

การเปรียบเทียบวิธีการทดสอบหาปริมาณปรอทในกากอุตสาหกรรมและในน้ำสกัด :  
กรณีศึกษาการหาปริมาณปรอทในเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน  
และการหาปริมาณปรอทในกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย

The comparison of method of mercury determination in solid waste and  
leachate : A case study of mercury determination in coal fly ash from  
power plant and sludge from wastewater treatment plant



วรารณ กิจชัยนุกูล<sup>1\*</sup>  
Waraporn Kitchainukul<sup>1\*</sup>

## บทคัดย่อ

การทดสอบหาปริมาณความเข้มข้นของสารปรอททั้งหมด (Total Mercury) ในสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญ เนื่องจากสารปรอทมีความเป็นพิษสูงและกฎหมายสิ่งแวดล้อมในประเทศไทยกำหนดให้ต้องทดสอบหาปริมาณความเข้มข้นของสารปรอททั้งหมดในสิ่งแวดล้อมที่ความเข้มข้นต่ำ ทั้งนี้ค่ามาตรฐานความเข้มข้นของปริมาณปรอททั้งหมดที่ยอมรับได้ในสิ่งแวดล้อมจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับว่าเป็นค่ามาตรฐานใด เช่น น้ำผิวดินมีค่าไม่เกิน 2 ไมโครกรัมต่อลิตร อากาศที่ระบายออกจากโรงงานที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงและไม่มี การเผาไหม้เชื้อเพลิงมีค่าไม่เกิน 2.4 และ 3.0 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และกากอุตสาหกรรมมีค่าไม่เกิน 0.200 มิลลิกรัมต่อลิตรน้ำสกัด (Soluble Threshold Limit Concentration, STLC) เป็นต้น วิธีการทดสอบหาปริมาณความเข้มข้นของสารปรอทในปริมาณต่ำมีหลายวิธี ทั้งนี้การเลือกวิธีการทดสอบที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างและช่วงความเข้มข้นของปรอทที่ต้องการวัดกลุ่มงานสิ่งแวดล้อม กรมวิทยาศาสตร์บริการ ซึ่งเป็นห้องปฏิบัติการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมและเป็นหน่วยงานกลางด้านการทดสอบของประเทศ ผลการทดสอบต้องมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับในระดับสากล การวิจัยเปรียบเทียบผลการทดสอบปริมาณปรอททั้งหมดในวัสดุอ้างอิงและตัวอย่างกากของเสียด้วยวิธีการมาตรฐานตามศักยภาพที่มีของห้องปฏิบัติการ โดยงานวิจัยครั้งนี้จะใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าเป็นตัวแทนของกากของเสียเพื่อศึกษาปริมาณปรอทในน้ำสกัดและใช้วัสดุอ้างอิงที่เตรียมจาก Matrix ของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียและเถ้าลอยเป็นตัวแทนกากของเสียเพื่อหาปริมาณปรอททั้งหมด โดยศึกษาเปรียบเทียบผลการทดสอบปริมาณความเข้มข้นของปรอททั้งหมดที่ได้จากวิธีการทดสอบ 2 วิธี EPA Method 7471 B: Mercury in Solid or Semisolid Waste (Manual Cold-Vapor Technique) และ EPA Method 7473: Mercury in Solid and Solutions by Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry ผลการศึกษา พบว่า เทคนิค Cold-Vapor Technique และ Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry ให้ผลการทดสอบเชิงปริมาณไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในแง่ค่าความไม่แน่นอนเทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry มีค่าความไม่แน่นอนต่ำกว่า Cold - Vapor Technique และสารพิษที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยเทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry มีปริมาณและความเป็นพิษที่ต่ำกว่า Cold-Vapor Technique

## Abstract

Mercury determination in the environment is really important, because of its highly toxic when contaminated in the environment. Therefore, Thai government has limited total mercury concentration in the environment in low concentration. Those concentrations are dependent on each standard for example less than 2 microgram per liter in surface water, less than milligram per cubic meter in ambient air and less than 0.200 milligram per liter in leachate. The alternatives of methods to determine low concentration mercury depend on physical property of sample and range of mercury concentration. The Environment group, Department of Science Service is not only environment testing laboratory but also the third party of testing in Thailand. Therefore, the test results must be of high precision, high accuracy and acceptance. This research focuses on comparison of test results from two methods used to determine low concentration mercury. These two methods are EPA Method 7471 B : Mercury in Solid or Semisolid Waste (Manual Cold-Vapor Technique) and EPA Method 7473 : Mercury in Solid and Solutions by Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry. The reference material (mercury in sludge and mercury in fly ash) is total mercury sample while coal fly ash from power plant is a leachate sample. The test results indicated that Cold - Vapor Technique are not deference and Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry. The comparison of uncertainty between Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry

and Cold - Vapor Technique showed that Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry were less than Cold - Vapor Technique. Moreover, the volume of waste and its toxicity from Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry were less than Cold - Vapor Technique.

