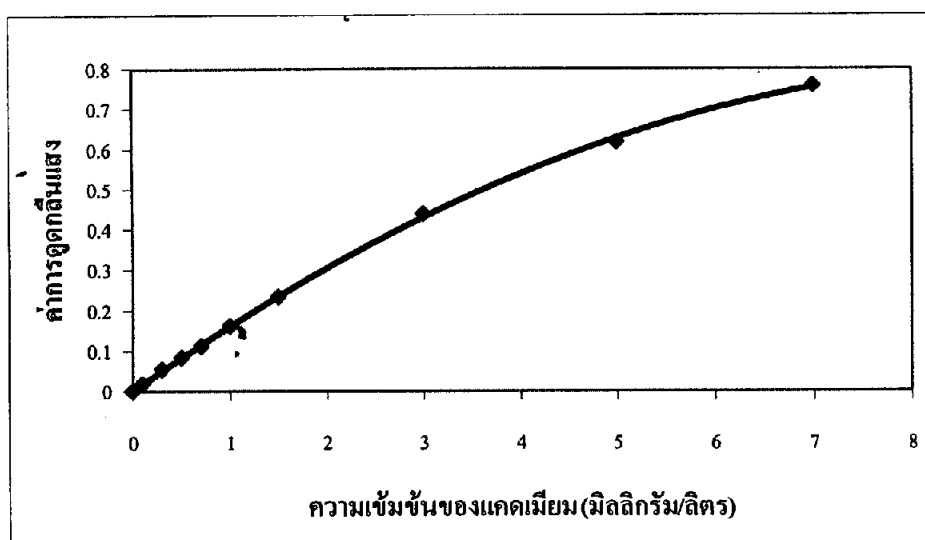
4.1.1 แสดงค่าความไวของการวิเคราะห์ แคดเมียมวิเคราะห์โดยเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ธาตุ	characteristic concentration (มิลลิกรัม / ลิตร)
แคดเมียม	0.028

หมายเหตุ ข้อมูลดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ 4

### 4.2 การหาช่วงความเป็นเส้นตรงของการวิเคราะห์ แคดเมียม

4.2.1 การวิเคราะห์หาช่วงความเป็นเส้นตรงของแคดเมียม วิเคราะห์โดยเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ดัง ภาพที่ 1 และตารางที่ 2



ภาพที่ 1. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสงของแคดเมียม

**ตารางที่ 2.** แสดงสมการเชิงเส้นและ coefficient of determination ของช่วงความเข้มข้นสารละลายมาตรฐาน แคดเมียมวิเคราะห์โดยเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ธาตุ	ช่วงความเข้มข้นที่ใช้ (มิลลิกรัม/ลิตร)	linear regression	R <sup>2</sup>
แคดเมียม	0-0.1	Y=0.183x	1
	0-0.3	Y=0.1803x	0.9999
	0-0.5	Y=0.1702x	0.9965
	0-0.7	Y=0.1637x	0.9952
	0-1.0	Y=0.1629x	0.9977
	0-1.5	Y=0.1589x	0.9977
	0-3.0	Y=0.1501x	0.9961
	0-5.0	Y=0.1327x	0.9812
	0-7.0	Y=0.119x	0.9697

หมายเหตุ ข้อมูลดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ 3

จากภาพที่ 1 ตารางที่ 3 พบว่าสารละลายมาตรฐานแคดเมียมมีช่วงความเข้มข้นสูงสุดมีค่า  $R^2 > 0.995$  เท่ากับ 3.0 มิลลิกรัม/ลิตร

#### 4.3 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือ (IDL)

4.3.1 แสดงค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือ วิเคราะห์โดยเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ธาตุ	ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือ(IDL) (มิลลิกรัม/ลิตร)
แคดเมียม	0.0176

หมายเหตุ ข้อมูลดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ 5

#### 4.4 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ (LOQ)

4.4.1 แสดงค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ(LOQ) วิเคราะห์โดยเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ธาตุ	ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ(LOQ) ( มิลลิกรัม/ลิตร)
แคดเมียม	0.04

หมายเหตุ ข้อมูลดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ 6

#### 4.5 การหาค่าความแม่นยำ (Accuracy)และความเที่ยง(Precision)ของค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ(LOQ)