**คำสำคัญ:** ปรอท เถ้าลอย วิธีทดสอบหาปริมาณปรอท

**Keywords:** Mercury, Fly ash, Mercury determination

---

<sup>1</sup>กรมวิทยาศาสตร์บริการ

\*Corresponding author E-mail address : waraporn@dss.go.th

## 1. บทนำ (Introduction)

กากอุตสาหกรรมซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตต่างๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องผ่านการทดสอบหาปริมาณสารอันตรายทั้งในรูปของปริมาณสารทั้งหมด (Total Threshold Limit Concentration, TTLC) และปริมาณสารในน้ำสกัด (Soluble Threshold Limit Concentration, STLC) ตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่องสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 [1] ปะปนเป็นสารอันตรายที่สำคัญพาราเมเตอร์หนึ่งที่ถูกกำหนดให้ทดสอบหาปริมาณตามประกาศฯ ดังกล่าว เนื่องจากสารปรอทมีความเป็นพิษสูงและเมื่อสารปรอทปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำจะเปลี่ยนรูปเป็นสารปรอทอินทรีย์ หรือที่เรียกว่า “เมทิลเมอร์คิวรี (Methyl mercury)” ภายใต้อิทธิพลของไร้ออกซิเจน ซึ่งสารดังกล่าวนี้มีความเป็นพิษที่สูงมากเป็นสารที่ก่อให้เกิดโรคพิษของปรอทหรือที่รู้จักในชื่อ โรคมินามาตะ ด้วยเหตุนี้เกณฑ์มาตรฐานความเข้มข้นของสารปรอทที่ยอมให้มีได้ในกากอุตสาหกรรมจึงอยู่ในปริมาณต่ำ กล่าวคือความเข้มข้นของปรอทในรูปของ TTLC กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณปรอททั้งหมดในรูปของ STLC กำหนดไว้ที่ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร (น้ำสกัด) และเกณฑ์การยอมรับจะลดต่ำลงอีกในน้ำเสีย/น้ำทิ้ง ที่กำหนดไว้ที่ 5.0 ไมโครกรัมต่อลิตร ดังนั้นในการเลือกวิธีการทดสอบหาปริมาณปรอทที่ความเข้มข้นต่ำในสิ่งแวดล้อม จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการทดสอบที่ถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ ปัจจุบันการทดสอบหาปริมาณความเข้มข้นของปรอทสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับช่วงความเข้มข้นที่ต้องการทดสอบ และชนิดของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ

ในการวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการวัดปริมาณความเข้มข้นของสารปรอททั้งหมด (Total Mercury) ในตัวอย่างกากอุตสาหกรรมทั้งในรูปของ TTLC และปริมาณความเข้มข้นของสารปรอททั้งหมดในน้ำสกัดในรูปของ STLC โดยศึกษาเปรียบเทียบผลการวัดปริมาณปรอทที่วัดได้ตามวิธีมาตรฐานและตามศักยภาพที่ห้องปฏิบัติการสามารถทำการทดสอบได้ กล่าวคือ

1) การทดสอบหาปริมาณสารปรอททั้งหมดในกากอุตสาหกรรมในรูป TTLC ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบหาปริมาณความเข้มข้นของปรอทด้วยวิธีมาตรฐาน EPA Method 7471 B : Mercury in Solid or Semisolid Waste (Manual Cold - Vapor Technique) [2] และ EPA Method 7473 : Mercury in Solid and Solutions by Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry [3]

2) การทดสอบหาปริมาณสารปรอทในน้ำสกัด (STLC) ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบหาปริมาณความเข้มข้นของปรอทด้วยวิธีมาตรฐาน EPA Method 7470 A : Mercury in Liquid Waste (Manual Cold-Vapor Technique) [4] และ EPA Method 7473 : Mercury in Solid and Solutions by Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry

## 2. วิธีการวิจัย (Experimental)

การศึกษาเปรียบเทียบวิธีทดสอบหาปริมาณปรอทความเข้มข้นต่ำในกากอุตสาหกรรม มีขั้นตอนการศึกษาโดยสังเขปดังนี้

### 2.1 วิธีดำเนินการ

2.1.1 ทดสอบหาปริมาณสารปรอททั้งหมดด้วยเทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry

2.1.1.1 ทดสอบความสามารถของเครื่องมือวิเคราะห์

2.1.1.2 ทดสอบความสามารถของวิธีวิเคราะห์

- ทดสอบความแม่นยำ ความเที่ยง และความไม่แน่นอนของการทดสอบ

- ทดสอบช่วงของการทดสอบ

2.1.2 ทดสอบหาปริมาณสารปรอททั้งหมดด้วยเทคนิค Cold vapor Atomic Absorption Spectrophotometry

2.1.2.1 ทดสอบความสามารถของเครื่องมือวิเคราะห์

2.1.2.2 ทดสอบความสามารถของวิธีวิเคราะห์

- ทดสอบความแม่นยำ ความเที่ยง และความไม่แน่นอนของการทดสอบ

- ทดสอบช่วงของการทดสอบ

2.1.3 เปรียบเทียบความสามารถของทั้งสองวิธีทดสอบ

### 2.2 เครื่องมือ และ อุปกรณ์

2.2.1 Atomic Absorption Spectrophotometry ด้วยเทคนิค Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry

2.2.2 Direct Mercury Analyzer (Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry)

### 2.3 สารเคมี

2.3.1 วิธี Direct Mercury Analyzer (Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry)

1) Deionized water (DI water) : น้ำปราศจากไอออน ที่มีค่า Resistivity ไม่น้อยกว่า 18.2 M .cm.

2) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl), 37% w/w: กรดจะต้องมีการวิเคราะห์ความไม่บริสุทธิ์ โดยค่าความไม่บริสุทธิ์จะต้องน้อยกว่าค่าที่ต่ำที่สุดที่วิธีสามารถวัดได้(MDL) จึงจะสามารถใช้ได้

3) Hg standard solution 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

4) Hg standard solution 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร คนละแหล่งกับข้อ 3

5) Hg standard solution: 0, 2, 5, 10, 20, 50

ไมโครกรัมต่อลิตร และ 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, and

2.0 มิลลิกรัมต่อลิตรเจือจาง Hg standard solution ความเข้มข้น ต่าง ๆ ด้วยสารละลาย 1 % HCl

6) Standard Reference Material 2782: Industrial Sludge traceable to NIST

7) CRM: Fly ash traceable to IRMM ใช้เป็นตัวอย่างควบคุมและทำให้ผลการวัดสอบกลับได้ ใช้เป็นตัวอย่างทดสอบ

2.3.2 วิธี Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry

1) Potassium permanganate AR grade

2) Tin(II)chloride dehydrate AR grade

3) Sodium borohydride AR grade

4) Conc. Nitric acid

5) Conc. Hydrochloric acid

6) Conc. Sulfuric acid

7) Sodium hydroxide AR grade

ขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงในรูปที่ 1

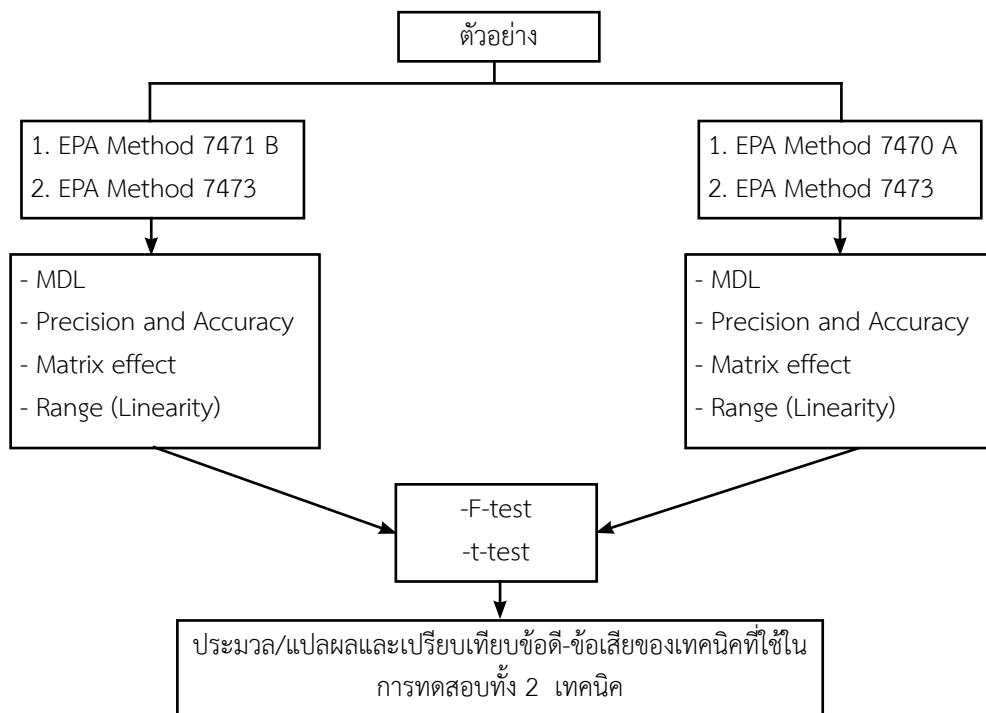
### 3. ผลและวิจารณ์ (Results and Discussion)