4.5.1 แสดงค่าความแม่นยำ (Accuracy)แสดงในรูปร้อยละการกลับคืน(%Recovery) และค่าความเที่ยง(Precision)แสดงในรูปร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์(%RSD)ของค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ(LOQ) วิเคราะห์โดยเฟลมอะตอมมิคแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ธาตุ	ร้อยละการกลับคืน(%Recovery)	ร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์(%RSD)
แคดเมียม	100.36	6.19

หมายเหตุ ข้อมูลดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ 7

#### 4.6 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม (Cd)

จากการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ จำนวน 17 ตัวอย่าง

4.6.1 ปริมาณแคดเมียม (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม) ไม่พบ (แสดงในภาคผนวกตารางที่ 13 )

4.6.2 ร้อยละการกลับคืน 98.7 – 104.8 (แสดงในภาคผนวกตารางที่ 13 )

#### 4.7 ผลการตรวจสอบพารามิเตอร์ของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียม (Cd)ในโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

4.7.1 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบ(MDL)

ธาตุ	ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบ(MDL) ( มิลลิกรัม/ลิตร)
แคดเมียม	0.05

หมายเหตุ ข้อมูลดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ 8

#### 4.7.2 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียม(LOQ)

ธาตุ	ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของวิธีทดสอบ(LOQ) ( มิลลิกรัม/ลิตร)
แคดเมียม	0.16

หมายเหตุ ข้อมูลดังแสดงในภาคผนวกตารางที่8

4.7.3 แสดงค่าความแม่นยำ(Accuracy)แสดงในรูปร้อยละการกลับคืน(%Recovery) และความเที่ยง(Precision)แสดงในรูปร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์(%RSD)ของค่าความเข้มข้นต่ำสุดของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียม(LOQ)วิเคราะห์โดยเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ธาตุ	ร้อยละการกลับคืน(%Recovery)	ร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์(%RSD)
แคดเมียม	99.4	2.4

หมายเหตุ ข้อมูล ดังแสดงในภาคผนวกตารางที่9

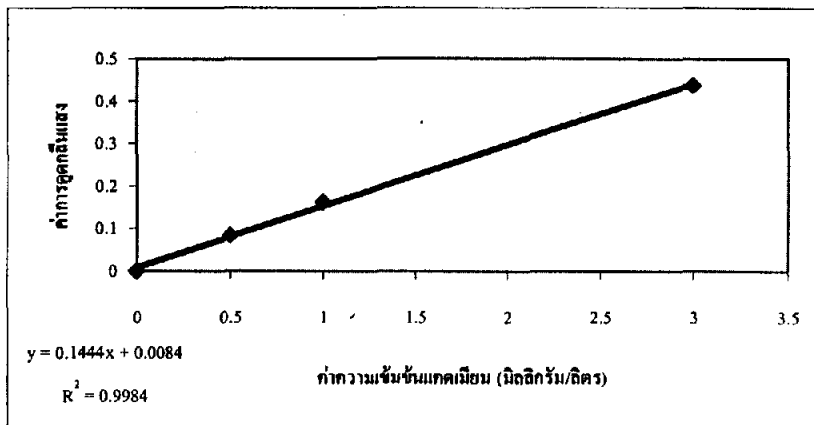
4.7.4 แสดงค่าความแม่นยำ(Accuracy)แสดงในรูปร้อยละการกลับคืน(%Recovery) และความเที่ยง(Precision)แสดงในรูปร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์(%RSD)ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ กลาง สูง (0.5 1.0 และ 2.0 มิลลิกรัม/ลิตร)

ความเข้มข้น มิลลิกรัม/ลิตร	ร้อยละการกลับคืน(%Recovery)	ร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์(%RSD)
0.5	100.7	2.30
1.0	101.3	0.63
2.0	100.6	0.36

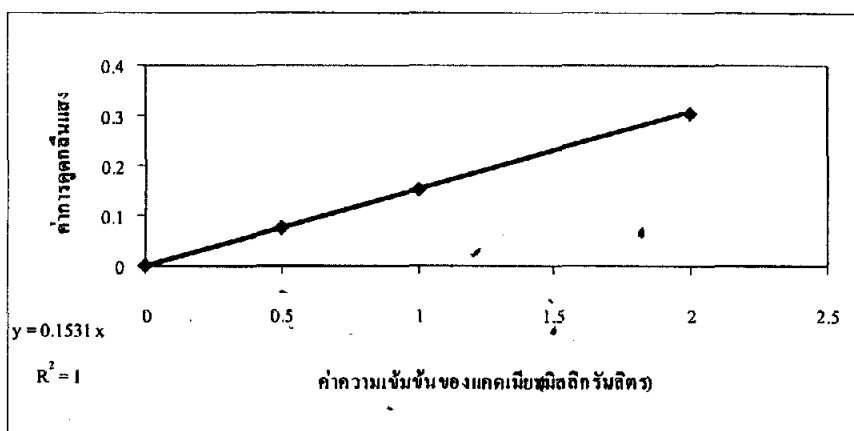
หมายเหตุ ข้อมูล ดังแสดงในภาคผนวกตารางที่10



#### 4.8 ผลการแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของวิธีทดสอบ



**ภาพที่ 2** แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นกับค่าการตกตะกอนแสงของสารละลายมาตรฐานแคลเซียม



**ภาพที่ 3** แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นกับค่าการตกตะกอนแสงของสารละลายมาตรฐานแคลเซียมที่เติมลงไป

จากกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นกับค่าการตกตะกอนแสงของสารละลายมาตรฐานแคลเซียมได้ค่า  $R^2 = 0.9984$  และกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นกับค่าการตกตะกอนแสงของสารละลายมาตรฐานแคลเซียมที่เติมลงไปได้ค่า  $R^2 = 1$

## บทที่ 5

### วิจารณ์ผล

จากการตรวจสอบพารามิเตอร์ของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ พบว่าการวิเคราะห์หาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบ(MDL)เท่ากับ 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร และการวิเคราะห์หาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ(LOQ) เท่ากับ 0.16 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งทั้งสองค่านี้ขึ้นอยู่กับค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแบ่ตงค์ ถ้าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยจะทำให้ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบน้อย การวัดความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่ำๆ สามารถวัดได้ดี แต่ถ้าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าสูงจะทำให้ความสามารถในการวัดสารที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ได้ไม่ดีเพราะค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบมีค่าสูง สำหรับค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณต้องมีการตรวจสอบว่ามีความแม่นยำในช่วงร้อยละ85-115และความเที่ยงอยู่ในช่วง  $\pm 10\%$  จึงอยู่ในเกณฑ์ยอมรับ ส่วนความเข้มข้นสูงสุดที่วัดได้อย่างน่าเชื่อถือ (LOL) สามารถดูได้จากค่า  $R^2 > 0.995$  ซึ่งความเข้มข้นสูงสุดที่วัดได้อย่างน่าเชื่อถือของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่ได้เท่ากับ 3.0 มิลลิกรัม/ลิตร

ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบ(MDL) ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ(LOQ) และค่าความเข้มข้นสูงสุดที่วัดได้อย่างน่าเชื่อถือ(LOL)ทำให้ทราบช่วงการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่สามารถรายงานผลเป็นตัวเลขได้อย่างถูกต้องและแม่นยำอยู่ในช่วง 0.16-3.0 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ถ้าค่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่เครื่องอ่านได้มากกว่า 0.05แต่ไม่ถึง0.16 มิลลิกรัม/ลิตร ให้รายงานผลเป็นค่าน้อยกว่า0.16 มิลลิกรัม/ลิตรและรายงานผลว่าไม่พบเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมที่เครื่องอ่าน ได้มีค่าน้อยกว่า0.05 มิลลิกรัม/ลิตร

ในการหา matrix effects ของสารละลายตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ด้วยการเติมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่มีความเข้มข้น 0.5 ,1.0 และ2.0 มิลลิกรัม/ลิตร กราฟที่ได้มีความเป็นเส้นตรงมีค่า  $R^2=1$  โดยเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมกับสารละลายตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเดียวกัน(ภาพที่2-3)สำหรับค่าการกลับคืนและค่าความแม่นยำของสารละลายตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมลงไปทั้ง 3 ระดับความเข้มข้นพบว่าค่าการกลับคืนอยู่ในช่วง100.6-101.3 % และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์อยู่ในช่วง0.36-2.3 % ดังนั้นแสดงว่าวิธีทดสอบที่ทำการตรวจสอบ สามารถหาปริมาณแคดเมียมได้อย่างมีความเที่ยงและความแม่นยำทำให้เกิดความผิดพลาด จากการรบกวนของmatrix