#### 3.1 ผลการทดสอบปริมาณปรอททั้งหมด (TTLC)

จากการทดสอบหาปริมาณปรอททั้งหมดในวัสดุอ้างอิง (CRM) โดยใช้เทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry และ Cold Vapor Absorption Spectrophotometry ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.1 – 3.2

#### 3.2 ผลการทดสอบปริมาณปรอทในน้ำสกัด (STLC)

การเปรียบเทียบผลการทดสอบปริมาณปรอทในน้ำสกัดโดยใช้ spike sample ที่มีการเติมสารละลายปรอทมาตรฐานที่รู้ค่าในปริมาณต่างๆ ลงในตัวอย่างเก่าลอยจากโรงไฟฟ้าแทนการใช้วัสดุอ้างอิง โดยสารละลายมาตรฐานที่ใช้ในการเติมต่างแหล่งกับสารละลายมาตรฐานที่ใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน การทดสอบปริมาณปรอทในน้ำสกัดเลือกใช้ spike sample เนื่องจากวัสดุอ้างอิงที่มี matrix เดียวกับเก่าลอยมีราคาสูงมาก และในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างต้องใช้ตัวอย่างในปริมาณมาก (มากกว่า 500 กรัม)



รูปที่ 1 แผนผังขั้นตอนวิธีดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบหาปริมาณปรอททั้งหมดในวัสดุอ้างอิง ประเภทเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าและกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยใช้เทคนิค Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry

ลำดับที่	ปริมาณปรอทใน Method Blank มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ปริมาณปรอทในเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ปริมาณปรอทในกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
1	0.0035	1.62	1.54
2	0.0036	1.36	2.01
3	0.0041	1.30	1.16
4	0.0037	1.14	1.28
5	0.0036	1.24	1.16
6	0.0035	1.18	0.932
7	0.0032	0.988	1.03
8	0.0030	1.06	0.921
9	0.0056	0.987	0.986
10	0.0044	1.31	0.980
ค่าเฉลี่ย	0.0038	1.30	1.20
SD	0.0007	0.3243	0.3422
MDL	0.0059	-	-
LOQ	0.011	-	-
Assign Value, mg/kg	-	1.60 + 0.23	1.10 + 0.19
% Recovery	-	81.25	109.09
%RSD	-	24.94	28.52

หมายเหตุ: ข้อมูลทั้งหมดผ่านการทดสอบ outlier โดยใช้ Grubbs' test พบว่าไม่มี outlier

3.2.1 การทดสอบหาปริมาณปรอทในน้ำสกัดของตัวอย่างเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า โดยใช้เทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry และ Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.3

3.2.2 การทดสอบหาปริมาณปรอทในน้ำสกัดของตัวอย่างเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าที่ spike ปรอทในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 0.010 ถึง 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตรน้ำสกัด (สูง กลาง และ ต่ำ) โดยใช้เทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry และ Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบหาปริมาณปรอททั้งหมดในวัสดุอ้างอิง ประเภทเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าและกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยใช้เทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation and Atomic Absorption Spectrophotometry

ลำดับที่	ปริมาณปรอทใน Method Blank (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณปรอทในเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณปรอทในกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
1	0.0021	1.38	1.32
2	0.0034	1.58	1.29
3	0.0020	1.33	1.25
4	0.0011	1.33	1.22
5	0.0033	1.44	1.21
6	0.0032	1.58	1.28
7	0.0030	1.49	1.23
8	0.0016	1.40	1.18
9	0.0012	1.55	1.17
10	0.0026	1.27	1.23
ค่าเฉลี่ย	0.0023	1.44	1.24
SD	0.0009	0.1058	0.0453
MDL	0.005	-	-
LOQ	0.011	-	-
Assign Value, mg/kg	-	1.60 + 0.23	1.10 + 0.19
% Recovery	-	90.0	112.73
%RSD	-	7.35	3.65

หมายเหตุ: ข้อมูลทั้งหมดผ่านการทดสอบ outlier โดยใช้ Grubbs' test พบว่าไม่มี outlier

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบหาปริมาณปรอทในน้ำสกัดจากตัวอย่างเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าโดยใช้เทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry และ Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry

ลำดับที่	Method Bank	
	Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	0.0034	0.007
2	0.0035	0.003
3	0.0031	0.006
4	0.0031	0.001
5	0.0022	0.002

6	0.0034	0.002
7	0.0018	0.002
8	0.0021	0.001
9	0.0022	0.005
10	0.0022	0.003
ค่าเฉลี่ย	0.0027	0.003
SD	0.0006	0.002
MDL	0.0045	0.009
LOQ	0.0087	0.023

ตารางที่ 3.4 ปริมาณปรอทในน้ำสกัดของตัวอย่างเฝ้ารอยจากโรงไฟฟ้าที่ spike ปรอทในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 0.010 -2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำสกัด

ลำดับที่	Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry (มิลลิกรัมต่อลิตร)				Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	Blank	0.010	0.500	2.00	Blank	0.010	0.500	2.00
1	0.0034	0.0099	0.5348	2.10	0.007	0.010	0.524	2.181
2	0.0035	0.0106	0.5387	2.11	0.003	0.013	0.529	2.041
3	0.0031	0.0107	0.4392	2.10	0.006	0.012	0.535	2.177
4	0.0031	0.0107	0.548	2.14	0.001	0.012	0.544	2.174
5	0.0022	0.0106	0.5467	2.15	0.002	0.011	0.539	2.187
6	0.0034	0.0112	0.5281	2.15	0.002	0.013	0.530	2.149
7	0.0018	0.0107	0.5600	2.15	0.002	0.012	0.481	2.170
8	0.0021	0.0106	0.5467	2.18	0.001	0.011	0.539	2.127
9	0.0022	0.0108	0.5414	2.16	0.005	0.011	0.529	2.196
10	0.0022	0.0109	0.4640	2.18	0.003	0.013	0.536	2.150
ค่าเฉลี่ย	0.0027	0.01067	0.464	2.14	0.003	0.012	0.582	2.155
% Recovery	-	106.6	92.8	107	-	120	116	108
%RSD	-	2.96	8.60	1.39	-	8.33	3.41	2.09

#### 4. สรุป (Conclusion)

การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการทดสอบหาปริมาณปรอททั้งหมด (TTL) ในตัวอย่างเฝ้ารอยจากโรงไฟฟ้า (ตัวแทนของตัวอย่างที่เป็นสารอินทรีย์) และในตัวอย่างกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (ตัวแทนของตัวอย่างที่เป็นสารอินทรีย์) และวิธีการทดสอบหาปริมาณปรอทในน้ำสกัด (STLC) จากตัวอย่างเฝ้ารอยจากโรงไฟฟ้า โดยใช้เทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry และ Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry โดยเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสีย ในด้านต่างๆ ดังนี้

##### 4.1 ด้านผลการทดสอบ

##### 4.1.1 การเปรียบเทียบผลทดสอบ

1) การเปรียบเทียบขีดจำกัดของวิธีทดสอบ (Method Detection Limit, MDL) ขีดจำกัดของปริมาณ (Limit of Quantitation, LOQ) ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบขีดจำกัดของวิธีทดสอบ (Method Detection Limit, MDL) ขีดจำกัดของปริมาณ (Limit of Quantitation, LOQ)

รายการ	วิธีทดสอบ	
	Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry	Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry
TTLC		
MDL, mg/kg	0.005	0.006
LOQ, mg/kg	0.011	0.011
STLC		
MDL, mg/l	0.0045	0.009
LOQ, mg/l	0.0087	0.023

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าขีดจำกัดของวิธีทดสอบและขีดจำกัดของปริมาณที่ได้จากเทคนิคทั้งสองมีค่าไม่แตกต่างกันในการทดสอบในตัวอย่างของแข็ง แต่ในการทดสอบหาปริมาณปรอทในน้ำสกัดพบว่าเทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry มีค่าขีดจำกัดของวิธีทดสอบและขีดจำกัดของปริมาณที่ต่ำกว่ากล่าวคือ สามารถตรวจวัดได้ในปริมาณความเข้มข้นที่น้อยกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความไว (Sensitivity) ของเครื่องมือที่มีสมรรถนะที่แตกต่างกัน อีกทั้งเทคนิค Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry มีขั้นตอนที่มากกว่าทำให้ผลการทดสอบในชุดการทดลองให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ที่สูงกว่าและส่งผลให้ผลการคำนวณค่าขีดจำกัดของวิธีทดสอบและขีดจำกัดของปริมาณมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

2) การเปรียบเทียบผลการทดสอบปริมาณปรอทที่ทดสอบได้ด้วยเทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry และ Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry ภายใต้สมมติฐานผลการทดสอบหาปริมาณปรอทด้วยเทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry และ Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (H0) โดยการทดสอบทางสถิติ ได้แก่ F-test เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเลือก t-test ที่เหมาะสมรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.2 และ 4.3