ผลการวิเคราะห์แคดเมียมในตัวอย่างโพธิ์อะลูมิเนียมคลอไรด์ทั้งหมด 17 ตัวอย่างทำการวิเคราะห์โดยใช้กราฟมาตรฐานแคดเมียมที่ความเข้มข้นคือ 0.5 1.0 และ 3.0 มิลลิกรัม/ลิตรปริมาณแคดเมียม(มิลลิกรัม/กิโลกรัม) ไม่พบ โดยค่าที่ได้น้อยกว่า MDLคือน้อยกว่า 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าความแม่นยำแสดงในรูปค่าการกลับคืนอยู่ในช่วงร้อยละ 98.7-104.8

## บทที่ 6

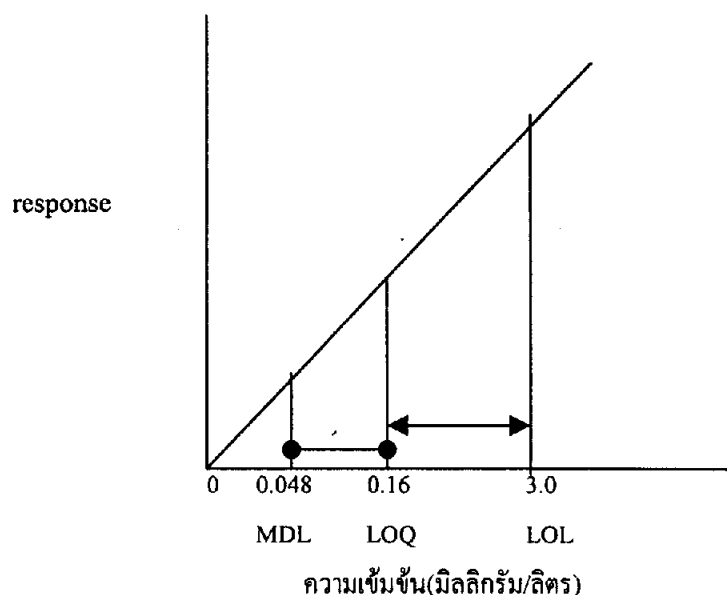
### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการตรวจสอบพารามิเตอร์ของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียมในตัวอย่าง โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์สามารถสรุปได้ว่าวิธีนี้มีความถูกต้อง เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม ในตัวอย่าง โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ผลการวิเคราะห์ไม่พบปริมาณแคดเมียมในตัวอย่าง และค่าความแม่นยำแสดงในรูปร้อยละการกลับคืน (% Recovery) อยู่ในช่วงร้อยละ 98.7 – 104.8

จากการตรวจสอบพารามิเตอร์ของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียมในตัวอย่าง โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ได้ผลสรุปดังนี้

- ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือคือ 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร
- ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณคือ 0.04 มิลลิกรัม/ลิตร
- ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบคือ 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร
- ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของวิธีทดสอบคือ 0.16 มิลลิกรัม/ลิตร
- ค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ให้กราฟเป็นเส้นตรงคือ 3.0 มิลลิกรัม/ลิตร
- ค่าความแม่นยำของผลการวิเคราะห์อยู่ใน 98.7-104.8
- ความสัมพันธ์เชิงเส้น  $R^2=1$
- ค่าความไวของการวิเคราะห์คือ 0.028

ผลการตรวจสอบพารามิเตอร์ของวิธีทดสอบพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดทั้งหมด นั้น แสดงว่าวิธีทดสอบที่ใช้มีความเที่ยงและความแม่นยำของผลการวิเคราะห์สำหรับความสามารถของวิธีทดสอบในการวัดปริมาณแคดเมียมในตัวอย่าง โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์สามารถแสดงดังภาพที่ 4.



ภาพที่ 4. แสดงช่วงความสามารถของวิธีทดสอบในการวัดปริมาณแคดเมียมใน โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

ความสามารถของวิธีวัดที่ถูกต้องและแม่นยำอยู่ในช่วง LOQ – LOL ช่วง MDL - <LOQ สามารถวัดได้แต่ไม่มีความแม่นยำ และช่วงน้อยกว่า MDL หรือสูงกว่า LOL ไม่สามารถวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง

จากการตรวจสอบพารามิเตอร์วิธีทดสอบ ถึงแม้จะสามารถสรุปได้ว่าวิธีที่ทำการตรวจสอบ สามารถวิเคราะห์ผลได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ แต่ผู้ทำการวิเคราะห์อาจต้องมีการปรับปรุงวิธีการทดสอบให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นเพื่อขยายความสามารถของวิธีทดสอบเนื่องจากอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณแคดเมียมใน โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณส่องแสง เลี้ยวชวลิต ผู้อำนวยการโครงการเคมี คุณสมจิตต์ บวร  
วัฒนาโสภณ นักวิทยาศาสตร์ 7ว ที่กรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และแก้ไขข้อบกพร่องให้  
ผลงานนี้สำเร็จสมบูรณ์

## เอกสารอ้างอิง

1. แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.  
กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ ชวนพิมพ์. 2534. หน้า 322-347.
2. สมอ สาร ปีที่25 ฉบับที่283 มกราคม 2542. หน้า6
3. อำนาจ สิทธิตระกูล. มลพิษอันเกิดจากโรคโลหะบางชนิด วารสารวิทยาศาสตร์.  
ตุลาคม,2520,หน้า 34-37
4. American Public Health Association. APHA, **Standard methods for the examination of water and wastewater.** ( part 1010C, 1020B,1030C) 20<sup>th</sup> edition, Washington,DC. 1998. p.1-3 to1-17
5. Japanese Industrail Standard. **Poly aluminium chloride for waterworks.**  
JIS K 1475-1996. p.1
6. The Perkin — Elemer Corporation. **Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrometry.** America : The Perkin — Elemer Corporation, 1994. p.56, 63, 67, 78

## ภาคผนวก



**ตารางที่ 3.** ข้อมูลการหาช่วงความเป็นเส้นตรงของการวิเคราะห์ แคลเมียม วิเคราะห์โดย  
เฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ธาตุ	ความเข้มข้น ( มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าความดูดกลืนแสง
แคลเมียม	0.0	0.0000
	0.1	0.0183
	0.3	0.0540
	0.5	0.0831
	0.7	0.1113
	1.0	0.1622
	1.5	0.2336
	3.0	0.4381
	5.0	0.6182
	7.0	0.7582

**ตารางที่ 4.** ข้อมูลการหาไวของสารวิเคราะห์ แคดเมียม วิเคราะห์โดยเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ค่าการดูดกลืนแสง ครั้งที่	แคดเมียม(Cd)	
	เบตงค์	แคดเมียม 1.5(มิลลิกรัม/ลิตร)
1	-0.0011	0.2329
2	-0.0011	0.23337
3	-0.0014	0.2336
4	-0.0018	0.2334
5	-0.0020	0.2341
เฉลี่ย	-0.0015	0.2335
characteristic concentration ที่คำนวณได้ (mg/L)	0.0281	
characteristic concentration กำหนดจากคู่มือ(mg/L)	0.028	

หมายเหตุ ค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ไม่เกิน  $\pm 20\%$

**ตารางที่ 5.** ข้อมูลการหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือ (Instrumental detection limit, IDL )

การดูดกลืนแสง ครั้งที่	แบลงค์ของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	0.007
2	0.013
3	0.008
4	0.011
5	0.009
6	0.011
7	0.008
8	0.007
9	0.012
10	0.014
ค่าเฉลี่ย	0.01
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.002539
ค่าIDL	0.01761

ตารางที่ 6. ข้อมูลการหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดการวิเคราะห์ปริมาณ(limit of quantitative, LOQ)

ค่าการดูดกลืนแสง ครั้งที่	แบลงค์ของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	0.007
2	0.013
3	0.008
4	0.011
5	0.009
6	0.011
7	0.008
8	0.007
9	0.012
10	0.014
ค่าเฉลี่ย	0.01
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00254
ค่าLOQ	0.03539

**ตารางที่ 7.** ข้อมูลการหาค่าความแม่นยำ(Accuracy)และความเที่ยง(Precision) และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ ปริมาณ(Limit of quantitation, LOQ)

ค่าการดูดกลืนแสง ครั้งที่	ความเข้มข้นของแคดเมียม0.04 (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	0.034
2	0.038
3	0.042
4	0.043
5	0.044
6	0.039
7	0.038
8	0.037
9	0.040
10	0.040
ค่าเฉลี่ย	0.04014
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.002486
ร้อยละส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานสัมพัทธ์	6.1917
ร้อยละการกลับคืน	100.357

หมายเหตุ ร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์  $\pm 10\%$  และ ร้อยละการกลับคืนไม่เกิน 90-110%

**ตารางที่ 8.** ข้อมูลการหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีทดสอบ  
(method detection limit,MDL) แคลเมียมในตัวอย่าง โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