- ผลการทดสอบทางสถิติเปรียบเทียบความเข้มข้นของปรอททั้งหมด (TTLC) ในวัสดุอ้างอิงทั้งสองชนิด (แก้วลอยและตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย) ที่ทดสอบได้จาก 2 วิธี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.2 การคำนวณค่า F-testของวัสดุอ้างอิง (แก้วลอย): ความเข้มข้นปรอททั้งหมด (TTLC)

F-Test Two-Sample for Variances

	Cold vapor	Thermal Decomposition
Mean	1.2985	1.435
Variance	0.15176722	0.01242778
Observations	10	10
df	9	9
F	8.463035315	
P(F<=f) one-tail	0.001958911	
F Critical one-tail	3.178893104	



ตารางที่ 4.3 การคำนวณค่า t-test ของวัสดุอ้างอิง (เถาลอย): ความเข้มข้นปรอททั้งหมด (TTLC)

	Cold vapor	Thermal Decomposition
Mean	1.2985	1.435
Variance	0.15176722	0.01242778
Observations	10	10
Hypothesized Mean Difference	0	
df	11	
t Stat	-1.258695506	
P(T<=t) one-tail	0.117099083	
t Critical one-tail	1.795884819	
P(T<=t) two-tail	0.234198166	
t Critical two-tail	2.20098516	

ตารางที่ 4.4 การคำนวณค่า F-test ของวัสดุอ้างอิง (ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย): ความเข้มข้นปรอท ทั้งหมด (TTLC)  
F-Test Two-Sample for Variances

	Cold vapor	Thermal Decomposition
Mean	1.1999	1.238
Variance	0.117117878	0.002284444
Observations	10	10
df	9	9
F	51.2675535	
P(F<=f) one-tail	1.16147E-06	
F Critical one-tail	3.178893104	

ตารางที่ 4.5 การคำนวณค่า t-test ของวัสดุอ้างอิง (ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย) : ความเข้มข้นปรอททั้งหมด (TTLC)  
t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances

	Cold vapor	Thermal Decomposition
Mean	1.1999	1.238
Variance	0.117117878	0.002284444
Observations	10	10
Hypothesized Mean Difference	0	
df	9	
t Stat	-0.348673217	
P(T<=t) one-tail	0.367676211	
t Critical one-tail	1.833112933	
P(T<=t) two-tail	0.735352421	
t Critical two-tail	2.262157163	

- ผลการทดสอบทางสถิติเปรียบเทียบความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัด (STLC) จากตัวอย่างที่ทุกความเข้มข้น ที่ทดสอบได้จาก 2 วิธี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.1.2 การเปรียบเทียบผลการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดปริมาณ Mercury โดย Method 7471B: Mercury in solid or semisolid waste (Manual cold - vapor technique) และ Method 7473 B: Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, Amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัดปริมาณปรอทในน้ำสกัด(STLC) ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

แหล่งค่าความไม่แน่นอน	ค่าความไม่แน่นอนในรูปแบบ Relative standard uncertainty	
	Thermal decomposition	Cold vapor
ความเที่ยง ( $U_{\text{Repeatability}}$ )	0.014	0.021
ปริมาตรตัวอย่าง ( $U_{\text{V sample}}$ )	$4.0 \times 10^{-6}$	0.0007
น้ำหนักตัวอย่าง ( $U_{\text{M sample}}$ )	-	-
สารละลายมาตรฐาน ( $U_{\text{Std. calibration}}$ )	0.0271	0.0271
กราฟมาตรฐาน ( $U_{\text{Calibration curve}}$ )	0.053	0.030
ค่าความไม่แน่นอนขยายที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95, mg/L	0.260	0.197
ผลการวัดปรอท, mg/L	2.14	2.16
คิดเป็นร้อยละ	12.1	9.1

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัดปริมาณปรอททั้งหมดในตัวอย่างแก้าลอย (TTLC)

แหล่งค่าความไม่แน่นอน	ค่าความไม่แน่นอนในรูปแบบ Relative standard uncertainty	
	Thermal decomposition	Cold vapor
ความเที่ยง ( $U_{\text{Repeatability}}$ )	0.073	0.250
ปริมาตรตัวอย่าง ( $U_{\text{V sample}}$ )	-	0.0007
น้ำหนักตัวอย่าง ( $U_{\text{M sample}}$ )	0.0035	0.0035
สารละลายมาตรฐาน ( $U_{\text{Std. calibration}}$ )	0.0080	0.0148
กราฟมาตรฐาน ( $U_{\text{Calibration curve}}$ )	0.030	0.030
ค่าความไม่แน่นอนขยายที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95, mg/L	0.213	0.654
ผลการวัดปรอท, mg/L	1.44	1.30
คิดเป็นร้อยละ	14.8	50.3

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัดปริมาณปรอททั้งหมดในตัวอย่างตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (TTLIC)

แหล่งค่าความไม่แน่นอน	ค่าความไม่แน่นอนในรูปแบบ Relative standard uncertainty	
	Thermal decomposition	Cold vapor
ความเที่ยง ( $U_{\text{Repeatability}}$ )	0.0365	0.285
ปริมาตรตัวอย่าง ( $U_{\text{V sample}}$ )	-	0.0007
น้ำหนักตัวอย่าง ( $U_{\text{M sample}}$ )	0.0035	0.0035
สารละลายมาตรฐาน ( $U_{\text{Std. calibration}}$ )	0.0067	0.0148
กราฟมาตรฐาน ( $U_{\text{Calibration curve}}$ )	0.030	0.030
ค่าความไม่แน่นอนขยายที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95, mg/L	0.0929	0.689
ผลการวัดปรอท, mg/L	1.24	1.22
คิดเป็นร้อยละ	7.49	57.4

จากตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัดปริมาณปรอทในตัวอย่างน้ำสกัด ค่าความไม่แน่นอนของวิธี Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry อยู่ที่ร้อยละ 12.1 ในขณะที่วิธี Cold vapor Atomic Absorption Spectrophotometry อยู่ที่ร้อยละ 9.1 ซึ่งไม่แตกต่างกันมากนักและค่าความเที่ยง (%precision ซึ่งหาได้จาก %RSD) ของทั้ง 2 วิธีอยู่ในเกณฑ์ที่ห้องปฏิบัติการกำหนดกล่าวคือไม่เกินร้อยละ 10 (ดังตารางที่ 3.4) ในขณะที่ตารางที่ 4.7 และ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัดปริมาณปรอททั้งหมดในตัวอย่างเถ้าลอยและกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย พบว่าค่าความไม่แน่นอนของการวัดปริมาณปรอทด้วยวิธี Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry มีค่าน้อยกว่าค่าความไม่แน่นอนจากการวัดปริมาณปรอทด้วยวิธี Cold vapor Atomic Absorption Spectrophotometry ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธี Cold vapor Atomic Absorption Spectrophotometry มีขั้นตอนมากกว่าวิธี Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry ทำให้การทำซ้ำมีการแปรปรวนมากกว่าผลการประเมินด้วย F-test จึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตาราง F-test ที่ 4.2 และ 4.4 และด้วยเหตุนี้เองทำให้มีผลกระทบต่อค่าความไม่แน่นอนดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8 ดังนั้นในกรณีที่ต้องการวัดปริมาณทั้งหมดในตัวอย่างเป็นของแข็งวิธี Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry จะเหมาะสมกว่าวิธี Cold vapor Atomic Absorption Spectrophotometry เนื่องจากวิธี Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry ให้ค่าความแม่นยำและความเที่ยง

อยู่ในเกณฑ์ที่ห้องปฏิบัติการยอมรับที่กำหนดไว้ที่ร้อยละ 80-120 และไม่เกินกว่าร้อยละ 10 ตามลำดับ ในขณะที่วิธี Cold vapor Atomic Absorption Spectrophotometry ให้ค่าความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ห้องปฏิบัติการยอมรับ แต่ค่าความเที่ยงมีค่ามากกว่าเกณฑ์ (ดังแสดงในตารางที่ 3.1) และค่าความไม่แน่นอนมีค่าสูงมาก

#### 4.2 ด้านต้นทุน

##### 4.2.1 เครื่องมือในการทดสอบ

Mercury analyzer (Cold vapor) ราคา 1,300,000 บาท โดยคิดอัตราค่าเสื่อมราคาของเครื่องมือร้อยละ 20 ต่อปี และเมื่อทำงานเต็มประสิทธิภาพของศักยภาพในห้องปฏิบัติการสามารถทดสอบตัวอย่างได้ 15 ตัวอย่างต่อวัน ใน 1 ปี คิดวันทำงานที่ 245 วัน ดังนั้นการประมาณการต้นทุนในส่วน of เครื่องในการทดสอบคำนวณจาก

ต้นทุน = (ราคาเครื่องมือ × ค่าเสื่อมราคา) / จำนวนตัวอย่างต่อวัน × จำนวนวันทำงาน...สมการ (1)

ต้นทุน = (1,300,000 บาท × 0.2) / 15 ตัวอย่างต่อวัน × 245 วัน = 70.75 บาทต่อตัวอย่าง