การดูดกลืนแสง ครั้งที่	ความเข้มข้นแคลเมียม (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	0.001
2	0.003
3	0.031
4	0.025
5	0.035
6	0.030
7	0.029
8	-0.003
9	0.000
10	0.035
ค่าเฉลี่ย	0.019
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.016
ค่าMDL	0.048
ค่าLOQ	0.16

**ตารางที่ 9.** ข้อมูลการหาค่าขีดต่ำสุดการวิเคราะห์ปริมาณ(limit of quantitative, LOQ) แคดเมียมในตัวอย่าง โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

ค่าการดูดกลืนแสง ครั้งที่	ความเข้มข้นของแคดเมียม 0.16 (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	0.155
2	0.158
3	0.154
4	0.157
5	0.156
6	0.164
7	0.158
8	0.159
9	0.162
10	0.166
ค่าเฉลี่ย	0.159
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.004
ร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ฐานสัมพัทธ์	2.42
ร้อยละการกลับคืน	99.37

**ตารางที่ 10.** แสดงข้อมูลความแม่นยำ(Accuracy)และความเที่ยง(Precision) ความเหมาะสมของวิธีทดสอบ

ครั้งที่	ความเข้มข้นตัวอย่างแคคเมียมที่วัดได้ (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	ตัวอย่าง+แคคเมียม 0.0 (มิลลิกรัม/ลิตร)	ตัวอย่าง+แคคเมียม 0.5 (มิลลิกรัม/ลิตร)	ตัวอย่าง+แคคเมียม 1.0 (มิลลิกรัม/ลิตร)	ตัวอย่าง+แคคเมียม 2.0 (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	-0.003	0.501	1.015	2.010
2	-0.004	0.516	1.023	2.007
3	0.004	0.523	1.010	2.007
4	-0.001	0.519	1.018	2.008
5	-0.001	0.502	1.003	2.005
6	-0.001	0.498	1.007	2.017
7	-0.002	0.490	1.005	2.022
8	0.007	0.496	1.016	2.012
9	0.002	0.497	1.018	2.014
10	-0.003	0.493	1.012	2.027
ค่าเฉลี่ย	-0.0002	0.5035	1.0127	2.0129
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	-	0.0116	0.0064	0.0072
ร้อยละส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานสัมพัทธ์	-	2.2995	0.6349	0.3571
Corrected conc.	-	-	-	-
ร้อยละการกลับคืน	-	100.7	101.27	100.64

หมายเหตุ ร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ไม่เกิน  $\pm 10\%$  และ ร้อยละการกลับคืน 85-115 %



**ตารางที่ 11.** ข้อมูลแสดง Matrix effects ความเหมาะสมของวิธีทดสอบ

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง			
	ตัวอย่าง+แคดเมียม 0.0มิลลิกรัม/ลิตร	ตัวอย่าง+แคดเมียม 0.5มิลลิกรัม/ลิตร	ตัวอย่าง+แคดเมียม 1.0มิลลิกรัม/ลิตร	ตัวอย่าง+แคดเมียม 2.0มิลลิกรัม/ลิตร
1	0.000	0.0748	0.1543	0.3055
2	-0.001	0.0772	0.1555	0.3051
3	0.001	0.0794	0.1534	0.3050
4	0.000	0.0789	0.1547	0.3052
5	0.000	0.0763	0.1524	0.3047
6	0.000	0.0757	0.1531	0.3065
7	0.000	0.0745	0.1527	0.3073
8	0.001	0.0754	0.1544	0.3057
9	0.000	0.0756	0.1547	0.3061
10	-0.001	0.0749	0.1538	0.3080
ค่าเฉลี่ย	0.000	0.07627	0.1539	0.30591

**ตารางที่ 12.** แสดงข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมกับค่าการดูดกลืนแสง

ธาตุ	ความเข้มข้น(มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
แคดเมียม	0.5	0.0831
	1.0	0.1622
	3.0	0.4381

ตารางที่ 13. ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างโพธิ์และข้อมูลการหาร้อยละการกักเก็บคืน(%Recovery)