Mercury analyzer (Direct) ราคา 1,500,000 บาท โดยคิดอัตราค่าเสื่อมราคาของเครื่องมือร้อยละ 20 ต่อปีและเมื่อทำงานเต็มประสิทธิภาพของศักยภาพในห้องปฏิบัติการสามารถทดสอบตัวอย่างได้ 60 ตัวอย่างต่อวัน ใน 1 ปี คิดวันทำงานที่ 245 วัน ดังนั้นการประมาณการต้นทุนในส่วน of เครื่องในการทดสอบคำนวณตามสมการ (1)

ต้นทุน = (1,500,000 บาท × 0.2) / 60 ตัวอย่างต่อวัน × 245 วัน = 20.41 บาทต่อตัวอย่าง

#### 4.2.2 สารเคมี

Mercury analyzer (Cold vapor)	Mercury analyzer (Direct)
1. การเตรียมตัวอย่าง - Potassium permanganate (6บาท/ตัวอย่าง) - Sodium borohydride (121บาท/ตัวอย่าง) - Nitric acid (4.5บาท/ตัวอย่าง) - Sulfuric acid (6บาท/ตัวอย่าง) - Sodium hydroxide (3บาท/ตัวอย่าง) 2. การทดสอบ - Tin(II)chloride dehydrate (36.5บาท/ตัวอย่าง) - Hydrochloric acid (4บาท/ตัวอย่าง) - Mercury Standard Solution (3บาท/ตัวอย่าง)	1. การเตรียมตัวอย่าง ไม่มีการเตรียมตัวอย่าง 2. การทดสอบ - Nitric acid (4.5 บาท/ตัวอย่าง) - Mercury Standard Solution (3บาท/ตัวอย่าง)

เมื่อคำนวณต้นทุนทั้งหมดที่เกิดขึ้นพบว่า ต้นทุนการทดสอบปริมาณปรอทด้วยเทคนิค Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry มีค่า 254.75 บาทต่อตัวอย่าง และต้นทุนการทดสอบปริมาณปรอทด้วยเทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry มีค่า 27.91 บาทต่อตัวอย่าง

#### 4.3 ด้านสิ่งแวดล้อม

ในการหาปริมาณปรอทด้วยเทคนิค Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างซึ่งมีการใช้สารเคมีหลายชนิด และต้องใช้ตัวอย่างในปริมาณที่มากพอโดยทั่วไปการทดสอบหาปริมาณปรอทด้วยเทคนิคนี้จะมีปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากการทดสอบประมาณ 100มิลลิลิตรต่อตัวอย่างซึ่งมีผลทำให้เกิดสารพิษในสิ่งแวดล้อม ในขณะที่การทดสอบหาปริมาณปรอทด้วยเทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry ไม่มีขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่าง ปริมาณตัวอย่างที่ใช้มีปริมาณน้อยมาก (สูงสุดไม่เกิน 100 ไมโครกรัม) และการทดสอบเป็นแบบทำลายในระบบปิดและมีระบบดูดซับไอของเสียที่เกิดขึ้นและทำให้อยู่ในสภาพที่ไม่เป็นอันตรายและง่ายต่อการจัดการ จึงอาจกล่าวได้ว่าของเสียเกิดขึ้นภายหลังการทดสอบด้วยเทคนิค Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเทคนิค Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry ทั้งแง่ของปริมาณและความรุนแรงของพิษ

### 5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และ

เทคโนโลยีแห่งชาติ (Coordinating Center for Thai Government Science and Technology Scholarship Students (CSTS) National Science and Technology Development Agency (NSTDA)) ปี พ.ศ. 2557 คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยงานผู้ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณเป็นอย่างดีสูงมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อธิบดี รองอธิบดี ผู้อำนวยการโครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม และหัวหน้ากลุ่มงานสิ่งแวดล้อมกรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความอนุเคราะห์และคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์กับโครงการวิจัยเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณผู้ร่วมงานทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้โครงการนี้ประสบผลสำเร็จและบรรลุเป้าหมายตามที่วางไว้

### 6. เอกสารอ้างอิง (Reference)

- [1] กระทรวงอุตสาหกรรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548. *ราชกิจจานุเบกษา*. 2548, 123 (ตอนพิเศษ 11 ง), 14.
- [2] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, US EPA. (2007), EPA Method 7471 B: *Mercury in solid or semisolid waste (Manual cold-vapor technique)*, pp.11.
- [3] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, US EPA. (2007), EPA Method 7473: *Mercury in solid and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry*, pp.17.
- [4] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, US EPA. (1994), EPA Method 7470 A : *Mercury in liquid waste (Manual cold-vapor technique)*, pp.6.