	การวิเคราะห์แคดเมียม (Cd)					ร้อยละการกักเก็บคืน
	น้ำหนัก (กรัม)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (มก./ล.)	ปริมาณแคดเมียม (มก./กก.)	ปริมาณแคดเมียม (มก./กก.)	ปริมาณแคดเมียม (มก./กก.)	
WM359	5.0456	-0.004	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	101.8
- ตัวอย่าง	5.0150	-0.002	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	
- ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0970	1.018	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	
WM795	5.0794	-0.003	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	101.7
- ตัวอย่าง	5.0100	-0.002	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	
- ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0985	1.017	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	
WM802	5.0202	-0.011	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	102.8
- ตัวอย่าง	5.0595	-0.006	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	
- ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0737	1.028	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	
WR668	5.0489	-0.005	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	104.8
- ตัวอย่าง	5.0612	-0.005	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	
- ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0047	1.048	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	

ตารางที่ 13. (ต่อ)

	การวิเคราะห์แคดเมียม (Cd)					ร้อยละการกลับคืน
	น้ำหนัก (กรัม)	ความเข้มข้นที่วัดได้ ลบแบบลด(มก./ล.)	ปริมาณแคดเมียม (มก./กก.)	ปริมาณเฉลี่ย (มก./กก.)		
WV326	5.0587	-0.002	ไม่พบ	ไม่พบ		
- ตัวอย่าง	5.0611	0.001	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	98.7
- ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0598	0.987	ไม่พบ	ไม่พบ		
WZ678	5.0387	0.00	ไม่พบ	ไม่พบ		
- ตัวอย่าง	5.0746	-0.003	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	103.5
- ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0166	1.035	ไม่พบ	ไม่พบ		
WZ937	5.0491	-0.007	ไม่พบ	ไม่พบ		
- ตัวอย่าง	5.0213	-0.003	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	102.2
- ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0507	1.022	ไม่พบ	ไม่พบ		
XA113	5.0437	-0.006	ไม่พบ	ไม่พบ		
- ตัวอย่าง	5.0198	-0.006	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	101.2
- ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0258	1.012	ไม่พบ	ไม่พบ		

ตารางที่ 13. (ต่อ)

	การวิเคราะห์แคดเมียม (Cd)					ร้อยละการกลับคืน
	น้ำหนัก (กรัม)	ความเข้มข้นที่วัดได้ ลบแบบลงค่า(มก./ล.)	ปริมาณแคดเมียม (มก./กก.)	ปริมาณเฉลี่ย (มก./กก.)		
WR352	5.0355	-0.005	ไม่พบ	ไม่พบ		
- ตัวอย่าง	5.0375	-0.001	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	101.8
- ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0276	1.018	ไม่พบ	ไม่พบ		
XC26	5.0176	-0.002	ไม่พบ	ไม่พบ		
- ตัวอย่าง	5.0428	-0.005	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	101.9
- ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0717	1.019	ไม่พบ	ไม่พบ		
XC27	5.0281	0.007	ไม่พบ	ไม่พบ		
- ตัวอย่าง	5.0766	-0.003	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	103.1
- ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0999	1.031	ไม่พบ	ไม่พบ		
XC47	5.0196	-0.010	ไม่พบ	ไม่พบ		
- ตัวอย่าง	5.0784	-0.013	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	102.5
- ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0741	1.025	ไม่พบ	ไม่พบ		

ตารางที่ 13. (ต่อ)

	การวิเคราะห์แคดเมียม (Cd)					ร้อยละการกลับคืน
	น้ำหนัก (กรัม)	ความเข้มข้นที่วัดได้ ลบเบaselงค์(มก./ล.)	ปริมาณแคดเมียม (มก./กก.)	ปริมาณเฉลี่ย (มก./กก.)		
XC608 - ตัวอย่าง - ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0241	-0.006	ไม่พบ	ไม่พบ	101.0	
	5.0143	-0.008	ไม่พบ			
	5.0192	1.010	ไม่พบ			
XD432 - ตัวอย่าง - ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0445	-0.005	ไม่พบ	ไม่พบ	103.7	
	5.01421	-0.010	ไม่พบ			
	5.0134	1.037	ไม่พบ			
XD623 - ตัวอย่าง - ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0597	-0.003	ไม่พบ	ไม่พบ	103.8	
	5.0316	-0.000	ไม่พบ			
	5.0414	1.038	ไม่พบ			
XF59 - ตัวอย่าง - ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0179	-0.005	ไม่พบ	ไม่พบ	104.2	
	5.0224	-0.006	ไม่พบ			
	5.0980	1.042	ไม่พบ			
XF634 - ตัวอย่าง - ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน	5.0212	-0.013	ไม่พบ	ไม่พบ	101.6	
	5.0257	-0.007	ไม่พบ			
	5.0268	1.016	ไม่พบ			